

寒冷地区典型融冰雪技术路用性能试验研究

张予博^{1*}, 邢亚杰¹, 沈兴华¹, 尤捷²

(1. 北京市公路事业发展中心, 北京 101160; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

摘要: 冬季道路除雪日益成为民众关心的突出问题。为了最大限度地减少雪天对道路交通和环境的影响, 应当全面提升扫雪铲冰精细化水平, 合理处理科学适量撒布融雪剂、快速除雪、安全出行三者之间的关系。结合北京市气象特点和除雪作业方式, 选取代表山区路段作为试点, 在达到现有除雪作业标准要求下, 分析不同融雪剂对道路抗滑性能、土壤盐含量、融冰效果等路用性能的影响。研究表明: 与氯盐类融雪剂相比, 醋酸盐类融雪剂除雪效果明显, 但存在用量较大、路面抗滑性能衰减率偏大和雪后抗滑能力偏差的问题。同时, 使用不同融雪剂后, 土壤中水溶性钠含量、盐含量的增幅均较大, 且使用不同融雪剂后土壤均呈现偏碱性的特征。

关键词: 寒冷地区; 除雪作业; 融雪剂; 抗滑性能; 土壤取样

中图分类号: U 418.56

文献标志码: A

Experimental Study on Road Performance of Typical Ice and Snow Melting Technology in Cold Regions

Zhang Yubo^{1*}, Xing Yajie¹, Shen Xinghua¹, You Jie²

(1. Beijing Road Career Development Center, Beijing 101160, China;

2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

Abstract: Road snow removal in winter has increasingly become a prominent concern for the public. In order to minimize the impact of snow on road traffic and the environment, it is necessary to comprehensively improve the level of precision in snow sweeping and ice removal, and reasonably handle the relationship among scientific and appropriate application of snow melting agents, rapid snow removal and safe travel. Based on the meteorological characteristics and snow removal methods in Beijing, the mountainous road sections were selected as pilot projects to analyze the effects of different snow melting agents on road anti-skid performance, soil salt content, ice melting effect and other road performance under the existing snow removal standards. The research results indicate that compared with chloride salt-based snow melting agents, acetate salt-based snow melting agents have significant snow removal effect. But there are problems of larger dosage, higher degradation rate of road anti-skid performance, and deviation in anti-skid ability after snow. Meanwhile, the increase in water-soluble sodium and salt content in the soil were more significant, and the soil showed a slightly alkaline characteristic after different types of snow melting agents.

Key words: cold region; snow removal operations; snow melting agent; skid resistance; soil sampling

北京市冬季平均气温在 0℃以下, 气温低于-10℃的天数平均达到 28 d, 其中 1 月份气温最低。长城以

南平原地区冬季最低气温一般在-20~-16℃, 长城以北大部分地区最低气温多在-20℃以下, 其中西北

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 张予博, 女, 副高级工程师, 硕士, 主要从事公路桥梁隧道养护管理方面的工作, E-mail: 624078076@qq.com。

引文格式: 张予博, 邢亚杰, 沈兴华, 等. 寒冷地区典型融冰雪技术路用性能试验研究[J]. 市政技术, 2025, 43(1): 33-40. (ZHANG Y B, XING Y J, SHEN X H, et al. Experimental study on road performance of typical ice and snow melting technology in cold regions[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(1): 33-40.)

山区延庆盆地官厅水库附近气温最低(极端天气时气温达到 -30°C)。

北京市冬季降雪以雨夹雪、小雪为主,偶发极端暴雪,各年份间降雪次数分布不均匀,降雪期间日夜气温跨 0°C 情况较多,降雪时具有持续时间长、累计降雪量大、降温显著、能见度低等特点,平原地区降雪时气温多处于 $-10\sim-5^{\circ}\text{C}$ 之间,山区降雪时气温基本处于 -20°C 以下。北京市降雪多出现在夜间,且以后半夜为主,夜间气温和路面温度都较低,易导致地面结冰(“地穿甲”现象)。当气温处于 $-10\sim-5^{\circ}\text{C}$ 时,雨雪落入地面即融化,极易产生“地穿甲”现象,而单纯采用滚刷除雪方式不能解决该问题,极易影响行车安全;当气温处于 -20°C 以下时,降雪后基本不会立即融化,很少产生“地穿甲”现象,使用颗粒型融雪剂能够取得较好的除雪效果。既有研究^[1-9]主要集中于高速公路除雪作业方式和融雪剂使用性能,对于山区公路,尤其是结合现有除雪作业方式和不同融雪剂现场使用情况的分析仍存在不足。氯盐类融雪剂因具有价格便宜、操作简单且融雪速度快等优势使用广泛。但除雪过程中的积雪常常需要堆积在道路两旁的绿化带或路侧统一集中清理,部分融化的盐类残留物易对绿化植物造成不同程度的伤害,对灌木、花卉和草坪的伤害尤其显著^[10],每到冬季需要在道路两侧设置大量的防盐设施,以减少融雪剂对设施、绿植和土地的破坏,但提高了养护成本。同时氯盐类融雪剂对路面结构和混凝土构件伤害极大^[11],使用融雪剂后的路面会大量泛白,遇水后会发生盐胀现象,造成道路路基损坏、路缘石和护坡砖等混凝土构件严重脱落,从而增加道路维护的难度和资金的投入。

1 除雪作业方式

除雪作业围绕“物理优先、因地制宜、固液平衡、循环作业”的方针开展。按照“以机械除雪为主、融雪剂融雪为辅”原则,降雪时,优先使用刷扫式扫雪机械进行物理刷雪作业,若降雪量达到大雪及以上量级时,再利用多功能除雪车进行推雪作业,最大限度减少融雪剂和融雪液使用量。DB 11/T 2082—2023《公路除雪融雪作业技术规程》^[12]对融雪剂使用量提出了明确要求,即:气温在 -10°C 及以下,小雪时融雪剂使用量 $\leq 50\text{ g/m}^2$,中雪时融雪剂使用量 $\leq 80\text{ g/m}^2$,大雪时融雪剂使用量 $\leq 150\text{ g/m}^2$ 。降雪前,根

据当日降雪气象预报量级,提前 $2\sim 3\text{ h}$ 适量撒布融雪剂。在除雪作业过程中,根据道路的不同位置、特点制定专项除雪方案,高速公路和平原一、二级公路以喷洒融雪液为主;桥区由于温度更低,易发生结冰现象,因此以撒布固态融雪剂为主;匝道统筹考虑弯道角度、车流量、纵坡坡度和横坡坡度等,小剂量撒布融雪剂;隧道出入口位置考虑车辆轮胎行驶温度变化,适量撒布融雪剂,以提高行车安全性;山区公路的弯道、坡道、平交路口和背阴等关键路段采取预撒融雪剂的方法,最大限度地避免“地穿甲”现象的发生,以确保雪天车辆安全通行。

融雪剂按形态划分为固态和液态 2 类。其中,固态融雪剂在山区公路的弯道、坡道、平交路口、背阴和桥区等路段使用效果较好,其优点是便于运输、方便预撒和节省场地,在经过除雪铲、滚雪刷等机械处理后撒布,再经车辆碾压后效果较好,可适当提高路面抗滑性能,其缺点是对于交通量小、车辆碾压频次少的道路融雪效果不明显;液态融雪剂在城区、平原和丘陵地区使用效果较好,其优点是通过水车冲洒、自带压力、融雪速度快,其缺点是受储存场地影响较大,融雪剂搅拌站布局少,新能源车作业半径小、运输补充不方便、折返路程时间长、更换成本高,低温天气路面水迹容易结冰。

2 融雪剂储存情况

2023 年,北京市县级以上普通公路设置 72 处融雪剂储备站点,共计储备固态融雪剂约 4 500 t、液态融雪剂约 1 400 t。为提高融雪剂的运输和撒布效率,在桥区、隧道出入口处和容易结冰的坡道旁不影响交通的位置存储一定量的融雪剂。固态融雪剂储存点一般选取干燥、通风较好的厂房,将其储存于室外时,应苫盖防潮布,如固态氯盐融雪剂;液态融雪剂储存点一般选用融盐池或者融盐罐,即具备存放液体溶剂的容器和搅拌机械,如液态氯盐融雪剂和醋酸盐融雪剂。由于用于储备液态融雪剂的融盐罐、融盐池和相应的搅拌设备较少,使得液态融雪剂的应用范围也较少,因此目前仍以固态融雪剂为主。近年来,随着北京市道路除雪时效要求越来越高,液体融雪剂搅拌和存储设备覆盖范围不断扩大。例如,在 2022 年冬奥会前期,为保障冬奥会专用公路的通行,在保障场馆附近建立多处液态融雪剂罐。进入冬季后,为做好冬季铲冰除雪工作,需提前溶解固

态融雪剂,并将其储存到液态融雪剂罐或融盐池内。雪季结束后,要清洗融雪剂罐,以免残留物对罐体造成腐蚀,影响罐体的使用寿命。固态融雪剂储存间见图1,液态融雪剂储存罐见图2。



图1 固态融雪剂储存间

Fig. 1 Solid snow melting agent storage room



图2 液态融雪剂储存罐

Fig. 2 Liquid snow melting agent storage tank

3 融雪剂使用情况

根据 GB/T 23851—2017《融雪剂》^[13],融雪剂按成分划分主要为氯盐类融雪剂和非氯盐类融雪剂,其中氯盐类融雪剂主要有氯化钠、氯化钙和氯化镁等,非氯盐类融雪剂主要有醋酸盐类融雪剂和植物基类(醇类)融雪剂。1930年美国在道路上首次使用氯化钠融冰雪后其他国家也陆续使用氯化物进行融冰雪^[14-15],我国在1990年之后开始使用氯盐类融雪剂进行道路铲冰除雪工作。美国在20世纪80年代研发了醋酸盐绿色环保型融雪剂^[16],极大地减少了融雪剂对环境的污染,但由于成本较高,目前应用范围较窄,主要集中在机场道路。目前,我国公路除雪依然使用以氯盐为主要成分的融雪剂。

按照“雪中除雪,雪后无痕”的作业要求,综合

考虑融雪效能、速度、方便快捷和成本效益等因素,短时期内融雪剂不能完全从现行融雪措施中退出。在使用融雪剂时,需考虑降雪量、雪程、温度走势等因素,采用科学合理的使用方法,最大限度降低融雪剂的使用量,以减少对基础设施和环境的影响。

由于近3年北京市降雪量较大,融雪剂使用明显增多,同时受2021年冬奥会保障影响,融雪剂年用量明显增加,且非氯盐类融雪剂的使用也有增加趋势,但总体上仍以氯盐类融雪剂为主,非氯类融雪剂仅用于部分重要道路,如涉奥路线。固态融雪剂在使用前,需对其进行检测,主要有溶解时间、冰点、相对融雪化冰能力和植物种子相对受害率等18个检测指标,满足DB 11/T 161—2012《融雪剂》^[17]和相关规范要求才可以使用。

4 路用性能评价

结合融雪剂现场试点使用情况,对比分析不同类型融雪剂在相同作业条件下的融冰能力、土壤影响和抗滑性能,从而研究氯盐类融雪剂和非氯盐类融雪剂的使用效果,有利于提高融雪剂的使用效能,同时降低环境污染、减少融雪剂对环境和交通安全的影响。

4.1 融冰能力

融冰能力即单位质量融雪剂的融冰量,根据GB/T 23851—2017《融雪剂》^[13]、JT/T 973—2015《路用非氯有机融雪剂》^[18]、融冰试验^[19],融冰率为某时间段内总融冰量与该段时间的比值。融冰能力 G_{ji} 计算式见式(1),融冰速率 M_{ji} (融雪剂的融冰持续性)计算式见式(2)。

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

$$M_{ji} = \frac{G_{ji}}{i}. \quad (2)$$

式中: i 为时间点; m_0 为撒布融雪剂前冰样的总质量,g; m_i 为撒布融雪剂后 i 时间冰样的总质量,g; m_r 为融雪剂质量,g。

4.2 土壤影响

采用恒温恒湿箱、恒温振荡器、电子天平和酸度计等仪器测定使用融雪剂前后土壤含盐量、水溶性钠、pH值,从而评价土壤的盐碱化程度。

土壤含盐量 C 即盐的质量与土样试样质量的比值,其计算式为:

$$C = \frac{m_2 - m_1}{m}. \quad (3)$$

式中: m 为相当于 50 mL 浸出液的干土质量,g; m_1 为蒸馏皿的质量,g; m_2 为盐与蒸馏皿的总质量,g。

采用火焰光度法,溶液中钠离子在火焰高温激发下,辐射出钠元素的特征光谱,用滤光片分离选择后,经光电池或光电倍增管把光能转换成电能,放大后采用微电流表测量电流的大小,从而计算钠离子含量,其计算式为:

$$\text{Na}^+ \text{ 含量 (cmol/kg)} = \frac{C_{\text{Na}} V}{m \times 230} \quad (4)$$

式中: C_{Na} 为钠离子的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; V 为测定体积,mL; m 为相当于分析时所取浸出液体体积的干土质量,g;230为钠离子每厘摩尔的质量, mg/cmol 。

4.3 抗滑性能

采用摆式仪,在保持无径(溢)流的湿润状态下,测定融雪剂湿基抗滑值 $H_{\text{湿基,融雪剂}}$ 和融雪剂湿基本底抗滑值 $H_{\text{湿基,本底}}$,从而计算使用融雪剂前后抗

滑性能的衰减情况。融雪剂湿基路面摩擦衰减率 $M_{\text{湿基}}$ 计算式为:

$$M_{\text{湿基}} = \left(1 - \frac{H_{\text{湿基,融雪剂}}}{H_{\text{湿基,本底}}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

5 试验对比

综合考虑水源保护区的功能定位与相关政策要求,优先选取密云水库周边的兴阳线、永定河周边的京拉线和京密引水渠周边的怀昌路 3 条重要水源保护区周边的普通公路作为试点路段,分别选取氯盐类融雪剂和非氯盐类融雪剂进行对比试验。

5.1 融雪剂的选取

试验选取醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂,其中醋酸盐类融雪剂为液态,氯盐类融雪剂为固态。依据 DB 11/T 161—2012《融雪剂》^[17]进行试验,结果见表 1。

表 1 融雪剂检测表

Tab. 1 Snow melting agent testing table

融雪剂类型	纯盐的质量分数/ %	相对融冰能力/ %	碳钢腐蚀率/ (mm/a)	植物种子相对受害率/ %	冰点/ ℃	路面摩擦衰减率(湿基)/ %
醋酸盐类融雪剂	30	121	0.01	44	-19.8	23
	70	157	0.01		-29.0	27
氯盐类融雪剂	100	103	0.05	45	-15.8	8
DB 11/T 161—2012 标准值			≤0.11	≤50	II 型 ≤-15	≤10

由表 1 可知,与氯盐类融雪剂相比,醋酸盐类融雪剂融冰能力更强、碳钢腐蚀率低、冰点较低,但路面摩擦衰减率(湿基)偏高。

5.2 除雪作业流程

基于“以机械为主、融雪剂为辅”“先打通,后扩展”的原则,严格按照除雪时限要求开展除雪作业。当遇小雪,降雪路面见白后,随即出动,采用除雪刷在前,水车(撒布机)在后的梯队作业方式;当遇中、大雪,降雪路面见白后,随即出动,采用推雪铲在前,除雪滚刷在中,水车(撒布机)在后的梯队作业方式。

醋酸盐类融雪剂采用水车冲压方式撒布,准备阶段先将融盐罐中的液态融雪剂用水泵抽至水车中,撒布过程中需要加压喷洒,车速控制在 15~20 km/h;氯盐类融雪剂采用撒布机进行撒布,车速控制在 20 km/h。

5.3 路用性能分析

5.3.1 融冰能力对比

融雪剂中盐的质量分数为 20%,温度为-10、-5℃

时,对比分析醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂的融冰能力,结果见表 2。

表 2 2 种融雪剂融冰能力

Tab. 2 The ability of melting ice of two types of snow melting agents

融雪剂类型	纯盐的试验 质量分数/%	纯盐的推荐 质量分数/%	温度/ ℃	融冰能力/ %
醋酸盐类融雪剂	20	50	-10	产品结冰
			-5	9
氯盐类融雪剂	20	30	-10	46
			-5	72

由表 2 可知,在纯盐的推荐质量分数下检测醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂相对融冰能力均满足 GB/T 23851—2017《融雪剂》^[13]对该指标的要求(90%)。但当纯盐的质量分数为 20%,检测醋酸盐类融雪剂相对融冰能力指标时,部分产品出现了结冰现象。因此,在实际除雪作业中,相同气温和降雪量等条件下,达到同等除雪效果时,醋酸盐类融雪剂使用量高于氯盐类融雪剂。

5.3.2 道路周边土壤取样对比

通过对不同融雪剂化学性能进行试验,其中醋酸盐类融雪剂氯化物质量分数为 0.001 8%,氯盐类融雪剂氯化物质量分数为 51%~62%。为验证融雪剂对道路周边土壤的影响,按照 DB 11/T 864—2020《园林绿化种植土壤技术要求》^[20],分别对在试验路段同一位置使用醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂前后的表层土壤进行现场取样检测,检测结果见表 3。

由表 3 可知,使用不同融雪剂后,试验路段土壤中水溶性钠含量和盐含量增幅均较大,且使用不同融雪剂后,土壤 pH 平均值均在 8.0~9.5 之间,呈现偏碱性的特征。

5.3.3 抗滑性能对比

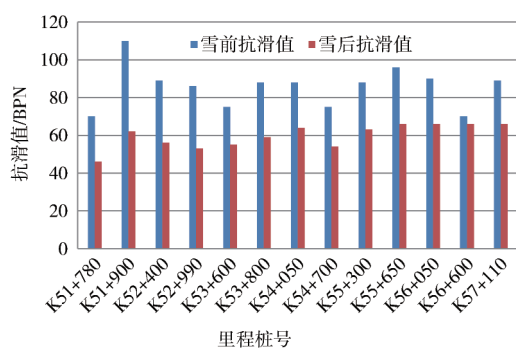
在使用醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂的试

表 3 土壤检测结果

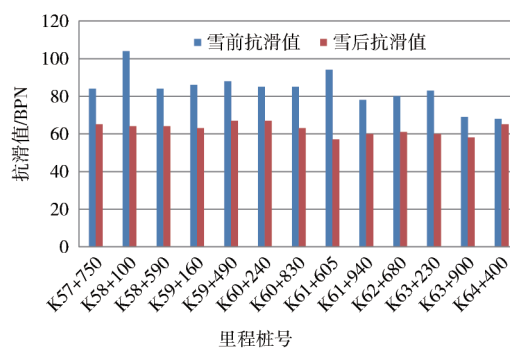
Tab. 3 Soil testing results

融雪剂类型	样品状态	水溶性钠含量/(mg/kg)	水溶性盐含量/(g/kg)	pH 平均值
醋酸盐类融雪剂	土壤(雪前)	19.00	0.22	8.47
	融雪剂污染土(雪后)	1 240.95	3.68	8.21
	增长量	1 221.95	3.46	-0.26
氯盐类融雪剂	土壤(雪前)	11.34	0.27	8.05
	融雪剂污染土(雪后)	1 080.14	2.82	8.62
	增长量	1 068.80	2.55	0.57
参考值		≤100	≤2	6.0~8.5

验路段上,均按照 1 km 选择 2 处且每处选择 3 个测点的布设原则进行路面取点,并对测点处路面降雪前后的抗滑性能进行检测。2 种融雪剂使用前后抗滑值对比见图 3,路面抗滑性能衰减情况见图 4。



a) 醋酸盐类融雪剂



b) 氯盐类融雪剂

图 3 2 种融雪剂使用前后抗滑值对比

Fig. 3 Comparison of anti slip values before and after using two types of snow melting agents

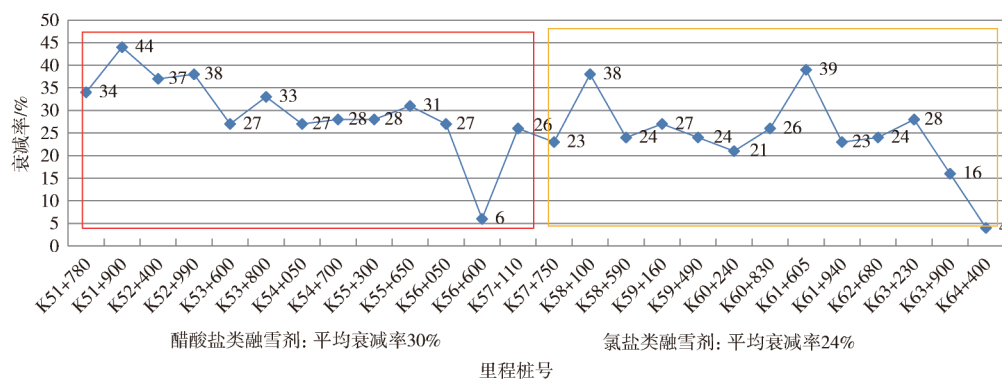


图 4 路面抗滑性能衰减情况

Fig. 4 Degradation of anti-skid performance of road surface

由图 3、4 可知,醋酸盐类融雪剂的路面雪后抗滑能力偏差,抗滑性能衰减率偏大。

5.3.4 除雪效果对比

使用醋酸盐类融雪剂的优点是可以通过水车冲压

喷洒,化雪速度快、即时性更强。由于 2024 年是暖冬气候,温度比往年高,产品冰点低于 -20°C ,雪量不大的情况下可以很快清除。经观察,撒布醋酸盐类融雪剂后路面存在雪泥,但不结冰,路面未残留融雪剂,

未发生泛白现象。由于该融雪剂是液态,对车流量小的路段“地穿甲”情况处置较好。其缺点是随着降雪持续,液态融雪剂被雪水稀释或渗透至地下,路面积雪后,需进行第 2 次补撒。装车后车辆自重较大,坡度较大的山区路段无法正常行驶,且装车时间较长。

使用氯盐类融雪剂的优点是随着车辆的碾压,

融雪效果渐好,除雪性能持续时间长,雪量增大后路面基本无积雪、无结冰,融雪剂装车时间较短。其缺点是撒布后瞬间化雪速度较慢,需社会车辆进行碾压后除雪效果才能显现。车流量小的路段除雪效果不好。除雪后路面有残留融雪剂,路面易泛白。

醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂撒布前、后效果见图 5、6。



a) 撒布前



b) 撒布后



c) 撒布 1 h 后



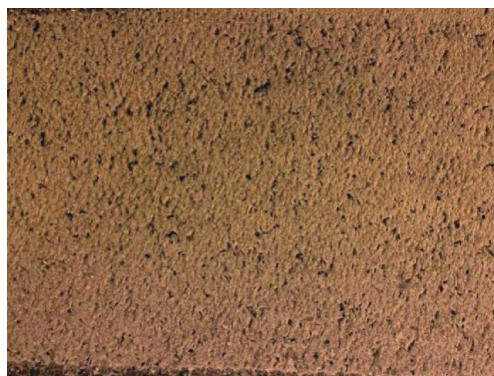
d) 撒布 24 h 后

图 5 醋酸盐类融雪剂撒布前、后效果

Fig. 5 The effect before and after spreading acetate salt-based snow melting agents



a) 撒布前



b) 撒布后



c)撒布 2 h 后



d)撒布 24 h 后

图6 氯盐类融雪剂撒布前、后效果

Fig. 6 The effect before and after spreading chloride salt-based snow melting agents

6 结 论

1)产品性能:通过分析2种试验样品,与氯盐类融雪剂(纯盐的质量分数为100%)相比,醋酸盐类融雪剂(纯盐的质量分数为30%、70%)融冰能力更强、碳钢腐蚀率低、冰点较低,但路面摩擦衰减率偏高。

2)相对融冰能力:同等气温和降雪量等条件下,若要达到同等除雪效果,醋酸盐类融雪剂的使用量高于传统氯盐类融雪剂的使用量。

3)融雪剂抗滑性能:与使用传统氯盐类融雪剂的路面相比,使用醋酸盐类融雪剂的路面抗滑性能衰减率偏大,雪后抗滑能力偏差。

4)融雪剂残留:使用不同融雪剂后,试验路段土壤中水溶性钠含量、盐含量增幅均较大,且使用不同融雪剂后,土壤的pH值均在8.0~9.5之间,呈现偏碱性的特征。

5)道路路面泛白:与醋酸盐类融雪剂相比,使用氯盐类融雪剂除雪后路面残留融雪剂明显,路面易泛白。

综上所述,醋酸盐类融雪剂和氯盐类融雪剂各有优缺点,后续还需加大对醋酸盐类融雪剂或其他环保型融雪剂的研发力度,降低养护投资成本,提高产品性能,从而满足公路市场普遍需求。同时,秉承“以机械除雪为主、融雪剂融雪为辅”原则,进一步优化除雪作业工序和机械布设,合理布局融雪剂储备点位,加大液体融雪剂存储设备建设,在“低成本、高环保”的双向合力要求下不断提高除雪效能,减少融雪剂使用对环境、土壤和道路设施的破坏,保障道路通行安全,切实践行“金山银山就是绿水青山”的理念。

[参考文献]

- [1] 李燕华. 高速公路冬季除雪作业及养护措施[J]. 交通世界, 2018(2):95-98. (LI Y H. Winter snow removal and maintenance measures for highways[J]. Transpo world, 2018(2):95-98.)
- [2] 张建伟. 对半幅双向行驶高速公路除雪问题的探索实践[J]. 内蒙古公路与运输, 2014(5):76-77. (ZHANG J W. Exploration and practice of snow removal on half width bidirectional expressway[J]. Highway & transportation in Inner Mongolia, 2014(5):76-77.)
- [3] 孙永俊. 浅谈高速公路除冰除雪的施工组织与管理[J]. 江西建材, 2014(2):145. (SUN Y J. Discussion on the implementation organization and management of ice and snow removal on highways[J]. Jiangxi building materials, 2014(2):145.)
- [4] 廖华兴. 高速公路冬季除雪作业与养护方案[J]. 中国高新科技, 2019(14):66-67. (LIAO H X. Winter snow removal and maintenance plan for highways[J]. China high-tech industry, 2019(14):66-67.)
- [5] 刘平. 高速公路冬季除雪防滑措施[J]. 建材世界, 2019(6):40-43. (LIU P. Winter snow removal and anti-skid measures for highways[J]. The world of building materials, 2019(6):40-43.)
- [6] 史记青. 南方山区高速公路冬季融冰除雪养护技术[J]. 中国新技术新产品, 2018(12):89-90. (SHI J Q. Ice-melting and snow-removing maintenance technology of expressway in southern mountain area in winter[J]. New technology & new products of China, 2018(12):89-90.)
- [7] 吴文佑. 山区高速公路冬季除雪保通工作探讨[J]. 上海公路, 2016(3):70-73. (WU W Y. Discussion on mountain area highway deicing work in winter[J]. Shanghai highway, 2016(3):70-73.)
- [8] 卢国彪. 高速公路冬季除雪防滑融雪材料撒布量分析探讨[J]. 中国水运, 2015, 15(4):207-208. (LU G B. Analysis and discussion on the distribution quantity of snow removal, anti slip and melting materials on highways in winter[J]. China water transport, 2015, 15(4):207-208.)
- [9] 梁宁. 液态融雪剂在黄石高速公路冬季除雪中的应用[J]. 山西

- 交通科技,2012(1):18-19,26. (LIANG N. The application of liquid melting agent to Huangshi expressway[J]. Shanxi science & technology of communications,2012(1):18-19,26.)
- [10] 鲁先阳,王菲,宋南,等. 不同类型融雪剂对高速公路两旁植物的伤害及修复[J]. 现代园林,2013,10(10):61-65. (LU X Y, WANG F, SONG N, et al. Injuries and restoration of chemistry salt destroy on plant besides the expressway[J]. Modern landscape architecture,2013,10(10):61-65.)
- [11] 姚艺,姚乐. 含氯融雪剂(盐)对交通基础设施的影响研究进展[J]. 当代化工,2015,44(6):1360-1364. (YAO Y, YAO L. Research progress in impact of chlorine snowmelt agent (salt) on transport infrastructure[J]. Contemporary chemical industry,2015,44(6):1360-1364.)
- [12] 北京市市场监督管理局. 公路除雪融雪作业技术规程:DB 11/T 2082—2023[S]. 北京:出版者不详,2023:1-4. (Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Technical specification for road snow removal and melting operation;DB 11/T 2082—2023[S]. Beijing:[s. n.],2023:1-4.)
- [13] 国家市场监督管理总局,等. 融雪剂:GB/T 23851—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:2-15. (State Administration for Market Regulation, et al. Snow-melting agent:GB/T 23851—2017[S]. Beijing:Standards Press of China,2017:2-15.)
- [14] KOEFOD S. Effect of prewetting brines and mixing on ice-melting rate of salt at cold temperatures:new tracer dilution method[J]. Transportation research record:journal of the transportation research board,2017,2613:71-78.
- [15] KOEFOD S, MACKENZIE R, ADKINS J. Effect of prewetting brines on the ice-melting rate of salt at very cold temperatures[J]. Transportation research record:journal of the transportation research board,2015,2482:67-73.
- [16] KLEIN-PASTE A, DALEN R. The fundamentals of plowing, anti-icing, de-icing, and sanding. In sustainable winter roads operation [J]. Wiley-blackwell,2018,1356(5):256-273.
- [17] 北京市市场监督管理局. 融雪剂:DB 11/T 161—2012[S]. 北京:出版者不详,2012:2-7. (Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Snow-melting agent:DB 11/T 161—2012[S]. Beijing:[s. n.],2012:2-7.)
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 路用非氯有机融雪剂:JT/T 973—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:5-12. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Non-chloride organic snow-melting agent for pavement;JT/T 973—2015[S]. Beijing:China Communications Press,2015:5-12.)
- [19] 李平,王梓晗,张洪刚,等. 融雪剂融冰能力评价方法研究[J]. 公路交通科技,2023,40(11):85-95. (LI P, WANG Z H, ZHANG H G, et al. Study on the evaluation method for ice-melting capacity of snow-melting agent[J]. Journal of highway transportation research and development,2023,40(11):85-95.)
- [20] 北京市市场监督管理局. 园林绿化种植土壤技术要求:DB 11/T 864—2020[S]. 北京:出版者不详,2020:4-11. (Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Soil requirements for landscaping use;DB 11/T 864—2020[S]. Beijing:[s. n.],2020:4-11.)
- 其他作者:邢亚杰,女,中级工程师,本科,主要从事公路桥梁隧道养护管理方面的研究工作。
沈兴华,男,中级工程师,硕士,主要从事高速公路桥梁隧道运营管理方面的研究工作。
尤捷,男,中级工程师,博士,主要从事地震应急救援方面的工作。

(上接第 32 页)

- [18] City of Copenhagen the Technical and Environmental Administration. Copenhagen city of cyclists the bicycle account 2016[EB/OL]. (2017-09-01)[2024-09-01]. <https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals4/CPH%20bicycle-account-2016.pdf>.
- [19] The New York City Department of Transportation's. NYC Dot encourages New Yorkers to go for a ride on 'bike-to-work day' this friday [EB/OL]. (2024-05-15)[2024-09-01]. <https://www.nyc.gov/html/dot/html/pr2024/bike-to-work.shtml>.
- [20] The New York City Department of Transportation's. Open streets: car-free earth day[EB/OL]. [2024-09-01]. <https://www.nyc.gov/html/dot/html/pedestrians/earthday.shtml>.
- [21] New York City. Bike New York (free cycling classes for adults & kids). [EB/OL]. (2024-08-01)[2024-09-01]. <https://www.bike.nyc/>.
- [22] Cycling Embassy of Denmark. Street furniture for cyclists[EB/OL]. (2019-03-01)[2024-09-01]. <https://cyclingsolutions.info/street-furniture-for-cyclists/>.
- [23] Portland Bureau of Transportation. Picture me rollin' 10-day bike safety education curriculum[EB/OL]. (2022-01-01)[2024-09-01]. [https://www.portland.gov/transportation/safe-routes-school/doc-](https://www.portland.gov/transportation/safe-routes-school/documents/bike-safety-education-curriculum/download)
- uments/bike-safety-education-curriculum/download.
- [24] 东京都生活文化スポーツ局. 第 40 回駅前放置自転車クリーンキャンペーンを実施します～自転車の代わりに置こう思いやり～[EB/OL]. (2024-09-24)[2024-09-24]. https://www.seikatubunka.metro.tokyo.lg.jp/tomin_anzen/kotsu/jitensha/houchi/.
- [25] SMRT Trains Limited. SMRT celebrates the launch of Adopt-a-station pilot programme between maris stella high school and bartley station[EB/OL]. (2014-09-18)[2024-09-01]. <https://www.mynewsdesk.com/sg/smart/pressreleases/smart-celebrates-the-launch-of-adopt-a-station-pilot-programme-between-maris-stella-high-school-and-bartley-station-1056260>.
- [26] 日本国会.《道路交通安全法》[EB/OL]. (1960-01-01)[2024-09-01]. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=335AC0000000105>.
- [27] San Francisco Personal Injury Attorneys. Do pedestrians always have the right-of-way?[EB/OL]. (2024-04-03)[2024-09-01]. <https://www.rftmlaw.com/blog/2024/april/do-pedestrians-always-have-the-right-of-way/>.
- [28] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Pedestrian safety guide for transit agencies[EB/OL]. (2008-02-01)[2024-09-01]. https://safety.fhwa.dot.gov/ped_bike/ped_transit/ped_transguide/index.cfm.