

# 基于改进SHRP融冰试验的氯盐融雪剂性能研究

吕悦晶<sup>1,2</sup>, 党博<sup>1</sup>, 张志伟<sup>2</sup>, 汤文<sup>1</sup>, 樊宇<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北武汉 430065; 2. 青海省公路局, 青海西宁 810001)

**摘要:** 氯盐融雪剂因其融冰除雪性能优异、价格低廉、易于获取而得到广泛应用。为探究氯盐融雪剂的温度适用性不同、标准不统一、撒布方式粗略等问题, 该文通过改进的SHRP融冰试验, 分析了温度、固态及撒布方式对NaCl、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> 3种常用氯盐融雪剂除冰性能的影响。试验结果表明: 氯盐融雪剂的除冰性能对温度具有显著的敏感性; MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub>两种融雪剂在融化过程中存在“放热”效应; 同种氯盐融雪剂在固态下的融冰效率高于液态下的; 同种氯盐融雪剂在不同撒布方式下融冰效率不同, 其中, 在线性撒布下除冰能力最强。根据试验结果, 建议使用固态线性撒布的方式, 并根据环境温度选择适宜的融雪剂。

**关键词:** 融冰除雪; 氯盐融雪剂; SHRP融冰试验; 撒布方式

中图分类号: U418.41

文献标志码: A

## Performance of Chlorine Salt Snow-Melting Agent Based on Improved SHRP Ice-Melting Test

LYU Yuejing<sup>1,2</sup>, DANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Zhiwei<sup>2</sup>, TANG Wen<sup>1</sup>, FAN Yu<sup>2</sup>

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China;

2. Qinghai Highway Bureau, Xining, Qinghai 810001, China)

**Abstract:** Chlorine salt snow-melting agent has been widely used because of its excellent ice-melting and snow-removing performance, low price, and easy access. In order to explore the problems of different temperature applicability, non-uniform standard, and rough spreading methods of chlorine salt snow-melting agents, this paper analyzed the influence of temperature, solid and liquid state, and spreading methods on the ice-melting performance of three commonly used chlorine salt snow-melting agents, namely NaCl, CaCl<sub>2</sub>, and MgCl<sub>2</sub>, through an improved SHRP ice-melting test. The test results show that the ice-melting performance of the chlorine salt snow-melting agent has strong temperature sensitivity. MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> snow-melting agents have an exothermic effect during the melting process. The ice-melting efficiency of the same chlorine salt snow-melting agent in the solid state is higher than that in the liquid state. The ice-melting efficiency of the same kind of chlorine salt snow-melting agent is different under different spreading methods, and the linear spreading shows the strongest ice-melting performance. Based on the test results, it is suggested to use the solid-state linear spreading method and select the appropriate snow-melting agent according to the ambient temperature.

**Keywords:** ice-melting and snow-removing; chlorine salt snow-melting agent; SHRP ice-melting test; spreading method

## 0 引言

融雪剂能有效促进路面冰雪融化, 减少积雪、结

冰等对交通安全的影响<sup>[1-5]</sup>。常用的融雪剂包括氯盐类、非氯盐类及混合型融雪剂<sup>[6-8]</sup>。氯盐融雪剂具有融冰能力好、价格便宜、易于获取等优点, 因此在冬

收稿日期: 2023-11-22(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52178427); 青海省重点研发与转化计划项目(编号: 2021-QY-207); 青海省交通运输厅科技项目(编号: 2022-01)

作者简介: 吕悦晶, 女, 博士, 教授. E-mail: lv Yuejing@126.com

季道路融冰除雪工作中得到了广泛应用<sup>[9-12]</sup>。

融雪剂的主要作用是降低冰雪冰点,加速冰雪消融,以期快速恢复路面抗滑性能,故国内外学者对其冰点、融冰能力等进行了大量试验研究。在试验方法方面:美国公路战略研究计划(SHRP)在《化学融雪剂评价方法手册》(SHRP-H-332)中给出了固体、液体融雪剂的融冰能力试验方法<sup>[13-14]</sup>;《融雪剂》(GB/T 23851—2017)<sup>[15]</sup>给出了以不同氯盐溶液溶质质量分数为基准的融雪剂性能检测方法;王腾等<sup>[16]</sup>提出了新的融冰能力测试方法,并分析了不同因素对融冰能力的影响;程洋洋<sup>[17]</sup>分析了国内外融雪化冰试验方法存在的不足并进行了优化。在性能研究方面:李萍等<sup>[18]</sup>通过凝冰点测试试验评价了不同融雪剂的除冰效果;Dan等<sup>[19]</sup>通过室内试验分析了除冰过程中盐溶液的体积和温度变化;谢康<sup>[20]</sup>采用试验分析了氯盐类、低氯盐类、多元醇类、醋酸盐类融雪剂的冰点、融冰能力及对环境的影响;关永胜等<sup>[21]</sup>通过室内试验研究了温度、固液态对融雪剂除冰效率的影响;霍尚斌<sup>[22-23]</sup>基于脉冲撒布技术对比分析了NaCl融雪剂在均匀与非均匀撒布方式下的融雪效率。以上文献从冰点、融冰能力、温度、物理状态、撒布方式等方面研究了融雪剂性能的相关问题,但均未对试验方法和系统的性能进行深入探讨评价。因此,有必要对目前的试验方法进行改进,并对融雪剂相关性能进行全面的评价。

该文对SHRP融冰试验进行分析与改进,提出以SHRP为基本的新试验方法并给出原理和操作步骤。通过室内试验研究温度、固液态及撒布方式对常用氯盐融雪剂除冰性能的影响,期望能够为冬季融冰除雪工作提供一定参考。

## 1 对SHRP融冰试验的改进

### 1.1 SHRP融冰试验

美国公路战略研究计划(SHRP)在1992年发布的《化学融雪剂评价方法手册》(SHRP-H-332)给出了评价融雪剂物理性能、化学性能、融雪性能等8个方面的试验方法。其中,固体融雪剂除冰试验(SHRP H-205.1)、液体融雪剂除冰试验(SHRP H-205.2)用于测定并评价融雪剂在一定温度下某一时间段内的除冰性能。试验在可控制温度的冷藏室或试验箱内进行,用有机玻璃试验盘制备冰样,有机玻璃试盘尺

寸为:直径22.860 cm,深1.905 cm,使用注射器抽取融冰产生的混合物后量取其体积来表征融冰量。

SHRP融冰试验完善了国标试验方法难以测定固态融雪剂的除冰性能,试验过程中容器表面会存在附着损失等弊端。但通过复现SHRP融冰试验发现,该方法在进行试验时存在一些因素的干扰,如:所选用玻璃试盘过大,会导致冰样出现大面积开裂;有机玻璃试盘导热性能较差,温度的改变会对结果造成较大误差;抽取盐水后,导致试盘内融雪剂有效成分减少,影响后续融冰效果等。

### 1.2 对SHRP融冰试验的改进

该文通过复现SHRP融冰试验,对该试验方法做出如下改进:

(1)通过预试验确定所需试盘的材料及尺寸,确保试验中不会因试盘尺寸过大而出现冰样开裂;同时试盘大小能够满足试验需要,最终确定的试盘参数见表1。

表1 试验仪器

Table 1 Test instruments

名称	规格/型号
电子分析天平	最小量程:0.1 g
金属试验盘	内径140 mm 深度10 mm 质量:136.1 g左右
卧式冷藏冷冻转换柜	BC/BD-318HD
程式恒温恒湿试验箱	AP-HX-150C3
注射器	60 mL
隔热手套	—
量筒	50 mL
烧杯	320 mL

(2)对所有试验选择固定的检测时间间隔,通过预试验及相关参考文献,确定时间间隔为10 min。

(3)增加冰样的厚度,同时减少融雪剂的用量,确保试验过程中不会出现洞穿冰样后仍存在大量融雪剂固体残留的情况。

(4)每个试验间隔抽取溶液测定后,迅速将其推回试盘内,避免融雪剂有效成分的减少导致的试验误差。

## 2 试验

### 2.1 试验仪器

试验过程中用到的仪器见表1。

## 2.2 试验试剂

试验所选用的融雪剂试剂见表2。

表2 试验试剂  
Table 2 Test reagents

名称	化学式	级别	颜色	形状
无水氯化钙	CaCl <sub>2</sub>	AR分析纯	白色	颗粒
氯化钠	NaCl	AR分析纯	无色	结晶
无水氯化镁	MgCl <sub>2</sub>	AR分析纯	白色	粉末

## 2.3 试验方法

该文基于SHRP融冰试验并对其进行改进。设计平行试验以探究温度、固液态及撒布方式对不同氯化物融雪剂除冰性能的影响。具体试验步骤如下：

(1) 称取金属试盘质量为 $m_0$ ，取3次称量结果的平均值。

(2) 用量筒量取等量蒸馏水并倒入烧杯内，分多次加入金属试盘，加至试盘深度3/4处，所用水质量为80 g。根据试验所需制备多个相同质量水样试盘并编号，同时放入冷冻柜中制冰。

(3) 设置恒温试验箱参数并称取等量融雪剂备用，记录融雪剂质量 $m_1$ ，根据试验研究因素设置不同的温度，选择融雪剂的种类、质量等。

(4) 称取初始冰盘质量 $m_2$ ，然后将融雪剂迅速撒入冰盘内并记录时间，最后置入恒温试验箱内进行试验。

(5) 每隔一定时间间隔用隔热手套取出试验箱内冰盘，并迅速用注射器抽取融化后盐水混合物，每次抽取选择固定的抽取次数(3次)，后称量冰盘剩余质量 $\Delta m$ 。则每个间隔时间内融冰质量 $m$ 为：

$$m = m_2 + m_1 - \Delta m \quad (1)$$

剩余冰块质量 $m_r$ 为：

$$m_r = \Delta m - m_0 \quad (2)$$

图1为试验操作过程。

## 2.4 误差分析方法

采用多次平行试验的方式来减小人为或外界环境等因素造成的误差。由于缺乏相关标准，参照平行样之间最大允许偏差的规定(不超过15%)，结合试验具体情况，平行测定结果的绝对差值取不大于10%。

一种试验同时制备4组试样，根据试验结果，剔除其中1组较差结果，取其余3组的算术平均值，而

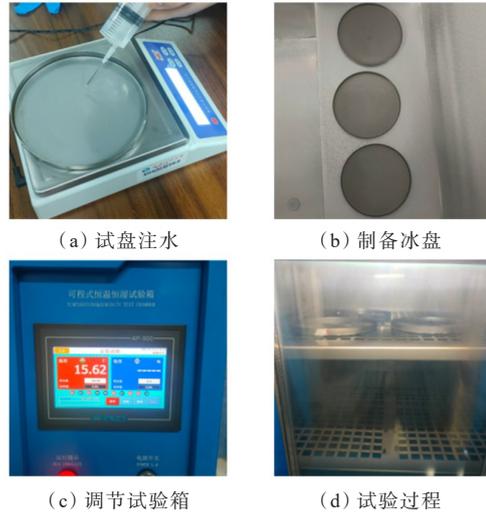


图1 试验操作过程

Figure 1 Test operation process

后计算在平均值上下浮动10%的融冰量范围作为误差控制线。若4组试验结果相关性均较差，则说明试验存在问题，此时检查试验材料和设备，重新进行试验，直至试验结果合理；若4组试验结果均符合要求，则剔除其中融冰量变化规律与其余3组出入较大的一组，取其余3组的算术平均值作为最终试验结果；其余情况挑选其中3组合格的结果进行分析讨论。

## 3 结果与讨论

### 3.1 平行试验结果分析

图2为-8℃时NaCl试验结果。

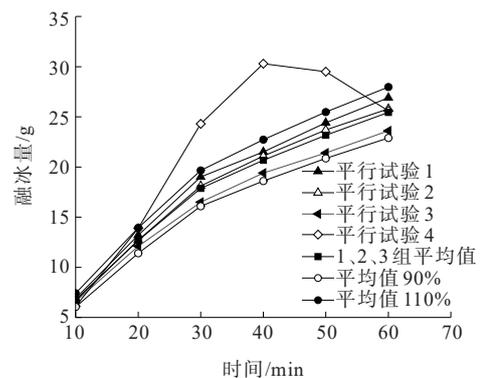


图2 -8℃时NaCl平行试验结果

Figure 2 Parallel test results of NaCl at -8℃

由图2可知：

(1) 平行试验组4变化规律与其余3组明显不同，因此剔除。分别以平行试验组1、2、3算术平均值的90%和110%作为误差控制线。

(2) 平行试验组1、2、3融冰量随时间变化的规

律接近,各个时间节点的值均在误差控制线范围内,因此可作为最终试验结果。对于平行试验组4,其融冰量在40 min前明显快于其他组,而在40 min后出现了明显的结冰现象。分析原因为:在制备冰样过程中,由于部分裂缝的存在,平行试验组4的冰样强度低于其他组的,出现了前期迅速融化的现象;而在40 min后,由于大量冰样的融化,NaCl被过度稀释,融冰能力下降,因而出现了明显的结冰现象。

其余两种材料的平行试验分析方法与上述类似,不再赘述,取得到的合理试验结果进行分析讨论。

### 3.2 温度对融冰效率的影响

根据各类融雪剂冰点的不同,试验探究了 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下NaCl, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下MgCl<sub>2</sub>, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下CaCl<sub>2</sub>在60 min内的融冰效果,控制各类融雪剂的质量为3 g,取3次平行试验结果的平均值作为试验结果并进行分析。

图3为各类融雪剂在不同温度下融冰量随时间的变化。融冰量为整个观测时间下的累计融冰量。

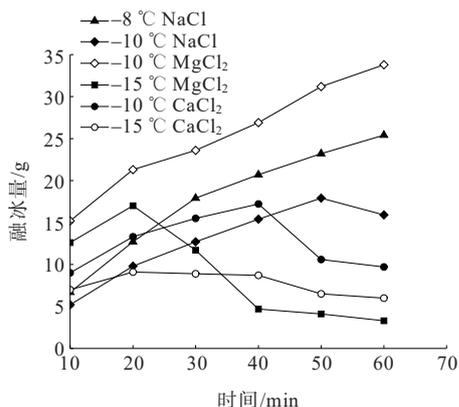


图3 融冰量随时间变化图

Figure 3 Variation of ice-melting amount with time

由图3可知:在不同温度下,NaCl、MgCl<sub>2</sub>及CaCl<sub>2</sub>的融冰性能存在明显差异。①由于NaCl溶液冰点较低,试验中仅选用了较为常见的低温情况来对比其在不同温度下的融冰效率, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下NaCl在整个观测周期内的融冰量明显高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的,在观测周期前50 min,两者变化规律相同。此外, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下未出现结冰状况,而 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下在60 min时出现了明显的融冰停滞和二次结冰现象;②两种温度下MgCl<sub>2</sub>在前20 min融冰量随时间累计上升,而在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,MgCl<sub>2</sub>在30 min时即出现了明显的结冰状况;③ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下CaCl<sub>2</sub>在40 min时出现了明显的结冰

现象, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下CaCl<sub>2</sub>在20~30 min时融冰过程开始变得缓慢,在50 min时出现了明显的结冰现象;④同一温度条件下( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),3类融雪剂的除冰效率从大到小的顺序为:MgCl<sub>2</sub>>CaCl<sub>2</sub>>NaCl。

根据试验结果,环境温度对融雪剂的除冰效率存在明显影响。常见的几类氯盐融雪剂均对环境温度具有显著的敏感性,MgCl<sub>2</sub>最为突出,其在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的融冰效率在三者中最优,而在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 却最先出现了二次结冰现象。在同等温度条件下,由于MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub>存在溶解“放热”效应且其自身溶液冰点低于NaCl,因而表现出更加优异的除冰性能。MgCl<sub>2</sub>由于其自身呈粉末状,颗粒最小,接触面多,且溶解性强,溶解放热多,因而除冰效果最佳。但在低温条件下( $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),其性能释放过早完毕,有效成分严重稀释,导致了融冰过程的快速停止,表现出最强的温度敏感性。

此外,在低温环境下使用融雪剂,其用量对整个除冰结果起决定性作用,用量过少易导致融冰停滞和二次结冰,进而影响整个除冰过程;过多则会造成融冰过度、资源浪费等问题。因此在综合考虑融雪剂含量对试验过程及结果影响的基础上,通过参考其他学者的研究及预试验选定3 g作为该文试验条件下融雪剂的用量。

### 3.3 固液态对融冰效率的影响

试验测定了相同质量融雪剂在固、液两种状态下的除冰量,通过测量剩余冰块质量的变化判断其除冰效率,固态融雪剂质量为3 g。为使对比明显,液态融雪剂以蒸馏水刚好能溶解固态盐的最小水质量进行配置。采用预试验方式确定比例,配得溶液的溶质质量分数分别为: $W(\text{NaCl})=21.28\%$ 、 $W(\text{MgCl}_2)=24.79\%$ 、 $W(\text{CaCl}_2)=23.08\%$ ,根据前期试验结果,NaCl选用 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为试验温度;CaCl<sub>2</sub>选用 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为试验温度;MgCl<sub>2</sub>选用 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为试验温度。以每10 min为一个时间间隔称量剩余冰块质量,图4为试验结果。

由图4可知:3种融雪剂在不同物理状态下剩余冰块的质量变化趋势大体相同。 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下NaCl在整个观测周期内融冰量稳定,前20 min,固、液态融雪剂除冰量基本相同;20~60 min时,随着时间的推移,固态表现出更优异的除冰性能。分析原因为:随着时间的推移,融雪剂溶液逐步被水稀释,导致其除冰能

力下降。液态融雪剂本身有效成分已被稀释,因而在除冰后期性能下降更为严重。

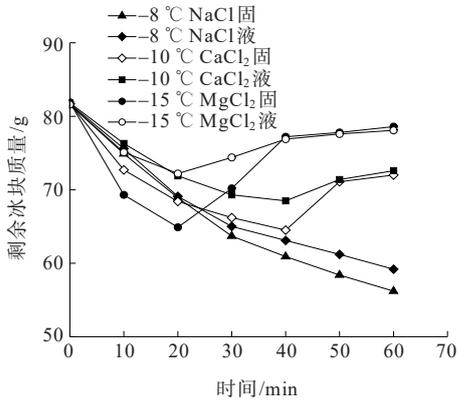


图4 固、液态下融冰效率对比

Figure 4 Comparison of ice-melting efficiency in solid and liquid states

-10 °C下 CaCl<sub>2</sub>在 40~50 min 时固、液态均出现了二次结冰的现象,这与 3.2 节温度试验现象一致。前 40 min 内,固态表现出更加优异的除冰性能。值得注意的是:MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub>在配制溶液或将固态撒入冰盘的过程中,均存在“放热”效应,配制溶液后的量筒外壁温度较高。除冰后期,固、液态在二次结冰上差距不大。分析原因为:在除冰阶段,固态 CaCl<sub>2</sub>由于质量分数更高、撒布时存在“放热”效应表现出更加优异的除冰性能。随着时间的推移,CaCl<sub>2</sub>溶液逐渐被稀释,加上配置溶液过程中“放热”效应的浪费,导致了其除冰性能的下落。

-15 °C下 MgCl<sub>2</sub>在 20~30 min 时出现融冰停滞,在 30~40 min 内出现二次结冰,在整个除冰过程中表现不稳定。分析原因为:MgCl<sub>2</sub>在融冰前期大量“放热”及本身的易溶解性,表现出非常优异的除冰性能。但在后期受温度、溶液稀释等因素影响,除冰性能表现不佳。根据试验结果,认为 MgCl<sub>2</sub>更适合在需要短期、迅速除冰雪的情况下使用,如冬季高速公路出入口、匝道等急需除冰雪来恢复交通的情况。

### 3.4 撒布方式对融冰效率的影响

目前最常用的融雪剂撒布方式为均匀撒布,其优势在于路面上每处冰雪都能得到等量的融雪剂,融冰除雪过程更加均匀;其缺陷在于单位时间内的融冰除雪效率过低,不利于迅速恢复交通。非均匀撒布方式能很好地提高融冰除雪效率,其优势在于集中融雪剂对关键点进行作业,集中区域融雪剂含量多、融雪效率高,从而对关键处冰雪迅速产生

作用。

该文设计试验,探究在同一温度下等量融雪剂在不同撒布方式下的除冰效率。试验采取均匀、线性、点状 3 种撒布方式进行对照,图 5 为各撒布方式示意图。试验温度为 -10 °C,融雪剂撒布量为 3 g,以每 10 min 为一时间间隔,通过每个时间间隔的融冰量来判断融冰效率,出现二次结冰后停止试验。

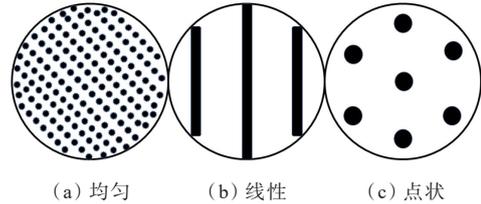


图5 撒布方式示意图

Figure 5 Spreading methods

图 6 为 -10 °C 下 NaCl 固态融雪剂各撒布方式下融冰量随时间的变化。融冰开始的前 10 min,均匀撒布的融冰量优于两种非均匀撒布;20~50 min 时,线性撒布方式表现出最优异的除冰性能,3 种撒布方式中均匀撒布融冰量最小;50~60 min 时,三者皆出现了不同程度的二次结冰现象,但非均匀撒布下的二次结冰量低于均匀撒布。3 种撒布方式的融冰效率从大到小依次是:线性撒布>点状撒布>均匀撒布。

由试验结果可知:在融冰前期,均匀撒布使冰层与融雪剂充分接触,从而有了更高的融冰量;在融冰中期,即固态融雪剂全部溶解后,线性、点状撒布方式由于局部融雪剂充足,表现出更优异的除冰性能;在融冰后期,由于均匀撒布方式对融雪剂的稀释更多,故二次结冰量较多;非均匀撒布由于局部区域仍含有较多残存融雪剂,故二次结冰量较少。

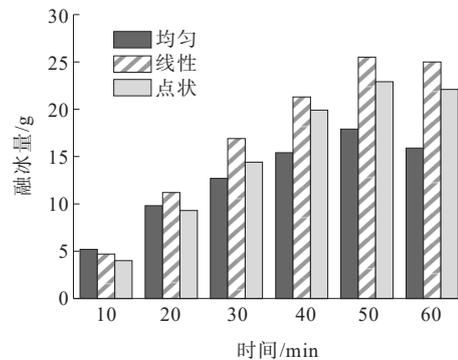


图6 -10 °C 下 NaCl 不同撒布方式的融冰量

Figure 6 Ice-melting amount of NaCl with different spreading methods at -10 °C

图7为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\text{CaCl}_2$ 固态融雪剂各撒布方式下融冰量随时间的变化。

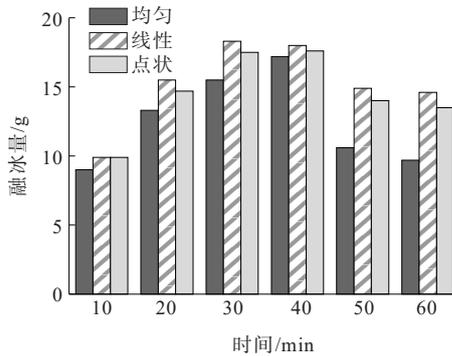


图7  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\text{CaCl}_2$ 不同撒布方式的融冰量

Figure 7 Ice-melting amount of  $\text{CaCl}_2$  with different spreading methods at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图7可知: $\text{CaCl}_2$ 在整个融冰过程中,非均匀撒布下的融冰量高于均匀撒布的。值得注意的是,在30~40 min时,3种撒布方式均出现了二次结冰现象,这与温度、固液态试验现象相同。3种撒布方式的融冰效率从大到小依次是:线性撒布>点状撒布>均匀撒布。

由于溶解“放热”效应的存在, $\text{CaCl}_2$ 在整个融冰周期内非均匀撒布下除冰能力始终最优。3种撒布方式均出现了二次结冰,但非均匀撒布仍旧保留着较少的二次结冰量,整体表现更为稳定。

图8为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\text{MgCl}_2$ 固态融雪剂各撒布方式下融冰量随时间的变化。前20 min内,3种撒布方式融冰量相差不大。20~90 min时,非均匀撒布方式表现出更优异的除冰性能。值得注意的是, $\text{MgCl}_2$ 直到100 min时才出现二次结冰,且除冰表现稳定,优于前两者。非均匀撒布下融冰能力优于均匀撒布,且非均

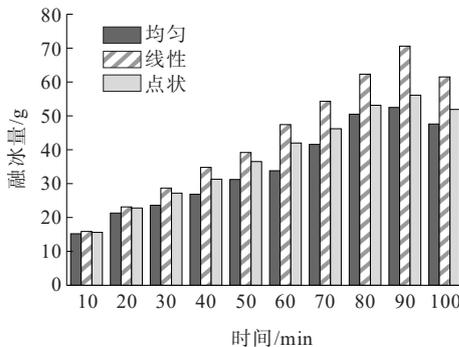


图8  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\text{MgCl}_2$ 不同撒布方式的融冰量

Figure 8 Ice-melting amount of  $\text{MgCl}_2$  with different spreading methods at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

匀撒布下仍旧保留着较少的二次结冰量。3种撒布方式的融冰效率从大到小依次是:线性撒布>点状撒布>均匀撒布。

$\text{MgCl}_2$ 优异的除冰性能,与其低冰点、易溶解性及物理状态有关。从3种撒布方式下各融雪剂的表现可以看出:在融冰中期,即融雪剂固态除冰转化为液态除冰开始,非均匀撒布相较于均匀撒布在单位时间内除冰性能更加优异,其中以线性撒布最为突出。此外,非均匀撒布对于二次结冰有着很好的抑制作用。

比较图6~8可以看出:3种撒布方式下, $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 分别在50 min、30~40 min和90 min时达到累计融冰量最大,随后融冰量开始减少,即出现了明显的二次结冰,这与温度试验中观察到的现象相符。

3种氯盐融雪剂中, $\text{NaCl}$ 冰点最高,溶解无“放热”效应,形态为无色晶体,大小均匀,因此在各时间段内融冰量稳定,至50 min时,随着融雪剂不断被稀释,融冰能力达到最大,出现二次结冰现象; $\text{CaCl}_2$ 为白色颗粒,形状不均匀,溶解性弱于其余两者,“放热”效应弱于 $\text{MgCl}_2$ ,故前期融冰能力强于 $\text{NaCl}$ ,而在30~40 min时融冰能力达到最大,后出现了二次结冰; $\text{MgCl}_2$ 表现最佳,融冰过程一直持续到90 min左右,这与其易溶解性、低冰点和“放热”效应有着很大关联。

## 4 结论

该文通过对SHRP融冰试验的改进,初步研究了温度、固液态及撒布方式对常用氯盐融雪剂除冰效率的影响,分析了融雪剂在不同温度、不同物态及不同撒布方式下融冰量随时间的变化。结论如下:

(1) 氯盐融雪剂的融冰性能对温度的变化具有显著的敏感性。温度高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{NaCl}$ 融雪剂融冰性能稳定,未出现二次结冰现象;温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{MgCl}_2$ 表现出最为优异的融冰性能,这与其自身溶液冰点较低、溶解时存在的“放热”效应及自身物理状态有关; $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下除冰表现不稳定,易出现二次结冰现象。此外,随着温度的降低,融雪剂融冰效率也会逐渐降低。同一温度条件下( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),3类融雪剂的除冰效率从大到小的顺序为: $\text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$ 。

(2) 同种氯盐融雪剂固态下的除冰性能优于液态下的。液态下溶液本身被稀释,导致有效成分含量不高, $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 在配制溶液的过程中浪费了自身溶解释放的热量,因而除冰效率低于固态下的。建议采用固态撒布为公路融冰除雪常用的撒布方式。

(3) 同种氯盐融雪剂在同一温度时,非均匀撒布下的除冰效率优于均匀撒布下的。非均匀撒布局部融雪剂含量大且融冰后仍有存留,因此无论在融冰阶段还是出现二次结冰后的表现均优于均匀撒布。3种撒布方式的除冰效率从大到小的顺序为:线性撒布>点状撒布>均匀撒布。建议可将公路融冰除雪作业的方式改为线性撒布。

各地标准不统一、撒布方式受人为影响大,往往造成融冰除雪不彻底、资源浪费、环境污染严重等问题。进一步研究融雪剂的合理撒布量及方式,以解决融冰除雪问题仍是未来需要深入考虑的问题。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 赵佃宝,朱辉,曲恒辉,等.基于工程路用性能的融雪剂性能评价[J].山东化工,2018,47(20):67-69.  
ZHAO Dianbao, ZHU Hui, QU Henghui, et al. The performance evaluation of the snowmelt agent based on its engineering practice[J]. Shandong Chemical Industry, 2018,47(20):67-69.
- [2] SHI X M, FORTUNE K, SMITHLIN R, et al. Exploring the performance and corrosivity of chloride deicer solutions: laboratory investigation and quantitative modeling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 36-44.
- [3] 段宝东,李俊,曹东伟,等.融雪剂对排水沥青混合料路用性能的影响[J].中外公路,2020,40(3):288-290.  
DUAN Baodong, LI Jun, CAO Dongwei, et al. Influence of snow-melting agent on road performance of drainage asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):288-290.
- [4] 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.  
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.
- [5] 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.  
SONG Yunlian, GAO Pan, JIANG Yu. Study on low temperature performance of asphalt mixture under salt freezing condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4):230-235.
- [6] 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.  
QIAO Shizhe, QIN Hao, HUANG Wanqing. Summary of research on anti-icing of asphalt concrete pavement in alpine region[J]. Highway, 2021, 66(8):337-341.
- [7] 郑武西,区桦,宗炜,等.道路融雪剂“精细化”使用技术研究与应用[J].公路,2022,67(1):344-348.  
ZHENG Wuxi, OU Hua, ZONG Wei, et al. Research and application of “fine” application technology of road snow melting agent[J]. Highway, 2022, 67(1):344-348.
- [8] 王文峰,吴冬生,吴春颖,等.新型融雪剂研究及工程应用[J].现代交通技术,2016,13(4):20-23.  
WANG Wenfeng, WU Dongsheng, WU Chunying, et al. Research and application of new snowmelt agent[J]. Modern Transportation Technology, 2016, 13(4): 20-23.
- [9] KE G J, ZHANG J, TIAN B. Evaluation and selection of deicing salt based on multi-factor[J]. Materials, 2019, 12(6):912.
- [10] WÄHLIN J, KLEIN-PASTE A. The effect of mass diffusion on the rate of chemical ice melting using aqueous solutions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 139:11-21.
- [11] 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.  
XIAO Xinbo, LI Hanfeng. Research and application of key technologies of snow-ice melting asphalt pavement for urban road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):90-94.
- [12] 江志刚,王子鹏,曹志龙,等.不同融冰剂对低冰点沥青混合料路用性能影响评价[J].中外公路,2021,41(6):245-249.  
JIANG Zhigang, WANG Zipeng, CAO Zhilong, et al. Influence of different deicing agents on pavement performance of low freezing point asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6):245-249.
- [13] CHAPPELOW C C, MCELROY A D, BLACKBURN R R, et al. Handbook of test methods for evaluating chemical deicers[J]. Deicing Chemicals, 1992.
- [14] 周斌,刘嵩,孙劲晖,等.融雪剂的融雪性能评价方法综述[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(5):62-64.  
ZHOU Bin, LIU Song, SUN Jinhui, et al. Review on evaluation methods of snow melting performance of snow

- melting agent[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(5): 62-64.
- [15] 全国化学标准化委员会无机化工分技术委员会. 融雪剂: GB/T 23851—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. SAC/AC63/SC1. Snow-melting agent: GB/T 23851—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] 王腾, 郭德栋, 周小鹏, 等. 道路融雪剂融冰能力试验方法的改进研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 195-198. WANG Teng, GUO Dedong, ZHOU Xiaopeng, et al. Research on test method improvement for deicing ability of road snow-melting agent[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 195-198.
- [17] 程洋洋. 道路除冰融雪剂关键评价指标与试验方法的优化研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2018. CHENG Yangyang. Road deicing snow melt agent key evaluation index and test methods of optimization research [D]. Ji'nan: Shandong Jiaotong University, 2018.
- [18] 李萍, 魏西应, 念腾飞, 等. 季节性冻土区沥青路面融雪剂凝冰点测试[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1561-1567. LI Ping, WEI Xiying, NIAN Tengfei, et al. Freezing point test of deicers on asphalt pavement in seasonal frozen region[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(5): 1561-1567.
- [19] DAN H C, TAN J W, DU Y F, et al. Simulation and optimization of road deicing salt usage based on water-ice-salt model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102917.
- [20] 谢康. 高速公路除冰融雪技术应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018. XIE Kang. Research on the application of expressway deicing and snow-melting technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [21] 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.
- [22] 霍尚斌. 融雪剂非均匀撒布技术的研究[J]. 山西交通科技, 2015(6): 14-17. HUO Shangbin. The study on non-uniform spraying technology of snowmelting agent[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2015(6): 14-17.
- [23] 霍尚斌. 脉冲式融雪剂撒布装置的研发[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(2): 87-91. HUO Shangbin. Research and development of pulsed snow-melting agent spraying device[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(2): 87-91.

## (上接第261页)

- WU Chuanhai, TI Jing, MA Jianping. Digitalization of asphalt pavement maintenance information based on holographic 3D detection technology[J]. Guangdong Highway Communications, 2023, 49(1): 1-7.
- [16] 陆树荣. 基于三维激光的车辙表面纹理特征研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 48-51. LU Shurong. Research on texture feature of rut surface based on 3D laser[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 48-51.
- [17] 方翠. 对称式线激光路面车辙检测技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. FANG Cui. Study on the symmetric line laser rut detection technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [18] 陈梁友, 闫浩. 基于数字全息和数字图像相关方法的面内位移测量[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0409002. CHEN Liangyou, YAN Hao. In-plane displacement measurement based on digital holography and digital image correlation[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0409002.
- [19] ZHENG Q, MASHIWA N, FURUSHIMA T. Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108626.
- [20] KULKARNI R, RASTOGI P. Three-dimensional displacement measurement from phase signals embedded in a frame in digital holographic interferometry[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3393-3397.
- [21] 郝雪丽, 孙朝云, 李伟, 等. 基于结构光的路面三维重构技术[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(8): 2303-2307. HAO Xueli, SUN Zhaoyun, LI Wei, et al. 3D road reconstruction research based on structured light[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(8): 2303-2307.
- [22] YAN H, PAN B. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital holography and digital image correlation[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5166-5169.