

抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层路用性能与应用

张 蓓^{1,2,3}, 杨 荷^{1,2,3}, 郝梅美^{1,2,3}, 钟燕辉^{1,2,3}, 付邵炜⁴, 王圣喆⁵

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 地下基础设施非开挖技术国际联合研究中心, 河南 郑州 450001; 4. 比亚迪股份有限公司, 广东 深圳 518118; 5. 河南九一环保科技股份有限公司, 河南 荥阳 450045)

摘 要: 为了提升冬季冷拌沥青路面的融雪除冰性能, 对冷拌沥青超薄耐磨层的机械性能和抗凝冰性能进行研究, 提出以缓释型抗凝冰颗粒等体积替代 3~5 mm 碎石, 制备抗凝冰型冷拌沥青超薄耐磨层, 并系统开展其路用性能评价与融冰率预测模型研究。试验结果表明: 抗凝冰颗粒的掺量(质量分数, 下同)不超过 4% 时, 混合料的高温稳定性、低温抗裂性能和水稳定性均满足规范要求, 2% 掺量下动稳定度达到最大值 5 583.31 次/mm。融冰率与抗凝冰颗粒掺量呈非线性关系, 掺量 3% 时融冰率达 23.4%, 较低的掺量提升显著, 满足规范要求。构建了考虑掺量和温度双因素的融冰率预测模型, 拟合优度 $R^2 > 0.93$, 能有效指导路面抗凝冰材料的配比设计。

关键词: 抗凝冰; 冷拌沥青; 超薄耐磨层; 路用性能; 融冰效果; 道路养护

中图分类号: U414, U416.217

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.04.016

沥青超薄耐磨层作为路面预防性养护的关键技术^[1-2], 因其能够在达到路面同等使用性能的前提下, 将厚度降至传统沥青罩面层厚度的 1/3~1/2^[3], 显著降低路面养护成本, 有效解决沥青路面浅层裂缝、集料松散及抗滑衰减等病害, 在中国公路养护中得到广泛应用。然而, 传统热拌超薄耐磨层存在能耗高、排放高等问题, 难以满足“双碳”战略下绿色交通发展需求^[4-5]。因此, 冷拌超薄耐磨层技术应运而生, 其常温施工、低碳环保的特点完全契合可持续发展要求。但中国北方寒区冬季路面积雪结冰严重, 显著降低行车安全性^[6-7], 冷拌超薄耐磨层在抗凝冰能力方面^[8]仍存在不足, 亟需技术突破。

抗凝冰沥青路面起源于二十世纪 60 年代瑞士和德国, 70 年代被日本引进改良, 迄今被广泛铺筑^[9]。国外抗凝冰路面技术研究起步较早^[10], 主要集中在自融雪材料开发^[11-12]和工程应用方面。Giuliani 等^[13]针对氯化钠防冻填料, 控制混合料温度湿度, 初步评价其有效性和耐久性。Nilssen 等^[14]

采用量热法进行高精度温控, 定量分析抗凝冰材料的融雪抑冰效果。中国抗凝冰路面技术研究虽然起步较晚, 但发展迅速, 主要集中在储能、融冰材料^[15]和性能评价^[16-17]方面, 呈现出鲜明的本土化特色^[18-19]。Liu 等^[20]开发一种缓释型融雪抑冰骨料, 5 g 缓释储盐融雪骨料在 -5 °C 温度下的融冰量为 0.9 g, 融雪性能优良。He 等^[15]通过新型溶胶-凝胶吸附法制备缓释融雪材料, NaCl 含量可高达 70%。Meng 等^[21]设计具有核膜结构的环保防结冰填料, 3% 防冰填料可保证两年以上的有效防冰周期。Meng 等^[22]开发的环保型除冰填料表现出良好的沥青相容性, 但水稳定性较差。Xu 等^[23]创新性地将抗凝冰材料包裹在钢渣骨料表面, 表现出良好的长期耐久性、融雪性能和经济效益。

综合以上分析发现, 现有研究主要集中在热拌技术体系(120~160 °C), 冷拌抗凝冰技术(80 °C 以下)的研究相对薄弱, 且缺乏系统的预测模型, 制约了该技术的推广应用。

收稿日期: 2026-03-02; **修订日期:** 2026-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52478477); 河南省自然科学基金交叉学科创新研究群体项目(252300421827)

作者简介: 张蓓(1968—), 女, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事交通及岩土基础工程安全防护理论与技术研究, E-mail: beizhang@zzu.edu.cn。

通信作者: 郝梅美(1988—), 女, 河南林州人, 郑州大学副研究员, 博士, 主要从事水利与交通基础设施安全防护理论与技术研究, E-mail: mmhao@zzu.edu.cn。

冷拌抗凝冰技术面临以下关键科学问题:抗凝冰功能与路用性能之间存在内在矛盾,如何在保证融冰效果的同时维持高温稳定性、水稳定性等关键指标仍是技术难点;融冰率评价方法有待完善,现行融冰率试验方法在试件尺寸、试验条件等方面难以准确反映实际工况;缺乏系统的性能衰减规律和预测模型。这些问题的存在严重制约了冷拌抗凝冰技术的发展和工程应用。

基于此,本文创新性地将抗凝冰技术与冷拌超薄耐磨层相结合,采用等体积替代法^[24]制备抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层,系统评价路用性能,并建立融冰率预测模型,为寒区绿色道路养护技术发展提供理论依据和技术支撑。

1 试验材料和方法

1.1 原材料

本文采用课题组自主研发的复合改性冷拌沥青结合料^[25],该材料主要成分为 70#基质沥青、冷拌液和环氧树脂^[26],质量比例为 10:1:1。集料选用玄武岩碎石、玄武岩机制砂和石灰岩矿粉。抗凝冰外加剂选用市售某缓释型抗凝冰颗粒(简称抗凝冰料),通过高分子的合金复合包裹技术加工,具有长效缓释特性,呈黑色颗粒状,技术指标见表 1。该材料包裹吸附的氯盐成分^[27]在冰雪天气下遇水形成盐溶液,在行车荷载和毛细作用下逐步迁移至路表^[28],有效降低路表冰雪冰点^[29-30],实现持续融冰防冻效果。

表 1 抗凝冰料技术指标

Table 1 Technical indicators of anti-icing material		
技术指标	技术要求	测试结果
公称最大粒径/mm	≤5.0	符合
氯离子含量/%	≥35.0	39.4
相对密度	≥1.7	2.2
含水率/%	≤2.0	0.4
外观	色泽均匀,无杂质、结团及油污	符合

1.2 试件制备

基于悬浮密实结构理论,采用 AC-10 连续式密级配进行混合料设计,级配设计见表 2,通过马歇尔

表 2 AC-10 级配

Table 2 AC-10 gradation		通过质量百分率/%								
级配类型	筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-10	级配上限	100	100	75	58	44	32	23	16	8
	级配下限	100	90	45	30	20	13	9	6	4
	设计级配	100	95	55	30	23	13	9	6	4

试验确定混合料最佳油石比为 5.3%。根据中国现行规范 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[31]的要求,抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层的厚度设计为 25 mm,养生条件为 110 ℃烘箱养生 24 h。所有试件均依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[32]的相应尺寸进行制备,试验试件与相关仪器见图 1。

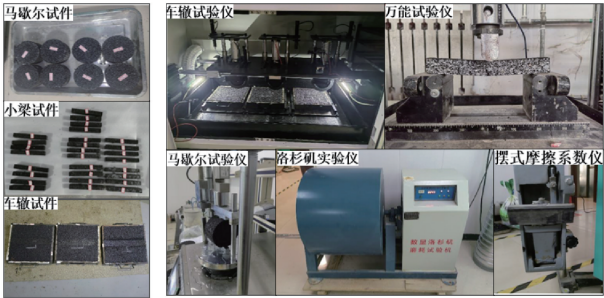


图 1 试验试件与试验仪器

Figure 1 Test specimens and test instruments

1.3 试验设计

由于抗凝冰料与集料之间密度存在较大差异,本文为弱化体积变化影响,采用等体积替代法替换 3~5 mm 粒径的玄武岩碎石,替代计算公式^[9]如下所示:

$$m_1 = \frac{\rho_1 \times m_2}{\rho_2} \tag{1}$$

式中: m_1 、 ρ_1 分别为抗凝冰材料的质量和密度, g、g/cm³; m_2 、 ρ_2 分别为被替换集料的质量和密度, g、g/cm³。

本文为模拟真实路面状况,借鉴 JT/T 1210.2—2018《公路沥青混合料用融冰雪材料 第 2 部分:盐化物材料》^[33]规范中马歇尔试件融冰性能评价方法,针对马歇尔试件厚度较大和融冰时间较短等不足,进行了系统改进如下所示。

- (1) 试件类型优化:标准马歇尔试件改为 100 mm×100 mm×25 mm 试件。
- (2) 覆冰方式改进:试件表面划分为 9 个区域,4 个角落区域作为覆冰区。
- (3) 试验条件扩展:3 个温度梯度(0 ℃、-5 ℃、-10 ℃),保温时间设为 2,4,6,8 h。

(4)覆冰质量统一:覆冰质量由 40 g 增至 50 g, 确保试件与冰接触面积一致。

为系统评估抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层的融冰特性与最佳掺量(质量分数,下同),抗凝冰料梯度掺量方案设计为对照组 0(C-0)、2%(C-2)、3%(C-3)、4%(C-4)、6%(C-6)5 个掺量等级。将抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层试件置于环境模拟箱中,精准调控环境模拟箱内部温度和保温时间,每间隔 2 h 进行一次融冰率试验,试验仪器与试件如图 2 所示。融冰率计算公式^[33]如下所示:

$$\sigma = \frac{M - m}{M} \quad (2)$$

式中: σ 为融冰率,%; M 为保温前冰块初始质量,g; m 为保温融冰后冰块残留质量,g。

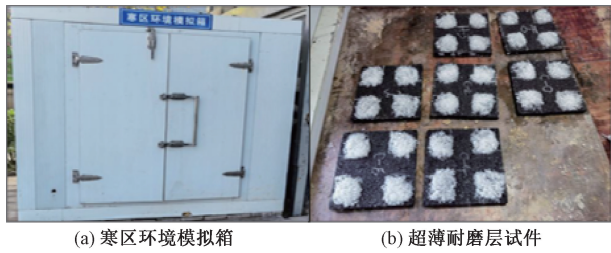


图 2 融冰率试验仪器与试件
Figure 2 Ice melting rate test instruments and specimens

2 结果与讨论

2.1 路用性能研究

2.1.1 力学性能分析

(1)高温稳定性。图 3(a)为不同抗凝冰料掺

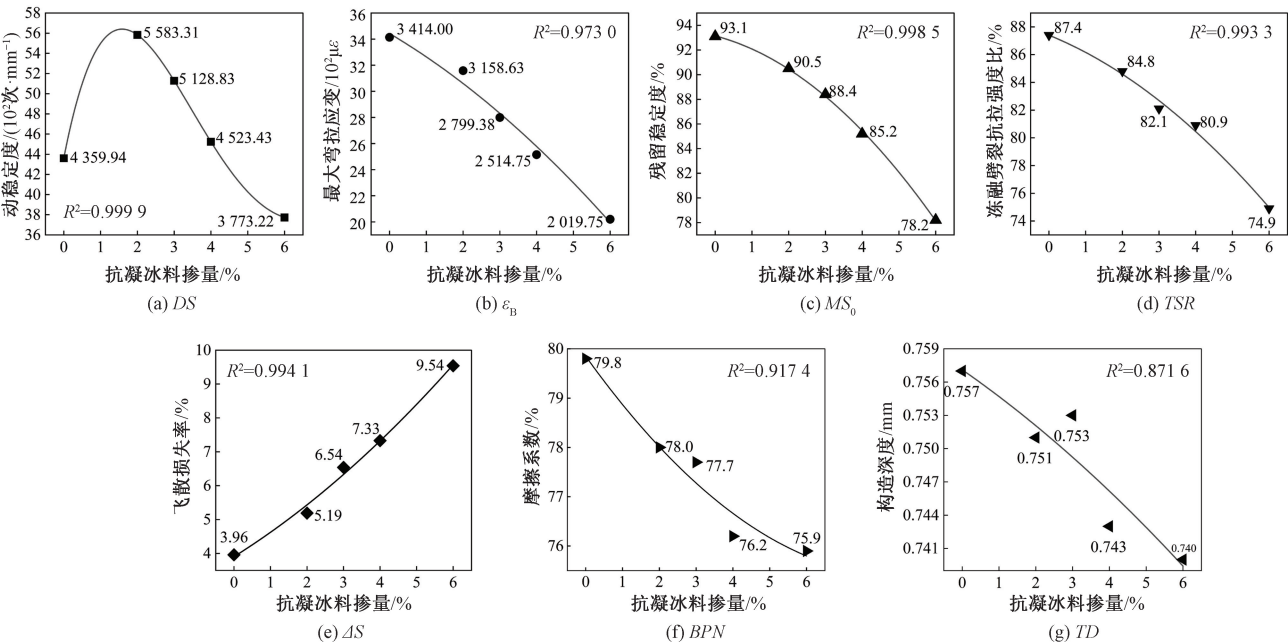


图 3 不同抗凝冰料掺量下路用性能变化规律
Figure 3 Variation of pavement performance with dosage of anti-icing material

(MS_0)和冻融劈裂抗拉强度比(TSR)。抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层的残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比随掺量增加基本呈线性下降趋势。抗凝冰料的融冰机理是通过释放材料中的融雪成分在路面形成盐溶液,有效降低冰点,融化积雪。浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验在养护过程中的长时间水浴会导致融雪成分持续析出,增大试件空隙率并削弱内摩阻力,最终造成水稳定性随掺量增加而下降。

(2)飞散稳定性。图3(e)为不同抗凝冰料掺量下冷拌沥青超薄耐磨层的飞散损失率(ΔS)。随着抗凝冰料含量的提高,抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层的飞散损失率呈上升趋势,而其抗飞散性能则相应降低。这是由于抗凝冰料-冷拌沥青界面黏结力及内摩阻力均弱于集料-冷拌沥青界面,随抗凝冰料掺量的增加,内部力学联结被削弱,导致集料更易脱离,飞散损失加剧。

2.1.3 抗滑性能分析

图3(f)和图3(g)为不同抗凝冰料掺量下冷拌沥青超薄耐磨层的摩擦系数(BPN)和构造深度(TD)。随着抗凝冰料含量的增多,抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层的构造深度和摩擦系数呈现逐渐降低的趋势。主要原因在于本文所用抗凝冰料粒径处于3~5 mm,但是粒径多数趋于3 mm,级配偏细,抗凝冰料占比增加会导致混合料级配细化^[34],相同制备工艺下压实度增大,路表粗糙度降低^[35-36],引起构造深度、摩擦系数逐渐减小,即表面抗滑性能削弱。

依据JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[37]的要求,动稳定度应大于3 000次·mm⁻¹,最大弯拉应变应大于2 500 $\mu\epsilon$,马歇尔残留稳定度应大于85%,冻融劈裂抗拉强度比应大于80%,飞散损失率应小于10%,构造深度应大于0.55 mm,摩擦系数应大于55。因此,抗凝冰料掺量应不大于4%。

2.2 融冰率研究

2.2.1 融冰率影响规律

(1)温度影响。由图4可知,对照组在-10℃条件下2 h和8 h的融冰率均为0;而在-5℃环境中,其融冰率分别为1.2%和4.8%,融化进程缓慢但仍具有冰雪消融能力,表明C-0试件此时的冰点在-10~-5℃。C-2试件在-10℃下2 h、8 h的融冰率分别为13.2%、26.8%,较-10℃下C-0试件的融冰率有大幅度提升,表明掺入抗凝冰材料能有效降低路表的冻结温度至-10℃以下,从而显著增强其融

雪除冰能力。

此外,除对照组外,融冰时间为2 h和8 h,温度区间为-10℃~-5℃时融冰率增量总是小于温度区间在-5℃~0℃的融冰率增量,这验证了环境温度与融冰速率的正相关性:温度升高会显著提升耐磨层抗滑材料的融雪速度。

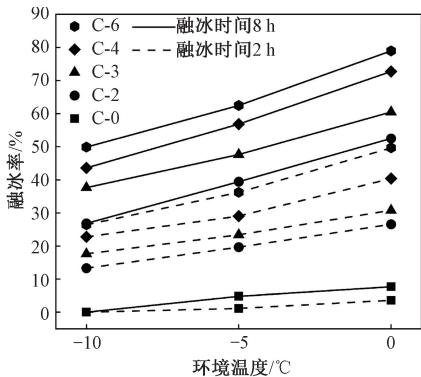


图4 融冰率随环境温度的变化

Figure 4 Variation of ice-melting rate with environmental temperature

(2)抗凝冰料掺量影响。图5为在-5℃恒温条件下,融冰率在融冰时间0~8 h的变化规律。随着抗凝冰料含量的提升,抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层融冰率呈现显著增长趋势。这源于抗凝冰料能够有效降低耐磨层的结冰温度,当含量达到2%时,路表冰点可降至-10℃以下,从而显著增强融雪除冰能力。且随着掺量的持续增加,单位掺量对应的融冰速率基本上呈现递减趋势。因此,从经济性与效率角度考虑,抗凝冰料的掺量存在一个合理上限。

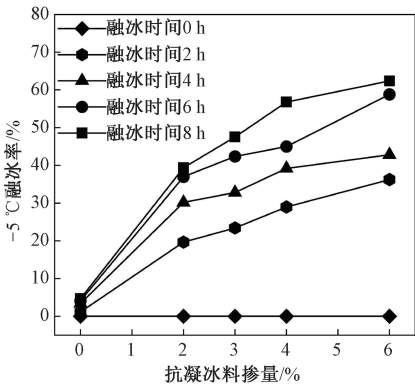


图5 不同抗凝冰料掺量的融冰率

Figure 5 Ice-melting rate with different dosages of anti-icing materials

5种不同掺量的试件融冰2 h的融冰率分别为1.2%、19.6%、23.4%、29%、36.2%,8 h时融冰率为4.6%、39.3%、47.5%、56.7%、62.3%。可以看出,除C-0对照组外,抗凝冰冷拌超薄耐磨层混合料在

初始 2 h 内的融冰率即可达到其 8 h 融冰性能的约 50%。这表明短期融冰效果与长期效果之间存在良好的相关性。

依据行业规范^[33]对融冰材料的技术要求, -5℃下融冰 2 h 的融冰率应不低于 20%。C-0、C-2 试件未能满足规范要求, 因此实际工程抗凝冰料掺量应大于 2%。

2.2.2 融冰率预测模型

基于 2.2.1 节抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层融冰率的变化特征, 本文选取环境温度和抗凝冰料掺量作为关键变量, 进行多元线性回归拟合, 构建了该材料的融冰性能预测模型。以规范^[33]要求的 2 h 测试时长为前提条件, 2 h 抗凝冰冷拌超薄耐磨层融冰率预测模型图如图 6 所示。

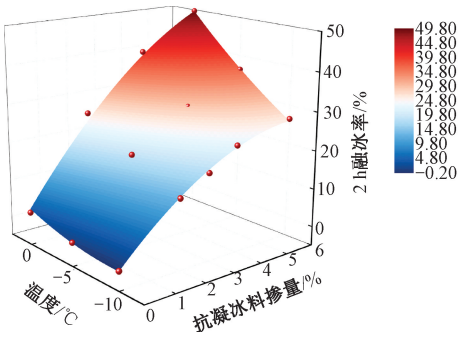


图 6 抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层融冰率预测模型图
Figure 6 Prediction model diagram of ice-melting rate for the anti-icing cold-mixed asphalt ultra-thin wear-resistant layer

抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层融冰率预测模型如公式 3 所示:

$$Y = 4.58 + 11.24X + 0.96T - 0.62X^2 + 0.05T^2 + 0.32X \cdot T. \quad (3)$$

式中: X 为抗凝冰料掺量, %; Y 为融冰率, %; T 为融冰温度, °C。

该模型整体揭示了材料掺量与温度的非线性相互作用机制。未添加抗凝冰料且温度为 0℃ 时, 融冰 2 h 的理论融冰率为 4.58%。融冰率随掺量和温度的增加而提高, 但掺量的促进作用呈边际递减趋势, 而温度的促进作用则呈边际递增趋势; 同时, 掺量与温度之间存在协同增强效应, 即温度越高, 掺量对融冰率的提升效果越明显, 预测模型的 R^2 为 0.97, $RMSE$ 为 1.25%。为满足路用性能规范要求, 抗凝冰料掺量应不大于 4%。同时, 为满足融冰率规范要求, 掺量需大于 2%, 因此, C-0 与 C-6 试件超出了有效掺量范围, 不再进行后续验证。融冰率影响规律表明, 除 C-0 对照组外, 抗凝

冰冷拌沥青超薄耐磨层在初始 2 h 的融冰率约为 8 h 融冰率的 50%, 由此可用 8 h 融冰率结果对 2 h 融冰率预测模型进行验证。对比结果如图 7 所示, 8 h 融冰率预测的 R^2 为 0.93, $RMSE$ 为 3.33%, 精度优异。

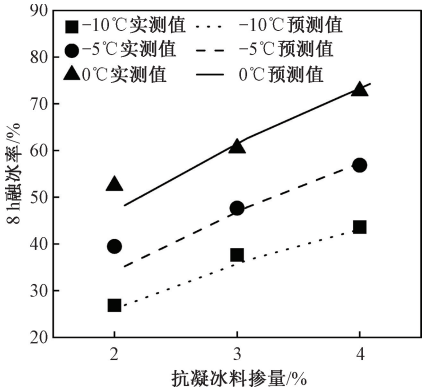


图 7 8 h 抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层融冰率对比
Figure 7 Comparison of 8-hour ice-melting rate for the anti-icing cold-mixed asphalt ultra-thin wear-resistant layer

3 工程实例

综合考虑上述路用性能测试结果和融冰效果, 抗凝冰料掺量应选在 2%~4%, 推荐使用 3% 抗凝冰料掺量作为工程应用的标准配比。该配比在确保融冰效果的前提下, 所有测试指标均符合现行技术标准的规定要求, 为寒区道路养护提供了可靠的技术方案。

本文选用 AC-10 级配设计的冷拌沥青混合料, 添加 3% 抗凝冰料, 在郑州至荥阳的某国道实施试验性铺筑, 如图 8 所示。考虑到建设规模, 抗凝冰冷拌沥青混合料拌和方式选择为厂拌, 运用专门输送设备将其运达施工场地。此试验段采取同步摊铺工艺, 首先对路面进行洗刨处理, 在铺筑混凝土同时喷洒高粘乳化沥青粘层油, 以防止混合料暴露在空气中受到污染或性能下降, 在路面碾压和养护完成后, 现场测试其路用性能, 融冰性能则取用现场混合料在室内同步进行, 试验对比结果见表 3。



图 8 路面摊铺与碾压
Figure 8 Pavement spreading and rolling

表 3 试验段性能检测结果				
Table 3 Test results of the test section				
检测指标	评价方法	实测值	试验值	规范要求
高温稳定性	JTG E20—2011 T 0719 ^[32]	4 762/(次·mm ⁻¹)	5 128/(次·mm ⁻¹)	≥3 000/(次·mm ⁻¹)
低温稳定性	JTG E20—2011 T 0715 ^[32]	2 843/με	2 799/με	≥2 500/με
水稳定性	JTG E20—2011 T 0709 ^[32]	87.1/%	88.4/%	≥85/%
	JTG E20—2011 T 0729 ^[32]	82.4/%	82.1/%	≥80/%
飞散稳定性	JTG E20—2011 T 0733 ^[32]	6.82/%	6.54/%	≤10/%
抗滑性	JTG 5142—2019 T 0962 ^[38]	76.4/mm	77.7/mm	≥55/mm
	JTG 5142—2019 T 0964 ^[38]	0.903/%	0.753/%	≥0.555/%
融冰率	JT/T 1210.2—2018 ^[33]	23.1/%	24.3/%	≥20/%

4 结论

本文研制了一种新型环境友好型抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层材料,通过系统测试评估了该材料的道路工程特性与除冰效能,结论如下。

(1)当抗凝冰料掺配比例控制在4%以内时,所研发的抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层材料展现出优异的路用性能,其各项技术指标均达到规范^[31]规定值:动稳定度大于3 000次/mm,最大弯拉应变大于2 500 με,马歇尔残留稳定度大于85%,冻融循环劈裂抗拉强度比大于80%,飞散损失率小于10%,构造深度大于0.55 mm,摩擦系数大于55。

(2)随着环境温度的升高和抗凝冰料掺量的增加,冷拌沥青超薄耐磨层的融冰率显著提升;当材料中抗凝冰料添加掺量达到2%以上时,该结构层在-5℃条件下经过2 h作用即可实现不低于20%的融冰效果,满足相关技术标准的要求。

(3)本文以规范^[27]中融冰率试验融冰时间2 h为基础,基于环境温度和抗凝冰料掺量两个关键参数,构建了冷拌沥青超薄耐磨层融冰性能的预测模型,并用8 h融冰率对预测模型进行验证,2 h、8 h融冰率预测结果的R²均大于0.93,预测结果精度良好,可有效指导工程参数设计。

(4)将抗凝冰冷拌沥青超薄耐磨层应用于试验段,该试验段的结果数据验证了该技术的工程适用性,为同类工程提供了实践依据。

参考文献:

[1] Wang Duanyi, Li Yanbiao, Pan Yanzhu. Skid resistance deterioration and influencing factors of ultra-thin wear layer[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 1-9. [王端宜,李彦标,潘艳珠.超薄磨耗层抗滑性能的衰变规律及其影响因素[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(5):1-9.]

[2] Hao Yan, Hu Liquan, Cheng Gaoli, et al. Study on the thermal regulation performance of steel slag ultra-thin wearing courses combined with phase change materials: towards green and low-carbon applications[J]. Construction and Building Materials, 2025, 478: 141426.

[3] Yu Jiangmiao, Yang Nikun, Yu Huayang. Research and application status of high-performance asphalt ultra-thin wearing layer technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2287-2298. [虞将苗,杨倪坤,于华洋.道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2287-2298.]

[4] Peng Bo, Deng Hailong, Cao Shijiang, et al. Carbon emission quantification and evaluation system of hot mix asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 1-9. [彭波,邓海龙,曹世江,等.热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(3):1-9.]

[5] Zou Guilian, Chen Qi, Zhang Yuan, et al. Research on deicing performance and environmental impact of anti-freezing asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2024, 428: 136355.

[6] Du Xinguo. Study on stability of anti-freezing asphalt concrete and its application in complex mountainous areas [J]. Railway Construction Technology, 2023(3): 196-199. [杜新国.抗凝冰沥青混凝土稳定性及其在复杂山区的应用研究[J].铁道建筑技术,2023(3):196-199.]

[7] Xu Degen, Wang Xiaohu, Zang Dongdong, et al. Research on the influence of slow-release anti-freezing agent on the pavement performance of SMA-8 ultra-thin asphalt mixture[J]. Northern Communications, 2023(1): 30-33. [徐德根,王小虎,臧冬冬,等.缓释型抗凝冰剂对SMA-8超薄沥青混合料路用性能影响研究[J].北方交通,2023(1):30-33.]

[8] Sun Pei, Zhu Tianming, Wang Yiqiang, et al. Research on application of slow release anti-freezing ice filler tech-

- nology in ultra-thin wearing course project[J]. Northern Communications, 2020(12): 45–48. [孙培, 朱天明, 王义强, 等. 缓释型抗凝冰填料技术在超薄磨耗层项目中的应用研究[J]. 北方交通, 2020(12): 45–48.]
- [9] Liu Zhuangzhuang, Sha Aimin, 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. [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.]
- [10] Zhang Hongwei, Chen Lunkun, Zhang Baolong, et al. Research status and progress of anti-freezing asphalt concrete pavement at home and abroad[J]. Highway, 2011, 56(1): 135–139. [张洪伟, 陈伦坤, 张宝龙, 等. 抗冻结沥青混凝土路面国内外研究现状与进展[J]. 公路, 2011, 56(1): 135–139.]
- [11] Wu Shujuan, Zheng Mulian, Chen Wang, et al. Salt-dissolved regularity of the self-ice-melting pavement under rainfall[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 371–383.
- [12] Xia Huiyun, Zhao Xu, Wu Yongchang, et al. Preparation and performance of antifreeze adhesive materials for asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119554.
- [13] Giuliani F, Merusi F, Polacco G, et al. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 174–179.
- [14] Nilssen K, Klein-Paste A, Wählin J, et al. Use of calorimetry to measure ice-melting capacity[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2613(1): 1–7.
- [15] He Lihong, He Xinyan, Li Qinglin, et al. Preparation and characterization of NaCl/SiO₂ composites as anti-icing materials for asphalt pavement[J]. Materials Today Communications, 2025, 44: 111988.
- [16] Tan Yiqiu, Sun Rongrong, Guo Meng, et al. Research on deicing performance of asphalt mixture containing salt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 23–29. [谭忆秋, 孙嵘蓉, 郭猛, 等. 蓄盐沥青混合料除冰雪性能研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 23–29.]
- [17] Zhang Lei, Wang Haoan, Xing Chao, et al. Study on the influencing factors of mechanical properties of anti-icing modified asphalt mortar[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 223: 104218.
- [18] Zhou Shuiwen, Lin Fang, Zhang Xiaohua, et al. Influence factors of deicing and thaw performance of asphalt mixture with low freezing point[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 207–214. [周水文, 林芳, 张晓华, 等. 低冰点沥青混合料融雪抑冰性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 207–214.]
- [19] Zhang Yibo, Zhu Hongzhou, Li Jingruo, et al. Selection of phase change materials used in heat storage cooling asphalt pavement[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(3): 10–14. [张一博, 朱洪洲, 李菁若, 等. 储热降温沥青路面用相变材料的选择[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3): 10–14.]
- [20] Liu Zhenzheng, Li Bo, Yao Tengfei, et al. Optimization of slow-release salt storage snowmelt aggregate preparation process and its slow-release performance based on response surface methodology-orthogonal test[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138356.
- [21] Meng Yongjun, Meng Fujia, Chen Jing, et al. Preparation of slow-release biologically active anti-icing filler and study on the anti-icing long-lasting performance[J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135150.
- [22] Meng Yongjun, Zhang Chunyu, Chen Jing, et al. Deicing characteristics and pavement performance of eco-friendly de-icing asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129565.
- [23] Xu Peixin, Zhang Derun, LYU Huijie. Snow and ice melting performance evaluation and economic - environmental assessment of a novel steel slag - based composite phase change aggregate asphalt pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2024, 150: 04023033.
- [24] Li Hanjun, Cheng Ming, Xie Xiaoguang, et al. Mix design optimization and performance evaluation of ultra-thin wearing courses incorporating ceramic grains as aggregate[J]. Coatings, 2025, 15(2): 249.
- [25] Zhang Bei, Yin Xiaoka, Zhong Yanhui, et al. Performance analysis and viscosity modeling of emulsified cutback composite cold-mixed epoxy asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135171.
- [26] Cong Peiliang, Liu Jianfei, Zhao Zhiqiang, et al. Preparation and properties of epoxy asphalt applied for concrete bridge deck[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(6): 78–81. [丛培良, 刘建飞, 赵志强, 等. 混凝土桥面铺装用环氧沥青的制备与性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 78–81.]
- [27] Liu Zhuangzhuang, Xing Mingliang, Chen Shuanfa, et al. Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures[J]. Construction and

Building Materials, 2014, 51: 133–140.

[28] Chen Jun, Ye Haihang, Zhang Ailin, et al. Long-term releasing and migration characteristics of chloride ions in chloride-based asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2024, 446: 137962.

[29] Tan Yiqiu, Zhang Chi, Xu Huining, et al. Snow melting and deicing characteristics and pavement performance of active deicing and snow melting pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 1–17. [谭忆秋, 张驰, 徐慧宁, 等. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 1–17.]

[30] Zhang Wengang, Wang Fang, Ding Longting. Corrosion behavior of melting snow salt on asphalt mixtures [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(1): 77–81. [张文刚, 王芳, 丁龙亭. 融雪盐对沥青混合料的腐蚀作用研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(1): 77–81.]

[31] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].

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

[33] JT/T 1210.2—2018 公路沥青混合料用融冰雪材料 第2部分:盐化物材料[S].

[34] Xu Ouming, Li Yang, Wan Shuo, et al. Research and application of skid resistance of ultra-thin wearing layer [J]. Highway, 2025, 70(2): 8–13. [徐鸥明, 李杨, 万硕, 等. 超薄磨耗层抗滑性能研究与应用[J]. 公路, 2025, 70(2): 8–13.]

[35] Zong Youjie, Li Song, Zhang Jinbao, et al. Effect of aggregate type and polishing level on the long-term skid resistance of thin friction course [J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122730.

[36] Zhou Mingyu, Liu Shuguang, Wu Chaofan, et al. Study on grade design and comparative performance of ultra-thin abrasion layer based on waterborne epoxy emulsified asphalt [J]. Materials Reports, 2024, 38(24): 261–268. [周铭钰, 刘曙光, 吴超凡, 等. 基于水性环氧乳化沥青的超薄磨耗层级配设计及性能对比研究[J]. 材料导报, 2024, 38(24): 261–268.]

[37] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[38] JTG 5142—2019 公路沥青路面养护技术规范[S].

The Road Performance and Application of Anti-icing Cold-mixed Asphalt Ultra-thin Wear-resistant Layer

ZHANG Bei^{1,2,3}, YANG He^{1,2,3}, HAO Meimei^{1,2,3}, ZHONG Yanhui^{1,2,3}, FU Shaowei⁴, WANG Shengzhe⁵

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. International Joint Research Center for Trenchless Technology of Underground Infrastructure, Zhengzhou 450001, China 4. BYD Company Limited, Shenzhen 518118, China; 5. Henan Jiuyi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xingyang 450045, China)

Abstract: In order to enhance the snow melting and ice removal performance of cold-mixed asphalt pavement in winter, the mechanical properties and anti-icing performance of the ultra-thin wear-resistant layer of cold-mixed asphalt were studied. It was proposed to replace 3–5 mm crushed stones with sustained-release anti-icing particles in equal volume to prepare anti-icing cold-mixed asphalt ultra-thin wear-resistant layer. And research was systematically carried out on its road performance evaluation and ice-melting rate prediction models. The test results showed that when the dosage (mass fraction, the same below) of anti-icing particles did not exceed 4%, the high-temperature stability, low-temperature crack resistance and water stability of the mixture all met the specification requirements. At a dosage of 2%, the dynamic stability reached the maximum value of 5 583.31 times/mm. The ice-melting rate had a nonlinear relationship with the dosage of anti-icing particles, and when the dosage was 3%, the ice-melting rate reached 23.4%, and the improvement was more significant at lower dosages, meeting the specification requirements. A prediction model for the ice-melting rate considering both dosage and temperature factors was constructed, and the goodness of fit R^2 was greater than 0.93. It could effectively guide the mix design of anti-icing materials for road surfaces.

Keywords: anti-icing; cold-mixed asphalt; ultra-thin wear-resistant layer; road performance; ice-melting effect; road maintenance