

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.02.010

高效含氯型融雪剂研发与性能评价

张卫兵¹, 胡隽婷^{*2}, 王梓晗^{2,3}, 刘威勤¹, 韦万峰⁴, 李平²

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051; 4. 广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要:【目标】为了平衡融雪剂使用效果和经济成本,降低对植物的伤害和对钢铁的腐蚀,选择多种融雪剂性能评价指标,以氯化钠、氯化钙和醋酸钠作为核心成分,通过正交试验确定2种高效含氯型融雪剂的配比。【方法】针对融雪剂的融雪除冰性能和环保性能,对2种高效含氯型融雪剂和2种传统氯盐融雪剂的pH值、冰点、融冰能力、渗透能力、下切能力、碳钢腐蚀率、植物种子相对受害率进行试验。根据试验结果优选出融雪剂的最优配比方案。【结果】氯化钠对静置融冰能力、渗透深度和下切面积的影响最大,其次是氯化钙,最后是醋酸钠。氯化钙的静置融冰能力和渗透能力最强,2种高效含氯型融雪剂的下切能力显著优于氯化钠和氯化钙。随着氯化钙在融雪剂中所占比例的增加,融雪剂的冰点降低能力增强,同时碳钢腐蚀率和植物种子的相对受害率均有所降低。这说明氯化钙在融雪剂中的含量对其性能和环境影响有重要的作用,应该根据实际情况合理地调节。【数据】融雪剂的最优配比方案为氯化钠:氯化钙:醋酸钠=69.8:23.2:7.0。该配比方案下的融雪剂具有较低的冰点、较强的融冰能力、较高的pH值、较小的碳钢腐蚀率和植物种子相对受害率。【结论】该配比方案的融雪剂能够有效地实现道路除雪除冰目的,同时降低对环境和基础设施的负面影响,为融雪剂的推广应用提供了科学依据和参考。

关键词: 道路工程; 含氯型融雪剂; 融冰试验; 渗透试验; 下切试验

中图分类号: U418.4+1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2025)02-0087-10

Research, development and performance evaluation on efficient chlorinated snow-melting agent

ZHANG Weibing¹, HU Junting^{*2}, WANG Zihan^{2,3}, LIU Weiqin¹, WEI Wanfeng⁴, LI Ping²

(1. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China;
2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
3. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430051, China;
4. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: [Objective] To balance the effectiveness and economic cost of snow-melting agent, and reduce the damage to plants and corrosion of steel, the performance evaluation indicators of a variety of snow-melting agents were selected. Sodium chloride, calcium chloride, and sodium acetate were taken as the core components. The ratio of two efficient chlorinated snow-melting agents was determined through the orthogonal tests. [Method] In view of the snow-melting and de-icing performance and the environmental performance of snow-melting agents, the tests were carried out on pH value, freezing point, ice-melting capacity, penetration

收稿日期: 2024-09-29 修改日期: 2025-01-18

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB21220070)

作者简介: 张卫兵(1981-),男,河南焦作人,硕士,高级工程师,研究方向为道路结构与材料、高速公路建设管理。(32487477@qq.com)

*通讯作者: 胡隽婷(2001-),女,湖南长沙人,硕士,研究方向为道路结构与材料。(1250647321@qq.com)

引用格式: 张卫兵, 胡隽婷, 王梓晗, 等. 高效含氯型融雪剂研发与性能评价[J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 87-96. ZHANG Weibing, HU Junting, WANG Zihan, et al. Research, development and performance evaluation on efficient chlorinated snow-melting agent[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(2): 87-96.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

capacity, undercutting capacity, carbon steel corrosion rate, and plant seed relative victimization rate of two efficient chlorinated snow-melting agents and two traditional chlorate snow-melting agents. The optimal mix proportion scheme of snow-melting agents was determined. [Result] Sodium chloride has the most significant influence on the static ice-melting capacity, penetration depth, and undercutting area, followed by calcium chloride, and finally sodium acetate. Calcium chloride has the strongest static ice-melting capacity and penetration capacity. The undercutting capacity of two efficient chlorinated snow-melting agent is significantly better than that of sodium chloride and calcium chloride. As the calcium chloride proportion in snow-melting agent increasing, the snow-melting agent freezing point depression capability increases, while the carbon steel corrosion rate and the plant seed relative victimization rate decrease. It indicates that the content of calcium chloride in snow-melting agents plays an important role in its performance and environmental impact. It should be reasonably adjusted according to the actual situation. [Data] The optimal mix proportion of sodium chloride, calcium chloride, sodium acetate is 69.8 to 23.2 to 7.0. The snow-melting agent with this mix proportion has lower freezing point, stronger snow-melting capacity, higher pH value, smaller carbon steel corrosion rate, and smaller relative victimization rate of plant seed. [Conclusion] The snow-melting agent with this mix proportion can effectively remove road snow and ice. It will reduce the negative impact on environment and infrastructure, providing a scientific basis and reference for the snow-melting agent promotion and application in the future.

Key words: road engineering; chlorinated snow-melting agent; ice-melting test; penetration test; undercutting test

0 引言

中国多数地区冬季容易遭遇冰雪天气,在自然条件下,路面积雪难以在短时间内消融,给交通通行带来了巨大困难。积雪在车辆碾压下会形成冰层,严重降低路面抗滑性能,导致车辆发生侧滑现象,易引发交通事故^[1-4]。根据相关部门提供的2005—2014年交通事故的统计数据^[5]可知,在雪天发生的交通事故占有不利气候条件的6.93%,位居所有不利气候条件下引发交通事故起数的第2位;平均每起交通事故造成的经济损失为8 100.11元,位居单起交通事故造成经济损失的第2位。路面冰雪严重地威胁着道路安全和财产安全。研究人员探索了多种清除路面冰雪的方法^[6-8],目前在道路工程中通常使用融雪剂减小路面冰雪对交通的影响。

根据《融雪剂》(GB/T 23851—2017),融雪剂按氯化物含量可分为氯化物类和非氯化物类。氯化物类是以氯盐为主要成分的无机融雪剂,主要包括氯化钠、氯化钙、氯化钾等。这类材料价格低,制备工艺简单同时融冰雪持续性好,但对钢铁腐蚀性和周边环境影响较大^[9-11]。非氯化物类以有机化工产品为主(如醋酸钙和醋酸钾),这类材料冰点高,融冰雪效果好,对钢铁腐蚀性小,且部分有机融雪剂可降解,对植物的生长产生促进作用,但制备工

艺较为复杂,使用成本较高^[12-14]。因此,氯化物类融雪剂仍然占主导地位,而非氯化物类融雪剂一般用于机场等重要场所。国家对融雪剂的生产使用提出多项调整措施,利用添加剂、缓蚀剂等进一步降低氯化物类融雪剂的实际用量。

国内外针对测定道路融雪剂融雪化冰能力的试验方法很多。中国的试验方法包括有国家标准GB/T 23851—2017的融雪化冰能力试验,以及地方标准,如北京市《融雪剂》(DB11/T 161—2012)的融雪化冰能力试验,辽宁省《融雪剂质量与使用技术规程》(DB21/T 1558—2007)的融雪化冰能力试验,河北省《公路融雪剂》(DB13/T 1411—2017)的融冰能力试验。美国公路战略研究计划于1992年出版的《化学融雪剂评价方法手册》(SHRP-H-332)介绍了融雪剂融冰能力试验、渗透能力试验和下切能力试验。国内外的试验方法测试原理和实际测试结果各不相同,给融雪剂融冰能力的准确测定及工程实际应用带来困难。中国融雪剂标准中,融冰能力测试方法为固定时间的融冰质量,但工程中融雪剂融冰过程是不同方面综合作用的结果,一般可以分为融冰、融雪剂聚集在冰层薄弱处穿透冰样、冰层与路面间黏结处融化剥离等方面。因而评价融雪剂融雪除冰性能时不能只考虑融冰性能,还应考虑渗透性能和下切性能。研究人员对国内外的融雪剂融

雪化冰能力试验方法进行了分析与改进。关永胜等^[3]通过对比中、韩融雪剂标准的融雪化冰能力评价方法的差异, 针对常用氯盐融雪剂进行评价测试。吕悦晶等^[15]通过改进的 SHRP 融冰试验, 分析了温度、固液态及撒布方式对常用氯盐融雪剂除冰性能的影响。科研人员对融雪剂开展了大量研究, 致力于开发环境友好、经济实用的复合融雪剂。张跃伟等^[16]通过正交试验和失重法对缓蚀剂成分和配比进行了筛选和优化, 制备了一种高效环保复合型氯化钙镁盐融雪剂。Wang 等^[17]制备了一种新型除冰缓蚀剂, 在降低氯离子使用量、碳钢腐蚀速率和混凝土抗盐冻性能方面发挥着重要作用。但由于对融雪剂的评价指标不全面, 原材料及配比难以确定, 严重阻碍了新型融雪剂的推广应用。

因此, 本研究拟开发一种高效含氯型融雪剂, 旨在平衡融雪剂使用效果和经济成本, 降低对植物的伤害和对金属、混凝土等物质的腐蚀。首先确定融雪剂的评价指标, 然后利用正交试验设计高效含

氯型融雪剂, 通过极差分析确定最优配比, 最后针对融雪剂的融雪除冰性能和环保性能, 测试 2 种含氯型融雪剂和 2 种传统氯盐融雪剂的 pH 值、冰点、融冰能力、渗透能力、下切能力、碳钢腐蚀率和植物种子相对受害率, 得到融雪剂的最优配比方案。

1 试验与方法

1.1 原材料

氯化钠资源丰富, 价格低廉; 氯化钙溶解时放热, 吸水性强, 冰点低, 防冻效果好, 但价格比氯化钠昂贵; 醋酸钠由于不含氯离子, 其溶液呈弱碱性, 对混凝土和碳钢的腐蚀较轻。综合考虑融雪剂的融雪除冰能力、对道路交通安全性、经济效益、环境因素 4 个方面, 宜选择氯化钠、氯化钙、醋酸钠作为高效含氯型融雪剂的主要成分。试验所用氯化钠、氯化钙、醋酸钠技术指标如表 1 所示。

表 1 融雪剂技术指标

Table 1 Snow-melting agent technical indicators

融雪剂	外观	分子量	25 °C 时的 pH 值	冰点/°C	有效成分/%	水不溶物/%	密度/(g · cm ⁻³)
氯化钠	白色结晶颗粒	58.44	5~8	-21	NaCl ≥ 99.5	≤ 0.005	2.165
氯化钙	白色颗粒块状	147.02	8~10	-50	CaCl ₂ · 2H ₂ O ≥ 98.0	—	2.150
醋酸钠	白色结晶粉末	82.02	7.5~9.0	—	CH ₃ COONa ≥ 99.0	0.005	1.450

1.2 试验方法

本研究将融雪剂的评价指标分为 2 部分。第 1 部分是融冰雪能力评价, 包括冰点试验、静置融冰试验、渗透试验、下切试验。目前评价融雪剂除冰雪能力的指标是相对融雪化冰能力, 但这一指标忽略了融雪剂融雪化冰的渗透和下切过程, 不能准确反映融雪剂的除冰雪能力。本研究采用融冰能力、渗透深度、下切面积 3 个指标评价融雪剂的融冰雪能力。第 2 部分是环境影响评价, 包括 pH 值、碳钢腐蚀试验、种子发芽试验。采用融冰雪能力评价指标和环境影响评价指标对自制融雪剂的使用性能进行评价。

1.2.1 融冰雪能力评价

(1) 冰点试验

融雪剂溶于水后, 水中离子浓度增大, 导致水的液相蒸气压下降, 但冰的固态蒸气压不变, 为达到冰水混合物平衡共存时固液相蒸气压相等的状态, 雪水凝固点持续降低, 从而达到融雪除冰的效果^[18]。差示扫描量热法 (Differential Scanning

Calorimetry, DSC) 测试温度范围广, 操作简单, 试验结果准确、快速, 可重复性好, 因此得到广泛应用。该方法是通过升温 and 降温过程, 进行温度和热流的测试, 在 DSC 仪器测量冰点时, 整个循环过程中会出现结晶温度和升温熔点这 2 个温度。试验过程中受样品纯度和降温速率的影响, 结晶温度的可重复性较差, 而升温熔点较为固定, 试验标准差较小, 可重复性较好, 所以本研究将升温熔点定义为冰点。本研究参考郭峰^[9]的冰点测试方法, 取 10 mg 固体融冰雪剂样品, 冷却和升温速率为 10 °C/min, DSC 温度范围为 25~60 °C, 气氛使用氮气。通过数据分析, 纵坐标为热流, 横坐标为温度, 在曲线斜率出现显著变化的特征点处作切线, 得出融雪剂冰点。

(2) 静置融冰试验

静置融冰试验为静置状态下融雪剂对容器内冰样融化质量的评价。根据 GB/T 23851—2017 可测试融雪剂试验溶液的融雪化冰能力, 但难以测定固态融雪剂的融雪化冰能力, 同时试验过程中容器表面

会存在附着损失。因此本研究依据 SHRP H-205.1 操作步骤,采用温湿度试验箱制备冰样,冰样制备温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验时保持单位冰样面积上融雪剂质量相同,即120 mm 培养皿用4.3 g 融雪剂,100 mm 培养皿用3.0 g 融雪剂,75 mm 培养皿用1.7 g 融雪剂。试验指标为静置融冰能力 G_{ji} ,即每单位质量的融雪剂的融冰量。计算公式为:

$$G_{ji} = \frac{m_0 - m_i}{m_r}, \quad (1)$$

式中, G_{ji} 为测试时间 i 时静置融冰能力; m_0 为试验前冰样和培养皿总质量; m_i 为测试时间 i 时冰样和培养皿总质量; m_r 为融雪剂质量。

(3) 渗透试验

渗透试验模拟道路除冰过程中融雪剂对冰雪层的在厚度方向上的渗透作用,其中融雪剂的主要功能是破坏冰-路面界面。穿透冰层到路面所需的时间,以及在冰-路界面上可用于后续融化的融化能力,通常决定了融雪剂协助融冰过程的能力。本研究依据 SHRP H-205.3 操作步骤,冰样制备和测试温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,融雪剂用量为22~27 mg。试验指标为渗透深度,即融雪剂在测试时间内对冰层的渗透深度。计算公式为:

$$H_{si} = M_{si} \times i, \quad (2)$$

式中, H_{si} 为测试时间 i 时渗透深度; M_{si} 为测试时间 i 时渗透速率。

(4) 下切试验

下切试验实质为融雪剂在冰-基质界面将冰从基体上剥离部分的评价,固体融雪剂进行的下切试验代表了当融雪剂颗粒分布在相对较薄的冰层上时发生下切的程度。液体融雪剂进行的下切试验代表了融雪剂溶液像薄膜一样分散在冰面上,从表面向下均匀地融化冰的下切程度。本研究依据 SHRP H-205.5 操作步骤,在构造深度为0.88 mm 的 SMA-13 车辙板上进行试验,冰样制备温度和测试温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,融雪剂用量为30~35 mg。试验指标为下切面积 S_x ,即融雪剂穿透冰层后在冰-基质界面产生的融化冰的面积。计算公式为:

$$S_{xi} = \frac{S_c}{V_c} \times V_{xi}, \quad (3)$$

式中, S_{xi} 为测试时间 i 时实际的下切面积; S_c 为参考面积,为 1 cm^2 ; V_{xi} 为测试时间 i 时实际下切面积的像素数,利用 Photoshop 软件计算; V_c 为参考面积的像素数,利用 Photoshop 软件计算。

1.2.2 环境影响评价

(1) pH 值

根据融雪剂的腐蚀机理,融雪剂的 pH 值与混凝土和碳钢的腐蚀性存在直接相关关系^[19]。本研究依据 GB/T23851—2017 操作步骤,按照使用浓度配置溶液,若无浓度要求的可按类型配置,I 型质量分数为18%,II 型质量分数为29%。做2组平行试验:用清水清洗 pH 计电极,再用配置的溶液冲洗;调节 pH 计温度补偿按钮至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,将 pH 计插入待测溶液中;在搅动的情况下测量溶液 pH 值,读数需稳定1 min。试验指标为 pH 值,其值需在6~10 范围内,且2次测得的 pH 值的差值不得大于 ± 0.02 。

(2) 碳钢腐蚀试验

本研究依据 GB/T23851—2017 中的试验步骤测定碳钢腐蚀率。选取3个20# 钢试片,尺寸均为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,表面积为 28 cm^2 ,用砂纸将试片打磨干净后用蘸取酒精的脱脂棉擦拭,置于烘箱中干燥2 h 后利用精密度达 0.0001 g 的电子天平称重;将试片没入浓度为10%的融雪剂溶液中,浸泡48 h;将试片用去离子水冲洗后再用无水乙醇浸泡5 min,清洗干净表面锈迹,放入烘箱中干燥2 h,称重,计算腐蚀速率。试验指标为腐蚀速率 v ,计算公式为:

$$v = \frac{8760(m_0 - m_1) \times 10}{spt}, \quad (4)$$

式中, m_0 为试片初始质量; m_1 为试片腐蚀损失后质量; s 为试片表面积; ρ 为试片的密度; t 为试验时间。

(3) 种子发芽试验

为了研究融雪剂对环境的污染情况,采用 GB/T23851—2017 规范中的种子发芽试验测定植物种子相对受害率。用4%过氧化氢溶液处理100粒早熟禾种子,在 $(40 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水中浸泡20 min;沥干后放在有滤纸和脱脂棉的发芽盒里;按比例稀释 I 型和 II 型融雪剂溶液;盖好发芽盒,放在 $(24 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的培养箱里,保湿并适时加水;12 d 后记录发芽数量,以幼芽长到种子长度的1/2 为标准。用同样的方法以水代替融雪剂试验溶液进行对照试验。试验指标为种子相对受害率 S 。计算公式为:

$$f = \frac{N_b}{100} \times 100\%, \quad (5)$$

$$S = \frac{F_w - F_s}{F_w} \times 100\%, \quad (6)$$

式中, f 为发芽率; N_b 为各次试验的发芽数; F_w 为水中的平均发芽率; F_s 为融雪剂中的平均发芽率; S 为相对种子受害率。

2 高效含氯型融雪剂配方初选

本研究采用正交设计原理, 选择三水平三因素, 选用 $L_9(3^3)$ 的正交表。首先确定试验评价指标为静置融冰能力、渗透深度和下切面积。在现有的相关研究中, 含氯型融雪剂的材料配比并不统一^[20-24], 按融雪性能由高到低排序为氯化钙、氯化钠、醋酸钠, 按环保性能由高到低排序为醋酸钠、氯化钠、氯化钙, 按经济性能由高到低排序为氯化钙、氯化钠、醋酸钠。综合考虑 3 种材料的融雪性能、环保性能和经济性能及其他研究人员的试验结果^[25-27], 宜选择氯化钠和氯化钙为高效含氯型融雪剂的主体成分, 而醋酸钠由于较高的价格和次于氯盐融雪剂的融雪除冰能力, 在融雪剂总量的占比宜小于任意一种氯盐融雪剂。最终确定 3 种材料的比例为: 氯化钠 70%, 80%, 90%; 氯化钙 15%, 30%, 45%; 醋酸钠 3%, 6%, 9%。然后选定正交设计方案 (见表 2), 根据试验方案进行试验, 对试验结果进行分析。

表 2 正交设计方案
Table 2 Orthogonal design scheme

编号	氯化钠	氯化钙	醋酸钠
1 [#]	1	1	1
2 [#]	1	2	3
3 [#]	1	3	2
4 [#]	2	1	3
5 [#]	2	2	2
6 [#]	2	3	1
7 [#]	3	1	2
8 [#]	3	2	1
9 [#]	3	3	3

表 2 中, 以 1[#] 为例, 3 种融雪剂均为水平 1, 即氯化钠含量为 70%, 氯化钙含量为 15%, 醋酸钠含量为 3%, 三者相加为 88%, 换算得到 1[#] 的氯化钠含量为 79.5%, 氯化钙含量为 17.0%, 醋酸钠含量为 3.5%。将正交设计表换算得到含氯型融雪剂试验方案如表 3 所示。采用 SHRP 静置融冰试验、渗透试验、下切试验作为评价融雪剂性能的主要方法, 对表 3 中 9 组含氯型融雪剂配方进行 3 次融雪性能试验, 正交试验设计结果如表 4 所示。对表 4 数据进行统计分析, 计算均值和极差, 如表 5 所示。

表 3 含氯型融雪剂试验方案 (单位: %)
Table 3 Test scheme for chlorinated snow-melting agents (unit: %)

编号	融雪剂配方中的比例		
	氯化钠	氯化钙	醋酸钠
1 [#]	79.5	17.0	3.5
2 [#]	64.2	27.5	8.3
3 [#]	57.8	37.2	5.0
4 [#]	76.9	14.4	8.7
5 [#]	69.0	25.9	5.1
6 [#]	62.5	35.2	2.3
7 [#]	81.1	13.5	5.4
8 [#]	73.2	24.4	2.4
9 [#]	62.5	31.2	6.3

表 4 正交试验设计结果
Table 4 Orthogonal test design result

编号	静置融冰能力	渗透深度/mm	下切面积/cm ²	经济指标/(元·kg ⁻¹)
1 [#]	8.68	6.50	1.10	27.72
2 [#]	9.28	9.00	1.61	31.28
3 [#]	9.48	10.58	1.70	30.86
4 [#]	9.06	7.58	1.21	29.90
5 [#]	9.20	8.17	1.54	29.56
6 [#]	8.32	6.25	1.08	29.33
7 [#]	10.31	15.08	2.45	28.21
8 [#]	9.88	13.50	2.17	28.08
9 [#]	9.51	12.25	2.09	30.77

表 5 正交试验均值和极差
Table 5 Mean value and extreme variance in orthogonal test

评价指标	影响因素	均值			极差
		水平 1	水平 2	水平 3	
静置融冰能力	氯化钠	9.15	8.86	9.90	1.04
	氯化钙	9.35	9.45	9.10	0.35
	醋酸钠	8.96	9.28	9.66	0.70
渗透深度/mm	氯化钠	8.69	7.33	13.61	6.28
	氯化钙	9.72	10.23	9.69	0.53
	醋酸钠	8.75	9.61	11.28	2.53
下切面积/cm ²	氯化钠	1.47	1.28	2.24	0.96
	氯化钙	1.59	1.77	1.62	0.19
	醋酸钠	1.45	1.64	1.90	0.45

不同因素条件下静置融冰能力随不同影响因素水平的变化如图 1 所示, 其中水平 1 代表氯化钠含

量为70%，氯化钙含量为15%，醋酸钠含量为3%；水平2代表氯化钠含量为80%，氯化钙含量为30%，醋酸钠含量为6%；水平3代表氯化钠含量为90%，氯化钙含量为45%，醋酸钠含量为9%。

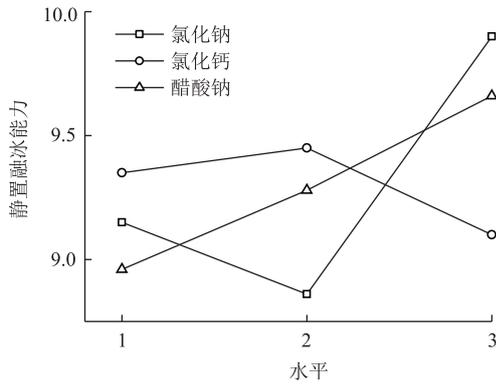


图1 静置融冰能力随不同影响因素水平的变化

Fig. 1 Static ice-melting capacity varying with different influencing factor levels

(1) 随着氯化钠含量的增加，静置融冰能力的平均值先减小后增大。当氯化钙含量为15%~30%时，静置融冰能力变化不大。但氯化钙含量增加到45%时，静置融冰能力下降，与含量30%时相比减少了3.7%。可以看出过高的氯化钙含量对静置融冰能力会产生不利影响。随着醋酸钠含量的增加，静置融冰能力逐渐提高。这说明醋酸钠的增加能提高融雪剂的静置融冰能力。

(2) 渗透深度平均值随不同影响因素水平的变化如图2所示。随着氯化钠含量的增加，渗透深度的平均值先减小后增大。在氯化钙含量增加的过程中对融雪剂渗透深度性能的影响不大，波动幅度为0.54 mm。这表明在提升融雪剂渗透深度时，不必掺入过多氯化钙，否则会增加生产费用。随着醋酸钠含量的增加，渗透深度逐渐增加。这说明醋酸钠的增加能提高融雪剂的渗透性能。

(3) 下切面积平均值随不同影响因素水平的变化如图3所示。随着氯化钠含量的增加，下切面积的平均值先减小后增大。当氯化钙含量为15%~30%时，下切面积增加约11.3%，但当氯化钙含量增加到45%时，下切面积减小。这说明氯化钙含量的增加能提高融雪剂的下切性能，但过量的氯化钙加入后在一定程度上劣化了融雪剂的下切性能。随着醋酸钠含量的增加，下切面积逐渐增大。这说明醋酸钠的增加能提高融雪剂的下切性能。

(4) 为得到影响融雪剂融雪性能各因素的权重，进行相应的极差分析（见表5）。各因素对融雪剂融

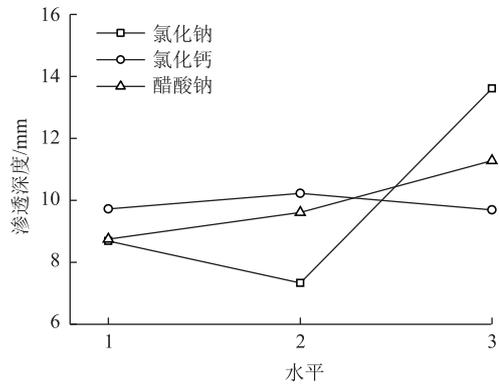


图2 渗透深度平均值随不同影响因素水平的变化

Fig. 2 Mean value of penetration depth varying with different influencing factor levels

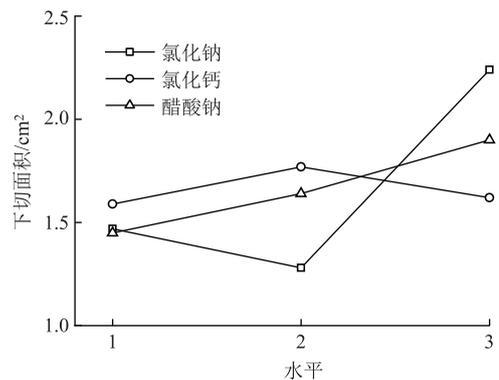


图3 下切面积平均值随不同影响因素水平的变化

Fig. 3 Mean value of undercutting area varying with different influencing factor levels

雪性能指标影响程度由高到低排序均为氯化钠、醋酸钠、氯化钙，即影响静置融冰能力、渗透深度、下切面积3个评价指标的最显著因素是氯化钠，其次是醋酸钠和氯化钙。随着氯化钠含量增加，融雪剂融雪性能呈现先减小后增大的趋势，选用氯化钠水平3（含量为69.8%）。醋酸钠的含量变化对融雪剂的融雪性能起重要作用，因此选用醋酸钠水平3（含量为7%）。氯化钙的加入在一定程度上会提高融雪剂的融雪性能，但掺量过多会劣化融雪性能，选用氯化钙水平2（含量为23.2%）。因此通过极差分析得到的最优配比组合为 $A_3B_2C_3$ ，即氯化钠含量69.8%，氯化钙含量23.2%，醋酸钠含量7%。

(5) 综合考虑静置融冰能力、渗透深度、下切面积3个评价指标与经济指标（见表4），其中7#配比方案的静置融冰能力、渗透深度、下切面积3个评价指标最高，经济指标较低，为最优方案。因此正交设计得到的最优配比组合为 $A_3B_1C_2$ 。 $A_3B_2C_3$ 的融冰能力、渗透能力、下切能力均高于 $A_3B_1C_2$ ，但综合考虑经济因素， $A_3B_1C_2$ 价格约为28.21元/kg，

而 $A_3B_2C_3$ 价格约为 30.14 元/kg, 相差约 2 元/kg, 拟对 2 种配方进行种子发芽试验和碳钢腐蚀试验, 以综合确定高效含氯型融雪剂配方。

3 最佳配合比性能测试

对 2 种含氯型融雪剂配方和 2 种传统氯盐融雪剂进行试验, 以综合确定高效含氯型融雪剂配方。

3.1 冰点

(1) 氯化钙的冰点显著小于其他 3 种融雪剂, 其冰点由低到高排序为氯化钙 ($-30\text{ }^\circ\text{C}$), $A_3B_2C_3$ ($-19\text{ }^\circ\text{C}$), $A_3B_1C_2$ ($-16\text{ }^\circ\text{C}$), 氯化钠 ($-10.5\text{ }^\circ\text{C}$), 不同融雪剂的 DSC 热图如图 4 所示。融雪剂溶于水后冰点比水的冰点低, 因此冰点越低的融雪剂融雪化冰能力越好。2 种自制融雪剂的冰点均低于氯化钠的冰点, 这说明二者的溶雪化冰能力优于氯化钠。

(2) 氯化钙含量对冰点的影响如图 5 所示。随着氯化钙含量的增加, 氯化钙对冰点的影响逐渐显现, 从而使冰点下降。 $A_3B_2C_3$ 融雪剂中的氯化钙含量比 $A_3B_1C_2$ 融雪剂增加了 9.7%, 冰点下降了 18.6%。这可能与氯化钙存在溶解放热效应有关^[19]。

3.2 融冰能力

不同融雪剂的静置融冰试验、渗透试验、下切试验结果如图 6 所示。

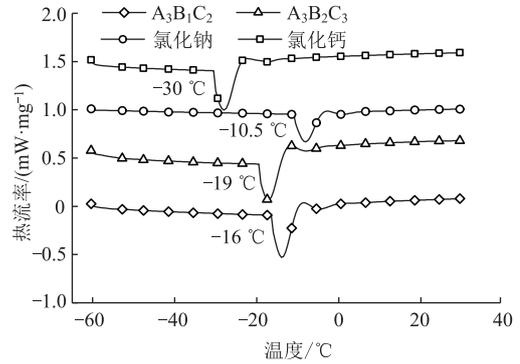


图 4 不同融雪剂的 DSC 热图

Fig. 4 DSC thermograms of various snow-melting agents

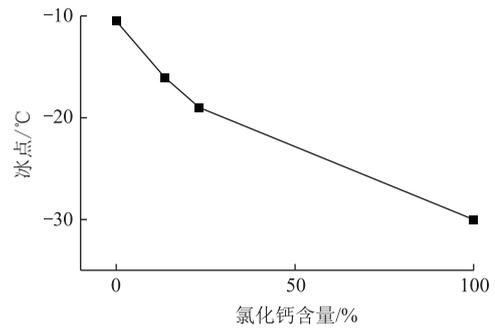


图 5 氯化钙含量对冰点的影响

Fig. 5 Influence of calcium chloride content on freezing point

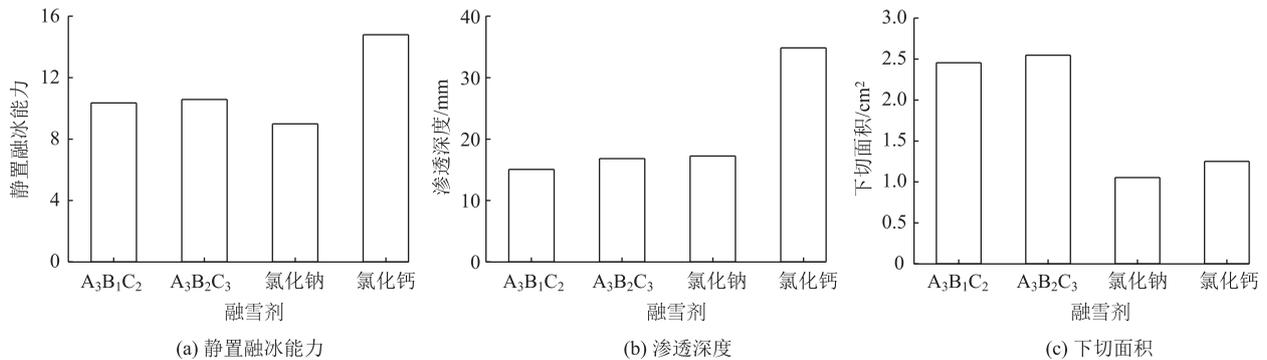


图 6 不同融雪剂的试验结果

Fig. 6 Test results of various snow-melting agents

(1) 不同融雪剂的静置融冰能力由高到低排序为氯化钙, $A_3B_2C_3$, $A_3B_1C_2$, 氯化钠。4 种融雪剂中氯化钙含量逐渐减小, 这说明氯化钙含量越高, 静置融冰能力越强。同时可以看出静置融冰能力的大小规律与冰点的大小规律一致, 可能是因为融雪剂对溶液冰点降低值的影响, 冰点降低值越大, 静置融冰能力越好。而氯化钙对溶液冰点降低值最大, 故增大氯化钙含量可增加融雪剂的静置融冰能力。

(2) 不同融雪剂的渗透深度由高到低排序为氯

化钙, 氯化钠, $A_3B_2C_3$, $A_3B_1C_2$, 这与静置融冰试验结果略有差异。这可能是由于自制融雪剂的配方中氯化钙占比较小, 在渗透过程中氯化钠成分起主导作用。因此 $A_3B_2C_3$ 和 $A_3B_1C_2$ 自制融雪剂配方中, 氯化钠含量较少的渗透能力较强。

(3) 不同融雪剂的下切面积由大到小排序为 $A_3B_2C_3$, $A_3B_1C_2$, 氯化钙, 氯化钠, 这与静置融冰试验和渗透试验结果略有差异。这是由于氯化钙的下切能力较氯化钠好, 且自制融雪剂中复配的 3 种

成分之间发生了协同作用,产生了 $1+1>2$ 的效果,故 $A_3B_2C_3$ 和 $A_3B_1C_2$ 配方融雪剂的下切面积均大于氯化钠和氯化钙。

(4) 各种融雪剂静置融冰试验、渗透试验和下切试验的结果存在一定差异。氯化钙的静置融冰能力和渗透能力最强,其他3种融雪剂相差不大。但2种自制融雪剂的下切能力显著优于氯化钠和氯化钙。这说明不同试验方法的原理不同,融冰试验为静置状态下融雪剂对容器内冰样融化质量的评价,渗透试验为对融雪剂在一定时间内穿透冰层深度的评价,下切试验为对融雪剂在冰-基质界面将冰从基体上剥离部分的评价,而工程中融雪剂融冰过程是不同方面综合作用的结果。因此,评价融雪剂融冰能力时应综合静置融冰能力、渗透能力和下切能力进行评价。

3.3 pH值

取平行测定结果的算数平均值为测定结果,利用pH值计测量的不同融雪剂pH值结果如图7所示。氯化钠, $A_3B_1C_2$, $A_3B_2C_3$ 的pH值差异不大,氯化钙的pH值小于其他3种融雪剂,由高到低排序为氯化钠, $A_3B_1C_2$, $A_3B_2C_3$,氯化钙,且 $A_3B_1C_2$ 和 $A_3B_2C_3$ 的pH值均为7左右,对环境损害不大。

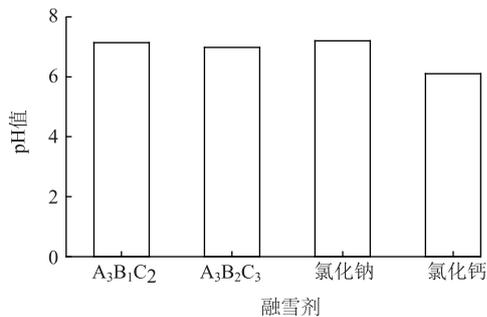


图7 不同融雪剂的pH值

Fig. 7 pH values of various snow-melting agents

3.4 碳钢腐蚀率

不同融雪剂的碳钢腐蚀试验结果如图8所示。腐蚀速率由高到低排序为氯化钠,氯化钙, $A_3B_1C_2$, $A_3B_2C_3$ 。 $A_3B_1C_2$ 和 $A_3B_2C_3$ 配方的碳钢腐蚀率均满足GB/T 23851—2017规范要求的小于 0.11 mm/a ,且自制融雪剂的碳钢腐蚀率显著低于2种传统氯盐融雪剂。2种含氯型融雪剂中氯化钙和醋酸钠质量分数更高,对碳钢的腐蚀速率更低,并且显著低于氯化钙和氯化钠的腐蚀速率。这可能是由于自制融雪剂中醋酸钠质量分数增加,导致氯离子浓度降低,从而减缓了碳钢的腐蚀过程。

3.5 植物种子相对受害率

不同融雪剂的种子发芽试验结果如图9所示。

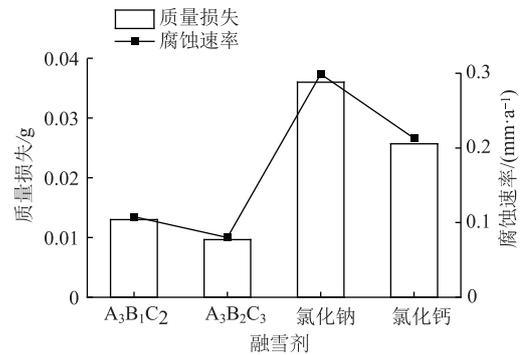


图8 不同融雪剂的碳钢腐蚀试验结果

Fig. 8 Carbon steel corrosion test results with various snow-melting agents

对植物种子伤害的程度由高到低排序为氯化钠, $A_3B_1C_2$, $A_3B_2C_3$,氯化钙。随着融雪剂中氯化钙和醋酸钠含量的提高,植物种子的相对受害率逐渐降低。氯化钙和醋酸钠含量越高,植物种子发芽越茁壮。这是因为氯化钙和醋酸钠对环境的负效应较小,减轻了氯化钠对土壤的损害,从而降低种子受害率。由试验结果可知,氯化钠和 $A_3B_1C_2$ 配比的植物种子相对受害率不满足规范要求,而 $A_3B_2C_3$ 配比的植物种子相对受害率满足规范要求的小于50%。

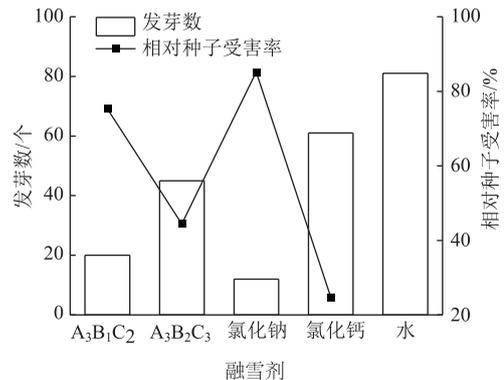


图9 不同融雪剂的种子发芽试验结果

Fig. 9 Seed germination test results with various snow-melting agents

氯化钙和 $A_3B_2C_3$ 的植物种子相对受害率虽然只有24.69%和44.44%,但浇灌了融雪剂溶液的植物种子芽短而小,而浇灌了纯净水的植物种子芽是长而茁壮的,这表明氯盐融雪剂对植物仍存在较大伤害。

4 结论

以氯化钠、氯化钙和醋酸钠作为核心成分,通过正交试验确定2种高效含氯型融雪剂的配比。采用融冰雪能力评价指标和环境影响评价指标,对2

种高效含氯型融雪剂和2种传统氯盐融雪剂的使用性能进行评价,得到结论如下。

(1) 氯化钠对静置融冰能力、渗透深度、下切面积的影响最大,其次是氯化钙,最后是醋酸钠。正交试验结果表明,在各因素不同水平下,氯化钠水平3(含量为69.8%),醋酸钠水平3(含量为7%),氯化钙水平2(含量为23.2%)均为提高静置融冰能力、渗透深度、下切面积的最佳条件。

(2) $A_3B_2C_3$ 融雪剂中的氯化钙含量比 $A_3B_1C_2$ 融雪剂增加了9.7%,冰点下降了18.6%。同时也对环境产生了更积极的作用,表现在碳钢的腐蚀率降低了25.9%,植物种子的相对受害率降低了41.0%。这说明氯化钙在融雪剂中的含量对其性能和环境影响有着重要的作用,应该根据实际情况合理地调节。

(3) 通过综合分析正交试验结果,得出了融雪剂的最优配比方案为氯化钠:氯化钙:醋酸钠=69.8:23.2:7.0,该配比方案下的融雪剂具有较高的pH值、较低的冰点、较小的种子相对受害率和碳钢腐蚀率,能够有效实现道路除雪除冰的目的。

参考文献:

References:

- [1] 徐剑,龚演,薛成,等. 沥青混合料用融冰雪盐化物材料评价指标研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(7): 1-6.
XU Jian, GONG Yan, XUE Cheng, et al. Study on evaluation indicators of snow-melting salinization-based materials used in asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(7): 1-6.
- [2] 滕厚军,张春海. 氯化物基沥青混合物长期融冰雪性能评价[J]. 中国建材科技, 2018, 27(1): 11-13.
TENG Houjun, ZHANG Chunhai. Evaluation of long-term anti-icing performance and moisture susceptibility of chloride based asphalt mixture [J]. China Building Materials Science & Technology, 2018, 27(1): 11-13.
- [3] 关永胜,张志祥,黄子杰,等. 不同融雪物质的化冰性能及评价方法研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 220-224.
GUAN Yongsheng, ZHANG Zhixiang, HUANG Zijie, et al. Study on deicing performance and evaluation method of different snow melting substances [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 220-224.
- [4] 戴晓峰,戴秉佑,杨文臣,等. 冬季桥梁沥青路面路表温度实时预估模型[J]. 公路交通科技, 2023, 40(8): 71-78.
JI Xiaofeng, DAI Bingyou, YANG Wenchen, et al. A real-time estimation model of road surface temperature of bridge asphalt pavement in winter [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(8): 71-78.
- [5] 宁贵财,康彩燕,陈东辉,等. 2005—2014年我国不利天气条件下交通事故特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 753-762.
NING Guicai, KANG Caiyan, CHEN Donghui, et al. Analysis of characteristics of traffic accidents under adverse weather conditions in China during 2005-2014 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(5): 753-762.
- [6] BAI Y H, CHEN W, CHEN B, et al. Research on electrically conductive concrete with double-layered stainless steel fibers for pavement deicing [J]. ACI Materials Journal, 2017, 114(6): 935-943.
- [7] YANG T, YANG Z J, SINGLA M, et al. Experimental study on carbon fiber tape-based deicing technology [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2012, 26(2): 55-70.
- [8] ZHONG K, SUN M, CHANG R. Performance evaluation of high-elastic/salt-storage asphalt mixture modified with Mafilon and rubber particles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 153-161.
- [9] 郭峰. 高弹蓄盐沥青混合料材料开发及性能研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2017.
GUO Feng. Study on development and performance of high elasticity salt-containing asphalt mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [10] 魏建国,傅广文,付其林. 氯盐融雪剂对沥青结合料路用性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 7-13.
WEI Jianguo, FU Guangwen, FU Qilin. Influence of chlorine salt snow-melting agent on road performance of asphalt binder [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 7-13.
- [11] 李雯雯,薛忠军,王春明,等. 不同因素对公路用撒播融雪剂碳钢腐蚀影响的试验研究[J]. 公路, 2021, 66(3): 318-322.
LI Wenwen, XUE Zhongjun, WANG Chunming, et al. Experimental study on the influence of different factors on the corrosion of snow-melting agent carbon steel [J]. Highway, 2021, 66(3): 318-322.
- [12] ZHANG L H, DUAN F, WU X R. NO and SO₂ removal and pore structure evolution during reburning with calcium magnesium acetate blended peanut shell [J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(2): 614-623.
- [13] 韩永萍,龚平,刘红梅,等. H₂O₂ 预氧化对BFA复合融雪剂性能的影响及其融雪机理[J]. 化工学报,

- 2016, 67 (10): 4461-4467.
- HAN Yongping, GONG Ping, LIU Hongmei, et al. Effect of H_2O_2 oxidation on property of BFA compound snow-melting agent and its snow-melting mechanism [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67 (10): 4461-4467.
- [14] 查湘义. CMA 融雪剂的制备及效益分析 [J]. *中外公路*, 2014, 34 (6): 257-260.
- ZHA Xiangyi. Preparation and benefit analysis of CMA snow melting agent [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2014, 34 (6): 257-260.
- [15] 吕悦晶, 党博, 张志伟, 等. 基于改进 SHRP 融冰试验的氯盐融雪剂性能研究 [J]. *中外公路*, 2024, 44 (3): 262-269.
- LÜ Yuejing, DANG Bo, ZHANG Zhiwei, et al. Performance of chlorine salt snow-melting agent based on improved SHRP ice-melting test [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44 (3): 262-269.
- [16] 张跃伟, 韩广文, 高宏达, 等. 高效环保复合型氯化钙镁盐融雪剂的制备及性能研究 [J]. *应用化工*, 2019, 48 (12): 2937-2939.
- ZHANG Yuewei, HAN Guangwen, GAO Hongda, et al. Preparation and properties of efficient and environmentally composite calcium magnesium chloride agent for snow melting [J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48 (12): 2937-2939.
- [17] WANG D D, ZHU Q, SU Y Y, et al. Preparation of $MgAlFe-LDHs$ as a deicer corrosion inhibitor to reduce corrosion of chloride ions in deicing salts [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174: 164-174.
- [18] 杨慧成. 蓄盐材料制备及其除冰融雪研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- YANG Huicheng. Study on the preparation and deicing snowmelt by Salt storage material [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [19] 信翔宇, 李超, 潘红, 等. 融雪剂对混凝土侵蚀机制与性能提升研究进展 [J]. *中国粉体技术*, 2023, 29 (6): 50-60.
- XIN Xiangyu, LI Chao, PAN Hong, et al. Research progress on corrosion mechanism and performance improvement of concrete by snow melting agents [J]. *China Powder Science and Technology*, 2023, 29 (6): 50-60.
- [20] 赵青. 新型融雪剂的研究 [D]. 西安: 西北大学, 2012.
- ZHAO Qing. Research on new types of snow melting agents [D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [21] 龙江虹, 曾平, 阳杰, 等. 环境友好型氯盐融雪剂的研制 [J]. *中国井矿盐*, 2014 (5): 1-4, 7.
- LONG Jianghong, ZENG Ping, YANG Jie, et al. Development of environmentally friendly chloride salt snow melting agent [J]. *China Well and Rock Salt*, 2014 (5): 1-4, 7.
- [22] 陈艳鑫, 吴红梅, 王明明, 等. 高效复合型氯盐融雪剂的制备研究 [J]. *辽宁化工*, 2014, 43 (8): 965-967.
- CHEN Yanxin, WU Hongmei, WANG Mingming, et al. Research on the preparation of high-efficiency composite chloride salt snow melting agent [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2014, 43 (8): 965-967.
- [23] 李鹏, 李波, 王刚, 等. 复合型道路融雪剂制备及其性能研究 [J]. *应用化工*, 2018, 47 (5): 924-927.
- LI Peng, LI Bo, WANG Gang, et al. Preparation and performance of composite road snow melting agent [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47 (5): 924-927.
- [24] 崔禹晴, 吕丹, 王威. 融雪剂的研究进展及发展方向 [J]. *广州化工*, 2022, 50 (12): 17-19.
- CUI Yuqing, LÜ Dan, WANG Wei. Research progress and development direction of snow melting agent [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50 (12): 17-19.
- [25] 苏志俊, 崔耀星, 徐俊辉, 等. 复合氯盐型融雪剂的制备及性能 [J]. *盐科学与化工*, 2022, 51 (1): 10-13.
- SU Zhijun, CUI Yaoping, XU Junhui, et al. Preparation and performance of composite chloride salt snow melting agent [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2022, 51 (1): 10-13.
- [26] 吴泽媚, 高培伟, 陈东丰, 等. 氯盐融雪剂对沥青混合料低温抗裂性的影响 [J]. *公路工程*, 2012, 37 (4): 26-30.
- WU Zemei, GAO Peiwei, CHEN Dongfeng, et al. Effect of chloride salt snow melting agent on low temperature crack resistance of asphalt mixture [J]. *Highway Engineering*, 2012, 37 (4): 26-30.
- [27] 郭云云, 杨捷, 宋茜茜, 等. 浅谈如何合理高效使用氯盐融雪剂 [J]. *中国井矿盐*, 2022, 53 (3): 35-37.
- GUO Yunyun, YANG Jie, SONG Qianqian, et al. Discussion on how to use chlorine salt deicing agent reasonably and efficiently [J]. *China Well and Rock Salt*, 2022, 53 (3): 35-37.