

颗粒包覆缓释型抗凝冰材料在寒冷地区公路的应用

何敏¹, 尹军¹, 李浦瑜¹, 季卫康², 王胜³

(1. 四川川交路桥有限责任公司, 四川 德阳 6183002; 2. 苏州嘉发新材料科技有限公司, 江苏 苏州 215621;

3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 解决寒冷地区路面凝冰问题, 是当下公路交通领域的重难点。为此, 选取多种降冰点成分进行复配, 结合挤压造粒和包覆成膜工艺, 制备了一种可抑制路面结冰的缓释型抗凝冰材料。冻融劈裂试验结果表明, 在5%掺量条件下, 其冻融劈裂TSR为89.84%。掺入该材料的沥青试件能缓慢释放组分中的有效成分, 抑制路面结冰, 结合室内试验和项目试验段路面应用效果进行综合评价, 制得抗凝冰沥青混合料抑冰效果明显。研究成果为后续寒冷地区路面材料的研究提供了新思路, 同时高效快速的抗凝冰沥青混合料施工工艺, 对低温环境的路面工程有一定的借鉴意义。

关键词: 沥青混合料; 抗凝冰; 火山岩; 缓释型; 寒冷地区

中图分类号: U416.217; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0333-06

Application of Particle-coated Slow-release Anti-icing Materials in Highways of Cold Regions

HE Min¹, YIN Jun¹, LI Puyu¹, JI Weikang², WANG Sheng³

(1. Sichuan Chuanjiao Road and Bridge Co., Ltd., Deyang 6183002, China; 2. Suzhou Jiajiafa New Material Technology Co., Ltd.,

Suzhou 215621, China; 3. National Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Solving the icing problem of pavements in cold areas is a major difficulty in the field of highway transportation nowadays. For this reason, a variety of freezing point reduction components are selected for compounding. Combined with extrusion granulation and coating film-forming process, a slow-release anti-icing material able to inhibit pavement icing is prepared. The results of freeze-thaw splitting test show that the TSR of freeze-thaw splitting is 89.84% at 5% dosage. The asphalt specimens mixed with this material can slowly release the active ingredients in the components and inhibit the pavement icing. Combined with the indoor test and the pavement application effect in the project test section for a comprehensive evaluation, the anti-icing effect of the anti-icing asphalt mixture is obvious. The research results provide a new idea for the follow-up research of pavement materials in the cold areas; at the same time, the efficient and rapid anti-icing asphalt mixture construction process has a certain reference significance for the pavement projects in the low-temperature environment.

Keywords: asphalt mixture; anti-icing; volcanic rock; slow-release type; cold area

0 引言

寒冷地区沥青路面凝冰已成为公路交通领域内的重难点问题^[1], 路面结冰会降低轮胎与路面的摩擦系数, 导致车辆制动距离增加, 引发交通事故, 甚至引起交通中断, 造成巨大的经济损失。

收稿日期: 2025-04-01

基金项目: 高寒高海拔地区国省干道抗凝冰路面技术研究(AH2023-0147)

作者简介: 何敏(1987—), 男, 本科, 从事施工现场管理工作。

通信作者: 李浦瑜(1996—), 男, 本科, 从事公路工程施工管理工作。电子邮箱: 643857457@qq.com

为解决这一难题, 国内外学者从两方面入手: 其一从原理出发, 聚焦材料研究, 在沥青混合料中添加各种新材料^[2-4], 如玄武岩纤维^[5]、蓄盐类材料和高弹性橡胶颗粒^[6]、氯盐类材料^[7]等, 并通过优化沥青配合比^[8], 制得具有抗凝冰性能的沥青混合料, 从源头上降低路面凝冰产生的概率; 其二着手于施工工艺的改进与革新, 采用多种技术手段保障道路通行安全, 传统的除冰方案包括撒融雪剂、机械除冰等, 效率低, 除雪效果差, 而随着技术的进步, 新型工艺崛起, 再施工阶段预埋发热电缆, 当路面达到低温凝结状态时, 通过传感器传输信号, 控制发热电缆工

作^[9-10],达到主动除雪融冰的效果,此外大数据智能平台的利用,可以实时监控路面状态^[11-13],喷洒环保型除冰剂,抑制路面结冰^[14]。然而,现有研究在实际工程上的应用中仍存在些许不足,部分材料的有效成分可能会对周边环境造成污染,在生态脆弱地区应用有诸多限制,另一方面,在使用过程中,现有的抗凝冰沥青混合料面临有效成分的挥发、降解等,存在耐久性差的问题,影响其长期使用效果,难以适应极端的雨雪夹杂天气,而主动除冰系统虽然具备一定的智能化优势,但其高昂的成本、复杂的工艺以及后期的维护费用等,不具备大面积推广应用的经济性。因此,研发一种兼具可操作性、低成本与使用周期长的新型材料对提升寒冷地区的道路通行安全性具有积极作用。

为了制备抗凝冰效果更佳的外掺材料,使得沥青混合料抑制结冰效果增强,采用多种降冰点成分复掺,利用挤压造粒工艺并结合自主研发的包覆工艺,制备颗粒包覆缓释型抗凝冰材料。试验段依托甘孜州公路改造项目,在雨雪天气下的路用效果表明抗凝冰沥青混合料具有较好的抑冰效果,降低了冰面与路面之间的黏结力。小雪情况下,有效成分的析出可保证路面正常通行;暴雪天气下,抗凝冰沥青路面具备一定的主动抑制冰雪覆盖层形成的作用,路面不易形成冰晶层,车轮碾压后积雪层破碎,除雪抑冰效果良好。研制的抗凝冰材料各项技术参数均达标,在工程实际应用中展现了其优异的除雪融冰效果,达到了“小雪可溶,大雪不结冰”的效果,保障冰雪天气路面正常通勤。

1 工程概况

项目依托甘孜州公路改造项目,该地区海拔较高;施工区10月初一次年3月中下旬降雪,对应时间内全线存在季节性结冰,产生季节性冻土,持续时间长,总体呈现随着海拔的增高而延长,季节冻结层厚度一般0.50~1.00 m;建设里程长65.067 km。通过在沥青混合料中添加抗凝冰材料,以期达到“小雪可溶,大雪不结冰”的结果。

2 抗凝冰材料

2.1 抑冰原理

抗凝冰材料主要成分为氯盐类物质、甲酸盐类以及有机溶剂等,通过降低水的冰点抑制路面凝冰^[15],进而达到主动化雪融冰的目的。采用缓释型

结构^[16],与多孔状的火山岩结合^[17],将有效抗凝冰成份储存于多孔隙的载体中,控制内部成分缓慢释放。包裹的憎水材料和低冰点材料,可降低水渗入路面,改善路面富水状态,显著降低冰与路面的黏结力,实现冰雪与路面分离,不至于产生二次结冰,除雪效果更好^[18-19],盐分析出后多孔材料可保持体积不变,避免混合料因成分析出导致的路面空洞。抗凝冰材料的使用可实现主动抑制路面凝冰,无需后期封闭道路进行人工、机械除冰,有效保障寒冷地区道路交通安全。

2.2 抗凝冰有效成分筛选

选择6种降冰点物质作为基础材料,配置不同质量分数的溶液,对不同种类不同质量分数下的溶液凝固点进行测定。结果表明,0~15%掺量下几种物质降冰点作用相差不大,当质量分数达到20%时,1#物质将冰点效果最佳,溶液凝固点远低于试验组。当质量分数增加至30%,1#、3#试验组的溶液凝固点迅速下降,凝固点分别为-24、-23℃,其次为4#材料,凝固点为-18℃。

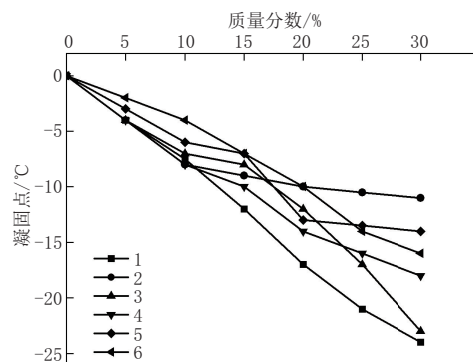


图1 溶液凝固点

综合考虑下,1#、3#物质在不同掺量下始终保持高效降冰点的优势,且两种材料的成本较低,在大掺量条件下经济效益更高,可作为主要的抗凝冰成分,但该材料的过量使用易侵蚀路基混凝土并造成开裂,影响沥青路面使用寿命,因此选择4#材料进行复掺,实验结果表明该材料在较低的掺量下也具备良好的降冰点作用,作为辅助材料掺入,兼顾材料降冰点效果的同时,削弱材料对路面性能的劣化。基于此,抗凝冰材料的降冰点成分为1#:3#:4#=2:2:1。

2.3 材料制备

为提高抗凝冰沥青路面的可持续性,满足路面长效抑冰的要求,掺加一定量的缓释剂、黏合剂和其他材料,充分固结抗凝冰材料组分,使其具备一定的强度,制备的抗凝冰材料有效组分缓慢溶解析出的

同时,其他外掺材料可协同改善沥青混合料的路用性能及其低温稳定性,降低路面与冰面之间的界面黏结力,提高路面的耐久性,减少后期的维护管理费用。采用挤压造粒工艺对组分进行造粒成形,依据前期实验结果,按比例配置抗凝冰材料的主要成分,混合后利用挤压造粒机进行造粒。成形后利用自主研发的颗粒包覆工艺,选用火山岩粉末和微量的合金粉末,配置成包膜液,对挤压制成的抗凝冰颗粒进行转鼓包覆,包覆完成后的颗粒烘干后筛分,获得 3~5 mm 的成膜颗粒,即为抗凝冰沥青外掺材料。制备完成的抗凝冰材料相关参数如表 1 所示。

表 1 抗凝冰材料技术参数

项目	技术指标	实验结果
外观		灰色颗粒状,无杂质及油污
氯离子含量/%	≥35	55.0
耐热性指数/%	≤0.5	0.20
相对密度	≥1.7	2.540
公称最大直径/mm	≤5	4.75
含水率/%	≤2	1.5
高温动水冲刷后	毛体积相对密度/%	≤1.0
	残留稳定度比/%	≥85
	盐分释出量/%	≤0.4
	pH 值	7.0~9.0
	吸湿率/%	≤0.7
	融冰率/%	≥20
	冰点/℃	≤-5

2.4 外掺材料最优掺量选取

冻融劈裂试验可以评估沥青混合料的抗冻性能,筛选出性能最优的抗凝冰材料掺量,在保证混合料具备一定的水稳定性和结构强度的前提下,评估不同掺量下的沥青试件经历冻融循环后的力学性能变化,为抗凝冰沥青混合料的工程应用提供依据,实验结果如图 2 所示。

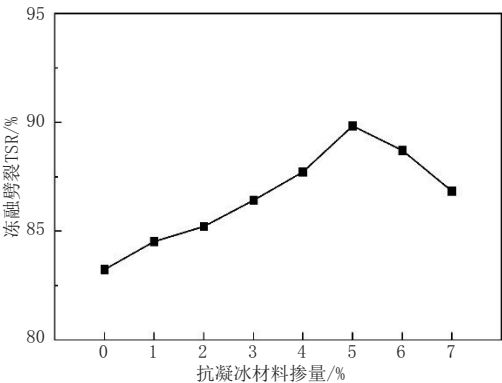


图 2 冻融劈裂试验

试验结果表明,抗凝冰材料的掺入对其力学性能和水稳定性具有显著影响。当掺量较低时,随着掺量的增加,试件的抗冻效果逐渐增强,冻融劈裂强度比逐渐增大;而掺量高于一定值时,冻融劈裂强度逐渐降低,这可能是由于过量的材料掺入,破坏了沥青混合料原有的骨料结构,稳定性降低,导致其冻融后的劈裂强度降低,加剧了冻融作用对试件的损伤。综合考虑,当抗凝冰材料掺量在 5% 左右时,材料的抗冻性能良好,能够有效抵御冻融作用对试件的破坏,并且未出现因材料掺量过大导致的结构松散、稳定性下降的问题。因此选择 5% 的材料掺量应用于后期施工,满足路面抗凝冰需求的同时,也有利于延长道路使用寿命,具备良好的工程适用性。

3 生产工艺

3.1 材料

(1)集料制备抗凝冰沥青混合料的粗细集料应选用坚硬、无风化、具有一定立方体形状的净石料,实际施工中采用的集料均为工程场地粉碎制成的不同规格碳质板岩(见图 3),填料为火山灰矿粉,相关性能参数见表 2 和表 3。

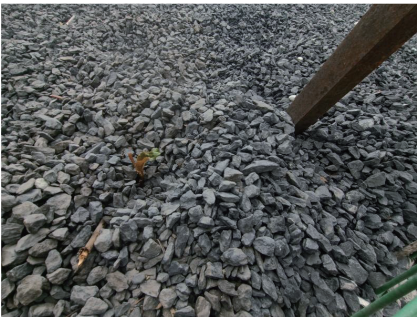


图 3 碳质板岩

表 2 矿料

矿料名称	表观相对密度	毛体积相对密度
13.2~16 mm	2.736	2.682
9.5~13.2 mm	2.74	2.686
4.75~9.5 mm	2.733	2.67
2.36~4.75 mm	2.73	2.674
0~2.36 mm	2.738	2.672
矿粉	2.744	2.744

(2)沥青

抗凝冰沥青混合料采用 90#石油沥青拌和,基质沥青相关参数见表 4。

(3)配合比

沥青混合料级配参考 AC—16C 沥青混合料,如图 4 所示。5#集料(13.2~16 mm):4#集料(9.5~

表3 火山灰矿粉

项目	国家标准	实际值
SO ₃ /%	≤3.5	1.26
烧失量/%	≤8.0	2.21
Cl ⁻ /%	≤0.06	0.02
流动度比/%	≥90	105
含水量/%	≤1.0	0.3
细度(0.045筛余%)	≤20.0	12
28 d活性指数	≥65	—

表4 90#沥青

检测项目	技术要求	检测结果
针入度25℃, 100 g,5 s(0.1 mm)	80~100	87
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	≥100	>120
软化点/℃	≥44	46.3
闪点/℃	≥140	160
溶解度/%	≥99.5	99.8
密度		1.05

表5 沥青试件参数

序号	油石比/%	沥青用量/%	理论最大 相对密度	毛体积相 对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	有效沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
1	4.5	4.3	2.538	2.412	4.7	13.6	65.6	13.66	3.9
2	4.8	4.6	2.528	2.427	4.0	13.5	70.4	14.06	4.0
3	5.1	4.9	2.516	2.422	3.7	14.0	73.5	13.47	3.8
技术要求				上限	6	—	75	—	4.5
				下限	3	12	65	5	2

3.3 生产配合比确定

根据试验所得结论,确定沥青混合料的配比,如表6所示。除开上述材料外,混合料中掺加了0.3%的抗剥落剂和0.6%的油基温拌改性添加剂。

表6 沥青混合料掺配比例

序号	原材料	掺配比例
1	13.2~16 mm	13
2	9.5~13.2 mm	18
3	4.75~9.5 mm	26
4	2.36~4.75 mm	9
5	0~2.36 mm	30
6	矿粉	4
7	抗凝冰材料	3
8	最佳油石比	4.75

3.4 检验结果

根据最优沥青含量制得的马歇尔试件,测定其相关性能,具体参数见表7。试验结果表明,抗凝冰沥青混合料性能满足技术要求,可应用于现场施工。

4 抗凝冰材料效果评价

4.1 试样析出浓度变化

材料组分中的缓释剂通过调节析出速度,使得

13.2 mm):3#集料(4.75~9.5 mm):2#集料(2.36~4.75 mm):1#集料(0~2.36 mm):矿粉=13%:18%:26%:9%:30%:4%。

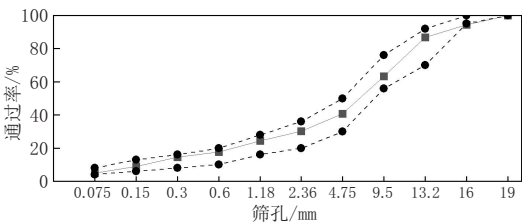


图4 沥青矿料级配曲线

3.2 最佳油石比

根据确定的矿料合成配比,采用OAC法确定最优沥青含量^[20]。初始最佳油石比为4.8%,再取±0.3%共3个油石比,参考试验规范^[21]对不同油石比制得的试件进行标准马歇尔试验,测定相关性能参数,具体数据见表5。根据OAC法计算规则与试验结果,确定最佳油石比为4.75%。

表7 沥青混合料检测结果

检测项目	技术要求	试验结果
油石比/%	4.75	4.75
毛体积相对密度	—	2.426
空隙率/%	3~6	4.0
标准马歇尔试验	矿料间隙率/%	≥13.5
	有效沥青饱和度/%	65~75
	稳定度/kN	≥5
	流值/mm	2~4.5
理论最大相对密度	—	2.528
浸水残留稳定度/%	≥85	91.5

抗凝冰沥青混合料试件逐渐释放有效成分,延长其在寒冷天气下路面的长效服役时间,保持抗凝冰性能,减少后期道路维护成本。为了验证材料的缓释效果,将试样浸泡后测定水溶液中其有效成分浓度,浓度变化曲线如图5所示。

从有效成分的浓度变化曲线来看,当试件在水中浸泡时,有效组分的浓度在初期迅速上升,说明该阶段材料有效组分释放,实验现象也表明雨雪天气下抗凝冰材料能够快速响应,促使有效成分析出。随后,浓度增长速率减缓,反映出材料中的缓释成分开始发挥作用,使其在较长时间内缓慢、持续地释放抗

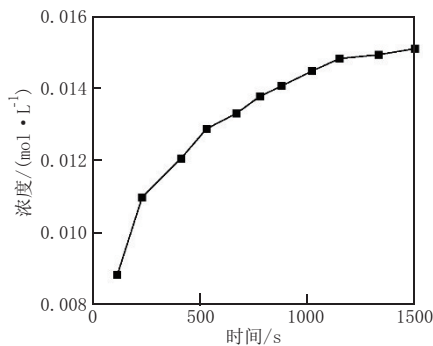


图5 浓度变化

凝冰组分,延长材料的使用寿命,避免材料的快速释放导致其内部结构产生缺陷,确保了材料的功能性不受影响,保持其在复杂环境条件下的可持续性效果。

试验结果表明,利用颗粒包覆缓释型抗凝冰材料制成的沥青混合料试件,当存在雨雪天气时,随着车轮碾压有效组分可通过孔隙逐步、缓慢的释放作用于路面,起到长效抑制路面凝冰的效果。

4.2 室内试验效果

在进行现场路面应用前,进行简易的抗凝冰沥青材料低温冻结抑冰效果试验,指导实际施工,具有一定的必要性和参考价值。如图6所示,通过简易的前期试验,验证材料特性以及指导后续现场施工。模拟低温环境下的冻结过程,明确抗凝冰材料在寒冷条件下是否能够有效防止水分冻结,减少路面结冰现象的发生。试验结果可以作为工程设计的相关依据,确保材料在实际应用中的效果和安全性。在实验室环境中进行冻结实验,相较于直接进行大规模的实际道路实验,能够节省大量的时间和成本。

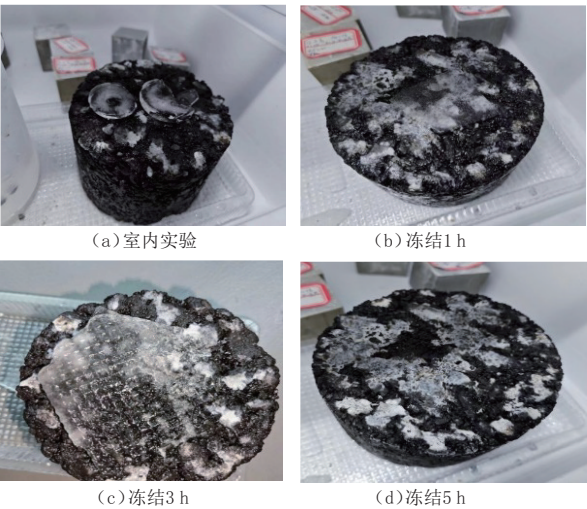


图6 实验室低温抑冰试验

试验结果表明,试块在冻结1 h后,马歇尔试件表面的覆盖冰层开始变薄,冰层分布均匀,未完全覆盖整个表面。经过3 h的冻结,表面上的冰层明显变

薄,冰的分布更加均匀,可见冰块开始出现融化趋势,冰层变薄,试验开始5 h后,试块表面覆盖冰层完全融化,少量水分聚集,相较1 h和3 h表面的明显大面积冰层覆盖,说明抗凝冰材料在这个过程中完成了释放并发挥其降冰点效应,同时路面与冰面之间的黏结力降低,达到了主动抑冰除冰的效果。

通过在实验室进行的简易低温冻结试验可知,制成的抗凝冰沥青材料在低温环境下可释放出降冰点材料,对路面形成的冰雪层逐步融解,达到主动除雪融冰的效果,为后期路面工程的实际应用提供了一定的参考价值。

4.3 路用效果

试验段选用该项目的K8+250路段,结合后期施工完成后的路用性能进行评价。每年11月底,甘孜州开始进入冬季,气温骤降,雨雪天气频发。具体的现场应用情况见图7,图7(a)为未铺设抗凝冰材料的路面,可以看到当雨雪天气来临时,路面积雪覆盖,产生了较为明显的凝冰层,路面被车辙覆盖的面层有细微冰晶,汽车行驶时容易出现打滑。图7(b)为铺设了抗凝冰沥青混合料的路段,无明显的凝冰层产生,路面整体较为湿润,但不存在细微冰晶,可保持正常行驶,积水路面在冰雪条件下能保持雪层和路面分离,不存在黏结,车辆行驶碾压后也不至产生冰层黏结,路用性能良好。



图7 现场应用

路用效果表明,抗凝冰材料在实际应用过程中抑冰作用显著。抗凝冰沥青混合料铺设的试验段路面在应对降雪天气时表现出优异的抑冰融雪性能,路面几乎没有出现明显的凝冰层,这意味着抗凝冰材料能够防止冰层的形成。在大雪天气下,有效抑制深厚积雪覆盖形成冰层,即使在极端天气条件下,也能维持路面状态,保障交通顺畅,提高了行车安全性,充分证明了抗凝冰材料的可靠性和耐久性,达到了“小雪可溶,大雪不结冰”的预期效果。

5 结 语

甘孜州抗凝冰沥青的使用,使得沥青路面路用

性能大大提升,提高寒冷地区冰雪地段的行驶安全性,并得出以下结论。

(1)通过添加抗凝冰材料,使得普通沥青混合料具备低温环境下抑制路面结冰的特性,且各项指标均满足技术要求,运用在寒冷地区效果良好,可保证路面安全通行。

(2)抗凝冰材料的掺加,在兼顾路面性能的同时,降低了后期道路维护的成本,且施工工艺简便。独特的材料载体设计,不仅使得抗凝冰主体成分得到有效的利用,也降低了路面因材料释放而产生空洞的可能性。

(3)在寒冷地区推广使用抗凝冰材料,对于优化沥青路面性能、提高道路可持续使用性具有积极作用,具有一定的经济价值和社会效益。

参考文献:

- [1] 乔世哲,秦浩,黄晚清.高寒地区沥青混凝土路面抗结冰研究综述[J].公路,2021,66(8):337-341.
- [2] 唐磊,时建刚.抗凝冰沥青混凝土的路用性能及抗冰效果研究[J].中外公路,2013,33(4):307-309.
- [3] 冯蕾,杨鑫,常俊鹏.温拌胶粉改性沥青砂浆在冻融作用下的低温性能研究[J].中外公路,2023,43(5):188-193.
- [4] 肖新波,李汉锋.城市道路融雪化冰沥青路面关键技术研究及应用[J].中外公路,2021,41(4):90-94.
- [5] 艾贤臣,胡帮艳,冉武平,等.冻融循环下纤维增韧型环氧沥青混合料损伤演化[J].河南科技大学学报(自然科学版),2024,45(1):35-42;50.
- [6] 汪成.复合型除冰化雪沥青混合料制备及性能研究[D].西安:长安大学,2022.
- [7] 程维.桂北地区抑冰融雪涂层的制备及其性能研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [8] 孟勇军,时建刚,白雪,等.抗凝冰沥青混凝土的优化设计研究[J].中外公路,2012,32(4):255-259.
- [9] 符养斌,黄有波,李炎锋,等.碳纤维与电缆加热用于道路融雪对比分析[J].中国科技信息,2017(增刊1):42-43;45.
- [10] 张登春,章照宏,袁江雅,等.公路桥梁发热电缆除冰系统试验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(11):90-95.
- [11] 谢霞,霍发明,周蒙,等.豫南地区公路凝冰自动化喷洒系统技术研究[J].交通世界,2024(20):22-25.
- [12] 于金良,张喜民,秦川,等.基于PCA-SVM的远程路面凝冰预警系统[J].湖南交通科技,2023,49(4):168-174;183.
- [13] 孙凡,王文华,杨丽.滨州黄河大桥气象预警及凝冰处置系统研究[J].山东交通科技,2023(4):125-126;145.
- [14] 余海敏.智能防冰除冰系统在高速公路与桥梁的应用[J].中华建设,2014(1):154-155.
- [15] 吴玉辉.浅谈公路融雪剂技术[J].北方交通,2010(3):9-11.
- [16] 胡健,张浩浩,王坤.缓释型抗凝冰桥面铺装 AFC-13 混合料设计与性能评价[J].交通科技,2023(1):115-120.
- [17] 许海博.松辽盆地南部火山岩样品微观结构特征的多尺度三维重建[D].长春:吉林大学,2022.
- [18] 文洁.憎水涂层混凝土对冰附着强度测试及性能研究[J].中国新技术新产品,2023(18):100-102.
- [19] 李永江,何斌.低冰点抗凝冰技术应用研究[J].公路,2021,66(5):274-277.
- [20] 张文霞.沥青混合料的施工配合比设计[J].山西建筑,2008(25):190-191.
- [21] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].