引文格式:金 娇,文 壮,徐 豪,等. 核壳蓄盐缓释型路面材料的制备及其抑冰性能研究[J]. 中国公路学报,2026,39(8):198-213.
JIN Jiao, WEN Zhuang, XU Hao, et al. Preparation and Anti-icing Performance of Core-shell Salt-storage Slow-release Pavement Materials [J]. China Journal of Highway and Transport, 2026, 39 (8): 198-213.
文章编号:1001-7372(2026)08-0198-16

核壳蓄盐缓释型路面材料的制备及其抑冰性能研究

金 娇*[1,2],文 壮[1],徐 豪[1],张亚龙[1],刘墨晗[1]
(1. 长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114; 2. 公路养护技术国家工程研究中心,湖南 长沙 410114)

摘要:针对冬季道路结冰引发的交通安全隐患问题,为实现路面的主动抑冰与界面减黏,以乙酸钠(SA)为蓄盐组分,坡缕石(PAL)为载体,制备缓释蓄盐芯材(SA-PAL),并利用高分子膜(EC-MA)进行包覆,制得一种核壳蓄盐缓释型路面材料(EMP)。以电导率为盐分析出量的评价指标,综合缓释性能与载盐率确定了材料的最优组分配比。进一步研究了掺 EMP 沥青混合料的冰点与冻黏强度变化,并对功能寿命进行了预测。研究结果表明:当硅烷偶联剂 KH570 掺量为 75%时,SA-PAL 的载盐率与缓释性能最佳;EC-MA 的玻璃化转变温度为 7.1 ℃,在 200 ℃时质量损失仅为 3.99%,既能满足低温荷载下的破裂要求,又可满足沥青施工温度条件。通过控制碾压与温度条件,结合抑冰性能测试结果,揭示了低冰点沥青混合料缓释-析盐-抑冰的作用机理。矿粉替换量为 50%时,低温碾压组试件的冰点最低可降至−2.37 ℃,冻黏强度下降约 44%。基于 1 m^2 沥青路面在冬季与非冬季的析盐速率,估算出低冰点沥青路面在南方典型气候条件下可维持约 3 年的有效抑冰周期。

关键词:路面工程;低冰点沥青混合料;核壳结构;抑冰性能;缓释性能
中图分类号:U414 **文献标志码**:A

Preparation and Anti-icing Performance of Core-shell Salt-storage Slow-release Pavement Materials

JIN Jiao*[1,2], WEN Zhuang[1], XU Hao[1], ZHANG Ya-long[1], LIU Mo-han[1]
(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: To address traffic safety hazards caused by winter road icing, this study aims to achieve active anti-icing performance and reduction of ice-pavement adhesion of pavement surfaces. Sodium acetate (SA) was used as the salt-storage component, while palygorskite (PAL) served as the carrier to prepare a slow-release salt-storage core (SA-PAL). The core was subsequently encapsulated with a polymer membrane (EC-MA) to fabricate a core-shell slow-release salt-storage pavement material (EMP). Electrical conductivity was used to evaluate the amount of

收稿日期:2025-11-11; **修回日期**:2026-03-22; **接收日期**:2026-04-17
基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFF0510200);国家自然科学基金项目(52478438,52174237);
中德中心德国优秀青年学者基金项目(GZ1717);长沙市科技计划项目-长沙市杰出创新青年人才项目(kq2405020)
* **作者简介**:金 娇(1988-),女,辽宁抚顺人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jinjiao@csust.edu.cn。

released salt, and the optimal formulation was determined based on the slow-release performance and salt-loading capacity. The freezing point and frozen bond strength of asphalt mixtures containing EMP were further examined, and the anti-icing service life was further predicted. Results show that when the KH570 dosage was 0.75, SA-PAL exhibited the best combination of salt-loading capacity and slow-release performance. The EC-MA film had a glass transition temperature of 7.1 ℃ and a mass loss of only 3.99% at 200 ℃, meeting both the fracture requirements under low-temperature loads and the thermal stability required for asphalt construction. By controlling compaction and temperature conditions, the mechanism of slow release-salt precipitation-ice inhibition in low-freezing-point asphalt mixtures was revealed. When the mineral filler replacement ratio was 50%, the freezing point of the low-temperature compacted group decreased to −2.37 ℃, and the frozen bond strength was reduced by approximately 44%. Based on the calculated salt release rates of a 1 m^2 asphalt pavement under winter and non-winter conditions, the low-freezing-point asphalt pavement was estimated to maintain an effective anti-icing function for about three years under typical southern climatic conditions.

Keywords: pavement engineering; low-freezing-point asphalt mixture; core-shell structure; anti-icing performance; slow-release behavior

Received 11 Nov. 2025; **Received in revised form** 22 Mar. 2026; **Accepted** 17 Apr. 2026

Funding: National Key R & D Program of China Youth Scientist Project (2024YFF0510200); National Natural Science Foundation of China (52478438, 52174237); Excellent Early Career Scientists form Germany (GZ1717); Science and Technology Project of Changsha-outstanding Innovative Youth (kq2405020)

* Corresponding author. *E-mail address*: jinjiao@csust.edu.cn.

https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2026.08.013

0　引　言

冬季路表温度较低时，常出现暗冰或薄冰现象。暗冰是指路面或结构层中的水分在−5 ℃～0 ℃的温度范围内凝结成极薄的冰层，表面光滑且难以察觉，极易造成车辆打滑、侧翻等交通事故[1]。研究表明，路面一旦形成冰层，其防滑系数仅为干燥路面的10%～20%，严重威胁行车安全[2]。传统的除冰方式主要包括撒布融雪剂、机械铲冰和人工清除等，以上方法虽能在短期内缓解道路结冰问题，但存在能耗高、效率低、环境污染严重及维护成本高等缺陷，难以满足冬季道路对行车安全与长期服役性能的要求[3]。

为克服传统被动除冰模式的局限性，近年来主动融雪除冰理念逐渐成为道路工程领域的重要研究方向。该技术通过在路面材料中引入功能组分，使其在冰雪或低温条件下具备自发融雪与抑冰功能，从而实现道路的主动防护与稳定运行。根据其实现机制不同，主动融冰路面主要分为导热型、储能型与低冰点型 3 类[4-6]。其中，低冰点型路面因无需外部能量输入，兼具节能、环保和结构简单等优势，逐渐成为研究热点[7]。这类路面通过掺入可降低水结冰温度的功能性填料，在车辆荷载和渗透压作用下促使抑冰组分由内部迁移至表层，与积水形成低冰点溶液，从而实现路面内源性抑冰效果[8]。低冰点型路面的长期性能主要受功能组分的空间分布及其释放行为影响，这也为后续的材料优化与体系设计提供了重要方向。

传统融雪抑冰材料多以氯盐类为主要融冰组分，虽具有良好的融冰效果，但易引起金属腐蚀、集料剥落及环境污染，对道路结构与生态系统造成不利影响[9-11]。为降低氯盐对生态系统的危害，研究逐渐转向以醋酸盐、聚四氟乙烯、聚脲及尿素等为基础的无氯化体系[12-14]。此类材料在融冰性能与环境兼容性之间实现了较好的平衡，具备较高的应用潜力。然而，其热稳定性较低，在高温拌和或铺筑条件下易发生分解或失效，限制了其在沥青路面中的推广应用[8]。此外，低冰点型路面在非冬季期间易受雨水侵蚀而出现盐分快速析出或流失，导致防冰性能衰减[15]。因此，实现盐分的可控释放与动态平衡，

是提升低冰点型路面功能持效性的关键方向之一。

为解决上述问题，研究正逐渐从单一组分改性向多尺度复合体系设计转变[16-17]。核心思路是通过结构调控与界面控制相结合，实现融冰组分在不同温度与荷载条件下的可控释放。一方面，材料的孔隙结构和表面能直接影响盐分的储存能力与释放速率[18]；另一方面，采用多层结构或表面包覆技术，可以在提升结构稳定性的同时延长缓释周期，从而兼顾融冰效率与服役耐久性[19]。然而，现有核壳或缓释型抑冰材料研究多以“降低初期释盐速率”为主要设计目标，其评价体系也主要集中于静态缓释性能，对材料在低温与交通荷载耦合作用下的结构响应行为，以及该行为与盐分迁移路径和宏观抑冰性能之间的内在联系关注不足，这在一定程度上限制了其工程适用性的进一步提升。

基于此，本研究从道路工程实际服役需求出发，提出一种以结构响应为导向的核壳蓄盐缓释型路面材料设计思路。通过将多孔矿物载体与玻璃化转变温度接近路面服役温区的高分子包膜相结合，使材料在非冬季条件下保持稳定封存状态，并在低温与交通荷载共同作用下发生破裂，从而实现盐分的按需释放。在此基础上，通过电导率变化表征盐分的释放规律，结合缓释性能与载盐率优化各组分配比，并利用多种微观测试手段揭示材料的结构特征与热稳定性。进一步通过冰点测定与拉拔试验，分析低冰点沥青混合料的抑冰机理与性能表现。研究旨在为低冰点型路面材料的工程设计与应用提供参考。

1 试验方案

1.1 原材料

1.1.1 盐分与载体

为实现盐分的可控释放与长期抑冰效果，本研究通过载体吸附、表面调控与高分子封装构筑了核壳缓释体系。以无水乙酸钠(SA)作为环保型无机盐组分，选用坡缕石(PAL)作为载体对盐分进行吸附固定(产自江苏盱眙)。坡缕石具有纤维状多孔结构和良好的吸附性能，其内部连续的微细孔道有利于盐分在载体内部的储存与分散[20]。为进一步提高蓄盐芯材的疏水特性，利用坡缕石表面富含的羟基官能团，采用 3 种硅烷偶联剂进行表面改性。材料基本参数见表 1。

1.1.2 高分子包膜

通过自由基聚合法将丙烯酸甲酯接枝于乙基纤维素上形成高分子包膜，并对蓄盐芯材进行有效封装，利用热塑性材料在特定温度下的玻璃态-高弹态转变特性，实现盐分的封存与按需释放功能。制备包膜材料的化学试剂基本参数见表 2。

表 1 乙酸钠与表面改性剂基本参数

Table 1 Basic Parameters of SA and Surface Modifier

种类	化学式	纯度	生产厂家
乙酸钠	$C_2H_3NaO_2$	AR	国药集团化学试剂有限公司
KH550	$C_9H_{23}O_3NSi$	AR	济南兴飞隆化工有限公司
KH560	$C_9H_{20}O_5Si$	AR	济南兴飞隆化工有限公司
KH570	$C_{10}H_{20}O_5Si$	AR	济南兴飞隆化工有限公司

表 2 化学试剂参数

Table 2 Chemical Reagent Parameters

种类	分子式	纯度	生产厂家
乙基纤维素(EC)	$(C_{12}H_{22}O_5)_n$	AR	国药集团化学试剂有限公司
丙烯酸甲酯(MA)	$C_4H_6O_2$	AR	国药集团化学试剂有限公司
二甲亚砜(DS)	C_2H_6OS	AR	国药集团化学试剂有限公司
过硫酸铵(AP)	$(NH_4)_2S_2O_8$	AR	国药集团化学试剂有限公司

1.2 核壳蓄盐缓释型路面材料制备

1.2.1 缓释蓄盐芯材的制备

(1)将坡缕石和无水乙醇以 1∶2 的质量比混合，并以 2 000 r·min^{-1}搅拌 30 min 得到分散均匀的悬浊液。向悬浊液中加入 150 g 饱和乙酸钠溶液，超声振动 2 h 后，经抽滤、烘干制得蓄盐芯材。

(2)向烧杯中依次加入 1∶20 质量比的硅烷偶联剂与无水乙醇，在 60 ℃水浴条件下搅拌 30 min 后，将步骤(1)所制蓄盐芯材置于其中再搅拌 2 h，抽滤、烘干后制得缓释蓄盐芯材(SA-PAL)。

1.2.2 高分子膜的制备

将 0.3 g 乙基纤维素加入到 20 mL 二甲亚砜中，在 60 ℃水浴条件下充分搅拌；持续通入氮气 15 min 后，加入 0.03 g 过硫酸铵与 10 g 丙烯酸甲酯得到预聚体溶液；将混合液在 60 ℃下反应 2 h，再置于 100 ℃的真空干燥箱中 48 h，得到高分子膜 EC-MA。

1.2.3 核壳蓄盐缓释型材料的制备

将所制缓释蓄盐芯材缓慢加入到装有预聚体溶液的烧杯中，在 60 ℃条件下以 200 r·min^{-1}搅拌 2 h 后，置于真空干燥箱中 48 h，所得生成物经粉碎后通过 200 目筛进行筛分，即制得一种核壳蓄盐缓释型路面材料 EMP，制备流程如图 1 所示。

1.3 低冰点沥青混合料制备

本研究胶结料选用中石化生产的 70＃基质沥青，基本性能指标见表 3。矿料为玄武岩破碎而成的集料，矿粉为石灰岩粉末。混合料油石比为 5.1%，研究选用 AC-13 沥青混合料级配设计，具体级配组成曲线如图 2 所示。将 EMP 以 50%的比例

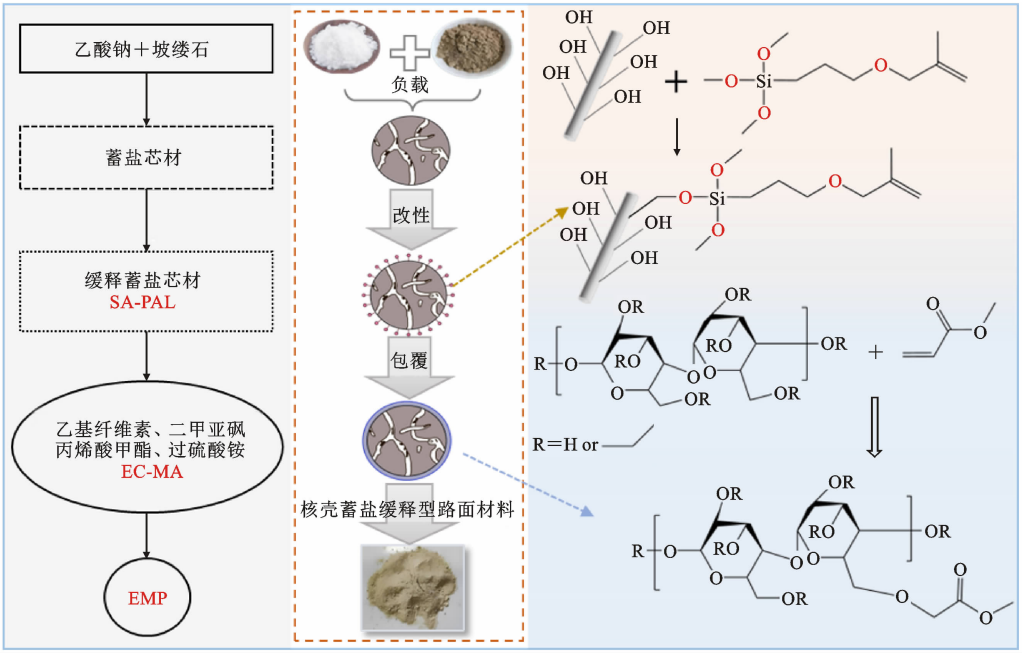


图 1　EMP 的制备流程

Fig. 1　Preparation Process of EMP

表 3　基质沥青技术指标测试结果

Table 3　Technical Properties of Base Asphalt

技术指标	JTG F40—2004 技术要求	检测方法	检测值
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	60～80	T0604	66
延度(10 ℃)/cm	≥20	T0605	76.6
延度(15 ℃)/cm	≥100	T0605	>150
软化点/℃	≥46	T0606	46.5
含蜡量/%	≤2.0	T0615	1.6
闪点/℃	≥260	T0611	319
密度(15 ℃)/(g·cm^{-3})	-	T0603	1.026 6
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	180～240	T0620	196

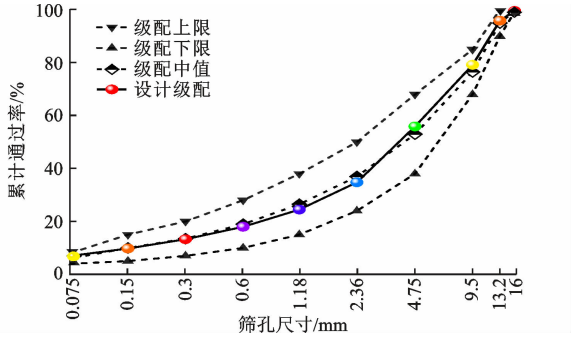


图 2　混合料级配

Fig. 2　Aggregate Gradation

替代矿粉，采用等体积替代法制得低冰点沥青混合料(EMP-50%)；对照组为普通马歇尔试件。

1.4　测试与表征

1.4.1　微观测试

采用 DDBJ-351L 型电导率仪测量盐溶液的电导率值。采用 Netzsch DSC214 差示扫描量热仪，在氮气氛围下对溶液的固液转变特性(温度区间为－30 ℃～40 ℃)与高分子膜的玻璃态转变温度(－60 ℃～100 ℃)进行研究，升温速率 15 K·min^{-1}。采用 Netzsch STA449F3 型同步热分析仪，在氮气氛围下对不同蓄盐组分进行热分解，用于表面改性剂种类的挑选及掺量确定，表征高分子膜的热稳定性，测试温度为 25 ℃～1200 ℃。采用 TA Instruments Discovery DMA850 动态热机械分析仪，在氮气氛围与薄膜拉伸夹具条件下对高分子膜进行温度扫描测试，测试模式为振荡温度斜坡，温度范围为－20 ℃～40 ℃，升温速率为 2 ℃·min^{-1}，振荡频率为 1 Hz。采用 Rigaku SmartLab 9kW 型 X 射线衍射仪对各蓄盐组分的物相组成进行表征，扫描范围为 3°～80°。采用德国 EVO10 型扫描电子显微镜对坡缕石以及载盐后样品的形貌结构进行表征。采用 Nicolet NEXUS 670 红外光谱仪对各蓄盐组分的官能团特征进行表征，扫描范围为 400～4 000 cm^{-1}。

1.4.2　EMP 静态抑冰性能测试

通过静态抑冰性能测试评估各蓄盐组分对冰晶成核过程的影响[12]。将 1 g 样品(SA、PAL、SA-PAL、EMP)分别加入 100 mL 去离子水中，以纯水为空白对照。将样品置在室温下保持 10 min，以消

除起始温差。随后将样品置于低温环境箱中，以1 ℃的温度梯度逐步降低，每一温度点保持5 min。降温过程中体系保持静置、避免外界扰动，记录冰晶首次出现及生长过程，每组试验重复3次。

1.4.3 低冰点沥青混合料的抑冰性能测试

通过对低冰点沥青混合料进行抑冰性能测试，验证高分子包膜的缓释能力，综合评价低冰点沥青混合料的抑冰功能特性。进行测试前需对EMP-50%试件进行预处理：将一组EMP-50%试件放置于−10 ℃环境中保持0.5 h，然后迅速取出置于路面的圆柱凹槽内，使之与路表平齐。接着使用试验车进行碾压处理，法向载荷为1.1 kN，来回碾压20次后得到EMP-50%低温碾压组。将室温下的EMP-50%试件按照上述步骤碾压后得到EMP-50%室温碾压组。

(1)冰点测定试验[15]：使用如图3(a)所示的CTR-390多路温度记录仪对混合料表面水冻结温度进行记录。将各组马歇尔试件放入直径11 cm的容器中，将温度传感器固定在各马歇尔试件表面。随后往容器中加入去离子水形成固定厚度(1、5、10 mm)的水层，如图3(b)所示。静置12 h后，将容器置于−25 ℃的低温试验箱中，持续记录试件表面温度，数据采集间隔设置为30 s，每组试件平行试验3次。



(a) CTR-390多路温度记录仪 (b) 注水处理

图3 冰点测定试验

Fig. 3 Test Procedure for Freezing Point Measurement

(2)冻黏强度拉拔试验[21]：使用如图4(a)所示的附着力测试仪对混合料表面的冻黏强度进行测量。将各组马歇尔试件置于容器中，并注水静置浸泡12 h。随后迅速取出试件放入低温试验箱中(−5 ℃、−7 ℃、−9 ℃、−11 ℃、−13 ℃)，将锭子紧贴试件表面，如图4(b)所示，冰冻1 h后测量冻黏强度，每组试件平行试验3次。

(3)析盐试验[22]：使用保鲜膜对各组马歇尔试件的底部进行密封处理后，将其浸入装有1 L去离子水的容器中，模拟路表在溶液渗透作用下盐分的释放过程。每间隔1 h测量一次溶液的电导率值，通过电导率值来评估各试件的盐分释放速率。



(a) 附着力测试仪 (b) 测试试件

图4 冻黏强度拉拔试验

Fig. 4 Pull-off Test for Frozen Bond Strength

2 EMP配比优化与微观分析

2.1 缓释蓄盐芯材性能表征

在缓释蓄盐体系的设计与配比优化过程中，盐分的封存状态及其释放行为是影响路面抑冰性能的关键因素。考虑到盐分释放过程在溶液体系中主要表现为离子浓度的变化，而离子浓度与溶液电导率之间具有明确的物理对应关系[23]，故电导率可作为表征盐分含量及其变化特征的间接参数。因此，本研究从溶液体系出发，对盐分含量、电导率及抑冰性能之间的关系进行分析，从而建立反映缓释体系基础释放特征的评价依据。

2.1.1 溶液电导率与盐分关系

为定量表征盐分含量变化对溶液电导率的影响，本研究选取不同质量分数的乙酸钠溶液进行了电导率测试。从图5可以看出，随着盐分质量分数的增加，溶液电导率逐渐升高，且二者呈现出显著的线性相关性($R^2=0.998$，$P<0.01$)。经线性回归得到经验公式

$$\sigma_c = 7\ 102.17\omega + 74.12 \tag{1}$$

式中：σ_c为溶液的电导率值；ω为质量分数。该结果说明电导率能够作为衡量盐分含量的有效表征指标。

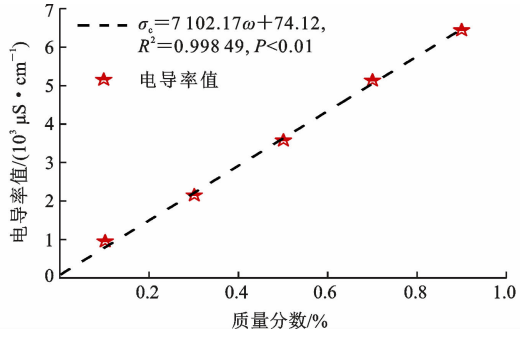


图5 盐溶液电导率测试结果

Fig. 5 Electrical Conductivity of Salt Solutions

为进一步探究电导率与抑冰性能之间的联系，

本研究采用 DSC 测定不同盐分溶液的冰点。以 DSC 曲线的外推起始熔化温度用作溶液的冰点，测量结果如图 6 所示。结果表明，溶液的冰点随盐分质量分数的增加而降低，其线性拟合关系为（$R^2=0.976$，$P<0.01$）

$$T_e=-5.923\omega-0.50 \tag{2}$$

式中：T_e 为溶液的冰点。

结合上述回归分析，进一步建立了电导率与冰点之间的相关关系（$R^2=0.977$，$P<0.01$）

$$\sigma_c=-1\ 199.02T_e-524.19 \tag{3}$$

由此可见，电导率不仅能够定量反映溶液中的盐分浓度，还可间接表征抑冰性能。相比直接测量冰点，电导率测试方法具有操作简便、灵敏度高、可实现连续监测等优点，更适合用于缓释蓄盐材料中盐分释放效果的表征。因此，在后续的缓释性能分析中，用电导率作为评价盐分析出量的主要指标。

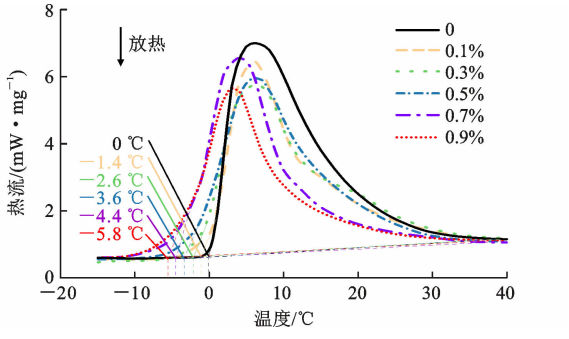


图 6　盐溶液 DSC 测试结果

Fig. 6　DSC Curves of Salt Solutions

2.1.2　蓄盐芯材微观表征

（1）XRD 测试分析

图 7 为坡缕石和蓄盐芯材的 XRD 图谱。结果显示，两者在 $2\theta=8.4°$ 处均存在坡缕石的特征衍射峰，蓄盐芯材在部分峰位处衍射强度有所降低。这是由于超声振荡过程中坡缕石棒晶被解聚，导致晶体结晶度下降[24-25]。同时，在 $2\theta=8.75°$ 与 $36.07°$ 处出现了乙酸钠的特征衍射峰，表明样品中引入了乙酸钠组分。

（2）FT-IR 测试分析

图 8 为坡缕石和蓄盐芯材的 FT-IR 光谱。两者在 470、796、1 646 cm^{-1} 处均存在坡缕石的特征吸收峰，分别对应 Si—O 弯曲振动、Si—O—Si 对称伸缩振动以及配位水的弯曲振动。与坡缕石相比，蓄盐芯材在 641、1 564 cm^{-1} 处出现新的吸收峰，分别归属于乙酸钠中 =C—H 的面外弯曲振动和—COO—的伸缩振动[26]，说明复合样品中存在乙酸钠。

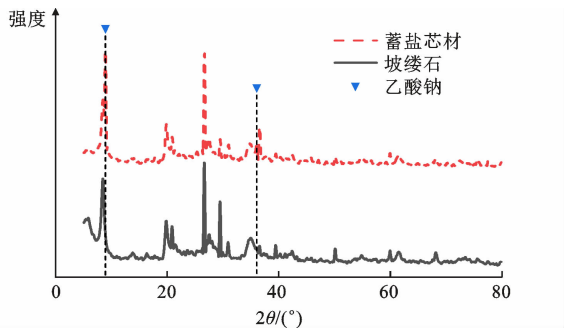


图 7　坡缕石和蓄盐芯材的 XRD 测试结果

Fig. 7　XRD Patterns of PAL and Salt-loaded Core Materials

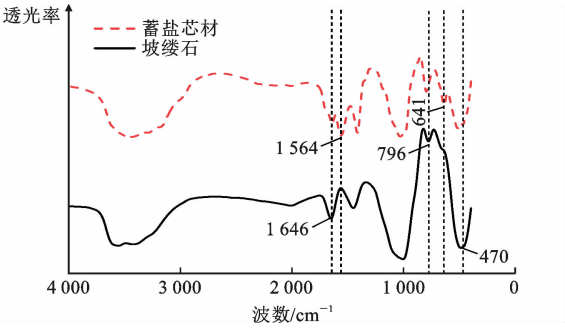


图 8　坡缕石和蓄盐芯材的 FT-IR 测试结果

Fig. 8　FT-IR Spectra of PAL and Salt-loaded Core Materials

酸钠。

2.1.3　表面改性剂的选择与掺量确定

由于乙酸钠具有较强的吸湿性和潮解性，未经处理的蓄盐芯材在制备及储存过程中容易因吸水而失效。为改善其稳定性并提升缓释性能，本研究选取了 3 种常用硅烷偶联剂（KH550、KH560 及 KH570）对蓄盐芯材进行表面改性，并通过电导率与热重分析综合评估其改性效果。

（1）改性剂种类的选择

图 9 为不同改性剂处理后缓释蓄盐芯材（SA-PAL）在水溶液中的电导率变化曲线。结果显示，随着浸泡时间的增加，4 种样品的电导率均呈上升趋势，表明盐分不断被析出。蓄盐芯材电导率始终显著高于 SA-PAL，说明 3 种改性剂均能降低芯材中盐分释放的速率。其中，KH560 与 KH570 处理后的芯材表现出较优的缓释性能，其电导率增长速度明显低于 550 SA-PAL。

图 10 为坡缕石、乙酸钠以及不同改性剂处理后 SA-PAL 的 TG-DTG 曲线。结果表明，纯 SA 在 324 ℃～530 ℃范围内出现显著分解峰，而 PAL 仅在 200 ℃前表现为游离水和结晶水的蒸发。改性后的芯材在 324 ℃～394 ℃范围内出现失重峰，对应乙酸钠分解过程，但其终止温度较纯 SA 提前，推测

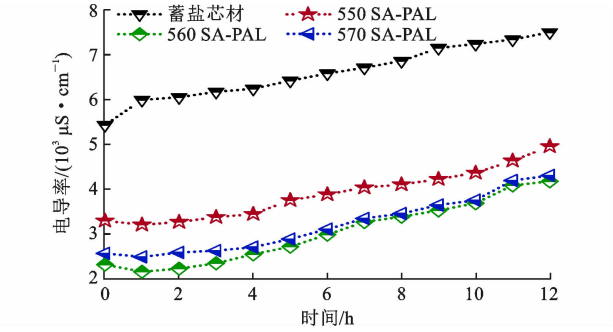


图 9 SA-PAL 的电导率

Fig. 9 Electrical Conductivity of SA-PAL Composites

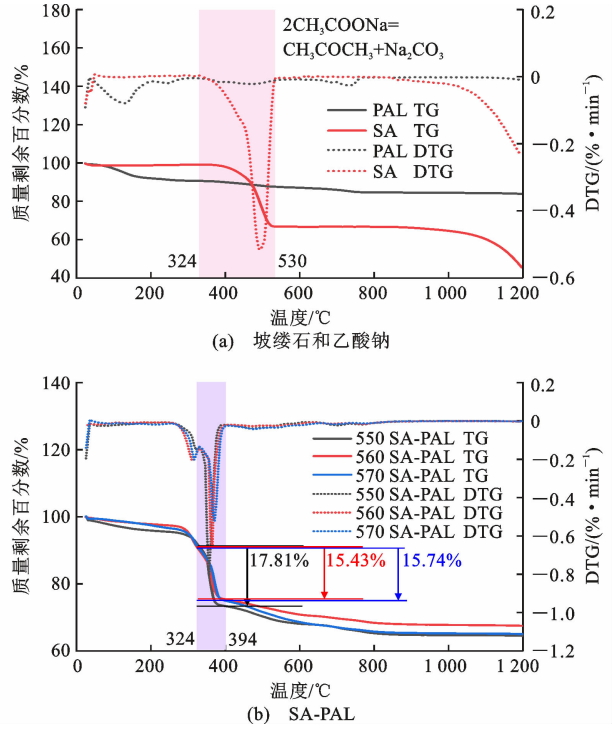


图 10 相关样品的 TG-DTG 测试结果

Fig. 10 TG-DTG Analysis of Related Samples

与复合材料结晶度降低有关。在 TG 曲线上取相应温度范围内的失重，推断蓄盐量由大到小的顺序为 550 SA-PAL、570 SA-PAL、560 SA-PAL。结合导电率测量结果，选择 KH570 作为表面改性剂。

(2)改性剂掺量的优化

为确定 KH570 的最优掺量，本研究在改性剂与蓄盐芯材质量比为 25%、50%、75%、100% 和 125%条件下制备 SA-PAL，并通过电导率测试与统计分析进行评价。图 11 展示了不同 KH570 掺量下 SA-PAL 的电导率变化规律。一般而言，在相同浸泡时间内，电导率值越低，说明盐分释放速率越慢，缓释效果越好。同时段 SA-PAL 的电导率值随 KH570 掺量的增加而降低，且各组样品的电导率均随浸泡时间延长而升高，说明盐分持续释放过程较为稳定。

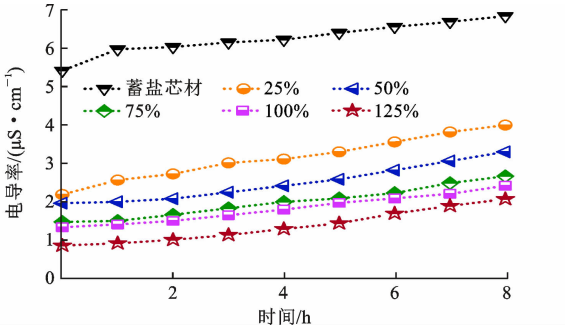


图 11 570 SA-PAL 的电导率

Fig. 11 Electrical Conductivity of 570 SA-PAL

为定量比较不同掺量的差异，对 5 组样品在 8 h 内的电导率进行配对样本 t 检验，结果见表 4。所有配对组的 Sig 值均小于 0.05，表明不同掺量之间的差异均具有显著性。其中，当 KH570 掺量由 25% 提升至 75%时，电导率下降幅度最大，缓释效果改善最为显著；而超过 75%后，电导率下降幅度趋缓。这主要是由于过量 KH570 会导致表面硅氧网络过密，影响离子交换与溶出过程，从而降低缓释效率[27]。

表 4 配对样本 t 检验

Table 4 Paired Samples t Test Results

配对	均值差	标准差	标准误差	差分的 95%置信区间		t 统计量	Sig.(双侧)
				下限	上限		
0&0.25	1 255.556	438.495	146.165	918.499	1 592.613	8.590	0
0.25&0.5	648.778	169.120	56.373	518.781	778.775	11.509	0
0.5&0.75	508.333	82.198	27.399	445.150	571.516	18.553	0
0.75&1.0	173.889	61.489	20.496	126.624	221.153	8.484	0
1.0&1.25	456.222	79.511	26.504	198.100	517.340	17.214	0

图 12 为不同 KH570 掺量下 SA-PAL 的 TG 曲线。由图 12 可知，乙酸钠在约 324 ℃开始发生明显热分解，而坡缕石在该温度区间不存在显著分解行为。因此，图 12 中选取 324 ℃～394 ℃温区内的质量损失，用于表征不同 KH570 掺量条件下 SA-PAL 中乙酸钠的相对保留情况。随着 KH570 掺量的增加，SA-PAL 样品的质量损失呈现出先缓慢变化、后明显下降的趋势；当掺量由 0.75 增至 1 时，损失量最为明显。综上，考虑各组 SA-PAL 的缓释性能提升率以及盐分损失量，改性剂掺量选择 0.75。

2.2 高分子膜性能表征

图 13(a)为高分子膜 EC-MA 的 DSC 曲线。玻璃化转变温度(T_g)是表征聚合物链段运动能力及其物理状态的重要参数。当温度低于 T_g 时，分子链段运动受限，材料处于脆性的玻璃态；当温度高于 T_g 时，链段开始发生协同运动，体系进入高弹

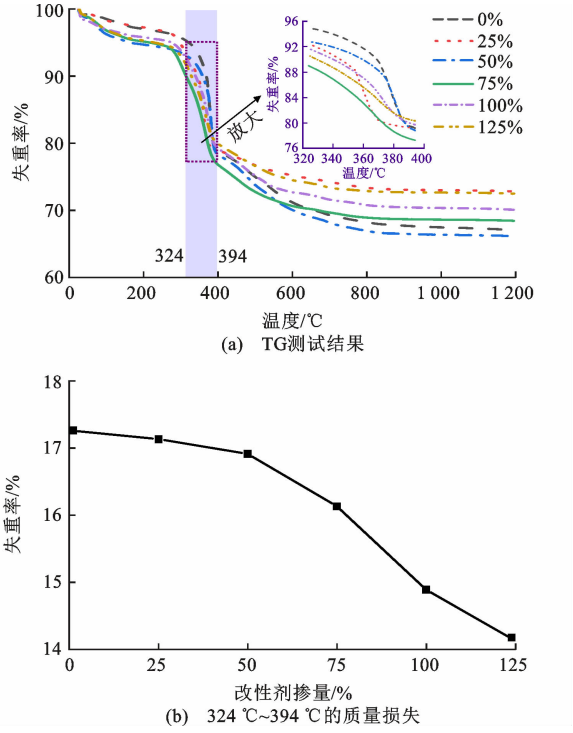


图 12　570 SA-PAL 的质量变化

Fig. 12　Mass Change of 570 SA-PAL

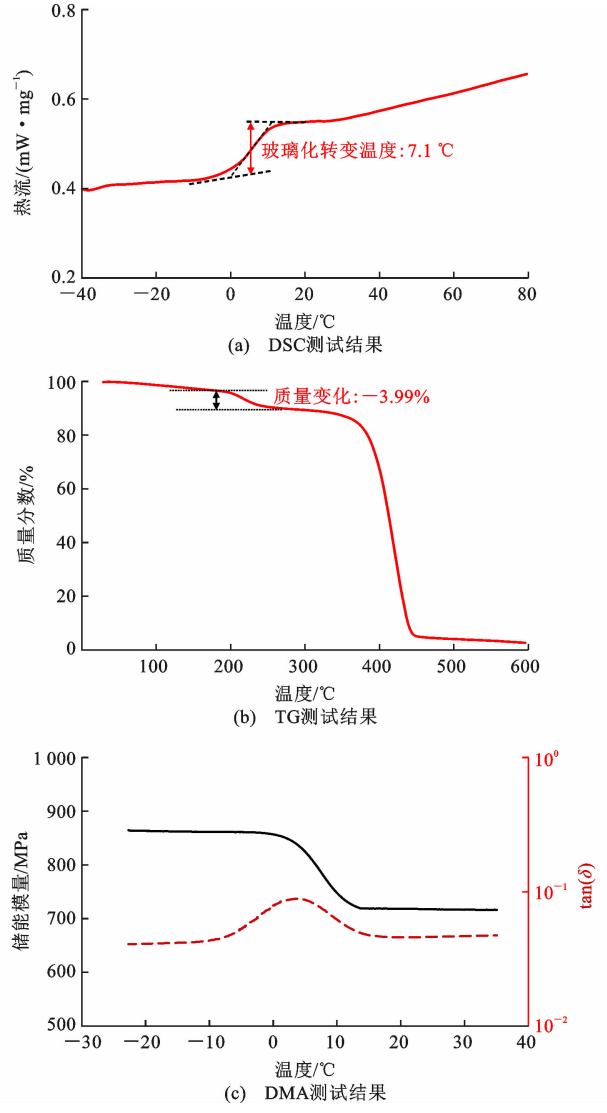


图 13　EC-MA 的热分析

Fig. 13　Thermal Analysis of EC-MA Polymer Film

态[28]。由图 13(a)可知，EC-MA 的 T_g 为 7.1 ℃。道路在冬季出现结冰现象时，其路表温度通常处于 0 ℃以下。在该温度区间内，EC-MA 所处环境温度低于 T_g，材料以玻璃态为主，链段运动能力显著降低，在外部交通荷载作用下更易产生局部应力集中，并诱发微裂纹[29]。该物理状态有利于包膜在低温与荷载作用下发生破裂，从而为盐分释放提供通道。而在非冬季，即环境温度高于 T_g 时，EC-MA 表现为高弹态，材料具有较高的链段柔性和一定的分子运动自由度，能够通过弹性变形耗散外部应力，有助于维持包膜结构的整体完整性并抑制盐分的过早流失[30]。由图 13(b)中 EC-MA 的 TG 曲线可知，EC-MA 在 200 ℃内的质量损失仅为 3.99%，主要来源于残余水分及少量低分子量物质的挥发。较高的分解起始温度说明 EC-MA 具有较好的热稳定性，可在常规施工或混合搅拌过程中保持结构完整，不会因热分解而导致膜层破坏[31]。

为进一步量化 EC-MA 在服役温度下的变形与耗能特性，开展动态热机械分析(DMA)试验，结果如图 13(c)所示。DMA 通过储能模量 E' 与损耗因子 tan(δ)表征材料刚度与黏弹耗能水平，其中 E' 反映材料抵抗可逆变形的能力，tan(δ)峰值温度通常用于表征玻璃化转变区间。由图 13(c)可知，EC-MA 的 E' 在低温区保持较高水平，并在 3 ℃～14 ℃区间出现明显下降，表明链段运动能力由受限逐步转变为协同运动，材料刚度随之显著降低并进入高弹响应区；相应地，tan(δ)在 6.3 ℃处出现峰值。该峰温与 DSC 测得 T_g 在 7.1 ℃相近，说明 EC-MA 的 T_g 位于接近 0 ℃的低温服役区间。

2.3　EMP 性能表征

2.3.1　包覆率

为评价 EC-MA 对 SA-PAL 的包覆效果，本研究采用电导率法测定材料在水溶液中的盐分释放量，并据此计算 EMP 包覆率。称取 2 g 材料置于 100 mL 去离子水中，静置 3 h 后测定其电导率值，并按式(4)计算包覆率，计算结果见表 5。

由表 5 可知，随着 SA-PAL 掺量的增加，EMP 的包覆率呈逐渐下降趋势。SA-PAL 掺量在 0.75～1.25 g 时，材料的包覆率较高，说明预聚体能够充

表 5 EMP 的包覆率

Table 5 Encapsulation Efficiency of EMP

EC-MA 质量/g	SA-PAL 质量/g	包覆率/%
1	0.75	88.2
1	1.00	87.7
1	1.25	85.4
1	1.50	73.6
1	1.75	58.2

分接触并裹覆芯材表面，形成较完整的膜层；当 SA-PAL 掺量超过 1.25 g 时，预聚体不足以完全覆盖芯材，导致部分芯材裸露，包覆率大幅降低。考虑到芯材掺量较低时，虽然包覆率较高，但预聚体用量过剩会导致材料整体利用率偏低，故选择 EC-MA 与 SA-PAL 的质量比为 1∶1.25 来制备 EMP。

$$\eta=\frac{M_0-M_t}{M_0}\times 100\% \tag{4}$$

式中：η 为包覆率；M_0 为 SA-PAL 的电导率值；M_t 为 EMP 的电导率值。

2.3.2 XRD 测试分析

图 14 为 EC-MA 和 EMP 的 XRD 测试结果。由图 14 可知，EC-MA 在 $2\theta=20°$附近出现(200)晶面的宽弥特征峰，伴随基线缓慢上升的“馒头峰”，表明材料内部为无定形结构[32]。EMP 的衍射图谱中主要反映了 SA 与 PAL 两部分特征，其中 PAL 特征峰出现在 $2\theta=8.5°$的(110)面；在 $2\theta=11.5°$的(110)面和 29.8°的(−402)面出现的是水合乙酸钠的特征峰，与纯 SA 特征峰位相比有所偏移，主要是由 SA 潮解后干燥温度不足而形成的[33]。对比图 7 可知，由于有机物的存在，EMP 样品表面容易吸附空气中的水分和其他杂质，导致谱图基线增加；另外衍射峰明显展宽，并且由于层间离子之间相互作用的减弱，图谱整体强度也随之降低[34]。由于制备过程无法准确评估盐分损耗情况，同时存在部分无水乙酸钠转化成水合乙酸钠现象，为确定 EMP 内部的含盐量，采用 Rietveld 精修法定量分析内部晶体结构，得到 EMP 内部 SA 的相对质量比为 35.8%。

2.3.3 SEM 测试分析

图 15 展示了坡缕石、SA-PAL 及 EMP 的微观形貌。天然坡缕石因氢键和范德华力作用通常以晶束或集合体形式存在，限制了比表面积和活性位点的暴露[35]。经超声处理后，晶束解聚并呈蓬松化特征，纤维单体形貌清晰；同时，所形成的毛细通道有助于提高储盐能力[36]；棒晶表面附着有不规则晶体颗粒，结合 XRD 与 FT-IR 结果可判定为乙酸钠，表明 SA 已成功负载于 PAL。进一步经 EC-MA 包覆后，芯材颗粒表面形成了紧致有序的壳层结构，显示出良好的覆盖效果，但包膜表面仍可见沟壑、龟裂及芯材裸露区域，主要与制样过程中的机械破碎有关，该现象与包覆率分析结果一致。

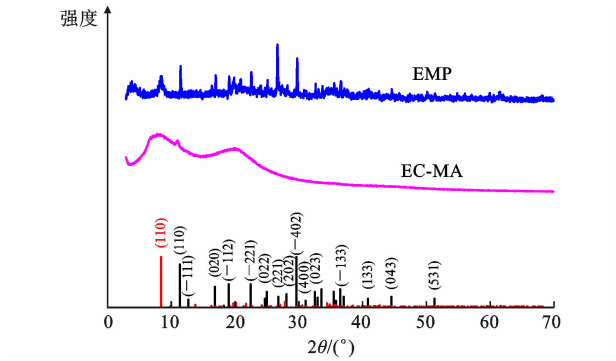
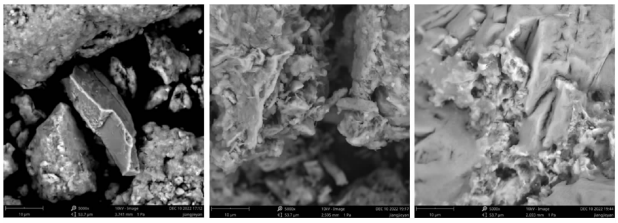


图 14 EC-MA 和 EMP 的 XRD 测试结果

Fig. 14 XRD Patterns of EC-MA and EMP



(a) 坡缕石 (b) SA-PAL (c) EMP

图 15 相关样品的 SEM 测试结果

Fig. 15 SEM Micrographs of Related Samples

2.3.4 FT-IR 测试分析

对 EMP 进行红外光谱测试，结果如图 16 所示。通过观察 2 个图谱可发现，EMP 与蓄盐芯材的主要吸收峰位置基本一致。EMP 的光谱在1 052.62、1 266.55、1 736.47、2 952.77 cm^{-1}处出现了新的特征吸收峰或峰强增强。其中，1 736.47 cm^{-1}对应丙烯酸甲酯中 C=O 的伸缩振动，1 052.62、1 266.55 cm^{-1}分别归属于乙基纤维素及聚丙烯酸甲酯骨架中的 C—O—C 与 C—O 伸缩振动，而 2 952.77 cm^{-1}则来源于聚合物链上 C—H 的不对称伸缩振动。综上，EMP 的光谱中既保留了蓄盐芯材的特征，又新增了 EC-MA 的有机官能团吸收峰，证明有机高分子膜成功包覆于芯材表面。

2.4 EMP 抑冰性能分析

2.4.1 静态抑冰性能测试

为比较 EMP 各组分在低温环境下的冻结特性，对样品在降温过程中的结冰行为进行了系统分析。试验结果如图 17 和表 6 所示。随着温度降低，不同组分的结冰温度及冰层形态存在明显差异。空白组在 0 ℃时即出现冰晶，说明去离子水在外界扰

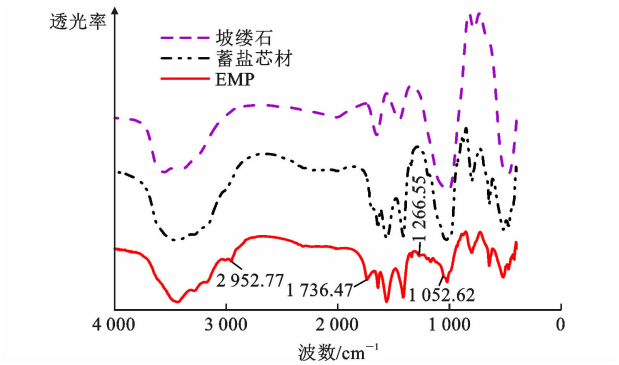


图 16　EMP 的 FT-IR 测试结果

Fig. 16　FT-IR Spectra of EMP

动下易发生异质成核[37]。添加 PAL 后冻结特征基本一致，表明载体本身不具备降冰点能力。加入 SA 后，冻结过程被显著推迟，在－6 ℃才出现冰晶，主要在于 SA 通过溶质效应降低水的化学势，抑制了冰晶生成。SA-PAL 组冻结略有提前，说明改性后的 SA-PAL 减缓了 SA 的溶出速率。

未碾压 EMP 组在－1 ℃出现局部冰晶，至－5 ℃形成连续薄冰层，表明包膜结构在低温下较为完整，SA 释放受限，溶液离子强度较低，对成核的抑制作用有限。相较之下，碾压后 EMP 组冻结明显推迟，降至－3 ℃时仍仅观察到少量冰晶，至－6 ℃才形成薄冰层。这表明，经荷载作用后的高分子膜产生微裂纹，SA 得以提前释放，提升溶液离子浓度，降低水的化学势并增加成核能垒，从而有效延缓冰晶生成与生长。

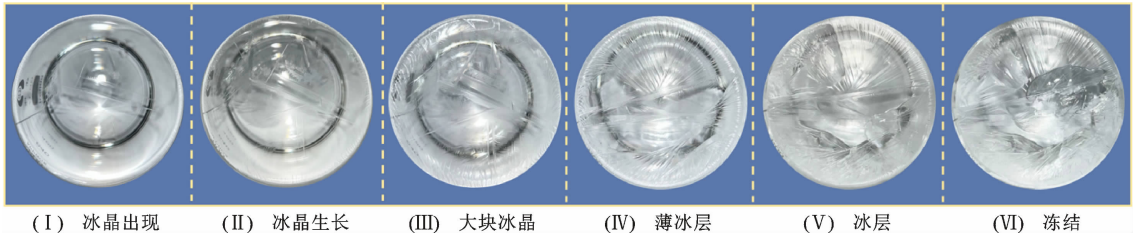


图 17　水的冻结过程

Fig. 17　Freezing Process of Water

表 6　不同组合在不同温度下的冻结状态

Table 6　Freezing States of Different Systems at Various Temperatures

类型	0 ℃	－1 ℃	－2 ℃	－3 ℃	－4 ℃	－5 ℃	－6 ℃	－7 ℃
去离子水	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)	(Ⅴ)	(Ⅵ)	(Ⅵ)	(Ⅵ)
水＋PAL	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)	(Ⅴ)	(Ⅵ)	(Ⅵ)	(Ⅵ)
水＋SA							(Ⅰ)	(Ⅱ)
水＋SA-PAL					(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)
水＋碾压后 EMP				(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)	(Ⅴ)
水＋未碾压 EMP		(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)	(Ⅳ)	(Ⅴ)	(Ⅵ)

2.4.2　DSC 测试分析

静态抑冰性能测试主要用于对比不同组分对宏观结冰过程的延缓能力。为进一步从热力学角度量化溶液的相变特征，本节采用 DSC 测定各组分的冰点与相变潜热变化，以反映离子作用对冰晶成核与生长的影响。对上述杯中液体进行 DSC 测试，结果如图 18 所示。由结果可见，加入乙酸钠后冰点与潜热显著降低，说明溶液中可冻结自由水比例减少、束缚水比例增加，其溶质效应可有效抑制冰晶生成。未碾压 EMP 体系冰点略低于纯水，但潜热减少不多，说明乙酸钠在包覆结构限制下释放缓慢，水相中

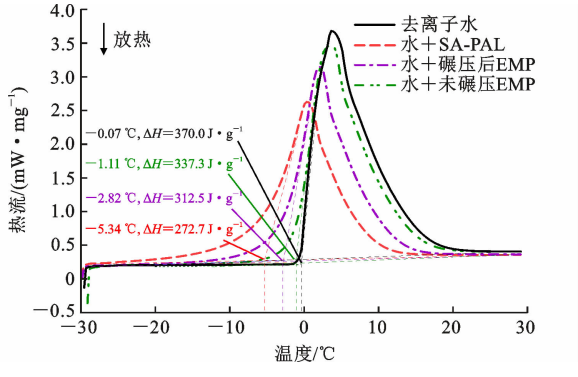


图 18　不同组分的 DSC 测试结果

Fig. 18　DSC Curves of Different Components

溶质浓度不足。碾压后 EMP 组的冰点进一步降低至－2.82 ℃，潜热较纯水降低 57.5 J·g^{-1}，表明荷载作用能促使盐分提前释放，提高溶液离子浓度，从而增强抑冰效应。SA-PAL 组的冰点最低且潜热减少最明显，说明乙酸钠在无高分子膜包覆下可快速融入水相，削弱冰晶生成与生长过程。

3　低冰点沥青混合料抑冰性能分析

3.1　低冰点混合料掺量的确定

为评估 EMP 以替代矿粉方式掺入后对混合料整体路用性能的影响，并据此确定兼顾工程适用性

与抑冰功能的合理掺量范围，设置了 EMP 替代矿粉掺量为 0%、30%、50%、70%和 100%的系列试验方案。选取高温稳定性（动稳定度 D_S）、低温抗裂性（最大弯拉应变 ε_B）与水稳定性（浸水残留稳定度 M_{S0}）作为关键评价指标，对不同掺量混合料进行对比测试，结果见表 7。

表 7 不同 EMP 替代矿粉掺量下混合料关键路用性能指标

Table 7 Key Pavement Performance Indices of Mixtures with Different EMP Replacement Ratios

EMP 替代矿粉掺量/%	D_S/(次·mm^{-1})	$\varepsilon_B/10^{-6}$	M_{S0}/%
0	3 750	3 452.10	91.86
30	4 217	3 337.30	84.92
50	3 874	2 784.12	80.23
70	3 331	2 512.45	77.35
100	3 087	2 478.89	71.24

由各指标随掺量变化的规律可知：D_S 呈先升后降的趋势，在 30%掺量处达到峰值；ε_B 随掺量增加整体下降，表明当掺量较高时低温抗裂性能可能受到不利影响；M_{S0} 随掺量增大逐渐降低，当掺量达到 70%及以上时已低于规范要求（$M_{S0}\geqslant 80\%$）。鉴于掺量提高有利于后续抑冰功能的有效发挥，在满足路用性能技术约束的前提下，引入多指标综合评价方法确定推荐掺量范围。

为在多指标框架下确定权重并提高评价结果的客观性，采用 CRITIC 方法对 D_S、ε_B 与 M_{S0} 进行客观赋权，并以加权综合得分对不同掺量方案进行综合评价。根据式(5)对各指标进行极差归一化处理

$$z_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{5}$$

式中：x_{ij} 为第 i 种掺量方案下第 j 个指标的原始值；$\max(x_j)$、$\min(x_j)$ 分别为指标 j 的最大值与最小值；z_{ij} 为归一化值。

各指标标准差 σ_j 按式(6)计算

$$\sigma_j=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(z_{ij}-\bar{z}_j)^2} \tag{6}$$

式中：m 为方案数；$\bar{z}_j$ 为指标 j 的均值。

指标冲突性 C_j 由式(7)计算

$$C_j=\sum_{k=1}^{n}(1-r_{jk}) \tag{7}$$

式中：n 为指标数；r_{jk} 为指标 j 与指标 k 的皮尔逊相关系数。

基于 σ_j 与 C_j，根据式(8)得到各指标信息量 I_j，再由式(9)计算客观权重 w_j

$$I_j=\sigma_j C_j \tag{8}$$

$$w_j=\frac{I_j}{\sum_{k=1}^{n}I_k} \tag{9}$$

最后依据式(10)对归一化指标进行加权求和，获得各掺量方案的综合得分 S_i

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}w_j z_{ij} \tag{10}$$

式中：w_j 为指标 j 的客观权重；S_i 为第 i 种掺量方案的综合得分，S_i 越大表示综合性能越优。

采用 CRITIC 方法对 D_S、ε_B 与 M_{S0} 进行客观赋权，得到权重分别为 0.431、0.282 和 0.287，并据此计算综合得分及排序（表 8）。结果表明：30%掺量的综合得分最高，体现出较优的路用性能均衡性；随着掺量进一步提高，综合得分逐步降低，表明高掺量条件下路用性能协调性下降。考虑掺量增加有利于抑冰功能发挥，在综合得分排序结果基础上，推荐 EMP 替代矿粉的合理掺量范围为 30%～50%，其中 30%可作为以路用性能为主的优选掺量，50%可作为兼顾抑冰效果的上限掺量。为验证上述掺量范围内 EMP 的最佳抑冰效果及其作用机理，冰点测定、冻黏强度与析盐试验均采用 50%掺量开展分析。

表 8 CRITIC 权重与综合得分排序结果

Table 8 CRITIC Weights and Comprehensive Score Ranking Results

EMP 替代矿粉掺量/%	综合得分	排序
0	0.822	2
30	0.870	1
50	0.514	3
70	0.188	4
100	0.000	5

3.2 冰点测定试验

冰点是溶液由液态转变为固态的临界温度值，当溶液开始结冰后，温度曲线会出现稳定平台期，此时的温度即为该物质的冰点。为比较不同碾压与温度条件下缓释蓄盐材料对混合料冰点的影响，对普通马歇尔试件及低温未碾压、低温碾压后、室温碾压后 3 组 EMP-50%马歇尔试件进行了冰点测试，结果如图 19 所示。普通马歇尔试件在不同水层厚度下的冰点约为－0.28 ℃，略低于纯水的理论冰点 0 ℃，这一差异主要源于混合料表面集料粗糙度及微量杂质对冰晶成核的扰动，使冰晶形成受到一定抑制，从而导致结冰温度略低于纯水[38]。相比之下，掺入 EMP 的 3 组试件冰点均出现不同程度下降，表明部分乙酸钠在接触水后开始析出，形成了一

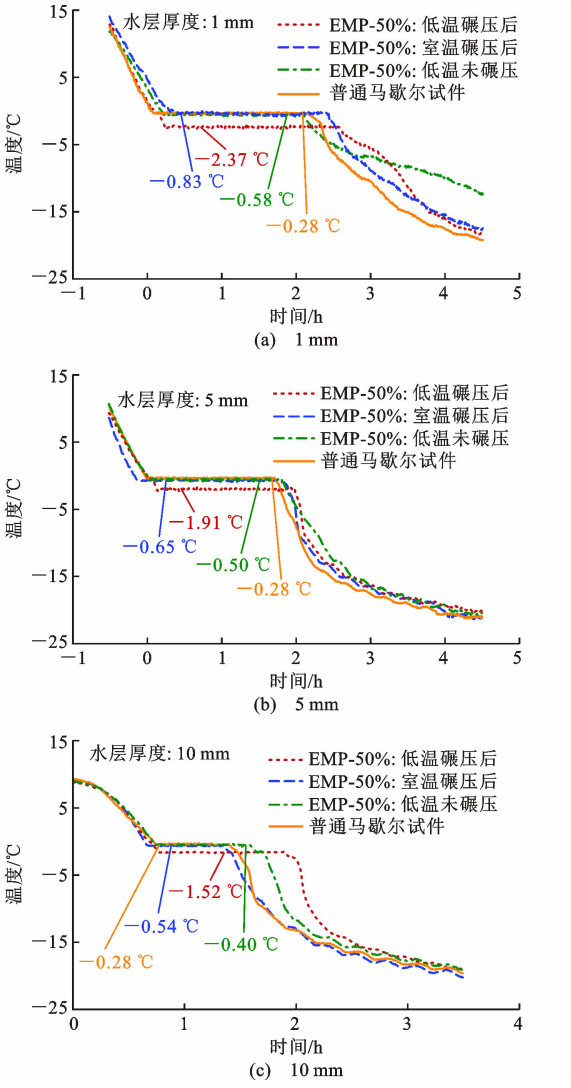


图 19　冰点测定结果

Fig. 19　Freezing Point Measurement Results

定浓度的稀盐溶液，推迟了水的结冰过程。其中，低温碾压组表现出最显著的降冰效果，在 1 mm 水层下冰点为−2.37 ℃，各水层下的冰点相较普通马歇尔平均降低约 1.65 ℃；室温碾压组的冰点整体低于普通马歇尔试件，但高于低温碾压组，在 1 mm 水层下为−0.83 ℃。上述现象表明，在低温与荷载共同作用下，高分子包膜发生了部分破裂，使盐分得以及时析出并在水层中扩散；而在室温碾压条件下的包膜结构仍较完整，使 EMP 内的盐分迁移受到一定限制。此外，低温未碾压组冰点下降幅度最小，在 1 mm水层下仅为−0.58 ℃，说明 EMP 在未受外力作用时内部盐分难以释放。

3.3　冻黏强度拉拔试验

冰-沥青界面黏结性能直接影响道路在冰雪天气下的安全性。为研究缓释蓄盐材料对界面黏结性能的影响，对各组马歇尔试件进行了冻黏强度拉拔试验，结果如图 20 所示。总体来看，所有试件的冻黏强度均随温度降低而上升。这是由于在较低温度下，沥青混合料与冰界面间的黏结作用增强，界面毛细水膜冻结后形成更强的机械咬合作用，使冰块与混合料表面结合更加紧密[39]。与普通试件相比，掺入 EMP 的 3 组试件均表现出一定程度的强度下降，其中低温碾压组降幅最为明显，冻黏强度由−5 ℃的 0.172 MPa 增至−13 ℃的 0.387 MPa，平均值较普通试件低约 44%。这表明，EMP 材料在受力与低温条件下能形成局部含盐薄层，从而削弱冰-混合料界面黏附性能。室温碾压组在相同条件下的冻黏强度为 0.450 MPa，介于低温碾压组与未碾压组之间，说明其盐分释放较少，界面削弱作用有限。

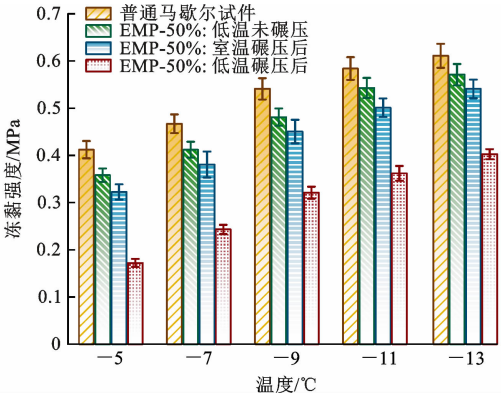


图 20　拉拔试验结果

Fig. 20　Pull-off Test Results

3.4　析盐试验

为进一步探究不同碾压及温度条件对缓释蓄盐材料盐分释放特性的影响，对各组马歇尔试件进行了电导率测试，结果如图 21 所示。从整体变化趋势看，3 组试件的电导率均随浸泡时间持续上升，表明盐分不断由混合料内部向外析出并进入溶液中，体系中离子浓度逐渐增加。低温碾压组的电导率增长最为迅速，在 24 h 时的电导率约为 153.5 $\mu S \cdot cm^{-1}$。此外，在浸泡约 8 h 后，低温碾压组的电导率增速减缓，进入相对平稳阶段，主要原因在于溶液浓度梯度减小、离子扩散受限，体系逐渐趋于平衡。

为定量分析盐分释放行为，对各组电导率数据采用指数模型进行拟合，其变化规律可用式(11)表示

$$\sigma(t)=A(1-e^{-kt})+\sigma_0 \tag{11}$$

式中：$\sigma(t)$ 为 t 时刻电导率；σ_0 为初始电导率；A 为平衡阶段电导率增量；k 为盐分释放速率常数。

拟合结果显示，低温碾压组的拟合参数为 $\sigma_0=25.5\ \mu S \cdot cm^{-1}$，$A=130\ \mu S \cdot cm^{-1}$，$k=0.145\ h^{-1}$，

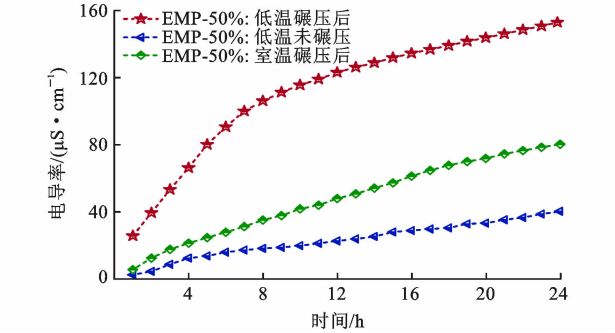


图 21 析盐试验结果

Fig. 21 Salt Release Test Results

确定系数 $R^2=0.997$，拟合精度较高。室温碾压组与低温未碾压组的 k 值分别为 0.092、0.076 h^{-1}，对比说明低温碾压处理对包膜破裂及盐分迁移具有显著促进作用，可使盐分释放速率分别提高约 58%、91%。

3.5 析盐机理

综合冰点测定、冻黏强度拉拔及析盐试验结果可知，EMP 材料的抑冰效果与盐分释放行为密切相关，而盐分释放过程主要受温度条件、交通荷载及包膜结构状态的共同影响。基于上述试验结果，对 EMP 材料的析盐机理作进一步分析，如图 22 所示。

EC-MA 包膜的 T_g 为 7.1 ℃，在冬季典型服役温度条件下，包膜处于玻璃态，材料脆性增强。在低温与交通荷载共同作用下，包膜更易发生局部破裂，从而为盐分向外迁移提供通道。这一过程在低温碾压条件下表现为更高的析盐速率及更显著的降冰点和界面减黏效果，表明包膜在低温条件下的破裂行为对盐分释放具有显著影响。

当包膜发生局部破裂后，水分可沿微裂纹通道进入核壳结构内部，在毛细作用和浓度梯度驱动下，盐分由内部向外界溶液迁移[8]。该机制可用于解释析盐试验中电导率随时间先快速上升、后逐渐趋于平缓的变化特征，反映了盐分迁移过程由非稳态向相对稳定状态的转变。

当环境温度升高至高于 EC-MA 的 T_g 时，包膜转变为高弹态，材料可通过弹性变形缓解外部应力，使微裂隙进一步扩展的倾向降低，从而限制盐分的持续外渗[30]。这一特性在室温碾压组及未碾压组中表现为较低的析盐速率和相对有限的界面减黏效果，有助于降低非冬季条件下盐分的过早损失并延长材料的抑冰功能持效期。

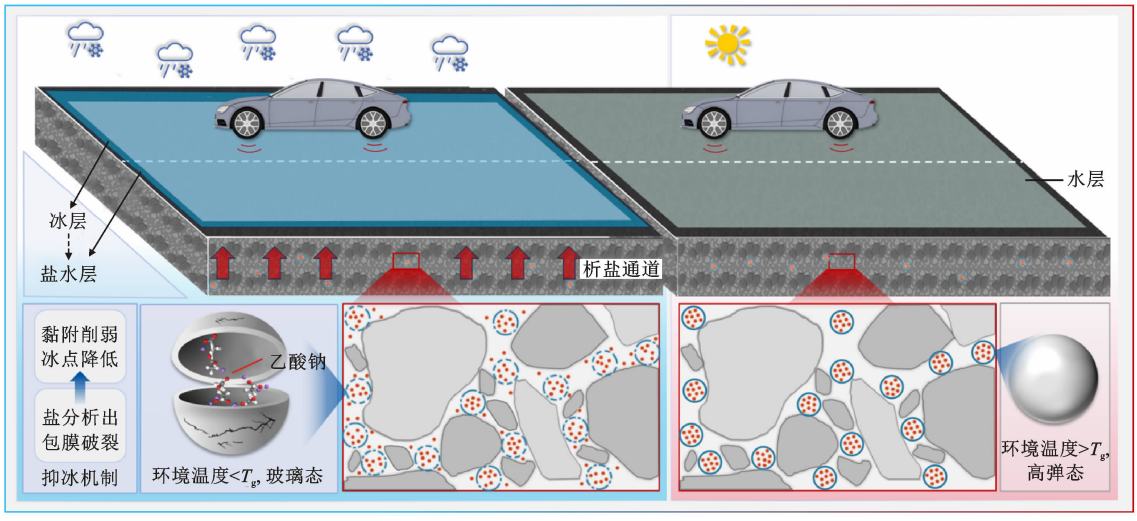


图 22 析盐机理

Fig. 22 Salt Release Mechanism

3.6 功能长效性预估

3.6.1 析盐速率计算

为定量评估低冰点沥青混合料的缓释性能，基于电导率法建立盐分释放速率与时间的关系模型。已知电导率与质量分数之间的关系式为 $\sigma_c=7\,102.17\omega+74.12$，结合马歇尔试件析盐试验的电导率测试数据，可由式(12)计算出试件内盐分的累积析出量

$$m_1(t)=\frac{\omega(t)}{100}\times\rho_w\times V_W\times 1\,000 \tag{12}$$

式中：$m_1(t)$为 t 时刻单个马歇尔试件的盐分累计析出质量；ρ_w 为去离子水密度(取 1.0 g·mL^{-1})；V_W 为试验中浸泡用去离子水体积(取 1 L)。

假定标准马歇尔试件与路面样层厚度一致(63.5 mm)，且盐分在体积内分布均匀，则可按体积比通过式(13)换算出 1 m^2 沥青路面的盐分析出量

$$m_2(t)=m_1(t)\times\frac{V_2}{V_1} \tag{13}$$

式中：$m_2(t)$为 t 时刻 1 m² 沥青路面折算后的盐分释放量；V_1、V_2 分别为单个马歇尔试件与 1 m² 沥青路面的体积。

进一步，1 m² 路面单位时间内的盐析速率可由式(14)计算

$$Q=\frac{m_2}{S\times t} \tag{14}$$

式中：Q 为沥青路面盐分析出速率；S 为析盐面积；t 为析盐时间。

由式(12)～(14)计算出 24 h 内 EMP-50%低温碾压组与室温碾压组的 1 m² 路面析盐量分别为 13.81、1.06 g，对应平均析盐速率分别为 0.58、0.04 g·(m²·h)⁻¹。上述析盐速率计算结果为 EMP-50%的 1 m² 路面在短期全浸泡的近似平均值，在后续计算中将分别代表 1 m² 沥青路面在冬季与非冬季的析盐速率。

3.6.2　抑冰功能寿命计算

低冰点沥青路面的抑冰功能寿命主要取决于混合料蓄盐量、盐分析出速率及当地降雨工况等环境因素。通常来说，蓄盐量越大、析出速率越缓、降雨时间越少，则抑冰功能寿命越长。基于盐分质量守恒假设，路面的使用寿命可由式(15)计算

$$T=\frac{M}{Q\times t'} \tag{15}$$

式中：T 为低冰点沥青路面抑冰功能寿命；M 为混合料的总蓄盐量；t' 为当地平均降雨天数，通过查询当地气候条件得到。

一个 EMP 掺量为 50%(替代矿粉)的标准马歇尔试件的蓄盐量由式(16)计算；进一步通过式(17)换算得到相同厚度的 1 m² 沥青路面蓄盐量。

$$M_1=\alpha_{SA}\times\frac{P}{1+P_b}\times\tau \tag{16}$$

式中：M_1 为单个马歇尔试件的蓄盐量；α_{SA} 为 EMP 中乙酸钠的相对质量含量(取 35.8%)；P 为制备一个马歇尔试件所需混合料质量(取 1 200 g)；P_b 为最佳沥青用量(取 5.1%)；τ 为 EMP 掺量(取 3.5%)。

$$M_2=\frac{M_1\times V_2}{V_1} \tag{17}$$

式中：M_2 为每 1 m² 沥青路面的蓄盐量。

先后代入式(16)、(17)，可得一个标准马歇尔试件蓄盐量 M_1 约为 14 g，1 m² 沥青路面蓄盐量 M_2 为 1 764 g。

以湖南省长沙市为例，查询当地气候状况可知，长沙全年雨日 t' 为 144 d，其中冬季降雨日 t_1' 为 34 d，非冬季降雨日 t_2' 为 110 d。分别将上述降雨日天数与 EMP-50%的 1 m² 沥青路面在冬季与非冬季的析盐速率 Q_1、Q_2 代入式(15)，计算得到 1 m² 低冰点沥青路面的抑冰功能使用寿命 $T_1=M_2/(Q_1\times t_1'+Q_2\times t_2')=1\ 764/(0.58\times24\times34+0.04\times24\times110)\approx3.05$ 年。因此，在典型南方气候下，EMP-50%低冰点沥青路面可维持约 3 年的有效抑冰周期。

需要说明的是，本研究对低冰点沥青路面抑冰功能寿命的预测，基于静态全浸泡条件下获得的盐分释放速率，并在一定工况假设下进行近似估算，其结果主要用于反映不同条件下材料抑冰功能寿命的量级和相对变化趋势。然而，在实际道路服役环境中，盐分释放行为还可能受到降雨历程、渗流状态、交通荷载频率及冻融循环等因素的共同影响，具有更为复杂的动力学特征。因此，本文基于该方法得到的抑冰功能寿命属于近似估算结果，旨在为工程设计和应用提供参考。后续研究有必要结合更接近实际服役条件的长期试验，对抑冰功能寿命模型进行进一步修正与完善。

4　结　语

(1)通过建立电导率-质量分数-冰点的线性关系，确立了以电导率作为冰点变化的量化评价指标。在此基础上，分别优化 SA-PAL 的表面改性参数与 EC-MA/SA-PAL 的配比。结果表明：当 KH570 掺量为 75%时缓释性能最佳；当 EC-MA 与 SA-PAL 质量比为1∶1.25 时，基于 XRD-Rietveld 定量得到 EMP 的载盐率为 35.8%。

(2)微观测试结果表明：乙酸钠成功负载于坡缕石层间；经高分子膜包覆后，材料表面形成连续致密的膜层。包膜的玻璃化转变温度为 7.1 ℃，在 200 ℃时的质量损失仅为 3.99%，表现出良好的热稳定性与温度响应性，可在冬季荷载作用下实现可控破裂并满足施工温度要求。

(3)冰点测定与拉拔试验结果表明，EMP 在低温与荷载共同作用下抑冰效果最显著。EMP-50%低温碾压组在 1 mm 水层条件下的最低冰点可降至 −2.37 ℃，各水层下的冰点较普通沥青混合料平均降低约 1.65 ℃，表明在荷载作用下包膜出现破裂，保证了盐分及时释放至界面，有效削弱了冰-路表间的黏附力，提升了混合料的抑冰性能。

(4)基于电导率法建立了盐分释放动力学模型，

结果表明释放过程符合指数变化规律，EMP-50%低温碾压组的释放速率常数为 0.145 h^{-1}，显著高于其他试验组。结合析盐试验与盐溶解量计算，估算EMP-50%低冰点沥青路面可在南方典型服役条件下维持约 3 年的有效抑冰周期。

(5)后续研究将结合实际道路服役环境，重点探讨 EMP 材料在多因素耦合作用下的功能稳定性及工程适用性，同时从工程应用角度进一步优化 EMP 的掺入方式与用量，为核壳蓄盐缓释型路面材料在冬季道路中的实际应用提供技术依据。

参考文献：

References：

[1] ZHAO C, LI Q, NIE Y, et al. The reversal of surface air temperature anomalies in China between early and late winter 2021/2022: Observations and predictions [J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14 (5): 660-670.

[2] XU B, DAN H, LI L. Temperature prediction model of asphalt pavement in cold regions based on an improved BP neural network [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 568-580.

[3] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报，2020，33(10)：1-66.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's pavement engineering research: 2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (10): 1-66.

[4] JIAO W X, SHA A M, LIU Z Z, et al. Analytic investigations of snow melting efficiency and temperature field of thermal conductive asphalt concrete combined with electrical-thermal system [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 399: 136622.

[5] WAN J M, WU S P, XIAO Y, et al. Enhanced ice and snow melting efficiency of steel slag based ultra-thin friction courses with steel fiber [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117613.

[6] LIU X M, ZHAO Y, LIU W Z, et al. Microwave heating and deicing efficiency for asphalt concrete with SiC—Fe_3O_4 microwave enhanced functional layer [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 332: 130111.

[7] MA T, DING X H, WANG H, et al. Experimental study of high-performance deicing asphalt mixture for mechanical performance and anti-icing effectiveness [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (8): 04018180.

[8] 刘状壮，沙爱民，蒋 玮. 蓄盐沥青路面研究进展：盐化物材料、混合料及其性能与评价[J]. 中国公路学报，2019，32(4)：18-31.
LIU Zhuang-zhuang, SHA Ai-min, JIANG Wei. Advances in asphalt pavements containing salts: Additives, mixtures, performances, and evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4): 18-31.

[9] PENG C, YU J, ZHAO Z J, et al. Preparation and properties of a layered double hydroxide deicing additive for asphalt mixture [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 110: 70-76.

[10] PAHLAVAN F, GHASEMI H, YAZDANI H, et al. Soil amended with algal biochar reduces mobility of deicing salt contaminants in the environment: An atomistic insight [J]. Chemosphere, 2023, 323: 138172.

[11] 郭乃胜，褚召阳，房辰泽，等. 沥青及沥青混合料氯盐侵蚀损伤的多尺度研究进展[J]. 中国公路学报，2023，36(12)：77-106.
GUO Nai-sheng, CHU Zhao-yang, FANG Chen-ze, et al. Progress of multi-scale research on chloride salt erosion damage of asphalt and asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36 (12): 77-106.

[12] MENG Y J, ZHANG C, CHEN J, et al. Deicing characteristics and pavement performance of eco-friendly de-icing asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129565.

[13] ZHANG Q, WU D, ZHANG X J, et al. Effect of organic deicing agents on asphalt rheology and analysis of the mechanism [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122649.

[14] YIN Y Y, HAN S, ZHU Y Q, et al. Functional durability evaluation of asphalt mixture containing ecologically friendly hydrophobic anti-icing additives [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 129781.

[15] 张海虎，闵润华，钱劲松. 蓄盐材料、蓄盐沥青混合料性能的研究进展[J]. 材料导报，2025，39(16)：76-89.
ZHANG Hai-hu, GUO Run-hua, QIAN Jin-song. Advances in salt-storage material and performance of salt-storage asphalt mixture: A review [J]. Materials Reports, 2025, 39 (16): 76-89.

[16] LU C, ZHANG Z Q, QIANG Y K, et al. A hydrophobic and sustainable anti-icing sand fog seal for asphalt pavement: Its preparation and characterization [J]. Construction and Building Materials, 2023, 401: 132918.

[17] XU H, JIN J, ZHANG Y L, et al. Optimization and performance evaluation of heat storage-transfer structures in asphalt pavements based on material layer adaptation [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 295: 130638.

[18] XIA H Y, ZHAO X, WU Y C, et al. Preparation and performance of antifreeze adhesive materials for asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119554.

[19] SU J F, XIE X M, WANG L Q, et al. Novel bionic and clean de-icing bituminous composite material by autocrine microcapsule production with a temperature responsive character [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127864.

[20] SUÁREZ M, GARCÍA-RIVAS J, MORALES J, et al. Review and new data on the surface properties of palygorskite: A comparative study [J]. Applied Clay Science, 2022, 216:

106311.

[21] LI J, LI B, LI G J, et al. Effect evolution and lifespan estimation on ice-melting performance of salt-storage asphalt mixtures under dynamic water scouring [J]. Construction and Building Materials, 2025, 489: 142327.

[22] 郭　鹏，蔡东洋，刘　俊，等. 蓄盐类抗凝冰沥青混合料长效性评价[J]. 科学技术与工程，2022，22(10)：4136-4142.
GUO Peng, CAI Dong-yang, LIU Jun, et al. Evaluation of long-term performance of salt storage anti-icing asphalt mixture [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (10): 4136-4142.

[23] 王　锋，韩　森，张丽娟，等. 融冰雪沥青混合料盐分溶析试验[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2010，30(6)：16-19.
WANG Feng, HAN Sen, ZHANG Li-juan, et al. Efflorescence experiment of asphalt mixture with salt for melting snow and ice [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30 (6): 16-19.

[24] JIN J, GAO Y C, WU Y R, et al. Rheological and adhesion properties of nano-organic palygorskite and linear SBS on the composite modified asphalt [J]. Powder Technology, 2021, 377: 212-221.

[25] TIAN H F, GAO P, YANG X, et al. Tandem composite of M (Zn, Ga, in)-UIO-66/ (HZSM-5)-palygorskite for hydrogenation of carbon dioxide to aromatics [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466: 143267.

[26] ARAÚJO D, CASTRO M C R, FIGUEIREDO A, et al. Green synthesis of cellulose acetate from corncob: Physicochemical properties and assessment of environmental impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 120865.

[27] 狄剑锋，邹建光. 防紫外纳米 ZnO/CeO_2 表面修饰工艺研究[J]. 材料导报，2013，27(增 2)：9-12.
DI Jian-feng, ZOU Jian-guang. Research on ultraviolet protective ZnO/CeO_2 nanoparticles surface modification technology [J]. Materials Reports, 2013, 27 (S2): 9-12.

[28] MA Y F, KOU Z M, GENG X, et al. Combining renewable ethyl cellulose and acrylate to fabricate sustainable TPEs via controlled polymerization [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2021, 29 (10): 3154-3160.

[29] VASSILIADOU O, CHRYSOSTOMOU V, PISPAS S, et al. Molecular dynamics and crystallization in polymers based on ethylene glycol methacrylates (EGMAs) with melt memory characteristics: From linear oligomers to comb-like polymers [J]. Soft Matter, 2021, 17 (5): 1284-1298.

[30] LIU L M, CHEN S L, HU Y, et al. Anti-/deicing membranes with damage detection and fast healing [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34 (40): 2404760.

[31] REN Y X, HAO P W. Modification mechanism and enhanced low-temperature performance of asphalt mixtures with graphene-modified phase-change microcapsules [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126301.

[32] GHIASI F, GOLMAKANI M T. Fabrication and characterization of a novel biphasic system based on starch and ethylcellulose as an alternative fat replacer in a model food system [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103028.

[33] YU K Y, LIU Y S, YANG Y Z. Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: Preparation, characterization and effect on the thermophysical properties [J]. Applied Energy, 2021, 292: 116845.

[34] 孙莉莉，闫　凯，罗　稳，等. 中空 ZSM-5 分子筛微球及其吸附与催化性能[J]. 无机材料学报，2016，31(8)：834-840.
SUN Li-li, YAN Kai, LUO Wen, et al. Hollow ZSM-5 zeolite microspheres with improved adsorption and catalytic properties [J]. Journal of Inorganic Materials, 2016, 31 (8): 834-840.

[35] DAI L, MENG K, ZHAO W F, et al. Enhanced removal of Cd^{2+} by nano zero-valent iron modified attapulgite from aqueous solution: Optimal design, characterization and adsorption mechanism [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10 (3): 107719.

[36] LIU S, FAN F Q, LIU X F, et al. Old wine and new bottles: Insights into traditional attapulgite adsorbents with functionalized modification strategies applied in efficient phosphate immobilization [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 395: 136451.

[37] 刘佳佳，黄凯健，王家庆，等. 路面用超疏水材料的抑冰研究进展[J]. 化工新型材料，2023，51(2)：223-228.
LIU Jia-jia, HUANG Kai-jian, WANG Jia-qing, et al. Research progress on ice suppression of superhydrophobic materials for road surface [J]. New Chemical Materials, 2023, 51 (2): 223-228.

[38] ZHANG Z S, LIU X Y. Control of ice nucleation: Freezing and antifreeze strategies [J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47 (18): 7116-7139.

[39] 丁金波，董　威. 表面粗糙度对冰冻黏强度影响试验研究[J]. 航空发动机，2012，38(4)：42-46.
DING Jin-bo, DONG Wei. Experimental study of influence of surface roughness on ice adhesion [J]. Aeroengine, 2012, 38 (4): 42-46.