

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.037

# 低冰点沥青混合料融雪抑冰性能影响因素研究

周水文<sup>1,2,3</sup>,林芳<sup>4</sup>,张晓华<sup>1,2,3</sup>,张凌波<sup>1,2,3</sup>,蒋昊秋<sup>1,2,3</sup>

(1.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川成都 611141;2.公路建设与养护技术、材料及装备行业研发中心,四川成都 611130;3.四川省路面结构材料及养护工程实验室,四川成都 611130;4.凉山州公路管理局,四川西昌 615000)

**摘要:**采用电导率试验研究融雪抑冰成分释放规律,以冻结试验研究混合料降温规律,并以融冰率试验研究融雪抑冰性能。结果表明:低冰点材料融雪抑冰成分释放具有温度依赖性,高温为低温的3.49~3.77倍,颗粒型材料易溶于水,导致融雪抑冰成分释放速率快于填料型材料;冻结过程分3个阶段,结冰阶段的冰点和结冰持续时间受材料类型、掺量及加水量影响,ZG-10S冰点最低;增大掺量、减小加水量相当于提高溶液浓度,可有效降低冰点;融化时间对融雪抑冰性能影响最大也最为显著,其次是温度,原因在于释放速率的温度依赖性决定了融雪抑冰效果具有一定限度。

**关键词:**沥青混合料;低冰点;融雪抑冰;温度依赖性;释放;冻结

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

低冰点技术是在沥青混合料中掺入含融雪抑冰成分的低冰点材料,有效成分不断向路表缓慢释放,降低路面冰点实现融雪抑冰,是一种施工便捷、环保、低成本的主动除冰雪技术,在国内外获得了较为广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。近年来,国内外研究者对低冰点材料融雪抑冰机理、混合料性能、融雪抑冰效果及长效性等进行了大量研究。刘状壮<sup>[2]</sup>、赵晓华<sup>[3]</sup>依据“稀溶液依数性”,认为融雪抑冰成分在路表形成稀溶液,减缓了H<sub>2</sub>O—H<sub>2</sub>O氢键结构形成,从而降低冰点,抑制路面结冰;研究表明:低冰点材料加入会导致沥青混合料高温性能和水稳性能变差,低温性能变化不大<sup>[4-7]</sup>;刘状壮等<sup>[5]</sup>采用硝酸盐法证明车轮碾压作用加速了融雪抑冰成分的释放;交通行业标准推荐采用融冰法,将冻结的冰块放置在混合料表面,定期称量融化的液体质量,计算融冰速率表征融雪化冰能力<sup>[8]</sup>;Giuliani等<sup>[9]</sup>、谭忆秋等<sup>[10]</sup>、Nilssen等<sup>[11]</sup>通过测试层间溶液温度、电阻及在并行冻结时的吸放热等来判断溶液冰点,从而评价材料最低使用温度;

Konstantin等<sup>[12]</sup>、周纯秀等<sup>[13]</sup>采用破冰法并结合图像分析技术定性判定和定量分析冰面破损情况,评价融雪抑冰效果;谭忆秋等<sup>[10]</sup>、曲雅楠等<sup>[14]</sup>、Zheng等<sup>[15]</sup>采用冻结力法研究冰—路界面冻结强度与温度、混合料类型等的关系,证明低冰点混合料可降低界面黏结强度。

目前中国生产的低冰点产品较多,主要包括颗粒型和填料型两种,但缺乏系统的对比,融雪抑冰效果评价方法多侧重于某个方面,而铺筑路面的实际效果受到饱水条件、环境温度、冰雪厚度、材料掺量及融化时间的影响,目前此研究尚不完善。本文采用电导率试验研究低冰点混合料在不同温度条件下的释放规律,采用冻结试验研究混合料降温规律,基于融冰率试验研究融化时间、饱水条件、环境温度等因素对融雪抑冰效果的影响,并进行显著性排序,为低冰点混合料应用提供参考。

## 1 原材料与试验

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 沥青

沥青为SBS改性沥青,其主要技术性能指标见表1。

收稿日期:2022-09-10(修改稿)

基金项目:四川省交通运输发展战略和规划科学研究院项目(编号:510201201910978);四川省公路规划勘察设计研究院有限公司项目(编号:2018-YL-07);四川省交通运输科技项目(编号:2020-A-02)

作者简介:周水文,男,硕士,工程师.E-mail:zswht@sina.com

表 1 SBS 改性沥青性能指标

针入度(25℃,100 g,5 s)/ (0.1 mm)	延度(5℃)/ cm	软化点/ ℃	老化后(163℃,85 min)			PG 等级
			质量损 失/%	残留针入度 (25℃)/%	延度 (5℃)/cm	
53	30	81.3	0.6	70	16	PG 70-22

### 1.1.2 集料

本研究所用粗集料为四川产玄武岩,细集料为四川产石灰岩机制砂,玄武岩集料性能如表 2 所示,

表 2 玄武岩集料性能指标

项目	单位	测试结果	技术要求
压碎值	%	9.0	≤28
洛杉矶磨耗损失	%	7.8	≤30
磨光值(PSV)		42	≥40
针片状颗粒含量	%	3.3	≤12
软弱颗粒含量	%	0.2	≤3
含水率	%	0.7	≤2
坚固性	%	0.3	≤10

由表 2 可见粗集料具有非常好的性能。

### 1.1.3 低冰点材料

常用低冰点材料为 RAA、MFL 和 ZG-10S。RAA 颗粒型材料是由热可塑性人工合成材料包裹低冰点成分混合加工而成,MFL 和 ZG-10S 填料型材料由多孔载体吸附融雪抑冰成分,添加憎水剂、偶联剂等加工而成。3 种材料的外观如图 1 所示,基本性能如表 3 所示。颗粒型材料有效成分含量、吸湿性高于填料型,但密度小于填料型,更容易吸收空气中的水分而形成稀溶液。

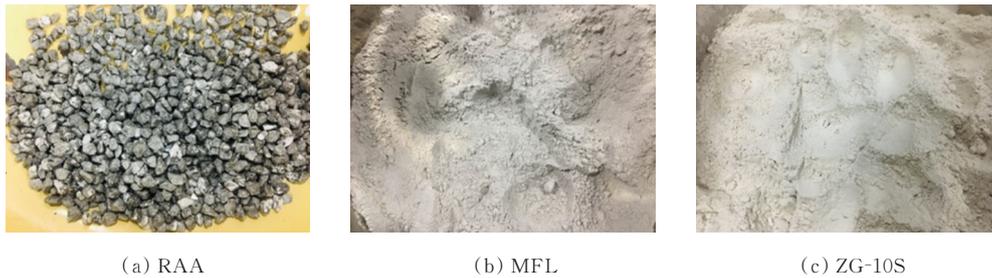


图 1 低冰点材料

表 3 低冰点材料技术指标

材料	外观	毛体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	粒径/mm	pH	有效盐分含量(质 量分数)/%	耐热性 指数/%	吸湿性/ %
RAA	灰白色颗粒	2.003	2.36~4.75	9.0	34.3	0.01	22.4
MFL	灰色粉末	2.343	<0.075	8.0	26.6	0.01	10.4
ZG-10S	淡黄色粉末	2.332	<0.075	8.8	29.5	0	14.3
技术要求	—	≥1.7	≤5,≤0.3 <sup>①</sup>	≥8	≥45,≥40 <sup>②</sup>	≤0.5	—

注:① 颗粒型粒径应≤5 mm,填料型粒径应≤0.3 mm;② 颗粒型含量应≥45%,填料型含量应≥40%。

## 1.2 试验

### 1.2.1 混合料组成

采用 AC-13C 型沥青混合料,矿粉掺量为 5%,油石比为 5.0%,目标空隙率为 4%,推荐 RAA 掺量为 5%,替代 3% 的 2.36~4.75 mm 粒径的集料;MFL 掺量为 5%,全部替代矿粉;ZG-10S 掺量分别为 3%、4% 和 5%,替代相应比例的矿粉。

### 1.2.2 电导率试验

电解质溶液里,有阴离子和阳离子,当有外加电

场作用时,阴阳离子向相反方向移动,从而产生导电现象,在电导率仪上可以显示出读数<sup>[16]</sup>。采用 DDS-307A 型电导率仪,首先配置标准浓度的 NaCl 溶液,测试电导率,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出:随着温度升高,电导率略有增大,电导率随浓度增加呈线性增加趋势,回归得到 5℃、25℃ 和 60℃ 时电导率与溶液浓度的关系曲线分别如式(1)~(3)所示。

$$\delta = 1260.2c - 401.0 \quad (1)$$

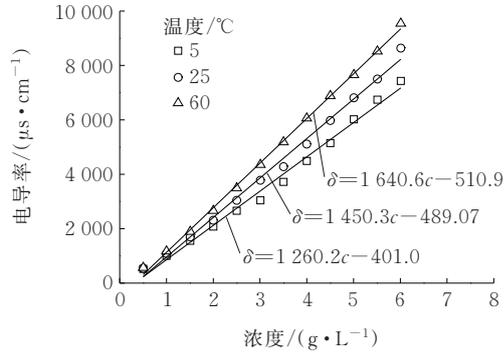


图2 NaCl溶液标准电导率曲线

$$\delta = 1450.3c - 489.07 \quad (2)$$

$$\delta = 1640.6c - 510.9 \quad (3)$$

式中: $c$ 为溶液浓度( $\text{g/L}$ ); $\delta$ 为电导率( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )。

低冰点沥青混合料电导率测试方法:取双面击实75次制备的标准马歇尔试件,将试件浸泡在1500 mL的烧杯中,加入750 mL蒸馏水,在5℃、25℃和60℃下恒温水浴中保温,测试溶液的电导率。

### 1.2.3 冻结试验

目前研究者进行冻结试验时,主要采用单一温度或者阶梯式降温,保温一定时间后观察试件表面冻结状态<sup>[17-18]</sup>,实际路面降温过程非常迅速且为连续式降温,因此,本文采用连续式降温,而不采用阶梯式降温,具体试验方法如下:成型标准马歇尔试件,冷却后不脱模,在试件的一面中心粘贴温度传感器,将试件与试模接触的边做密封处理,按照冰层厚度(4 mm、6 mm和8 mm)倒入相应质量的水,将传感器浸没,浸泡3 h后,放入-18℃冰箱中进行降温,测试冻结过程中溶液温度变化,并观察溶液冻结的状态。

### 1.2.4 融冰率试验

参照交通行业标准<sup>[8]</sup>对融冰率试验进行了修正,考察冰层厚度、环境温度、融化时间等因素的影响,试验步骤如下:

(1)按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中T0702方法成型4个直径为100 mm的马歇尔试件,试件冷却后脱模,其中两个试件按照T0729方法进行真空饱水处理,另一组不处理。

(2)按照4 mm、6 mm和8 mm冰层厚度往硅胶模(直径100 mm)中加入相应质量的纯净水,在-18℃条件下冻结成冰块备用。

(3)将处理过的试件分别放入-5℃、-10℃

和-15℃低温环境中保温4 h。

(4)将冰块取出,快速称量质量 $M$ 后,立即放在试件表面一并恒温4 h,每隔1 h取出冰块称量残留质量 $m$ ,并用吸水纸将试件表面的水分吸干。

(5)按照式(4)计算保温不同时间的融冰率 $R$ ,准确至0.1 g。

$$R = \frac{M - m}{M} \times 100\% \quad (4)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 电导率试验

3种材料25℃时电导率随时间变化情况如图3所示。

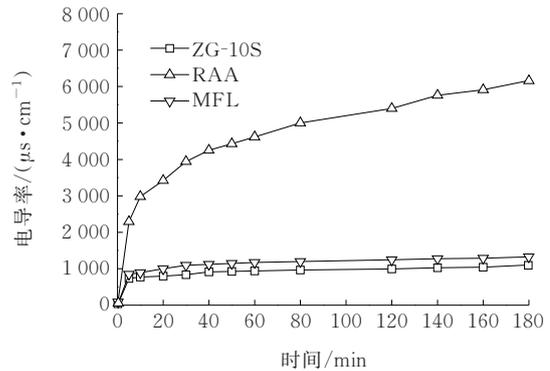
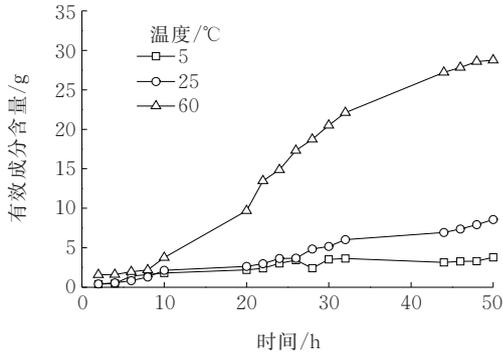


图3 不同材料电导率

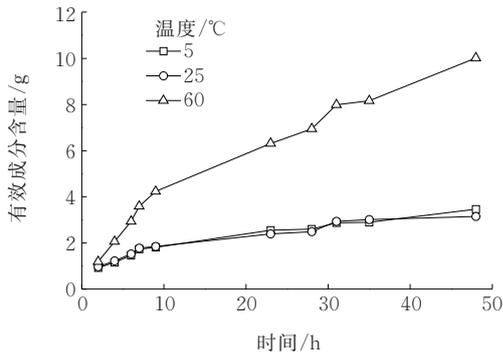
从图3可以看出:随着浸泡时间增加,溶液电导率不断增大,且前20 min析出速度很快,随后增长速率逐渐减缓,浸泡相同时间时,3种材料电导率排序为: $\delta(\text{RAA}) > \delta(\text{MFL}) > \delta(\text{ZG-10S})$ , $\delta(\text{ZG-10S})$ 与 $\delta(\text{MFL})$ 比较接近,几乎只有 $\delta(\text{RAA})$ 的1/5。分析原因:RAA吸湿性强,极易溶于水中,而MFL和ZG-10S吸湿性小,不易溶于水,导致融雪抑冰成分释放速率显著小于RAA。

RAA和MFL混合料在5℃、25℃和60℃浸泡48 h,测试期间电导率的变化,根据式(1)~(3)换算成质量浓度,进一步换算成有效成分质量(图4)。

从图4可以看出:两种材料释放速率均随着温度升高而不断加快,由5℃到25℃释放速率变化不大,但由25℃增加到60℃时,释放速率显著增加。对25℃和60℃相同时间下的释放量进行回归,如图5所示。

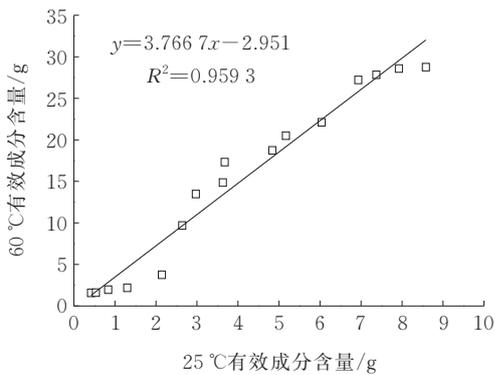


(a) RAA

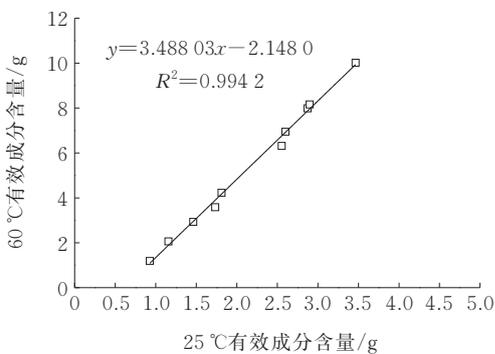


(b) MFL

图 4 不同温度下释放曲线



(a) RAA



(b) MFL

图 5 不同温度回归曲线

从图5可以看出:两个温度下的释放量具有很好的线性相关性,相关系数超过了0.9,两种材料60℃释放速率分别为25℃的3.77倍和3.49倍,可见低冰点材料释放具有明显的温度依赖性,高温多雨的夏季快速释放,而真正需要融雪化冰的冬季缓慢释放。因此,低冰点材料释放速率的温度依赖性增加了不必要的成分损耗,从而降低了融雪抑冰功能的持久性,同时阻碍冬季有效成分释放,削弱了融雪抑冰效果。

### 2.2 冻结试验

#### 2.2.1 材料影响

3种低冰点材料全部按5%掺量成型马歇尔试件,加入形成冰层厚度6mm的水(48.6g)进行冻结试验,试件冻结后状态如图6所示,冻结过程中温度变化如图7所示。



(a) ZG-10S

(b) MFL



(c) RAA

图 6 不同材料冻结状态

从图6可以看出:试件表面溶液由于有融雪抑冰成分存在,冻结后呈模糊状态,且表面有明显的冰膜,冰膜的存在会降低冰层与路面的黏结作用,也有利于除冰雪机械快速除冰。

从图7可知:

(1) 溶液冻结分为3个阶段:①快速降温阶段,随着保温时间增加,温度急速下降;②结冰阶段,随着保温时间增加,温度基本不变或者缓慢下降,与试

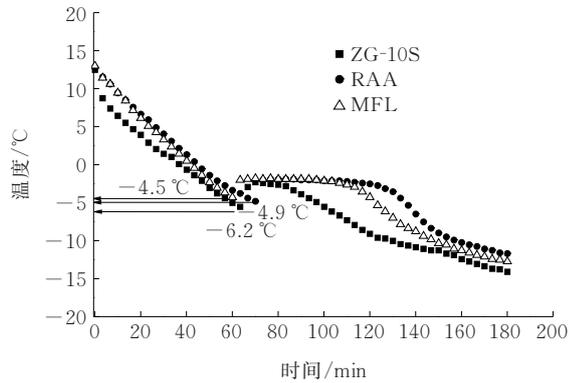


图7 不同材料冻结过程温度变化

模接触部分开始出现薄冰,慢慢增多,直至全部结冰,持续时间20~60 min;③冻结阶段,随着保温时间增加,降温速度再次加快,但比快速降温阶段速度明显要慢。

(2)对于不同材料,出现回升的温度点、冻结持续时间均不相同,出现温度回升点表明溶液开始结冰释放大量热量,这就是溶液的冰点,冰点越低,代表材料适用的温度范围更广,冻结持续时间越长,表明材料抑制结冰的能力越强。ZG-10S开始结冰温度最低为 $-6.2^{\circ}\text{C}$ ,但结冰阶段持续时间最短,RAA结冰温度次之为 $-4.9^{\circ}\text{C}$ ,结冰阶段持续时间最长,MFL结冰温度最小为 $-4.5^{\circ}\text{C}$ ,结冰阶段持续时间居中。由此可见,3种材料中,ZG-10S适用温度范围更广,但抑制结冰能力最差,RAA适用温度范围居中,抑制结冰能力最强,MFL适用温度范围最窄,抑制结冰能力居中。

### 2.2.2 材料掺量影响

采用ZG-10S掺量分别为3%、4%和5%,加入形成6 mm冰层厚度的水(48.6 g)时冻结过程中温度变化如图8所示。

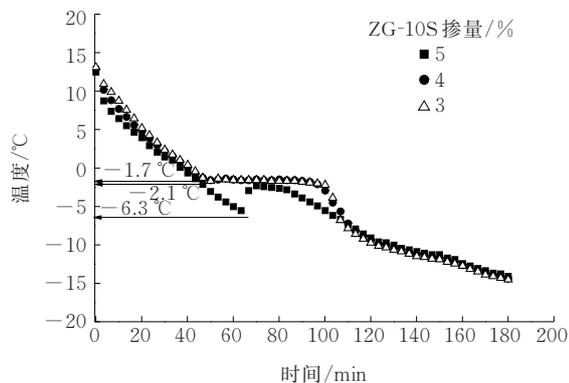


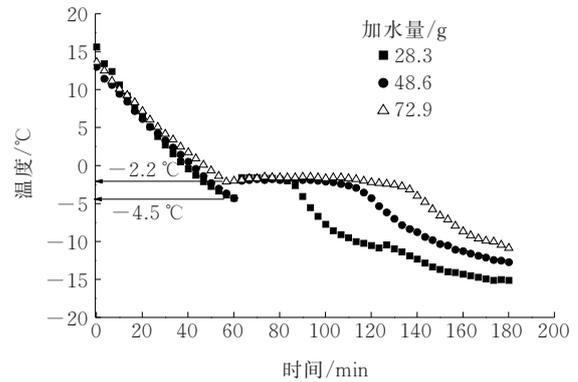
图8 不同ZG-10S掺量下冻结过程温度变化

从图8可以看出:随着掺量增加,冻结曲线不断向下移动,结冰温度不断降低,3%和4%ZG-10S掺

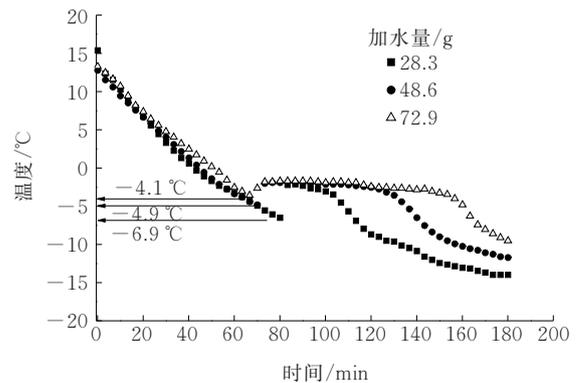
量下的变化不大,5%掺量变化较大,结冰温度下降了 $4.1^{\circ}\text{C}$ ,结冰阶段持续时间也缩短了将近0.5 h。由此可见,提高低冰点材料的掺量,在加入相同量水时,相当于增加了溶液浓度,根据稀溶液依数性,冰点降低幅度与溶液中溶质浓度正相关,因而可以大幅降低路面冰点。

### 2.2.3 加水量影响

采用MFL和RAA,分别加入形成冰层厚度3 mm、6 mm和9 mm的水(相当于28.3 g、48.6 g和72.9 g的加水量),冻结过程中温度变化如图9所示。



(a) MFL



(b) RAA

图9 不同加水量冻结过程温度变化

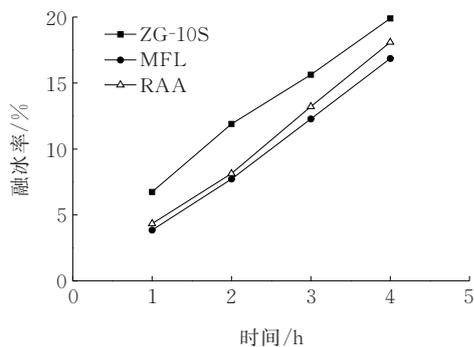
从图9可以看出:两种材料规律一致,随着加水量增加,结冰温度不断升高,结冰持续时间不断增大,RAA的变化幅度明显大于MFL,由28.3 g增加到72.9 g,结冰温度升高了 $2.8^{\circ}\text{C}$ ,持续时间增加了1 h。可见,由于加水量增加,相当于对溶液进行稀释,融雪抑冰成分的浓度减小,根据稀溶液依数性原理,导致冰点升高,同时,水量增加,全部冻结需要的热量更多,因而结冰阶段持续时间显著增加。

## 2.3 融冰率试验

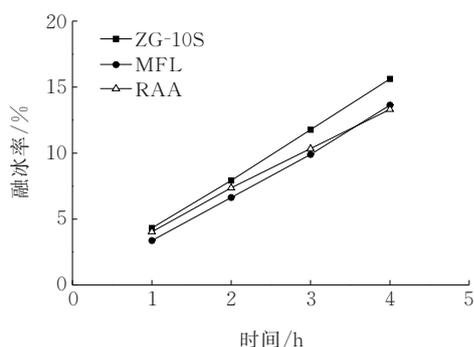
### 2.3.1 材料影响

3种材料掺量全部为5%时,在 $-10^{\circ}\text{C}$ 环境下测

试4 mm、6 mm冰层厚度的融冰率,试验结果如图10所示。



(a) 冰层厚度 4 mm



(b) 冰层厚度 6 mm

图10 不同材料融冰率随时间变化

从图10可以看出:两种冰层厚度不同材料融冰率规律相同,随着保温时间增加,融冰率呈直线增长,4 mm厚度时,融化时间由1 h增加到4 h,3种材料融冰率增加范围为13.0%~13.8%,6 mm厚度时,融化时间由1 h增加到4 h,3种材料融冰率增加范围为9.3%~11.3%。从不同材料来看,ZG-10S融冰率最大,MFL最小;随着厚度增加,不同材料融冰率均减小,ZG-10S减小幅度最大。

### 2.3.2 掺量影响

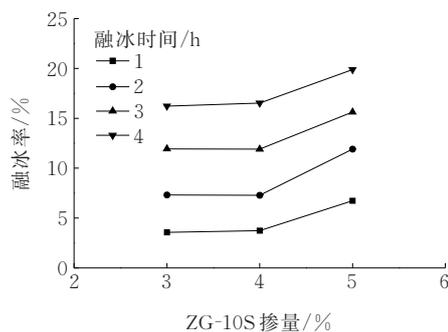
采用ZG-10S掺量分别为3%、4%和5%时,在-10℃环境下测试4 mm、6 mm冰层厚度的融冰率,试验结果如图11所示。

从图11可以看出:融化时间相同时,随着ZG-10S掺量增加,融冰率不断增大,冰层厚度为4 mm时,4%掺量比3%掺量融冰率略有增大,5%掺量增幅较大,不同时间下均增大了3%左右;6 mm时,随着ZG-10S掺量增加,融冰率不断增大,且融化时间越长,增幅越大,但均小于4 mm厚度。

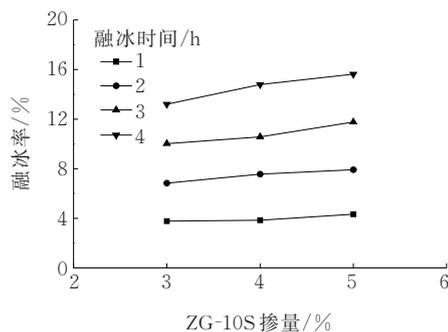
### 2.3.3 冰层厚度影响

ZG-10S沥青混合料在-10℃环境下测试4 mm、

6 mm和8 mm厚度融冰率,试验结果如图12所示。



(a) 冰层厚度 4 mm



(b) 冰层厚度 6 mm

图11 不同ZG-10S掺量融冰率

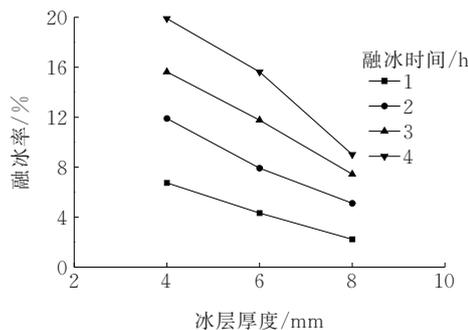


图12 不同冰层厚度融冰率

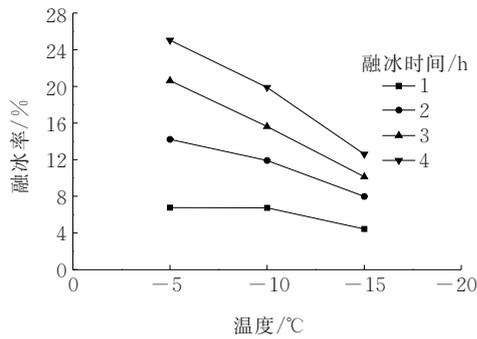
从图12可以看出:融化时间相同时,冰层厚度越厚,融化冰层质量越少,融冰率呈线性下降,且冰层越厚,随时间增加融冰率增长幅度越小;融冰4 h后,融冰率由4 mm的19.8%降低至8 mm时的9.0%,降低约1/2。可见,低冰点材料的融冰率有一定限值,冰层越厚时,需要融冰时间越长。

### 2.3.4 环境温度影响

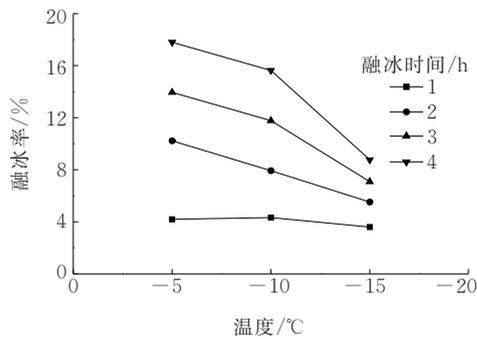
ZG-10S沥青混合料冰层厚度为4 mm和6 mm时,分别在-5℃、-10℃和-15℃环境中测试融冰率,试验结果如图13所示。

从图13可以看出:融化时间相同时,随着环境温度降低,融冰率显著减小,且随着融化时间增加和环

境温度的减小,减小幅度越来越大,以4 mm厚度冰层为例,融冰4 h后,融冰率由-5℃时的25%降低至-15℃时的12.6%,降低超过50%。可见,低冰点材料融冰率受温度影响非常显著,特别是温度低于-10℃,融冰效果显著降低。分析原因,当路面稀溶液一定时,溶液冰点是保持不变的,当环境温度低于冰点时,融冰率显著降低,证明低冰点材料具有一定适用温度范围。



(a) 冰层厚度4 mm



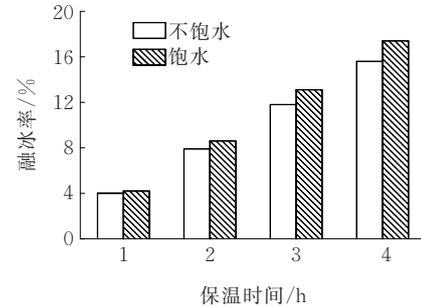
(b) 冰层厚度6 mm

图13 不同温度融冰率

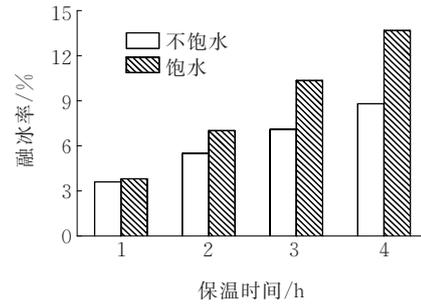
### 2.3.5 饱水条件影响

路面实际运营期间内部处于饱水与无水状态交替变化中,处于饱水状态时有利于加速内部的融雪抑冰成分向路表迁移,因而有必要研究饱水对融冰率的影响。将ZG-10S沥青混合料试件进行真空饱水处理后,冰层厚度为6 mm时,分别在-10℃和-15℃环境中测试融冰率,试验结果如图14所示。

由图14可知:与不饱水试件规律一致,随着保温时间的增加,融冰率不断增大。与不饱水试件相比,两个温度条件下,饱水试件的融冰率均有一定程度的增加,-15℃条件下增加的幅度微大于-10℃。可见,饱水处理有利于冰点下降材料向试件表面迁移,从而提高融冰效果。



(a) -10℃



(b) -15℃

图14 饱水与不饱水试件融冰率不(冰层厚度:6 mm)

### 2.3.6 因素影响分析

#### (1) 极差分析

极差分析可用于判断各因素对目标值影响大小排序,确定最重要的影响因素。计算*i*因素*j*个水平试验值之和 $K_{ij}$ ,然后计算同一水平的平均值 $\bar{K}_{ij}$ ,再按照式(2)计算某个因素的极差 $R_j$ 。根据试验结果,计算得到材料类型、融化时间、冰层厚度、温度、饱水条件和掺量的极差 $R_j$ ,如表4所示。

$$R_j = \max \bar{K}_{ij} - \min \bar{K}_{ij} \quad (2)$$

从表4可以看出:6个因素中,融化时间极差最大,掺量极差最小,排序为:融化时间>温度>冰层厚度>材料类型>饱水条件>掺量。可见融化时间对融冰率影响最大,其次是环境温度和冰层厚度,掺量影响最小。

表4 融冰率试验极差分析结果 %

处理号	材料	融化时间	冰层厚度	温度	饱水条件	掺量
$K_{1j}$	93.8	62.5	54.2	112.8	64.3	72.9
$K_{2j}$	74.2	121.8	39.7	93.8	78.1	76.2
$K_{3j}$	78.9	176.8	23.8	60.2	—	93.8
$K_{4j}$	—	231.4	—	—	—	—
$\bar{K}_{1j}$	11.7	4.2	13.5	14.1	8.0	9.1
$\bar{K}_{2j}$	9.3	8.1	9.9	11.7	9.8	9.5
$\bar{K}_{3j}$	9.9	11.8	6.0	7.5	—	11.7
$\bar{K}_{4j}$	—	15.4	—	—	—	—
$R_j$	2.4	11.2	7.5	6.6	1.8	2.6

注:① 材料类型采用图10种两个冰层厚度数据;② 融化时间采用图10和图14中所有数据;③ 冰层厚度采用图12数据;④ 掺量采用图11数据;⑤ 温度采用图13数据;⑥ 饱水条件采用图14数据。

## (2) 方差分析

方差分析可用于判断因素对目标值影响的显著性,统计  $i$  因素  $j$  水平下不同测试数值,进行方差分析,借助  $F$  检验,进行假设检验,确定因素对试验结果的影响是否显著。 $\alpha$  取 0.05,当  $F > F_{\alpha}$  时,表明因素对试验结果影响显著,当  $P\text{-value} < 0.05$  时,表明因素影响极其显著。

材料类型、融化时间、冰层厚度、温度、饱水条件和掺量 6 个因素的方差分析结果如表 5 所示。

表 5 融冰率试验方差分析结果

变异来源	SS	df	MS	F	P-value	$F_{\alpha}$
材料类型	27.469	2	13.734	0.661	0.528	3.56
融化时间	1 051.615	3	350.538	40.36	$5.05 \times 10^{-15}$	2.77
冰层厚度	115.245	2	57.62	2.715	0.119	4.26
温度	241.822	2	120.911	4.567	0.018	3.28
饱水条件	11.96	1	11.97	0.607	0.449	4.60
掺量	31.58	2	15.791	0.673	0.521	3.47

注:SS为离均差平方和;df为自由度;MS为均方差;F为F统计量;P-value为相应F值下的概率值; $F_{\alpha}$ 为在相应显著水平下的F临界值。

从表 5 可以看出:融化时间和温度均对融冰雪影响极其显著,冰层厚度、材料类型、饱水条件和掺量对融冰率影响不显著。

## 3 结论

(1) 低冰点材料融雪抑冰成分释放具有温度依赖性,高温释放速率显著快于低温,增加了不必要的损耗,削弱了融雪抑冰效果和持久性;颗粒型材料吸湿性更强,导致释放速率快于填料型材料。

(2) 低冰点沥青混合料冻结过程可分为快速降温、结冰和冻结 3 个阶段,其中冻结阶段开始冻结温度(冰点)和持续时间受材料类型、掺量及加水量的影响,ZG-10S 冰点最低;增大掺量、减小加水量相当于提高溶液浓度,可有效降低冰点,有利于材料在更低的温度条件下使用。

(3) 低冰点沥青混合料融雪抑冰效果受材料类型、融化时间、冰层厚度、温度、饱水条件和掺量的影响,融化时间影响最大也最为显著,其次是温度;受释放速率温度依赖性的影响,冬季释放量更少,决定了低冰点混合料融雪抑冰效果具有一定限度,具有适用的环境温度范围,且需要足够的融化时间。

## 参考文献:

- [1] OHICHI T, KONNO K, SAITOH T, et al. Development of ice-restraint pavement utilizing polymer mortar[J]. Hokkaidoritsu Kogyo Shikenjo Hokoku, 1996, 295:15-22.
- [2] 刘状壮. 沥青路面融雪抑冰材料的研发与应用[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [3] 赵晓华. 沥青路面多孔蓄盐集料化-力耦合效应及析盐特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [4] 曹林涛, 郭声波, 吕晓舜, 等. 盐化物对防冰沥青混合料的影响分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(6):72-74.
- [5] 刘状壮, 高杰, 张正伟, 等. 融雪抑冰沥青混合料路用性能及盐分溶析特性[J]. 公路, 2016, 61(8):199-204.
- [6] WANG Z J, LI F P, MA R, et al. Experiment on road performance of asphalt mixture with automatic long-term snowmelt agent[J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2013, 6(4):372-378.
- [7] 张丽娟, 孙青松, 韩森. 掺加盐化物融冰雪材料的沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2011, 31(4):269-273.
- [8] 交通运输部公路科学研究院, 安徽省交通控股集团有限公司, 北京航空航天大学, 等. 公路沥青混合料用融冰雪材料第 2 部分: 盐化物材料: JT/T 1210.2—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] NILSSEN K, KLEIN-PASTE A, WÅHLIN J, et al. Use of calorimetry to measure ice-melting capacity[J]. Transportation Research Record, 2017, 2613(1):1-7.
- [12] SOBOLEV K, NOSONOVSKY M, FLORES-VIVIAN I, et al. Anti-icing and de-icing superhydrophobic concrete to improve the safety on critical elements of roadway pavements[R]. Madison: National CFIRE, 2013.
- [13] 周纯秀, 谭忆秋. 橡胶颗粒沥青混合料除冰雪性能的影响因素[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6):672-675.
- [14] 曲雅楠, 李哲, 付志鹏, 等. 新型抑制结冰封层性能室内试验研究[J]. 石油沥青, 2012(3):58-61.
- [15] ZHENG C F, FENG Y P, MA Z, et al. Influence of mineral filler on the low-temperature cohesive strength of asphalt mortar[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133:1-6.
- [16] 孙健, 钱振东, 罗桑. 融冰化雪型沥青混合料路用性能的试验评价[J]. 公路, 2013, 58(12):204-207.
- [17] 夏慧芸, 李芳芳, 宋莉芳, 等. 自融雪材料制备及其融雪效果评价[J]. 公路, 2015, 60(7):269-274.
- [18] 付靖宜. 包覆氯盐融冰剂对沥青混凝土融冰和路用性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.