

道路融雪剂性能评价方法对比研究

景金华^{1*}, 何冰²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 融雪性能是道路融雪剂选用的重要依据, 其评价方法的不足导致了融雪剂的滥用。介绍了我国目前采用的相对融冰能力评价方法、美国公路战略研究计划中的融雪剂性能标准试验方法以及近年 DSC 等新的融雪剂性能评价方法的发展和应用情况。选取氯化钠、氯化钙和醋酸钠 3 种典型融雪剂, 分别进行了我国和国外的标准融雪剂融雪化冰试验。通过对比分析试验结果发现, 我国现有的评价方法存在试样选取代表性不足、评价指标少、试验温度单一等问题, 不能全面、有效地评价实际使用条件下的融雪剂融雪化冰性能, 不利于融雪剂的合理选用。

关键词: 道路; 融雪剂; 融雪性能; 评价方法; 对比分析

中图分类号: U 418.6

文献标志码: A

Comparative Study on Evaluation Methods for Snowmelt Agent Performance

Jing Jinhua^{1*}, He Bing²

(1. China Design Group, Nanjing 210014, China; 2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: Snowmelt performance is an important basis for the selection of road snowmelt agent so that the lack of evaluation method cause snowmelt agent abuse. The relative ice-melting capacity evaluation method in China, the performance standard test method of snowmelt agent in American Highway Strategic Research Plan are compared. The development and application of new performance evaluation methods such as DSC in recent years are introduced. The melting and deicing tests of standard snowmelt agent home and abroad are carried out respectively by 3 typical snowmelt agents of sodium chloride, calcium chloride and sodium acetate. The test results show that the existing evaluation methods in China have shortcomings of insufficient representative of sample selection, few evaluation indexes and single test temperature, which can not fully and effectively evaluate the performance of practical snow melting agent. It is not suitable for rational selection of snow melting agent.

Key words: road; snowmelt agent; snow melting performance; evaluation method; comparison and analysis

大量使用融雪剂会造成路面剥蚀和沥青路面松散剥落, 降低路面的服务质量和使用寿命^[1-5]。经济成本和融雪性能是影响路面融雪剂选择的两大因素。建立有效的融雪剂性能评价体系, 不仅能够根据具体的使用条件合理选择融雪剂种类和使用量, 提高融雪效率, 减轻融雪剂对环境和路面的影响, 而且对控制融雪剂使用成本和污染成本均具有

重要意义^[6-8]。

目前, 我国采用的融雪性能评价方法指标较少, 试验条件与实际使用条件不符, 不利于指导融雪剂的合理选用。笔者介绍了国外普遍采用的、由美国公路战略研究计划(以下简称 SHRP)提出的融冰、渗透和剥离等融雪性能标准试验方法, 以及冰层剪切剥离、差示扫描量热和机械震荡融冰等新的融雪

收稿日期: 2022-01-20

作者简介: 景金华, 男, 工程师, 硕士, 主要从事道路设计、养护工作。

引文格式: 景金华, 何冰. 道路融雪剂性能评价方法对比研究[J]. 市政技术, 2022, 40(7): 51-56. (JING J H, HE B. Comparative study on evaluation methods for snowmelt agent performance[J]. Journal of municipal technology, 2022, 40(7): 51-56. (in Chinese))

性能试验方法^[9],并以氯化钠、氯化钙和醋酸钠 3 种融雪剂为例,通过对比分析 SHRP 的融冰和渗透试验以及我国的相对融冰能力试验,证明了我国融雪性能评价方法的不足。

1 融雪剂融雪性能评价方法简介

1.1 我国常用的评价方法

我国的融雪剂标准制定较晚,对融雪性能的评价方法也较单一,目前常采用相对融雪能力进行评价。北京市质量技术监督局于 2002 年发布的地方标准 DB11/T 161—2002《融雪剂》,是我国制定的第 1 部融雪剂标准^[10]。该标准以氯化钠溶液为参比溶液,通过测定-10℃下融雪剂溶液的相对融冰能力来评价其融雪性能。2009 年,我国发布了首部融雪剂国家标准 GB/T 23851—2009《道路除冰融雪剂》。该标准参考了北京市地方标准中采用的相对融冰能力评价方法,以质量浓度 200 g/L 的氯化钠溶液作为参比溶液。试验时,首先将固体融雪剂配制质量浓度为 200 g/L 的溶液,再测试-10℃下融雪剂溶液和氯化钠溶液在 30 min 内的融冰量,并以此计算融雪剂的相对融雪能力。按照要求,融雪剂溶液在相同条件下的融冰量应不小于氯化钠溶液的 90%^[11]。为科学地使用融雪剂,该国家标准中还规定了融雪剂的撒布要求,例如应首先在雪前撒布 5~10 g/m²,然后再根据雪厚,在机械除雪基础上撒布 10 g/m²,最后还要分次、分阶段进行撒布^[12]。

北京市于 2012 年对融雪剂地方标准做了修订,新标准 DB11/T 161—2012 延用了 DB11/T 161—2002 中的融雪性能评价方法,但对相对融冰能力的试验条件和参比溶液进行了修改^[13]。新标准根据融雪剂的冰点调整了试验温度和参比溶液,其中 I 型融雪剂(-15℃<冰点≤-10℃)的试验温度为-10℃,参比溶液为氯化钠溶液;II 型融雪剂(冰点≤-15℃)的试验温度为-15℃,参比溶液为二水氯化钙溶液。

1.2 国外常用的评价方法

SHRP 在 1992 年发布的《化学融雪剂评价方法手册(SHRP-H-332)》中给出了 62 种融雪剂性能测试的标准试验方法,其中用于融雪性能评价的标准试验方法有 8 种,包括:固体和液体融雪剂的融冰试验、固体和液体融雪剂的渗透试验、固体和液体融雪剂的剥离试验、差示扫描量热试验等。

1) 融冰试验

SHRP 推荐了标准融雪剂融冰试验方法,试验用于测定融雪剂在特定温度条件下一定时间段内的融冰能力。该试验采用圆形有机玻璃盘冻结成厚度均匀(3.175 mm)的薄冰片,待恒温至试验温度时,将融雪剂均匀撒布到冰面上。加入融雪剂后 60 min 内,每隔一定时间便倾斜玻璃盘,用注射器取出盘内产生的全部盐水并测定其体积,再将盐水重新倾倒在冰面上,以使冰片在融雪剂的作用下进一步融化。通过绘制融冰量随融雪剂加入时间的变化曲线,可以评价融雪剂在特定温度条件下的融冰能力。为了保证融冰后产生的盐水便于测量,该试验中融雪剂的用量为路面实际使用量的 3 倍。固体融雪剂的试验用量换算为路面用量是 372 kg/(车道·km),液体融雪剂的试验用量换算为路面用量是 387 L/(车道·km)。

2) 渗透试验

渗透试验用于模拟公路融雪化冰过程中融雪剂穿透冰雪层,渗透到路面-冰雪层界面的能力。该试验需采用特制的渗透试验装置。试验时,首先要制备圆柱体冰样,然后在控温条件下将融雪剂颗粒放于冰样表面,通过记录一定时间内圆柱体冰样内部融雪剂溶液的渗透深度来评价融雪剂的渗透能力。

3) 剥离试验

SHRP 推荐了标准剥离试验。该试验采用水泥胶砂底板或沥青混合料底板模拟融雪剂使用的路面条件,把固体融雪剂颗粒放至厚度均匀的冻结于底板上的冰层表面,通过测定一定时间内融雪剂作用下冰层-底板界面的剥离面积来评价融雪剂的剥离能力。

4) 差示扫描量热试验

差示扫描量热法是一种热分析方法,主要用于无机物、有机化合物和药物分析,可以测定多种热力学和动力学参数。该试验对 NaCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 融雪剂在不同温度条件下的融雪性能做了预测,并将预测结果与同等条件下的 SHRP 融冰试验结果进行了相关性分析。其结果显示,0℃时的预测结果与实测值具有良好的相关性。作为一种新方法,目前差示扫描量热法在融雪剂性能评价中的应用还不够成熟,在推广之前仍需进行大量的深入研究。

2 融雪剂融雪化冰能力试验

2.1 我国的相对融雪化冰能力试验

按照 GB/T 23851—2009《道路除冰融雪剂》中的

规定,分别测试了氯化钠、氯化钙和醋酸钠溶液的相对融雪化冰能力。首先,在2个150 mL的瓷坩埚中分别加入100 mL蒸馏水,放入-10℃低温试验箱中冻结冰样;然后配制质量浓度为200 g/L的氯化钠溶液,同时称取200 g融雪剂样品,加水溶解得到1 000 mL质量浓度为200 g/L的融雪剂溶液;分别量取氯化钠和融雪剂溶液各25 mL,放入低温试验箱,在-10℃下保温12 h后备用。试验时,从低温试验箱中取出盛有冰样的瓷坩埚,擦干外表的水和冰,迅速称重;然后将制备的融雪剂溶液迅速倒入瓷坩埚中,并迅速放回低温试验箱内;30 min后取出瓷坩埚,立即倒出瓷坩埚内的液体并称量瓷坩埚和剩余冰块的质量。氯化钠溶液的操作步骤与融雪剂溶液的操作步骤相同。氯化钠及每种融雪剂均进行2次平行试验,试验结果见表1。

表1 相对融雪化冰能力试验结果

Tab. 1 Test results of relative snow-melting and ice-melting capacity mL

融雪剂名称	第1次融冰量	第2次融冰量
氯化钠	4.7	4.6
氯化钙	4.4	4.5
醋酸钠	6.0	5.8

融雪剂溶液的相对融雪化冰能力 w 按照式(1)计算:

$$w = \frac{m_0 - m_1}{m'_0 - m'_1} \times 100. \quad (1)$$

式中: m_0 为未加入融雪剂溶液的瓷坩埚和冰样的总质量,g; m'_0 为未加入氯化钠溶液的瓷坩埚和冰样的总质量,g; m_1 为加入融雪剂溶液0.5 h后瓷坩埚和剩余冰块的总质量,g; m'_1 为加入氯化钠溶液0.5 h后瓷坩埚和剩余冰块的总质量,g。

取平行测定结果的算术平均值为测定结果,2次平行测定结果的绝对差值不大于5%。其测试结果见图1。

2.2 SHRP的融雪化冰能力试验

SHRP提出的融冰、渗透和剥离试验是国外普遍采用的融雪性能评价方法。笔者参照SHRP的《化学融雪剂评价方法手册(SHRP-H-332)》,用150 mm培养皿代替融冰试验中的融冰试验盘,根据试验手册中提供的参数加工了渗透试验装置,并完全参照SHRP试验规程对氯化钠、氯化钙和醋酸钠等固体融雪剂进行了融冰和渗透试验。笔者选择该2种试

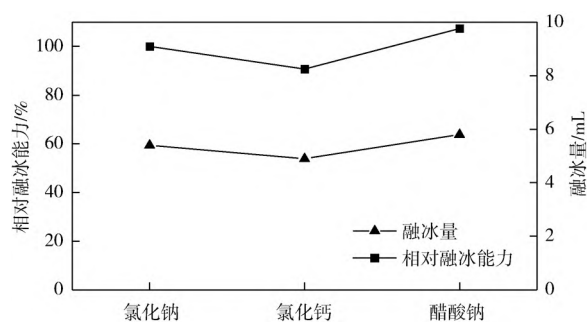


图1 相对融冰能力试验结果

Fig. 1 Test results of relative melting capacity

验方法的主要原因在于:①可以更好地与我国的融雪化冰能力试验进行对比;②SHRP提出的其他2种试验方法目前还不成熟。

1) 融冰试验

按照冰层厚度和单位面积融雪剂用量一致的原则,笔者在试验中对蒸馏水体积等试验参数进行了调整。笔者的试验参数与SHRP的试验参数对比见表2。

表2 试验参数对比

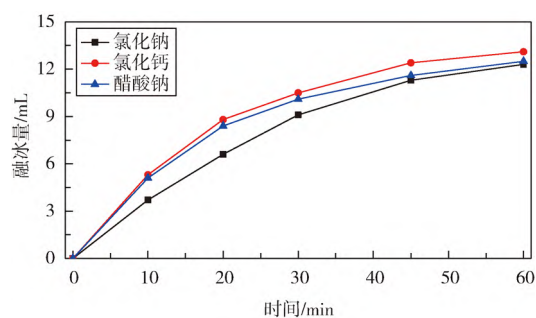
Tab. 2 Comparison of test parameters

试验参数	SHRP	笔者
试验盘直径/cm	22.86	15.00
蒸馏水体积/mL	130	56
固体除冰盐质量/g	4.170	1.795
冰层厚度/mm	3.175	
当量路面用量	372 kg/(车道·km) (31 g/m ²)	

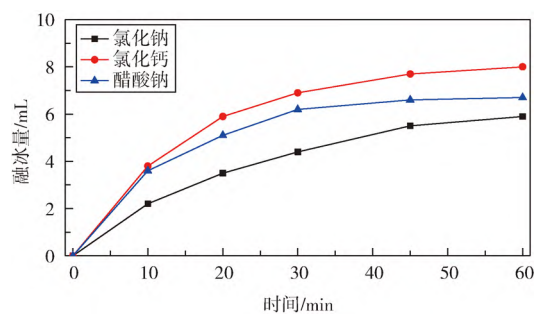
分别在-5、-10、-15℃下对氯化钠、氯化钙和醋酸钠颗粒进行融冰试验。试验时,首先量取56 mL蒸馏水倒入洁净的150 mm培养皿中,在保持试验温度的低温试验箱中水平放置12 h,制备3.175 mm厚的冰样;然后将预先放入低温试验箱的1.795 g固体融雪剂均匀撒布到冰面上,用注射器分别在第10、20、30、45、60 min时抽取融化后产生的盐水,量取体积后重新倒入培养皿中。每种融雪剂在每一个试验温度下均进行3次重复试验,并根据3次试验的平均值绘出盐溶液体积随时间变化的关系曲线,见图2。

2) 渗透试验

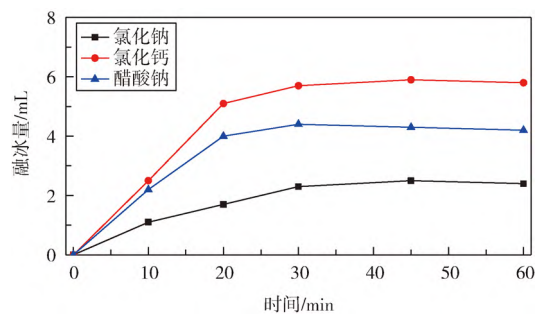
按照SHRP试验规程提供的参数,笔者在试验中采用了有机玻璃加工渗透试验装置。试验前,用注射器吸取经过煮沸去氧的蒸馏水将渗透试验装置的凹槽注满水,并引出凹槽中的气泡,放入低温试验



a) -5 °C



b) -10 °C



c) -15 °C

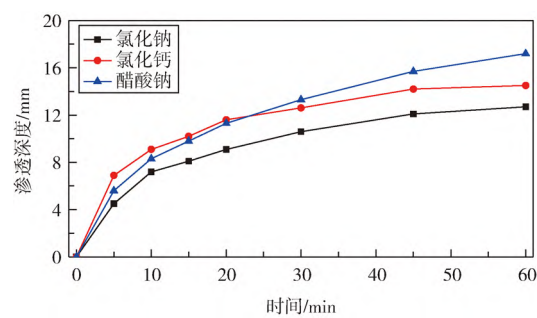
图 2 融冰能力试验结果

Fig. 2 Test results of ice melting capacity

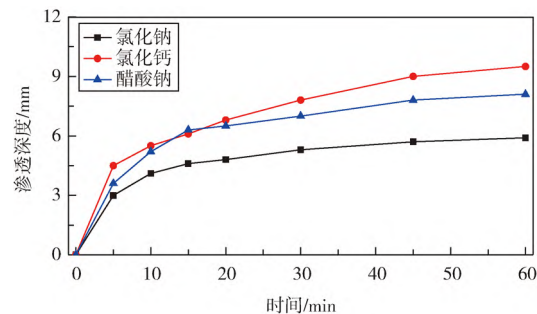
箱中保温 12 h。水冻结后,修整凹槽顶面,使冰面光滑平整,并用微量移液器在冰面偏离中心的位置上滴 2~3 滴染色剂溶液(溴甲酚绿)。试验时,在每个凹槽顶面放置质量在 22~27 mg 之间的单一固体融雪剂颗粒,观察并记录放置后第 5、10、15、20、30、45、60 min 时的最大渗透深度。为了保证试验的重现性,取 5 次重复试验的平均值作为试验结果。分别在 -5、-10、-15 °C 温度条件下测试氯化钠、氯化钙和醋酸钠 3 种融雪剂的渗透能力,试验结果见图 3。

3 试验结果分析

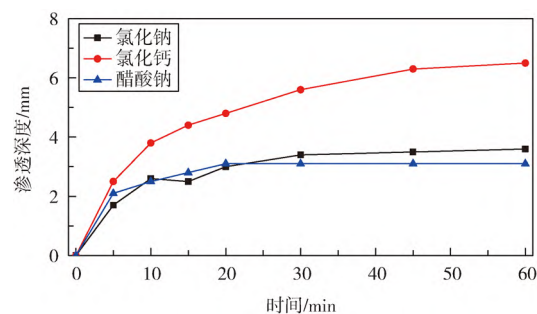
从 SHRP 融冰和渗透试验的结果可以看出,在不同的温度条件下,融雪剂的融雪化冰性能存在较大的差异,且试验过程中融雪剂的融雪化冰效率随



a) -5 °C



b) -10 °C



c) -15 °C

图 3 渗透试验结果

Fig. 3 Permeability test results

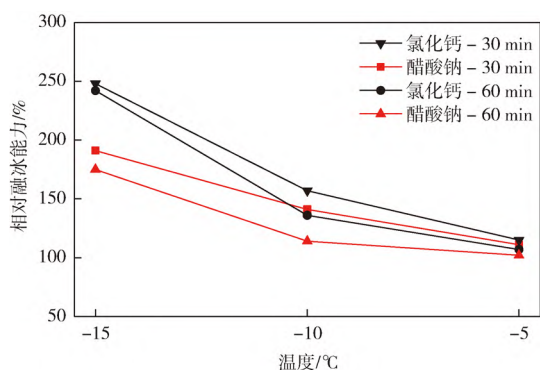
融雪剂质量浓度的降低逐渐衰减。由图 1、2b)可以看出,相对融冰能力试验和 SHRP 融冰试验的试验结果存在较大的差异,200 g/L 氯化钠溶液在 -10 °C 的相对融冰能力仅为 90.7%,而在相同的温度条件下,氯化钙固体则表现出最佳的融冰能力,30 min 内的融冰量为氯化钠颗粒的 147%。醋酸钠固体相对氯化钠颗粒的融冰表现也优于醋酸钠溶液,30 min 内的融冰量达到氯化钠颗粒的 132%。事实上,从融雪剂溶液到融雪剂固体颗粒,融冰能力的提升是由溶解热的释放和溶液凝固点的降低引起的。固体融雪剂的溶解过程往往伴随着溶解热的释放,其热量被冰样吸收,在一定程度上提高了融冰效率。3 种融雪剂在 18 °C 时的溶解热见表 3。融雪剂溶液的凝固点一般随质量浓度的增大而降低,但不同融雪剂溶液

的增长规律存在较大差异。不同融雪剂固体溶解热的差异及其溶液的凝固点随质量浓度变化规律的差异导致同种融雪剂固液相之间、不同质量浓度之间融冰能力的差异性和非线性。在实际应用过程中,融雪剂主要是以固体颗粒的形式撒布到已积雪或结冰的路面上,因此采取融雪剂固体颗粒进行融雪化冰性能试验更符合实际。我国相对融冰能力试验采用的200 g/L融雪剂溶液不能正确衡量其在固态或其他质量浓度下的融冰能力,不利于指导融雪剂的合理选用。

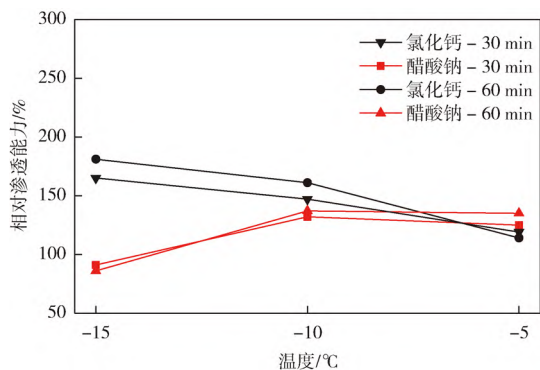
表3 融雪剂18℃时的溶解热

Tab. 3 Heat of solution at 18℃			kcal/mol
融雪剂	氯化钠	氯化钙	醋酸钠
溶解热	-1.18	17.41	3.87

试验温度和评价时长亦是重要的试验参数。为了评价我国试验方法中温度和评价时长选取的合理性,依照我国相对融冰能力采用的换算原则,以同等试验条件下氯化钠的融冰量和渗透深度为基准,将SHRP试验结果转换为相对融冰能力和相对渗透能力,见图4。



a) 相对融冰能力



b) 相对渗透能力

图4 SHRP试验结果转换

Fig. 4 SHRP test results conversion

由图4可以看出,试验温度对相对融冰能力的影响较为明显,尤其是温度由-10℃降至-15℃时,其影响最为显著。以氯化钙为例,试验温度为-10℃时,其相对融冰能力为157%(30 min);试验温度降至-15℃时,其相对融冰能力高达248%。因此,-10℃下的相对融冰能力并不能用于评价某一融雪剂在其他温度条件下的融雪化冰性能,这也说明氯化钠并不适合作为较低温度下相对融雪性能试验的参比溶液。

SHRP的研究成果认为,融雪剂渗透冰雪层的能力是评价融雪剂融雪化冰性能的重要指标。对比图2和图3的试验结果可以看出,尽管渗透能力与融冰能力有较强的相关性,但还是存在一定的差异:试验温度为-5℃时,氯化钙的融冰能力最强,但渗透能力最强的是醋酸钠,且3种融雪剂渗透能力之间的差异较融冰能力差;-15℃时,氯化钠与醋酸钠的渗透能力相当,但融冰能力却有较大的差异。从图4也可以看出,随温度的变化,渗透能力呈现出与融冰能力不同的变化规律。在实际路面除雪作业中,如冰雪层较厚,应首先使用渗透能力较强的融雪剂,有助于融雪剂更快浸入路面-冰雪层界面,破除冰雪层与路面之间的粘结,从而提高融雪化冰效率,节省融雪剂用量。因此,增加渗透能力试验,对于全面评价融雪剂的融雪化冰能力具有重要的意义。

根据融雪剂在我国实际应用的成功经验,结合试验结果,笔者推算了融雪剂实际应用中的用量(温度变量,雪量定值10 mm/次),其结果见表4。

表4 融雪剂用量推算

Tab. 4 Calculation of snowmelt dosage				g/m ²
温度/℃	氯化钠	氯化钙	醋酸钠	
-5	10.0	10.0	10.0	
-10	20.0	14.3	16.7	
-15	50.0	16.8	25.0	

4 结 论

根据试验结果,可以得到以下3个结论:

1) 融雪剂的固液相和融雪剂溶液的质量浓度对其融雪化冰性能的影响较大。我国融雪剂融雪化冰性能评价方法采用融雪剂溶液的做法与融雪剂的实际使用情况不符,不能很好地指导融雪剂的选用。

2) 融雪剂的融雪化冰性能受温度影响显著。氯化钙和醋酸钠在-10℃下的相对融冰能力不具备代表性,不能用于评价其他温度条件下的融冰能力,而

氯化钠不适合作为较低温度下相对融雪性能试验的参比溶液。

3)融冰试验不能全面评价融雪剂的融雪化冰性能,增加渗透能力评价指标有助于提高融雪化冰效率,节省融雪剂用量。MET

[参考文献]

- [1] XIE N, SHI X M, ZHANG Y. Impacts of potassium acetate and sodium-chloride deicers on concrete[J]. Journal of materials in civil engineering, 2017, 29(3): 04016229.1-04016229.10.
 - [2] SURANENI P, AZAD V J, ISGOR O B, et al. Deicing salts and durability of concrete pavements and joints: mitigating calcium oxychloride formation[J]. Concrete international, 2016, 38(4): 48-54.
 - [3] OPARA K R, SKAKUJ M, STÖCKNER M. Factors affecting raveling of motorway pavements: a field experiment with new additives to the deicing brine[J]. Construction & building materials, 2016, 113: 174-187.
 - [4] 史丽峰. 氯盐侵蚀对纤维混凝土强度的影响研究[J]. 市政技术, 2021, 39(12): 109-113. (SHI L F. Influence of chloride erosion on strength of fiber reinforced concrete[J]. Journal of municipal technology, 2021, 39(12): 109-113. (in Chinese))
 - [5] 吕学春. 主动融冰雪沥青路面技术在冬奥保障道路中的应用[J]. 市政技术, 2021, 39(7): 49-52, 68. (LYU X C. Application of active melting ice and snow asphalt pavement technology in guarantee road of Winter Olympics[J]. Journal of municipal technology, 2021, 39(7): 49-52, 68. (in Chinese))
 - [6] SONG L, ZHENG N, YANG J, et al. Ice melting performance of deicers and their effect on stripping resistance of asphalt mixture[J]. Journal of Southeast University (English edition), 2016, 32(3): 327-332.
 - [7] SHI X, JUNGWIRTH S, AKIN M, et al. Evaluating snow and ice control chemicals for environmentally sustainable highway maintenance operations[J]. Journal of transportation engineering, 2014, 140(11): 05014005.
 - [8] 马宇翔. 浅谈融雪剂对公路绿化植物的影响[J]. 市政技术, 2012, 30(4): 41-42, 46. (MA Y X. Discussion on the influence of snowmelt agent on highway greening plants[J]. Journal of municipal technology, 2012, 30(4): 41-42, 46. (in Chinese))
 - [9] AKIN M, SHI X M. Development of standard laboratory testing procedures to evaluate the performance of deicers[J]. Journal of testing & evaluation, 2012, 40(6): 1-12.
 - [10] 北京市环境卫生设计科学研究所. 融雪剂: DB11/T 161—2002[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2002. (Beijing Institute of Environmental Sanitation Design. Snowmelt agent: DB11/T 161—2002[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2002. (in Chinese))
 - [11] 青岛华东制钙有限公司. 道路除冰融雪剂: GB/T 23851—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. (Qingdao Huadong Calcium Producing Co., Ltd.. Road deicing and snow melting agent: GB/T 23851—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese))
 - [12] 陆季超. 减少除雪作业中融雪剂用量的作业技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(9): 76-78. (LU J C. Techniques for reducing the amount of snowmelt in snow removal operations[J]. Road machinery & construction mechanization, 2013, 30(9): 76-78. (in Chinese))
 - [13] 北京市环境卫生设计科学研究所. 融雪剂: DB11/T 161—2012[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2012. (Beijing Institute of Environmental Sanitation Design. Snow melt agent: DB11/T 161—2012[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2012. (in Chinese))
- 其他作者: 何冰, 男, 工程师, 学士, 主要从事道路施工、养护工作。

(上接第50页)

- science edition), 2009, 37(8): 116-121, 126. (in Chinese))
- [9] 郝增恒, 王滔, 王民, 等. 钢桥面铺装温度场分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(11): 36-43. (HAO Z H, WANG T, WANG M, et al. Analysis on temperature field of steel bridge deck pavement[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2018, 35(11): 36-43. (in Chinese))
- [10] 沈聪, 高培伟, 张辉. 钢箱梁大桥桥面铺装温度场有限元分析研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 21-25. (SHEN C, GAO P W, ZHANG H. Research on temperature field of steel deck pavement by finite[J]. Highway engineering, 2018, 43(3): 21-25. (in Chinese))
- [11] 逯彦秋, 陈宜言, 孙占琦. 改善钢桥面铺装层高温作用的有效措施[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 115-119. (LU Y Q, CHEN Y Y, SUN Z Q, et al. Effective measures to lower the temperature for steel bridge deck pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 115-119. (in Chinese))
- [12] 杜银飞. 沥青路面取向热诱导传输机理与结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. (DU Y F. Study on mechanism and structure of oriented heat induced transmission of asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese))
- [13] 叶伟. 基于钢桥面铺装层内部温度变化监测的隔热降温材料优选试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 108-113. (Ye W. Experimental study on optimization of heat insulation and cooling materials based on monitoring of internal temperature changes in steel bridge deck pavement[J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(3): 108-113. (in Chinese))
- [14] 丁敏, 周旭东, 熊锋, 等. 降低钢桥桥面铺装体系温度方法探索[J]. 山东交通科技, 2013(1): 9-11. (DING M, ZHOU X D, XIONG F, et al. Explore the method of reduce temperature of steel bridge deck pavement system[J]. Shandong transportation science and technology, 2013(1): 9-11, 16. (in Chinese))
- [15] 王赫. 沥青路面热反射涂层性能及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (WANG H. Study on performance and application of thermal reflective coating on asphalt pavement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))