

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.037

盐冻条件下沥青混合料低温性能研究

宋云连,高盼,蒋宇

(内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为探究融雪剂融冰能力和不同盐冻条件对沥青混合料低温性能的影响,分别进行融冰能力试验、小梁弯曲试验和小梁弯曲蠕变试验。结果表明:当温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,融雪剂浓度在30%以上时才能起到融冰效果,但融冰质量较小,就融冰质量而言,P型融雪剂融冰能力优于H型融雪剂;当温度在 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,推荐P型和H型融雪剂浓度分别为20%和30%,此时不仅融冰效果较好,且能减小沥青路面的损害;当盐冻时间为24 h时,其小梁强度损伤已接近最大,与盐冻时间为72 h相比,其最大降低幅度仅为2.25%,而蠕变速率随着盐冻时间的增加而降低;灰色关联度分析发现融雪剂浓度对融冰质量的影响最为显著;方差分析得知,影响小梁抗弯拉强度的显著程度顺序依次是:温度>融雪剂浓度>盐冻时间。

关键词:融冰能力;低温性能;沥青混合料;灰色关联度;方差分析

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

中国北方地区冬季气温较低,在持续降雪环境下,为了道路交通流畅和行车安全,通常采用机械除雪、加热路面除雪、撒融雪剂等含盐类物质除雪^[1],氯盐类融雪剂不仅融雪效果好,而且价格便宜,因此被推广应用,但氯盐对沥青路面有腐蚀作用,进而导致沥青混合料的耐久性迅速下降^[2-5];为了使融雪剂对路面的损伤降到最低,大量科研人员研究不同浓度的融雪剂溶液对路面的损伤程度^[6],通过盐冻融循环次数来研究路面的衰变规律^[7-8],但北方地区气候复杂,沥青路面不仅受到融雪剂浓度的影响,而且盐冻时间、环境温度也会对沥青路面产生一定的影响,因此,研究融雪剂的浓度、盐冻时间、环境温度对沥青混合料低温性能的影响规律,对指导铺撒融雪剂具有实际意义。

本文主要考虑了P型融雪剂和H型融雪剂在不同浓度、不同温度下的融冰能力以及不同盐冻时间对沥青混合料低温性能的影响,研究融雪剂浓度、

盐冻时间、环境温度对沥青混合料性能影响的显著程度。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

1.1.1 集料及混合料级配

所用沥青为90#基质沥青,采用AC-13混合料类型,粗、细集料均产自呼和浩特赛罕区拌和站大青山玄武岩,性能均符合规范^[9]要求。AC-13矿料级配范围及合成级配见表1,通过马歇尔试验确定最佳油石比为4.988%。

1.1.2 融雪剂

本试验选用以 CaCl_2 占比约为71%的P型融雪剂和 NaCl 占比约为59%的H型融雪剂,P型融雪剂为白色针片状固体,H型融雪剂为白色粉末与褐色固体颗粒状混合物,根据规范^[10],采用溶解速率评价融雪剂的融雪化冰能力,试验结果如表2所示。

1.2 融冰能力试验

本试验方案是在规范^[10]测试方法上的进一步拓

收稿日期:2022-04-22

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(编号:2019MS05060);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号:NJZZ20064);内蒙古工业大学内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室开放基金项目

作者简介:宋云连,男,博士,教授.E-mail:751904198@qq.com

表1 AC-13矿料合成级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配上限	100	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0	
级配下限	100	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0	
合成级配	100	95.7	81.4	46.9	29.0	20.3	14.4	9.7	7.7	6.4	

表2 两种融雪剂(P型、H型)溶解能力测试结果

融雪剂类型	固体溶解速率/ (g·min ⁻¹)	溶解现象
P型	47.0	快速溶解,溶液无色透明,无杂质
H型	35.7	溶解较慢,溶液浑浊,有少量沉淀

展,在测定融雪剂相对融冰能力时,采取使用融雪剂溶液来融冰的测试方法,北方地区冬季气温通常在0℃以下,且气温多变,消除极端天气的影响,设置多组温度评价融冰能力,为实现上述想法,按照国标中的规定进行试验:①在8个型号相同的烧杯中分别加入15 mL的水,在(-10±1)℃的冰箱中冻3 h,制成8块形状相同的冰块,称取冰块与烧杯的质量记作 m_0 ;②将P型、H型融雪剂固体颗粒按照10%、20%、30%、40%的浓度溶解于溶液体积为2 L的烧杯中,搅拌均匀;③将高低温交变箱的温度分别调至-20℃、-10℃、0℃,待其稳定5 min后,取不同浓度的融雪剂溶液25 mL,将8个装有冰块的烧杯分成两组,一组分别倒入不同浓度的P型融雪剂溶液;另一组分别倒入不同浓度的H型融雪剂溶液,然后在高低温交变箱中静置0.5 h后,取出烧杯;④将烧杯中的融雪剂溶液与水一并倒出,此时称剩余冰块与烧杯的质量记作 m_1 ,此时融冰质量为 $\Delta m=m_0-m_1$ 。

1.3 小梁弯曲试验

本试验是模拟沥青路面在融雪剂溶液盐冻浸泡后,对沥青路面低温性能的影响,试验步骤如下:①制备250 mm×30 mm×35 mm棱柱体小梁试件,试件在放入融雪剂溶液之前,先进行1 h饱水;②将饱水后的试件放入装有不同浓度融雪剂溶液的容器中;③将容器中的试件放入温度为-20℃、-10℃、0℃的高低温交变箱;④由于不同温度对路面盐冻时间影响差异较大,根据北方地区气温特点,将盐冻时间分别设为8 h、24 h、72 h,盐冻后取出试件进行小梁弯曲试验。

1.4 小梁弯曲蠕变试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

(JTGE20—2011)^[11]进行试验。

2 试验结果分析

2.1 融雪剂浓度对融冰能力的影响

P型、H型融雪剂在不同温度、浓度下的融冰质量如图1所示。

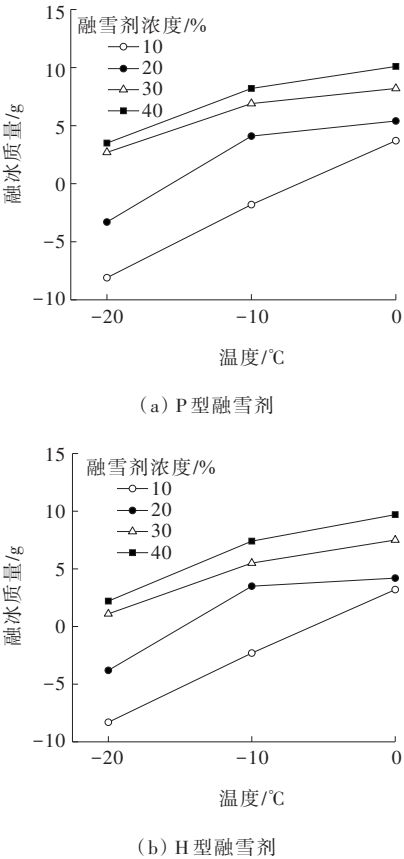


图1 不同温度下融雪剂的融冰质量

从图1可知:随着温度的升高、浓度的加大,P型、H型融雪剂的融冰能力都在逐渐增强,但-20~-10℃时的融冰量增长幅度大于-10~0℃时的融冰量增长幅度;当温度为-20℃时,P型、H型融雪剂在浓度为10%、20%时并不能起到融冰效果,浓度为30%、40%时虽能起到一定的融冰效果,但融冰质量较小,就融冰质量总体而言,P型融雪剂融冰质量优于H型融雪剂2.47%~59.26%;在中国北方地区,冬季温度通常在0℃以下,从融冰能力角度看,融雪剂浓度为20%~40%时能够起到较好的融冰效果。

2.2 融雪剂浓度、温度、盐冻时间对小梁抗弯拉强度的影响

小梁试验在不同融雪剂浓度、不同温度、不同盐

冻时间测得的试件强度计算公式如(1)所示,计算结果见图2。

$$R_B = \frac{3 \times L \times P_B}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

式中: R_B 为试件破坏时的抗弯拉强度(MPa); b 为跨

中断面试件的宽度(mm); h 为跨中断面试件的高度(mm); L 为试件的跨径(mm); P_B 为试件破坏时的最大荷载(N)。

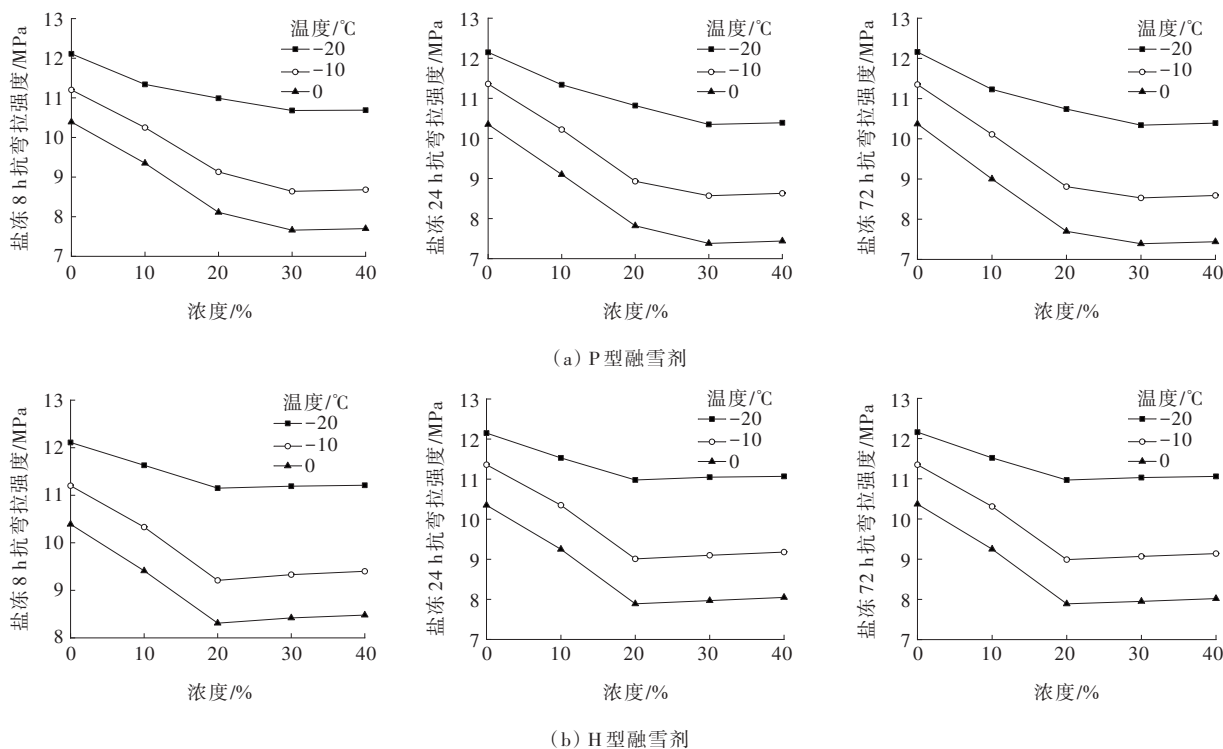


图2 融雪剂浓度对小梁试件抗弯拉强度的影响

由图2可知:随着浓度的提高,两种融雪剂对小梁抗弯拉强度的影响差异较大,对于P型融雪剂,浓度在30%时,其小梁的抗弯拉强度最低,对于H型融雪剂,浓度在20%时,其小梁抗弯拉强度最低,因为当融雪剂溶液浓度太高时,融雪剂颗粒不能完全溶于水,从而无法通过盐水溶液浸入小梁试件内部,从两种融雪剂对小梁损伤程度的大小来看,P型融雪剂对试件的损伤均高于H型融雪剂;当温度为-20℃时,推荐P型、H型融雪剂浓度为40%,当温度为-10~0℃时,推荐P型融雪剂浓度为20%和H型融雪剂浓度为30%,在此浓度下,不仅融冰效果较好,且能减小沥青路面的损害;当融雪剂浓度为0时,其抗弯拉强度并不随着盐冻时间的增长而降低,但在其他浓度时,盐冻时间从8h到24h时,其强度下降较大,而盐冻时间超出24h时,小梁抗弯拉强度下降较小,小梁抗弯拉强度在盐冻时间为24h时,其抗弯拉强度损伤已接近最大,与盐冻时间为72h相比,其最大降低幅度仅为2.25%;因此,为了降低沥青路

面的损伤,尽量做好排水,减少盐浓度的侵蚀,使盐冻时间对路面的损伤降到最低。

2.3 融雪剂浓度、盐冻时间对小梁蠕变速率的影响

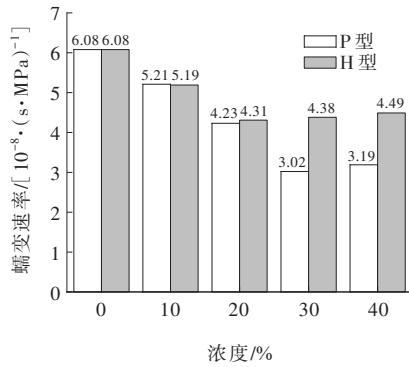
采用不同融雪剂浓度、不同盐冻时间时测得的小梁试件弯曲蠕变速率评价沥青混合料的低温变形性能,计算公式见式(2),计算结果如图3所示。

$$\epsilon(t) = \frac{6 \times h \times d(t)}{L^2} \quad (2a)$$

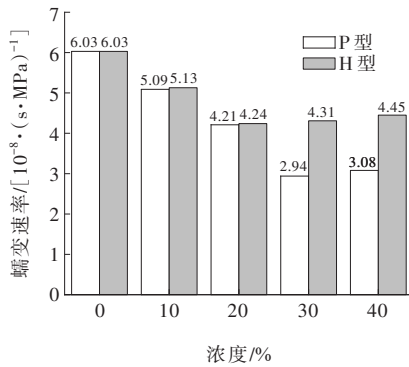
$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{(t_2 - t_1) \times R_B} \quad (2b)$$

式中: $d(t)$ 为实时跨中挠度(m); t_1 、 t_2 分别为蠕变曲线稳定期起点、终点对应时间(s); ϵ_1 、 ϵ_2 分别为 t_1 、 t_2 对应的弯曲应变; $\epsilon(t)$ 为试件梁底弯拉应变; ϵ_s 为弯曲蠕变速率[1/(s·MPa)]。

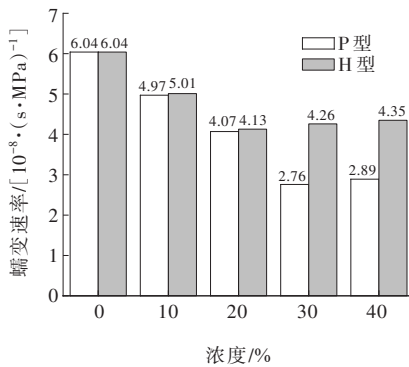
由图3可知:除盐浓度为0外,各小梁的弯曲蠕变速率都随着盐冻时间的增加而降低,蠕变速率越大,沥青路面抵抗开裂的性能越好,因此,减少盐冻时间能够提高沥青混合料的低温变形性能,P型融雪



(a) 盐冻 8 h



(b) 盐冻 24 h



(c) 盐冻 72 h

图3 融雪剂蠕变速率图

剂在浓度为30%时,蠕变速率最低,而H型融雪剂在浓度为20%时,蠕变速率最低,说明两种融雪剂在此浓度下对沥青路面的危害最大,在工程实际应用中,应尽量避免在此浓度下融雪化冰。

3 统计分析

3.1 灰色关联度分析

灰色关联度理论是以因素之间的发展态势、几何对应关系为依据来衡量因素之间的关联程

度,计算步骤如下:设参考数列为 $X_0=\{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$,比较数列为 $X_i=\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, (i=1, 2, 3, \dots, m)$,用均值法将数列归一,如式(3)所示:

$$Y_0 = \left\{ \frac{X_0(1)}{\bar{X}_0}, \frac{X_0(2)}{\bar{X}_0}, \dots, \frac{X_0(n)}{\bar{X}_0} \right\} \quad (3a)$$

$$Y_i = \left\{ \frac{X_i(1)}{\bar{X}_i}, \frac{X_i(2)}{\bar{X}_i}, \dots, \frac{X_i(n)}{\bar{X}_i} \right\} (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (3b)$$

比较数列和参考数列的关联系数如式(4),灰色关联度如式(5)所示:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |Y_0(k) - Y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |Y_0(k) - Y_i(k)|}{|Y_0(k) - Y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |Y_0(k) - Y_i(k)|} \quad (4)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (5)$$

式中: $k=1, 2, 3, \dots, n; i=1, 2, 3, \dots, m; \xi$ 为分辨系数,其值为0~1,一般取0.5; γ_i 为比较数列 X_i 对参考数列 X_0 的关联度系数,其值越大,关联度越大。

本研究以融雪剂浓度作为参考数列,以融冰质量(0℃)、抗弯拉强度(-10℃)、蠕变速率作为比较数列,融雪剂浓度的灰色关联度计算结果如表3所示。

由表3可知:无论P型融雪剂还是H型融雪剂,其融雪剂浓度对融冰质量的影响最为显著,对于P型融雪剂,浓度对抗弯拉强度影响的显著程度大于蠕变速率,而对于H型融雪剂,浓度对抗弯拉强度和蠕变速率的影响无显著差别,但随着盐冻时间的增加,二者的显著程度发生变化,P型融雪剂随着盐冻时间的增加,其浓度对抗弯拉强度影响的显著程度增大,对蠕变速率影响的显著程度减小,而H型融雪剂随着盐冻时间的增加,其浓度对抗弯拉强度和蠕变速率的影响程度与P型融雪剂的规律相反。

3.2 方差分析

为分析不同因素对小梁抗弯拉强度的影响,把融雪剂浓度、温度、盐冻时间两两作为一组进行双因素方差分析,计算结果如表4所示。

表 3 融雪剂浓度与各比较系列的灰色关联度结果

项目	融冰质量	抗弯拉强度			蠕变速率		
		8 h	24 h	72 h	8 h	24 h	72 h
P 型融雪剂 关联系数	0.777 5	0.401 7	0.399 2	0.400 1	0.340 5	0.341 2	0.335 4
	0.982 1	0.713 9	0.727 4	0.732 8	0.632 8	0.618 1	0.611 0
	1.000 0	0.652 5	0.653 7	0.657 0	0.530 0	0.527 6	0.518 4
关联度	0.796 4	0.424 2	0.425 5	0.426 9	0.380 2	0.376 9	0.371 8
	0.889 0	0.548 1	0.551 5	0.554 2	0.470 9	0.465 9	0.459 2
	0.792 7	0.368 6	0.361 6	0.361 8	0.351 7	0.351 1	0.352 0
H 型融雪剂 关联系数	0.798 0	0.729 2	0.736 4	0.734 7	0.764 1	0.768 7	0.776 1
	1.000 0	0.652 4	0.643 6	0.643 8	0.629 6	0.626 7	0.636 1
	0.991 6	0.391 9	0.389 2	0.388 8	0.390 0	0.391 6	0.391 0
关联度	0.895 6	0.535 6	0.532 7	0.532 3	0.533 8	0.534 5	0.538 8

表 4 方差分析结果

方差来源		F 值		$F_{\alpha}=0.05$	$F_{\alpha}=0.01$	显著性		
		P 型	H 型	临界值	临界值	P 型	H 型	
时间	8 h	融雪剂浓度	0.62	0.31	3.86	6.99		
		温度	4.47	4.34	3.86	6.99	*	*
	24 h	融雪剂浓度	0.66	0.42	3.86	6.99		
		温度	4.44	4.38	3.86	6.99	*	*
	72 h	融雪剂浓度	0.56	0.43	3.86	6.99		
		温度	4.39	4.38	3.86	6.99	*	*
浓度	10%	盐冻时间	8.63	7.60	5.14	10.90	*	*
		温度	958.42	3 845.40	4.76	9.78	**	**
	20%	盐冻时间	37.11	24.49	5.14	10.90	**	**
		温度	2 536.49	2 212.47	4.76	9.78	**	**
	30%	盐冻时间	18.88	20.04	5.14	10.90	**	**
		温度	2 853.76	1 752.76	4.76	9.78	**	**
	40%	盐冻时间	16.09	20.35	5.14	10.90	**	**
		温度	2 958.68	1 786.04	4.76	9.78	**	**
	-20 ℃	盐冻时间	11.82	96.84	5.14	10.90	**	**
		融雪剂浓度	78.91	618.59	4.76	9.78	**	**
	-10 ℃	盐冻时间	8.66	9.03	5.14	10.90	*	*
		融雪剂浓度	541.35	228.01	4.76	9.78	**	**
0 ℃	盐冻时间	72.96	27.21	5.14	10.90	**	**	
	融雪剂浓度	1 118.02	160.07	4.76	9.78	**	**	
10 ℃	盐冻时间	19.28	30.41	5.14	10.90	**	**	
	融雪剂浓度	238.08	350.13	4.76	9.78	**	**	

注:*表示影响显著,**表示影响高度显著。

当 F 值大于 $F_{0.05}$ 时,此因素对试验结果影响显著,当 F 值大于 $F_{0.01}$ 时,此因素对试验结果影响高度显著。由表4可知:无论P型还是H型融雪剂,二者对小梁抗弯拉强度的影响相同,当盐冻时间变化时,融雪剂浓度对抗弯拉强度的影响不显著,温度对抗弯拉强度的影响显著;当融雪剂浓度变化时,温度对小梁抗弯拉强度影响高度显著,在融雪剂浓度为10%时,盐冻时间对小梁抗弯拉强度影响显著,其他浓度时,盐冻时间对小梁抗弯拉强度的影响均高度显著;当温度发生变化时,融雪剂浓度对小梁抗弯拉强度影响高度显著,温度在 -10°C 时,盐冻时间对小梁抗弯拉强度影响显著,其他温度时,盐冻时间对小梁抗弯拉强度的影响均高度显著;融雪剂浓度、温度、盐冻时间对小梁抗弯拉强度的影响程度顺序依次为:温度>融雪剂浓度>盐冻时间。

4 结论

(1) 通过融冰试验可知,无论融雪剂种类及浓度如何变化,在 $-20^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 时的融冰量增长幅度大于 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 时的融冰量增长幅度;当温度为 -20°C 时,融雪剂浓度在30%以上时才能起到融冰效果,但融冰质量较小,就融冰质量而言,P型融雪剂融冰质量优于H型融雪剂。

(2) 基于小梁弯曲试验和弯曲蠕变试验可知,当温度为 -20°C 时,推荐P型、H型融雪剂浓度为40%,当温度为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 时,推荐P型融雪剂浓度为20%和H型融雪剂浓度为30%,此时不仅融冰效果较好,且能减小沥青路面的损害,当盐冻时间为24 h时,其小梁强度损伤已接近最大,与盐冻时间为72

h相比,其最大降低幅度仅为2.25%,而蠕变速率都随着盐冻时间的增加而降低,减少盐冻时间能够提高沥青混合料的低温变形性能。

(3) 由灰色关联度分析发现:P型、H型融雪剂浓度均对融冰质量的影响最为显著,对抗弯拉强度和蠕变速率的影响差异较大;由方差分析得知,对小梁抗弯拉强度影响的显著程度顺序依次为:温度>融雪剂浓度>盐冻时间。

参考文献:

- [1] 王东,赵富强,田中男,等.环保型路用融雪剂制备及其功效研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(6):92-98.
- [2] 李闯,熊锐,李科宏,等.盐冻循环作用下沥青混合料性能损伤研究进展[J].应用化工,2020,49(7):1770-1773.
- [3] 乐群力.融雪剂对再生沥青混合料路用性能影响研究[J].当代化工,2020,49(3):605-608.
- [4] 王祎沛,袁玉卿,刘毅豪.融雪剂对沥青混合料水稳定性的影响[J].中国科技论文,2019,14(8):830-834.
- [5] 李长雨.氯盐融雪剂对沥青混合料路用性能影响研究[J].中外公路,2016,36(2):248-252.
- [6] 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):288-291.
- [7] 廖德扬.冻融循环作用下氯化钙溶液对沥青混合料路用性能影响的研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- [8] 袁其华,师国玮,王雅宁.盐冻循环对沥青混合料性能的影响分析[J].住宅与房地产,2019(36):86,120.
- [9] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [10] 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.
- [11] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.