工程材料与结构
Engineering Materials and Structures
2026 年第 05 卷第 03 期
Vol. 05, No. 03, 2026

研究性论文
http://www.scifootprint.com/EMS/index.html

盐-冻融作用下水泥乳化沥青混合料性能损伤规律研究

赵　松[1,*]，苏　丹[2]

（1. 大连理工大学建设工程学院，大连 116024；2. 辽宁和城建设项目咨询管理有限公司，盘锦 124100）

摘要：为明确寒冷及融雪盐环境下水泥乳化沥青混合料的耐久性衰减特征，本文以水泥乳化沥青混合料为研究对象，采用清水与 15% NaCl 溶液进行冻融循环处理，系统分析不同冻融循环次数对其高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性的影响。结果表明，冻融循环会持续削弱水泥乳化沥青混合料的路用性能，且盐溶液冻融作用下的损伤程度明显高于清水冻融作用。随着循环次数由 1 次增加至 15 次，动稳定度、最大弯拉应变和劈裂强度比均出现不同程度下降，说明水分迁移、冰胀压力、盐分侵蚀以及水泥水化产物与乳化沥青膜界面弱化共同加速了混合料内部结构损伤。研究结果可为水泥乳化沥青混合料在寒冷地区及融雪盐环境下的材料设计和耐久性评价提供参考。

关键词：水泥乳化沥青混合料；盐冻作用；冻融循环；水稳定性；损伤规律

DOI：10.48014/ems.20260721015

引用格式：赵松，苏丹．盐-冻融作用下水泥乳化沥青混合料性能损伤规律研究[J]．工程材料与结构，2026，5(3)：140-146.

1　引言

随着全球气候变化、寒区交通基础设施建设以及冬季融雪盐使用量的增加，道路材料在低温、潮湿和盐蚀耦合作用下面临更加严苛的服役环境[1]。水泥乳化沥青混合料兼具水泥水化硬化和乳化沥青成膜黏结的特点，具有常温施工、节能减排和早期强度发展等优势，常用于冷补、冷再生和低温养护工程。然而，该类材料内部孔隙较多，胶结体系由水泥水化产物、乳化沥青膜和矿料界面共同构成，在盐冻循环作用下更容易发生水分侵入、界面弱化和微裂纹扩展等问题，其耐久性需要进一步明确[2,3]。

在寒冷地区，盐冻作用通常是指氯化钠等融雪盐溶液与冻融循环共同作用于路面材料的过程[4]。与传统热拌沥青混合料相比，水泥乳化沥青混合料的损伤不仅包括沥青胶膜与矿料界面的黏附衰退，还涉及水泥水化产物的孔隙结构、乳化沥青破乳成膜质量以及水泥-沥青复合胶浆的整体完整性。盐水通过降低溶液冰点、增强渗透迁移能力并引入氯离子侵蚀作用，使材料在反复冻结和融化过程中产生更复杂的物理-化学损伤[5,6]。

已有研究表明，盐冻循环会加速路面材料的性能衰减，主要表现为承载能力降低、低温变形能力下降和水稳定性劣化[7-9]。对于水泥乳化沥青混合料而言，水泥水化产物提供骨架支撑和早期强度，乳化沥青则改善柔韧性和界面黏结。当盐水不断进入孔隙和界面区后，冰胀压力会诱发微裂纹，盐分迁移会削弱复合胶浆与矿料之间的黏结，二者叠加将导致混合料由局部界面损伤逐步发展为整体结构损伤。

基于此，本文以水泥乳化沥青混合料为研究对象，设置清水和 15% NaCl 盐溶液两种冻融介质，研究不同冻融循环次数下混合料高温车辙性能、低温弯曲性能和冻融劈裂性能的变化规律，并结合材料组成特征讨论其盐冻损伤机理。研究结果旨在为水泥乳化沥青混合料在寒冷地区道路养护、冷再生基层及低温施工场景中的耐久性设计提供依据。

* 通讯作者　**Corresponding author**：赵松，zsnefu0719@163.com

收稿日期：2026-07-21；　**录用日期**：2026-07-26；　**发表日期**：2026-09-28

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验中采用氯化钠配置盐溶液,用于模拟寒冷地区融雪盐环境。水泥、乳化沥青及工业氯化钠的主要技术指标见表 1～表 3。本文水泥乳化沥青混合料采用 AC-13 型连续级配,矿料选用玄武岩粗、细集料和石灰岩矿粉。乳化沥青用量为矿料总质量的 5.3%,P·O 42.5 普通硅酸盐水泥掺量为矿料总质量的 3.0%,混合料总用水量为矿料总质量的 4.5%。其中,总用水量包括乳化沥青中所含水分与拌和过程中补充的外加水,外加水量根据乳化沥青实际含水率进行扣除计算。

表 1 水泥技术指标测试结果

Table 1 Test results of cement technical specifications

测试指标	技术要求	试验结果
比表面积(m^2/kg)	≥300	356
初凝时间(min)	≥45	165
终凝时间(min)	≤600	245
安定性	合格	合格
3d 抗折强度(MPa)	≥3.5	5.2
28d 抗折强度(MPa)	≥6.5	8.4
3d 抗压强度(MPa)	≥17.0	26.8
28d 抗压强度(MPa)	≥42.5	49.6

表 2 乳化沥青主要技术指标测试结果

Table 2 Test results of main technical specifications of emulsified asphalt

测试指标	技术要求	试验结果
蒸发残留物含量(%)	≥60	62.3
1.18mm 筛上剩余物(%)	≤0.1	0.04
储存稳定性(1d,%)	≤1	0.6
蒸发残留物针入度(25℃,0.1mm)	40～100	68.5

表 3 NaCl 溶液指标测试结果

Table 3 Test results of NaCl solution specifications

测试指标	技术要求	试验结果
NaCl 含量(%)	≥98	98.6
冰点(℃)	≤-10℃	-16
水含量(%)	≤3	2.7

混合料制备时,首先将各档玄武岩集料、矿粉及水泥按照设计比例加入拌和锅中干拌 30s,使各组分初步分散均匀;随后加入外加水湿拌 30s,最后加入乳化沥青继续拌和 90s,直至混合料均匀且无明显结团。马歇尔试件采用双面分次击实方法成型,第一面击实 50 次,翻面后继续击实 25 次。车辙板试件采用轮碾法成型,低温小梁试件由养护完成的车辙板切割制得。所有试件成型后先在 60℃鼓风干燥箱中养护 3d,再置于室温条件下养护 1d,以促进水分蒸发、乳化沥青破乳成膜及水泥水化反应。养护结束后,选择外观完整且尺寸满足试验要求的试件开展盐冻循环处理。

2.2 试验方法

2.2.1 水泥乳化沥青混合料盐冻试验

试验采用冻融循环法对水泥乳化沥青混合料进行盐冻处理。冻融循环次数分别设置为 1、5、10、15 次,冻融介质分别为清水和 15% NaCl 溶液,以比较水分冻融与盐溶液冻融对混合料性能损伤的差异。单次冻融循环历时 40h:将成型后的水泥乳化沥青混合料试件在-20±2℃条件下冻结 16h,随后在 60℃条件下融化保温 24 ,重复上述过程直至达到设定循环次数[10]。若试验过程中溶液出现明显损耗,则补充相同浓度的 NaCl 溶液,以保持介质浓度和液面高度基本稳定。达到规定循环次数后,取出试件并擦除表面浮水,在规定温度下调节后开展性能试验。每种冻融介质和循环次数下设置 3 个平行试件,试验结果以平均值±标准差表示,图 1-图 3 中的误差线均代表标准差。

2.2.2 高温性能试验

采用车辙试验评价水泥乳化沥青混合料经盐冻循环后的高温抗变形能力。以动稳定度 DS 表征混合料抵抗车辙变形的能力,计算方法如公式(1)所示。

$$DS=\frac{(t_2-t_1)\times N\times C_1\times C_2}{d_2-d_1} \tag{1}$$

式中:DS—动稳定度(次/mm);t_1—试验进行的 45min;d_1—t_1 时刻的混合料车辙深度(mm);t_2—试验进行的 60min;d_2—t_2 时刻的混合料车辙深度(mm);N—轮碾的碾压速度(42 次/min);C_1 和

C_2—常数参数，本文取值 1。

2.2.3　低温性能试验

采用低温弯曲破坏试验评价水泥乳化沥青混合料的低温抗裂能力。通过测定小梁试件破坏时的最大弯拉应变，反映材料在低温条件下抵抗拉伸开裂和变形破坏的能力，计算方法如公式(2)所示。

$$\varepsilon_b = \frac{6 \times h \times d}{L^2} \tag{2}$$

式中：ε_b—最大弯拉应变($\mu\varepsilon$)；L—混合料试件跨径(mm)；h，b—混合料试件高度和宽度(mm)。

2.2.4　水稳定性试验

本文采用冻融劈裂法评价沥青混合料的水稳定性。按照式(3)～式(5)计算沥青混合料的劈裂强度及劈裂强度比。

$$R_{T1} = \frac{0.00628 \times h_1}{P_{T1}} \tag{3}$$

$$R_{Tn} = \frac{0.00628 \times h_n}{P_{Tn}} \tag{4}$$

$$TSR_n = \frac{RT_n}{RT_1} \times 100\% \tag{5}$$

式中：R_{Tn}—第 n 组试件冻融循环后的劈裂强度(MPa)；R_{T1}—未冻融循环试件的劈裂强度(MPa)；TSR_n—盐冻循环 n 次后试件的劈裂抗拉强度比(%)。

3　结果与讨论

3.1　车辙试验结果

选用 15% NaCl 融雪盐溶液和清水对水泥乳化沥青混合料进行冻融循环处理，处理后的车辙试验结果如图 1 所示。

由图 1 可知，清水冻融循环后，水泥乳化沥青混合料的动稳定度随循环次数增加而逐渐降低，由 1 次冻融后的 8251 次/mm 降至 15 次冻融后的 5966 次/mm，降幅为 2285 次/mm，降幅约为 27.7%。在 15% NaCl 盐溶液冻融条件下，动稳定度由 7651 次/mm 降至 4866 次/mm，降幅为 2785 次/mm，降幅约为 36.4%。这说明冻融循环会持续削弱混合料的高温抗变形能力，而盐溶液会进一步放大这种损伤效应。

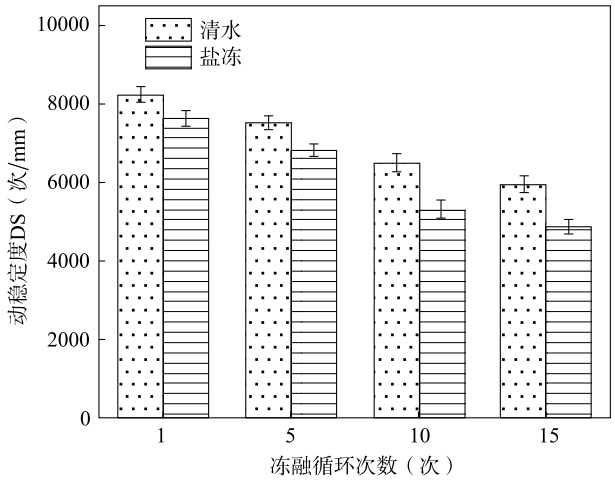

图 1　冻融循环后水泥乳化沥青混合料高温车辙试验结果

Fig. 1　High-temperature rutting test results of cement emulsified asphalt mixtures after freeze-thaw cycles

从材料组成看，水泥乳化沥青混合料的高温稳定性主要依赖矿料骨架嵌挤、水泥水化产物支撑以及乳化沥青膜的黏结作用。清水冻融循环中，孔隙水反复冻结和融化会诱发局部微裂纹，使复合胶浆与矿料界面的约束能力下降。盐溶液冻融循环中，盐水具有更强的渗透迁移能力，并会在孔隙和界面区形成盐分累积，使水泥水化产物与沥青膜之间的协同黏结受到削弱，因此车辙变形抵抗能力下降更加明显。

总体而言，水泥乳化沥青混合料动稳定度随冻融循环次数增加呈连续衰退趋势，且盐冻条件下的衰退速率高于清水冻融条件。这表明在寒冷地区应用该类材料时，仅考虑水分冻融作用仍不足以评价其耐久性，还应将融雪盐侵蚀与冻融循环的耦合效应纳入材料设计和性能评价。

3.2　小梁试验结果

选用 15% NaCl 融雪盐溶液和清水对水泥乳化沥青混合料进行冻融循环处理，处理后的低温小梁试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知，清水冻融循环下，水泥乳化沥青混合料的最大弯拉应变由 1 次冻融后的 3412$\mu\varepsilon$ 降至 15 次冻融后的 2133$\mu\varepsilon$，下降 1279$\mu\varepsilon$，降幅约为 37.5%。盐溶液冻融条件下，最大弯拉应变由 3251$\mu\varepsilon$ 降至 1766$\mu\varepsilon$，下降 1485$\mu\varepsilon$，降幅约为

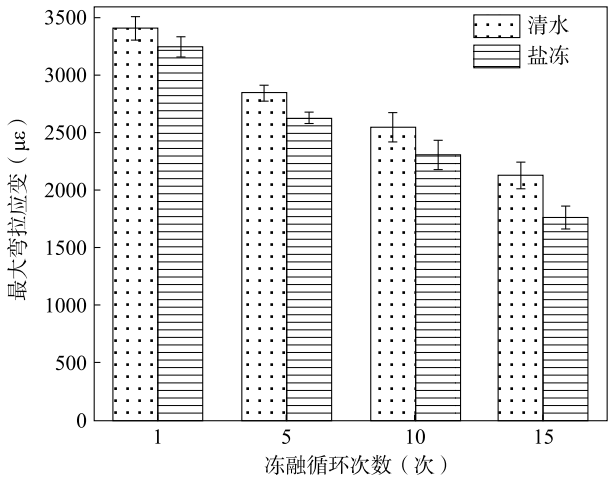

图 2 冻融循环后水泥乳化沥青混合料低温小梁试验结果

Fig. 2 Low-temperature beam test results of cement emulsified asphalt mixtures after freeze-thaw cycles

45.7%。与清水冻融相比,盐冻作用使混合料低温变形能力损失更加显著。

水泥乳化沥青混合料低温性能受乳化沥青膜柔韧性、水泥水化硬化程度以及界面完整性共同影响。冻融循环过程中,水分进入孔隙和微裂纹后发生冰胀,导致胶浆内部应力集中;融化阶段水分继续向界面薄弱区迁移,使裂纹进一步扩展。盐溶液会降低水的冰点并增强反复冻融过程中的渗透作用,使材料内部长期处于更复杂的湿冷损伤状态,从而降低最大弯拉应变。

需要指出的是,水泥的加入虽然有利于提高早期强度和整体刚度,但过度的冻融损伤会破坏水泥水化产物与沥青膜之间的复合结构,使混合料由韧性变形逐步转向脆性开裂。因此,随着冻融循环次数增加,水泥乳化沥青混合料的低温抗裂能力逐渐衰退;在盐冻条件下,这种衰退更为明显。

清水冻融循环主要通过水分相变产生的体积膨胀和收缩作用诱发微裂纹扩展;盐溶液冻融则在此基础上叠加盐分渗透、界面侵蚀和孔隙盐析等影响,使复合胶浆结构更加松散,界面黏结更加脆弱。因此,盐冻环境是导致水泥乳化沥青混合料低温抗裂性能快速降低的重要外部因素。

3.3 劈裂试验结果

对盐冻循环后的马歇尔试件进行劈裂试验,劈裂强度及劈裂强度比结果如图 3 所示。

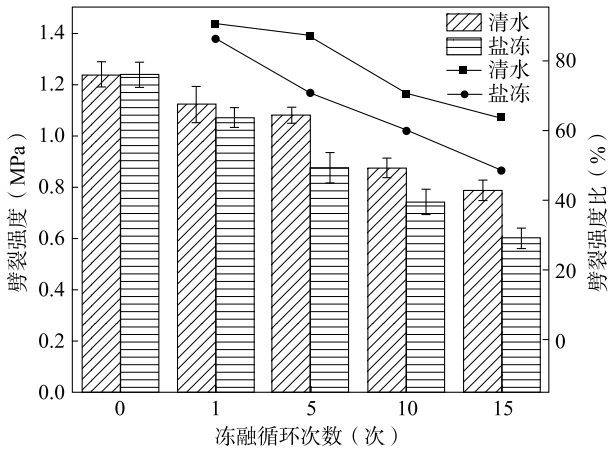

图 3 冻融循环后水泥乳化沥青混合料劈裂试验结果

Fig. 3 Splitting test results of cement emulsified asphalt mixtures after freeze-thaw cycles

由图 3 可知,清水冻融循环下,水泥乳化沥青混合料的劈裂强度比随循环次数增加而降低,由 1 次冻融后的 90.49%降至 15 次冻融后的 63.49%,下降 26.99 个百分点。盐溶液冻融条件下,劈裂强度比由 86.38%降至 48.43%,下降 37.95 个百分点。相比清水冻融,盐冻循环后劈裂强度比下降更快,表明盐溶液对混合料水稳定性和抗裂能力具有更强的削弱作用。

劈裂强度比反映了冻融后混合料内部胶结结构的保持能力。对于水泥乳化沥青混合料而言,水泥水化产物形成的无机骨架与乳化沥青成膜形成的有机黏结共同承担荷载。冻融循环会破坏两类胶结相之间的协同作用,使复合胶浆与矿料界面出现脱黏、微裂纹和局部松散。盐溶液进一步加剧水分迁移和界面侵蚀,使劈裂强度比下降幅度明显增大。

3.4 衰变机理讨论

3.4.1 清水冻融循环的衰变机理

在清水冻融循环下,水泥乳化沥青混合料的性能衰退主要与以下因素有关。

(1)水分冻融引起的孔隙胀缩与微裂纹扩展

水泥乳化沥青混合料内部存在一定孔隙,水分进入孔隙和界面薄弱区后,在低温下冻结膨胀,在升温后融化收缩。反复冻融会使孔壁、复合胶浆和矿料界面承受周期性拉压扰动,导致原有微裂纹不

断扩展并相互贯通。随着循环次数增加，材料内部结构完整性下降，高温抗变形能力、低温抗裂能力和劈裂强度比均随之衰减。

(2)水泥-乳化沥青复合胶浆与矿料界面的损伤

冻融循环不仅影响乳化沥青膜的黏结状态，也会削弱水泥水化产物与矿料之间的界面约束。水分在界面区反复迁移和相变，使复合胶浆与矿料之间产生局部脱黏，进而降低荷载传递效率。对于水泥乳化沥青混合料而言，界面损伤会同时削弱无机水化结构和有机沥青膜的协同作用，是造成路用性能持续下降的重要原因。

3.4.2 盐溶液冻融循环的衰变机理

在盐溶液冻融循环下，水泥乳化沥青混合料的衰退机理比清水冻融更加复杂，主要表现为盐分侵蚀、渗透迁移和冻融损伤的耦合叠加。

(1)盐分侵蚀与界面弱化效应

NaCl 溶液可随水分进入混合料孔隙、微裂纹及复合胶浆-矿料界面。从宏观性能变化推测，盐分迁移可能改变局部孔隙液环境，并对水泥水化产物、乳化沥青膜及矿料之间的界面黏结产生不利影响。在反复冻融过程中，上述作用可能促进既有微裂纹扩展，进而削弱复合胶结体系的荷载传递能力。

(2)盐溶液冻融循环的耦合叠加效应

盐溶液降低了孔隙水的冻结温度，使材料在冻结、半冻结和融化状态之间反复转化，延长了水分迁移和界面侵蚀的作用时间。同时，盐水在孔隙中反复进入和析出，会进一步扰动水泥-乳化沥青复合胶浆结构。结合路用性能的持续衰减趋势，推测盐分侵蚀、冰胀压力和界面弱化可能共同促进损伤由局部孔隙和界面区域向材料内部扩展。但由于本文未开展微观结构表征，上述机理仍需进一步试验验证。

4 结论

(1)清水和 15% NaCl 盐溶液冻融循环均会导致水泥乳化沥青混合料动稳定度下降，说明冻融作用会削弱混合料的高温抗车辙能力。与清水冻融相比，盐溶液冻融下动稳定度降幅更大，表明盐分侵蚀与冻融循环耦合作用会进一步破坏水泥-乳化沥青复合胶结体系和矿料界面结构。

(2)随着冻融循环次数增加，水泥乳化沥青混合料最大弯拉应变持续降低，低温抗裂能力逐渐衰退。盐冻条件下最大弯拉应变下降幅度高于清水冻融条件，说明盐溶液渗透、冰胀压力和界面弱化会促进微裂纹扩展，使材料脆性增强。

(3)水泥乳化沥青混合料劈裂强度比随冻融循环次数增加而降低，盐溶液冻融条件下衰退更为显著。劈裂性能的下降表明混合料水稳定性和抗裂能力受到持续削弱，其主要原因在于孔隙水迁移、盐分侵蚀、水泥水化产物松散化以及乳化沥青膜-矿料界面脱黏的共同作用。

5 研究局限性与未来工作

本文主要基于动稳定度、最大弯拉应变和劈裂强度比等宏观指标分析水泥乳化沥青混合料在清水冻融及盐冻循环下的性能衰减规律。关于盐分迁移、水泥水化产物变化、孔隙结构演化以及乳化沥青膜-矿料界面损伤的讨论主要依据宏观试验结果和已有理论进行推测，尚缺少直接的微观试验证据。后续研究可采用扫描电子显微镜及能谱分析观察界面形貌和元素迁移特征，采用 X 射线衍射分析水泥水化产物及其晶相变化，并结合工业 CT 定量表征孔隙率、裂纹数量和裂纹连通性的演化，从而进一步建立微观结构损伤与宏观路用性能衰减之间的联系。此外，还可考虑不同盐浓度、冻结温度及冻融制度对试验结果的影响，以提高研究结论对实际服役环境的适用性。

利益冲突：作者声明没有利益冲突。

参考文献(References)

[1] 巴兴强，王晓辉，荆超. 寒地高速公路事故应急交通组织方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2019，43(4)：585-589.
https://doi.org/10.3963/j.issn.2095-3844.2019.04.003

[2] 宋云连，高盼，蒋宇. 盐冻条件下沥青混合料低温性能研究[J]. 中外公路，2023，43(4)：230-235.
https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.037.

[3] Cui Y，Chen Q，Li M，et al. Study on low temperature crack resistance of warm-mixed recycled SBS modified asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materi-

als,2023,409:134120.

[4] Feng B, Wang H, Li S, et al. The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: A review[J]. Construction and Building Materials,2022,315:125749.

[5] 于保阳,章林,王浩. 冻融-盐腐蚀耦合作用下 OGFC 水稳定性研究[J]. 公路,2024,69(12):72-78.

[6] 董朔,邢墨非,王欣悦. 混凝土耐久性能优化方法研究进展[J]. 工程材料与结构,2026,5(1):33-51.

[7] Wang R,Zhang Q,Li Y. Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze-thaw cycles and other actions:A review[J]. Construction and Building Materials,2022,319:126045.

[8] 谭忆秋,徐慧宁,赵春丽,等. 冻融循环下沥青混合料损伤特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(05):778-788.
https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2024.05.02

[9] 姜博. 含盐高湿环境下复合纤维沥青混合料路用性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.

[10] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

Study on the Performance Deterioration Law of Cement Emulsified Asphalt Mixtures under Salt-Freeze-Thaw Action

ZHAO Song[1,*], SU Dan[2]

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Liaoning Hecheng Construction Project Consulting Management Co., Ltd., Panjin 124100, China)

Abstract: To clarify the durability degradation characteristics of cement emulsified asphalt mixtures under cold and de-icing salt environments, this study subjects cement emulsified asphalt mixtures to free-thaw cycles in both water and 15% NaCl solution, and systematically analyzes the effects of different freeze-thaw cycle counts on their high-temperature stability, low-temperature crack resistance, and water stability. The results show that freeze-thaw cycles continuously weaken the road performance of cement emulsified asphalt mixtures, and the degree of deterioration caused by salt-solution freeze-thaw is significantly higher than that caused by water freeze-thaw. As the cycle counts increase from 1 to 15, the dynamic stability, maximum flexural strain, and splitting strength ratio all decrease to varying degrees, indicating that moisture migration, ice expansion pressure, salt erosion, and the weakening of the interface between cement hydration products and the emulsified asphalt film collectively accelerate the internal structural deterioration of the mixtures. The findings can provide a reference for the material design and durability evaluation of cement emulsified asphalt mixtures in cold regions and under de-icing salt environments.

Keywords: Cement emulsified asphalt mixture; salt freezing; freeze-thaw cycle; water stability; deterioration characteristics

DOI: 10.48014/ems.20260721015

Citation: ZHAO Song, SU Dan. Study on the Performance Deterioration Law of Cement Emulsified Asphalt Mixtures Under Salt-Freeze-Thaw Action[J]. Engineering Materials and Structures, 2026, 5(3): 140-146.

Copyright © 2026 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).