

文章编号:1001-7372(2015)05-0001-65

## 中国隧道工程学术研究综述·2015

《中国公路学报》编辑部

**摘要:** 为了促进中国隧道工程学科的发展,系统梳理了各国隧道工程领域的学术研究现状、热点前沿、存在问题、具体对策及发展前景。首先在总结中国隧道工程建设历程和现状、技术发展与创新的基础上对未来隧道工程的发展趋势进行了展望;然后分别从钻爆法、盾构工法、沉管工法、明挖法和抗减震设计等方面对隧道工程设计理论与方法进行了系统梳理;进而从不同工法(钻爆法、盾构工法、TBM、沉管工法、明挖法)的角度对隧道施工技术进行了详尽剖析;最后从运营通风、运营照明、防灾救灾、病害、维护与加固等方面对隧道运营环境与安全管理进行了全面阐述,以期隧道工程学科的学术研究提供新的视角和基础资料。

**关键词:** 综述;隧道工程;设计理论与方法;施工技术;运营环境;安全管理

**中图分类号:** U45

**文献标志码:** A

## Review on China's Tunnel Engineering Research: 2015

Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*

**Abstract:** In order to promote the development of China's tunnel engineering subject, the academic research status, hot issues, existing problems, correspondent countermeasures and development prospects about tunnel engineering at home and abroad were analyzed systematically. Firstly, China's tunnel engineering construction history and status quo, technology development and innovation were summarized and the development trend of tunnel engineering in the future was introduced. Secondly, tunnel engineering design theory and method were investigated systematically: drilling and blasting method, shield method, immersed method, cut and cover method, and anti-seismic and shock absorption design. Then from the aspect of different methods (including drilling and blasting method, shield method, TBM, immersed method, and cut and cover method), tunnel construction technology was dissected in detail. Finally, based on operation ventilation, operation lighting, disaster prevention and rescue, disease, maintenance and reinforcement, tunnel operation environment and security management were elaborated. This paper is supposed to provide new perspectives and basic data for academic researches on tunnel engineering subject.

**Key words:** review; tunnel engineering; design theory and method; construction technology; operation environment; security management

# 索引

|                      |      |
|----------------------|------|
| 0 引言 .....           | (2)  |
| 1 隧道工程建设成就与展望 .....  | (2)  |
| 1.1 建设历程 .....       | (2)  |
| 1.2 建设现状 .....       | (3)  |
| 1.3 技术发展与创新 .....    | (4)  |
| 1.4 展望 .....         | (5)  |
| 2 隧道工程设计理论与方法 .....  | (6)  |
| 2.1 钻爆法 .....        | (6)  |
| 2.2 盾构工法 .....       | (9)  |
| 2.3 沉管工法 .....       | (12) |
| 2.4 明挖法 .....        | (14) |
| 2.5 抗减震设计 .....      | (18) |
| 3 隧道施工技术 .....       | (21) |
| 3.1 钻爆法 .....        | (21) |
| 3.2 盾构工法 .....       | (24) |
| 3.3 TBM 隧道修建技术 ..... | (27) |
| 3.4 沉管工法 .....       | (31) |
| 3.5 明挖法 .....        | (33) |
| 4 隧道运营环境与安全管理 .....  | (37) |
| 4.1 运营环境 .....       | (37) |
| 4.2 防灾救灾 .....       | (45) |
| 4.3 病害 .....         | (48) |
| 4.4 维护与加固 .....      | (48) |
| 5 结 语 .....          | (51) |

## 0 引言

随着社会经济水平的持续发展和人们对生活质量要求的不断提高,中国的交通运输及工程建设规模与数量在总体上呈现出不断增长的趋势。隧道作为地下通道的工程建筑物,具有某些其他工程无法比拟的优势,因此也呈现出了非常明显的增长趋势,具体表现为里程数不断增加,特长和长大隧道以及大规模隧道群不断涌现,以隧道方式跨越水域的工程日益增加。隧道作为交通运输线路上的工程结构物,具有重大的社会、经济效益。特别是在山岭地区可克服地形或高程障碍,改善线形,缩短里程,节省时间,减少对植被的破坏;在城市可减少地面用地,对疏导交通起到积极的作用;在江河、海峡和港湾等地区,可不影响水路通航,提高舒适性,增加隐蔽性且不受气候影响。由此可见,隧道建设对于交通的发展起着积极的促进作用。随着隧道工程领域相关研究的不断深入,新工法、新技术、新结构等不断涌

现,隧道工程建设如火如荼;然而,迄今为止学术界缺乏对整个隧道工程领域学术研究成果的系统总结和梳理。为了促进中国隧道工程学科的发展,充分发挥《中国公路学报》在公路交通行业中的学术引领作用,本刊编辑部特约请了隧道工程领域的专家、学者 20 余人,在分析行业发展现状和趋势的基础上,围绕隧道工程设计理论与方法(钻爆法、盾构法、沉管法、明挖法、抗震设计)、隧道施工技术(钻爆法、盾构法、TBM、沉管法、明挖法)、运营环境与安全管理(运营通风、运营照明、防灾减灾、病害、维护与加固)等主题,论述各国该领域的学术研究现状、热点、存在问题、具体对策及发展前景,以期为中国隧道工程学科的学术研究与发展提供参考和借鉴。由于资料、水平有限,加之时间仓促,该综述还不够系统和完善,对一些问题分析的深度和广度还不够,敬请广大读者批评指正。

## 1 隧道工程建设成就与展望(山东大学李术才老师提供初稿)

### 1.1 建设历程

纵观世界公路隧道修建史,中国古人早在汉朝就开凿了世界上第 1 条人工隧道——石门隧道,之后历代陆续有用于交通、灌溉和军事用途的小规模土洞和岩洞出现,相续衍生于秦驰道、汉丝绸之路、唐宋御道以及明清官道的华夏交通网络中。直至 20 世纪上半叶中国公路发展仍举步维艰,清末和北洋政府时期是中国公路的萌芽阶段。中国第 1 条公路是 1908 年在广西南部边防兴建的龙州至那堪公路<sup>[1]</sup>,长 30 km,随后广东、湖南、福建、江苏等省相继修建公路,建有邕武公路、龙州至水口公路、长沙至湘潭公路等,至 1927 年全国公路通车里程仅  $2.9 \times 10^4$  km。民国时期,公路开始纳入国家建设规划阶段,至 1936 年公路通车里程约  $11.73 \times 10^4$  km。抗日战争时期,公路发展缓慢,总里程增长至  $13 \times 10^4$  km,截止到新中国成立前夕,能通车的公路里程也仅为  $7.5 \times 10^4$  km,全中国仅有十几座公路隧道用于低等级公路穿山越岭,最长不超过 200 m,但铁路隧道有 200 多座,总延长近 90 km,最长的约 4 km<sup>[2]</sup>,如滇缅铁路碧鸡关隧道、大转弯隧道、密马龙隧道等,但整体建设水平和质量较为落后,至今几乎全部废弃。

新中国成立后,公路开始在中华大地迅速延伸,1950~1952 年国民经济恢复时期新建公路 3 846 km,全中国通车里程近  $13 \times 10^4$  km。1953 年第 1

个五年计划开始实施,这是中国公路的稳步发展阶段,通车里程增长了1倍,举世闻名的川藏、青藏公路于1954年通车。但在五十年代中国仅有公路隧道30多座,总长约2 500 m,且单洞长度均较短,六七十年代干线公路上修建了一些超过百米的隧道,主要用于低等级公路穿山越岭。“大跃进”和国民经济调整时期,公路数量急剧猛增,成鹰、宝成、川黔、渝厦、福温、沈丹、潍石等国家干线公路相继建成,至1965年底中国公路通车里程已达 $51.4 \times 10^4$  km。十年动乱期间,中国公路建设仍有发展,10年增长了 $10 \times 10^4$  km,其中不乏有打浦路水下隧道和挂壁公路郭亮隧道等亮点工程,分别长达2.761 km和1.25 km。到1978年,全中国公路通车总里程超过 $89 \times 10^4$  km,次年公路隧道达375座,通车里程52 km,隧道建设规模和数量有所增长,主要出现在省道和国道公路上,诸如河南S229省道的愚公洞隧道和向阳洞隧道等。

十一届三中全会以后,公路交通建设变得更为迫切,1985年中国公路总里程历史性的突破百万千米,但交通功能亟待改善,高速公路进入国人视野,隧道工程建设进入前所未有的高峰期。1984年,中国第1条高速公路——沈大高速公路开工,高速公路建设如火如荼,公路隧道工程越来越多,代表性工程有深圳梧桐山隧道、福建马尾隧道和甘肃七道梁隧道等。至1990年底,中国已建成十余座千米级隧道,福建鼓山隧道成为中国第1座现代化公路隧道<sup>[3]</sup>。“九五”期间新建隧道504座,27.8万延米,高速公路总里程于1999年突破了 $1 \times 10^4$  km,跃居世界第4位,至1993年公路隧道通车里程137 km(683座),均以二级以下的短隧道为主,发展至2000年达627 km(1 685座)。2001年末中国高速公路通车里程达到 $1.9 \times 10^4$  km,跃居世界第2位,至2007年底已建成公路隧道总里程2 555 km,先后涌现出成渝环线高速中梁山隧道(3.16 km)、沈海高速大溪岭隧道(4.116 km)等一批特长或宽体扁坦隧道工程,面临的修建环境和地质条件越发艰难,隧道工程建设和营运技术空前复杂。

进入21世纪以来,中国公路隧道年均增长率高达20%,且有逐年加快的趋势,仅前十年公路建设年均隧道里程就高达555 km,隧道建设与营运技术得到了长足发展。先后建成了沪蓉高速华蓥山隧道(4.706 km)、二广高速雁门关隧道(5.235 km)、福银高速美荻林隧道(5.580 km)、沪渝高速方斗山隧道(7.605 km)和秦岭终南山公路隧道(18.02 km)

等一批标志性特长隧道工程。其中,秦岭终南山公路隧道已成为中国目前运营最长的公路隧道。

目前,中国已成为世界上隧道工程建设规模最大、数量最多和难度最高的国家,这不仅体现在隧道长度、埋深和断面尺寸的增长上,建设难度和技术创新也达到了空前的高度,各种新材料、新工艺等不断涌现。随着中国公路交通路网不断向崇山峻岭、离岸深水延伸,越来越多的隧道工程将修建在高海拔、强风沙、高温高寒环境和高应力、强岩溶区域,包括越江跨海等水下隧道,亟需发展新材料、新工艺、新方法和新技术,为未来几十年公路隧道工程建设的持续发展提供重要的技术支撑。

## 1.2 建设现状

公路隧道的发展得益于高速公路的建设。2011年以来,公路隧道年均净增已超过1 000 km,至2014年底,中国已有公路隧道12 404座,总长10 756.7 km。2010~2013年公路隧道总里程与座数增长率分别为46.7%和35%,远超过公路本身的增长率<sup>[4]</sup>,且于2012年其年均建设里程超越铁路隧道,具体见图1。在很长时期内,公路隧道的建设规模和数量远不及铁路隧道。进入新世纪后,公、铁隧道建设速度稳步增长,且在2008年左右均进入快速增长期,公路隧道建设里程于2012年超越铁路隧道,目前总里程已超过 $1 \times 10^4$  km,涌现出一大批具有开创性和示范功能的隧道工程<sup>[5-7]</sup>。

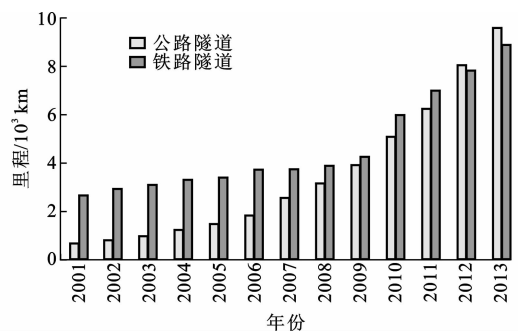


图1 中国公路、铁路隧道建设里程增长情况  
Fig. 1 Growth of Chinese Highway and Railway Tunnel Construction Mileage

在沈大高速公路扩建期间,2004年建成的金州隧道成为中国第1座单洞四车道公路隧道,最大开挖宽度达22.482 m。深圳雅宝隧道<sup>[8]</sup>和广州龙头山隧道分别是中国第1条双洞八车道公路隧道和最长大跨度高速公路隧道,后者的最大开挖面积达229.4 m<sup>2</sup>,于2008年建成通车<sup>[9]</sup>。福建万石山隧道-钟鼓山隧道是中国第1座地下立交互通隧道,由7条隧道组成隧道群,于2008年全部建成通车,这

是地下立体互通设计理念的大胆尝试,在隧道扁平度和埋深方面均有了较大突破<sup>[10-11]</sup>。福建的金鸡山隧道是当时跨径最大的高速公路双连拱隧道,单洞净跨 18.198 m,连拱隧道总跨度达 41.498 m,于 2010 年建成通车<sup>[12]</sup>。福建弄尾隧道为单洞四车道,宽度达 21.9 m,是中国开挖断面最宽的公路隧道,于 2011 年通车<sup>[13]</sup>。西藏嘎隆拉隧道是中国最后一条通县公路——墨脱公路的控制性工程,其坡度达 4.1%,是中国坡度最大的公路隧道<sup>[14]</sup>。四川雅克夏雪山隧道海拔 4 300 m,是中国目前已通车海拔最高的公路隧道,青海长拉山隧道则是世界上在建海拔最高的公路隧道,出口海拔达 4 493 m<sup>[15-16]</sup>。青海鄂拉山隧道是世界上在建最长的高原冻土双洞公路隧道,知亥带隧道则是同类隧道中海拔最高的,进口海拔 4 462 m,这 2 座隧道分别于 2011 年和 2013 年开工建设。陕西的羊泉隧道和唐家塬隧道分别是中国最长和断面最大的黄土隧道,前者长 6.146 km,后者最大断面达 172.4 m<sup>2</sup><sup>[17-18]</sup>。广东牛头山隧道横截面积可达 243.5 m<sup>2</sup>,是中国横截面积最大的单向四车道公路隧道,于 2013 年建成通车。河南红专路矩形顶管隧道断面高 7.5 m,宽 10.4 m,于 2014 年 12 月建成通车<sup>[19-20]</sup>。上述工程的出现极大程度上刺激了中国隧道建设水平的飞速提高,在项目规划、勘测设计、施工建造以及运营管理多个方面取得了重大突破,使得公路隧道建设技术水平达到了前所未有的高度<sup>[21]</sup>。

此外,水下隧道建设发展蓬勃,越来越多的城市交通急需修建大量的河底、湖底、江底和海底隧道(图 2)。中国第 1 条水下隧道是 1970 年建成的打浦路越江隧道,2009 年建成的浏阳河隧道是当时世界埋深最浅的河底隧道,暗挖段河床下覆土厚度仅 14 m,风险极高<sup>[22-23]</sup>。厦门翔安隧道是中国第 1 条海底隧道,全长 8.695 km,于 2010 年建成通车<sup>[24]</sup>。安徽的方兴湖隧道是中国最宽的湖底隧道,左右跨度净跨 16.45 m,于 2012 年主体竣工<sup>[25]</sup>。江苏瘦西湖隧道主体盾构段长 1 275 m、直径 14.5 m,下穿瘦西湖,是世界上直径最大的单洞双层公路隧道,于 2014 年 9 月建成通车<sup>[26]</sup>。此外,在武汉、南京、上海等地修建了大量的江底隧道,引入了 TBM、盾构等施工技术,极大程度地促进了水下隧道建设和运营水平的提高<sup>[27]</sup>。

中国水域面积辽阔,内陆水域面积达  $17.47 \times 10^4$  km<sup>2</sup>(长江、黄河、珠江等七大水系),辽东湾、渤海湾等海湾水域面积超过  $0.5 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,越来越多

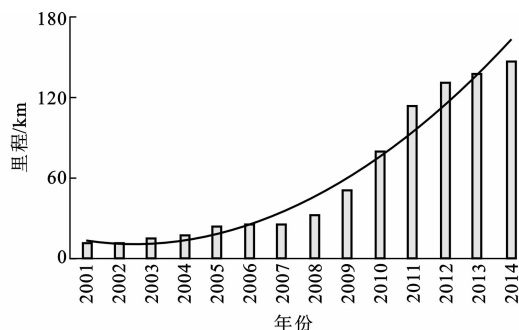


图 2 中国水下隧道建设里程增长曲线

Fig. 2 Growth Curve of Chinese Underwater Tunnel Construction Mileage

的城市交通建设需要修建水下隧道。目前,运营最长的水下隧道是狮子洋隧道,长度为 10 800 m。中国正在规划未来 30 年内建设包括穿越渤海湾、琼州海峡、台湾海峡等在内的 5 条世界级海底隧道工程,近百座跨越江河湖泊的水下隧道即将投入建设。因此,中国水下隧道建设方兴未艾,任重而道远。

### 1.3 技术发展与创新

#### 1.3.1 勘测与设计水平不断提高

近年来,随着复杂地质条件下大埋深和长洞线隧道工程的不断增多,工程勘察综合利用了遥测遥感、多点高频物探、GIS、GPS 等技术,不仅提高了勘测效率,也大幅提高了控制精度的等级。设计技术方面引入了 BIM 技术,隧道设计逐步重视交通和建造艺术的双重功效,在隧道扁平度和埋深方面均有较大突破,涌现出一批新型隧道结构形式,诸如分岔隧道等,并形成了地下立体互通的设计理念,立体交叉广泛应用于公路、铁路隧道和地铁中,如长沙营盘路湘江隧道。

#### 1.3.2 隧道施工技术的发展

中国大部分地铁隧道采用浅埋暗挖法,包括部分公路、铁路隧道,尤其是浅埋山岭隧道与水下隧道。钻爆法施工长期主导中国隧道工程施工技术,推进了中国设备的信息化和自动化进程,针对开挖和支护流水线作业,先后自主研发了液压凿岩台车、挖装机、自动机械化喷射混凝土设备、拱架安装机、移动栈桥、模板台车等一系列装备,极大提高了工作效率。

盾构、TBM 掘进机长期以来依赖国外引进,但近年来以中铁装备为代表的中国厂家已实现了中国盾构和 TBM 的自主制造,占据了中国大部分市场,在地铁工程中广泛应用,并于 2014 年成功实现了超前地质预报装备的搭载。在大量工程实践中,不断创新了单护盾 TBM 和敞开式 TBM 技术,解决了

TBM在软弱地层掘进脱困与市区沉降控制技术中的难题,形成了超浅埋、大宽度、小净距矩形顶管技术与盾构始发、到达零覆土技术,在甘肃引洮7号隧洞、重庆轨道交通6号线等工程中成功应用,创造了多项世界纪录。

### 1.3.3 隧道工程防灾和减灾技术的进步

隧道地质灾害主要包括突水突泥、岩爆、大变形和高瓦斯。突水突泥灾害源的定位定量预报技术取得了较大突破,尤其是对含水构造的静储量的估算,灾害预测预警尝试建立以微震为载体的多元信息综合预报预警系统,以实现灾害源动补给水量和涌水量的预测预警,该技术已在成兰铁路跃龙门隧道进行了现场试验。对于大规模突水突泥灾害的治理,涌现出了一系列新型注浆材料及配套工艺、装备,初步解决了高压大流量动水封堵与富水破碎岩体加固的技术难题,如江西吉莲高速莲花隧道大规模破碎带突水突泥的治理。大变形问题在乌鞘岭隧道中极为突出,在兰渝铁路、沪蓉西高速等诸多工程中也有出现,其具有变形速率快、总变形量大和持续时间长等显著特点,实际施工中主要从开挖工法、支护措施等方面进行改进,诸如采用深孔锚杆、钢管混凝土等,但尚未从根本上解决该问题。锦屏引水隧洞施工中遇到了强烈的岩爆灾害,主要采用导洞释放应力,掌子面洒水等措施进行预防,监测预警主要依赖微震技术,对应力型岩爆具有一定效果,整体来讲岩爆灾害的防治仍处于被动状态。

### 1.3.4 隧道工程结构新材料与运营管理的进步

以防排水材料、衬砌混凝土材料以及反光材料为代表,隧道结构新材料及工艺不断涌现,诸如喷涂速凝型防水材料、高性能防腐混凝土、自发光材料等。隧道风险监控方面发展了无线智慧感知及可视化技术,研发了隧道结构健康快速检测车,提出了等效节能照明理念,并以秦岭终南山公路隧道为应用示范工程,突破了长大隧道防灾救灾和通风照明技术的难题,采取竖井送排式纵向通风方式,每座隧道洞内设置3处特殊照明带,缓解驾驶疲劳。整体来讲,隧道工程运营管理仍需向精细化、信息化和智能化方向继续发展。

## 1.4 展望

隧道将成为人类“上天入地”的重要探索途径,未来的隧道工程将面临空前复杂的地质条件和施工环境,呈现出长洞线、大埋深和大断面的发展趋势,复杂地层及深部地层高应力和强渗透压导致的岩爆、突水突泥等地质灾害愈演愈烈,钻爆法、TBM施

工等面临着空前严峻的技术挑战。

### (1) 隧道全寿命与结构耐久性设计

隧道传统设计方法主要包括经验类比法、荷载结构法、地层结构法和信息反馈法,主要侧重结构的安全,在围岩荷载、水压力取值以及岩体破坏机理方面缺乏突破性进展,且较少涉及运营期的管理、维护等问题,诸如防排水系统维护更换、运营期突涌水等。同时,在投资上存在重建设期、轻运营期的现象。针对复杂及深部地层的隧道工程,急需建立考虑结构耐久性的隧道全寿命周期设计方法,将空间三维结构、物料特性、工艺设计与全寿命周期管理融为一体,实现高应力和高渗压作用下隧道结构的定量设计,开发耐腐蚀和耐疲劳等超高性能的混凝土材料,以适应复杂地层和深部地层的特殊地质环境和运营要求,并制定相应的标准和规范,使隧道在设计 and 建造阶段就充分考虑到全寿命的使用性能和要求。

### (2) 隧道精细化勘测与地质预报

隧道勘测将向精细化和大数据方向发展,逐步借助遥感、北斗卫星定位系统等技术,结合多点频物探、高速地质钻机以及水位地质资料信息进行大数据分析,形成天、地、空三位一体化大数据分析平台,提高勘测的精度和效率。隧道施工过程超前地质预报,在传统TSP、地质雷达等基础上发展可实现含水构造定位定量预报的复合式激发极化和全空间瞬变电磁技术,汲取地质素描、物探钻探动态信息,进行多元信息的联合反演,实现掌子面前方含水构造的定位预报(100 m)、水量估算(40 m)。同时,关注钻孔雷达与跨孔电阻率CT技术,使得预报技术能“深入腹地、精细窥探”钻孔周围30 m范围含水构造的空间展布和赋存形态。

### (3) 岩溶隧道灾害预测预警与控制技术

富水断层、充水溶洞等含水构造定位定量预报是岩溶隧道施工面临的首要难题,突水突泥灾害预测预警则是灾害控制的核心难题。通过综合物探技术圈定灾害源区域位置,发展以微震为载体的突水前兆多元信息实时监测方法与综合预警技术,通过含水体补给通道的微震定位推测最大补给水量,预测突水量量级,对隔水阻泥结构进行实时监测,获取内部通道微破裂信息与外部力场等多元监测信息,进行大数据挖掘与实质融合,发展基于前兆多元信息综合预警阈值的突水预报预警装备与技术,对于突水灾害远程监控与临灾预警具有重要的工程价值。对于已探明的重大灾害源,需综合考虑地下水

资源保护与灾害处置效果,以及充水溶洞等含水构造的防排堵截决策模型,形成灾害协同治理的基本原则与方法。针对突水突泥、大体积坍塌等地质灾害,急需突破高压大流量突水封堵与富水破碎岩体坍塌治理难题,发展具有早高强和抗分散功能的堵水加固一体化注浆材料及配套工艺、装备,并关注大型溶洞的充填技术,发展新型充填材料及配套支护结构体系,为岩溶隧道地质灾害防治提供技术支撑。

#### (4) 水下隧道建设关键技术

越来越多的河底、江底和海底隧道即将投入建设,其覆盖厚度和路线选址异于山岭隧道,水下隧道设计需更多考虑超高水压条件下结构的防排水和防腐寿命,急需研究强渗流和施工扰动双重作用下衬砌结构的动态演化破坏机理,并着重研究地震、火灾等对深水长线隧道结构设计的影响,突破现有隧道设计理念。建设方面,水下隧道面临深水不良地质预报和精细化勘察的难题,需突破钻爆法或掘进机穿越浅覆土层、陆域流沙层、海域风化槽等不良地层的施工关键技术。运营方面,应加强对衬砌结构健康监测与运营安全管理的研究,尤其是发生火灾时的预警救援与应急逃生,实现复杂地质条件下高水压、大断面海底隧道施工与运营的安全管理。

#### (5) 复杂及深部地层大型掘进机施工关键技术

为适应隧道工程的长大深发展趋势,TBM、盾构等大型掘进机将面临诸多设计和施工难题,尤其是越来越大的断面尺寸,超大型掘进装备的设计与制造成为中国国产化装备的重大突破方向(直径大于17 m)。超大型掘进机动力传递、突变载荷顺应性设计、导向纠偏等关键设计难题的进一步研究也刻不容缓。针对掘进机穿越浅覆土层、软硬岩交接、岩溶区等特殊地段,需突破硬岩地层刀具磨损、软岩地层卡机以及突水突泥、岩爆等灾害发生时机械脱困、护盾等技术难题。发展TBM搭载激发极化等预报装备,在线实时监测感知围岩——机械系统信息技术,突破大型掘进装备施工自动化、多样化、高适应性以及智能化发展的技术难题也是下一步的研究方向。

#### (6) 岩爆与大变形灾害预测预警与控制技术

岩爆(冲击地压)是典型的深部工程灾害形式,在岩质坚硬的地层尤为突出。大量现场岩爆记录表明爆破对岩爆发生的强度和频次有直接影响,当前的研究主要集中于开挖后瞬间发生的岩爆,对时滞性岩爆尚无太多讨论。在当前综合超前地质预报、微震等新型监测技术的基础上,应加强对岩爆预测方法的研究,从多个角度出发探讨具有广泛适用性

的岩爆综合防治技术体系;同时,还应关注防岩爆型支护结构的研究,尤其是具有缓冲压力和一定弹性能力的初喷混凝土材料,发展高应力区钻爆法施工的防岩爆型支护结构和掘进机施工的护盾技术,突破深部岩体工程岩爆预测预警和防治关键技术也是重要的研究方向。深部岩体大变形具有强流变、难支护的显著特性,尤其是深部岩体的分区破裂化现象和特殊岩质的持续流变特性引发一系列极具挑战性的支护难题,导致工程围岩坍塌、冒顶等重大灾害。此外,硬岩大变形是高地应力区深部工程特有的一种灾害形式,但尚未引起足够重视。针对当前研究对大变形的共性认识和尚需验证的争议点,还应进一步探讨岩体由浅层转入深部后岩体力学性能急剧变化带来的支护理念和支护技术、工艺等方面的革新,尤其是深部分区破裂对支护的要求,重点关注钢管混凝土支护体系、六肢格栅及其他新型支护结构形式,研究大变形控制标准和支护设计的技术难题,突破深部地下工程岩体大变形预测预警与防治关键技术。

## 2 隧道工程设计理论与方法

### 2.1 钻爆法(山东大学李术才、李利平老师,长安大学陈建勋、罗彦斌老师提供初稿)

钻爆法也称钻孔爆破法,是通过钻孔、装药、爆破开挖岩石的方法。

最原始的岩石破碎是先用锤击岩石,然后根据热胀冷缩的原理,用木材烧热岩石,随后再用冷水浇淋,造成岩石碎裂。随着黑火药在军事上的发展使用,1627年Kasper Weinde首先在匈牙利使用黑火药进行了矿山岩石巷道的爆破,爆破法第1次应用于隧道工程施工<sup>[5]</sup>。1863年,意大利Sommineller发明了风动凿岩机,风钻开始应用到隧洞开挖中。同时,火药也被做成药卷状使用,1857~1870年,欧洲修建的仙尼斯铁路隧道,长12 235m,就是采用这种开挖方法。风动凿岩机的发明,使隧道钻爆技术产生了巨大的突破。1870年,欧洲修建长14 912m的圣哥达隧道时,隧道钻爆技术更趋进步,该隧道掘进速度创造了日进7.3 m、月进171 m的记录。

经过100多年的发展,钻爆法的施工方法得到了迅猛发展,先后出现了喷锚支护、控制爆破、新奥法等技术,使得隧洞施工迈向全断面、大断面、机械化、高效率的发展方向。

#### 2.1.1 设计理论

经过多年的基础工程建设和研究,采用钻爆法

施工的隧道及地下工程结构设计理论正逐步形成一门完善的学科理论。到目前为止,结构设计的发展大致经历了如下几个阶段:古典压力理论、弹塑性力学理论、新奥法理论、能量支护理论等。

#### 2.1.1.1 古典压力理论

古典压力理论认为在支护结构上覆盖的重力是其压力的来源,其代表有 Haim 理论、Rankine 理论和金尼克理论、Terzaghi 理论和普氏理论。但是这种理论没有考虑围岩自身的承载能力,由于早期地下工程埋置深度不大,此种理论曾一度被认为是正确的。通过近几十年的研究,隧道所处位置地应力垂直分量的实测结果表明,地应力垂直分量常常并不等于上覆盖层重力的量值,两者往往有很大差异,该理论逐渐被人们所怀疑。

#### 2.1.1.2 弹塑性力学理论

弹塑性力学是固体力学的 1 个重要分支,是研究弹性和弹塑性物体变形规律的 1 门科学。1678 年,Hooke 提出了弹性体的变形和所受外力成正比的定律;19 世纪 20 年代,法国的 Navier,Cauchy 和 De Saint Venant 等建立了弹性理论;1864 年,Tresca 提出了最大剪应力屈服条件;Mises 提出形变屈服条件,Prandtl 和 Reuss 提出了塑性力学中的增量理论;Fenner 和 Kastner 分别推导了弹塑性理论公式。

#### 2.1.1.3 新奥法理论

新奥法是应用岩体力学理论,以维护和利用围岩的自承能力为基点,采用锚杆和喷射混凝土为主要支护手段,及时进行支护,控制围岩的变形和松弛,使围岩成为支护体系的组成部分,并通过对围岩和支护的量测、监控来指导隧道施工和地下工程设计施工的方法和原则。

Rabcewicz 最早把新奥法思想应用于奥地利阿尔卑斯山深埋硬岩隧道建设,采用柔性支护旨在充分利用“拱效应”——地层的自承能力<sup>[28]</sup>;20 世纪 60 年代中期,Muller 把新奥法应用于城市地铁软岩(土)隧道,认为新奥法用于硬岩隧道和软岩(土)隧道开挖时应有所区别;1964~1969 年 Rabcewicz 提出了岩石压力下隧道稳定性的理论分析,强调采用薄层支护,并及时修筑仰拱以闭合衬砌的重要性,根据试验证实,衬砌应按剪切破坏进行设计计算。

中国在 20 世纪 70 年代引入新奥法,并得到迅速推广,取得了良好的技术经济效果,在软岩(土)隧道新奥法施工中,提出了既全面又科学的“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的十八字

诀<sup>[29]</sup>,避免了照搬硬岩隧道新奥法经验的弯路。

#### 2.1.1.4 能量支护理论

1975 年 Salamon 提出了能量支护理论,认为支护结构与围岩相互作用、共同变形,在变形过程中,围岩释放一部分能量,支护结构吸收一部分能量,但总能量没有变化,因而,其主张利用支护结构的特点,使支架自动调整围岩释放的能量和支护体吸收的能量,支护结构具有自动释放多余能量的功能。不足之处在于该理论发展尚不够成熟,很难用于指导实践。

#### 2.1.1.5 其他理论

为了解决隧道开挖和支护的稳定性问题,各国提出了多种控制理论:日本山地宏和樱井春辅提出了应变控制理论;于学馥等<sup>[30]</sup>在 1981 年提出了“轴变理论”和“优系开挖控制理论”;陆家辉<sup>[31]</sup>通过对新奥法支护理论进行总结,提出了“联合支护基础”理论,注重“先柔后刚、先挖后让、柔让适度、稳定支护”;郑雨天<sup>[32]</sup>提出了锚喷-弧板支护理论,认为联合支护理论先柔后刚的支护形式为“钢筋混凝土弧板”;He<sup>[33]</sup>提出关键部位耦合组合支护理论,认为巷道破坏主要由于支护结构与围岩在强度、刚度上不耦合造成的。

施工过程力学最早于 20 世纪 80 年代初期由朱维申提出,是以钻爆法隧道工程的施工过程(开挖与支护的时间和空间顺序,即时空效应)为研究对象,强调施工过程对围岩稳定状态的影响,通过深入研究施工过程对围岩稳定性的影响与锚固效应的准确评价方法,采用科学的方法提出设计和施工方案的优化原理,为寻求最佳的开挖和布锚等施工方案提供理论依据<sup>[34]</sup>。

#### 2.1.2 设计模型

目前有关隧道衬砌结构的计算方法有“荷载-结构法”和“地层-结构法”2 种理论,与其相对应的计算模型分别为荷载-结构模型、地层-结构模型。

##### 2.1.2.1 荷载-结构模型

荷载-结构模型的设计原理为,隧道开挖后地层的作用主要是对衬砌结构产生荷载,而衬砌结构应能安全可靠地承受地层压力等荷载的作用。隧道支护结构的承载能力极限状态计算,可以采用传统的综合安全系数法(破损阶段法),也可以采用基于结构可靠度理论的分项安全系数法。计算时先按地层的类别计算出地层压力,然后再按弹性地基结构物的计算方法计算隧道衬砌内力,内力求出后再进行结构截面的设计。20 世纪 80 年代中期,以概率论



数理统计为基础的可靠度分析方法开始应用到隧道结构设计的研究中。

#### 2.1.2.2 地层-结构模型

地层-结构模型设计理念是将隧道衬砌和地层看成是整体共同受力的统一体系,在满足变形协调条件的前提下分别计算衬砌与地层的内力,并据此验算地层的稳定性和进行结构截面设计。与荷载-结构模型相比,地层-结构模型充分考虑了地下结构与周围地层的相互作用,结合具体的施工过程可以充分模拟地下结构以及周围地层在每个施工工况下的结构内力以及周围地层的变形,更符合实际工程。

地层-结构模型的计算方法可分为解析法和数值法。其中解析法只适用于均匀介质中的圆形隧道,且只能计算若干典型工况,一般采用收敛-约束法、特征曲线法或剪切滑移破坏法。除简单边界条件的圆形洞室有较严格的解析解外,其他断面形状的洞室可采用有限元法或其他数值方法计算弹性、弹塑性或粘(弹)塑性的隧道地层结构。

##### (1) 解析法

解析法主要是采用复变函数积分变换法、复变函数法、分离变量法、变分法等对围岩应力变形进行计算求解,具有精度高、速度快等优点<sup>[35]</sup>。1956 年 Tumei 最早提出了解析法求解围岩应力变形问题;Panet<sup>[36]</sup>,Unlu 等<sup>[37]</sup>根据三维有限元弹性分析法得出了 LDP 拟合公式;Basarir 等<sup>[38]</sup>,Abdel-Meguid 等<sup>[39]</sup>采用三维有限差分法探究了理想弹塑性围岩开挖面的空间效应。由于周围地层以及地层与结构相互作用模拟的复杂性,地层-结构法处于发展阶段,在很多工程应用中,仅作为一种辅助手段。不过随着今后的研究和发展,地层-结构法将会得到广泛应用和发展<sup>[40]</sup>。

##### (2) 数值法

随着计算机技术的迅猛发展,各种数值计算方法越来越多地被应用到围岩稳定性的分析中,主要使用的方法有有限元法(FEM)、边界单元法(BEM)、离散单元法(DEM)、拉格朗日单元法以及块体理论等,或是上述几种方法的耦合分析。

19 世纪 60 年代,有限元法最早被用于隧道结构计算,目前仍是解决岩土工程最有效的数值方法<sup>[41]</sup>;边界元法最早由英国人 Bribbia 提出,其原理是将偏微分方程转化为边界积分方程再离散为代数方程,求解未知量<sup>[42]</sup>;离散元法最早由 Cundall 提出,是分析物质系统动力学问题的强有力的数值方法,既能反映岩体之间接触面的滑移、分离和倾覆等

大位移,又能计算岩体内部的应力和位移分布,进行颗粒行为的模拟和分析<sup>[43]</sup>。

由于本构模型和物理参数等诸多方面的原因,数值模拟仿真得到的数据虽然很难作为设计的准确依据。但是,数值计算将随着计算机技术的发展和岩石及土力学问题的逐步解决,越趋于准确和完善,在以后的隧道设计中必将成为一种重要的设计和验证方法<sup>[44]</sup>。

#### 2.1.3 设计方法

钻爆法隧道施工的设计方法主要有工程类比法、荷载-结构法、地层-结构法、信息反馈法、综合设计法和针对地震荷载的抗震设计法 6 种。

##### 2.1.3.1 工程类比法

工程类比法又称经验法,是将拟建工程的地质结构状况与已建成工程的地质结构状况进行类比,综合分析以确定拟建工程破坏面的各项参数指标<sup>[45]</sup>。近几年,这种方法在国内外得到了普遍的运用,可以针对不同的围岩类别及地质情况,直接定量地给出与隧道设计有关的围岩压力和应采取的支护措施和类型,提高隧道设计和施工的效率。

围岩分级从 Terzaghi 最早提出发展至今,分类方法有上百种之多。从最初以单一指标分类,到以多项指标分类,再到以多种因素组合分级,围岩分级在各国工程实践中不断完善。随着勘探测量技术、监控量测技术和岩石力学的发展,围岩分级逐渐从以主观经验定性描述,向经验定性描述和定量指标相结合对围岩进行综合评价的分级方法发展,并将继续发展成为以定量分析为主。目前世界上比较著名的围岩分类方案有:奥地利的 MATM 分类法、前苏联的普氏系数法、Barton 的 Q 系统法、Deer 的 RQD 分类法等<sup>[46]</sup>。

在目前的钻爆法隧道工程中,工程类比法应用较为普遍,理论体系发展迅速,但是还存在一定的不足和局限性,致使有些工程设计不合理,技术措施不当,易造成工程事故或安全隐患,因此,应加强和重视钻爆法隧道工程的经验积累,建立隧道数据库和专家评判系统。

##### 2.1.3.2 信息反馈法

随着新奥法的应用,作为新奥法施工三大技术手段之一的监控量测,其地位显得尤为重要。通过监控量测,现场监控得到的信息可以及时、准确地反馈给施工和设计部门,实现隧道的动态管理,使开挖方式及支护结构的设计更符合现场实际情况,同时也能够更好地适应复杂多变的地质环境和各种不同



的施工工艺及手段。

信息反馈方法可以通过现场数据来反演隧道围岩的物理力学参数,并以此来评价围岩的稳定性,此种方法发展迅速且已日趋成熟,尤其是在软弱或者断层破碎带围岩中的应用尤为重要;但是,监控量测信息反馈法也存在一些问题,除需要有较完备的测试仪器和现场量测工作较为复杂外,量测数据的分析和反馈计算成果的判断,仍然依赖专家的经验。

#### 2.1.3.3 综合设计法

由于围岩性质复杂,加之施工水平和管理水平的差异,不可能通过某种单一方法得出非常可靠的结论,因此目前在进行地下结构设计时,广泛采用以经验类比、数值计算和现场实测信息反馈相结合的综合设计法。同时还需研究更加完善的用于地下结构计算的力学模型,以便能更好地考虑结构与地层的共同作用,逐步减少“综合设计”中的反馈修正工作。结合国内外钻爆法修建隧道的现状,设计主要以工程类比为主,结构计算为辅。

#### 2.1.4 设计参数

隧道工程的设计计算参数与初始地应力场、岩体力学和施工因素有关,尽管随着计算机技术的推广和岩土介质本构关系研究的发展,地下结构的数值计算方法有了很大的进步,但是隧道工程的设计计算参数还是难以准确获得。

在进行隧道衬砌结构设计计算时,围岩的抗力系数  $K$  是1个极为重要的参数,反映了围岩与衬砌共同作用时围岩所能分担的荷载<sup>[47]</sup>。目前,抗力系数的取值通常是通过设计经验获得或者规范查得,具有很大的主观性,中国研究者对围岩抗力系数进行了一系列理论及试验研究,如:钱令希<sup>[48]</sup>考虑隧洞的天然节理裂隙及爆破开挖产生的爆破裂缝区,提出了基于弹性理论的抗力系数计算公式;蔡晓鸿<sup>[49]</sup>基于统一强度理论,在不同计算模型的基础上得出了有压隧道围岩抗力系数的计算公式。

在进行隧道施工过程数值模拟计算时,为了模拟掌子面的空间支护效应,多采用应力释放法进行分析,而释放荷载参数的选取对计算结果有重要影响。于学馥等<sup>[50]</sup>提出了采用释放系数模拟隧道的施工过程;孙钧等<sup>[51]</sup>论述了采用释放荷载模拟隧道开挖的有限元计算步骤,并对隧道开挖面的空间效应进行了分析,采用广义虚拟支撑力法模拟开挖面的时空效应,进行了二维粘弹塑性分析;朱维申等<sup>[34]</sup>利用洞壁径向位移释放系数反映开挖面径向虚拟支撑力的释放;杨广安等<sup>[52]</sup>研究了围岩物理参

数对应力释放的影响。

由于对岩土材料的本构模型与围岩的破坏失稳准则认识不足,目前还很难获得准确可靠的设计参数。因此,理论计算获得的结果,一般只能作为设计的参考依据。

#### 2.1.5 小结

中国是隧道及地下工程建设大国,但还不是理论强国,许多现代设计理论的依据仍来自西方这一局面还未打破,设计模型、方法还有很多不足之处,数值分析软件开发的能力和国外相比仍然有很大的差距。除此之外,采用钻爆法施工的隧道,在设计中尚有许多其他问题有待研究,如:岩体初始地应力各相应力学特性参数的确定,数值解析计算中怎样反映施工方法及支护时机,怎样建立符合隧道动态设计的计算模式及分析方法等。这些问题的解决,仍有赖于隧道及地下工程理论的建立和完善。

### 2.2 盾构工法(北京交通大学袁大军老师提供初稿)

盾构工法主要是通过盾构及内部的土压力或者泥水压力与作业在开挖面上的土压力和水压力保持平衡的方法取得开挖面的稳定,同时使用坚固的盾构外壳支撑着隧道周边地层,在盾构内部进行开挖和衬砌的施工,通过重复这样的过程建造隧道的一种施工方法。盾构隧道设计主要包括管片设计,盾构选型及其始发到达井的设计,盾构的构造及设计等。

#### 2.2.1 盾构隧道管片选定及设计

盾构管片设计一般是通过容许应力设计法来进行的,主要依靠经验进行。极限状态设计法可以依据安全系数直接考虑荷载及材料的不均一性及不确定性,且已逐渐开始在盾构管片设计中应用。

盾构隧道的衬砌通常由一次衬砌与二次衬砌组成,其中一次衬砌是由管片在接头处通过螺栓连接而成的,二次衬砌是在一次衬砌内侧现浇混凝土而成。对于管片的设计,要根据不同的地质条件,选择合适的管片类型、接头方式,还需要按隧道的横断面方向及纵断面方向分别来进行设计。管片作为一次衬砌必须具备极强的密封防水性能。目前中国对于二次衬砌的设计及应用并不广泛,但其在修正偏离中轴、防水、防腐蚀、防震,抗浮加重及补强加固等方面都有极大的作用。

##### 2.2.1.1 管片类型、接头方式的选择

盾构隧道的管片按材质及形状分类,主要有钢管片、球墨铸铁管片、钢筋混凝土(RC)管片和复合型管片等。管片种类的选定必须充分考虑对象隧道

的用途及地基条件。这些种类的管片在工程中均已得到广泛应用,例如在武汉地铁越长江盾构隧道江中段联络通道中,钢管片可作为主隧道(柔性结构)与联络通道(刚性结构)的连接部位<sup>[53]</sup>;球墨铸铁管片<sup>[54]</sup>具有管壁薄、韧性好、强度高、耐腐蚀等优点,这种新型材料也将逐渐应用盾构隧道建设中;南京长江隧道采用了钢筋混凝土平板型预制管片。

管片接头方式包括对接方法与紧固方法。管片对接方法主要有全面对接式、部分表面对接、键式、搭接式以及凹式等,紧固方法主要有直螺栓、弯曲螺栓、斜螺栓、贯通螺栓以及榫头连接等。何川等<sup>[55]</sup>对比分析了直螺栓、斜螺栓和弯螺栓在全面对接式管片的抗弯性能和承载能力。

#### 2.2.1.2 管片结构设计

通常情况下,管片断面需要按相对于横断面方向的设计来决定。根据设计条件,在已确定荷载作用下,选择一种适当的计算方法,对管片截面进行内力计算及校核。管片截面内力计算是管片设计的核心内容,其主要的计算方法有惯用法、修正惯用法、多铰接环法以及梁弹簧模型方法等。

惯用计算法是将管环作为与管片有相同刚度的刚性均一的环,忽略管片接头的存在来评价管片的,而修正惯用法引入了抗弯刚度的有效率及弯矩的增减率2个参数,计算结果比惯用法更接近实际。多铰接环法是将管片作为铰接来进行评价。梁弹簧模型法是将管片主断面作为梁进行模型化处理,将管片接头作为回转弹簧进行模型化处理,将环接头作为抗剪弹簧进行模型化处理的方法。

近年来,有许多新的计算方法提出,例如朱伟等<sup>[56]</sup>围绕盾构衬砌管片的设计,提出了一种新的壳-弹簧设计模型;苏宗贤等<sup>[57]</sup>提出了在地层-结构模式下的壳-弹簧-接触计算模型;彭益成等<sup>[58]</sup>提出了壳-接头模型。

#### 2.2.1.3 管片防水设计

根据防水材料的不同,管片防水方法可分为防水板(膜),混凝土防水和橡胶等密封材料防水。

防水板(膜)一般用于复合衬砌防水,防水层设于一次支护与二次模注之间。杨其新等<sup>[59-60]</sup>对喷膜防水技术进行了研究;常炳阳等<sup>[61]</sup>通过试验考察了丙烯酸盐喷膜防水材料的性能;朱祖熹<sup>[62]</sup>分析了喷涂聚脲防水涂料的防水机理以及其在施工上的优势。

管片自身防水性能主要是依靠高抗渗等级(>P8)的防水混凝土来实现的。王育江等<sup>[63]</sup>对混凝土

衬砌进行研究;陈月顺等<sup>[64]</sup>采用透水法研究了混凝土抗渗性能的影响因素;刘杰胜等<sup>[65]</sup>认为参入有机硅可有效改善水泥混凝土的防水抗渗性能;李厚祥等<sup>[66]</sup>研制出一种适用于隧道衬砌的自密实防水混凝土(WPSCC)。

橡胶防水是盾构隧道的主要防水措施之一,可分为三元乙丙弹性橡胶密封垫、遇水膨胀橡胶止水条以及两者复合型止水条,主要通过胶条间的挤压来达到防水效果。向科等<sup>[67]</sup>提出了盾构隧道管片弹性密封垫断面的主要设计参数;朱祖熹<sup>[68]</sup>认为中国宜采用多孔、特殊断面弹性橡胶密封垫和遇水膨胀橡胶的复合型式;朱伟等<sup>[69]</sup>通过试验证明三元乙丙弹性橡胶具有良好的长期防水性能;刘建国<sup>[70]</sup>得到了遇水膨胀橡胶在空气中与水中随时间的发展规律。

#### 2.2.2 盾构的构造、设计与选型

##### 2.2.2.1 盾构主体设计

盾构主体设计主要包括盾构外径、长度的设定以及盾尾密封。

盾构的外径是由管片外径加上壁后注浆间隙与盾尾钢壳的厚度来决定的。决定壁后注浆间隙大小的要素主要有盾尾的变形量、土水压力下管片的变形量、管片的倾斜、管片外径的容许误差等。盾尾钢壳的厚度,可以按照所产生的土水压力进行设计。盾构的长度是左右盾构推进时灵敏性的重要因素,长径比是评价盾构长度的主要指数之一。

盾尾密封应具有耐压性、耐久性、对拼装的管片之间产生错缝的追踪性,以及破损更换时的易操作性。为此开发出了以金属刷为材料的密封技术,现已广泛应用在盾构中,同时也有许多其他材料的盾尾刷不断出现在工程当中。李奕等<sup>[71]</sup>设计的新型盾尾刷压紧板采用弧型结构,很大程度上克服了传统盾尾刷存在的问题,减少了盾尾泄漏现象。在盾构掘进过程中必须要解决盾尾刷更换问题,赵新合等<sup>[72]</sup>在江底高水压条件下采用冷冻法止水,对盾尾刷进行改造并改进其更换的技术。

##### 2.2.2.2 盾构刀盘刀具的设计

刀盘的设计必须要根据结构强度、耐久性、机械性和土质条件等因素来确定。刀盘按正面形状分主要有面板式和辐条式两种,其对应的地层条件,适用的盾构机种也不同。刀具由钻柄及刀刃所组成,主要种类有滚刀、切刀、先行刀、周边刮刀、仿形刀等。刀具和刀盘构成了盾构的掘进机构。

同一时间刀盘刀具磨损程度应尽量相近,为了

能够高效、快速地进行掘进,需要对刀盘刀具的布置进行一定的试验和理论分析。王飞等<sup>[73-74]</sup>等从理论上探究了切桩刀具的选型、适应性设计和布置方法,表明切桩宜采用零后角负前角、双面刃的贝壳刀,并提出了超前贝壳刀的立体布局方案以及分次切筋的切削理念。

#### 2.2.2.3 盾构其他部分的构造与设计

盾构还需要对推进机构、铰接机构、管片拼装置(举重臂)、后配套台车、附属装置、以及特殊装置进行设计。盾构是一种隧道掘进的专用工程机械,现代盾构集机、电、液、传感、信息技术于一体,这就要求盾构各部分构造之间必须要相互协调运作,这也是盾构安全掘进的必要条件之一。

#### 2.2.2.4 盾构选型

盾构选型是盾构法隧道能否安全、环保、优质、经济、快速建成的关键工作之一,所选的盾构形式应尽量减少辅助施工法确保开挖面和适应地层条件。

盾构选型主要是根据地层的渗透系数、颗粒级配、地下水压等因素决定的。通常,当地层的渗透系数小于  $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,可以选用土压平衡盾构;当地层的渗透系数在  $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间时,既可以选用土压平衡盾构也可以选用泥水式盾构;当地层的透水系数大于  $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,宜选用泥水盾构。根据地层的颗粒级配进行选型时,黏土、淤泥质土适用土压平衡盾构进行掘进,砾石粗砂适用泥水盾构进行掘进,粗砂、细砂可使用泥水盾构,经土质改良后也可使用土压平衡盾构。以地下水压进行判断依据时,当水压大于 0.3 MPa 时,适宜采用泥水盾构。在实际工程中,盾构选型还需要综合考虑经济、安全等因素。

在北京站至北京西站地下直径线工程<sup>[75]</sup>中,其地层渗透系数大于  $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,采用了泥水盾构;在大连市地铁2号线<sup>[76]</sup>施工中,其土体渗透系数处于  $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在土压泥水盾构都可行的情况下,选用了土压平衡盾构;在广州地铁2号线<sup>[77]</sup>施工中采用了盘形滚刀和标准割刀组合布置刀盘的复合盾构;在杭州地铁<sup>[78]</sup>盾构选型时从工程设计条件和土层渗透性来分析,土压平衡盾构和泥水平衡盾构均可,但从施工工期和经济因素等方面考虑,土压平衡盾构较为适合。

#### 2.2.3 开挖面稳定

开挖面稳定是盾构工法设计中需要考虑的主要因素之一。对于不同盾构机,其维持开挖面稳定的理论与措施也不尽相同。

泥水平衡盾构在特殊地层的泥水压力以及泥膜的形成较难控制,中国有许多学者在这两方面做了大量的研究。袁大军等<sup>[79-84]</sup>进行了室内盾构掘进泥水劈裂模型试验和现场泥水劈裂试验,以研究劈裂伸展现象及其力学机制。研究表明泥水劈裂伸展的力学特性不仅与地层性能有关,而且与所选用的泥浆特性有关,为盾构开挖面稳定性研究提供了坚实有力的理论依据。为保证开挖面的稳定,泥水盾构泥水舱中的泥浆必须在开挖面上形成微透水的泥膜,将部分泥浆压力转化为有效应力,泥浆压力才能平衡地层中的土压力和水压力。闵凡路等<sup>[85]</sup>对不同性质的泥浆开展渗透试验,结果表明泥浆压力将会在地层中转化为抵抗地层静水压力的孔压、超静孔隙水应力和抵抗地层土压力的有效应力;魏代伟等<sup>[86]</sup>指出泥膜的形成时间是影响泥膜能否有效支护开挖面稳定的重要因素。

在土压平衡盾构方面,戴仕敏<sup>[87]</sup>进行了大直径土压平衡盾构开挖面稳定性控制研究,其成果已成功应用于上海外滩通道工程和迎宾三路隧道新建工程;徐长胜等<sup>[88]</sup>研究了在粘土卵石地层中开挖面稳定性问题。

#### 2.2.4 盾构掘进控制设计

##### 2.2.4.1 盾构掘进参数控制

盾构掘进参数的控制对保证掘进的效率和掘进过程的稳定有很重要的作用。其中掘进参数与地质条件往往具有一定的对应关系,可以利用掘进参数的变化规律和趋势对盾构隧道状况做出正确判断。

苏州轨道交通2号线穿越老城区,地下水位较高,透水性强,袁大军等提出了盾构通过时的地表沉降控制标准,并给出了掘进速度、浆液材料组成与配比、注浆量及注浆时机的控制标准;潘庆明<sup>[89]</sup>通过盾构掘进参数分析,得到了硬岩段及地层转换时施工参数的变化规律;肖超等<sup>[90]</sup>依托长沙市南湖路隧道工程,对盾构穿越地层裂隙密集带掘进参数进行了控制。

##### 2.2.4.2 盾构掘进姿态控制

盾构的姿态控制是盾构掘进中的一个重要环节。盾构姿态控制的基本原则是以隧道设计轴线为目标,偏差控制在设计范围内,同时在掘进过程中进行盾构姿态调整确保不破坏管片。

在南京长江隧道<sup>[91-92]</sup>施工中,合理控制了大直径盾构的掘进姿态。与小直径盾构相比,大直径盾构若在推进过程中偏离设计轴线或姿态不良,造成的后果会更为严重,此工程设计经验成功应用于扬

州瘦西湖隧道、南京地铁10号线大盾构越长江区间、广深港高铁益田路隧道和深港隧道等国家省市级重大工程项目中。王晖等<sup>[93]</sup>提出了影响复合地层盾构掘进姿态的主要因素和控制措施。龚国芳等<sup>[94]</sup>基于模糊PID的控制策略为盾构失准问题的进一步解决提供了理论基础和现实依据。

### 2.2.5 小结

随着国家经济发展,对越江跨海隧道的需求将越来越大。越江海隧道由于其独特的不受气候影响、通行能力稳定和抵抗战争破坏强等特点,日益发展为城市、地区、甚至国家之间的重要连接手段和交通命脉。但是越江海隧道具有水压高、地质条件复杂、距离长等特点,一旦建设中发生事故,或是运行中出现应对灾害能力不足的情况,都将带来不可估量的损失;因此,揭示高水压越江海长大盾构隧道安全和正常运行的科学规律,建立确保高水压越江海长大盾构隧道安全以及正常运行的理论和分析方法,从而形成高水压越江海长大盾构隧道建造、运行安全以及健康服役的控制理论迫在眉睫。

### 2.3 沉管工法(同济大学丁文其老师提供初稿)

沉管隧道是指将若干个预制段分别浮运至现场,逐段沉放在水中事先开挖好的沟槽中,在水中拼装连接,其后辅以相关工程施工,使这些管节组成的连接体与两端陆域通道相连,形成水下隧道型的交通运输或输水的结构载体<sup>[95]</sup>。

沉管隧道的历史可追溯到19世纪初期,Wyatt和Hawkins于1810年在伦敦泰晤士河首次尝试修建沉管隧道<sup>[96-97]</sup>。1885年西特奈湾的自来水管工程和1894年美国波士顿下水管线工程的原理与如今的沉管隧道工法基本一致<sup>[98]</sup>。1910年美国人成功应用沉管法建成的跨越美国与加拿大之间的底特律河铁路隧道被誉为历史上第1条真正的大型沉管隧道<sup>[98]</sup>。1928年建成的美国波西隧道是第1条钢筋混凝土沉管隧道;1941年建成的荷兰马斯河隧道首次采用矩形断面钢筋混凝土管节<sup>[99]</sup>;20世纪50年代以后,随着科学技术的进步及施工经验的增长,沉管施工技术难题逐步被克服,成为修建跨越河流和海湾隧道的常用技术。到目前为止,中国、美国<sup>[100]</sup>、荷兰<sup>[101]</sup>、丹麦、挪威、日本<sup>[102]</sup>等20多个国家已建成了100多条沉管隧道<sup>[103]</sup>。

目前世界上已建成的沉管隧道中,总长度最长的是美国旧金山海湾地区的快速运输系统(Bay Area Rapid Transit System, BART),共5 825 m,由58节管节组成;单节管节最长的隧道是荷兰的海姆斯

普尔隧道,最长管节长达268 m,宽21.5 m,重达50 000 kN;管节最宽的隧道是比利时的压珀尔隧道,宽达53.1 m,全长336 m;荷兰的德赫特隧道,为双向四车道,是迄今为止车道数最多的隧道之一;瑞典的利尔杰霍尔姆斯维肯隧道的最大水深达50 m;美国纽约东63街隧道环境条件很差,海水流速非常急,达 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;比利时的斯海尔德隧道,河水流速 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,潮位差很大。此外,在世界范围内已建成的大型沉管隧道工程还有厄勒海峡(Oresund)、韩国釜山巨济(Busan-Geoje)、土耳其Bosphorus海峡沉管隧道<sup>[104]</sup>等,这些工程的成功建设均为大型跨江越海通道的建设提供了新思路<sup>[105-106]</sup>。

沉管隧道在中国的发展起步较晚,香港是中国沉管隧道的发源地,20世纪70年代起,相继修建了5条沉管隧道,包括1972年建成的跨港隧道、1979年建成的港湾隧道、1990年建成的东区隧道、1996年建成的西区铁路隧道和1997年建成的西区公路隧道<sup>[107-108]</sup>。中国大陆已建成的沉管隧道主要有1994年建成的广州珠江沉管隧道、1995年建成的宁波甬江沉管隧道、2002年建成的宁波常洪沉管隧道、2003年建成的上海外环沉管隧道和2006年建成的广州仑头-生物岛-大学城沉管隧道;在建的有天津海河隧道、广州洲头咀隧道、舟山沈家门隧道、广东省佛山东平隧道和港珠澳跨海桥隧工程等;正在筹划阶段的有潮海海峡跨海通道和台湾海峡隧道等<sup>[109-112]</sup>。中国得天独厚的地理地貌和水域特点,具有大力发展沉管隧道工程,推进地域间联系与合作的巨大优势,大量沉管隧道工程必将在21世纪的中国建成。

#### 2.3.1 沉管管段设计

目前常用的矩形钢筋混凝土沉管隧道的横断面多为多孔箱形框架,沉管隧道一般纵向较长,而横向尺寸较小,计算时可沿纵向截取一单位长度的管节,按弹性地基上平面应变状态的闭合框架进行计算,弹性地基一般按照温克尔弹簧地基考虑,地基系数根据基础处理的砂垫层(或碎石基础压浆垫层)的特性及开挖基槽的地质情况,采用分层法来计算。纵向分析计算的另一个关键问题是对接头的模拟,以往均是将其处理成刚接或者铰接,但均与实际存在一定的差距。

在几何设计方面,黎宝松<sup>[113]</sup>、陈韶章等<sup>[114]</sup>等总结了珠江沉管隧道设计的经验,刘千伟等<sup>[115]</sup>总结了宁波市常洪沉管隧道工程的设计经验,胡政才

等<sup>[116]</sup>、Gokce 等<sup>[117]</sup>、Zhang 等<sup>[118]</sup>对国外的沉管设计经验进行了总结提炼。

在结构分析方面,万晓燕等<sup>[119]</sup>利用有限元法对沉管隧道的纵向、横向以及局部等3个部分进行了考虑沉船荷载、列车荷载(单、双线)、温度作用等因素下结构的计算与分析,并总结了结构反应的特点;彭海阔等<sup>[120]</sup>采用2种不同类型的单元分析其对沉管隧道结构计算模型有效性的影响,并结合试验进行了验证;陈海军<sup>[121]</sup>对沉管隧道主体结构设计的管段分节、起浮与干舷、抗浮、结构强度及连接技术等方面进行了论述,提出了各部分的设计思路、影响因素、计算方法和关键技术;张易谦等<sup>[122]</sup>从大型沉管混凝土裂缝控制技术的角度进行了理论和实践的针对性分析;陆元春等<sup>[123]</sup>介绍了多向预应力混凝土管段的设计要点、计算分析和主要结论;刘霁等<sup>[124]</sup>利用 ANSYS 有限元软件对沉管隧道管段进行了内力三维有限元分析;陈鸿等<sup>[125]</sup>阐述了管段横断面设计、浮力设计、静力计算以及计算参数的取用和相关控制要求;李荣高<sup>[126]</sup>总结了上海外环越江沉管隧道大体积矩形混凝土管段制作的裂缝控制技术。

### 2.3.2 防水与接头设计

沉管隧道的管节接头应满足以下要求:①水密性要求,即在施工和运营各阶段均不漏水;②接头应具有抵抗各种荷载作用和变形的能力;③接头的各构件功能明确,价格适度;④接头的施工性好,施工质量易于保证,并尽量做到能检修。管节接头根据接头型式可分为刚性接头、半刚半柔性接头、半刚性接头和柔性接头。刚性接头通过水下浇筑混凝土方式形成,其接头刚度与沉管管节本体结构基本一致。半刚半柔性接头的主要部件有:端钢壳、GINA 止水带、OMEGA 止水带、波形钢板连接件、水平剪切键及垂直剪切键等。半刚性接头一般由以下部件组成:端钢壳、GINA 止水带、连接钢板、接头槽钢筋混凝土等。柔性接头的主要部件有:端钢壳、GINA 止水带、OMEGA 止水带、预应力钢索、水平及垂直剪切键等。

管节接头是沉管隧道的重要部位,同时也是薄弱部位,其结构强度和刚度相对混凝土管节而言更加脆弱。接头的受力特性和隧道的防水能力有直接关系。柔性接头的防水一般采用 GINA 止水带加 OMEGA 止水带双层组合的方式,但实际上接头防水主要还是依靠布置在接头断面外侧的 GINA 止水带,OMEGA 止水带仅作为二次止水元件用来增

加止水的可靠性。GINA 止水带能很好地适应管节不均匀沉降所产生的变形,具有良好的止水效果,其缺点是出现问题以后无法进行修复和替换,而 O-MEGA 止水带则可以拆卸更换。GINA 止水带作为柔性接头密封防水的首道防线,其工作状态是反映接头结构寿命和沉管隧道止水安全性能的关键。

依托在建的港珠澳大桥沉管隧道工程,同济大学在接头力学理论模型构建、解析表达式推导、大比例尺力学性态及变形试验和接头渗漏水原位检测技术等领域开展了相关研究工作,取得了如下成果:刘鹏等<sup>[127-129]</sup>在考虑管节接头力学特性的基础上提出了相应的力学模型及其参数确定的系列方法;萧文浩等<sup>[130]</sup>对港珠澳沉管隧道进行了大比例尺管节接头压弯试验研究;禹海涛等<sup>[131]</sup>在此基础上提出了相应的力学模型及解析表达式;徐晓扉等<sup>[132]</sup>采用红外监测法对接头可能发生的突发渗漏水进行了模型试验研究。

各国学者也对此进行了较多研究工作,长安大学谢永利教授团队就节段接头剪力键破坏状态与机理开展了相应研究,利用 ANSYS 三维有限元进行了相应的分析研究<sup>[133-134]</sup>。庄道庆<sup>[135]</sup>从构造、原材料使用、施工等方面介绍了沉管隧道的防水技术。唐英等<sup>[136-137]</sup>对沉管隧道接头的设计与理论计算进行了阐述,结合双框箱形截面沉管隧道中间接头的具体情况,提出了较为通用的中间接头设计方案,并在此基础上,对接头中的五大部件——端钢壳、GINA 止水带、OMEGA 止水带、水平及竖直剪切键、欧米加部件提出了较为详尽的设计和计算方法。陆明等<sup>[138]</sup>针对沉管隧道管段防水性能进行了一系列试验,包括了应力-压缩变形试验、水密性试验等,试验结果可为类似的大型沉管隧道管段接头的试验、设计、施工提供借鉴。刘千伟<sup>[139]</sup>根据常洪沉管隧道管段接头的构造形式和功能要求,介绍了接头2道止水带的选型依据和安装工艺,描述了接头其他构造如剪切键等的制作方法,分析了常洪沉管隧道最终接头的施工方法。黄帆<sup>[140]</sup>基于橡胶材料本构模型、Mooney-Rivlin 二参数应变能函数公式和蠕应变率方程建立数学模型进行数值模拟分析,并对比水密性试验,依据计算得出的结果对 GINA 止水带的防水性能及耐久性作出判断,对实际工程具有指导意义。刘正根等<sup>[141]</sup>按平均水压法和接触应力法2种方法计算了保证 GINA 止水带水密性要求的最小压缩量,并在此基础上针对 GINA 止水带长期压紧状态下的松弛,提出了使用阶段 GINA 止水

带最小压缩量的计算方法,估算了GINA止水带的当前压缩水平和GINA止水带的剩余压缩量。陆明等<sup>[142]</sup>对建设中的港珠澳大桥工程岛隧标段中的沉管隧道工程作了详细介绍,并针对超深埋海底沉管隧道的管节接头与节段接头防水设计所遇到的一系列问题进行了深入探讨,重点阐述了GINA止水带、OMEGA止水带、中埋式可注浆止水带的防水技术。肖晓春等<sup>[143]</sup>介绍了采用接头井的形式实现最终接头的干地施工法。唐英等<sup>[136]</sup>提出了双框箱形截面沉管隧道中间接头的设计方案,并提出了端钢壳、GINA止水带、OMEGA止水带、水平及竖直剪切键、欧米加部件的设计计算方法。薛勇<sup>[144]</sup>论述了沉管隧道接头的功能、类型、特点和适用条件。潘永仁等<sup>[145]</sup>阐述了“止水板式”最终接头的原理。

### 2.3.3 抗震设计

沉管隧道是1种地下结构,其既符合一般地下结构的地震反应特点<sup>[146]</sup>,又存在一定的特殊性,主要表现在以下几个方面:①沉管隧道一般都修建在饱和的软弱地层中,在地震作用下可能会因砂土液化等造成不均匀沉降,对结构受力、接缝防水极为不利;②沉管隧道上覆土层厚度一般较薄,且为回填土,其对隧道结构的约束作用相对较小;③沉管隧道由于其重要性及在水下的特殊性,一旦破坏将产生灾难性的后果;④沉管隧道不同于一般的地下结构,受破坏后难于修复。因此,对沉管隧道进行抗震研究,进而设计出安全、合理的结构,以最大限度地减小和避免地震损失是十分必要的。

依托在建的港珠澳大桥沉管隧道工程,同济大学在超长沉管隧道整体抗震设计、接头抗震性态响应、土-结构耦合分析模型等领域开展了相关研究工作,取得了如下成果:刘鹏等<sup>[147]</sup>对隧道接头及止水带地震响应进行了分析;禹海涛等<sup>[148]</sup>阐述了超长沉管隧道抗震设计与分析中迫切需要解决的4个关键性问题;Yu等<sup>[149]</sup>对超长沉管隧道的地震响应进行了分析。

目前,常用于沉管隧道抗震分析的计算方法主要有:反应位移法、BART法、质点-弹簧法、设计反应谱法、动力有限元法等。反应位移法的基本原理是采用弹性地基梁来模拟地下线状结构物,把地震时地基的位移当作已知条件作用在弹性地基上,以求解在梁上产生的应力和变形。BART法针对地下结构的破坏特点,提出地下结构应具有吸收强变形的延性,并且不丧失承受静载的能力。质点-弹簧法模型主要用于弥补BART法的不足,BART法只

能求出地震波传播时地震波特性和不变情况下沉管隧道中产生的应力和应变,未考虑沿沉管隧道轴向地基的不均匀性而使地震力可能产生变化的情况。反应谱法认为地震时结构的位移最多等于周围地层的位移,从土体到结构的位移传递比取决于土壤和结构的刚度。动力有限元法将包含对象结构物在内的整个底层划分成有限元网格,使无限自由度问题转化为有限自由度问题,考虑边界条件以后,输入地震波,进行动力响应分析,从而得出每一时刻地层和结构物中的变形、应力和应变等。丁峻宏等<sup>[150]</sup>基于显式有限元和高性能计算上的大规模数值模拟仿真方法,建立了包括地基土、沉管隧道以及柔性接头在内的全三维分析模型,进行了大规模地震响应分析;严松宏等<sup>[151]</sup>采用田村重四郎和冈本舜三提出的沉埋隧道地震响应分析数学模型对南京长江越江隧道(沉管段)方案进行了地震响应的纵向受力分析;郭毅之等<sup>[152]</sup>提出了新的接触模型和算法,可将接触处理的CPU计算时间大大缩短;吴玖荣等<sup>[153]</sup>在质点-弹簧体系数学模型的基础上,提出了沉管隧道土体地震反应的离散化分析方法,并建议在实际使用中采用质点-弹簧体系的计算结果,辅以剪切波速传播理论的计算结果作为参考;韩大建等<sup>[154]</sup>提出了将行波法应用到刚度较大、分段较多的水下沉管隧道地震分析中的思路,并提出了把轴向、横向2个输入波处理成2个独立行波的方法。

### 2.3.4 防灾研究

相对地上公路隧道,沉管隧道和水下隧道由于其位置的特殊性,使其疏散救援、通风排烟和火灾扑救更加困难,因此中国学者在防灾减灾的设计与研究方面做了大量工作,以保证沉管隧道的安全运营。蒋树屏等<sup>[155]</sup>自主设计建立了高温烧蚀试验平台,针对沉管隧道特点,采用C50混凝土制备了局部1:1的结构试验构件,并进行了高温烧蚀试验;徐湃等<sup>[156]</sup>结合试验对沉管隧道火灾烟气蔓延特性进行了分析;王冲<sup>[157]</sup>对特长海底沉管隧道火灾应急救援进行了研究。相关研究对沉管隧道的防灾研究提供了有益的参考。

## 2.4 明挖法(北京工业大学张明聚、郭雪源老师提供初稿)

在无支护或支护体系的保护下,将隧道及上覆一定范围内的岩体逐层分块挖除形成基坑或沟槽,然后施作隧道衬砌结构或地下工程主体结构,最后回填上覆土,这种施工工法称为“明挖法”,明挖法施工的隧道称为明挖隧道。明挖法按照施工基坑的形



状主要分为敞口开挖和盖挖,敞口开挖分为放坡开挖和垂直开挖,盖挖可分为盖挖顺作、盖挖逆作、盖挖半逆作和多种支护形式、开挖方式相组合的方法<sup>[5]</sup>。明挖隧道主体结构的设计理念与其他工法施工的隧道设计相似,基坑工程是明挖隧道工程中的关键工序,基坑支护的设计计算是明挖隧道区别于其他工法施工的隧道设计的特色之处。

#### 2.4.1 明挖隧道基坑设计的主要内容

明挖隧道基坑按照边坡围护方式的不同,可以分为放坡明挖基坑、悬臂围护明挖基坑和围护结构加支撑明挖基坑。放坡明挖基坑设计主要关注基坑(边坡)的稳定性,包括整体稳定性的设计计算,以及对土层较差、地面超载较大、基坑较深的边坡的抗隆起、抗渗流稳定性和边坡变形的分析和评价。悬臂围护明挖基坑设计需要在此基础上考虑围护结构本身承载力的要求。围护结构加支撑明挖基坑设计是通过内支撑、锚索或锚杆等支撑方式给予悬臂围护结构约束作用,保证基坑稳定,控制基坑及周边变形,增加了对支撑体系的设计内容。总之,围护结构加支撑明挖基坑设计内容概括了明挖基坑支护设计的绝大部分问题,也是深基坑工程最常采用的支护形式。

#### 2.4.2 设计理论——土压力理论

在采用极限平衡法、地基反力法和杆系有限元方法来进行基坑支护设计时,全部或一部分土压力是以外力的形式施加到支护结构上的,设计是否正确、计算是否精确很大程度上取决于土压力理论的选择是否合理。

朗肯土压力理论和库仑土压力理论作为经典土压力理论的代表,一直为基坑支护设计大量采用。学者在此基础上进行了一系列改进,陆培毅等<sup>[158]</sup>在试验基础上建议了一种粘性土土压力分布形式。汤连生等<sup>[159]</sup>以地心引力为依据,提出了一种基于引力场的基坑坑壁土压力计算方法。李峰等<sup>[160-161]</sup>推导了考虑土体变形情况的有限土体土压力计算模式,并通过工程实例计算进行对比分析,提出了基坑工程中有限粘性土体土压力的计算方法,得出当有限土体宽度不大于坑深的75%时,宜采用有限土体土压力计算模式进行计算的结论;同时依据基坑支护工程的实际监测结果反演分析了基坑工程中主动土压力的时变特性,推导了土压力随时间变化的计算公式。金亚兵等<sup>[162]</sup>提出了建立在库仑土压力理论基础之上的简化计算方法——叠加法,推导并给出了非粘性土和粘性土在不同坡率和地面分布有荷

载条件下主动土压力系数和土压力的计算公式,提出了临界宽度的概念和土条土压力折减系数的计算公式。王洪亮等<sup>[163]</sup>通过对挡土墙与既有建筑基础间的有限土体进行完整的受力分析,考虑了既有建筑基础与有限土体间的法向及切向相互作用力,建立了求解有限土体主动土压力的计算公式,并进行了适当的简化。

有限元法在基坑支护设计领域的应用带动了土压力理论的发展,可通过建立弹塑性的接触单元、双线性的接触面本构模型、无厚度的 Goodman 接触面单元,采用数值计算方法模拟围护结构与土层间的摩擦特性等相互作用<sup>[164]</sup>。应宏伟等<sup>[165]</sup>建立了无粘性土中狭窄基坑刚性挡墙的有限元分析模型,研究了挡墙相对平移时不同宽度土体的被动滑裂面的分布规律,推导了被动极限状态下滑裂面倾角及被动土压力系数的解析公式,得到了被动土压力分布、土压力合力作用点高度的理论公式。有限元法的发展为研究挡土墙土压力问题提供了新的途径。

#### 2.4.3 设计模型

1987年,国际隧道协会将各国采用的地下结构设计模型归纳为荷载结构模型、地层结构模型、经验类比模型和连续介质模型<sup>[166]</sup>。

荷载结构模型又称为传统结构力学模型,以基坑的支护结构作为承载主体,周围地层提供荷载和支护结构的外部约束,通过普通结构力学方法解得结构的内力和变形。黄明琦等<sup>[167]</sup>针对厦门海底隧道明洞修筑后地基承载力不足引起的结构安全性问题,建立荷载结构模型,采用 ANSYS 结构分析软件对回填前后明洞结构变形、受力和安全性进行分析和评估,给出了结构安全系数,得出了在回填土自重荷载作用下结构安全性不够,回填前应进行地基加固的结论。宁茂权等<sup>[168]</sup>采用弹性支点杆系有限元法、荷载-结构二维均质弹簧有限元法、荷载-结构三维有限元法来分析盾构始发井的围护墙、支护结构体系和主体结构,解决始发井结构分析方法问题,指导完成了南京长江隧道盾构始发井结构设计。李新星<sup>[169]</sup>结合上海某邻近基坑开挖的运营地铁车站,运用叠加原理,采用有限元荷载结构法和强制位移法,分别按照裂缝控制和强度控制来对车站标准段结构的稳定性及其允许变形进行分析和反算。荷载结构模型概念清晰,计算简便,是中国基坑支护相关规范推荐的主要设计模型。

地层结构模型和连续介质模型可直接考虑地层承载能力,支护结构主要起到限制土层变形的约束



作用,体现了支护结构与土体的相互作用,分析计算较为复杂,一般要借助有限元、有限差分等数值计算软件进行。廖少明等<sup>[170]</sup>采用间接边界单元法推求基坑开挖位移场及其对邻近地铁隧道的影响,表明利用平面计算或监测的可靠数据推算基坑周边位移场是一个可靠途径。刘庭金等<sup>[171]</sup>分别采用三维流-固耦合数值方法、荷载-结构模式和分层总和法分析计算水位下降对隧道受力和变形状态的影响。薛莲等<sup>[172]</sup>将 FLAC 软件应用到重庆市某深基坑数值分析中,探讨了基坑开挖在极限状态下的破坏模式,分析了开挖对邻近建筑物的影响。朱小蓉<sup>[173]</sup>结合北京宋家庄地铁 3 号线换乘车站工程,采用了地层-结构模型分析了地铁平行换乘枢纽中后建车站施工对既有运营车站的影响。李昀等<sup>[174]</sup>分别采用二维环形墙等效弹簧刚度法、三维 m 法和三维连续介质有限元分析方法,对圆形围护结构的变形及内力进行分析计算,通过与实测的监测结果对比,认为三维连续介质有限元法能够综合考虑结构与土体的相互作用,从而较好地模拟基坑开挖引起围护结构的变形与应力、周围土体的变形。

荷载结构模型和平面连续介质有限元方法用于形状不规则基坑时,无法反映所有支撑结构的受力和变形状况。因而,对有明显空间效应的基坑和不规则形状的基坑有必要利用三维分析方法进行分析。目前,空间弹性地基板法和三维连续介质有限元方法已在一些基坑工程中得到了实际运用。

总之,基坑支护设计模型的建立往往不局限于一种模型的分析,对荷载结构模型、地层结构模型和连续介质模型的研究与应用逐渐穿插渗透、互补使用。以现有成功工程案例为依据(经验类比模型),结合荷载结构模型分析计算,并以数值模拟作为设计分析的检验手段,将各种模型灵活搭配使用是现今基坑支护设计广泛采用的模型选择方法。

## 2.4.4 设计方法

### 2.4.4.1 围护结构设计方法

基坑工程围护结构设计常用的方法包括极限平衡法、地基反力法和有限元法。

极限平衡法假定作用在围护墙前后的土压力分别到达被动土压力和主动土压力,在此基础上再作某些力学上的假设,把超静定的力学问题简化为静定问题求解。极限平衡法<sup>[175-176]</sup>包括等值梁法、静力平衡法、二分之一担法、太沙基法等。极限平衡法均采用荷载-结构模型,根据力的平衡原理求解围

护结构的内力和稳定性,是一种未考虑土与结构共同作用的近似计算方法,其力学概念明确、简单实用。

地基反力法认为围护结构是与侧向地层变形关联的结构,用压缩刚度等效的土弹簧模拟地层对围护结构变形的约束作用。该方法按照对地基反力假设的不同分为极限地基反力法、弹性地基反力法和复合地基反力法<sup>[177]</sup>,这些方法不同程度地考虑了桩与土之间的共同作用。地基反力法经历了由简化解析法向数值解法的发展,早期“山肩邦南法”、“弹性法”和“弹塑性法”等<sup>[178]</sup>假定围护结构后主动土压力是已知的,土层仍全部处于弹性阶段或可简单划分为弹性区和塑性区,对模型进行简化计算。邓子胜<sup>[179]</sup>提出了非线性共同作用弹性地基反力法,然后将神经网络引入深基坑位移反分析,研究了根据深基坑空间效应的表现形式及规律选取适当剖面进行位移反分析的原理与方法,编制了计算程序。邓子胜<sup>[180]</sup>将地基土的水平基床系数视为深度和围护墙位移的非线性函数,建立了作用于围护墙上土压力增量的计算模型,推导出了考虑非线性共同作用的弹性地基梁挠曲微分方程,给出了非线性共同作用弹性地基反力法的计算模型与求解方法。耿建勋等<sup>[181]</sup>建立了支护结构非线性土抗力模型,考虑由于开挖造成土弹簧刚度的软化,提出了模拟基坑开挖过程的支护结构分析方法,编制出非线性共同作用弹性地基反力法的计算程序,分析了 1 个实际基坑工程中各工况支护结构的受力与变形特征。耿建勋等<sup>[182]</sup>建立了一个非线性土抗力模型,基于此模型提出了一个考虑土-基坑支护结构非线性共同作用的弹性地基反力法,编制计算程序并分析了基坑工程实例中各工况支护结构的受力与变形。郭发忠等<sup>[183]</sup>采用弹性地基反力法进行杭州地铁某盾构区间风井围护结构优化设计,并分析了基坑施工过程中的施工监测情况。

有限元法是基坑围护结构数值分析的常用方法,把地基土在内的整个深基坑作为一个空间结构体系,可考虑开挖过程、支护结构与土共同作用、渗流、时间等因素的影响,综合分析支护结构的内力、变形及开挖引起的环境效应。谢凌志等<sup>[184]</sup>以某地铁站工程的大量现场监测资料为基础,基于位移反分析思想,利用三维有限元法对复杂地质条件的场地土参数进行反演,将反演所得场地土参数用于数值计算,得到了与实际监测数据基本吻合的地下连续墙位移变形值、临时钢支撑内力值等计算结果,验证了反分析方法的有效性。周传波等<sup>[185]</sup>建立支护

结构计算分析求解模型,应用有限元法、非线性规划方法、遗传算法、以及 MATLAB 语言编程等研究手段,对地铁深基坑的支护结构参数进行优化,建立了科学、合理的优化模型和优化软件,并据其选择相关支护结构参数,为地铁深基坑支护结构设计提供合理的依据。刘射洪等<sup>[186]</sup>根据弹性地基梁的计算原理和方法,应用有限元法中的加权余量法和杆系有限元法对其进行求解,并与数值模拟计算结果进行对比分析,验证了弹性地基梁法的实用性和局限性。由于参数取值困难,有限元法目前还难于直接在设计中应用,多用于重要深基坑工程的辅助设计和研究中。

#### 2.4.4.2 内支撑体系设计方法

基坑内支撑体系由围檩(冠、腰梁)、内支撑和立柱等构成。土压力产生的荷载经由围护结构传递给窄条形围檩结构,并最终由杆、线型的内支撑或锚索承担,立柱主要起到减小内支撑跨度和承担一部分内支撑自重的作用。

对围檩结构进行设计计算时,通常会将其简化为单跨或多跨连续梁,荷载以均布荷载的形式施加,内支撑视为固定或铰支座,采用结构力学的方法进行计算,支座处位移可通过地基反力法进行分析,围檩结构的分析方法与围护结构基本相同。围檩不是支撑体系主要承力结构,所以不作为支撑体系设计的重点,各国相关研究较少。

内支撑是支撑体系中的应力集中部位,其设计计算尤为重要。内支撑不与土层直接接触,其轴力通过围檩传递到围护结构,内支撑内力计算方法与土压力理论无关,涉及到单跨或多跨压杆稳定性的问题。工程中常用钢支撑的钢管直径为 600~800 mm,壁厚为 10~14 mm,属于薄壁钢管,经研究其失稳破坏的方式包括平衡分岔失稳、极值点失稳、跃越失稳<sup>[187]</sup>。关于薄壁壳屈曲失稳的问题学者们提出了小挠度理论、大挠度理论、欧拉公式等一系列分析方法,并进行了大量的理论研究<sup>[188]</sup>,由于各理论的薄壁压杆的稳定性承载力计算结果不够合理且过程复杂,难以应用于工程设计,基本上还是依据最大强度理论进行基坑钢支撑的设计,按钢管发生整体失稳来考虑。

内支撑是由多道支撑组合而成的整体系统,其安全性可由可靠度理论分析,胡强等<sup>[189]</sup>提出了深基坑内部支撑的功能函数,将内支撑体系简化为串联系统,运用几何法计算内支撑杆件可靠度。内支撑的刚度是描述支撑安全性的另一个指标,《基坑工

程手册》给出了规则基坑的刚度公式,但是对于异形复杂基坑支撑刚度未作详细说明。陈焘等<sup>[190]</sup>以上海某深大异形基坑为背景,提出了等效刚度算法,将异形基坑分块规则化,单独研究各单元刚度。郑刚等<sup>[191]</sup>以某环梁形式的水平支撑体系为典型,提出了考虑水平支撑设计荷载的冗余度评价指标,并指出在满足刚度的条件下合理增加传力路径来提高冗余度尤为重要。

#### 2.4.4.3 基坑稳定性设计方法

基坑稳定性分析可分为定性分析和定量分析,包括条分法、数值分析法、塑性极限法、可靠度法和模糊数学法等,其中基坑支护设计常采用的是条分法和数值分析法。

条分法是 1916 年瑞典人彼德森提出的,其中被广泛采用的包括瑞典圆弧法、简化 Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法和 Fredlund-Krahn 法等。条分法按照是否同时满足力和力矩平衡方程,可分为简化条分法和通用条分法。对于简化条分法,瑞典圆弧法完全忽略了土条间的相互作用,理论与实际情况相差悬殊,其计算结果与其他方法也相差较大,故逐渐被其他方法所取代;简化 Bishop 法虽然只满足了整体力矩和竖向力的平衡,但其迭代求解简单,圆弧滑动面的计算结果较好,在工程上应用依然较多。学者们通过引入新的数学方法,对条分法进行进一步研究工作,石林珂等<sup>[192]</sup>提出了一种新的深基坑稳定分析方法——等弧长条分法,并给出了公式推导过程,介绍了相应的可视化软件功能,给出了工程实例。罗晓辉等<sup>[193]</sup>应用 Sarma 所提出的扰动力概念与条分法相结合,建立了考虑条间作用力影响的土钉支护结构稳定性分析极限状态方程。刘鑫等<sup>[194]</sup>将不确定性分析法中的概率分析方法与失效分析方法相结合,构建单因素风险率、因素组合风险率、风险值的计算方法与步骤,对某车站基坑稳定风险值计算进行研究。惠趁意等<sup>[195]</sup>以极限平衡理论和土钉支护结构稳定性计算的条分法为基础,根据复合土钉支护结构和稳定性安全系数的关系假定滑动面为抛物线形,利用几何关系和积分法建立了最危险滑移面搜索模型,推导了稳定性系数的求解公式,并确定了滑移面几何控制参数与稳定性安全系数之间的函数关系。周勇等<sup>[196]</sup>基于圆弧滑动条分法,以内部整体稳定性安全系数作为目标函数并采用全局差分法建立灵敏度分析模型,研究设计参数与内部整体稳定系数及其灵敏度之间的关系,为深基坑工程中土钉加预应力锚杆复合土

钉支护结构的优化设计提供重要的依据,对今后土钉加预应力锚杆复合土钉支护设计提供了理论依据。

所有条分法的设计计算都是基于极限平衡理论,是通过求解静力平衡方程的方法进行的,差别在于各方法的安全系数的计算方法、适用范围和计算精度不同。滑面安全系数的计算是条分法设计的重要内容,搜索安全系数最小的可能滑动面尤为重要,常用的搜索方法包括:变分法,模式搜索法,数学规划法,随机搜索法,人工智能法等<sup>[197]</sup>。条分法无法分析稳定破坏的发生和发展过程,更无法考虑变形对土体稳定的影响,在理论层面存在较大缺陷,但分析计算过程相对简单,误差范围能满足工程需要。

有限元法能更好地反映边坡岩土体的应力应变关系,不受边坡几何形状和土体不均匀情况的限制,适于处理非线性、非均质和复杂边界等问题,是比较理想的分析土体应力、变形和稳定的手段。根据采用方法的不同,边坡稳定性分析的有限元法大体上可以分为基于滑面应力分析的有限元法和基于强度折减的有限元法 2 类。黄春娥等<sup>[198]</sup>提出有限元法与条分法相结合的新方法,采用条分法进行基坑边坡的稳定性分析,采用有限元法计算基坑周围的渗流场,求出作用于各土条上的渗流力并将其参与到稳定验算中。吴开辉<sup>[199]</sup>建立了考虑桩土共同作用的二维有限元数值模型,根据简化 Bishop 法和有限元强度折减法,对工程基坑采用放坡无支护开挖方式进行边坡稳定性分析,给出了不同工况下基坑边坡安全系数最小解。

有限单元法全面满足静力许可、应变相容和应力应变之间的本构关系,但其计算结果对计算模型、材料参数、求解方法很敏感。而极限平衡法已经积累了丰富的经验,使用的参数少,力学模型简单,可以快速得出结果,计算结果相对稳定。从基坑工程支护设计的需要角度来看,传统的条分法仍是评价土体稳定的首选方法,有限元法多作为验证条分法计算结果的辅助性方法。

#### 2.4.4.4 基坑变形控制设计方法

地表沉降和桩(墙)水平位移是围护结构强度控制的评价。

陈万鹏<sup>[200]</sup>在前人研究的基础上,较为系统地总结了坑外地表沉降曲线和围护结构侧向位移形态。杨茜等<sup>[201]</sup>采用“相似模型的长度与变形的时间成反比”的相似法则设计模型试验,研究了复合土钉支护的作用原理,表明复合土钉支护能够充分调

动周围土体共同作用,有效地控制基坑变形,复合土钉支护中止水帷幕的插入深度和强度对控制边坡变形与失稳有较大作用,为其设计和施工提供了参考依据。魏焕卫等<sup>[202-203]</sup>基于 Mindlin 应变解,推导出土质直坡和斜坡侧向与竖向变形的理论解,接着又基于弹性半无限体的 Mindlin 应变解首次推导出基坑边坡变形的理论解,利用该解研究了不同施工步数条件下基坑边坡侧向变形和竖向变形的规律,据此提出了边坡加固方法和施工措施。

#### 2.4.5 其他

明挖隧道多见于山区铁路、公路隧道明洞段,城市区间隧道和道路隧道、越江隧道的出入口段;其中城市区间隧道通常埋深较深,基坑变形控制要求更为严格,设计施工难度更大,故其基坑设计基本包括了其他形式明挖隧道的基坑设计的关键内容;但由于特殊地形地质条件和应用需求,山岭隧道设计需要注意以下问题:为了防止深路堑或隧道洞口高边坡上发生落石、塌方等危险,山岭隧道出入口段多建成明洞的结构形式,对明洞设计力求使回填土覆盖复原自然坡度并对地表恢复植被,以尽可能保护自然环境;回填土是为了缓冲落石对衬砌的冲击而设的,其厚度应视落石下坠的实际情况计算而定。

#### 2.5 抗减震设计(西南交通大学何川、耿萍、张景、晏启祥老师提供初稿)

中国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震断裂带发育成熟,是世界上最大的大陆浅源强震活动区。严重的地震灾害一直给中国基础设施造成严重的破坏,最近 30 年来的数次强震造成隧道结构严重破坏的事实,警示我们不能忽视当前隧道工程的抗震问题,应从既有隧道震害中吸取经验教训,采取切实有效的措施,把隧道抗减震设防理念和相应的设计方法贯穿到各类隧道的设计、施工和营运等阶段。专家学者们通过强震观测、震害调研、理论分析、试验研究和数值模拟等手段对隧道工程地震响应及抗震设计等领域进行了大量研究,取得了许多有益的成果。

##### 2.5.1 隧道震害

地震观测和震害调研被称为“最真实的原型试验”,能够真实反映特定工程地质条件下结构物的地震响应特征,受到人们的广泛关注。国外对于隧道及其他地下结构物地震观测和震害调研开展较早,樱井等人率先观测了日本长野县松代群发地震时地下管道的震害<sup>[204]</sup>;美国土木工程学会对 San Fernando 地震中地下结构的震害进行了调研<sup>[205]</sup>;

Dowding 等<sup>[206]</sup>统计了 71 座铁路隧道和水工隧道的震害情况,对隧道抗震效果与地震动参数的关系进行了研究;Owen 等<sup>[207]</sup>对不同类型地震波作用下隧道结构的变形模式进行系统研究;Sharma 等<sup>[208]</sup>对 85 个国家 78 次地震中的 192 个地下洞室震害实例进行了整理和分析,建成了当时最丰富的隧道震害数据库;日本土木工程学会通过对日本兵库县南部大地震中 100 多座各类隧道震害的调研,对隧道破坏特征及其影响因素进行了总结分析<sup>[209]</sup>;中国学者潘昌实<sup>[210]</sup>分析了日本、美国等地的数次大地震对隧道的破坏情况,总结出隧道震害与其影响因素之间的关系;台湾地区的王文礼等<sup>[211]</sup>对集集大地震中 57 座山岭隧道受损情况进行调研,分析了山岭隧道震害的影响因素及机理;何川等<sup>[212-214]</sup>对汶川地震震区内近 40 条干线公路上 24 座公路隧道震害进行了调研;李天斌<sup>[215]</sup>对汶川地震中山岭隧道的变形破坏特征进行总结并分析了其影响因素;高波等<sup>[216]</sup>通过汶川地震后都汶高速公路 18 座隧道的调研数据,系统描述了隧道震害的形式、原因,并对震后修复原则提出建议。

综合目前隧道地震观测和震害调研结果可得出如下结论:

### (1) 隧道震害的类型

隧道震害主要发生在洞口、断层破碎带等地质条件复杂或地质条件突变处,以及隧道与其附属结构如竖井、联络横通道连接处等结构刚度突变部位。洞口段震害主要为:洞口边仰坡垮塌、落石;局部边仰坡地面、截排水沟开裂变形;洞门墙及洞口附近衬砌松动、开裂、渗水等。洞身段震害主要为:衬砌受断层剪切破坏;衬砌环向、纵向、斜向开裂;衬砌错台、钢筋扭曲、衬砌掉块、拱圈局部垮塌甚至整体掉落;路面裂缝及隆起等。

### (2) 隧道震害原因

隧道在地震作用下的震害是地震波特性、围岩地质条件、衬砌结构等诸多因素综合作用的结果,总结起来,主要可分为:断层错动、地震波自由面放大效应和地震波振动效应。

### (3) 隧道震害影响因素

影响隧道震害的因素众多,其中最主要的几点因素有:地震参数,包括地震震级、震中距、震源深度和地震波特性等;隧道围岩条件;隧道埋深;隧道衬砌材料;施工质量和设防标准等。

## 2.5.2 抗震计算方法

除地震观测和震害调研外,理论分析是隧道结

构抗震研究的另一重要手段。隧道抗震设计最早的理论分析方法是由日本学者大森房吉提出的静力理论<sup>[217]</sup>;Thomas<sup>[218]</sup>于 20 世纪 60 年代末修建旧金山海湾地区快速地铁运输系统(BART)时,针对地下结构震害特点提出了 BART 法;日本于 20 世纪 70 年代根据盾构隧道地震响应特征提出了反应位移法;Shukla 和 John 分别基于弹性地基梁理论提出了 Shukla 法和 ST. John 法;前苏联学者提出了基于连续介质弹性力学的福季耶娃法;Dasgupta 以及 Wolf、Song 等根据有限元理论中子结构法提出了递推衍射法等<sup>[219]</sup>。在众多抗震设计方法中,由于建模复杂程度、参数获取难易程度、计算工作量大小等因素不尽相同,在实际工程中的应用程度也不尽相同。目前中国涉及隧道等地下结构的抗震设计规范主要有《铁路工程设计技术手册(隧道)》<sup>[220]</sup>、《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—97)<sup>[221]</sup>、《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)<sup>[222]</sup>、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[223]</sup>、《公路工程抗震规范》(JTG B02—2013)<sup>[224]</sup>、《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)等<sup>[225]</sup>。综合现行规范,隧道结构抗震计算方法主要有静力法、反应位移法及其变化形式和动力分析法 3 种。

### 2.5.2.1 静力法

静力法(又称地震系数法)是日本学者大森房吉<sup>[217]</sup>提出的地震荷载计算理论。在该方法中,作用于结构上的惯性力可由地震动加速度与结构各部分质量相乘得到,即化动力计算为静力计算,最初应用于地面结构,后逐渐扩展至地下结构的抗震计算中。因为该方法具有原理简单、计算量小、参数易得、操作性强等特点,故为设计人员所熟悉。

《铁路工程设计技术手册(隧道)》对静力法做了详细规定:定义了结构由地震而受到的惯性力称为地震力,并规定衬砌受到的地震力由衬砌自重地震力、隧道顶部上覆土柱地震力和地震时衬砌侧向土压力增量三部分组成。当考虑竖向地震荷载时,可将水平地震荷载乘以一个折减系数,该折减系数在不同规范中有不同取值<sup>[222,224]</sup>,主要与地震类型以及隧道是否接近断层有关。值得注意的是,采用现行规范中的静力法无法对隧道纵向进行抗震计算<sup>[226]</sup>,且从静力法计算原理及计算公式可以看出,隧道上覆土柱地震荷载的大小取决于土柱的高度,当隧道的埋深过小时,计算结果偏小;计算结果将随隧道埋深的增大而急剧增大,甚至出现内力过大衬砌无法配筋的情况。针对此问题,何川等<sup>[226-227]</sup>采

取振动台模型试验、理论分析、数值模拟等手段,对不同隧道跨度、不同围岩级别及不同地震烈度时静力法的适用性进行研究,提出隧道上覆土柱合理计算高度的概念,指出上覆土柱计算高度与隧道跨度、围岩级别等有关,并给出建议取值,对交通隧道中量大面广的山岭隧道的抗震计算具有一定的指导意义。

#### 2.5.2.2 反应位移法

与地面结构不同,隧道的地震响应不由其自身的惯性力决定,而是对地层振动具有依赖性和追随性,隧道在半无限体地层中的存在对地层本身地震响应的影响很小<sup>[228]</sup>。试验研究作为另一种有效的隧道抗减震研究手段,弥补了震害研究中无法主动控制地震各变量的改变这一缺陷,同时相比理论分析更接近工程中真实地震的实际情况,因此广泛应用于隧道抗减震研究中,一般分为人工震源试验和振动台模型试验两大类。人工震源试验最早由 Phillips 等<sup>[229]</sup>在美国内华达州核试验场附近 1 座试验隧道中通过核爆炸完成,试验结果表明自由场围岩与隧道的地震响应基本上相同。人工震源试验法由于起振力较小,实地材料类型单一,且代价昂贵,一般不采用。

振动台模型试验方法能够较方便地进行材料选取和配比,可以通过不同条件、不同工况的控制,从多个角度探求围岩和地下结构的地震响应特性,因此得到较广泛的应用。Okamoto 等<sup>[230]</sup>进行过 1 座水下沉管隧道的地震模型试验,试验结果表明沉管隧道地震过程中随周围地层的而振动;何川等<sup>[231-235]</sup>利用盾构隧道振动台试验证实了隧道结构的上述地震响应特征。基于隧道结构的振动特性,日本于 20 世纪 70 年代提出了反应位移法,并用于隧道等线状地下结构的抗震设计中,日本学者立石章(1992 年)采用土-结构动力分析的子结构法对反应位移法进行了理论推导,证明不考虑阻尼时,反应位移法在理论上是严密的<sup>[236]</sup>。

由于遵从了地下结构的地震响应特征,反应位移法能够真实地反映隧道在地震作用下的受力状态,适用于盾构、明挖、沉管等软土地层隧道的抗震计算,在日本共同沟、地下停车场、石油、自来水管、铁道等规范中广泛采用<sup>[228]</sup>;台北捷运系统工程土木工程设计手册(1998)、高雄捷运系统红桔线路网建设案土建及车站工程设计规范(2002)等<sup>[237]</sup>也规定土质地层中的盾构隧道采用反应位移法进行抗震计算。在中国,反应位移法现已应用于《核电厂抗

震设计规范(GB 50267—97)》、《地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/T J08-2064—2009)》、《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB 50909—2014)》等规范中。

反应位移法中地震作用主要分为 3 个部分<sup>[228]</sup>: 地层位移差、地层剪应力以及结构自身的惯性力,其中惯性力影响较小可忽略,计算时将地层位移差以强制位移的形式施加在荷载-结构模型中地层弹簧的末端,将地层剪应力转化为节点力施加在结构上,准确求解地层位移及剪应力成为反应位移法的关键。文献<sup>[228]</sup>中推导了均质地层中地层位移及剪应力的解析公式,并据此得到了地震作用下圆形盾构隧道结构内力计算的简化公式;对于成层地层可以采用重复反射理论求解特定位置的位移及剪应力。目前反应位移法的应用存在以下几方面的困难<sup>[238-239]</sup>:传统的反应位移法对非均匀地层并不适用;地层弹簧刚度需要利用有限元方法计算,使用不方便;再者,当隧道断面复杂时,地层剪应力的施加将变得十分繁琐。针对这些问题,学者们提出许多简化反应位移法的途径:片山幾夫等<sup>[240]</sup>提出了反应加速度法,该方法采用地层-结构模型,以地下结构顶部与底部位移差最大时刻各单元的加速度作为输入地震动;何川等<sup>[232-234]</sup>提出的广义反应位移法解决了在非均匀地层中应用反应位移法精度不足的问题;刘如山等<sup>[241]</sup>对反应加速度法的地震荷载加载方法进行改进,提出了反应应力法;陶连金等<sup>[242]</sup>详细比较了反应位移法、反应加速度法等目前地铁地下结构抗震设计方法的差异性和规律;刘晶波等<sup>[243]</sup>结合反应位移法明确的物理概念和严密的理论基础,提出整体式反应位移法;李亮等<sup>[244]</sup>通过改进地层弹簧系数的求解方法,提出了改进的反应位移法,上述诸多改进途径拓宽了反应位移法的适用范围,并使其便利性得到改善。

#### 2.5.2.3 时程分析法

起源于 20 世纪 60 年代的动力分析法是直接通过动力方程求解地震响应的方法,包括频域分析与时程分析法。频域分析的原理是利用傅里叶变换,首先计算结构体系的频域传递函数,求得频域解后再通过傅里叶逆变换求得时域解。频域分析计算速度较快,但由于其叠加原理,仅适用于线性结构系统。当结构形式、边界条件复杂或地层非均匀性大时,结构地震响应呈现高度非线性,该方法就不再适用。时程分析法将地震动时程直接带入振动微分方程,将地震持时划分为许多微小的时间段,通过振动微分方程逐步积分求出结构在整个地震过程中各时

刻的响应,非线性结构系统也可使用。时程分析法能够较好地处理介质中各种非均匀、非线性问题,可以全面考虑地震动的峰值、频谱特性和持续时间,计算结果能够反映出结构体系较为真实的变形,强度变化过程及结构-土体之间的相互作用,被称为真正的动力反应分析法<sup>[51]</sup>。求解时程分析法中的振动微分方程一般需要采用数值求解的方法,根据对时间增量的处理方式不同,常用的数值计算方法有线性加速度法、Wilson- $\theta$ 法、Newmark- $\beta$ 法和中心差分法等;根据建模方式的不同,时程分析法的数值计算方法一般分为有限元法、边界元法、离散元法和有限差分法等<sup>[245]</sup>。

动力分析方法使用时应注意以下2点:①采用有限的模型模拟无限的地层介质时必然将导致地震波在模型边界上的反射,从而引起模型内波的震荡,导致计算结果失真,为解决此问题,一般需在模型边界上引入人工边界条件<sup>[246]</sup>;②受限于计算机容量和计算能力,合理的模型尺寸及范围是计算精度和计算效率二者权衡的结果。

### 2.5.3 抗减震构造措施

隧道工程抗减震构造措施分为两个方面:①采取必要的构造措施,使隧道容易追随地层的振动,从而减小结构内力,提高隧道自身的抗震性能;②通过工程手段减少地层传递至隧道结构的地震能量的减震措施。

#### 2.5.3.1 抗震构造措施

盾构隧道由管片与接头拼装而成,其抗震构造措施可从管片和接头两方面着手。对管片而言,降低其刚度可有效降低相同变形条件的衬砌内力,适当减小幅宽、增加管片环分割数可减小隧道整体的等效刚度<sup>[228]</sup>;同时应注意,过小的结构刚度将导致结构产生过大的变形,从而易使结构破坏或无法正常使用。特定条件下盾构隧道内设置二次衬砌可在一定条件下起到减小震害的作用<sup>[231]</sup>。对接头而言,在管片连接处设置橡胶止水带、弹性垫圈,不仅可防止接头处因变形过大而漏水,同时可减小结构地震内力;隧道纵向采用直螺栓、加长螺栓长度等措施在盾构隧道抗震设计中也经常用到。

矿山法山岭隧道洞口浅埋、偏压和断层破碎带处震害严重,是抗震设防的重点部位。对于洞口浅埋、偏压段隧道,规范<sup>[28]</sup>,<sup>[30]</sup>中对洞口边仰坡开挖高度、洞门材料、衬砌形式等均做出规定,同时还提出设置系统锚杆、衬砌背后注浆等措施;对于穿越断层破碎带隧道的抗震设防研究中,常用措施有根

据断层蠕变及错动量采取扩挖措施<sup>[247]</sup>、采用柔性连接方式通过断层破碎带<sup>[248]</sup>、设置抗震缝、加固断层破碎带处的围岩,以及对断层破碎带过渡段同样采取抗震设防措施等<sup>[249]</sup>。

#### 2.5.3.2 减震构造措施

隧道减震构造措施的思路是在衬砌和围岩间设减震装置,使原有衬砌-围岩系统变为衬砌-减震层-围岩系统,通过减震层吸收一部分地震能量,从而减小或改变地震对结构的作用强度和方式,达到减震目的。在盾构隧道壁后注浆时注入硅胶类的隔震材料已经在日本得到应用<sup>[204]</sup>,在中国仍处于试验研究阶段。蒋树屏等<sup>[14,250-251]</sup>通过振动台模型试验,研究了减震层刚度、地震波输入频率和减震层阻尼等参数对隧道减震效果的影响;耿萍等<sup>[252]</sup>开展了穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验研究。

#### 2.5.4 小结

通过隧道震害及抗震设计研究现状的调研和总结,可得出以下结论:

(1)隧道工程的震害情况与房屋、桥梁等地面建筑相比较小,隧道工程具有较强的抗震性能,但各国数次严重震害警示人们,在强震情况下隧道结构仍有可能产生较大震害,地下结构无“绝对安全”的神话,隧道工程也应重视抗震设防;

(2)现有的隧道抗震计算方法适用范围有限,由于在参数取值以及计算成本等方面存在的一些限制,有些计算方法尚未达到可以直接指导设计的阶段,因此简便、可靠的隧道抗震计算方法仍是今后隧道抗震设计研究的重点;

(3)专门针对隧道结构物的抗震设计规范仍然缺少,亟待制定;现行规范中针对隧道结构抗震措施的条文数量少、实用性和操作性不强,今后应着重开展经济、有效的抗减震措施等方面的研究。

## 3 隧道施工技术

**3.1 钻爆法**(山东大学李术才、李利平老师,长安大学陈建勋、罗彦斌老师,西南交通大学杨其新老师提供初稿)

### 3.1.1 钻爆法施工的发展与现状

钻爆法是以钻孔、装药、爆破为开挖手段,以围岩-结构共同作用为支护设计理论,采用复合式衬砌结构,以钻爆开挖作业线、装渣运输作业线、初期支护与防排水作业线、二次模筑衬砌作业线、辅助施工作业线为特点的重要、应用极广、首选的隧道施工



方法。

钻爆法开挖隧道的历史要追溯到 16 世纪产业革命开始后。产业革命开始后,炸药的出现加速了近现代隧道开挖技术的发展。风动凿岩机的发明使得钻爆技术发生了划时代的飞跃。随着硝化甘油炸药及风洞凿岩机的推广使用,钻爆法施工技术渐渐发展起来。此后经过 100 多年的发展,钻爆法的施工方法也得到了迅猛发展。在 20 世纪 60 年代之前,中国隧道开挖普遍采用了传统的钻爆法。20 世纪 60 年代以来,隧道机械化施工水平的进一步提高和以岩体力学理论为基础的新奥法的引入,全断面液压凿岩台车和其他大型施工机具相继用于隧道钻爆法施工<sup>[253]</sup>。

20 世纪 90 年代以后,中国隧道工程建设事业有了较快的发展,这与隧道爆破技术的进步密切相关。大量的锚喷支护工程实践和岩石力学的迅速发展,导致了现代支护理论的建立,在此基础上出现了新奥法、挪威法、新意法等更有效的施工方法;冲击钻头改进及全液压钻孔台车的出现,大能力装渣、运渣设备的开发,新型爆破器材的研制及爆破技术的完善,超前地质预报等新技术的应用,改善围岩条件及支护技术的进步等,极大地改良了施工环境,提高了掘进速度,使得钻爆法的掘进技术得到更新,也为水底隧道施工技术的发展(穿越江河、海湾)提供了新的有效手段<sup>[254]</sup>。当前中国隧道施工中广泛采用的是与新奥法原理相结合的钻爆法。到目前为止,中国采用钻爆法已成功修建了全国 99% 的隧道,是采用钻爆法修建隧道数量较多的国家之一<sup>[255]</sup>。目前,中国隧道钻爆法施工技术已跻身世界领先行列,已经成为世界上隧道数量最多、发展速度最快、地质条件与施工环境最复杂、隧道结构形式多样的国家。

### 3.1.2 隧道钻爆开挖技术

中国隧道爆破作业在 20 世纪 60 年代由原始的钢钎凿岩、打孔方式转变为手持气动冲击钻进行钻孔作业,并在 1965 年首次采用了光面爆破技术。70 年代以后,手持风钻改进为气腿支撑式手持高性能风钻,70 年代后期光面爆破基本取代了传统的爆破方法。在 20 世纪 80 年代,中国在隧道开挖爆破技术上取得了跨越式的技术进步。在为修建衡广铁路复线大瑶山隧道时铁道部决定引进世界上最先进的多臂液压凿岩台车,同时塑料导爆管(诺雷尔)非电起爆系统在中国试验成功并批量生产<sup>[256]</sup>。自 20 世纪 60 年代以来,中国对钻爆法开挖隧道进行了持续不间断的研究。从爆破方法及爆破模式的改

善<sup>[257]</sup>、光面爆破装药结构<sup>[258]</sup>、爆破震动控制技术<sup>[259]</sup>等多方面进行了研究。目前,选择合理的掏槽形式(比如楔形掏槽)、严格控制单段最大装药量、确定合适的循环进尺和台阶长度等技术措施,能有效控制爆破震动效应对隧道稳定性的影响<sup>[260]</sup>。这些措施使得隧道爆破技术有了长足的进步。随着控制爆破技术的发展,钻爆法的应用范围也逐渐加大,并逐步应用于软石及硬土的松动爆破。20 世纪 90 年代后,在众多的隧道工程项目施工中,使用拼装式简易台架进行隧道施工钻岩、支护等作业是值得肯定的技术改进,其代价低廉,实现了风、水、电上架,给施工作业以极大的方便,经济效益显著,深受广大隧道建设者们的欢迎。隧道爆破技术的显著进步,极大地促进了隧道施工能力和综合效益的提高<sup>[253]</sup>。20 世纪 90 年代以后,中国隧道工程建设事业有了较快的发展,这与隧道爆破技术的进步密切相关。

在开挖方法的选择上,钻爆法中常用的有全断面法、台阶法、环形开挖留核心土法、双(单)侧壁导坑法、CD 法、CRD 法等开挖方法,这些技术已日渐成熟。每种工法具有不同的特点,对于不同的地质条件很难做到完全兼顾<sup>[261]</sup>。当隧道通过浅埋、偏压、软弱围岩、断层破碎带、岩溶以及大面积淋水或涌水地段时,应考虑采用适当的超前支护等辅助施工措施,以保证施工过程中的安全。目前在钻爆法施工的隧道中通常采用的超前支护方法有超前锚杆、超前小导管、超前管棚等,在某些特殊地质情况下,也可考虑水平高压旋喷桩<sup>[262]</sup>、超前管棚<sup>[263]</sup>、冻结<sup>[264]</sup>等方法控制隧道围岩变形和开挖面的稳定,提高施工安全性及高效性。

尽管中国在钻爆开挖技术上取得了一定的成就,但在具体操作实施上由于员工素质等原因,根本达不到相应要求;通过运用现代计算机技术着力开发隧道爆破设计计算机程序软件,提高隧道爆破专业化队伍的管理水平,才能促使中国的隧道工程钻爆施工技术进一步的提高。

### 3.1.3 隧道支护技术

目前,中国隧道工程施工还是以钻爆法为主。钻爆法是通过各种支护技术、加固技术、预加固技术和辅助施工技术,来提高围岩的自承能力,确保隧道开挖和后续作业时结构的稳定<sup>[265]</sup>。

在钻爆法施工中,针对不同的围岩级别,采用相应的支护形式,由初期支护与二次衬砌组合成的复合式衬砌最为常用,是隧道结构的主要承载单元。



其中初期支护通常采用由喷射混凝土、钢筋网、钢架及锚杆组成的组合结构,而二次衬砌常常采用模筑混凝土作为安全储备来进行设置。传统坑道开挖后的支护方法,大致可以分为钢木构件支撑(传统矿山法)和锚杆喷射混凝土支护(新奥法)2类。中国从20世纪60年代开始应用锚杆和喷射混凝土技术,近几十年来,通过工程实践积累了丰富的在不良地质等困难条件下用钻爆法修建隧道工程的成功经验。传统施工方法中初期支护采用钢木构件支撑,构件支撑在模筑整体式衬砌时通常应予以拆除,即不作为永久承载构件,被称为临时支撑。目前在隧道工程施工中,初期支护一般由锚杆、喷射混凝土、钢拱架、钢筋网等及它们的组合组成,使用最多的组合形式是锚杆(主要指系统锚杆)加喷射混凝土(素喷或网喷)。因此,初期支护可以称为锚喷支护。

近年来,国内外研究人员对新型复合材料钢纤维喷射混凝土的喷射技术、增强机制、力学试验、早期强度、应用与设计等方面进行了相关研究,并在恶劣环境下提高喷射混凝土耐久性研究取得了较多研究成果<sup>[266-267]</sup>。钢架对限制围岩变形能够起到重要作用,尤其是在软弱围岩隧道中。目前中国隧道钢架主要采用格栅钢架与型钢钢架,中国学者曾对格栅钢架和型钢钢架的受力特性和变形特征、结构特点及适用性也做了相应研究并给出了使用原则<sup>[268-269]</sup>。锚杆被认为具有悬吊作用、支撑作用、组合梁作用和加固作用,在隧道初期支护中起到重要作用。许多学者通过数值模拟或现场量测的方法对锚杆的作用效果进行了大量研究。在现场试验与应用中,总结了诸如“型钢拱架+喷射混凝土+钢筋网+锁脚锚杆(管)+纵向连接筋”组成的新型支护结构以及多用应用原则<sup>[270-273]</sup>。除此之外,近年来隧道衬砌结构的加固补强已引起国内外同行的普遍重视<sup>[274]</sup>。内表面补强、粘贴FRP布法因其相对良好的表现和易于施工的优点,成为了隧道衬砌内表面补强方法中最为推崇的一种方法<sup>[274-275]</sup>。

初期支护施作后即成为永久性承载结构的一部分,它与围岩共同构成了永久的隧道结构承载体系。当前常用的永久衬砌形式有:整体衬砌、复合式衬砌、拼装衬砌、锚喷衬砌4种<sup>[276]</sup>。喷射混凝土技术的发展在隧道工程支护技术发展中占有很重要的地位,目前锚喷支护技术的发展趋势主要集中在全面推行湿喷技术、钢纤维喷射混凝土和聚丙烯纤维喷射混凝土推广并应用、隧道喷射混凝土单层衬砌将成为隧道永久性衬砌3个方面。

### 3.1.4 监控量测

在国外,西方国家主要采用红外线测距技术、激光技术及地质图像处理技术、光纤传感监测系统等高科技技术手段,对隧道内测点的变化情况进行监测分析,得到测点处围岩的位移变化情况<sup>[277]</sup>。

在中国,目前以位移测试为主体的隧道施工监控量测系统普遍采用了全站仪、水准仪以及收敛计等仪器对隧道内的测点变化情况进行监测分析<sup>[278]</sup>;此外,多种类型的压力盒、位移计、钢筋计等也应用到隧道监控量测工作中。在监测数据处理上,线性-非线性回归预测、时间序列预测、灰色系统预测、神经网络模型预测等一种或多种方法结合应用,对隧道围岩情况分析取得良好的预测结果。

虽然中国隧道监控量测技术的理论方法取得了显著的进步,但是与欧美及日本等隧道修建技术先进的地区和国家相比,还存在一定的差距。一方面,对隧道施工监控量测仪器的研发投入较少,对隧道施工监测管理要求也不严格;另一方面,由于中国公路隧道建设起步较晚,在早期的发展过程中,科研攻关的重点主要集中在隧道结构设计、受力分析和施工方法方面,而忽视了监控量测技术的研究<sup>[278]</sup>。

### 3.1.5 隧道超前地质预报技术

在隧道施工期间,采用各种技术手段和方法对隧道掌子面前方不良地质条件进行及时、准确的预测是保证隧道施工安全的重要措施。隧道超前地质预报应体现以隧道地质为基础,根据可能存在的不良地质条件,选择适宜的地质超前预报方法进行预报<sup>[279]</sup>。自20世纪70年代起,国际上开始了隧道及地下工程施工期的不良地质超前预报研究工作,经过近40年的发展,已经由起初的超前导坑、超前钻探等方法发展到地震反射法、电法、电磁法等地球物理勘探方法<sup>[280]</sup>。

隧洞工程超前地质预报最早采用地质分析法,即工程地质分析法、超前导洞法和超前钻探法。此外,隧道工程领域还发展了红外探水仪、岩体温度法等,在一定时期内得到了现场应用,但是隧道环境、温度等对预报结果影响较大<sup>[281]</sup>。

近几年,在国外地表勘探领域,Meju等<sup>[282-285]</sup>开始探索多元地球物理信息的联合反演理论,初步实现了2种地球物理信息的联合反演(如:地震信息与电法信息、地震信息与重力信息),利用多种地球物理勘探方法构制同一地球物理模型已经成为国际公认的抑制多解性的主要研究趋势,但相关研究尚处于起步阶段;中国开展相关研究的单位主要有山东

大学、吉林大学等,并取得了一定的进展。

中国的研究人员在隧道超前地质预报技术上开展了不同程度的研究和试验工作,取得了较丰富的成果,例如:利用瞬变电磁对隧道不良地质探测研究<sup>[286]</sup>、基于地质分析的“断层参数法”<sup>[287]</sup>、基于地质力学理论的综合超前预报技术体系<sup>[288]</sup>;综合超前地质预报技术“三结合”原则,以及高风险岩溶隧道综合预报技术体系和流程<sup>[6,289]</sup>。

近几年来,隧道超前地质预报技术得到了蓬勃的发展,技术手段越来越趋于多样化;但是面对复杂的地质环境,仍然还有很多的问题需要解决,根据目前的现状与技术水平,未来超前预报发展的重点也逐渐明确,即通过利用超前地质预报技术实现定性辨识和定量预报不良地质体三大核心属性(空间位置、赋存形态、充填特性)的定位定量化探测的概念及思想需要得到发展和肯定;基于多元地球物理信息融合与联合反演理论的综合超前地质预报技术是压制探测多解性、提高预报可靠性的可行有效途径;激发极化技术和核磁共振技术则由于其参数对水量的响应敏感性在定量探测水量方面也显示出较好的应用前景<sup>[290-291]</sup>。

### 3.1.6 隧道突水突泥灾害防控技术

在突水突泥“防、排、堵、截”综合控制理论方面,最主要的手段是水源探测、疏水降压和注浆堵水,其中水源探测是决策依据,疏水降压和注浆堵水是控制方法<sup>[292-293]</sup>。目前国内外学者多针对灾害发生前的“防”和灾害发生后的“治”2个方面开展了相关研究,并取得了一定的研究成果,鲜有学者开展突水突泥等灾变过程的“控制理论”研究,主要因为不同孕灾模式下的突水突泥灾变演化过程关键控制因素及其相应的控制方法尚不确定,难以建立相应的决策模型<sup>[294]</sup>。在隧道突水突泥“堵、排”理念及控制理论方面,从传统的“封堵”和“疏排”到现阶段的“以堵为主、适量排放、堵排结合”,很少从环保方面考虑对水资源的保护,造成了地下水资源的浪费和生态环境的破坏<sup>[295]</sup>。注重水资源和生态保护的突水突泥灾害协同治理理论和方法尚属空白。在注浆控制理论研究方面,目前国内外学者在渗透注浆、裂隙注浆、挤密注浆、劈裂注浆等浆液扩散理论和机理研究方面均取得了一定进展,许多高校和学者已经开展了一系列的注浆仿真试验,初步建立了简化的注浆扩散理论模型<sup>[296-298]</sup>。然而以上研究均针对静水条件下的超前预注浆和岩体、土体的防水及加固,并未考虑深长隧道的复杂动水环境。动水注浆方面,山

东大学和中国矿业大学初步开展了单裂隙条件下的动水注浆扩散及封堵模型试验,但未涉及可视化三维条件下的动水环境和其他含导水构造<sup>[299-302]</sup>。动水注浆理论急需突破破碎岩体加固封堵机理,当前研究还无法对动水条件下的破碎岩体浆液的扩散、运移和封堵过程进行合理分析,尚未建立针对不同孕灾模式和灾变演化阶段的注浆封堵、加固与效果评价理论模型。

目前在针对突水突泥灾变演化过程的注浆控制理论研究方面,国内外尚属空白。考虑水资源和环保生态效应,建立疏水泄压、注浆堵水和岩体结构加固于一体的协同控制机制和动态防控集成理论,是深长隧道突水突泥防控的基础和关键。

### 3.1.7 小结

隧道修建技术的进步为长大隧道工程的发展和开发利用地下空间奠定了基础;同时,大规模地下工程的建设也必将对隧道修建技术提出新的更高要求。为了适应今后隧道工程大规模发展的需要,展望钻爆法隧道施工的发展方向,需开展以下几个方面的工作:①加强施工中隧道地质勘探工作,施工中的地质超前预报技术的开发与完善和发展多种勘探手段,进而迅速及时地获得尽量多的地质信息资料,保证施工的安全<sup>[257-258]</sup>。②加快隧道施工机械化,在应用最广泛的钻爆法作业方面,建立以钻孔台车为先导的几条机械化作业线(开挖、出渣作业线,喷混凝土作业线,模筑混凝土衬砌作业线),可以使钻爆法适应性更强;在特长隧道中,采用以全断面掘进机为核心的综合机械化技术(开挖、出渣、衬砌),以实现特长隧道的高速、高效和高质量施工技术水平。

### 3.2 盾构工法(北京交通大学袁大军老师提供初稿)

盾构施工法简称盾构法,是使用盾构机在地下掘进,在护盾保护下防止软基开挖面土砂崩塌和保持开挖面稳定的同时,在机内安全的进行开挖和衬砌作业,从而构筑成隧道的施工方法。与传统地铁隧道施工方法相比较,盾构法具有地面作业少、自动化程度高、对周围环境影响小等特点。

#### 3.2.1 盾构始发、到达技术

##### (1)盾构始发技术

由于地铁盾构隧道的增加,越来越多的隧道在城市中心区的繁华地带修建,在线路上方预留盾构吊装口进行始发作业已基本不能满足环境要求。邓美龙等<sup>[303]</sup>在沈阳地铁南京街站至南市站处采用车站风道下井、始发的施工方式进行,成功开创了车站风道下井盾构始发施工方法。在地下水位较高或有

含承压水的砂性地层,盾构进洞时的地下水控制较为复杂,稍有不慎,便可能引起涌水、涌砂等重大事故,除工程本身以外,对周边环境造成的影响及损失也十分巨大。钢套筒辅助盾构进洞工艺主要基于水土压力平衡的理念,以小空间换取大空间、循环利用为核心,为盾构进洞提供了新的技术和思路,成功克服盾构在进洞过程中受加固空间局限制约的进洞,减小了对周边环境的影响<sup>[304]</sup>。

### (2) 盾构到达技术

盾构到达技术既是盾构施工的关键环节,也是施工的重点和难点。盾构直径不断增大及地层和环境条件越来越复杂易导致到达施工过程中的塌方、透水等工程事故不断出现,且多数事故与端头加固模型使用不当及纵向加固范围不够有关。近些年,深覆土、高水压、复杂地层工况一直是盾构到达施工重大难题,武汉地铁2号线越江隧道工程采用头旋喷加固、冷冻加固以及基坑回填、盾构掘进等水下到达关键施工技术实现了水下到达施工,成功地解决了盾构到达过程中高水压风险<sup>[305-306]</sup>。

### (3) 端头加固

洞门凿除以后端头地层暴露,端头地层受力平衡被打破,对于自稳时间较短的土体,始发掘进之前的端头加固显得十分有必要。丁修恒<sup>[307]</sup>通过列举几种典型的工程地质条件下采用的端头加固方案,提出了端头加固常用的施工技术工艺和要点以及注意事项。特殊地段及复杂地质条件下盾构始发到达采用的水平冰冻加固方法,基于冻结法技术在越江隧道工程中的参数设计计算过程,提出采用冻结法安全施工可设置冻结泄压孔、适当补浆并加强监测等<sup>[308-309]</sup>。

### 3.2.2 盾构掘进技术

#### (1) 开挖面稳定控制

盾构隧道施工中,合理的开挖面支护力控制,保证开挖面的稳定,能有效减少开挖对周围地层变位及构筑物的影响。泥水平衡盾构是通过泥水压力使掘削面稳定平衡,从而控制开挖面稳定。土压平衡盾构则是通过保持土仓压力使掘削面稳定平衡,维持开挖面土体稳定。目前,开挖面稳定性理论研究主要侧重于开挖面极限支护压力的确定。国内外学者在分析开挖面失稳破坏模式的基础上提出了许多计算模型和研究方法(包括解析法、现场试验法、数值模拟法等)。

#### (2) 盾构掘进姿态控制

盾构机所处土层的土质情况、隧道轴线设计情况、盾构机操作手的技术水平和经验等因素都直接

影响到盾构机的姿态控制<sup>[310]</sup>。在盾构施工中,保证良好的盾构姿态,不仅有利于保护好盾构机,同时也有利于保证良好的隧道施工质量。

### (3) 刀具磨损检测

盾构掘进过程遇到复杂地质条件对盾构刀具的磨损特别严重,减小盾构刀具磨损,是保证土压平衡后构长距离掘进的重要措施。袁大军等<sup>[311-313]</sup>进行刀具磨损现场监测,利用数学统计方法对监测数据进行回归,得到砂卵石地层盾构刀具的动态磨损情况,提出了刀盘选型和刀具配置原则以及合理的设计参数,为工程实际中减小刀具磨损及预测盾构在类似地层条件下的最长掘进距离等提供理论依据。刀具的磨损检测也是盾构能顺利进行的关键因素之一,现在的刀具磨损检测技术包括:开仓检查、安装刀具磨损感应装置、通电式刀具磨损等<sup>[314]</sup>。

### 3.2.3 管片拼装技术

盾构推进结束后,迅速拼装管片成环。除特殊场合外,大都采取错缝拼装。在纠偏或急曲线施工的情况下,有时采用通缝拼装。由于地铁等盾构隧道工程的不断开展,在现有施工工艺的基础上,应该在盾构隧道地层适应性(特别是复杂地层)、管片拼装密封(防水防漏)、管片注浆、管片拼装方式等方面逐步提高。宋艳玲<sup>[315]</sup>对超大型盾构隧道管片拼装方法、技术要点控制、拼装精度控制、拼装顺序优化、掘进姿态影响等方面进行了较系统的总结,可为同类工程施工提供借鉴。张晓莉<sup>[316]</sup>针对大直径隧道中的管片错缝拼装技术以及盾构掘进过程中管片拼装的施工工法提出需要控制盾构掘进姿态、加强人工检测、严格控制注浆量等要求,有利于保证管片拼装质量的关键方法。

### 3.2.5 壁后注浆技术

盾构管片后的注浆材料以及注浆参数的控制是决定地面沉降的关键因素。

注浆材料的选择需考虑隧道土质和盾构形式等条件,为使壁后充填注浆材料能迅速、准确地填充到衬砌管片与地层间的空隙中,要求壁后充填注浆材料具有优异的填充性、均一性,流动性良好,不会产生沉淀现象;有地下水存在时浆液不会被稀释,且在短时间内能到达与空隙外围原状土相当的强度;浆液硬化后,不会发生体积收缩现象,透水性降低,浆液充填不污染地下水且成本低<sup>[317]</sup>。王春河等<sup>[318]</sup>以南京长江隧道盾构掘进为背景,将废弃泥浆和高分子材料在不同配合比下复合,调制出具有新特性的泥浆。为满足复杂盾构工况的需要,徐建平

等<sup>[319]</sup>研制出具有快硬、抗水分散性和稳定性好等特点的高性能同步注浆材料,成功应用于武汉地铁 4 号线杨春湖、工业四路及岳家嘴等标段。游永锋等<sup>[320]</sup>调整胶凝材料组分、水胶比,添加絮凝剂、有机纤维和减水剂,制备出可减少管片上浮、抗水分散性好、抗渗性好于一体的高性能同步注浆材料,在台山核电取水隧洞施工过程中效果良好。

理论推导可以根据不同的施工工况,建立不同的盾构壁后注浆模型,为注浆过程中注入压力、注浆量、注入时间以及浆液初始粘度等参数提供合理的选取依据。叶飞等<sup>[321-324]</sup>将隧道壁后注浆总结为充填、渗透、压密和劈裂 4 个过程,并引入等效孔隙率概念,提出了壁后注浆的三维饼形充填模型、半球形和柱形渗透模型等,最后结合工程实例,验证了公式的准确性,为合理选取注浆压力、注浆量、注入时间以及浆液初始粘度等参数提供了有效依据。

采用数值模拟方法可以针对实际隧道施工工程进行数值模拟分析,考虑注浆过程中注浆浆液时间与强度的变化<sup>[325]</sup>,壁后注浆压力消散和浆液固结硬化过程<sup>[326]</sup>,注浆压力的影响<sup>[327]</sup>等对地表沉降的影响,为地表沉降与地层变形提供了有利的参考依据。

### 3.2.5 带压进仓技术

近年来,随着现代盾构装备技术的长足进步,盾构法逐渐成为应对软弱地层、跨越江海等复杂困难地质条件的主要施工工法。中铁十四局集团公司采用直径 14.93 m 的泥水平衡盾构机,成功破解了超大直径、超高水压、带压开仓换刀技术等六大世界级技术难题;在南京长江隧道施工中实现了在高压条件下成功检修刀盘刀具,采用了在开挖面上形成气密性良好的泥膜、气压支护开挖面的带压开仓方法,成功地实现了江底更换刀具、修复刀盘作业;随后在南京地铁 10 号线穿江工程中,全球首次成功实现 11 m 级泥水盾构机内小空间常压换刀直径泥水盾构带压进仓作业时<sup>[328]</sup>,开挖仓内良好的气密性可防止开挖仓内的高压气体逃逸从而保证气压稳定并能安全施工<sup>[329]</sup>。

### 3.2.6 地中对接技术

盾构地中对接技术即两台盾构机分别从两向掘进至结合地点正面对接。地中对接技术能够缩短工期,能解决无法设置竖井等困难,还能降低经济成本。对接地点的选取、对接前的高精度测量和盾构机对接部位的密封等是软弱土层盾构地中对接过程的关键技术难点<sup>[330]</sup>。广深港铁路客运专线狮子洋隧道采取了盾构水底地中对接施工的技术措施。通

过加强对地中对接的实施过程控制和采取辅助措施,解决了对接精度要求高、对接面地层涌水量大及洞内拆机空间狭小等技术难题<sup>[331-332]</sup>。

### 3.2.7 特殊地层条件施工技术

在盾构施工过程中经常会遇到一些特殊的地层条件,例如黄土地层、富水砂卵石地层、上软下硬地层等。

黄土是一种典型的非饱和结构性土,其强度与土体结构特征密切相关。黄土地层中盾构法隧道施工开挖面的稳定性与施工参数有关。何川等<sup>[333]</sup>等结合西安地铁 2 号线,针对在黄土地层中采用土压平衡式盾构,研究了黄土地层条件下盾构掘进对地层的扰动情况以及盾构施工关键参数的匹配问题。王俊等<sup>[334]</sup>以南京地铁 10 号线越长江隧道为研究对象,通过数值模拟与室内模型试验相结合研究了砂卵石地层条件下大断面泥水盾构隧道施工过程中泥膜“生成-破坏-再生成”的动态过程以及泥浆渗透范围,探讨了不同泥水压力条件下盾构施工对周围环境的影响。

上软下硬的复合地层不同于普通软土地层,易造成盾构偏离轴线、喷涌、开挖面失稳、结泥饼、刀盘刀具严重磨损、软硬交界面处刀具的崩裂和导致地面严重沉降等情况出现,因此在上软下硬地层中进行盾构施工也存在很多问题和风险。李有兵<sup>[335]</sup>以狮子洋盾构隧道为背景,总结出了 FEM 数值模拟、刀盘刀具配置、掘进参数选择、姿态控制技术等上软下硬地层综合施工技术。

### 3.2.8 盾构施工存在的问题及对策

#### (1) 刀具磨损问题

随着大直径、长距离的复杂地层盾构隧道的出现,刀具磨损问题成为了盾构施工顺利进行的关键因素之一。根据不同的地层进行不同的刀具选型及刀盘配置,刀具磨损预测,以及在掘进过程中应采用的刀具检测方法都是急需解决的问题。

#### (2) 管片上浮问题

盾构机刀盘直径与隧道衬砌管片外径的差值,以及在掘进过程中产生的超挖,使得管片与地层间存在一个环形建筑间隙,会使管片产生上浮现象。采用性能较好的浆液使盾构隧道管片与围岩共同作用形成稳定的整体构筑物,调制浆液配比以控制地表的沉降和保证管片的稳定。叶飞<sup>[322]</sup>在理论计算方面,引入等效孔隙率概念,将浮力划分为静态浮力与动态浮力,给出了局部抗浮与整体抗浮计算公式。肖明清等<sup>[336]</sup>应用有限元法,对地层材料的物理力

学性质、注浆材料的性质等影响盾构衬砌环上浮的因素进行分析。针对大直径盾构隧道的特点,提出了施工、设计过程中控制衬砌管片上浮的策略和措施。

### (3)高水压、长距离、大直径盾构隧道问题

越江海隧道具有水压高、地质条件复杂、距离长、直径大等特点。高水压浅覆土复杂地形地质超大直径长江盾构隧道成套工程技术(2014年获国家科技进步二等奖)开发了适应高磨蚀性密实砂卵石砾石地层刀具配置技术,创新了刀具更换技术与进舱泥膜技术,攻克了高水压高磨蚀地层超大直径盾构长距离连续掘进技术难题,同时还建立了高水压强渗透浅覆土地形陡变条件下超大直径泥水盾构安全掘进体系。高铁狮子洋隧道、南京纬三路过江通道等出现的关键技术问题还未解决,国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)《高水压越江海长大盾构隧道的安全基础研究》将对高水压长大盾构越江海隧道的盾构机土相互作用、安全掘进、刀具磨损等问题进行进一步的研究。

### 3.2.9 盾构施工新技术展望

中国城市地铁发展迅速,盾构法以其安全、环保、快速的优点必将在地铁隧道的修建中得到更广泛的应用与发展。随着现代科技的发展,盾构施工技术也将集中在施工断面的多元化、管片衬砌拼装技术、盾构施工技术自动化等方向发展。

(1)施工断面的多元化。为适应不同的地质条件和特殊的工程,越来越多的盾构形式在不断出现,比如多圆盾构、椭圆形盾构、矩形盾构、子母盾构、变形断面盾构、H&V盾构、机械式盾构、箱型盾构等。

(2)开发新的施工技术,包括进出洞技术、地中对接技术、带压换刀技术、急曲线施工法等,以满足盾构特殊的工程施工要求。

(3)管片拼装的自动化并研制隧道衬砌新技术,包括压注混凝土衬砌、管片接头技术、管片接缝防渗技术以及高强度、高耐久性管片的制造等。

(4)盾构技术自动化。随着计算机技术的快速发展,盾构的自动化程度也会越来越高,并具有数据采集功能、掘进姿态管理功能等,盾构机正朝着全自动化、智能化的方向发展。

## 3.3 TBM隧道修建技术(北京交通大学谭忠盛老师提供初稿)

### 3.3.1 概述

岩石隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)的发展曾经历了一个漫长的过程。1884年博

蒙特设计了一台TBM,并在英法海峡水底隧道掘进了直径2.1 m的导坑,并掘进了5 km。1884~1926年间,一些国家先后设计制造21台掘进机之后,因受到当时技术条件的限制,例如合金钢材、液压技术、配套技术、配套设备等,致使掘进机制造处于停滞状态。直至20世纪40年代至50年代初,欧、美及日本各工业发达国家和地区又继续研究设计制造和使用掘进机,并在实际使用中获得了较为理想的效果。目前世界上著名的五大掘进机制造厂商是美国的罗宾斯公司和贾瓦公司、德国的沃斯公司和德马克公司、瑞典的阿拉斯·科普柯公司,都是20世纪50年代和60年代开始研制和生产掘进机的。国外TBM技术已经相当成熟,到目前为止全世界使用已超过450台,掘进总长度在2 500 km以上。

20世纪50年代,中国开始研究TBM制造及掘进技术。1965年,掘进机的研制列入国家重点科研项目。1966年,由上海勘测设计院和上海水工机械厂研制生产出中国第1台直径为3.5 m的TBM,并在云南下关的洒洱水电站进行试验,掘进机开挖施工通过的岩层是花岗、片麻布岩及石灰岩,最高月进尺48.5 m。由于种种原因,中国产掘进机的可靠性和技术性能都与国外掘进机有相当大的差距,掘进机的应用未能在国内得到推广。20世纪70年代至80年代是国外TBM技术突飞猛进的发展时期,而这期间TBM技术在中国基本上处于低潮阶段。从1991年引大入秦工程开始,中国TBM施工开始进入新的发展时期,虽然此时的TBM施工市场主要控制在外国承包商的手中,但毕竟实现了TBM施工的成功应用。20世纪90年代后期,以西康铁路秦岭隧道为契机,TBM再次迎来了新的发展机遇,首次实现了中国承包商独立使用和管理TBM施工。2000年以来,随着输水工程、铁路和各大城市地铁建设力度的不断加大,TBM在隧道工程中应用越来越广泛。

### 3.3.2 TBM的工程应用

自20世纪90年代以来在中国的隧道工程建设中TBM掘进技术得到了广泛的应用,主要的TBM施工隧道情况见表1<sup>[337-356]</sup>。

### 3.3.3 TBM制造技术

#### 3.3.3.1 TBM刀盘刀具研制

结合秦岭隧道极高强度硬岩的掘进,中国成功研制了17 cm盘型滚刀,其性能指标达到或超过国外同类产品,而整刀价格只是进口价格的50%。谢海波等<sup>[357]</sup>针对TBM掘进中刀盘被困的现象,设计

表 1 TBM 在隧道工程的应用情况

Tab. 1 Application of TBM in Tunnel Engineering

| 类别             | 序号 | 工程名称,建设时间                          | TBM 类型               | 直径/m                | 掘进长度/km   | 工程地质特点                         |
|----------------|----|------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------|--------------------------------|
| 水利<br>工程       | 1  | 天生桥二级水电站工程,<br>1985~1992 年         | 2 台二手<br>敞开式 TBM     | 10.80               | 约 7       | 主要为灰岩                          |
|                | 2  | 引大入秦工程,1991~1992 年                 | 双护盾 TBM              | 5.53                | 17        | 灰岩、砂岩、板岩夹千枚岩、砾岩等               |
|                | 3  | 山西万家寨引黄工程,<br>1994~2002 年          | 7 台双护盾 TBM           | 4.82~5.96           | 146.7     | 白云质灰岩、泥灰岩为主的<br>软硬岩相间地层        |
|                | 4  | 云南掌鸠河供水工程,<br>2003~2005 年          | 双护盾 TBM              | 3.65                | 13.77     | 砂质板岩、泥质板岩、白云岩等                 |
|                | 5  | 甘肃引洮工程,2009 年至今                    | 单护盾和双护盾<br>TBM 各 1 台 | 5.75                | 17.3~18.3 | 泥岩、砂质泥岩,软硬互层,<br>复合地层          |
|                | 6  | 辽宁大伙房输水工程                          | 3 台敞开式 TBM           | 8.03                | 60.3      | 混合岩、凝灰岩、砂岩、混合<br>花岗岩,复合地层      |
|                | 7  | 新疆伊犁河流域八十一大坂<br>输水隧洞工程,2006~2010 年 | 双护盾 TBM              | 6.90                | 21.86     | 砂岩、粉砂质泥岩、安山岩复合<br>地层,96%段落软弱破碎 |
|                | 8  | 青海引大济湟工程,2007 年至今                  | 双护盾 TBM              | 5.93                | 24.17     | 复合地层,软弱大变形                     |
|                | 9  | 陕西引红济石工程,2008 年至今                  | 双护盾 TBM              | 3.65                | 11        | 围岩软弱破碎,富水,大变形                  |
|                | 10 | 锦屏二级水电站工程,<br>2012 年至今             | 8 台敞开式<br>硬岩 TBM     | 12.40               | 约 8       | 大理岩、灰岩、结晶灰岩、<br>砂岩、板岩等         |
|                | 11 | 辽西北供水工程,2012 年至今                   | 双护盾 TBM              | 3.65                | 11        | 主要为二长花岗岩、混合花岗岩                 |
| 铁路<br>隧道<br>工程 | 12 | 西安安康铁路秦岭隧道工程,<br>1995~1999 年       | 2 台敞开式<br>TBM        | 8.80                | 约 18.46   | 以混合花岗岩、混合片麻岩等<br>坚硬岩石为主        |
|                | 13 | 磨沟岭隧道工程,2000~2002 年                | 敞开式 TBM              | 8.80                | 6.11      | 主要岩性为石英片岩和大理岩                  |
|                | 14 | 中天山特长隧道工程,<br>2007~2014 年          | 敞开式 TBM              | 8.80                | 13.42     | 变质砂岩、变质角斑岩、花岗岩等                |
|                | 15 | 兰渝铁路西秦岭隧道工程,<br>2008~2014 年        | 2 台敞开式 TBM           | 10.20               | 19.8      | 主要地层有灰岩、千枚岩、变砂岩、<br>砂质千枚岩等     |
|                | 16 | 高黎贡山隧道工程,<br>2014 年至今              | 敞开式 TBM              | 平导 5.60,<br>正洞 9.00 | 约 20      | 区内地层繁多,岩性复杂,<br>自寒武系至第四系均有出露   |
| 城市地<br>铁工程     | 17 | 重庆地铁 6 号线工程,<br>2003~2014 年        | 2 台敞开式 TBM           | 6.36                |           | 主要为泥岩、泥质砂岩和砂岩                  |
|                | 18 | 青岛地铁 5 号线工程,<br>2015 年至今           | 敞开式 TBM              | 6.85                | 约 22.6    | 主要为花岗岩                         |
| 煤矿<br>工程       | 19 | 大同塔山矿井工程,<br>2003~2004 年           | 双护盾 TBM              | 4.82                | 3.5       | 主要岩性为石灰岩、花岗岩,<br>中间穿越煤层        |
|                | 20 | 鄂尔多斯新街台格庙矿区工程,<br>2014 年至今         | 2 台 TBM              | 7.62                | 6.43      | 主要为砂质泥岩、粉砂岩、<br>砂质泥岩           |

出一种新型的 TBM 刀盘驱动技术,该系统比现有驱动系统在脱困性能方面有大幅度提升。刘春<sup>[358]</sup>通过对刀具工作条件的分析,提出关于整刀及其刀圈、刀体、刀轴、托架、轴承、油封等部件选材、热处理和加工精度的技术指标,以及相应试验方法和原则,最终以刀位系数作为刀具评价标准。

3.3.3.2 大坡度煤矿斜井 TBM 研制

中国铁建重工集团研制了全球首台长距离大坡度煤矿斜井 TBM,该仪器具有盾构和 TBM 两种模

式,掘进过程中能在 2 种模式间快速转换,可以穿越软岩、硬岩和复合地层等复杂地层。这台 TBM 总长 238 m,总质量超过 1 200 t,开挖直径 7.62 m,已用于神华集团鄂尔多斯新阶台格庙的煤矿试验斜井工程<sup>[355-356]</sup>。

3.3.3.3 大直径多功能 TBM 研制

中国中铁装备集团研制了直径 8.03 m 的 TBM,此台设备突破了 TBM 整机多系统协调控制集成技术,硬岩环境下高效破岩的刀盘高强度、非线性

性布置、小刀间距设计技术,不良地质条件下的高效快速支护系统设计技术,TBM 三维激发极化超前地质探测预报技术等。该设备将投用于吉林省中部城市引松供水工程项目<sup>[359-361]</sup>。

#### 3.3.3.4 小型 TBM 研制技术

中信重工机械股份有限公司研制的5 m 敞开式无轨运输 TBM 具有转弯半径小,对工程的适应性强,打破常规有轨运输模式,采用胶轮车无轨运输工艺,爬坡能力更强,小直径隧道掘进连续皮带机出渣,提高功效等特点,将在云南驰宏彝良矿山工程中应用。

#### 3.3.3.5 TBM 再制造技术

中铁隧道集团结合中天山铁路隧道特点,对直径 8.8 m 掘进机进行改造,通过增加变频装置、加长前盾、加大开挖直径及缩短主机,可提高其适应复杂地质的能力;通过内伸缩盾刚性连接,可提高 TBM 掘进效率;通过缩短支撑盾、增大腔内空间及增加超前钻机,可实现超前钻探<sup>[362]</sup>。

#### 3.3.4 TBM 隧道地质勘察技术

TBM 施工具有快速、优质、安全、环保等优点,但其对地层围岩的特性非常敏感,一般需要针对特定的地层和要求进行设计。大伙房隧道工程采用地质遥感、地球化学勘探、高密度电法、跨孔 CT 层析成像等综合地质勘察技术,查明了工程区地质条件和主要工程地质问题,为方案选择、工程设计提供可靠的地质资料、建议和施工指导<sup>[363]</sup>。西秦岭隧道勘察进行了大面积的方案研究和地质调查工作,布置了钻孔和可控源大地音频电磁法以及全隧道范围高密度电法、工程地震等方法的物探工作<sup>[364]</sup>。

#### 3.3.5 TBM 施工选型技术

TBM 可分为敞开式、单护盾、双护盾 3 种类型。敞开式 TBM 适应于较完整、有一定自稳性的围岩,特别是在硬岩、中硬岩掘进中,强大的支撑系统为刀盘提供了足够的推力,能充分发挥出优势。敞开式 TBM 刀盘附近有足够空间用来安装钢架、锚杆、超前注浆、喷射混凝土等作业,能及时有效地对不稳定围岩进行支护。

双护盾式 TBM 有护盾保护结构,可在掘进的同时进行管片的安装,但其适用的地层需相对稳定、岩石抗压强度适中、地下水不太丰富。采用双护盾 TBM 在通过地应力变化大、破碎、块状围岩时如不能迅速通过,则护盾有被卡住的风险。

影响 TBM 选型诸多因素中,地质条件、衬砌型式、隧洞用途和造价是重点,而最为关键的因素是地

质条件<sup>[365]</sup>。西秦岭特长隧道围岩以Ⅲ级为主,岩性以层状的变砂岩、夹砂质、千枚岩、砂质千枚岩居多,岩石饱和抗压强度小于 100 MPa,选择敞开式 TBM 施工。大伙房输水工程突破了国内外 TBM 选型的常规经验限制,在Ⅲ类围岩(相当于铁路的Ⅳ级)占据进长度 78.76%的 TBM 施工段开创性地选用了敞开式 TBM,并为其各项设备进行了科学合理的配置,在施工中取得了极大成功,TBM 月进尺达到国际先进水平<sup>[366]</sup>。

#### 3.3.6 TBM 洞内组装及拆卸技术

针对无法进行洞外 TBM 组装及拆卸的情况,大伙房输水工程通过分析论证并结合 TBM 设备的特点,合理确定地下组装洞室断面形式及布置位置,根据 TBM 的大件尺寸,研究 TBM 运输支洞的断面以及洞内运输方案,中国首次实现了 TBM 的地下洞室组装<sup>[363]</sup>。通过设置中间支洞,对 TBM 进行中间检修来提高 TBM 长距离掘进的可靠性,并提出 TBM 中间转场方案,为 TBM 连续掘进 20 km 奠定了基础。最终在西秦岭隧道贯通后成功实现 TBM 洞内拆卸<sup>[367-370]</sup>。

#### 3.3.7 TBM 掘进技术

##### 3.3.7.1 敞开式 TBM 掘进

###### (1)刀盘刀具设置技术

为进一步提高掘进机滚刀的破岩效率,在刀盘设计过程中确定合理的刀间距显得尤为重要。冯欢欢等<sup>[359]</sup>在利用岩石破碎角推导破岩刀间距范围的基础上,基于 RFPA 分析系统,进行了双刀、三刀作用下的不同刀间距破岩效果的分析,并推导出了最优破岩刀间距的计算公式,最后通过滚刀-岩-机作用综合试验台,验证了所推导的最优刀间距计算公式的科学性。

###### (2)不良地质段 TBM 施工技术

TBM 穿越不良地质地段时,地质预报十分关键。实际工程中主要采用地质素描、物探及超前钻探相结合的综合超前地质预报方法,确定断层带的规模、充填物、涌水、隧道轴线与断层走向、倾向的组合关系等情况<sup>[337,371-372]</sup>。

①TBM 穿越断层的处理措施:对于较短的一般性断层,可直接通过,并及时支护;对于高压富水断层,需进行管棚超前注浆处理,在 TBM 通过后及时采用钢支撑加固和注浆堵水。

②TBM 穿越高地应力硬岩地段的处理措施:预测为微弱岩爆时,在开挖面上喷水,TBM 可直接掘进通过,及时支护封闭围岩即可;预测为中等以上岩



爆时,超前钻孔,并向孔内注高压水软化围岩,并向开挖面喷水,然后 TBM 掘进通过,并及时支护。

③TBM 穿越高地应力软岩地段的处理措施:加强超前支护、初期支护及监控量测,加快 TBM 掘进速度,快速通过。

### 3.3.7.2 护盾式 TBM 掘进技术<sup>[373-379]</sup>

#### (1)护盾 TBM 卡机脱困技术

①超高压换步:支撑盾和尾盾发生卡机时,可采用超高压泵站和辅助推进油缸进行超高压换步脱困,这一般适用于支撑盾和尾盾轻微被卡的情况。

②人工扩挖:在前盾被卡或超高压仍不能推动支撑盾和尾盾的情况下,可以通过人工扩挖的方式掏空盾壳周围以释放围岩作用在盾壳上的压力,如青海引大济湟工程。

③化学灌浆加固:利用灌浆泵压力将化学灌浆材料灌注到岩体裂隙中,使松散或破碎的围岩结成整体,提高围岩完整性,以有利于 TBM 施工通过,如山西万家寨引黄工程<sup>[346]</sup>。

#### (2)护盾 TBM 预防卡机技术

①扩大刀盘开挖直径:增大刀盘的开挖直径,可以给围岩提供更大的收敛空间,减少盾壳被卡的几率。

②降低盾壳和围岩之间摩擦阻力:在外伸缩盾和支撑盾前端盾壳上半圆钻若干个注脂孔,连接 1 套气动油脂泵和分配阀系统,向盾壳和围岩之间注入廉价油脂或其他润滑材料,以降低盾壳和围岩之间的摩擦因数,从而降低推进和换步时的摩擦阻力。

③采用单护盾掘进模式掘进:在软弱围岩破碎带宜采用单护盾模式掘进,以减少撑靴挤压对围岩的扰动,减少尾盾的清渣量,提高管片安装速度,快速通过软弱围岩。

### 3.3.8 TBM 长距离出渣运输技术

TBM 施工掘进速度快,单位时间出渣量大、运距长,要求具有稳定、高效的出渣系统与 TBM 配套。大伙房输水工程每台 TBM 掘进距离长达 20 km,在比较机车运渣和连续皮带运渣方案后,选定连续皮带运渣方案,这在中国也是首次应用。工程在实施过程中,TBM 掘进多次突破 1 km 的月进尺<sup>[380]</sup>。兰渝铁路西秦岭隧道 TBM 掘进长度 19.8 km,采用连续皮带运输模式出渣,皮带桥采用 2 种支撑方式,在 TBM 掘进段采用洞壁三角固定支架技术,在 TBM 预备洞段采用竖向固定支撑技术<sup>[381]</sup>。

### 3.3.9 TBM 施工测量技术

TBM 测量系统是一种全新的测量模式,表现在

对隧洞掘进的指导方面。该技术采用 GPS 精密定位技术,布设 GPS 全面网进行测量,建立工程坐标系,确保施工控制网测量精度和隧洞高精度贯通。TBM 测量技术最早成功应用于秦岭隧道<sup>[382-383]</sup>,并在大伙房水库输水工程中进一步的改进,在国内外没有现成规范的情况下,合理地比照相应的规范,以确定本工程测量等级<sup>[384]</sup>。

### 3.3.10 TBM 支护技术<sup>[385-387]</sup>

#### (1)衬砌与 TBM 掘进同步技术

国外采用敞开式 TBM 施工时,在掘进贯通设备拆解后再进行混凝土二次衬砌,施工工期长。中天山隧道采用矿车运输实现开挖与衬砌同步施工后,接着西秦岭特长隧道实现了皮带运输条件下的开挖与衬砌同步,攻克了施工工期长这一世界难题,其主要技术为在台车和台架之间设置具有纵向自由度的伸缩台架代替皮带机支撑装置,实现在 TBM 掘进、皮带机运行、机车通行的同时进行混凝土浇筑的同步衬砌,且在 TBM 正常掘进的情况下,实现皮带机三角之间的拆装、台车台架的行走以及台架的伸缩。

#### (2)复合衬砌施工技术

在内层衬砌施工时,为了实现快速施工,秦岭隧道利用自制的穿行模板台车,和 1 套与模板台车相结合的衬砌施工工法,实现了衬砌的快速施工,创每天衬砌 34 m 的中国最高水平。

#### (3)管片拼装技术

护盾式 TBM 一般采用管片衬砌,其拼装技术与盾构隧道管片拼装技术相同,控制盾构掘进姿态、加强人工检测、严格控制注浆量等,是保证管片拼装质量的关键技术。但是在 TBM 卡机情况下,一般需进行 TBM 脱困施工,即将刀盘或盾壳周围围岩应力释放,解除其约束,这样 TBM 通过该段进行管片安装时的周围空间将比 TBM 正常掘进时大,在安装管片时若不及时将管片背后充填,将会出现较大的错台和间隙。为了防止管片安装失稳,管片脱出盾壳后必须及时进行背后回填。

### 3.3.11 存在的问题及建议<sup>[388-390]</sup>

近年来,中国的 TBM 制造及应用技术取得了很大进步,但还存在许多问题,同时也远远不能满足中国规模宏大、高速增长的工程建设需求。

(1)中国地域广阔,地形、地质条件十分复杂。在隧道工程设计中人们对地层认识的不确定性往往是 TBM 技术使用的最大障碍。现有的 TBM 技术对地层的适应能力和对突发灾害的防御能力仍有很

大不足,限制了它的使用范围。

(2)中国在TBM技术研发方面力量远远不足,缺乏高素质科技人才队伍。TBM设备及关键部件仍主要依赖从国外进口,价格昂贵,而中国建筑行业工程造价普遍较低,工程施工单位对采用TBM施工没有积极性,这种状况不利于TBM技术的发展。

(3)大量工程实践表明,护盾式TBM卡死现象很多,如在台湾雪山隧道、中国引大济秦隧洞、引黄入晋工程、昆明掌鸠河隧洞等工程中都出现过盾构卡死现象。建议在以后的工程中采用敞开式TBM,其优点是:灵敏度高,调向精度可控制在 $\pm 30\text{ mm}$ 以内;能够及时对不良地层进行支护,不易塌方;衬砌随荷载调整,造价低;在TBM上可加装锚杆机、混凝土喷射机、钢拱架安装机以及超前钻机,而且可调整刀间距、推力、扭矩及撑靴支撑力等参数,以适应软岩、硬岩的切削特性。

(4)目前中国盾构TBM刀具种类多、产品多、性能差异大、无统一标准,技术创新能力较低,建议进一步加快盾构TBM刀具行业标准化、系列化和产业化。

### 3.3.12 TBM新技术展望<sup>[337,388-391]</sup>

随着TBM技术在中国隧道领域的广泛应用,TBM法以其安全、环保、快速的优点必将得到更广泛的应用,TBM新技术也将不断发展。

(1)TBM应能更适应不利的地质条件。从发展趋势来讲,TBM的设计将趋向于两极化,即既要设计能适合复杂地质条件使用的、费用高的多功能TBM,又要生产用于地质条件简单、廉价的TBM。

(2)目前公路隧洞因多车道的需要,要求大断面,预计今后TBM将更趋大直径化,因此,大直径TBM的设计制造和部件运输组装是其技术上的主要趋势之一。

(3)随着科技进步,机电液、计算机、变频技术等大量地应用到TBM上,给TBM的故障诊断等提供了很好的基础,同时也逐步提高设备利用率和完好率,以此不断提高掘进速度。

(4)全自动化TBM、微型TBM研制和应用技术也是今后发展的方向。

(5)TBM导洞超前再扩挖方法,可进行超前地质预报,同时超前导洞形成的掏槽孔可提高钻爆法扩挖进度、光面爆破效果和减少爆破震动速度等。

### 3.4 沉管工法(同济大学丁文其老师提供初稿)

19世纪50年代以后,随着科学技术的进步及施工经验的增长,沉管施工技术难题逐步被克服,沉

管隧道已成为跨越江河湖海的重要通道。沉管施工主要工序包括:干坞开挖、管节制作并制作临时封闭结构、基槽浚挖、地基处理、管节拖运沉放、管节连接止水及回填覆盖等。沉管隧道施工作为典型的预制工法,其施工阶段的平均风险不亚于运营阶段,而随着港珠澳大桥沉管隧道工程、南昌红谷隧道工程为代表的一系列重大项目的陆续兴建,系统总结沉管隧道的施工技术更是迫在眉睫。

沉管隧道施工技术的发展具有以下特点<sup>[102,392-393]</sup>:①管节制造材料的变化,由钢筋混凝土取代钢材;②管节截面形式的变化,高空间利用率的方形取代圆形;③管节在横断面尺寸和纵向总长度2个维度上不断增大;④适用范围扩大,由传统内河向复杂海洋环境扩展;⑤施工过程持时更长,工序更为精细且工法日趋复杂;⑥结构对环境因素和施工误差(如超大管节预制精度、高水压条件下管节的浮运对接、隧道基底软土地基不均匀沉降控制等)更为敏感,力学行为特性更为复杂,施工误差控制难度显著增加,施工误差不良效应问题更为突出。

对复杂海洋环境下超大管节沉管隧道的基础设计与施工仍需进行深入系统的研究,总结沉管隧道常用的地基处理方式,分析各种方式对基床系数的影响,并结合实际地勘资料,建立较为精确的基床系数计算方法,为选择适宜的基础处理方法奠定基础。在此基础上进一步引入工厂化、标准化、流水化的生产理念,结合工厂化预制管节高性能混凝土自身特点,建立管节制作全过程中的温度场和应力场分布规律模型,是实现管节预制过程中裂缝控制的基本前提。最后,建立实时控制高精度测量定位方法,确保管节拖运及水下对接的万无一失,是沉管隧道精细化施工的有力保障。复杂海洋环境下超大管节沉管隧道地基处理与基槽开挖、管节制作、测量定位和浮运沉放等多阶段的施工控制是目前的主要研究方向。

#### 3.4.1 地基处理

沉管隧道基础处理方法较多,选择的基本依据主要有:①沉管段的工程地质条件、抗震设防要求等;②沉管隧道设计资料(纵断面及管节底宽等);③航道通航及封航要求;④隧道所在地充填料供应条件及施工机械的配备条件;⑤工期及经济性要求等。实际工程设计应根据上述要求按照经验、模型试验以及现场试验综合确定适宜方案。

理论研究方面,朱令等<sup>[392]</sup>认为基床系数是利用荷载-结构法求解工程问题的关键。为研究具有

变异性成层土地基的等效基床系数的分布特征及统计参数,基于最终沉降量一致原理推导出了以压缩模量为参数的等效基床系数计算方法,利用 Monte Carlo 方法考虑地层的变异性。在此基础上,借助 MATLAB 软件实现求解,并将计算结果应用于港珠澳沉管隧道工程中,建立了基于荷载-结构法的二维分析模型。

王吉云<sup>[393]</sup>依托港珠澳大桥沉管隧道工程实例,详细讨论了粗挖、精挖及清淤的基槽开挖方法及设备,以及碎石刮铺处理基础的方法及设备。徐干成等<sup>[394]</sup>详细讨论了压砂法和压浆法的机理、有关参数的计算确定及设计和施工问题,并对沉管隧道基槽的淤泥沉积及基沉降问题也进行了分析。张志刚等<sup>[395]</sup>在分析沉管隧道地基处理中两端陆域边界条件、纵横向荷载分布、地层受力特点、差异沉降控制及施工偏差等主要影响因素的基础上,对散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基、刚性桩复合地基在沉管隧道地基处理中的适用性进行了多项目对比分析,总结出了各种复合地基处理方法的适用条件,并提出了沉管隧道采用复合地基方案时设计计算中应引起高度重视的几个关键问题。张庆贺等<sup>[396]</sup>对目前国内外沉管隧道基础处理的主要方法进行了对比分析,给出不同方法在解决基槽稳定性、控制隧道沉降中的效果。

除了探索改进实际施工技术外,部分学者也采取模型试验的手段,对具体地基处理方法的理论机理进行了研究。袁伟耀<sup>[397]</sup>以变截面沉管隧道为依据,通过 1:1 的物理模拟试验对压砂法的砂积盘形成机理、扩散规律、压力大小和砂积盘密实度进行了分析。Li 等<sup>[398]</sup>开展了砂流法用于沉管隧道地基处理的足尺试验,试验结果表明模型底部和砂垫层间存在半闭合区域,该区域的存在可有效减小基础差异沉降。以舟山沈家门港海底隧道工程为背景,宋光猛等<sup>[399]</sup>采用 1:10 相似模型试验方法系统研究了在设定注浆压力条件下浆液流动特性以及不同垫层粒径、不同垫层坡度和不同淤泥厚度的影响;并在此基础上根据相似原理将模型试验结果合理拓展,建立了实际工程条件下基槽注浆扩散半径、注浆压力与时间的相关关系,可为沉管隧道工程设计和施工提供依据。沈永芳<sup>[400]</sup>采用等比例模型试验研究了沉管隧道基础注浆无损监测方法的适用性和可靠性,提出了快速、简便、准确和经济的注浆充填效果无损探测方法。

另外,沉管隧道地基土的液化也是地基处理中

需要关注的一个问题。由广明等<sup>[401]</sup>采用数值模拟方法研究了高速列车通过沉管隧道时对沉管地基的影响,分析了沉管地基在高速列车作用下的液化可能性。冉申德等<sup>[402]</sup>采用二维动力有限元模拟方法,分析了地震荷载作用下沉管隧道地基的动力响应,得到了地震荷载作用下地基土的动剪应力分布;通过对试验资料的分析,得到了沉管隧道地基砂垫层的抗液化剪应力,据此分析了沉管隧道地基土在地震荷载作用下的液化可能性,并提出了相应的抗液化措施。

### 3.4.2 管节制作

管节预制是沉管隧道施工的主要环节,预制管节的质量直接关系到浮运沉放及使用寿命。管节预制的重点和难点主要包括以下几点<sup>[403]</sup>:①预制管节的几何尺寸误差控制。几何尺寸误差不仅会引起浮运时管节的干舷及重心变化,增加管节浮运沉放的施工风险,还会影响钢端壳的加工及安装精度,增加管节间的对接难度,甚至影响接头防水效果。②混凝土配合比设计及生产。混凝土的容重变化会直接影响管节的干舷高度,而混凝土的质量是保证管节预制综合质量的根本,也是提高管节结构的防水性能和防裂抗渗性能的关键环节。③混凝土的施工工艺及裂缝控制。采用合理的施工工艺和技术措施,可减少或避免裂缝特别是贯穿性裂缝的出现。

袁勇<sup>[404]</sup>对外环沉管隧道在预制过程中的温度场和应力场进行了数值仿真分析,得到了沉管隧道温度场和应力场的分布及发展规律。罗垚等<sup>[405]</sup>针对工厂法沉管预制施工工艺进行了沉管结构温度场和应力场的仿真分析。采用室内力学和热工试验得到混凝土材料力学参数和热学参数,考虑预制全过程各阶段变化的力学边界条件和热学边界条件,应用有限元方法建立仿真模型,得到了沉管结构温度场和应力场的发展规律。梅甫良等<sup>[406]</sup>对沉管隧道管段施工全过程进行了仿真计算,得出了管节施工期的温度分布及变化规律,分析了有无保温层时管节温度场的变化规律。韩卫东等<sup>[407]</sup>采用有限元方法按照实际浇筑顺序对沉管管节制作的全过程作了数值仿真,分别分析了夏季和冬季施工条件下管体混凝土的温度场分布及其变化规律。

陆仁超等<sup>[408]</sup>基于工厂化预制施工流程,模拟分析了沉管节段早龄期性能的发展过程;进而引入开裂风险系数,运用敏感性分析方法分析了沉管隧道预制过程中带模养护、室内养护和室外养护 3 个不同阶段中入模温度、模板形式、室内外养护温度等

因素对沉管节段早期裂缝控制的影响。在工厂化预制过程中应在材料制备阶段对材料配比、带模养护阶段对入模温度和室内养护温度进行科学控制。

陈俊生等<sup>[409]</sup>基于大型沉管隧道的节段式管节设计施工理念,以厄勒海峡沉管隧道管节的工厂化制作为工程背景,对工厂化预制技术的基本原理、场地布置、工艺流程以及工厂化预制所涉及的模板工艺、混凝土浇筑及管节顶推等关键技术点进行了介绍。工程实践表明该方法具有占地少、经济环保、施工周期短、质量可靠性高、全天候施工等优点,能大大提高管节的制作速度与质量,降低工程成本。

### 3.4.3 管节沉放对接

沉管法隧道施工中管节的沉放是整个施工过程中非常重要的一步,由于是水下施工,难度较大,又要求作业时间短,所以其不仅受气候河流自然条件的直接影响,还受到航道、设备条件的制约。为了使得管节能够准确地沉放到设计位置,需要对管节沉放过程中管节特征点(端面特征点等)的位置进行实时监测。

高卫平<sup>[410]</sup>基于常洪隧道和上海外环线隧道水利模型试验结果,分析了浮运时管段所受水阻力的规律,归纳总结了不同环境参数(流速、水深、波浪)对管节阻力的影响程度,从而确定了拖运时所需的拖运力及水流产生的横向力,为选用合适的拖轮提供了依据;同时还分析了管段沉放过程中所受水阻力的规律以及波浪、水流及沉深等环境因素对管段纠偏缆绳张力的影响规律。

何青<sup>[411]</sup>通过构造数学模型,结合施工测量,提出了在沉管隧道施工中采用计算机控制全站仪的实时测控方法,解决沉管沉放的问题。其利用全站仪观测数据,通过不同坐标系之间的坐标转换,实时计算沉管管体特征点的坐标以实现对沉管沉放过程实时监测。

吴瑞大等<sup>[412]</sup>以国内外已建沉管隧道相关施工技术为依托,对常用管节沉放方法进行了对比分析。阐述了常用管节沉放方法如浮吊法、浮箱沉吊法、升降平台法和抬吊法的施工流程及技术措施,并对这4种管节沉放方法的优缺点进行了综合比较,给出了每种管节沉放方法的适用范围,为沉管隧道管节沉放方法的选择、工艺优化及新技术研究提供了参考依据。潘永仁等<sup>[413]</sup>以上海外环沉管隧道管段沉放对接为例,介绍了“双三角形”布置锚缆管段平面定位和双浮箱四点竖向吊沉系统及设备,简述了管段沉放对接工艺流程及测量定位技术。

海河隧道是中国北方首次采用沉管法工艺施工的隧道工程,实现了沉管管节在水中的精确对接。郭建文<sup>[414]</sup>针对沉管的浮运、沉放、对接等关键问题进行了重点分析与阐述。海河隧道沉管施工过程中,采用岸拖方式将沉管管节依次浮运至沉放区域;采用浮驳吊沉法工艺进行管节沉放;利用全站仪、GPS、倾角仪实时监控并调整管节空间位置及姿态;利用水力压接将GINA止水带压缩,完成沉管对接。施工结果表明采用岸拖法浮运,浮驳吊沉法、水力压接技术进行沉管对接是可行的,技术上是可靠的。

此外,以声纳法为代表的相对定位法,因其具有测量时无需测量塔,测量精度不受隧道长度影响,且能够快速高效地实现管节对接端的精确定位等优势,应用也日渐广泛。任朝军等<sup>[415]</sup>从管节形态、仪器位置标定和现场定位测量等几个方面对声纳法管节沉放实时定位测量技术进行了分析研究,并根据超声波的传播原理和声纳法在国外沉管隧道工程中的应用实例,分析了各种因素对声纳法定位测量精度的影响,给出了声纳法管节沉放实时定位测量的精度。

### 3.5 明挖法(北京工业大学张明聚、郭雪源老师提供初稿)

明挖法具有施工方法简单、技术成熟,施工作业面大、施工进度快、基坑支护结构受力明确和造价低等优点,是地下空间开发初期广泛采用的施工技术。明挖法的支护、支撑类型不断丰富,地下水控制等关键技术日趋完善;钻爆法、浅埋暗挖法、TBM工法、盾构法等施工技术也开始广泛应用;隧道施工方法的选择开始具有了系统性、多样性和互补性的特点。在隧道及地下工程施工技术百家争鸣的今天,明挖法仍然在浅埋隧道施工领域占据重要地位。

明挖法施工主要工序包括:基坑(边坡)支护、土方开挖、防水工程及主体结构施工等。其中,与其他地下工程施工方法相区别的关键和特色施工技术是围护结构施工技术和支撑体系施工技术。

因此,在简述明挖法施工原则基础上,重点对围护结构和支撑体系施工技术作详细介绍。

#### 3.5.1 施工原则

明挖法施工时,应从技术、安全、经济、环境等方面进行综合对比分析,其施工原则如下<sup>[5]</sup>:①做好地下水的处理;②合理选择围护结构形式;③合理选择围护结构的入土深度;④合理选择支撑体系;⑤控制开挖的时空效应;⑥严格控制基坑周围超载和动载

的影响;⑦基坑底部软弱地层的加固;⑧底板快速封闭;⑨监测量测和信息化施工;⑩控制基坑整体失稳和破坏的风险。

### 3.5.2 围护结构施工技术

#### 3.5.2.1 土钉支护施工技术

土钉支护技术是通过钻孔、插筋(管)、注浆、喷射混凝土面板等一系列工序,形成土钉与混凝土面板的复合挡土结构,实现土体加固的技术。一般适用于地下水以上或经降水处理后的杂填土、普通粘土或非松散性的砂土<sup>[5]</sup>。

20 世纪 90 年代,陈肇元等<sup>[416-418]</sup>编写了中国土钉支护的设计和施工方法的相关规程。随着对土钉支护机理认识的加深,土钉形式不断创新,并开始与多种支护结构组成复合土钉支护技术,土钉支护应用范围不断拓展,如南京玄武湖隧道工程垂直支护段采用自钻式土钉与 SMW 机械施工止水帷幕相结合的复合土钉支护技术,梅西湖隧道基坑采用上部桩锚加下部土钉墙的支护型式,昆明南站地铁基坑支护采用了玻璃纤维土钉。

目前对于土钉支护技术的研究已取得丰硕的研究成果,但土钉支护结构的内力、变形与混凝土支护面层所受到的土压力、土钉长度、最优土钉间距的关系等问题仍然没有得到很好的解决,有待进一步深入研究。

#### 3.5.2.2 锚索支护施工技术

锚索支护结构是围护结构与外拉系统相结合的一种深基坑组合式支护结构。锚索由承载体、钢绞线、灌浆体、外锚头等组成,其锚固在稳定土层中的钢绞线提高的抗拔力平衡维护结构将受到土压力及其他荷载的作用。一般适用于较密实的砂土、粉土、硬塑到坚硬的粘性土或岩层中的深、大基坑。对形状复杂、开挖面积较大而设置内支撑比较困难的基坑应考虑采用;对存在地下埋设物而不允许损坏的场地不宜采用<sup>[5]</sup>。

#### 3.5.2.3 灌注桩施工技术

灌注桩是指在地面以下竖直开挖出一定直径的桩孔,向桩孔内吊装钢筋笼并灌注混凝土形成钢筋混凝土桩体。多个桩体依次排列构成抵抗土压力的抗弯承载结构。根据成孔方法的不同,灌注桩分为人工挖孔桩和机械钻孔桩,机械钻孔桩有干法钻孔灌注桩、泥浆护壁钻孔灌注桩和钻孔咬合桩。人工挖孔桩适用于无地下水或地下水较少的粘土、粉质粘土,含少量的砂、砂卵石、砾石的粘土层和全、强风化地层,特别适合于黄土层使用,深度一般控制在

20 m 左右。干法钻孔灌注桩适用于地下水位以上的粘性土、砂土、人工填土等软土地层。泥浆护壁钻孔灌注桩适用于地下水位较高的土层、砂砾石地层及软岩。钻孔咬合桩一般适用于地下水位较高的粘土、粉质粘土、砂粘土、砂砾石地层<sup>[5]</sup>。

随着灌注桩施工技术不断发展成熟,出现了多种新的结构形式和施工方法,在基坑工程中的应用逐渐增多。如沈阳地铁过新开河段区间隧道明挖基坑采用钻孔灌注桩围护结构,兰州地铁 1 号线世纪大道车站深基坑工程采用旋挖咬合灌注桩工法。

诸多学者及工程技术人员对灌注桩的应用十分重视,通过结构形式和施工方法的一系列创新对该技术进行完善,做了大量的监测和研究工作,钻孔灌注桩的作用机理上和施工工艺方面取得了许多研究成果,得出了一些可用于工程设计与施工的结论。

#### 3.5.2.4 水泥搅拌桩施工技术

水泥搅拌桩是利用水泥干粉或水泥浆作为固化剂的主剂,并加入一定量的外加剂,通过深层搅拌机机械上带有叶片的搅拌头在地基深部就地将软土和固化剂强制拌和,对土体进行改良形成土壤水泥墙。水泥搅拌桩适用于软弱地基处理,对于淤泥、淤泥质土、粉质粘土、粉土及饱和素填土等地基承载力标准值低于 140 kPa 的地层,搅拌桩的强度也较低,适合地层加固和止水,不适合作为挡土结构,一般需和其他挡土结构配合使用<sup>[5]</sup>。

上海和天津地区的大量工程实例说明超深三轴水泥土搅拌桩技术具有可行性和可靠性。但中国水泥搅拌桩施工工艺仍存在问题,于是研发了五轴水泥搅拌桩新技术。

诸多学者采用理论分析、室内试验等研究方法对搅拌桩的工作性状开展了大量研究,多轴搅拌桩等新工艺的提出更好地发挥了该围护形式的技术优势,但其设计计算理论还不成熟,复杂地层条件下施工方法和质量检测等方面有待深入研究。

#### 3.5.2.5 钢板桩施工技术

钢板桩施工技术是指将预制的钢板桩通过捶打法、振动打入法、静力压入法或振动锤击法打入土层,锚索或支撑承担土压力的基坑围护技术。钢板桩是由 U 形、Z 形或直腹板式条形钢板经由边缘锁口或钳口咬合而成的连续钢板墙结构。一般适用于含水量较大的填土层、粉土、粘土、砂土等软地层<sup>[5]</sup>。

钢板桩形式的基坑围护结构,由于质量轻、施工速度快和可回收利用等优点,围堰和非水下基坑支护中均有较多应用,在工法的改进和围护结构变形

分析方面取得了成果。比如厦门海底隧道右线通风竖井工程采用环形钢板桩施工技术,南京宁南地区地下隧道工程采用拉森钢板桩支护。

#### 3.5.2.6 地下连续墙施工技术

地下连续墙是利用挖槽机械沿着基坑的周边,在泥浆护壁的条件下开挖一条狭长的深槽,在槽内放置钢筋笼,然后用导管法在泥浆中浇注混凝土,如此逐段进行施工,在地下构成一道连续的钢筋混凝土墙壁。通常条件下,基坑工程中地下连续墙适用条件归纳起来有以下几点<sup>[5]</sup>:①基坑开挖深度大于10 m;②软土地基或砂土地基;③基坑周围有重要的建筑物、地下构筑物;④围护结构与主体结构相结合共同承受上部荷载,且对抗渗有严格要求;⑤采用盖挖逆作法施工,围护结构和内衬形成复合结构的工程。

在地下连续墙应用过程中,开发了许多新设备、新技术和新材料,并广泛地用作深基坑工程的围护结构。徐杨青等<sup>[419]</sup>结合对武汉地铁2号线循礼门地铁车站嵌岩地下连续墙的实际隔渗效果分析,提出了“纵向平移集中法”处置防渗墙渗漏点的方法。

地下连续墙结构在基坑工程中应用实例已有很多,但是其计算理论及方法的发展还不能满足工程实践的要求,还需在应用中不断总结工程经验,探索地下连续墙内力及变形的变化规律。

#### 3.5.2.7 双排桩施工技术

双排桩是由2排平行的钢筋混凝土桩、前后桩连系梁以及压顶梁组成的空间组合围护桩体系。可通过改变前、后排桩间距和排列形式调整整体刚度,适用于常规围护结构形式刚度过小不能满足基坑变形控制要求,支护结构不能架设支撑体系等情况,还能起到挡水的作用。

双排桩施工技术随着中国地下工程建设的发展,出现了应用于更多复杂地质和特殊施工环境基坑工程的需求。吴刚等<sup>[420]</sup>提出了一种新的双排桩支护结构设计计算模型,白冰等<sup>[421]</sup>建立了考虑空间效应的深基坑双排桩支护结构计算模型,编制了设计计算软件。

学者们针对实践中产生的问题总结施工经验,不断更新施工技术,对桩身受力和桩身侧移等关键问题进行分析,取得了丰硕的理论成果。

#### 3.5.2.8 微型钢管桩施工技术

微型钢管桩是在微型桩和钢管桩的基础上发展而来的一种施工技术。近年来,微型钢管桩作为基坑超前支护技术应用于特殊地形、地质条件下基坑

支护和基坑加固处理工程中。曹建等<sup>[422]</sup>采用了超前微型钢管桩加土钉喷锚支护的施工方法,成功地解决了紧邻基坑的围墙的垂直、水平位移控制等问题。朱守祥<sup>[423]</sup>对太中银铁路地震液化带桥梁深基坑开挖的施工技术进行了研究,提出了真空轻型井点降水、钢管桩围堰和两者相结合的方案,解决了太中银铁路地震液化带桥梁深基坑开挖施工过程中可能出现的喷砂冒水和滑坡等灾害。刘红军等<sup>[424]</sup>在青岛岩石地区土岩组合的一个超深基坑工程中,采用局部放坡,结合钢管桩预支护的吊脚桩加锚索支护体系,有效地控制了基坑及周围土体变形,减少了工程造价。王海平等<sup>[425]</sup>以青岛地铁车站设计为例,探讨岩石地区明暗结合的车站设计特点,结合周围环境保护要求确定了明挖基坑的钢管桩加锚杆和喷锚不对称的支护形式。朱丹晖等<sup>[426]</sup>将软件计算结果与现场施工的反馈进行对比分析,认为吊脚桩加超前微型钢管桩支护体系是适用于青岛上软下硬地层的基坑支护形式。

#### 3.5.2.9 SMW 施工技术

SMW(Soil Mixing Wall)法也称为柱列式土壤水泥墙工法,即利用多轴长螺旋钻机在土壤中钻孔,达到预定深度后,边提钻边从钻头端部注入水泥浆,将其与地基土反复混合搅拌,在原位置上建成一段水泥墙,然后再进行第2段墙施工,使相邻的土壤水泥墙彼此连续重叠搭接即可做成连续的桩墙。一般可在含水量不大的粘性土、粉土、砂土、砂砾土等软土地层中应用。

该技术在中国经不断完善和发展,在上海地铁2号线等基坑工程中实现了H型钢的回收,确保了基坑稳定及周围建筑物和管线的安全。李冰河等<sup>[427]</sup>针对杭州天际大厦基坑工程SMW围护结构进行了监测,分析得出了软土地区采用SMW围护结构加内支撑方式施工深、大基坑的工程经验。鲍立楠等<sup>[428]</sup>对天津站交通枢纽工程五经路隧道SMW工法支护的基坑进行了系统的观测,分析了开挖与支撑安装的空间效应对围护结构内力与变形的影响。杭州庆春路过江隧道北岸基坑主要采用SMW工法加钢支撑的围护结构体系,张忠苗等<sup>[429]</sup>通过在基坑开挖过程中的监测发现,围护桩的最大水平位移与开挖深度及时间密切相关,地下水位的变化能很好反映围护桩的止水效果,可作为判断基坑是否出现漏水的指标。楼春晖等<sup>[430]</sup>通过对采用SMW工法围护体系支护下的超长基坑实测分析,认为SMW围护基坑中围护桩最大侧向变形与开挖

深度的比值在 0.005 左右;SMW 围护刚度在不及地下连续墙的条件下可达到 1.4~2.0 的基坑抗隆起安全系数;双排 SMW 围护桩比单排围护能减小侧向变形,但幅度仅在 10%~20%。

SMW 施工技术开始在基坑工程中大范围应用,也取得了丰硕的经验性成果,但在设计理论和施工实践等方面仍有许多需要改进和深入研究的工作要做。

#### 3.5.2.10 旋喷桩施工技术

旋喷桩施工技术首先利用钻机钻孔,然后将旋喷头钻置孔底高速喷射水泥浆液破坏土体,边提升边搅拌使浆液与土体充分搅拌混合,在土中形成水泥浆和土的复合固结柱状体,从而对土体进行改良,一般分为单管旋喷、双管旋喷和三管旋喷。旋喷桩适用于淤泥、砂性土、粘性土、粉质粘土、粉土等软弱地层,土层的标贯值  $N$  在 0~30 的淤泥、砂性土、粘性土等含水层中,效果尤其明显。

20 世纪 70 年代中国从日本引入高压全喷技术,后经推广应用于基坑工程支护体系中。朱爱国等<sup>[431]</sup>结合深基坑工程支护设计,提出了对旋喷桩的工艺进行改进后可以有效地提高止水帷幕可靠性的结论。汪小超等<sup>[432]</sup>结合深圳地铁竖井的施工,发现在降水条件下,水泥旋喷桩既有效阻滞了地铁竖井外地下水,又充分利用了水泥旋喷桩改良的基坑边坡土体,保证了竖井施工的安全。刘全林<sup>[433]</sup>通过工程实践,研究介绍了旋喷搅拌加劲桩这种新型的基坑主动支护技术,提出了加劲桩在淤泥质软土基坑中成功应用的关键,建立了加劲桩的加固和支护刚度计算方法。胡海英等<sup>[434]</sup>以深圳平安国际金融中心大厦为例,介绍了在含有透水层地质时,所采用的高压旋(摆)喷桩加袖阀管注浆加挂网喷射混凝土的止水方案效果良好。刘凤洲等<sup>[435]</sup>研究了天津地铁车站深基坑三轴高压旋喷桩施工对邻近历史保护建筑影响,利用各阶段沉降监测数据重点分析三轴高压旋喷桩围护结构不同施工工序对建筑物沉降的影响。

旋喷桩施工技术具有施工简便、施工占地及净空面积小等特点,在施工场地受限情况下广泛采用。但是旋喷桩承载能力低,主要起到防渗止水的作用,提高旋喷桩在基坑工程中的适用性,对旋喷桩的作用机理进行研究,改善桩体的支护能力具有重要的工程意义。

#### 3.5.3 支撑体系施工技术

基坑的支撑体系由内支撑体系和外支撑体系组

成,外支撑体系包括锚索、锚杆等形式,内支撑体系由围檩(冠、腰梁)、内支撑和立柱等构成。

##### 3.5.3.1 内支撑施工技术

当基坑开挖深度比较大,基坑所处地域的地质条件和周边环境较为复杂,或对基坑及周边变形要求比较严格时,需要在基坑内部设置内支撑体系与围护结构配合使用。

内支撑体系有全部采用钢支撑或全部采用混凝土支撑的,也有部分采用钢支撑、部分采用混凝土支撑的。从支撑构造及施工工艺来看,钢支撑多采用大直径圆形薄壁钢管。钢重量轻,易吊装,简便易行,但钢支撑与钢围檩组成的内支撑体系整体性较弱,刚度较小,需预加轴力来控制基坑变形,跨度较大时易失稳脱落。钢筋混凝土支撑采用现场浇注方法成型,具有刚度大,变形小的显著优点,但该种支撑需要现场浇筑,浪费工期;待基坑回填时,混凝土支撑被废弃在地层中永久占用地下空间并造成材料浪费;如需拆除,也费工费力,不能重复利用,而且拆除作业还会产生震动、噪声和粉尘,污染环境。

针对内支撑的结构形式很多学者作了一系列创新性研究。在进行主体结构施工时,换撑、拆撑是施工中的技术难点。李守彪等<sup>[436]</sup>结合软土地区某地铁半逆作法基坑工程,在施工中进行动态监测,发现该地区钢支撑轴力的变化规律为支撑轴力与支撑间距、施工步骤、支撑形式、开挖深度和开挖速度等因素有关;第 1 道钢筋混凝土支撑刚度较大;第 2 道支撑施作较早可减小最大支撑轴力值。近年来基坑事故频发,影响恶劣,关于基坑事故的研究较多,薛丽影等<sup>[437]</sup>分析了深基坑工程的主要破坏形式和诱发因素,并提出北京地区基坑工程中存在的主要问题,即钢腰梁与支护桩之间未设抗剪蹬,斜撑与牛腿间未焊接。钢支撑活络头是设置在支撑端部的连接构件,是钢支撑的薄弱部位,传力不可靠,易造成偏心受力,导致脱落事故,张明聚等<sup>[438]</sup>设计研发了新型基坑工程内支撑抱箍式活络头。北京工业大学<sup>[439]</sup>提出了一种盾构竖井装配式钢管混凝土内支撑体系,矩形截面钢管内灌注轻质微膨胀混凝土并以法兰将两端密封形成封闭构件,以螺栓连接相邻构件形成钢管混凝土框架结构,提高了支撑承载能力,可实现内支撑的装配化施工。

对钢管混凝土内支撑结构的研究多处在一种新型结构形式的提出,还没有系统性研究成果的发表,有待深入。



### 3.5.3.2 锚索(杆)施工技术

锚索根据锚固形式的不同,可分为荷载集中型和荷载分散型锚索,荷载分散型锚索又分为拉力分散型和压力分散型锚索。其中,荷载分散型锚索能承担更大的荷载,压力分散型锚索能满足较高的防腐等级的要求。锚索施工技术对较大或形状不规则基坑的适应性较内支撑更强,但需要较密实硬质土层和很大地下空间作为锚固范围。

目前,预应力锚索(杆)种类繁多,施工技术越来越先进,新工艺、新材料、新设备、新标准等也得到了比较充分的发展与完善。但对锚索(杆)锚固性能的研究还不完善,大多数只能凭实践经验和工程类比法来确定锚固参数等,不能全面反映边坡岩体锚固性能的力学行为本质,难以为预应力锚索(杆)施工技术提供坚实的理论支撑,在理论上定量研究岩体锚固的设计方法、力学效应和加固机理等方面需要进一步深化。

张明聚等<sup>[440]</sup>以美兰机场隧道为工程背景,研究发现拉力分散型锚杆在高地下水位的土层中也能正常工作;拉力分散型锚杆在粘土和粘质粘土中张拉预应力时,锚杆均产生较大的位移变形;在剧烈开挖时,若桩后土层不发生涌水涌沙,桩后土层主动土压力对锚杆轴力影响甚微,但发生桩后涌水涌沙后,桩后土层发生应力重分布,对锚杆轴力影响很大。锚索作为岩土工程的主要技术手段,同时也是地下空间的污染物,赵启嘉等<sup>[441]</sup>从作用机理、施工工艺成熟度、安全可靠性及经济效益等几个方面探讨了JCE锚索和U形钢绞线锚索等可回收锚索的工程意义,最后列举了可回收锚杆的工程应用实例。锚杆是黄土隧道的主要支护形式,宿钟鸣<sup>[442]</sup>从拉拔力作用下系统锚杆的受力特性和锚喷支护中系统锚杆中性点的轴力出发,以理论解为依据,提出了黄土隧道锚杆长度参数优化的必要性。锚索式悬浮隧道是水中悬浮隧道的主要支护形式,由于水流在锚索周围产生漩涡,使锚索涡激振动,发生疲劳破坏。罗刚等<sup>[443]</sup>指出锚索的长细比和密度是锚索涡激疲劳损伤的主要控制因素。

## 4 隧道运营环境与安全管理

### 4.1 运营环境

4.1.1 运营通风(长安大学王亚琼、王永东老师,兰州交通大学孙三祥老师提供初稿)

1919~1920年,美国在修建纽约市荷兰隧道

时,美国矿务局得到了大学和研究所的协助,对汽车CO排放量和人体对CO浓度的容许值进行了研究,并以此作为隧道通风计算的依据,这是历史上首次对公路隧道通风进行的研究,研究决定将 $400 \times 10^{-6}$ 作为CO的设计浓度,并以此算出所需要的通风量。1973年成立的空气动力学和隧道通风国际研讨会,每3年召开1次,提供平台以便于各国隧道通风方面的专家、学者展示自己的研究成果,大大推进了隧道通风技术的发展。1985年,日本关越隧道一线首次将纵向式通风应用于10 km以上的公路隧道,并通过编制的1套程序对关越隧道通风系统进行了模拟,验证了其通风系统的可靠性和实用性。此外,国外一些学者如Bring A, Chen T Y, Jang H M, Guian S K, Sambolek M以及Katolicky J等也在公路隧道通风领域进行了大量的研究。

中国公路隧道建设起步较晚,发展虽快,但公路隧道通风研究落后于日本和欧洲各国。20世纪90年代初,由西南交大、原兰州铁道学院等单位参与的“公路长大隧道纵向通风研究”课题基本解决了成渝高速公路上中梁山隧道和缙云山隧道的通风问题。在此隧道的修建中,汇集了众多国内外隧道专家,对隧道通风等重大难题进行了研究,最终决定采用纵向通风系统,为以后的隧道建设提供了成功经验。

重庆交通科研设计院、长安大学在隧道通风方面做了大量的研究,分别建立了中国最大和最长的隧道通风实验室。重庆交通科研设计院于1999年主持编写了现行的《公路隧道通风照明设计规范》,2014年主持编写了《公路隧道通风设计细则》。该规范和细则对隧道通风设计具有很强的指导意义,但鉴于1999年该规范编写时中国长大公路隧道建设刚刚起步,对于长大公路隧道的通风技术难点仍有许多问题值得探讨;2014年编写的细则则在通风技术难点、通风新技术、污染物控制浓度方面进行了很大的调整和完善,使之更符合中国公路隧道通风的需求。

隧道通风研究涵盖通风污染物浓度控制标准、通风方式的选择、通风控制模式、通风数值模拟、通风物理模型试验、现场通风测试分析、通风软件的开发与应用等,在许多方面均成果斐然。

#### 4.1.1.1 隧道通风污染物浓度标准研究

隧道通风标准主要指隧道内CO和烟雾(VI)的控制浓度,该浓度是保证司乘人员健康的基本要求。随着对隧道环境要求的提高以及汽车尾排质量的提高,CO和VI对隧道需风量的控制作用逐步降低,

氮氧化物对隧道通风的影响日益凸显。在污染物浓度标准研究方面,胡宇峰等<sup>[444]</sup>研究了隧道内的空气流动及污染物扩散问题,建立了隧道内空气流动及污染物分布的工程估算方法,研究表明使用不当的通风竖井方案反而会抑制隧道内污染物的扩散。叶蔚等<sup>[445-446]</sup>指出国内外标准对隧道内 CO 浓度限值的设定在计算方法和取值上都存在差异,并针对射流风机式、竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道 CO 浓度分布特性,基于差分形式的 CFK 方程,拟合了 2 类典型的纵向通风隧道正常运营 CO 浓度限值计算式。郭春等<sup>[447]</sup>针对公路隧道通风中 CO 和 VI 基准排放量折减率取值对远期需风量影响较大的问题,分析了机动车排放污染物组成、欧盟汽车排放标准限制值以及对机动车的排放规定,指出《公路隧道通风照明设计规范》所规定的 CO、VI 取值为 1%~2% 的年折减率偏于保守。王亚琼等<sup>[448]</sup>研究了隧道环境中氮氧化物对隧道通风的影响,根据不同国家隧道通风环境标准,综合考虑了车型、汽车质量、海拔、车龄等影响因素,结合 PIARC 的相关标准和计算模型,分析认为氮氧化物转化为二氧化氮的比值对隧道需风量影响较大,与稀释 CO 及 VI 的需风量相比,稀释氮氧化物的需风量为控制值。

#### 4.1.1.2 横向通风研究

国外通风研究历史较长,经历了较为完整的全横向通风研究、半横向通风研究。中国通风研究历史较短,横向和半横向通风研究和应用历史很短。20 世纪 80 年代初期的梧桐山隧道在中国首次采用横向式通风;20 世纪 80 年代中期,中国尝试半横向式通风,但采用该通风方式建成使用的山岭隧道不多。2001 年建成通车的二郎山隧道全长 4 178 m,采用的是半横向通风,其通风由设置在运营隧道与通风辅助隧道间的 18 个横通道提供新鲜风,将运营隧道中的污染空气通过隧道两端排出洞外。张祉道等<sup>[449]</sup>对等级公路隧道半横向通风应用进行了探讨,推导了半横向通风方式的应用公式并提出了一些改进意见。田沛哲等<sup>[450]</sup>对二郎山半横向通风的火灾控制模式进行了研究,隧道发生火灾时,通过控制通风系统的风机、横通道与平行导洞内的阀门,使着火点产生大于临界风速的强制气流,对隧道内烟气走向进行调节,从而达到控制火灾的效果。王亚琼等<sup>[451]</sup>研究了半横向通风送排风孔形状和大小对隧道通风的影响,建立了港珠澳大桥海底隧道半横向通风物理模型,分析了隧道内风量与风道内风量

的关系,得出了不同风孔大小对隧道及风道静压的影响规律。

#### 4.1.1.3 纵向通风研究

中国特长隧道多采用纵向通风方式,这与欧美发达国家的主流设计理念相吻合。从第 1 座采用全射流式纵向通风长度达 3 000 m 的中梁山隧道的成功运作,到以后相继修建的许多长大公路隧道都是采用纵向式通风或竖井分段纵向式通风。从 2000 年起长安大学先后主持了秦岭终南山公路隧道、雁门关公路隧道、龙潭公路隧道、夹活岩公路隧道、包家山公路隧道等数十座特长、长大公路隧道的通风方案设计和防灾救灾研究,这些研究极大促进了分段纵向通风理论的完善和通风方式的应用。在纵向通风研究方面,高孟理等<sup>[452]</sup>根据隧道射流通风原理和模拟试验结果,建立了通风系统的基本流动模式,对射流风机性能、射流特性、通风气流组织和通风效率等方面进行了阐述和分析,提出了射流通风系统优化设计的原则和方法。方磊等<sup>[453]</sup>对公路隧道竖井底部中隔板高度进行了物理模型试验研究,分析了不同风量和不同中隔板高度时能量损失的变化规律;同时对公路隧道竖井送排式纵向通风中排风孔与隧道轴向夹角进行了试验研究,分析了不同排风孔角度下的风速变化规律。蒋鹏飞等<sup>[454]</sup>通过模型试验对竖井送排式通风运营工况和通风风井部位的关键参数进行了研究。杨秀军等<sup>[455]</sup>通过对射流风机工作原理和隧道内流态进行分析,依据射流力学的有关原理研究了影响射流风机纵向最小间距的因素和计算方法。目前中国隧道运营通风以全射流风机、竖(斜)井、轴流风机、双洞互补多种纵向通风方式及其各种组合为主。中国已建的长度大于 5 000 m 的高速公路隧道普遍采用“通风井送排式+射流风机”组合纵向通风方式,其中以秦岭终南山公路隧道为典型代表。

#### 4.1.1.4 互补式纵向通风研究

双洞互补式通风是近几年研究较多并开始使用的一种新型纵向通风方式,该方式改变了传统的纵向通风把隧道左右洞割裂开的理念,把隧道左右洞作为一个有机整体来考虑,是一种全新的通风设计理念。

文献<sup>[456]</sup>、<sup>[457]</sup>中针对相邻 2 条上、下行隧道内通风负荷相差较大的特点,根据隧道通风基本理论,对这种新型的隧道通风换气方式——互补式通风进行了研究,给出了该方式在公路隧道纵向通风中的应用范围和具体的设计算法,并对互补式通风

的工程应用测试结果进行了分析研究。

双洞互补式网络通风方式尚处研究应用的起步期,通风及控制问题复杂。目前的研究均结合了具体工程的实际应用进行,主要针对适用条件及不同运营阶段的运营模式展开研究<sup>[458]</sup>。蒋学猛<sup>[459]</sup>通过需风量计算分析,给出了互补式通风的适用条件。针对不同运营期互补式通风运营模式,夏丰勇等<sup>[460]</sup>在编制模型计算程序进行分析计算的基础上,针对大别山特长公路隧道,提出了上坡隧道交通量不同时可采用的通风模式。基于该方法,王梦恕院士在2013年全国公路隧道学术会议上提出6 km以内的隧道可不设通风竖井或斜井。上述双洞互补式通风相关问题的研究均基于单向双车道开展,未考虑单向三车道及以上的情况。由于车道增加引起隧道断面面积增大,隧道内换气工况的需风量改变,因此双洞互补式通风的适用条件及运营模式有待进一步研究。

#### 4.1.1.5 特殊隧道工程通风研究

##### (1)高海拔公路隧道

鉴于高海拔地区环境特点,相关技术问题与现行规范有所不同,针对具体工程,从理论及技术参数等方面进行了综述。曹正卯等<sup>[461]</sup>基于实测气象数据,利用FLUENT软件对隧道内自然风进行三维数值模拟分析后认为,温度对隧道内自然风风速影响不大,对于不考虑斜井、竖井和横通道情况下的隧道内自然风计算,建议采用相关规范建议的理论公式计算,以提高计算效率。

鹧鸪山隧址区实测的VI海拔高度系数与海拔高度呈线性关系(海拔400~4 000 m),且VI海拔高度系数大于规范给出的取值;雀儿山隧址区实测的CO海拔高度系数和VI海拔高度系数均与海拔高度呈线性关系(海拔400~5 000 m),CO海拔高度系数小于规范给出的取值,VI海拔高度系数也大于规范给出的取值<sup>[452]</sup>。根据鹧鸪山隧道和雀儿山隧道的实测结果,李志厚等<sup>[462]</sup>对白茫雪山1#隧道(设计高程4 113.15~4 069.99 m)进行了需风量计算,结果表明需风量在运营近期与规范计算相等,在运营远期较规范计算小12%。对于高海拔区CO限值大于一般海拔的反常情况,其原因在于现行规范的CO浓度要求并非按CoHb饱和度10%取值。

高海拔公路隧道一般位于气象分隔带,根据已运营隧道监测结果,洞内自然风比较明显,二郎山隧道仅利用自然风即可满足通风要求。为此,周仁强<sup>[463]</sup>提出利用自然风节能通风。确定隧道洞内自

然风大小及方向,选取不同保证率,节能控制模式可按时段控制或实时控制。分时段控制即根据计算得到的自然风规律,将全年划分成不同的控制时段(例如月),每个控制时段按该时段内的最不利工况进行控制。实时控制是根据隧道内实时自然风风速情况,对通风设备实时控制。若将控制时段进一步细分可得到更好的节能效果,但需加强隧道通风控制。

鉴于西藏墨脱公路嘎隆拉特长隧道车型仅限于中小型客货车,总体交通量较小,计算出的CO、VI需风量远小于换气需风量。乔春江等<sup>[464]</sup>分析了海拔高度对CO浓度限值的影响,认为隧道两洞口形成2个不同的气候区,在气候条件最好的8~9月份,隧道洞口两端的温度、湿度、风向和大气压力等气候差异足以满足隧道的通风需求。即使隧道洞口温差、压差和风压等出现相互抵消的情况,导致洞内空气无法流动,隧道仍可通过交通管制的手段,利用隧道内行驶车辆的交通风达到隧道换气的目的,并针对可能出现的不利工况组合和隧道消防安全要求,提出了相应的机械通风和交通管制通风补充方案。

##### (2)沙漠隧道

针对沙漠隧道通风,杨宇翔等<sup>[465]</sup>设想通过结构构造的改变,利用自然风解决隧道通风问题,在半固定、固定沙丘组成的沙漠区域中,采用外露型和半掩型沙漠隧道,路线走向大致垂直风向时,结构可采用棚洞式,即在迎风面采用实体面,背风面采用柱结构,当路线走向大致平行风向时,采用隧顶开窗式构造。全掩埋型沙漠隧道通风,可参照山区公路长隧道通风方案进行。该设想仍需要进行相应的实地试验和观测予以验证。

##### (3)曲线隧道

Wang等<sup>[466]</sup>使用动态网格模型分析了不同半径的弯曲通道内,汽车引起的交通风力对通道内通风的影响。王峰<sup>[467]</sup>采用移动网格技术对直线和曲线隧道内行驶汽车的动态过程进行模拟,发现不同车道行车产生的交通风力的差别很小,在实际通风系统设计中可以忽略其影响;汽车在小半径曲线隧道内行驶时产生的交通风力差别较大,交通风力随着隧道半径的减小逐渐增加,对单向行车隧道通风非常有利;曲线隧道半径大于2 000 m时交通风力的大小与直线隧道的差别很小。汽车行驶时周围断面压力明显低于直线隧道,行车间距的增加有利于增大交通风,行车间距的增加和车速的降低将有利于提高隧道内汽车有效空气阻力系数。

对两螺旋曲线隧道射流风机的优化布置三维数值模拟和现场实测结果表明:风机组向隧道内侧(左侧)移动 0.5 m 时,风机升压折减系数明显提高;风机组向隧道外侧(右侧)移动时,风机升压折减系数明显降低;风机组间距为 2.4 m,并向隧道内侧移动 0.5 m 时,风机升压折减系数最高。在满足隧道建筑限界的前提下应尽量将风机组安装于远离拱顶的位置,以提高风机升压折减系数。射流风机组安装距离应大于 100 m。

距入口 600 m 后断面风速分布基本稳定,曲线隧道沿程阻力系数基本保持不变。

曲线隧道有待进行更全面的现场实测及分析,包括不同半径曲线隧道内断面风速分布规律,隧道沿程阻力变化规律和交通风力变化规律,污染物浓度分布规律等,以便于提出针对性的通风方式。

#### (4)城市隧道

杜峰等<sup>[468]</sup>对南京市主要隧道中的废气成分 CO 分布进行了实地监测,结果表明隧道中最严重的污染物成分是 CO 和 PM<sub>10</sub>。采用 CO 和 PM<sub>10</sub> 作为隧道通风的衡量指标,符合目前隧道废气组分分布的实际情况。当交通流量较大时,采用合理通风方式的同时,在隧道内部安装废气净化设备可有效解决隧道及其周围环境的污染问题。为了减少分散污染物,Ciocanea 等<sup>[469]</sup>研究了通风口之间的距离、通风口和汽车之间的影响以及通风口的布置,分析了阻塞工况下风机工作和关闭情况下隧道内污染物的分布情况。

##### 4.1.1.6 通风控制模式研究

公路隧道纵向通风系统具有很强的时变性、非线性和滞后性等特点,过去采用的是手动线性控制,但线性控制理论难以获得精确的数学模型,且传统的控制方法效率低下。因此寻求高效的通风智能控制系统,降低隧道内通风系统高昂的运营费用一直是通风控制模式研究的热点,目标是使控制模式更节能、高效、自动化、智能化。隧道通风控制模式有前馈式、后馈式与即时反馈式,通风控制从最早的手动直接控制、间接控制到目前的自动控制发展过程中,控制模式与不同理论相结合产生了许多有效的通风控制方法,具体有模糊控制、神经网络控制、专家系统、遗传算法等。

在通风控制模式研究方面,何世龙<sup>[470]</sup>在对各国公路长隧道通风控制现状及前馈式通风控制系统原型分析的基础上,运用计算流体力学基本理论,采用“一维非稳态对流扩散方程”对污染物沿隧道的纵

向分布进行数值模拟,得出隧道内污染物浓度纵向分布规律,并在此基础上提出了简化的通风计算模型,开发了相应的实用程序。冯威<sup>[471]</sup>在分析了前馈预估控制对隧道通风控制必要性的同时,提出了运用自回归滑动(ARMA)时间序列模型对隧道交通流进行预测的方法。马永杰<sup>[472]</sup>提出的神经模糊控制系统实现了公路隧道纵向全射流通风模糊控制模型隶属函数和控制规则的自动生成,大大缩短了控制系统的设计时间,为通风控制系统的实时在线修改奠定了基础。何川等<sup>[473-474]</sup>将模糊逻辑应用于长大公路隧道通风系统的前馈式控制中,解决了传统控制法中存在的时滞性和风机启动频繁等问题,并对前馈式智能模糊控制系统进行了数值分析。任桂山<sup>[475]</sup>引入了模糊控制技术,根据专家或者操作者的经验来设计模糊规则库,建立了模糊控制的智能模型;对该模糊控制模型的规则库进行调整和优化后,模糊控制器根据实时检测到的 CO/VI 浓度与设定的标准 CO/VI 浓度差值,经过模糊推理,输出所需要启动的风机台数。杨宵<sup>[476]</sup>建立了隧道竖井送排式纵向通风的神经网络在线控制器,分析了神经网络在线控制器系统的适应性。李德英等<sup>[477-478]</sup>针对公路隧道通风模糊控制系统,提出并验证了最优规则与排序无关,通过修改控制规则获得了较优的规则库,与常规试凑法相比节省了调整时间;同时利用等价结构的模糊神经网络模型,对模糊变量各语言值隶属函数参数进行调整,使其与规则库更好匹配,以获得更好的模糊组合,反复调整隶属函数和修改控制规则,直至营运通风的电能耗基本上随模糊组合的更新趋于稳定,可以获得任意给定交通流模型下的最佳模糊组合,从而实现了最优控制。

##### 4.1.1.7 隧道通风数值模拟

1933 年,英国人 Thom 首次采用数值方法求解了二维粘性流体偏微分方程,计算流体力学(CFD)由此诞生。Shortley 和 Weller 于 1938 年,Southwell 于 1946 年分别利用松弛方法(Relaxation Method)求解了椭圆形微分方程,也即非粘性流体的偏微分方程组,使 CFD 逐渐成为一门学科,并且得到广大学者、科学家和工程师的关注。由于计算机技术和数值计算技术的高速发展,数值分析成为隧道通风研究中最重要的手段。数值分析方面具有代表性的有瑞典的 Bring A 等在 IDA(输入数据汇编程序)环境下编制的一套模块化模拟程序,所有数学模型都按中性格式 MF 表示,模拟结果包括空气压力、流速、污染物浓度沿隧道轴线的分布。英

国著名学者 Vardy 编写了一套用于对纵向通风方式和半横向通风方式进行模拟计算的程序,可以模拟稳态和非稳态气流状况,输出结果包括轴流风机和射流风机运作、车辆阻力、热力效应以及污染物的浓度分布等,并对英国的太恩隧道进行了模拟计算。

在中国,与隧道通风有关的课题也大量地采用了三维 CFD 方法进行研究,其中比较常用的模拟软件有 FLUENT, PHOENICS, CFX, STAR-CD 等。对于公路隧道通风的多维和动态模拟,西南交通大学、长安大学等在数值模拟的不同领域做了很多研究。他们利用空气动力学模型、交通模型、污染模型以及控制模型对纵向通风系统进行了动态数值模拟;对采用射流通风和具有射流调压的竖井送排式通风系统的空气动力学特征进行了数值分析;在公路隧道不同通风方式下的流场、流速、压力、浓度、局部效应以及火灾通风模拟等方面取得了一系列的重要成果。1996 年西南交通大学雷波在中梁山、缙云山隧道纵向通风课题研究中进行了探索性的研究,首次编制了在中国能够用于公路隧道纵向通风计算的软件,该软件可以用来对隧道通风系统进行动态数值模拟。长安大学仇玉良等<sup>[479]</sup>在研究公路隧道通风技术特点的基础上,建立了包含自然风阻模型、交通风压模型、轴流风机模型、公路隧道射流风机模型、汽车交通风压模型、动态火风压模型等 6 个专用模型的公路隧道通风网络整体模型,并开发编制了公路隧道复杂通风网络仿真分析应用程序。该程序采用 VB 语言编写,可实现运营通风网络分风计算(正向解算)、运营通风网络风机配置计算(反向解算)及火灾工况模拟计算等。曾艳华等<sup>[480]</sup>根据隧道通风网络的构成及网络中风流流动的基本规律,运用通风网络解算的斯考德-恒斯雷法和风量调节通路计算法,对分段纵向式通风系统进行了网络模拟和调节计算,通过网络的自然分风和按需分风解算,模拟隧道内风流的分配、风机的设置。石平<sup>[481]</sup>对公路隧道通风中的沿程损失、弯曲风道损失、缩径与扩径损失、三通损失、短道、连接风道、射流通风以及洞口和竖井交叉污染等进行了三维数值模拟分析,对隧道局部和整体进行了数值模拟分析,得出很多有益的结论。

#### 4.1.1.8 隧道通风物理模型试验研究

模型试验一直是研究和解决流体力学问题的有力手段,不仅可为理论分析提供重要依据,而且始终是探索自然现象、发展新科学概念的重要方法。隧道通风研究方法主要是通过理论计算、模型试验、实

地测量、数值模拟等方法获得隧道内速度场、压力场、温度场的分布规律,相对于数值仿真,隧道通风物理模型试验研究较少。

高孟理<sup>[482]</sup>从理论上分析了应用流体运动的相似理论,探讨了射流通风系统模型试验的相似规律,通过模型试验,在动力射流的基本特性阻力射流的压降以及在分段吸出式通风系统中的射流调压等方面获得了一些基础数据。长安大学<sup>[483-484]</sup>以流体力学相似理论与模型试验理论为基础,完成了公路隧道通风物理模型试验系统的设计、制作与调试工作,给出完整的隧道通风模型设计方法,并分别针对秦岭终南山特长公路隧道和港珠澳大桥海底隧道建立了隧道通风物理模型整体模型试验系统和局部模型试验系统,验证了不同通风方式的可行性,对通风局部构造进行了模型试验,为数值仿真提供了基本参数。2004 年,谢永利<sup>[485]</sup>结合西部交通建设科技项目《秦岭终南山特长公路隧道通风技术研究》,依托秦岭终南山特长公路隧道分别建立了 1:8 的大比例公路隧道通风物理模型试验系统与 1:24 的公路隧道通风物理模型试验系统,对秦岭终南山特长公路隧道通风系统工况进行了模拟,并对公路隧道竖(斜)井送排组合纵向通风方式进行了研究。研究成果直接用于秦岭终南山特长公路隧道方案确定和通风系统设计中,有力地支持了秦岭终南山特长公路隧道的建设,相关研究成果也对中国公路隧道建设起到了重要指导和示范作用。2005 年,涂耘<sup>[486]</sup>针对雪峰山隧道建立物理模型,通过模型试验对雪峰山隧道通风系统进行了论证与优化,并进一步分析了竖(斜)井送排组合纵向通风方式的基本原理。根据流动相似性理论和隧道通风主要控制因素,确定隧道通风的边界条件并推导了隧道通风模型试验的相似准则。任锐等<sup>[487]</sup>为了研究半横向通风方式隧道内风速、风压的分布特点,针对某海底隧道半横向通风方案,建立了 1:9 的缩尺物理模型与 1:1 的三维数值仿真模型,研究了排风孔开启数量与排风孔开启位置对隧道内风速、风压分布的影响。李炎等<sup>[488]</sup>利用活塞风改善单线特长铁路隧道空气质量和降低通风能耗,采用全模型试验方法设计搭建了隧道活塞风模型试验台,用于活塞风风速的测试;将试验值与理论计算值、原型转换试验值与理论计算值进行比较,结果表明活塞风速度的符合度较好。王亚琼等<sup>[489]</sup>基于双洞互补式纵向通风的原理和设计方法,研究了大纵坡双洞隧道风量不平衡时采用互补式通风的可行性,建立了 1:10 的互补式通风

物理模型试验,得出了换气横通道内换气风量变化对隧道内各区段风速和风压的影响规律。

#### 4.1.1.9 隧道通风现场测试分析

现场测试数据对于验证及完善模型试验、数值模拟及理论分析有着重要的作用。王亚琼等<sup>[457]</sup>以大别山公路隧道为依托工程,现场检测及验证了大纵坡隧道互补式网络通风中换气通道的作用及存在的问题。互补式通风适用于具有一定坡度,上下行隧道通风负荷不平衡的工程,能起到节约初期投资及运营费用的作用。大别山隧道作为首次采用互补式通风的隧道,为今后类似隧道通风积累了运营测试技术。孙继东等<sup>[490]</sup>以高海拔特长公路隧道鹤鹑山隧道为依托,研究了 VI 海拔高度系数的合理取值。朱文等<sup>[491]</sup>采用现场测试的方法研究了公路隧道内全射流通风的压力分布情况,测试结果表明,隧道入口段气压高于当地大气压力,出口段气压低于当地大气压力,在隧道中存在一个与大气压力相等的点。近年来出现很多有关隧道自然通风的研究,其主要思路是利用隧道两洞口之间的气候条件、高差的特殊性在有利条件下采用自然通风,如墨脱公路嘎隆拉特长隧道、圆梁山隧道对夏冬季温度差较大自然风的利用。在基本通风模式已经确定的情况下,今后隧道通风研究趋向于通风细节的优化,通风研究会更加具体深入。

#### 4.1.1.10 通风理论及软件设计研究

王军等<sup>[492]</sup>在通风系统理论模型基础上,借助 Lyapounov 稳定性理论,建立了系统热力学和动力学稳定性判据,指出宏观参数扰动与具体宏观过程的相互作用是决定公路隧道自然通风系统稳定性的根本原因。Colella 等<sup>[493]</sup>提出了一种新的隧道内通风流动模拟方法——多尺度方法,在一定的环境条件下,该方法能够提供局部流体的流动情况,可为隧道的通风设计提供一定的参考;通过多尺度建模方法,分析了在紧急通风和一些风机无法工作的情况下隧道通风系统能够提供的通风流量<sup>[494]</sup>。

交通系统具有多信息来源、多传感器的分布式系统的特点,传统的理论方法很难对其进行有效的研究控制,将信息处理技术、现代控制技术与交通工程相结合,能取得良好的仿真效果。陈敏<sup>[495]</sup>应用人工智能原理,根据隧道内的风速、风向、CO 和 VI 的数据信息以及风机转向给出相应的控制方案,对隧道风机的开启、停止、正反转动工作状态进行控制,该软件具备正常情况下的通风控制功能和发生火灾情况下的通风控制功能,但还需要加入网络模块以

提高数据的共享性和完整性。

曾艳华、何川等研究了公路隧道网络通风理论,并编制了稳态的隧道通风网络计算程序。王永东、赵峰等编制了 LVSRT、VDSHT 软件用来进行纵向、半横向和横向通风的通风计算和通风方案的比较。王磊等<sup>[496]</sup>以流体力学为基础,借助图论理论与方法将隧道通风系统转化为通风网络,利用节点法将通风系统转化为“节点”、“支路”等网络元素,通过“串联”、“并联”、“角联”等连接关系,自由组合通风方式,采用 VC++ 语言编写了隧道网络通风可视化程序。葛磊<sup>[497]</sup>在网络图论的理论基础上建立了单竖井、双竖井公路隧道通风网络图,依据斯考德-恒斯雷迭代法对通风网络图进行解算,编制了基于 VC++ 计算机语言的公路隧道网络通风软件 VNHST;运用 VNHST 软件对自然风压的影响因素(竖井位置及高度、隧道纵向坡度及上坡长度等)可进行敏感性分析及节能效果分析。张彦晓<sup>[498]</sup>基于双洞互补式网络通风的具体求解方法,结合斯考德-恒斯雷迭代原理,利用 MATLAB 与 VB 混合编程开发了界面良好的通风网络计算程序。赵红莉<sup>[499]</sup>建立了公路隧道火灾通风排烟网络解算模型,给出了不同隧道通风排烟模式下主要技术参数、所需风机风量、风压的计算方法;并利用 MATLAB 开发平台,采用斯考德-恒斯雷迭代法编制了基于质量描述的隧道道网络通风模拟仿真计算程序,该程序可完成分支风量、风压、风速、通风阻力、风机数量等参数的求解计算;可得到不同排烟阀设置方案下,行车道和排烟道内烟气温度分布、排烟道内和排烟阀处烟气流速分布。

#### 4.1.2 隧道运营照明(西南交通大学郭春老师、长安大学王亚琼老师提供初稿)

国外对公路隧道照明技术的研究较早,20 世纪 60 年代意、法两国之间的勃朗峰隧道就已经按照交通量的变化进行照明调光,隧道的照明随着车辆的增加而日益受到重视。

20 世纪 80 年代后,世界各国相继出台了隧道照明规范,以规范隧道照明的设计和施工,减少交通事故。很多国外公路隧道照明研究文献经翻译在中国公开发表,如陈田中等<sup>[500]</sup>翻译了日本学者成定康平和吉川孝次郎(日本公路隧道照明理论的 2 位创始人)有关短隧道照明研究的文献;董国贤<sup>[501]</sup>介绍了法、意合建的勃朗峰隧道照明系统设计方案;林贤光等<sup>[502]</sup>翻译了荷兰学者范·波莫、德·波尔的著作《道路照明》,将公路隧道照明理论正式引入中



国。当时被广泛接受的标准是1982年制定的CIE(国际照明委员会)标准,在随后几年中,此标准不断得到修订和完善。与此同时,各国也相继实施了各自的标准,如EUROSTD(欧洲隧道照明标准,1997年版),日本《隧道照明指针》(1990)等。这些发达国家和地区由于照明理论和技术相对完善,在早期就形成了规范性的标准。

中国隧道照明技术研究起步较晚,经验和基础性研究工作不足,在2000年以前主要遵照《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)来设计隧道的照明系统。20世纪90年代中期,照明研究工作相继开展,郑汉璋<sup>[503]</sup>分析了CIE《公路隧道和地道照明指南NO. 26/2. 1990》的贡献及不足;程昌华<sup>[504]</sup>翻译了日本对公路隧道光照度和VI浓度关系所进行研究的相关文献;齐向军<sup>[505]</sup>编译了瑞士公路隧道照明系统必须满足的要求;王华牢<sup>[506]</sup>全文翻译了《公路隧道和地道照明指南CIE NO. 26. 1990》。1999年重庆交通科研设计院主持编写了现行的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026. 1—1999);并于2014年主持编写了《隧道照明设计细则》。中国照明研究主要集中于隧道灯具、布灯方式、照明系统控制等方面,以及长大隧道利用色彩变化洞内虚拟出口研究等。国外出现了利用色彩变化、光图案等景观照明的隧道,尤其是挪威24 000 m的特长公路隧道利用蓝光制造假洞口(过渡区段)的景观照明更是引起了专业人员的关注。秦岭终南山隧道设置有不同的灯光和图案变化,将特长隧道演化成几个短隧道,从而消除驾驶人的焦虑情绪和压抑心理。

#### 4.1.2.1 隧道照明光源研究

隧道照明光源随着照明技术的发展而不断变化,从最初的白炽灯、高压汞灯、低压钠灯、荧光灯、金卤灯到后来的电磁感应灯、LED灯再到光纤照明等,照明技术取得了巨大的进步,不同光源在隧道内的应用研究全方位展开。目前中国公路隧道照明大多采用高压钠灯和荧光灯(主要用于洞内紧急停车带和横通道照明)。受国家“节能减排”战略导向,以LED灯和电磁感应灯为代表的新型高效节能光源得到关注。公路隧道LED灯照明在均匀性方面具有高压钠灯不可比拟的优势,在采用显色指数较高的LED灯时,可适当降低公路隧道照明标准<sup>[507-508]</sup>。王宝林等<sup>[509]</sup>研究了自然光在隧道洞口段的应用,设计优化了洞口适用曲线,取消了隧道入口段的加强照明,基本消除了隧道洞口的黑洞效应。文献<sup>[510]~[512]</sup>中分别对高压钠灯、导光管、电磁

感应灯、无极荧光灯在隧道照明中的应用进行了研究,指出了不同光源的适用性、优缺点及应用前景。文献<sup>[513]~[515]</sup>中分析了LED灯作为白光光源的特点,光源色温对照明效果的实际影响,在隧道入口段、过渡段和中间段采用LED灯照明的优点,LED灯作为新型节能环保型光源具有广阔的应用前景;这几个文献还研究了LED灯和钠灯组合照明技术在隧道中的应用,分析了不同技术特点光源的组合特性。王亚琼等<sup>[516]</sup>提出采用高压钠灯与LED灯组合照明技术来尝试解决照明成本和能源短缺方面的难题,即公路隧道加强段照明采用高压钠灯与LED灯组合照明,以解决单一冷光源在公路隧道入口段透过率低的难题,在中间段则采用LED灯照明,以降低公路隧道运营成本。刘英婴等<sup>[517]</sup>针对LED光源色温对隧道照明入口段、过渡段和中间段的影响分别进行了研究。郭春等<sup>[518]</sup>通过对LED照明以及人眼视觉特性的研究,建立起人眼中间视觉模式下的LED照明计算模型,得到基于人眼视觉效果下的LED及高压钠灯对应照明视通量,形成了基于中间视觉特性的公路隧道LED照明设计方法。徐景峰等<sup>[519]</sup>提出天然光光纤照明系统可以作为一种新型的、无能耗的照明系统,探讨了天然光光纤照明系统应用于隧道照明的可行性,提出了适宜在隧道照明中应用的天然光光纤照明技术。另外广州珠江黄浦大桥建设有限公司组织编制了中国首部《公路隧道LED照明企业标准》,国家半导体照明工程研发及产业联盟提出的推荐性技术规范《LED隧道灯》(LB/T003—2009)也已发布实施。

#### 4.1.2.2 隧道照明适用性研究

隧道照明系统从洞外到洞内是一个完整系统,洞外亮度基准非常重要,从洞外到洞内有一个亮度变化曲线,照明系统的设计和研究都要适用这个曲线的变化,否则容易出现视觉障碍,影响行车安全。隧道照明适用性研究包括洞外基准亮度测算,洞(进出口)、洞内视觉适用,照明的空间效应分析等。

在洞外亮度L<sub>20(S)</sub>研究方面,上海市照明灯具研究所采用黑度测试法对浙江甬台温高速公路、福建福厦高速公路和罗宁高速公路的山岭隧道进行了一系列实测,分析了公路隧道洞外亮度变化规律及代表性洞外景物亮度值<sup>[520]</sup>。重庆交通科研设计院曾在中国首次采用环境简图法,对京珠高速公路粤境北段和南段隧道群进行了大量的现场实测和数据分析,为公路隧道照明工程建设提供了科学合理的指导意见<sup>[521]</sup>。周烨等<sup>[522]</sup>在中国首次提出了基于



数码技术的公路隧道洞外亮度 L20(S)测试方法,使得大规模、高效率地实测公路隧道洞外亮度成为可能,同时定量分析了洞外亮度取值对入口段加强照明灯具布置及能耗的影响,基于环境景观理论提出了符合“环境友好型”山区高速公路隧道设计理念的接近段减光措施。在隧道照明设计指标研究方面,重庆交通科研设计院与福建高速公路建设指挥部对短隧道照明设计参数进行了初步研究。杜志刚等<sup>[523]</sup>利用照度仪、加速度采集仪、EMR-8B 眼动仪等设备,对隧道进出口驾驶人的瞳孔变化等进行大量行车试验,结果发现在隧道内距进出口 50 m 范围内,驾驶人瞳孔面积与隧道进出口照度成幂函数关系,驾驶人瞳孔面积变化速度可作为隧道进出口的行车安全评价指标;研究还得出了基于视觉适应的隧道进出口照明公式。文献<sup>[524]</sup>、<sup>[525]</sup>中分析了长隧道、中短隧道照明特点和适应性,对隧道对称布灯、交错布灯以及中央侧偏布灯方式对照明的影响进行了研究,分析了不同的灯具组合对隧道照明适用性的作用,为隧道照明优化提供了基础数据和参数。

#### 4.1.2.3 隧道照明节能与安全研究

对公路隧道照明节能与运营安全技术开展研究,可以平衡“节能”与“安全”二者之间的关系,节能不能以降低安全为代价。在公路隧道照明节能技术研究方面,重庆交通科研设计院先后主持了《特大断面隧道的节能能技术研究》、《山区高速公路隧道节能型照明系统研究与应用》、《高速公路隧道照明关键技术研究》、《高速公路隧道照明需求与节能技术研究》等课题,从系统工程角度提出了解决公路隧道照明节能问题的一整套关键技术,基本涵盖了公路隧道照明技术性节能、结构性节能和管理性节能的各个方面。在公路隧道照明安全技术研究方面,同济大学承担了《公路隧道进出口运行安全研究》的课题,提出“视觉震荡”的概念<sup>[526]</sup>及基于视觉适应的公路隧道进出口照明公式。刘洋<sup>[527]</sup>对长时间处于公路隧道光环境下的生理、心理变化情况进行了研究,并提出了长隧道照明设计优化思路。目前对于长隧道照明中耗能比例最大的中间段照明的研究还处于起步阶段,郭春等<sup>[528]</sup>建立了特长公路隧道中间段照明调压节能技术,并将调压节能新型设备应用于实际运营中,系统地建立了一套基于调压技术的公路隧道中间段照明节能方法,给出了不同交通量和计算行车速度条件下的公路隧道中间段照明亮度值,确定了电压调整影响亮度效率的计算方法,对于特长公路隧道,该方法可节约 20%~30% 的电

力消耗。

#### 4.1.2.4 隧道照明控制模式研究

隧道照明受到洞外亮度、车速、车流量等因素的影响,用作照明的灯具在不同功率、不同使用年限下的光效也不同,因此隧道照明控制模式显得尤为重要。文献<sup>[529]</sup>~<sup>[531]</sup>中分别采用 ZigBee, WIFI, GPRS 等无线技术对隧道照明无线控制系统进行了研究与设计。照明控制研究内容较为分散,包括对公路隧道照明节能控制软件、车辆感应式隧道照明控制系统、自适应隧道节能照明控制系统、高速公路中短隧道照明节能控制系统进行开发等。黄艳国等<sup>[532]</sup>提出基于模糊控制的隧道照明无级调光控制系统,阐述系统控制结构及模糊控制器的设计,以洞外亮度和交通量作为系统的输入,采用白光 LED 作为光源,实现自适应控制。崔丰曦<sup>[533]</sup>把模糊神经网络模型应用在隧道照明控制系统中,根据环境参数(洞外亮度、车速、车流量等)的改变自动修改控制方案,经过模糊神经网络控制决策,输出照明回路的控制命令,从而实现实时节能控制。戚佳金等<sup>[534]</sup>提出了一种基于动态调光的新型照明节能控制系统,该系统的核心组成部分是组群控制器的控制策略,给出了一种适合于单片机为硬件平台的照度检测、计算、控制方法。徐曦等<sup>[535]</sup>建立了基于无线传感网络的隧道照明控制系统的架构,并针对隧道复杂环境完成了车辆检查传感器、光照传感器、VI 传感器的硬件设计和系统软件设计。

#### 4.1.2.5 照明仿真计算及测试

目前对隧道照明设计所进行的仿真模拟研究主要采用的是 DIALux 软件,如张善伟<sup>[536]</sup>对公路隧道照明设计中 DIALux 的适用性及建模方法进行了分析;郭春等<sup>[537]</sup>则利用 DIALux 软件对发光涂料铺设范围对公路隧道照明影响进行了研究;屈永照等<sup>[538]</sup>则采用 OpenSceneGraph 三维渲染引擎技术建立了隧道照明设计平台。

黄珂等<sup>[539]</sup>采用 HED 头戴式眼动仪系统进行隧道照明测试,对公路隧道照明察觉对比设计方法中的大气透射比取值进行了研究;孟繁宇等<sup>[540]</sup>模拟试验了 VI 对隧道灯光透过性的影响;国威等<sup>[541]</sup>对驾驶人隧道段夜间行车动视点特征进行了模糊聚类评价;杜志刚等<sup>[542]</sup>通过测试瞳孔面积变化确定了公路隧道明暗适应时间。

#### 4.1.3 隧道运营环境研究展望

展望未来隧道运营环境,安全、舒适、节能、环保

是永恒的主题。未来隧道运营环境将更加人性化,将从安全性和舒适度来衡量运营环境的优劣。随着汽车工业的发展,污染物排放的降低,甚至是电动汽车的大力推广,通风控制指标将永久地由换气来控制,基本通风模式研究空间较小,今后隧道通风研究趋向于通风细节的精细化,通风节能环保研究也会更加具体深入。隧道照明的研究不仅致力于满足安全行车的舒适性,还会大力推广白光照明,把阳光“引入”到隧道中,这样既节能又环保。隧道内环境控制指标将发生较大改变,将来隧道噪声会作为隧道环境指标来要求,因此隧道噪声会大幅度下降,隧道的小气候要求(温度、湿度、风速、气压)也会日益提高。随着隧道运营环境要求的提高,隧道技术界还有很长的路要走,这要求隧道研究人员做足多方面的技术储备,迎接挑战。

#### 4.2 防灾救灾(北京交通大学袁大军老师,长安大学王永东老师,中南大学易亮老师提供初稿)

经过近20年的快速发展,中国公路隧道总量和规模已处于世界领先地位,可以认为中国隧道已由建设期转化为建设与管理并重期。在公路隧道运营管理中,影响隧道安全的问题相继出现,与之对应的隧道运营防灾救灾研究逐步开展,成果显著。本节主要介绍隧道火灾、防爆、防水、防冻方面的研究进展。隧道抗震也属于防灾减灾,具体见本文第2.5节隧道抗减震设计。

##### 4.2.1 隧道火灾

隧道火灾是公路隧道常见的、危害最大的灾害之一,长大公路隧道的火灾只能减少而无法完全避免。近年来国内外发生了多起隧道火灾事故,如1999年3月的勃朗峰隧道火灾<sup>[543]</sup>造成38人遇难,2014年3月的晋济高速岩后隧道火灾<sup>[544]</sup>造成了40人遇难等。实例表明,火灾除了对隧道内的人员造成巨大伤害外,还会对隧道衬砌结构以及隧道路面产生较大破坏,因此对隧道火灾的发展规律、救援与人员逃生、衬砌结构高温力学性能及路面材料阻燃等方面的研究至关重要。

##### 4.2.1.1 隧道火灾发展规律研究

火源热释放率、临界风速和火灾曲线等是研究火灾发展规律的基本要素。在理论研究方面,文献<sup>[545]~[547]</sup>中提出,临界风速可以根据Froude数和试验数据推导的半经验公式计算得出。文献<sup>[548]~[554]</sup>中在对热释放速率的确定以及临界风速与热释放速率关系式的拟和方面取得了显著的成

果。为了反映隧道发生火灾时温度随时间的变化历程,国外建立了一系列不同类型的火灾曲线,如RWS,RABT,Runehamar等。这些曲线均体现了隧道火灾升温速度快,达到的最高温度高、持续时间长的特点。

试验研究方面,主要有大尺寸试验和小尺寸试验。文献<sup>[555]~[558]</sup>中在Runehamar隧道中进行多次试验,在火灾热释放率、温度场、火势蔓延及火焰长度等方面对以前的试验数据进行了完善,并建立了新的预测参数理论模型。Wang等<sup>[559]</sup>通过某段顶部有开口的现有隧道,对烟雾从洞顶开口的排出效率,以及烟雾对人员的伤害方面进行了全尺寸试验研究。彭伟等<sup>[560]</sup>在3条公路隧道上进行了10次全尺寸试验,研究不同火灾条件和风速下烟气的运动情况。Oka等<sup>[561]</sup>采用1:10缩尺的模型,用丙烷燃烧器作为火源,研究了水平隧道里的烟气运动状况。Yuan等<sup>[562]</sup>采用原尺寸1:15的缩尺模型模拟了在火源热释放率、风机尺寸、风机距火源距离、障碍物、烟雾浓度等因素下对烟雾扩散模式的影响。

数值模拟方面,隧道火灾常用到的数值模拟方法主要有网络模拟、区域模拟和场模拟。目前研究者都是在常用的CFAST区域模拟和CFD数值模拟中进行选择,两者各有特点且区别明显。Chow<sup>[563]</sup>利用CFAST软件,将隧道假设为多个房间,模拟了不同物体(火车、地铁列车、卡车、公共汽车等)引起的隧道火灾的特性。Jain等<sup>[564]</sup>利用区域模拟软件CFAST和场模拟软件CFX对同一条件下火灾的发展和烟气的流动进行了对比。Cox等<sup>[565-566]</sup>较早地采用CFD方法研究公路隧道的火灾问题,建立了JASMINE数学模型,研究了通风、坡度和不稳定火灾对隧道火灾的影响。舒宁等<sup>[567]</sup>采用CFD的ANSYS软件对公路隧道的火灾通风进行了仿真,研究了火灾发生时烟气在隧道内的流动状况。

##### 4.2.1.2 隧道火灾救援与人员逃生

隧道发生火灾后,人员能否安全疏散主要取决于2个时间,一是火灾发展到对人构成危险所需的时间,另一个是人员疏散到安全场所需要的时间。如果前者大于后者便可认为该隧道对于火灾中人员疏散是安全的。

近年来,邬剑明等<sup>[568]</sup>从心理学的观点出发,根据人的“心理-行为”模式,基于火灾事故中环境对人的影响,对火灾中个体和群集的心理行为进行了交

互分析,总结了个体和群集在火灾中的异常心理行为特点。夏永旭等<sup>[569]</sup>分析了克拉尼提出的高温条件下人员逃生公式,结合公路隧道火灾时的人员逃生情况,对克拉尼公式进行了修正。以修正后的隧道火灾人员逃生公式作为判别条件,给出隧道内人员可能逃生的位置和消防救援的安全位置。

隧道火灾逃生最主要还是依赖于疏散通道。Nilsson 等<sup>[570]</sup>利用疏散试验来研究当隧道发生火灾时机动车驾驶人的反应及情绪,以及如何通过信息、寻路系统、交通指示灯等选择安全撤离路线。杨高尚等<sup>[571]</sup>以雪峰山隧道为工程实例,运用火灾模拟软件 FDS4.0 计算了不同场景下的逃生时间。谢宝超等<sup>[572]</sup>针对客运专线隧道进行了人员疏散了模拟。李削云等<sup>[573]</sup>以苍岭隧道为背景,采用经验计算理论和软件 Building EXODUS 相结合的方法来研究中小规模火灾情况下的安全疏散时间。目前中国对横向通道间距的大小仍然没有具体规定,仅依赖软件模拟难以反映真实情况。

在防灾救援管理指挥机制和政策建立方面,Brian 等<sup>[574]</sup>在对隧道事故应急救援指挥权与转移分析的基础上,确立了隧道事故救援的指挥机制。王永东等<sup>[575]</sup>将公路隧道的防火救灾对策系统划分为指导思想、安全等级、宣传教育、交通管理、通风控制、监控与消防、建筑材料和附属设施以及灭火救援体系 8 个子系统,对应于每个子系统提出了详细的防灾对策。

#### 4.2.1.3 隧道衬砌结构高温下的力学性能

钢筋与混凝土是组成隧道衬砌结构的主要材料。目前,国内外对火灾高温下混凝土与钢筋材料的物理力学性能进行了显著的试验,并取得了显著的研究成果。Modic<sup>[576]</sup>采用计算机模拟了火灾时衬砌结构的温度分布。Majorana 等<sup>[577]</sup>在对隧道火灾真实热输入评估的基础上,将混凝土看作多相孔隙材料,对衬砌混凝土进行了热力耦合分析。

近年来,闫治国等<sup>[578]</sup>系统研究了盾构衬砌结构管片、接头及衬砌环在火灾高温时(高温后)的力学行为,并提出了用于设计方法、衬砌结构火灾安全性的模糊综合评估方法。徐志胜等<sup>[579]</sup>对公路隧道火灾排烟道顶隔板结构耐火性能进行了大量的全尺寸试验和数值模拟研究,提出了火灾条件下排烟道顶隔板及其与衬砌连接构件的损伤评估方法。熊珍珍<sup>[580]</sup>基于隧道衬砌结构在高温火灾作用下的一般力学特性和受损规律,得出受火时间长短和受火范围大小直接影响衬砌结构温度场分布的结论,并拟

合出了破损规律曲线。

#### 4.2.1.4 隧道路面材料阻燃技术

国内外对公路路面沥青材料的燃烧性能和阻燃技术研究是随着沥青路面的广泛应用而开始的。近年来,邓宇强<sup>[581]</sup>利用多因素模糊评定法得出了综合性能最好的沥青混合料配方。陈辉<sup>[582]</sup>配制了适合于隧道工程的环保型阻燃沥青,提出了低配筋率 CRC 层+AC 复合式隧道路面设计的长寿命隧道路面建设理念。李怀海<sup>[583]</sup>通过研究提出将新型 AP-FR 阻燃剂添加于 SBS 改性沥青中(添加量为沥青质量分数的 5%),其在满足隧道路面力学性能要求的同时,也能够满足隧道的阻燃、抑烟要求,确保隧道的使用安全性。范芳芳<sup>[584]</sup>通过纳米材料和传统阻燃材料的复合,组成纳米复合阻燃体系,得出阻燃效果最佳的最优配比(DBPE),减少了阻燃剂的用量,提高了沥青的阻燃性能。

#### 4.2.2 隧道防爆

隧道内的爆炸冲击会对隧道结构造成破坏,而且相邻隧道的爆破也会对既有隧道产生不良影响。隧道结构在强冲击力作用下的动力响应等问题得到了国内外研究人员的高度关注。

##### 4.2.2.1 隧道内爆炸

针对隧道在爆炸作用下的动力响应问题,国内外已开展了较多的研究工作。刘齐建等<sup>[585]</sup>对径向谐和激励下圆形隧道的动力稳定性进行了研究,从动荷载作用下衬砌结构的振动方程出发,得到了隧道衬砌动力失稳临界频率的计算公式。杜修力等<sup>[586]</sup>对部分埋置结构在爆炸荷载作用的动力响应进行了研究。在动力反应计算方面,王德荣等<sup>[587]</sup>在经典弹性理论的基础上,建立了圆柱壳在内部冲击爆炸荷载作用下的动力平衡方程,通过数学变换和简化分析得到了内部冲击荷载作用下各向异性圆柱壳体动力反应问题的简化计算方法。

对隧道衬砌结构损伤破坏方面的研究一般采用数值模拟方法,国内外学者均对爆炸冲击波破坏、衬砌损伤机理和特性等方面进行了研究。田志敏等<sup>[588]</sup>采用三维有限元计算方法,给出了内爆炸产生的隧道内冲击波流场。李忠献等<sup>[589]</sup>将爆炸超压简化为双直线模型,分析了地下隧道内爆炸引起的隧道和地表各类结构的动力响应和滑移隔震效果。张小勇等<sup>[590]</sup>采用 AUTODYN 软件建立了炸药-空气-衬砌结构-围岩与土体三维耦合体系模型,分析了隧道内爆炸荷载作用下衬砌结构的动力响应及损伤机理。

值得注意的是,数值模拟在处理爆炸荷载时多将其简化为双直线的形式,与实际的爆炸荷载时程曲线差异较大,并且直接施加到结构上,回避了气体和结构间的流固耦合作用。

#### 4.2.2.2 隧道外爆炸

随着隧道工程的发展,如何解决近距离爆破对已有隧道造成的不利影响,是亟待解决的工程实际问题。近年来国内外研究者对小间距隧道爆破振动进行了深入研究,研究方法主要包括现场监测、数值模拟和模型试验,并取得了一些实用性结论。

刘国华等<sup>[591]</sup>基于爆破动力分析和加权双剪强度准则,提出了邻近爆破安全评估和爆破方案优选方法。王明年等<sup>[592]</sup>采用现场监测和数值分析2种手段研究了不同间距情况下既有隧道衬砌迎爆侧的最大振速、最大主应力和衬砌安全性评价,并建议以振速作为检测指标。为了减小爆破对既有隧道的影响,除了爆破方案的优化和安全检测,采取有效措施进行抗爆隔震也是重要手段。李利平等<sup>[593]</sup>结合沪蓉线庙垭分岔隧道工程实例,以小间距既有隧道中墙迎爆侧破坏为基准,从循环进尺、微振起爆、掏槽结构等方面提出了相邻隧道爆破减振技术措施。

国内外对于隧道在爆炸荷载下的动力响应研究等方面取得了不少成果,但对强冲击作用下的隧道变形问题、不同隧道表面对冲击波传递的影响问题方面的研究还较少;同时,为减少邻近隧道爆破的影响而采用的隔震措施或隔震材料也有待进一步研究。

#### 4.2.3 隧道防水

隧道水灾害是指在隧道修建和运营过程中遇到的水的干扰与危害,这也是隧道最常见的病害之一。

##### 4.2.3.1 隧道水灾害机理研究

随着岩溶地区地下空间的开发利用,岩溶突水灾害逐渐成为隧道工程中的主要灾害。在岩溶突水灾害机理的研究工作中,由Lomize的平行板模型到裂隙岩体渗流模型,学者们提出了岩体渗流系数实测的方法,后期又出现了对应力-渗流-损失及温度等多场耦合机制的研究<sup>[594]</sup>。

李利平等<sup>[595]</sup>对突水通道的渐进破坏进行了渗流场、应力场及损伤场的多场耦合分析。王建秀等<sup>[596]</sup>根据地下水在各种渗流介质中流态的不同,建立了快速紊流系统及慢流渗流系统。在岩溶突水机理的研究工作中,数值模拟的方法得到了广泛的应用,采用MIDAS,ANSYS,FLAC,ADINA等方法能够很好地进行岩溶突水的多场耦合分析研究。

在水灾害的机理与评价方面,学者们采用和提

出的方法有解析方法、定量定性法<sup>[597-598]</sup>和数值方法<sup>[599]</sup>等。

#### 4.2.3.2 隧道水灾防治研究

##### (1)水灾害预报探测技术

目前国内外主要的突水灾害预报方法有物探化探法、地质法及钻探法等,如瑞士、美国等研发的TSP,澳大利亚研发的单孔多含水层综合水文地质参数预测技术。中国目前物探化探法主要有地质雷达、同位素测试、槽波地震及连通试验等手段;针对岩溶水的探测,中国主要采用综合物探、超前钻探,及瞬变电磁仪、三维高分辨地震勘探仪等进行探测和预报。

##### (2)突水灾害的治理技术

目前,隧道涌突水灾害治理以“以堵为主,堵排结合,综合治理,保护环境”为原则。常见的具体治理措施为注浆法,即预注浆和后注浆。根据实际地质情况和突水的含水构造特征,一般主要通过超前小导管、长管棚及帷幕的方法达到预注浆的目的,而后注浆则是为了加固围岩并减少突水量而通过径向小导管及径向注浆锚杆实现的。

#### 4.2.4 隧道防冻

##### 4.2.4.1 冻胀机理分析和冻胀力研究

20世纪80年代,部分学者对日本北海道、中国东北地区的大量冻害隧道进行调查分析,研究了隧道冻胀机理,形成了含水风化层冻胀说。关于冻胀力求解方面,中国吴文丁等<sup>[600]</sup>都进行了相应的研究。近年来,吕康成等<sup>[601]</sup>对冻胀机理从不同角度做出了合理解释,丰富了冻胀理论的研究。耿珂<sup>[602]</sup>以内蒙古寒区公路隧道为依托,采用弹性力学方法计算阿拉坦隧道承受的冻胀力,通过对隧道冻胀力的理论及数值模拟计算结果的比对,及时了解隧道运营期间结构受力性状的变化情况,来判断隧道结构的安全性和可靠度。王洪存<sup>[603]</sup>通过弹性力学和弹塑性有限元数值模拟的方法,研究了冻胀应力在隧道衬砌中的分布规律。

##### 4.2.4.2 寒冷地区隧道温度场

对于温度场的解析解研究方面,20世纪70年代,Bonacina等<sup>[604]</sup>提出了相变热传导温度场的数值求解方法;Harlan<sup>[605]</sup>提出了著名的Harlan方程,采用土体冻结过程中的热质迁移数学模型,首次将渗流场和温度场耦合分析。随后Comini等<sup>[606]</sup>对相变热传导温度场的非线性问题进行了有限元分析。

赖远明等<sup>[607]</sup>根据传热学和渗流理论导出了带

相变的温度场和渗流场耦合问题的控制微分方程,应用 Galerkin 法导出了这一问题的有限元计算公式,并根据冻土地区的实际情况对圆形隧道正冻区和未冻区的热传导方程进行简化,运用量纲为 1 的量和摄动技术求出了寒区圆形截面隧道温度场的解析解。张学富等<sup>[608]</sup>运用 Galerkin 法推导出了三维计算公式,对隧道空气与围岩对流换热和围岩热传导藕合问题进行了有限元分析。对于温度场的规律趋势,文献[609]~[611]中都进行了研究。

#### 4.2.4.3 隧道冻害防治研究

挪威根据自身的地质和气候特点提出了“低造价公路隧道”理念,开创了抗防冻衬砌的设计理念和支护衬砌结构型式。挪威主要采用铺喷支护的防冻保护措施,开发了 2 种主要的抗防冻二衬系统。

在保温隔热材料及其他保温防寒措施的研究与应用方面,21 世纪初,陈建勋<sup>[612]</sup>提出了防冻隔温材料的优化组合。马建新等<sup>[613]</sup>论证了硬质聚氨酯泡沫塑料和干法硅酸铝纤维板 2 种保温隔热层材料的设置厚度。赖远明等<sup>[614]</sup>得出了保温门保温效果优于防雪棚的研究结论。孙文昊<sup>[615]</sup>通过对多种冻胀工况下数值模拟计算结果进行分析,指出在寒区隧道中增大衬砌厚度不能从根本上防止衬砌及其背后地下水的冻结。罗彦斌<sup>[616]</sup>使用综合评判法对新建隧道抗冻设防等级进行了划分,引进 T-S 模糊故障树和事件树理论对既有隧道冻害程度等级进行 5 级划分。吉哲<sup>[617]</sup>提出了“严密防水、妥善排水、酌情保温、及时供热”的隧道冻害设防理念。

### 4.3 病害(重庆交通大学张学富、周杰老师提供初稿)

随着隧道运营时间的增加,隧道病害愈加显著,因而对隧道的维护与加固提出了更高的要求。要对隧道进行维护和加固,首先要对病害进行检查,然后判断病害程度,进而制定出合理的治理方案<sup>[618]</sup>。

#### 4.3.1 隧道病害的种类

由于隧道所处地质环境的复杂性,隧道的病害也呈现出多样性的特点。《铁路工务技术手册:隧道》<sup>[619]</sup>中将隧道病害分为隧道漏水、衬砌腐蚀、衬砌裂损、隧道冻害、洞门损坏、整体道床裂损、附属结构物损坏等 7 种病害。中国《铁路桥隧建筑物劣化评定标准》<sup>[620]</sup>、《城市轨道交通设施养护维修技术规范》<sup>[621]</sup>和日本《公路隧道维持管理便览》<sup>[622]</sup>、美国《公路及铁路隧道养护指南》<sup>[623]</sup>以及诸多文献<sup>[624-625]</sup>中均对分离隧道病害进行了归纳总结。

众多隧道病害经验表明,衬砌结构破损和渗漏

水是影响隧道安全的主要因素。本节主要关注渗漏水 and 衬砌结构破损病害维护与加固方面的相关研究,实际上隧道各种病害经常同时存在且相互作用,整个隧道安全状态的评价不应建立在单一病害调研和检测的基础上,而应基于对隧道内的各种病害进行全面的调研和检测。

#### 4.3.2 隧道病害的分级

为了确保隧道的安全,需要对隧道病害进行定期检查。根据《公路隧道养护技术规范》<sup>[626]</sup>的要求,高速公路隧道结构的检查分为日常检查、定期检查、特别检查和专项检查。根据检查所得隧道结构的破损程度,对隧道结构由好至坏分为 B,1A,2A,3A 四级。《铁路工务技术手册——隧道》等规范<sup>[619-623]</sup>均从某单一因素(如裂缝宽度、裂缝长度、渗漏水、衬砌剥落、衬砌材料劣化等)的角度出发进行了隧道结构病害分级。

目前,国内外对隧道衬砌病害的评估主要都是基于先通过对病害进行检测,再利用数值计算、理论模型等方法对其承载力、稳定性、裂损状况、耐久性等进行模拟<sup>[625]</sup>。但以上计算方法一般仅限于单一病害的评估,为了全面分析不同病害作用下隧道的安全状态,可应用层次分析法<sup>[624]</sup>、灰色理论<sup>[625]</sup>、模糊数学<sup>[627]</sup>等理论对隧道病害数据进行深入的统计、分析,以建立定量化的隧道病害分级方法<sup>[624]</sup>。需要强调的是,隧道作为一种典型的“隐蔽工程”,衬砌受自然环境、围岩和地下水等多种复杂因素的影响,无论采用传统还是交叉学科的理论以实现隧道病害的合理分级,对隧道所处环境以及病害信息的精确测量都是最基本的要求。为了从本质上对隧道的病害进行分级,需要密切结合隧道的地质和施工情况,进行“基于病因”的病害分级,以制定“标本兼治”的“治疗方案”。这也对隧道施工过程中围岩、施工质量资料的完整、真实记录提出了要求,鼓励建立“隧道档案”制度,以从本质上分析病因,制订治疗方案。

### 4.4 维护与加固(重庆交通大学张学富、周杰老师提供初稿)

目前国外在铁路隧道维修养护管理中,应用了人工智能技术,开发了诊断隧道病害的专家系统软件,使铁路维修养护管理工作达到了一个新的水平<sup>[625]</sup>。日本对其国内的铁路、公路、电力、地下铁路等隧道衬砌结构进行了大量调查,并根据变异、变形速度、开裂、错动、掉块、材料劣化、腐蚀等影响因素建立模型,开发了有效的专家系统软件<sup>[625]</sup>。美国学者基于结构损伤度的概念对结构物损伤评估方

法进行了研究<sup>[625]</sup>。日本、美国等推出的隧道健康诊断与维修管理规范<sup>[622-623]</sup>,为隧道的维护和加固提供了指导。中国学者也对隧道病害的防治进行了大量的研究,关宝树开发了铁路隧道病害(变异)诊断的专家系统软件<sup>[628]</sup>。中国的《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2003)<sup>[626]</sup>中对隧道常见的病害给出了推荐的维护和加固方法,最新的《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)于 2015 年 3 月 1 日开始实施,新规范中明确提出了“预防为主、防治结合”的养护原则。此外,中国组织编写的《公路隧道加固技术规范》目前正处于征求意见阶段,其中对隧道衬砌结构、裂缝和渗漏水等病害给出了相应的维护与加固方法。中国对隧道维护与加固的研究,大都局限于某一类具体的病害或具体的工程条件,整治措施的可靠性和可操作性均不够理想,缺乏系统性和完整性。

隧道所处地下环境的复杂性和致病原因的多样性,决定了隧道维护与加固方案的灵活性和针对性。本节主要介绍隧道衬砌结构(衬砌加固、套拱加固、注浆加固、换拱加固)的维护与加固方法以及裂缝、渗漏水等的治理方法。

#### 4.4.1 衬砌加固

衬砌加固常采用喷射混凝土、嵌入钢拱架、粘贴纤维复合材料和粘贴钢板(带)4 种加固措施。其中喷射混凝土法和嵌入钢拱架法的设计计算按照增大截面加固法进行验算,粘贴纤维复合材料法和粘贴钢板(带)法分别参考各自方法计算粘贴对强度的影响。

对于裂缝较多,但深度较浅,发展缓慢的局部破损,可以采用喷射混凝土法进行加固,当裂损严重时喷射混凝土可与钢筋网、锚杆(锚索)结合使用。喷射混凝土加固法早在 20 世纪 80 年代就有相关的报道,在石匣隧道<sup>[629]</sup>、重庆四角山隧道中均取得了良好的加固效果。采用素喷对轻微裂损衬砌加固后,拱的极限承载能力比原衬砌拱提高了将近 1 倍;采用网喷对临近失稳的衬砌加固后,拱的极限承载能力可比原衬砌提高 1.3 倍左右<sup>[630]</sup>。随着材料与工艺的发展,喷射玻璃纤维混凝土(GFRC)或高分子材料<sup>[631]</sup>、混钢纤维混凝土(SFRC)<sup>[632]</sup>等的加固方法不断推陈出新。其中纤维混凝土具有较高的力学性能和良好的耐久性,可以在喷层-混凝土结合面上传递拉应力和剪应力,对于断裂、错位后处于复杂应力状态下的隧道结构,是一种理想的补强材料。喷射混凝土的加固施工方法虽已较为成熟,但随着中

国高铁时速的提升,需要注意喷混凝土边缘区域应与原衬砌顺接,以防止结构突变区在行车风动力下的剥落。

当衬砌裂缝密集,裂缝的深度和宽度影响混凝土的整体性,且隧道内轮廓与建筑限界富余较小时,可采用嵌入钢拱架法进行加固,如仲澳隧道<sup>[631]</sup>、台湾某单线铁路隧道和公路隧道<sup>[633]</sup>等均采用了此治理方法。嵌入钢拱架加固分全断面嵌拱和拱部嵌拱 2 种方式,要求加固拱架和既有衬砌成为一体,故要求新增混凝土的强度等级应比原衬砌混凝土提高一级,且应不低于 C25。原衬砌的开槽施工若施工不当则会对原衬砌造成应力集中,因此在隧道净空允许的情况下,嵌钢拱架后再联合网喷混凝土进行补强则效果更佳。

当衬砌因材料劣化在较小范围内出现掉块可能,但没有漏水,且净空富余较小时,可采用粘贴钢板或纤维复合材料的方法进行加固。针对粘贴钢板、纤维补强等方法,学术界已提出了比较成熟的设计理论<sup>[634-636]</sup>。粘贴钢板加固是通过将钢板牢固粘接在混凝土构件表面以提高其承载力的加固方法,多用于盾构隧道结构的加固<sup>[637]</sup>,遵义市牯牛坡公路隧道采用此法进行加固处理<sup>[638]</sup>。对于新奥法建设的公路隧道,粘贴钢板加固耐久性及美观性差,安全可靠度也一般,粘贴纤维复合材料法<sup>[274,639]</sup>则在此种隧道加固工程中应用更广。纤维复合材料是柔性的,即使加固结构的表面不平整,也可以达到 99% 的有效粘贴率,而且在加固过程中能保证隧道的正常使用。当要使构件承载力有较大提高时,可以在构件表面粘贴多层纤维布进行加固。但是当纤维布的使用量超过一定范围时,纤维的加固作用反而会降低<sup>[636]</sup>,因此在使用此法时需要加以注意。

#### 4.4.2 套拱加固

何川等<sup>[274,640-642]</sup>众多国内外学者通过实验室模型试验,研究了套拱加固隧道的衬砌受力和破坏模式。EKPeI 等<sup>[643-644]</sup>对套拱补强隧道进行了有限元模拟,对套拱加固法提出了一些指导意见。实验室和数值研究成果可对套拱加固的应用设计起指导作用,但实验室试验很难精确模拟地层抗力,数值研究中地层、接触等参数也难以真正模拟隧道与复杂围岩的相互作用,故研究成果的适用性与正确性有待商榷,但可利用研究成果中的规律性对工程设计进行指导。

“八一”、“向阳”隧道<sup>[644]</sup>、翠竹岭公路隧道<sup>[645]</sup>、赚宝隧道<sup>[646]</sup>的二衬均采用了套拱加固的治理方



法。为了保证套拱加固的效果,施工前应先对原衬砌进行局部补强和防渗漏处理,并尽量做到工程类比与有限元计算模拟相结合<sup>[644]</sup>。此外,根据“治病不如防病”的理念,对运营隧道的中初期病害,也可以采取套拱加固作为预防性处治措施。

#### 4.4.3 注浆加固

注浆加固被大量应用于因衬砌背后空洞、围岩松弛、偏压、滑坡等引起的衬砌开裂、变形、渗漏水等隧道病害的治理或隧道病害的预防。如石匣隧道<sup>[629]</sup>、上海轨交运营隧道等均采用此法进行加固。

运营隧道注浆加固一般联合网喷、钢带和嵌钢拱架等综合补强措施,且需要考虑注浆对已有结构的影响,不能因注浆而导致已有结构变形甚至破坏。此外,在既有衬砌上开注浆孔的孔径不宜过大,开孔不应损伤原有防水板,这都对施工技术提出了较高的要求。虽然注浆加固隧道能起到良好的治理效果,但注浆加固的设计理论假设过多,目前仍处于半经验设计阶段。也有很多学者采用数值分析法<sup>[647]</sup>研究注浆加固的模型试验,但注浆后围岩参数、围岩与结构接触参数选取方面的研究仍需进一步加强,以对运营隧道的注浆加固设计提供理论基础。此外,在进行注浆加固设计时,必须考虑注浆土体力学性质随时间的劣化作用,以防止加固效果在数年后失效。

#### 4.4.4 换拱加固

换拱是对公路隧道在施工中和营运后较为严重隧道病害的一种较为彻底的病害处治措施,一般需要先对围岩注浆加固,然后再进行原拱的拆除。运营隧道换拱维护的报道日渐增多,如重庆渝北隧道、赚宝隧道等。

换拱技术在中国已相对成熟,但原拱的拆除依旧存在诸多难点需要解决<sup>[648]</sup>。首先是拆除方法有爆破、凿除、切割等方式,其中爆破法因周期短、效益高而被优选采用,但爆破的扰动大<sup>[648]</sup>,需采用静态爆破、预裂控制爆破、微震爆破法等,因此根据工程特点选择拆除方法并对爆破参数进行合理设计是难点之一。再次经过旧衬砌拆除处理后,围岩的压力增长很快,临时支撑阶段围岩压力大且不均匀,每次拆除衬砌的长度、拆后临时支护的设计是难点之二,赚宝隧道采取了每次换拱3 m,间隔换拱的方法<sup>[646]</sup>。此外,为了尽快封闭拆除的二衬,采用何种方法预制更换二衬也是需要探讨的问题。

#### 4.4.5 裂缝治理

隧道裂缝的产生与地质、设计、偏压荷载、施

工<sup>[629]</sup>等因素有关,传统的裂缝观测方法有记录末端位置法、贴石膏条(饼)法、刻度显微镜观测法、专用测缝计量测法等。近年来,一些新的监测方法也逐渐兴起<sup>[649]</sup>,如超声波检测法、光纤传感检测法、图像处理检测法等,其中图像处理检测法具有非接触、效率高、便捷直观等优点,逐渐成为研究的主流方向<sup>[649]</sup>。

通过监测所得裂缝数量、方向、深度等参数,可分析裂缝对衬砌承载力的影响。对隧道承载力有影响的裂缝,应对隧道结构及围岩进行加固处理;对不影响结构受力的裂缝,直接对裂缝进行治理<sup>[650]</sup>,可采用锚杆加固、碳纤维加固、骑缝注浆、凿槽嵌补及直接涂抹等裂缝整治措施<sup>[651]</sup>。

目前裂缝治理的通常做法是:对宽而深的裂缝采用环氧树脂浆液灌注处理,对细而浅的裂纹采用环氧树脂浆液进行表面封闭处理<sup>[638,652]</sup>。但不同工程对宽、细裂缝的划分标准有所不同,主要有0.5 mm和0.2 mm两种划分标准。对于裂缝治理,除了采用压浆、环氧树脂粘结的方法,还可采用碳纤维布(CFRP)加固的方法。罗立娜<sup>[275]</sup>根据荷载结构法,以碳纤维补强钢筋混凝土偏压构件的理论为基础,提出了裂缝发展分析方法,初步形成了适用于碳纤维补强公路隧道衬砌结构的设计计算方法。猫狸岭隧道等隧道裂缝治理中均采用了粘贴碳纤维布的加固方法<sup>[275,653]</sup>。

随着隧道裂缝治理经验的增多以及材料的进步,新材料也逐渐被应用于裂缝的维护和加固。基于全寿命的设计理论,在隧道二衬中加入适量的纤维材料也可以有效地预防混凝土的收缩裂缝<sup>[631]</sup>。

隧道裂缝与结构强度是相互关联的,在完成对隧道裂缝的治理后,要对结构性裂缝进行长期监测,根据后续裂缝发展情况进一步采用粘贴钢板加固、粘贴纤维或开槽增设拱架等处治措施<sup>[654]</sup>。

#### 4.4.6 渗漏水治理

渗漏水是运营隧道的“顽疾”,与自然环境、设计、施工均有关,病害机理及理论研究较复杂。目前已有关于运营隧道渗漏水病害机理的数值研究成果<sup>[655-657]</sup>,如杨甲奇<sup>[657]</sup>基于渗流理论采用流固耦合数值计算法分析了隧道衬砌结构注浆前后受力(地应力和水压力)、涌水量的变化和注浆后围岩的稳定性,指出适当增大注浆圈的渗透系数,保证地下水有一定的渗流通道,可减小围岩压。但目前关于隧道渗漏水的理论研究成果有的不全面,有的未经过试验验证,在指导实际工程方面仍有不足<sup>[657]</sup>。中国



隧道渗漏水病害的治理多是在掌握工程原防水的设计、施工、验收资料的基础上依赖工程经验进行的。

从应用的角度,可将隧道中的渗漏水按照形式和面积简单分为点、线、面 3 种形式,并采取不同的治理方法。目前已有许多关于公路隧道、铁路隧道、电力隧道、寒区隧道、岩溶隧道渗漏水治理的相关报道<sup>[655-658]</sup>,中国隧道衬砌渗漏水的整治,始终没有脱离“一封补,二注浆,三充填,四引排”的综合治理措施<sup>[659]</sup>。

较之普通的隧道,寒区隧道渗漏水的病害机理和治理则更为复杂,寒区的低温虽然是导致隧道围岩和衬砌冻融破坏而产生渗漏水的主要原因,但低温冻土也可以作为防止隧道渗漏水的天然保护层。故在寒区隧道渗漏病害防治中可以采用在衬砌内表面铺设绝热层等保温措施来预防寒区隧道的渗漏,也可以采取抬高隧道浅埋段冻土上限的方法,以使冻土作为天然防水层<sup>[660]</sup>。

隧道病害的“致病原因”是多因素综合作用的结果,因此在进行隧道病害治理时,要结合隧道施工过程中的地质素描和施工质量记录,找出病害的主要“病因”,以做到“对症下药”的进行维护和加固。同时,在进行隧道设计时,要考虑复杂地质环境对隧道结构的影响,对不良因素进行“疏堵结合”的处治,使隧道做到“强身健体、预防生病”。

## 5 结 语

王梦恕院士指出“21 世纪是隧道及地下空间大发展的世纪”。随着技术水平的不断进步和运营发展的需要,隧道势必将越修越长,越修越宽,建设难度越来越大,面临的各种问题也越来越复杂。隧道工程作为一个复杂的系统工程,其建设涉及到结构、防排水、岩土、地质、地下水、空气动力、光学、消防、交通工程、自动控制、环境保护、工程结构等多个领域、多种学科,是综合性很强的复杂技术,需要多学科、多领域联合研究、共同攻关。中国早已是隧道大国,隧道工程数量、长度等指标都早已跃居世界首位,但我们依然行进在隧道强国的路上。

可喜的是,中国隧道工程建设事业仍在持续、快速、蓬勃发展,隧道建设基础理论日趋成熟,研究手段日益全面,勘测设计技术日益先进,建设规模日益宏大,结构形式日趋丰富,施工技术逐步迈向机械化,材料日益先进,装备渐趋完备……21 世纪中国隧道建设速度与规模必将迈上一个新的台阶,让我

们携起手来,为把中国由隧道大国变成隧道强国而共同奋斗!

## 策划与实施

总策划:马建  
总组稿:孙守增,赵文义  
组 稿:王磊,马勇,刘辉,张伟伟,陈红燕,  
陈磊,魏雅雯  
统 稿:长安大学叶飞老师

## 致 谢

本文在成稿过程中,还得到西南交通大学王明年、于丽老师,天津大学张稳军老师的大力协助,特致谢忱!

## 参考文献: References:

[1] 何 德.中国公路发展历程[J].中国公路,1999,99(7):19.  
[2] 《铁道建筑》编辑部.我国铁路、公路和地铁隧道工程的显著成就[J].铁道建筑,1990(11):11-42  
[3] 蒋树屏.我国公路隧道建设技术的现状及展望[J].交通世界,2003,2:22-27  
[4] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015,35(2):95-107.  
[5] 王梦恕.中国隧道及地下工程修建技术[M].北京:人民交通出版社,2010.  
[6] 李术才,薛翊国,张庆松,等.高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1297-1307.  
[7] 李利平,李术才,张庆松.岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J].岩土力学,2010,31(2):523-528.  
[8] 黄伦海,秦 峰,龚世强.雅宝双洞八车道公路隧道设计[J].现代隧道技术,2005,42(4):5-8.  
[9] 刘庭金,莫海鸿,房营光.龙头山双洞 8 车道公路隧道施工[J].铁道标准设计,2008(1):76-79.  
[10] 逢铁铮.地下十字交叉隧道的设计与施工技术[J].公路,2013(8):310-313.  
[11] 谢卫东,后宝琴.钟鼓山隧道于今年“十一”前通车[N/OL].福建之窗(2007-07-24)[2015-04-30].<http://news.66163.com/2007-07-24/300943.shtml>.  
[12] 刘福昌,王 月.鸡金山隧道开工[N].中国铁道建筑报,2008-01-08.  
[13] 杨 飞.弄尾隧道爆破施工技术浅析[J].商品与质量:建筑与发展,2011(10):39-40.  
[14] 蒋树屏,文栋良,郑升宝.嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):649-656.  
[15] 王 洋,刘贵有,琚远航,等.雅克夏雪山隧道涌水涌碴防治研

- 究[J]. 西南公路, 2013(2): 268-273.
- [16] 霍玲. 高寒高海拔隧道施工机械配套技术[J]. 山西建筑, 2013, 39(5): 222-223.
- [17] 王晓振, 吴顺川. 地质雷达在东山隧道二衬检测中的应用[J]. 路基工程, 2010(5): 167-169.
- [18] 吴晓琪. 唐家壩隧道进口施工及安全保护技术[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2014, 27(增): 41-45.
- [19] 刘长江. 牛头山黄土铁路隧道的地震稳定数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 547-551.
- [20] 贾连辉. 超大断面矩形盾构顶管设计关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(11): 1098-1106.
- [21] 蒋树屏, 赵阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3460-3464.
- [22] 袁勇, 刘涛, 柳献. 运营越江隧道服役现状调查与检测评估[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(2): 83-89.
- [23] 安永林, 彭立敏, 吴波, 等. 隧道坍方突发性事件风险可拓法综合评估[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(2): 514-520.
- [24] 张建斌. 厦门翔安海底隧道陆域段 CRD 法位移监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3653-3658.
- [25] 王树英, 阳军生, 唐鹏, 等. 八车道明挖湖底隧道结构受力现场测试与安全性评价[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 120-127.
- [26] 陈健. 扬州瘦西湖隧道湖东段基坑工程设计与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 590-594.
- [27] 谢红强, 何川, 李围. 江底盾构隧道施工期外水压分布规律的现场试验研究[J]. 岩石力学, 2006, 27(10): 1851-1855.
- [28] 韩瑞庚. 地下工程新奥法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [29] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [30] 肖翔. 吊沟岭隧道软岩施工方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [31] 陆家辉. 软岩巷道支护技术[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [32] 郑雨天. 关于软岩巷道地压与支护的基本观点[J]. 软岩巷道与支护论文集, 1985, 5: 31-35.
- [33] HE Man-chao. Constitutive Relationship for Plastic Dilatancy due to Weak Intercalations in Rockmasses[C]//Engineering Group of the Geological Society. Proceedings of the 26th Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society. Leiden: Balkema Press, 1994: 4173-4180.
- [34] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [35] TURNER M J, CLOUGH R W, MARTIN H C, et al. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structure[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1956, 23(9): 805-823.
- [36] HUDSON J A, BROWN E T, FAIRHURST C, et al. Comprehensive Rock Engineering[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [37] UNLU T, GERCEK H. Effect of Poisson's Ratio on the Normalized Radial Displacements Occurring Around the Face of a Circular Tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18: 547-553.
- [38] BASARIR H, GENIS M, OZARSLAN A. The Analysis of Radial Displacements Occurring near the Face of a Circular Opening in Weak Rock Masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 40: 771-783.
- [39] ABDEL-MEGUID M. Three Dimensional Analysis of Unlined Tunnels in Rock Subjected to High Horizontal Stress[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(6): 1208-1224.
- [40] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [41] 刘承论. 基于解析积分求解影响系数的三维 FSM 边界单元法[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(8): 1243-1248.
- [42] 谭云亮, 姜福兴. 锚杆对节理围岩稳定性影响的离散元研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 361-365.
- [43] CUNDALL P. A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems[C]//ISRM. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy: ISRM, 1971: 2-8.
- [44] 孙昊. 公路隧道施工监控量测及分析研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- [45] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [46] 刘春原. 工程地质学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [47] 吕有年. 水工压力隧洞结构计算与岩石抗力系数问题[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [48] 钱令希. 关于水工有压隧洞计算中的弹性抗力系数“K”[J]. 土木工程学报, 1955, 2(4): 369-380.
- [49] 蔡晓鸿. 圆形压力隧洞岩石抗力系数  $K$  的理论和计算[J]. 工程力学, 1988, 5(3): 100-108.
- [50] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [51] 孙钧, 汪炳鑑. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [52] 杨广安, 李之达, 李艳芳, 等. 围岩物理参数对应力释放影响的研究[J]. 交通科技, 2008, 228(3): 35-37.
- [53] 王士民, 何川, 高云龙. 高水压条件下盾构隧道联络通道及集水井施工力学行为研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 108-114.
- [54] 张磊, 韩阳, 范量. 浅析球墨铸铁管在城市管道中的应用及前景[J]. 山西建筑, 2008, 34(14): 31-33.
- [55] 何川, 周济民, 封坤, 等. 基于接头非线性抗弯刚度的盾构隧道迭代算法的实现与应用[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 166-173.
- [56] 朱伟, 黄正荣, 梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 940-947.
- [57] 苏宗贤, 何川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 131-136.
- [58] 彭益成, 丁文其, 朱合华, 等. 盾构隧道衬砌结构的壳-接头模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1823-1829.
- [59] 杨其新, 刘东民, 盛草樱, 等. 隧道及地下工程喷膜防水技术[J]. 铁道学报, 2002, 24(2): 83-88.
- [60] 杨其新, 常炳阳, 刘东民, 等. 隧道力环境下防水膜防水性能损伤的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 487-491.

- [61] 常炳阳,杨其新,刘东民,等.隧道及地下工程喷膜防水材料力学性能研究[J].中国建筑防水,2008(8):15-19.
- [62] 朱祖熹.喷涂聚脲防水涂料在地铁与隧道工程中的应用[J].中国建筑防水,2010(21):43-48.
- [63] 王育江,钱春香,王 辉,等.隧道混凝土防水性能研究[J].现代隧道技术,2009,46(1):76-80.
- [64] 陈月顺,曾三海,李厚祥,等.隧道自密实防水混凝土抗渗性试验研究[J].新型建筑材料,2005(5):18-20.
- [65] 刘杰胜,郑雄贞,邹民虎,等.“刚性防水和混凝土结构自防水”系列报道之七:有机硅改性混凝土防水抗渗性能研究[J].中国建筑防水,2013(2):8-10.
- [66] 李厚祥,唐春安,熊健民,等.隧道防水新材料及其关键技术的研究[J].混凝土,2006(3):33-36,83.
- [67] 向 科,石修巍.盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J].地下空间与工程学报,2008,4(2):361-364.
- [68] 朱祖熹.当今国内外盾构隧道防水技术比较谈[J].地下工程与隧道,2002(1):14-20.
- [69] 朱 伟,钟小春,秦建设,等.盾构管片接缝防水材料防水耐久性实验及分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(2):281-285.
- [70] 刘建国.盾构隧道遇水膨胀密封带接触压力试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1122-1125.
- [71] 李 奕,钟志全.一种新型盾尾刷的设计与应用[J].建筑机械化,2011,32(1):82-84.
- [72] 赵新合,陈 馈.钱塘江底承压水层盾尾刷改造及更换技术[J].建筑机械化,2010,31(8):66-68.
- [73] 王 飞,袁大军,董朝文,等.盾构直接切削大直径钢筋混凝土桩基试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2566-2574.
- [74] 王 飞,袁大军,董朝文,等.盾构直接切削大直径群桩的刀具配置研究[J].土木工程学报,2013,46(12):127-135.
- [75] 陈 馈.北京铁路地下直径线盾构选型[J].建筑机械,2007(6):36-39.
- [76] 冯欢欢,陈 馈,王助锋,等.大连富水复合地层盾构施工关键技术探讨[J].现代隧道技术,2014,51(1):186-191.
- [77] 丁志诚,张志勇.广州地铁隧道施工中的盾构选型及盾构改进应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1820-1823.
- [78] 沈林冲,张金荣,秦建设,等.杭州地铁1号线盾构选型探讨[J].铁道建筑,2011(7):66-69.
- [79] 袁大军,黄清飞,小泉淳,等.水底盾构掘进泥水喷发现象研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11):2296-2301.
- [80] 袁大军,黄清飞,李兴高,等.盾构掘进黏土地层泥水劈裂伸展现象研究[J].岩土工程学报,2010,32(5):712-717.
- [81] 刘学彦,袁大军.盾构掘进过程中防止泥水劈裂的泥水压力设定[J].土木工程学报,2014,47(5):128-132.
- [82] LIU Xue-yan, YUAN Da-jun. An In-situ Slurry Fracturing Test for Slurry Shield Tunneling[J]. Journal of Zhejiang University-science A, 2014, 15(7):465-481.
- [83] 刘学彦,袁大军.泥水劈裂试验伸展现象的力学分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1434-1442.
- [84] 刘学彦,袁大军,郭小红.现场泥水劈裂试验及应用研究[J].岩土工程学报,2013,35(10):1901-1907.
- [85] 闵凡路,朱 伟,魏代伟,等.泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J].岩土工程学报,2013,36(4):722-727.
- [86] 魏代伟,朱 伟,闵凡路.砂土地层泥水盾构泥膜形成时间及泥浆压力转化率的试验研究[J].岩土力学,2014,35(2):423-428.
- [87] 戴仕敏.超大直径土压平衡盾构隧道施工关键技术[J].施工技术,2011,40(18):1-5.
- [88] 徐长胜,李 婷.土压平衡盾构在粘土卵石层中的掘进技术[J].建筑机械化,2011,32(6):70-72.
- [89] 潘庆明.全断面硬岩及地层转换时地铁盾构隧道掘进参数分析与优化控制[J].铁道建筑技术,2013(8):17-23.
- [90] 肖 超,阳军生,李 科,等.穿越湘江地层裂隙密集区域大直径泥水平衡盾构掘进参数控制[J].铁道科学与工程学报,2013,10(5):40-46.
- [91] 郭信君,闵凡路,钟小春,等.南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J].岩石力学与工程学报,2012,32(10):2154-2160.
- [92] 肖明清.南京纬三路长江隧道总体设计的关键技术研究[J].现代隧道技术,2009,46(5):1-5,12.
- [93] 王 晖,竺维彬,李大勇.复合地层中盾构掘进的姿态控制[J].施工技术,2011,40(10):67-69.
- [94] 龚国芳,洪开荣,周天宇,等.基于模糊 PID 方法的盾构掘进姿态控制研究[J].隧道建设,2014,34(7):608-613.
- [95] SAVEUR J. Immersed and Floating Tunnels, Second Edition. Chapter 3: Structural Design of Immersed Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, 12(2):93-109.
- [96] 朱 升.沉管隧道管段浮运和沉放过程中流场和阻力特性的研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [97] RASMUSSEN N S. Concrete Immersed Tunnels — Forty Years Experience[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, 12(1):33-46.
- [98] 陈韶章,陈 越.沉管隧道设计与施工[M].北京:科学出版社,2002.
- [99] 李兴碧,王明洋,钱七虎.沉管隧道的发展与琼州海峡的沉管隧道方案[J].岩土工程界,2003,6(7):7-11.
- [100] GURSOY A. Immersed Steel Tube Tunnels: An American Experience[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(4):439-453.
- [101] GLERUM A. Developments in Immersed Tunnelling in Holland[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(4):455-462.
- [102] 王兴铎.水下沉管隧道的发展及施工技术[J].中国铁路,2001(5):48-50.
- [103] 陈 越.从广州地区沉管隧道建设谈沉管隧道的建造设想[J].现代隧道技术,2008,45(1):10-16.
- [104] INGERSLEV L C F. Considerations and Strategies Behind the Design and Construction Requirements of the Istanbul Strait Immersed Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(6):604-608.
- [105] 肖 伟.广州某沉管隧道施工若干关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2007.
- [106] JOSEPH Y C. The State-of-the-art Technology for Immersed Tube Tunnel in Hong Kong and Korea[C]//The Hong Kong Institution of Engineers. Proceedings of the Seminar on “the State-of-the-art Technology and Experience on Geotechnical

- Engineering in Korea and Hong Kong". Hong Kong: The Hong Kong Institution of Engineers, 2008: 1-45.
- [107] 杨文武,毛 儒,曾楚坚,等. 香港海底沉管隧道工程发展概述[J]. 现代隧道技术, 2008(增 1): 41-46.
- [108] 蒋义康. 甬江水底隧道工程的管段沉放技术[J]. 港口工程, 1998(4): 49-54, 61.
- [109] 管敏鑫,严金秀,唐 英. 沉管隧道技术在我国的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 18(增): 1000-1004.
- [110] 沈秀芳,乔宗昭,贺春宁. 上海外环沉管隧道设计(一)[J]. 地下工程与隧道, 2003(3): 2-5.
- [111] 贺春宁,陈 鸿,乔宗昭. 上海外环沉管隧道设计(二)[J]. 地下工程与隧道, 2003(4): 1-6.
- [112] 张志刚,刘洪洲. 公路沉管隧道的发展及其关键技术[J]. 隧道建设, 2013(5): 343-347.
- [113] 黎宝松. 广州珠江沉管隧道的设计与施工[J]. 城市道桥与防洪, 1992(4): 27-34.
- [114] 陈韶章,黄国源,韩广禄. 珠江沉管隧道的几何设计[J]. 世界隧道, 1996(6): 7-11.
- [115] 刘千伟,杨国祥,周 松. 宁波市常洪沉管隧道工程[J]. 世界隧道, 2000(6): 6-13.
- [116] 胡政才,先明其,马积薪. 日本多摩川沉管隧道的设计与施工[J]. 世界隧道, 1995(5): 52-75.
- [117] GOKCE A, KOYAMA F, TSUCHIYA M, et al. The Challenges Involved in Concrete Works of Marmaray Immersed Tunnel with Service Life Beyond 100 Years[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(5): 592-601.
- [118] ZHANG K, XIANG Y, DU Y. Research on Tubular Segment Design of Submerged Floating Tunnel[J]. Procedia Engineering, 2010, 4: 199-205.
- [119] 万晓燕,管敏鑫,唐 英. 沉管隧道段的结构计算与分析[J]. 世界隧道, 1999(3): 19-22.
- [120] 彭海阔,孟 光,李鸿光. 沉管隧道结构有限元建模及模型有效性研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 6: 1-3, 16.
- [121] 陈海军. 沉管隧道主体结构设计关键技术分析研究[J]. 隧道建设, 2007(1): 46-50, 69.
- [122] 张易谦,杨国祥,李 侃. 大型沉管隧道混凝土裂缝控制技术[J]. 中国市政工程, 2003(2): 21-24, 27, 68.
- [123] 陆元春,宁佐利. 多向预应力沉管隧道管段设计[J]. 中国市政工程, 2005(1): 48-49, 55.
- [124] 刘 雯,陈建宏. 基于 ANSYS 的沉管隧道管段内力三维有限元分析[J]. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2008, 17(4): 1-3.
- [125] 陈 鸿,蔡岳峰,贺春宁. 宁波市东外环路常洪隧道设计[J]. 地下工程与隧道, 2001(2): 23-26, 49.
- [126] 李荣高. 外环越江沉管隧道大体矩形混凝土管段制作裂缝控制[J]. 上海建设科技, 2010(1): 57-58.
- [127] 刘 鹏,丁文其,杨 波. 沉管隧道接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2): 133-139.
- [128] 刘 鹏,丁文其,金跃郎. 沉管隧道接头三维非线性刚度力学模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 232-237.
- [129] 刘 鹏,丁文其,杨 波. 考虑接头力学特性的沉管隧道计算方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(6): 1983-1991.
- [130] 萧文浩,徐国平,禹海涛. 沉管隧道大比尺管节接头压弯试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 181-186.
- [131] 禹海涛,袁 勇,刘洪洲. 沉管隧道接头力学模型及刚度解析表达式[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 145-150.
- [132] 徐晓扉,付石峰,白 云. 沉管接头突发渗漏水的红外监测模型试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2426-2432.
- [133] 胡指南,谢永利,来弘鹏,等. 沉管隧道节段接头剪力键破坏状态与机理研究[J]. 建筑结构, 2015(1): 77-81.
- [134] 武义凯,谢永利. 沉管隧道的 ANSYS 三维有限元分析研究[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(3): 296-301.
- [135] 庄道庆. 沉管隧道的防水技术[J]. 东海海洋, 2001, 19(3): 32-38.
- [136] 唐 英,管敏鑫,万晓燕. 沉管隧道接头的理论分析及研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(1): 69-74.
- [137] 管敏鑫,唐 英,万晓燕. 沉管隧道接头的研究与设计[J]. 世界隧道, 1999(6): 9-16.
- [138] 陆 明,朱祖熹,张 勇. 大型沉管隧道管段接头防水试验研究[J]. 中国建筑防水, 2003(10): 9-12.
- [139] 刘千伟. 常洪沉管隧道接头施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2478-2483.
- [140] 黄 帆. 沉管隧道 GINA 橡胶止水带数值模拟分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(1): 96-102.
- [141] 刘正根,黄宏伟,张冬梅. 沉管隧道接头三维非线性数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 691-694.
- [142] 陆 明,陈 鸿. 超深埋海底沉管隧道接头防水设计的探讨[J]. 中国建筑防水, 2012(8): 17-21.
- [143] 肖晓春,林家祥,何拥军,等. 沉管隧道的一种最终接头形式及施工方法[J]. 现代隧道技术, 2005(5): 69-73.
- [144] 薛 勇. 沉管隧道接头研究[J]. 特种结构, 2003(3): 4-8.
- [145] 潘永仁,彭 俊,NAOTAKE S. 上海外环沉管隧道最终接头施工技术[J]. 施工技术, 2004(1): 37-39.
- [146] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic Design and Analysis of Underground Structures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247-293.
- [147] 刘 鹏,丁文其,杨 波. 深水超长沉管隧道接头及止水带地震响应[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 984-988.
- [148] 禹海涛,袁勇,徐国平,等. 超长沉管隧道抗震设计及其关键性问题分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 94-98.
- [149] YU H, YUAN Y, QIAO Z, et al. Seismic Analysis of a Long Tunnel Based on Multi-scale Method[J]. Engineering Structures, 2013(49): 572-587.
- [150] 丁峻宏,金先龙,郭毅之,等. 沉管隧道地震响应的三维非线性数值模拟方法及应用[J]. 振动与冲击, 2005(5): 21-25, 131-132.
- [151] 严松宏,高 峰,李德武,等. 南京长江沉管隧道的地震安全性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2800-2803.
- [152] 郭毅之,金先龙,丁峻宏,等. 沉管隧道地震响应分析中的三维接触模型与算法研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 48-52, 171.
- [153] 吴玖荣,徐 安. 用多质点-弹簧模型研究沉管隧道土体地震响应[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2009, 8(5): 68-72.
- [154] 韩大建,唐增洪. 沉管隧道地震反应的工程分析方法[C]//广

- 东省岩石力学与工程学会,广东省岩土工程与基础工程学术会议论文集,广州:广东省岩石力学与工程学会,1993:100-108,99.
- [155] 蒋树屏,张恩情,郭 军.沉管隧道结构构件耐火试验研究[J].现代隧道技术,2014(2):43-49.
- [156] 徐 湃,蒋树屏,周 健,等.沉管隧道火灾烟气蔓延特性[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(6):125-130.
- [157] 王 冲.特长海底沉管隧道火灾应急救援研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [158] 陆培毅,严 驰,刘 润.粘性土基于室内模型试验土压力分布形式的研究[J].建筑结构学报,2002,23(2):83-86.
- [159] 汤连生,黄国怡,杜赢中,等.考虑地下水渗流的基坑水土压力计算新图式[J].岩土力学,2004,25(4):565-569.
- [160] 李 峰,郭院成.基坑工程有限土体主动土压力计算分析研究[J].建筑科学,2008,24(1):15-18.
- [161] 李 峰,郭院成,周同和.基坑工程时变主动土压力研究[J].岩土工程学报,2008,30(增):125-128.
- [162] 金亚兵,刘吉波.相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J].岩土力学,2009,30(12):3759-3764.
- [163] 王洪亮,宋二祥,宋福渊.紧邻既有建筑基坑有限土体主动土压力计算方法[J].工程力学,2014,31(4):76-81.
- [164] 蒋 波.挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [165] 应宏伟,郑贝贝,谢新宇.狭窄基坑平动模式刚性挡墙被动土压力分析[J].岩土力学,2011,32(12):3755-3762.
- [166] 王海彦,密荣三,骆宪龙.地下结构设计的荷载、模型、方法的确定[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2007,6(3):5-10.
- [167] 黄明琦,张明聚,李云超.厦门海底隧道明洞回填前后结构安全性分析[J].北京工业大学学报,2008,34(3):265-270.
- [168] 宁茂权,徐军林.南京长江隧道盾构始发井结构分析[J].铁道标准设计,2009(6):102-105.
- [169] 李新星.邻近基坑开挖的运营地铁车站结构安全度分析[J].岩土力学,2009,30(增2):382-386.
- [170] 廖少明,余 炎,陈 亮.由基坑挡墙位移推算地层位移及其影响[J].岩土工程学报,2005,27(7):800-803.
- [171] 刘庭金,邓飞皇,莫海鸿.水位下降对地铁盾构隧道的影响分析[J].现代隧道技术,2008(增1):207-210.
- [172] 薛 莲,傅 晏,刘新荣.深基坑开挖对临近建筑物的影响研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(5):847-851.
- [173] 朱小蓉.地铁三线换乘站帮接建设对既有车站结构的影响分析研究[J].建筑施工,2009,4:237-239.
- [174] 李 昀,李华梅,吴 昊,等.大型圆形深基坑设计分析研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):938-944,967.
- [175] 龚晓南,高有潮.深基坑工程设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [176] MEYERHOF G G. Development of Geotechnical Limit State Design[J]. Canadian Geotechnical Journal,1995,32(1):128-136.
- [177] 卢世深,林亚超.桩基础的计算和分析[M].北京:人民交通出版社,1987.
- [178] 高大钊,孙 钧,陈汉忠,等.深基坑工程[M].2版.北京:机械工业出版社,2002.
- [179] 邓子胜.基于径向神经网络的深基坑非线性位移反分析[J].岩土工程学报,2005,27(5):554-557.
- [180] 邓子胜.深基坑支护结构-土非线性共同作用弹性地基反力法[J].土木工程学报,2006,39(4):68-72.
- [181] GENG Jian-xun,ZHANG Ke-xu,GENG Yong-chang. Elastic Subgrade Reaction Method Considering Nonlinear Interaction Between Soil and Retaining Structure for Foundation Pits[J]. 岩土工程学报,2008,30(增1):295-298.
- [182] 耿建勋,张克绪,何 林,等.基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(8):872-877.
- [183] 郭发忠,魏新良.地铁盾构区间风井基坑支护设计的空间效应性状分析[J].公路交通科技:应用技术版,2009(11):178-180.
- [184] 谢凌志,李胤铎,林旭明,等.基于地铁站基坑工程施工过程的场地土参数动态反演[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(5):19-26.
- [185] 周传波,蒋 楠,刘文进.武汉地铁站深基坑支护结构参数优化系统研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(6):1267-1275.
- [186] 刘射洪,袁聚云,赵 昕.弹性地基梁有限元法在基坑支护结构中的应用[J].工业建筑,2014,44(增):840-846.
- [187] 陈 骥.钢结构稳定与应用[M].北京:科学文献出版社,1994.
- [188] Det Norsshke Veritas. Rulers for the Design Construction and Inspection of Fixed Offshore Structures[M]. Oslo:Det Norsshke Verites,1974.
- [189] 胡 强,郭志川,刘 宁,等.深基坑支撑体系可靠度计算研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):674-677.
- [190] 陈 焘,张茜珍,周顺华,等.异形基坑支撑体系刚度及受力分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(7):1384-1389.
- [191] 郑 刚,程雪松,张 雁.基坑环梁支撑结构的连续破坏模拟及冗余度研究[J].岩土工程学报,2014,36(1):105-117.
- [192] 石林珂,贺为民,孙懿斐,等.深基坑稳定分析中的等弧长条分法及可视化软件设计[J].岩石力学与工程学报,2002,24(10):1568-1572.
- [193] 罗晓辉,李再光,何立红.基于可靠性分析的基坑土钉支护稳定性[J].岩土工程学报,2006,28(4):480-484.
- [194] 刘 鑫,洪宝宁,韩尚宇.地铁车站基坑稳定风险值计算[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(6):2331-2337.
- [195] 惠趁意,朱彦鹏,叶帅华.预应力锚杆复合土钉支护边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2013,35(增2):325-329.
- [196] 周 勇,张 磊.深基坑土钉加预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J].岩土工程学报,2014,36(增2):106-112.
- [197] 王成华,夏绪勇.边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J].四川建筑科学研究,2002,28(3):34-37.
- [198] 黄春娥,龚晓南,顾晓鲁.考虑渗流的基坑边坡稳定分析[J].土木工程学报,2001,34(4):98-101.
- [199] 吴开辉.基坑边坡失稳对邻近桩基的影响分析[J].福建建设科技,2015(1):1-4.
- [200] 陈万鹏.基坑开挖引起地表沉降的预测方法研究[D].南京:南京工业大学,2006.
- [201] 杨 茜,张明聚,孙铁成.软弱土层复合土钉支护试验研究[J].岩土力学,2004,25(9):1401-1408.
- [202] 魏焕卫,孙剑平,陈启辉,等.基坑边坡变形的理论计算方法

- [J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2): 75-79, 83.
- [203] 魏焕卫, 贾强, 陈建峰, 等. 基于 MINDLIN 解的边坡变形计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 49-54.
- [204] 小泉淳. 盾构隧道的抗震研究及算例[M]. 张稳军, 袁大军, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [205] ASCE. Earthquake Damage Evaluation and Design Considerations for Underground Structures[M]. Los Angeles: ASCE, 1974.
- [206] DOWDING C H, ROZEN A. Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking[J]. Journal Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(2): 175-191.
- [207] OWEN G N, SCHOLL R E. Earthquake Engineering of Large Underground Structures[R]. San Francisco: Federal Highway Administration, 1981.
- [208] SHARMA S, JUDD W R. Underground Opening Damage from Earthquakes[J]. Engineering Geology, 1991, 30(3): 263-276.
- [209] JSCE. The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake[J]. Japan Society of Civil Engineers, 1996, 81(3): 38-45.
- [210] 潘昌实. 隧道及地下结构抗震问题的研究概况[J]. 世界隧道, 1996(5): 7-6.
- [211] 王文礼, 苏灼谨, 林峻弘, 等. 台湾集集大地震山岳隧道受损情形之探讨[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 52-60.
- [212] HE Chuan, GENG Ping, YAN Qi-xiang. Seismic Damage of Tunnels in the Great Wenchuan Earthquake[C]//ICEE. Proceedings of the 1st ICEE. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009: 545-551.
- [213] HE C, ZHANG J, GENG P. Seismic Damage of Lifeline Engineering in the Great Wenchuan Earthquake[C]//SinoRock. International Symposium on Rock Mechanics, SinoRock 2009. Hong Kong: SinoRock, 2009: 1-10.
- [214] 王明年, 崔光耀, 林国进. 汶川地震灾区公路隧道震害调查及初步分析[J]. 西南公路, 2009(4): 41-46.
- [215] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008(3): 742-750.
- [216] 高波, 王峥峥, 袁松, 等. 汶川地震公路隧道震害启示[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 336-341.
- [217] 蒋莼秋. 世界地震工程 100 年(1891-1991)编年简史(一)[J]. 世界地震工程, 1992(1): 6-12.
- [218] THOMAS R K. Earthquake Design Criteria for Subways[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(6): 1213-1231.
- [219] 于翔, 陈启亮, 赵跃堂, 等. 地下结构抗震研究方法及其现状[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2000, 1(5): 63-69.
- [220] 铁道部第二设计院. 铁路工程设计技术手册: 隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1978.
- [221] GB 50267—1997, 核电厂抗震设计规范[S].
- [222] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [223] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [224] JTG B02—2013, 公路工程抗震规范[S].
- [225] GB 50909—2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
- [226] 何川, 耿萍, 晏启祥. IV 级围岩铁路隧道抗震计算上覆土柱合理计算高度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 144-150.
- [227] 耿萍, 何悦, 何川, 等. 地震系数法隧道上覆土柱的合理计算高度[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(4): 159-164.
- [228] 川岛一彦. 地下构造物耐震设计[M]. 东京: 鹿岛出版株式会社, 1994.
- [229] PHILLIPS J S, LUKE B A. Tunnel Damage Resulting from Seismic Loading[C]//Missouri University of Science and Technology. Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis: Missouri University of Science and Technology, 1991: 207-217.
- [230] OKAMOTO S, TAMURA C. Behavior of Subaqueous Tunnels During Earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1972, 1(3): 253-266.
- [231] 何川. シールドトンネル縦断方向の地震時挙動に関する研究[D]. 東京: 早稲田大学, 1999.
- [232] HE C, KOIZUMI A. Seismic Behavior in Longitudinal Direction of Shield Tunnel Located at Irregular Ground[C]//IASEM. Proceedings of the First International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul: IASEM, 1999: 1493-1498.
- [233] HE C, KOIZUMI A. A Study on Seismic Behavior of Shield Tunnels in Longitudinal Direction[R]. Tokyo: Waseda University, 1999.
- [234] KOIZUMI A, HE C. Dynamic Behavior in Longitudinal Direction of Shield Tunnel Located at Irregular Ground With Considering Effect of Secondary Lining[C]//New Zealand Society for Earthquake Engineering. Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000: 985-994.
- [235] HE C, KOIZUMI A. Study on Seismic Behavior and Seismic Design Methods in Transverse Direction of Shield Tunnels[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 11(6): 651-662.
- [236] 刘晶波, 王文晖, 张小波, 等. 地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 161-167.
- [237] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 122-127.
- [238] 耿萍, 张景, 何川, 等. 隧道横断面反应位移法基本原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3478-3485.
- [239] 张景, 何川, 耿萍, 等. 地下结构反应位移法的两种简化分析途径及应用[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 248-254.
- [240] 片山幾夫, 足立正信, 嶋田穰, 等. 地下埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案[C]//土木学会. 土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集第 1 部門. 东京: 土木学会, 1985: 1-9.
- [241] 刘如山, 胡少卿, 石宏彬. 地下结构抗震计算中拟静力法的地震荷载施加方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 237-242.
- [242] 陶连金, 王文沛, 张波, 等. 地铁地下结构抗震设计方法差异

- 性规律研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 170-176.
- [243] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1618-1624.
- [244] 李 亮, 杨晓慧, 杜修力. 地下结构地震反应计算的改进的反应位移法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1360-1364.
- [245] 雷晓燕. 岩土工程数值计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [246] LIAO Z P, WONG H L. A Transmitting Boundary for the Numerical Simulation of Elastic Wave Propagation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(4): 178-183.
- [247] 梁文灏, 李国良. 乌鞘岭特长隧道方案设计[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(2): 1-7.
- [248] CAULFIELD R, KIEFFER D, CAIN B, et al. Seismic Design Measures for the Retrofit of the Claremont Tunnel[C]//Jacobs Associates. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings. San Francisco: Jacobs Associates, 2005: 1-11.
- [249] 李 林. 隧道穿越断裂带地震响应特性及抗震措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [250] 王峥峥. 跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [251] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1884-1889.
- [252] 耿 萍, 唐金良, 权乾龙, 等. 穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2520-2526.
- [253] 郭陕云. 隧道掘进钻爆法施工技术的进步和发展[J]. 铁道工程学报, 2007(9): 67-74.
- [254] 申志军. 越江隧道钻爆法施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 976-978.
- [255] 《中国公路学报》编辑部. 中国公路交通学术研究综述·2012[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 2-50.
- [256] 王梦恕. 大瑶山隧道修建新技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994.
- [257] 中国铁道科学研究院. 客运专线大断面隧道控制爆破技术试验研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.
- [258] 毛建安. 光面爆破技术在向莆铁路青云山特长隧道工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 134-138.
- [259] 杨年华, 张志毅. 隧道爆破振动控制技术研究[J]. 铁道工程学报, 2010(1): 82-86.
- [260] 陈 贵, 高文学, 刘 冬, 等. 浅埋隧道开挖爆破震动监测与控制技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 193-198.
- [261] 彭立敏, 刘小兵. 交通隧道工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [262] 王海涛, 贾金青, 郁 胜. 隧道管棚预支护的力学行为及参数优化[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 78-83.
- [263] 沈桂平, 曹文宏, 杨俊龙, 等. 管幕法综述[J]. 岩土工程界, 2006(2): 30-32.
- [264] 史继尧. 冻结法施工在地铁联络通道中的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(增2): 159-163.
- [265] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [266] 赵喜忠. 隧道喷射混凝土抗冻耐久性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [267] 罗彦斌, 陈建勋, 段献良. C20 喷射混凝土冻融力学试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 113-119.
- [268] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [269] 谭忠盛, 喻 渝, 王明年, 等. 大断面黄土隧道中型钢与格栅适应性的对比试验[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 628-633.
- [270] 张顶立. 隧道初期支护结构受力特性及适用性研究[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 78-84.
- [271] 姚显春, 李 宁, 陈蕴生. 隧洞中全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2272-2276.
- [272] 陈建勋. 黄土隧道网喷支护结构中锚杆的作用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 71-75.
- [273] 罗彦斌. 软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1519-1525.
- [274] 何 川, 唐志成, 汪 波, 等. 内表面补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 406-412.
- [275] 罗立娜. 碳纤维补强条件下公路隧道衬砌计算方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [276] 崔玖江. 隧道与地下工程修建技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [277] 何 晖, 赵 敏, 李宝平. 土木工程测试技术[M]. 西安: 西安工业大学出版社, 2006.
- [278] 王玉文. 公路隧道周边位移监测及其应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [279] 罗利锐. 超前地质预报系统的提出及其发展方向[J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 614-618.
- [280] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1344-1352.
- [281] LI Li-ping, WANG Qing-han, LI Shu-cai, et al. Cause Analysis of Soft and Hard Rock Tunnel Collapse and Information Management[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2014, 23(4): 1227-1233.
- [282] GALLARDOL L A, MEJU M A. Characterization of Heterogeneous Near-surface Materials by Joint 2D Inversion of DC Resistivity and Seismic Data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(13): 1658-1661.
- [283] MEJU M A, GALLARDO L A. Evidence for Correlation of Electrical Resistivity and Seismic Velocity in Heterogeneous Near-surface Materials [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(7): 1373-1376.
- [284] GALLARDOL L A, MEJU M A. Joint Two-dimensional Cross-gradient Imaging of Magnetotelluric and Seismic Traveltime Data for Structural and Lithological Classification[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1261-1272.
- [285] GALLARDOL L A, MEJU M A. Joint Two-dimensional DC Resistivity and Seismic Travel Time Inversion with Cross-gradients Constraints[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B3): 1-11.
- [286] 李 貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35-38.
- [287] 刘志刚, 赵 勇. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京: 中国铁道



- 出版社,2001.
- [288] 王锦山,王 力,曹志刚,等. 厦门海底隧道综合超前地质预报实践[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(11):2309-2317.
- [289] 李术才,李树忱,张庆松,等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):217-225.
- [290] 李天斌. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2429-2436.
- [291] 李术才. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [292] 孙克国. 注浆控制岩溶隧道突水地质灾害的机制和模拟方法研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- [293] 许振浩,李术才,李利平,等. 一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1396-1404.
- [294] NONVEILLER E. Grouting Theory and Practice[M]. New York:Elsevier Science Publishers,1999.
- [295] FUNEHAG J,GUSTAFSON G. Design of Grouting with Silica Sol in Hard Rock-new Methods for Calculation of Penetration Length, Part I[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2008,23(1):1-8.
- [296] YANG M J,YUE Z Q,LEE P K K,et al. Prediction of Grout Penetration in Fractured Rocks by Numerical Simulation[J]. Canadian Geotechnical Journal,2002,39(6):1384-1394.
- [297] MILLER E A,ROYCROF G A. Compaction Grouting Test Program for Liquefaction Control[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2004,130(4):355-361.
- [298] 李利平,李术才,崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3642-3648.
- [299] 刘人太,李术才,张庆松,等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1455-1459.
- [300] 湛铠瑜,隋旺华,高 岳. 单一裂隙动水注浆扩散模型[J]. 岩土力学,2011,32(6):1659-1689.
- [301] 张 宵,李术才,张庆松,等. 关建孔注浆方法在高压裂隙水封堵中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1414-1421.
- [302] 薛翊国,李术才,苏茂鑫,等. 青岛胶州湾海底隧道涌水断层注浆效果综合检验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1382-1388.
- [303] 邓美龙,尹清锋,王东猛. 盖挖车站风道式盾构下井始发施工技术[J]. 现代城市轨道交通,2011(5):60-62.
- [304] 夏晨欢. 盾构进洞钢套筒施工技术的研究[J]. 建筑施工,2013(1):69-71.
- [305] 侯建军,肖铭钊. 高水压粉砂地层泥水盾构水下到达施工技术[J]. 土工基础,2014(6):17-20.
- [306] 徐延召. 泥水盾构水下到达(过站)施工技术[J]. 隧道建设,2012,32(增2):88-92.
- [307] 丁修恒. 地铁盾构始发与到达端头加固施工技术研究[J]. 城市建设理论研究,2013(18):1-9.
- [308] 卢礼顺. 复杂环境下盾构机水平冰冻始发技术[J]. 城市道桥与防洪,2012(9):297-300,308.
- [309] 蔡豪学. 盾构始发和到达工程中冻结法的运用[J]. 大科技,2014(31):247-248.
- [310] 巩丽顺. 浅析盾构机姿态控制[J]. 市政技术,2009,27(增2):172-174.
- [311] 袁大军,胡显鹏,李兴高,等. 砂卵石地层盾构刀具磨损测试分析[J]. 城市轨道交通研究,2009,12(5):48-51.
- [312] 张明富,袁大军,黄清飞,等. 盾构刀具磨损与使用寿命分析[C]//中国土木工程学会. 第四届中日盾构隧道技术交流会论文集. 北京:中国土木工程学会,2007:323-327.
- [313] 张明富,袁大军,黄清飞,等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):397-402.
- [314] 陈 馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展[J]. 隧道建设,2015,35(3):197-203.
- [315] 宋艳玲. 超大直径盾构管片拼装技术[J]. 铁道建筑技术,2011(2):51-52,64.
- [316] 张晓莉. 盾构法隧道管片拼装施工技术[J]. 山西水利科技,2011(3):66-67.
- [317] 罗超红,付亚伟. 盾构壁后充填注浆材料分析[J]. 公路与汽运,2007(5):176-178.
- [318] 王春河,许满吉. 泥水盾构泥浆复合调制的应用分析[J]. 铁道标准设计,2011(10):96-98,102,110.
- [319] 徐建平,林文书,许 可,等. 盾构隧道快硬高性能同步注浆材料研究[J]. 隧道建设,2014,34(2):95-100.
- [320] 游永锋,梁奎生,谭华灵. 盾构快速掘进下同步注浆材料优化配合比设计[J]. 隧道建设,2012,32(6):816-820.
- [321] 叶 飞,苟长飞,刘燕鹏,等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(12):1789-1806.
- [322] 叶 飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [323] 叶 飞,苟长飞,陈 治,等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):618-624.
- [324] 叶 飞,朱合华,何 川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学,2009,30(5):1307-1312.
- [325] 孙 闯,张建俊,刘家顺,等. 盾构隧道壁后注浆压力对地表沉降的影响分析[J]. 长江科学院院报,2012(11):68-72.
- [326] 王冠琼,刘干斌,邓岳保. 盾构壁后注浆对地表沉降影响模拟研究[J]. 宁波大学学报:理工版,2014(3):97-102.
- [327] 万战胜,朱岱云,夏永旭. 盾构隧道壁后注浆对地表沉降影响数值模拟研究[J]. 河北工业大学学报,2011(1):110-113.
- [328] 陈 健. 超大直径泥水盾构穿越长江关键施工技术综述[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 2014 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集. 洛阳:中国土木工程学会隧道及地下工程分会,2014:1-6.
- [329] 黄学军,孟海峰. 泥水盾构带压进仓气密性分析[J]. 西部探矿工程,2011,23(7):202-204.
- [330] 袁风波. 软弱土层盾构地中对接施工若干关键技术探讨[J]. 中国市政工程,2014(1):57-59,95.
- [331] 陈 馈. 狮子洋隧道盾构地中对接施工技术[J]. 建筑机械化,2010(11):60-63.
- [332] 杜闾东,任成国,张志达. 狮子洋隧道盾构地中对接技术[C]//中国土木工程学会. 第二届隧道掘进机(盾构、TBM)专业委员会第一次学术研讨会暨中铁隧道集团城市盾构项目管理、施工技术、设备维保交流论文集. 北京:中国土木工程学会,2011:21-26.

[333] 何川,李讯,江英超,等.黄土地层盾构隧道施工的掘进试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1736-1743.

[334] 王俊,何川,封坤,等.砂卵石地层中大断面泥水盾构泥膜形态研究[J].现代隧道技术,2014,51(6):108-115,153.

[335] 李有兵.大直径泥水平衡盾构穿越上软下硬地层的施工技术研究[D].成都:西南交通大学,2014.

[336] 肖明清,孙文昊,韩向阳.盾构隧道管片上浮问题研究[J].岩土力学,2009,30(4):1041-1045,1056.

[337] 《岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例》编纂委员会.岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M].北京:中国铁道出版社,2004.

[338] 薛继洪.隧道掘进机在引大入秦工程中的应用[J].四川水力发电,1998,17(3):4-9.

[339] 章跃林,王秀香,隋世军,等.TBM掘进综合技术在引黄工程中的应用[J].科技情报开发与经济,2003(11):232-233.

[340] 颜秉仁.浅谈TBM法在大伙房水库输水工程中的应用[J].吉林水利,2009(2):36-37.

[341] 韩佳霖,高伟贤,李清文.辽西北供水工程TBM步进装置[J].科技传播,2014(4):184-185.

[342] 孙海波,刘金祥.敞开式TBM掘进初期典型问题的分析与探讨[J].建筑机械化,2014(9):71-73.

[343] 吴世勇,王鸽,徐劲松,等.锦屏二级水电站TBM选型及施工关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2000-2009.

[344] 李晓兰.试论TBM在铁路隧道施工中的应用[J].中国高新技术企业,2013(8):37-38.

[345] 吴功达.秦岭隧道全断面岩石掘进机[J].工程机械与维修,1998,27(5):14-15.

[346] 李宏亮.中天山特长隧道敞开式TBM掘进与二次衬砌同步施工技术[J].现代隧道技术,2010,47(2):63-67.

[347] 黄朝军.西秦岭隧道TBM掘进施工质量控制[J].城市建设理论研究,2013(23):15-19.

[348] 王峻武,陈大军.兰渝铁路西秦岭隧道TBM步进施工技术[J].铁道建筑技术,2011(5):101-106.

[349] 王树勋.磨沟岭隧道TBM在不良地质中掘进的探讨[J].隧道建设,2002,22(1):18-19.

[350] 陈馈.高黎贡山隧道设计及施工技术初探[J].建筑机械化,2009,30(2):48-52.

[351] 王飞.重庆轨道交通敞开式TBM下穿过水涵洞掘进技术[J].兰州交通大学学报,2012,31(1):47-51.

[352] 沈圆顺.岩石隧道掘进机在城市轨道交通工程中的应用[J].沈阳建筑大学学报,2011,27(1):57-63.

[353] 刘文.TBM在塔山煤矿特殊条件下施工中的应用[C]//中国煤炭学会.2006全国矿山建设学术会议文集:矿山建设工程新进展.北京:中国煤炭学会,2006:502-506.

[354] 刘泉声,时凯,黄兴.TBM应用于深部煤矿建设的可行性[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):633-641.

[355] 龙斌.新街台格庙矿区长距离大坡度斜井TBM设备选型探讨[J].铁道建筑技术,2012(10):25-27.

[356] 曹协,张军.大埋深、长距离斜井井筒施工中适应性的研究[J].内蒙古煤炭经济,2014(1):163-165.

[357] 谢海波,洪啸,赵阳,等.液体黏性离合器在全断面硬岩掘进机刀盘驱动中的运用[J].机械工程学报,2014,50(21):69-75.

[358] 刘春.TBM掘进机关键部件——盘型滚刀的研制[J].中国铁道科学,2003,24(4):101-106.

[359] 冯欢欢,陈馈,周建军,等.掘进机滚刀最优破岩刀间距的分析与计算[J].现代隧道技术,2014,51(3):56-59.

[360] 彭欢,张怀亮,袁坚,等.硬岩掘进机比例调速阀选型方法[J].机械工程学报,2014,50(21):92-98.

[361] 彭欢,张怀亮,邹伟,等.硬岩掘进机推进液压缸结构参数优化[J].机械工程学报,2014,50(21):76-83.

[362] 齐梦学.再制造TBM在我国应用初探[J].国防交通工程与技术,2012(4):5-8.

[363] 梅志荣,唐与,穆国华.大伙房输水工程特长隧洞修建技术研究[J].现代隧道技术,2010,47(增):6-12.

[364] 刘培硕,梁文源.秦岭隧道使用TBM施工的设计问题[J].岩石力学与工程学报,1999,18(增):878-881.

[365] 毛卫洪.隧道掘进机(TBM)选型探讨[J].国防交通工程与技术,2011,9(5):15-17.

[366] 张军伟,梅志荣,高菊茹.大伙房输水工程特长隧洞TBM选型及施工关键技术研究[J].现代隧道技术,2010,47(5):1-10.

[367] 莫耀升,王月华,巩南.敞开式TBM在长大输水隧洞中的施工技术[C]//中国岩石力学与工程学会.2005年南水北调西线工程深埋、长大隧道关键技术及掘进机应用国际研讨会论文集.北京:中国岩石力学与工程学会,2005:329-335.

[368] 邓青力.敞开式TBM掘进过节理密集带施工技术[J].隧道建设,2011,31(6):733-736.

[369] 徐向前.敞开式TBM城市地铁快速掘进及配套技术研究[C]//中国土木工程学会.第二届隧道掘进机专业委员会第一次学术研讨会·暨中铁隧道集团城市盾构项目管理、施工技术、设备维保交流会论文集.北京:中国土木工程学会,2011:77-81.

[370] 仲建华.重庆轨道交通硬岩掘进技术(TBM)的应用研究[J].重庆交通大学学报,2011,30(增2):167-170.

[371] 高晓东.敞开式全断面隧道掘进机通过不良地质地段的措施和施工方法[J].铁道工程学报,2006(6):59-63.

[372] 王占生,王梦恕.TBM在不良地质地段的安全通过技术[J].中国安全科学学报,2002,12(4):55-59.

[373] 张超.青海“引大济湟”工程TBM卡机段围岩大变形特性及扩挖洞室支护方案研究[D].成都:成都理工大学,2012.

[374] 郭毅.引红济石工程TBM卡机原因分析及处理[J].陕西水利,2013(2):61-62.

[375] 张铸.双护盾全断面掘进机卡机事故处理方案[J].科技情报开发与经济,2008,18(29):197-198.

[376] 高燕芳.TBM掘进技术在软岩隧洞中的应用[J].水利与建筑工程学报,2001,9(6):126-128.

[377] 张社道.关于挤压性围岩隧道大变形的探讨和研究[J].现代隧道技术,2003,40(2):5-12.

[378] 温森,徐卫亚.深埋隧洞TBM卡机事故风险分析[J].长江科学院院报,2008,25(5):135-138.

[379] 张许平.深埋水电隧道TBM施工中的软岩变形分析[J].电力学报,2005,20(1):50-53.

[380] 王智远,伍智勇.连续皮带机配套TBM出碴技术探讨[J].隧道建设,2011,31(1):138-143.

- [381] 徐双永,陈大军. 西秦岭隧道皮带机出碴 TBM 同步衬砌技术方案研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 115-198.
- [382] 张项铎,杜道龙. 特长隧道洞内平面施工控制测量技术探讨[J]. 铁路航测, 2003(4): 33-35.
- [383] 梁大伟,李娜,魏冰. 测量技术在 TBM 掘进中的应用[J]. 城市建设理论, 2012(10): 1-5.
- [384] 张晓鹏,杨晓迎,谷世发. 超长隧洞 TBM 法施工中测量控制技术[C]//中国岩石力学与工程学会. 2009 年地基础工程与锚固注浆技术研讨会论文集. 北京:中国岩石力学与工程学会, 2009: 449-456.
- [385] 黄昌全. 浅谈 TBM 施工中应注意的几个关键问题[J]. 中国科技博览, 2008(17): 33-34.
- [386] 张军伟,梅志荣,唐与. 特长隧洞 TBM 施工与锚喷支护应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011(1): 39-46.
- [387] 韩亚丽,崔原. 超前支护技术在敞开式全断面掘进机施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 55-58.
- [388] 叶飞,黎柯军. 隧道掘进机技术及其在我国的发展和应用[J]. 中外公路, 2006, 26(4): 166-171.
- [389] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [390] 郭陕云. 对盾构(TBM)技术运用及开发的几点认识[J]. 隧道建设, 2008, 28(6): 631-637.
- [391] 张镜剑,傅冰骏. 隧道掘进机在我国应用的进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 226-238.
- [392] 朱令,丁文其,王瑞,等. 考虑成层土变异性的等效基床系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 3036-3041.
- [393] 王吉云. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道施工新技术介绍[J]. 地下工程与隧道, 2001(1): 22-26.
- [394] 徐干成,李永盛,孙钧,等. 沉管隧道的基础处理、基槽淤积和基础沉降问题[J]. 世界隧道, 1995(2): 2-18.
- [395] 张志刚,付佰勇,姜岩,等. 复合地基在沉管隧道基础设计中的应用探讨[J]. 广东公路交通, 2012(4): 50-55.
- [396] 张庆贺,高卫平. 水域沉管隧道基础处理方法的对比分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增 1): 349-352.
- [397] 袁伟耀. 变截面沉管隧道基础处理物理模拟试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [398] LI Wei, FANG Ying-guang, MO Hai-hong, et al. Model Test of Immersed Tube Tunnel Foundation Treated by Sand-flow Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 102-108.
- [399] 宋光猛,王颖轶,黄醒春. 沉管隧道基础注浆效果模拟试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 24-30.
- [400] 沈永芳. 沉管隧道基础注浆效果等比例模型试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [401] 由广明,刘维宁. 高速列车振动荷载作用下沉管地其整体稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 81-85.
- [402] 冉申德,钟辉虹,肖宏彬. 地震荷载作用下沉管地其砂垫层液化的可能性[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 123-126.
- [403] 申琪玉,邱峰,张海燕. 沉管隧道管段预制的重点难点分析及应对措施[J]. 施工技术, 2010(39): 239-242.
- [404] YUAN Y, SONG W, FU D. Thermal Gradient and Stress Within Immersed-tube Tunnel[C]//IASEM. Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Daejeon: Techno Press, 2002: 1-7.
- [405] 罗垚,柳献,王胜年. 沉管结构预制全过程温度和应力仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 28(2): 46-52.
- [406] 梅甫良,曾德顺. 沉管隧道混凝土管段温度场的仿真计算[J]. 现代隧道技术, 2004, 39(4): 6-9.
- [407] 韩卫东,乔春生. 沉管隧道管体制作过程中的温度场仿真[J]. 铁道工程学报, 1999(2): 34-37.
- [408] 陆仁超,柳献,袁勇,等. 预制沉管隧道早期裂缝控制因素敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 177-183.
- [409] 陈俊生,莫海鸿,刘叔灼,等. 港珠澳大桥沉管隧道管节预制厂选址研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(6): 122-127.
- [410] 高卫平. 沉管隧道浮运与沉放阶段受力性态研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [411] 何青. 沉管隧道沉放测量研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [412] 吴瑞大,任朝军,吕黄,等. 沉管隧道管节沉放施工技术[J]. 水运工程, 2013(5): 176-180.
- [413] 潘永仁,丁美. 大型沉管隧道管段沉放施工技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(5): 1-5.
- [414] 郭建文. 海河隧道沉管沉放对接的主要施工技术[J]. 铁道标准设计, 2013(4): 73-77.
- [415] 任朝军,苏林王,吕黄,等. 声纳法在管节沉放实时定位测量中的应用[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 132-136.
- [416] 陈肇元,崔京浩,宋二祥,等. 深基开挖的土钉支护技术:(一)构造方法[J]. 地下空间, 1995, 15(4): 241-249.
- [417] 陈肇元,宋二祥,崔京浩. 深基开挖的土钉支护技能:(二)工作性能[J]. 地下空间, 1996, 16(1): 1-11.
- [418] 宋二祥,陈肇元,崔京浩,等. 深基开挖的土钉支护技术:(三)设计方法[J]. 地下空间, 1996, 16(2): 65-75, 127.
- [419] 徐杨青,刘国锋,盛永清. 深基坑嵌岩地下连续墙隔渗效果分析与评价方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2905-2910.
- [420] 吴刚,白冰,聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2753-2758.
- [421] 白冰,聂庆科,吴刚,等. 考虑空间效应的深基坑双排桩支护结构计算模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 118-124.
- [422] 曹建,赵昌. 超前微型钢管桩在基坑围护中的应用[J]. 铁道建筑, 2007(2): 69-70.
- [423] 朱守祥. 太中银铁路地震液化带桥梁深基坑开挖施工技术[J]. 中国港湾建设, 2008(4): 63-66.
- [424] 刘红军,张庚成,刘涛. 土岩组合地层基坑工程变形监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增 2): 550-553.
- [425] 王海平,刘燕,刘涛. 岩石地区明暗结合基坑工程设计[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增 2): 343-346.
- [426] 朱丹晖. 吊脚桩+超前微型钢管桩体系在地铁基坑工程中的应用[J]. 铁道标准设计, 2014(5): 90-94.
- [427] 李冰河,刘兴旺,袁静. SMW 工法在软土深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增 1): 381-384.
- [428] 鲍立楠,李竹,王世杰. 某深基坑 SMW 工法支护监测结果分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增 1): 489-492.
- [429] 张忠苗,赵玉勃,吴世明,等. 过江隧道深基坑中 SMW 工法加钢支撑围护结构现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1270-1278.
- [430] 楼春晖,夏唐代,刘念武. 软土地区基坑中 SMW 围护桩变形

- 性状研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 1208-1211.
- [431] 朱爱国, 石汉生. 深厚粉细砂层中深基坑支护设计实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5438-5442.
- [432] 汪小超, 齐卫国. 水泥旋喷桩在地铁工程中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(5): 572-575.
- [433] 刘全林. 旋喷搅拌加劲桩对软土基坑支护的机理及其支护刚度的确定方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 346-350.
- [434] 胡海英, 张玉成, 刘惠康, 等. 深圳平安国际金融中心超深基坑工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增1): 31-38.
- [435] 刘凤洲, 谢耀耀. 地铁基坑围护结构成槽施工对邻近建筑物沉降影响及监测数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2901-2907.
- [436] 李守彪, 李仕雄, 魏子龙. 软弱地层半逆作深基坑支撑轴力变化规律[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 732-736.
- [437] 薛丽影, 杨文生, 李荣年. 深基坑工程事故原因的分析与探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增1): 468-473.
- [438] 张明聚, 赵鸿超. 基坑工程内支撑抱箍式活络头力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 418-423.
- [439] 北京工业大学. 盾构竖井装配式钢管混凝土内支撑体系及其施工方法: 中国, CN201310480442. 6[P]. 2014-01-29.
- [440] 张明聚, 叶新丰, 谢小春, 等. 拉力分散型锚杆在明挖隧道基坑围护结构中应用[J]. 铁道建筑技术, 2010(增): 16-20.
- [441] 赵启嘉, 刘正根. 可回收锚索在基坑支护工程中的技术研究及应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 480-483.
- [442] 宿钟鸣. 黄土隧道系统锚杆受力特性及长度优化分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(4): 32-35.
- [443] 罗刚, 周晓军. 悬浮隧道锚索涡激疲劳损伤分析[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 642-648.
- [444] 胡宇峰, 陆志良. 汽车隧道内气流及污染问题研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 103-113.
- [445] 叶蔚, 张旭. 纵向通风隧道正常运营CO浓度限值计算[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(6): 882-888.
- [446] 叶蔚, 张旭. 基于改进的CFK方程的隧道CO浓度限制的研究[J]. 铁路标准设计, 2010(增2): 51-56.
- [447] 郭春, 王明年, 李玉文, 等. 公路隧道通风CO、烟雾基准排放量折算率研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 105-109.
- [448] 王亚琼, 谢永利, 张素磊, 等. 氮氧化物对隧道需风量影响研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 89-94.
- [449] 张祉道, 韩斌. 等级公路隧道半横向通风应用与探讨——九寨沟仙境隧道通风设计[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(5): 4-11.
- [450] 田沛哲. 二郎山半横向通风公路隧道的火灾控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.
- [451] 王亚琼, 谢永利, 刘洪洲, 等. 海底隧道半横向通风送排风孔物理模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 76-82.
- [452] 高孟理, 武金明, 孙三祥. 隧道射流通风系统的优化分析[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 64-67.
- [453] 方磊, 谢永利, 杨晓华. 公路隧道竖井送排式通风送风口角度优化模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 69-72.
- [454] 蒋鹏飞, 万剑平, 喻波, 等. 雪峰山隧道通风模型实验设计研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 88-90.
- [455] 杨秀军, 王晓雯, 陈建忠. 公路隧道通风中射流风机纵向最小间距研究[J]. 重庆交通大学: 自然科学版, 2008, 27(1): 40-44.
- [456] 张光鹏. 公路隧道双向换气式纵向通风研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [457] 王亚琼, 胡彦杰, 邓敏, 等. 大纵坡双洞隧道互补式通风运营测试[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(5): 29-35.
- [458] 楼慧元. 特长公路隧道非对称风量U式互补纵向通风模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [459] 蒋学猛. 公路隧道双洞互补式通风适用性及应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [460] 夏丰勇, 谢永利, 王亚琼, 等. 特长公路隧道互补式通风模式[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(6): 27-34.
- [461] 曹正卯, 杨其新, 郭春. 高海拔特长隧道自然风计算方法研究[J]. 公路, 2014(2): 196-201.
- [462] 李志厚, 姜睿, 夏才初, 等. 高海拔公路隧道海拔高度系数及运营通风的修正[J]. 公路交通科技, 2014(1): 169-172.
- [463] 周仁强. 高海拔隧道利用自然风节能通风技术研究[J]. 北方交通, 2014(8): 129-133.
- [464] 乔春江, 舒恒, 伍国军. 高海拔特长公路隧道低碳通风方案研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增1): 1717-1722.
- [465] 杨宇翔, 吴楚钢, 夏维. 沙漠隧道通风方案浅析[J]. 华东公路, 2014(5): 72-73.
- [466] WANG F, WANG M N, HE S, et al. Computational Study of Effects of Traffic Force on the Ventilation in Highway Curved Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26(3): 481-489.
- [467] 王峰. 曲线公路隧道营运通风关键参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [468] 杜峰, 张村峰, 鲁钢. 公路隧道内废气分布规律的研究[J]. 公路隧道, 2012(2): 27-30.
- [469] CIOCANEA A, DRAGOMIRESCU A. Modular Ventilation with Twin Air Curtains for Reducing Dispersed Pollution[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 28(7): 180-198.
- [470] 何世龙. 公路长隧道前馈式通风控制系统原理与方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [471] 冯威. 越江隧道的通风控制模型及控制方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [472] 马永杰. 公路隧道纵向通风神经模糊控制系统应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [473] 何川, 李祖伟, 方勇, 等. 公路隧道通风系统的前馈式智能模糊控制[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 575-579.
- [474] 王亚琼, 邓敏, 胡彦杰, 等. 单洞对向交通隧道火灾烟气模糊控制[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5): 13-21.
- [475] 任桂山. 城市公路隧道通风智能控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [476] 杨宵. 公路隧道竖井送排式纵向通风神经网络在线控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [477] 李德英. 基于模糊神经网络的公路隧道纵向通风控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [478] 朱德康. 基于智能控制的隧道通风节能系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [479] 仇玉良. 公路隧道复杂通风网络分析技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.

- [480] 曾艳华,李永林,何川,等.隧道通风网络及调节[J].西南交通大学学报,2003,38(2):183-187.
- [481] 石平.公路隧道通风局部效应三维数值模拟分析与研究[D].西安:长安大学,2004.
- [482] 高孟理.中梁山隧道通风的模型试验研究[J].公路,1994(10):17-22.
- [483] 方磊.长大公路隧道通风物理模型试验研究[D].西安:长安大学,2005.
- [484] 王书涛.港珠澳海底隧道通风物理模型试验研究[D].西安:长安大学,2010.
- [485] 谢永利.秦岭终南山特长公路隧道通风技术研究报告[R].西安:长安大学,2005.
- [486] 涂耘.雪峰山隧道运营通风模型实验研究关[J].公路交通科技,2005,22(5):115-117.
- [487] 任锐,谢永利.海底隧道半横向往通风方式模型试验与数值仿真[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):63-68.
- [488] 李炎,周鸣镝,孙三祥,等.隧道活塞风模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(1):145-148.
- [489] 王亚琼,夏丰勇,谢永利,等.特长公路隧道双洞互补式通风物理模型试验[J].中国公路学报,2014,27(6):84-90.
- [490] 孙继东,何川,翁汉民,等.鹧鸪山隧道海拔修正系数的现场测试研究[J].隧道建设,2008,28(2):148-150.
- [491] 朱文,方勇,何川,等.公路隧道全射流通风压力坡度的现场测试[J].隧道建设,2008,28(5):557-560.
- [492] 王军,张旭.公路隧道自然通风热动力学稳定性分析[J].陕西理工学院学报,2008,24(3):31-36.
- [493] COLELLA F, REIN G, BORCHIELLINI R, et al. Calculation and Design of Tunnel Ventilation Systems Using a Two-scale Modeling Approach[J]. Building and Environment, 2009, 44(12):2357-2367.
- [494] COLELLA F, REIN G, CARVEL R, et al. Analysis of the Ventilation Systems in the Dragomiresue Ciocaneatford Tunnels Using a Multi-scale Modeling Approach[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(4):423-432.
- [495] 陈敏.隧道通风系统计算软件研究与设计[D].西安:长安大学,2012.
- [496] 王磊,郭洋洋.特长公路隧道运营网络通风技术[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(7):52-56.
- [497] 葛磊.公路隧道自然通风竖井设置与效果研究[D].西安:长安大学,2014.
- [498] 张彦晓.公路长隧道双洞互补式网络通风方案研究[D].西安:长安大学,2011.
- [499] 赵红莉.公路隧道通风排烟网络分析及计算方法研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [500] 成定康平,吉川孝次郎.短隧道照明及其出口亮度对照明水平的影响[C]//中国建筑科学研究院建筑物理研究所.国际照明委员会第十八届大会论文选.北京:中国建筑工业出版社,1981:121-129.
- [501] 董国贤.水下公路隧道[M].北京:人民交通出版社,1984.
- [502] 范·波莫,德·波尔.道路照明[M].林贤光,李景色,译.北京:轻工业出版社,1990.
- [503] 郑汉璋.C1E《公路隧道与地道照明准则 No. 26/2. 1990》中的概念更新与不足[C]//交通部重庆公路科学研究所.第二届全国公路隧道学术会议论文集.重庆:交通部重庆公路科学研究所,1993:138-144.
- [504] 程昌华.汽车专用隧道中光照度和烟雾浓度的关系[J].公路隧道,1994(4):19-27.
- [505] 齐向军.引导安全的公路隧道照明[J].国外公路,1995,15(4):37-39.
- [506] 王华牢.公路隧道和地道照明指南 C1E NO. 26. 1990[J].公路隧道,1995(2):1-18.
- [507] 韩直.LED公路隧道照明灯应用与技术条件研究[J].中国交通信息产业,2007(11):30-31.
- [508] 韩直.LED隧道照明试验研究[J].公路交通技术,2009(4):143-147.
- [509] 王宝林,叶颖,刘灿,等.自然光在隧道照明工程的应用及试验评价[J].现代隧道技术,2014,51(3):35-42.
- [510] 彭端,彭路丽.高压钠灯电子镇流器的研究[J].电力电子技术,2002,36(3):53-57.
- [511] 陈文成,陈大华,陈育明,等.电磁感应灯应用于雁列山隧道照明的探讨与实践[J].照明工程学报,2005,16(1):51-55.
- [512] 林俊.无极荧光灯在上中路隧道照明的应用[J].光源与照明,2014(2):25-28.
- [513] 刘英婴,张青文,胡英奎.LED光源色温对隧道照明入口段和中间段的影响[J].照明工程学报,2013,24(2):30-34.
- [514] 杨超,王志伟.LED在隧道照明工程中的应用研究[J].照明工程学报,2011,22(2):60-66.
- [515] 许景峰,刘英婴.道照明中照明功率密度的探讨[J].灯与照明,2009,33(4):9-12.
- [516] 王亚琼,谢永利,赖金星.隧道钠灯和LED灯组合照明试验研究与应用[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):505-509.
- [517] 刘英婴,翁季,陈建忠,等.光源光色对隧道照明效果的影响[J].土木建筑与环境工程,2013,35(3):162-166.
- [518] 郭春,王明年,杨璐.人眼视觉影响下的公路隧道LED照明计算模型[C]//中国照明学会.海峡两岸第二十一届照明科技与营销研讨会.武汉:中国照明学会,2014:1-8.
- [519] 徐景峰,宗德新,胡英奎.天然光光纤照明系统早隧道照明中的应用[J].照明工程学报,2012,23(1):30-35.
- [520] 曹言瑞,章海穗.隧道洞外亮度 $L_{20}$ 值的黑度法测量和洞口装饰的讨论[J].光源与照明,2003(3):20-24.
- [521] 屈志豪,赵清碧,刘相华.用环境简图法测试隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$ [J].公路交通技术,2004(5):117-121.
- [522] 周烨,赵宾,涂耘,等.基于照明优化的隧道洞外亮度(S)的定量研究[J].公路交通技术,2014(4):127-131.
- [523] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌.高速公路隧道进出口视觉适应实验[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1998-2001.
- [524] 王少飞,涂耘,邓欣,等.公路隧道照明节能的形势和对策[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1539-1545.
- [525] 傅翼,杨波,陈云庆.公路隧道照明眩光影响仿真与分析[J].现代隧道技术,2014,51(5):150-154.
- [526] 杜志刚,潘晓东,杨轲.高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J].中国公路学报,2007,20(5):101-105.
- [527] 刘洋.基于驾驶员生理与心理反应的公路隧道光环境分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [528] 郭春,王明年.特长公路隧道中间段照明调压节能技术研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1422-1425.

- [529] 杨显立. 基于 WiFi 的隧道照明无线控制系统设计与实现[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- [530] 李英举. 基于无线传感网络的隧道照明控制系统研究与设计[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [531] 王少飞, 张琦, 李科. 基于 GPRS 技术的中、短公路隧道照明远程监控方案[J]. 电气应用, 2010(23): 46-51.
- [532] 黄艳国, 倪艳明, 许伦辉. 公路隧道照明无级调光模糊控制方法[J]. 广西师范大学学报:自然科学版, 2011, 29(1): 10-14.
- [533] 崔丰曦. 基于模糊神经网络的隧道照明控制系统研究与设计[D]. 长沙:湖南大学, 2008.
- [534] 戚佳金, 刘晓胜, 李琰, 等. 基于动态调光的隧道照明监控系统研究[J]. 交通电气, 2006, 25(12): 123-127.
- [535] 徐曦, 曾璐, 谢晓尧. 无线传感网络在隧道照明控制中的应用研究[J]. 照明工程学报, 2013, 24(5): 115-120.
- [536] 张善伟. 公路隧道照明设计中 DIALux 的适用性及建模方法分析[J]. 照明工程学报, 2014, 25(5): 93-97.
- [537] 郭春, 柳玉良, 王明年. 发光涂料铺设范围对公路隧道照明影响研究[J]. 照明工程学报, 2013, 24(6): 25-29.
- [538] 屈永照, 蔡超, 王武功, 等. 基于 OpenSceneGraph 的隧道照明设计平台实现[J]. 公路交通技术, 2014(4): 139-143.
- [539] 黄珂, 何莎莎. HED 头戴式眼动仪系统在隧道照明测试中的应用分析[J]. 灯与照明, 2013(2): 6-8.
- [540] 孟繁宇, 李波, 赵元莹, 等. 烟雾对隧道灯光透过性影响的模拟实验研究[J]. 交通科学与工程, 2013(6): 97-101.
- [541] 国威, 潘晓东, 邓其, 等. 驾驶员隧道段夜间行车动视点特征模糊聚类评价[J]. 公路工程, 2013(6): 97-101.
- [542] 杜志刚, 黄发明, 严新平, 等. 基于瞳孔面积变动的公路隧道明暗适应时间[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 98-102.
- [543] 陆译. 勃朗峰隧道火灾[J]. 劳动保护, 2006(10): 66-69.
- [544] 武丽珍. 从岩后隧道事故谈公路隧道的消防设计[J]. 建筑防火设计, 2014(11): 1254-1257.
- [545] HESELDEN A J M. Studies of Fire and Smoke Behavior Relevant to Tunnels[C]//University of Cambridge. Proceedings of the 2nd International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Cambridge: Cambridge University Press, 1976: 1-6.
- [546] DANZLGER N H, KENNEDY W D. Longitudinal Ventilation Analysis for the Glenwood Canyon Tunnels[C]//Elsevier Applied Science. Proceedings of the 4th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. London: Elsevier Applied Science, 1982: 169-186.
- [547] KENNEDY W D, PARSONS B. Critical Velocity: Past, Present and Future[M]//LOWNDES J F L. Smoke and Critical Velocity in Tunnels: One Day Seminar. London: Independent Technical Conferences Ltd, 1996: 57-68.
- [548] Transit Development Corporation. Subway Environmental Design Handbook, Vol. II[M]. Washington DC: Transit Development Corporation, 1980.
- [549] Transit Development Corporation. Subway Environmental Design Handbook, Vol. II[M]. Washington DC: Transit Development Corporation, 1997.
- [550] CARVEL R O, BEARD A N, JOWITT P W. The Influence of Tunnel Geometry and Ventilation on the Heat Release Rate of Fire[J]. Fire Technology, 2004, 4(1): 15-26.
- [551] BETTIS R J, JAGGER S F, WU Y. Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models; Summary of Phase 2 Tests[R]. London: The Health and Safety Laboratory, 1993.
- [552] BETTIS R J, JAGGER S F, MACMILLAN A J R, et al. Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models; Summary of Phase 1 Tests[R]. London: The Health and Safety Laboratory, 1994.
- [553] ART B. Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program[C]//Lowndes J F L. Smoke and Critical Velocity in Tunnels: One Day Seminar. London: Independent Technical Conferences Ltd, 1996: 105-113.
- [554] WU Y, BAKER M Z A. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems — A Study of the Critical Velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(4): 363-390.
- [555] INGASON H, LÖNNERMARK A. Heat Release Rates from Heavy Goods Vehicle Trailers in Tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(7): 646-668.
- [556] LÖNNERMARK A, INGASON H. Gas Temperatures in Heavy Goods Vehicle Fires in Tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(6): 506-527.
- [557] LÖNNERMARK A, INGASON H. Fire Spread and Flame Length in Large-scale Tunnel Fires[J]. Fire Technology, 2006, 42(4): 283-302.
- [558] HAUKUR I, YING Z L, LÖNNERMARK A. Runehamar Tunnel Fire Tests[J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 134-149.
- [559] WANG Y, JIANG J, ZHU D. Full-scale Experiment Research and Theoretical Study for Fires in Tunnels with Roof Openings[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 339-348.
- [560] 彭伟, 霍然, 胡隆华. 隧道火灾的全尺寸试验研究[J]. 火灾科学, 2006, 15(4): 212-218.
- [561] OKA Y, ATKINSON G T. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4): 305-322.
- [562] YUAN Z, LEI B, KASHEF A. Reduced-scale Experimental Research on Fires in Tunnels with Natural Ventilation[J]. Procedia Engineering, 2013, 62: 907-915.
- [563] CHOW W K. Simulation of Tunnel Fire Using a Zone Model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 221-236.
- [564] SHORAB J, SHASHI K, SURENDRA K, et al. Numerical Simulation of Fire in a Tunnel; Comparative Study of CFAST and CFX Predictions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 160-170.
- [565] COX G, KUMAR S. A Numerical Model of Fire in Road Tunnels[J]. Tunnels & Tunnelling, 1987, 19(3): 55-60.
- [566] KUMAR S, COX G. Mathematical Modeling of Fires in Road Tunnels[R]. Paris: Transport and Road Research Laboratory, 1988.
- [567] 舒宁, 徐建闽. 计算流体力学在纵向式公路隧道火灾通风中的仿真[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(4): 511-516.
- [568] 邹剑明, 李英辉, 杜红兵. 火灾中人的心理状态及行为特点的

- 研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(3): 35-38.
- [569] 夏永旭, 周勇狄, 王永东. 公路隧道火灾时的人员逃生研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 115-123.
- [570] DANIEL N, MARIA J, HKAN F. Evacuation Experiment in a Road Tunnel: A Study of Human Behaviour and Technical Installations[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(4): 458-468.
- [571] 杨高尚, 彭立敏, 彭建国, 等. 从人员疏散的角度研究公路隧道的横通道间距[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 44-49.
- [572] 谢宝超, 徐志胜. 客运专线隧道火灾疏散研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 102-108.
- [573] 李削云, 马险峰, 王俊淞. 公路隧道火灾逃生疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 66-71.
- [574] BRIAN L, DAVID B. Merseyside Fire Service, UK "Emergency Services Response Managing Major Tunnel Fire Incidents" [J]. 4th International Conference on Tunnel Fires, 2002, 2(4): 267-273.
- [575] 王永东, 夏永旭, 邓念兵. 长大公路隧道防火救灾对策[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(4): 56-60.
- [576] MODIC J. Fire Simulation in Road Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(5): 525-530.
- [577] MAJORANA C E, PESAVENTO F, BRUNELLO P. Computational Analysis of Thermo-chemical and Mechanical Behavior of Tunnels During Fire[J]. Structure and Materials, 2003(12): 365-375.
- [578] 闫治国, 朱合华. 隧道衬砌结构火灾安全及高温力学行为研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 695-700.
- [579] 徐志胜, 吴德兴, 李伟平, 等. 公路隧道火灾排烟与排烟道顶隔板结构耐火性能试验研究[R]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [580] 熊珍珍. 隧道火灾衬砌结构热力受损规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [581] 邓宇强. 阻燃沥青的综合评定分析与公路隧道火灾温度场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [582] 陈辉. 特大断面隧道阻燃沥青路面技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [583] 李怀海. 高速公路隧道阻燃沥青路面结构应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [584] 范芳芳. 纳米复合阻燃沥青的设计与性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [585] 刘齐建, 赵跃宇. 径向谐和激励下圆形隧道衬砌的动力稳定性[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(9): 22-26.
- [586] 廖维张, 杜修力, 田志敏. 爆炸荷载作用下部分埋置结构响应的数值模拟方法[J]. 北京工业大学学报, 2007, 32(2): 154-155.
- [587] 王德荣, 冯淑芳, 李杰, 等. 地下隧道在内爆炸荷载作用下的动力响应分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2013, 14(5): 511-516.
- [588] 田志敏, 邬玉斌, 罗奇峰, 等. 隧道内爆炸冲击波传播特性及爆炸荷载分布规律研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 21-26.
- [589] 李忠献, 刘杨, 田力. 单侧隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应与抗爆分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 173-181.
- [590] 张小勇, 龚顺风. 隧道内爆炸作用下衬砌结构损伤机理及抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 193-199.
- [591] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(2): 204-209.
- [592] 王明年, 潘晓马, 张成满, 等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 412-414.
- [593] 李利平, 李术才, 张庆松, 等. 小间距隧道爆破动力响应分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 100-106.
- [594] CHEN S K, YANG T H, LIU H L, et al. Water Inrush Monitoring of Zhangmatun Mine Grout Curtain and Seepage-stress-damage Research[J]. Materials Science Forum, 2012(704/705): 558-562.
- [595] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [596] 王建秀, 冯波, 张兴胜, 等. 岩溶隧道围岩水力破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1363-1370.
- [597] 潘海泽, 黄涛, 李艳, 等. 距离判别分析法在隧道渗漏水灾害分级中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 719-723.
- [598] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757-1766.
- [599] 王育奎. 海底隧道渗流场分布规律及涌水量预测方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [600] 吴文丁. 季冻区隧道温度场分布规律及衬砌冻胀力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [601] 吕康成. 隧道防排水工程指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [602] 耿珂. 冻融循环对寒区隧道结构冻胀力的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 913-918.
- [603] 王洪存. 冻土隧道冻胀力敏感度分析及防冻保温技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [604] BONACINA C, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical Solution of Phase Change Problems[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1973, 16(10): 1825-1832.
- [605] HARLAN R L. Analysis of Coupled Heat-fluid Transport in Partially Frozen Soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [606] COMINI G, GUIDICE S D, LEWIS R W, et al. Finite Element Solution of Nonlinear Heat Conduction Problems with Special Reference to Phase Change[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1974, 8(6): 613-624.
- [607] 赖远明, 喻文兵, 吴紫汪, 等. 寒区圆形截面隧道温度场的解析解[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 126-130.
- [608] 张学富, 赖远明, 杨风才, 等. 寒区隧道围岩冻融影响数值分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(4): 92-96.
- [609] 张先军. 青藏铁路昆仑山隧道洞内气温及地温分布特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1086-1089.
- [610] 张德华, 王梦恕, 任少强. 青藏铁路多年冻土隧道围岩季节活动层温度及响应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 614-619.
- [611] 赖金星, 谢永利, 李群善. 青沙山隧道地温场测试与分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 78-82.
- [612] 陈建勋, 咎勇杰. 寒冷地区公路隧道防冻隔温层效果现场测试与分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 75-79.
- [613] 马建新, 李永林, 谢红强, 等. 高寒地区隧道保温隔热层设防厚度的研究[J]. 铁道建筑技术, 2003(6): 20-22.



- [614] 赖远明,吴紫汪,张淑娟,等.寒区隧道保温效果的现场观察研究[J].铁道学报,2003,25(1):81-86.
- [615] 孙文昊.寒区特长公路隧道抗防冻对策研究[D].成都:西南交通大学,2005.
- [616] 罗彦斌.寒区隧道冻害等级划分及防治技术研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [617] 吉哲.寒冷地区隧道冻害预防与处治技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- [618] 袁超,李树忱,李术才,等.寒区老旧隧道病害特征及治理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):3354-3361.
- [619] 铁道部工务局.铁路工务技术手册:隧道[M].北京:中国铁道出版社,1997.
- [620] TB/T 2820.2—1997,铁路桥隧建设物劣化评定标准[S].
- [621] DB11/T 718—2010,城市轨道交通设施养护维修技术规范[S].
- [622] 日本道路协会.道路トンネル维持管理便覧[M].东京:日本道路协会,1993.
- [623] TRB. Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual[M]. Washington DC:TRB,2005.
- [624] 吴江滨.浅谈隧道病害分级技术[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2422-2425.
- [625] 李云.既有隧道衬砌病害评估与治理决策[D].长沙:中南大学,2010.
- [626] JTG H12—2003,公路隧道养护技术规范[S].
- [627] 贺志勇,张娟,平存宝,等.高速公路隧道安全性的综合评价[J].华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(2):58-63.
- [628] 关宝树.隧道工程维修管理要点集[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [629] 赖金星,谢永利,赵严峰.公路隧道衬砌裂损病害检测与治理对策[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(1):37-41.
- [630] 张悦.铁路工程设计技术手册:隧道[M].北京:中国铁道出版社,1999.
- [631] 付黎龙.偏压连拱隧道衬砌病害分析及加固研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [632] 陈晓东.钢纤维喷混凝土在隧洞加固处理中的应用[J].现代隧道技术,2002,39(1):61-63.
- [633] 李佳翰,王泰典,薛文城,等.隧道维修补强技术与案例探讨[J].隧道建设,2010,30(增1):113-119.
- [634] 蒋齐.碳纤维加固法与粘钢加固法的适用性及经济性比较分析[D].上海:上海交通大学,2007.
- [635] YOSHIZAWA H, WU Z. Analysis of Debonding Fracture Properties of CFS Strengthened RC Member Subject to Tension[J]. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,1997,10(1):47-53.
- [636] TRIANTAFILLOU T C. Design of Concrete Members Strengthened in Shear with Fiber Reinforced Polymer Materials[C]// CHARLES W D, RIZKALLA S H, ANTONIO N. Proceedings of the 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. Washington DC: American Concrete Institute,1999:209-218.
- [637] 柳献,张浩立,唐敏,等.内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究-半环加固法[J].现代隧道技术,2014,51(3):131-137.
- [638] 杨明举,黄景林.隧道衬砌开裂探析及处治措施[J].公路,2014(8):304-306.
- [639] 吴启勇,蔡叶澜.碳纤维布在连拱隧道衬砌裂缝病害治理中的应用[J].现代隧道技术,2006,43(6):70-75.
- [640] 重田佳幸,飛田敏行,亀村勝美,等.ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法[J].土木学会論文集F,2006,62(4):628-632.
- [641] 刘学增,桑运龙,包浩杉.叠合式套拱加固带裂缝隧道衬砌受压力机理分析[J].土木工程学报,2013,46(10):127-134.
- [642] 桑运龙.隧道套拱补强承载力评价分析[D].上海:同济大学,2013.
- [643] VAN EKPEL W H N C, SIP J W, HARING F P. Design of Repair Measures of a Damaged Shield Driven Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2006,21(3-4):338-339.
- [644] 傅刚,张林.“八一”“向阳”隧道衬砌开裂分析及治理[J].现代隧道技术,2008(增):466-471.
- [645] 吴治家.套衬技术在隧道病害整治工程中的应用[J].铁道建筑技术,2011(5):31-33.
- [646] 周念.赚宝隧道病害处治措施的研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [647] 高峰,胡蓉,谭绪凯.隧道注浆加固模型试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2014,33(4):44-46.
- [648] 吴圣智,段宝福,朱应磊,等.微震爆破在顺层软岩隧道换拱技术中的应用研究[J].现代隧道技术,2013(6):174-178.
- [649] 王平让,黄宏伟,薛亚东.基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别[J].岩石力学与工程学报,2012,5(31):991-1000.
- [650] 叶飞,何川,夏永旭.公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J].土木工程学报,2010,43(7):97-105.
- [651] 陈东桂.高速铁路隧道衬砌裂缝病害及其整治措施研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [652] 苏生瑞,朱合华,李国峰.连拱隧道衬砌病害及其处治[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2510-2515.
- [653] 杨成忠,黄明,刘新荣,等.碳纤维布用于深埋隧道衬砌裂缝的加固效果[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2010,11(3):322-327.
- [654] 王晓彤.运营期隧道带裂缝二衬承载力评价[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1455-1458.
- [655] 王秀英,谭忠盛.厦门海底隧道结构防排水原则研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):3810-3815.
- [656] 高劲松.公路隧道渗漏水病害发生机理及对策研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [657] 杨甲奇.浅析深埋富水地区隧道渗漏水病害注浆整治[J].公路工程,2014,39(5):209-214.
- [658] 张政.岩溶地区公路隧道渗漏水处治原则研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [659] ITA. Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,1991,6(1):11-76.
- [660] 张学富,张耀南,梁波,等.昆庐山隧道漏水灾害的链式机制及断链新措施[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增1):2719-2729.