

文章编号: 1008-1542(2023)01-0093-10

沥青路面绿色缓释微胶囊自融冰剂的研究与测试

于国功¹, 赵全胜², 陈玉帅²

(1. 河北省高速公路京雄管理中心, 河北雄安新区 071700; 2. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为了解决传统氯盐类道路融雪剂存在对道路腐蚀和环境危害的问题, 开发一种绿色环保的缓释微胶囊自融冰剂。利用从糠醛生物质内提取的有机物质制作自融冰剂芯材, 利用固废载体将融雪盐芯材吸附至孔隙内, 再在吸附芯材的载体表面进行高分子囊壁改性处理, 形成微胶囊结构, 以冰点和相对融冰化雪能力等为评价指标, 开展室内性能试验, 并在京雄高速(K64+992)~(K65+193.641)路段进行现场中试试验。结果表明, 微胶囊掺入路面材料比例为4%时, 室内融冰率达到46.9%, 远超规范要求; 在5.5%缓释微胶囊自融冰剂替代等量矿粉中试试验中, 路面的落雪完全融化, 融冰效果良好。利用糠醛热解废液提取物研发的融冰剂芯材缓释效果显著, 避免了传统氯化物添加剂的腐蚀性, 减少了对路面的腐蚀和环境污染, 达到了绿色环保效果。

关键词:天然产物有机化学; 融冰剂; 固废利用; 缓释微胶囊; 非氯盐; 绿色环保

中图分类号: TU506 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2023yx01011

Research and testing of green and slow release microencapsulated self melting ice agent for asphalt pavement

YU Guogong¹, ZHAO Quansheng², CHEN Yushuai²

(1. Hebei Expressway Jing-Xiong Management Center, Xiong'an New Area, Hebei, 071700, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problems of road corrosion and environmental damage caused by traditional chloride road snow melting agent, a green and environment-friendly slow release microencapsulated self melting ice agent was developed. The core material of self melting ice agent was made by extracting the organic substances in furfural. The core material of snow melting salt was adsorbed into the pores by using solid waste carrier, and the surface of the carrier of the adsorption core material was modified by the polymer capsule wall to form a microcapsule structure. Taking freezing point and relative ice-melting and snow-melting ability as indexes, the indoor performance test was carried out, and the field pilot test was carried out in section

收稿日期: 2022-12-04; 修回日期: 2023-01-08; 责任编辑: 张士莹

基金项目: 国家自然科学基金(1633201); 河北省交通运输科技计划项目(JX202015)

第一作者简介: 于国功(1976—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事新型沥青路面方面的研究。

通信作者: 赵全胜教授。E-mail: zony8@163.com

于国功, 赵全胜, 陈玉帅. 沥青路面绿色缓释微胶囊自融冰剂的研究与测试[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(1): 93-102.

YU Guogong, ZHAO Quansheng, CHEN Yushuai. Research and testing of green slow release microencapsulated self melting ice agent for asphalt pavement [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(1): 93-102.

(K64+992) ~ (K65+193.641) of Jingxiong Expressway. The results show that the indoor ice-melting rate reaches 46.9% when the ratio of microcapsule to pavement material is 4%, which far exceeds the standard requirement. In the pilot test of 5.5% replacement of mineral powder, the snow on the road surface melted completely, which shows the good ice-melting effect. The ice-melting agent core developed by using furfural pyrolysis waste liquid extract has a remarkable slow-release effect, avoids the corrosiveness of the traditional chloride additive, reduces the corrosion to the road surface and the environmental pollution, and achieves the green environmental protection effect.

Keywords: organic chemistry of natural products; ice melting agent; solid waste utilization; slow release microcapsules; non-chlorine salts; green and environmental protection

一直以来,许多国家都非常重视路面积雪结冰的清除问题,经过长期研究和探索,已拥有多种清除路面积雪结冰的技术,按除冰雪方式可分为主动式与被动式2类^[1-2]。被动式除雪是指依靠外界力量施加于路面达到清除冰雪的方法^[3],机械法、人工除雪和使用外撒融雪剂等方式均为被动式除雪。主动式除雪则是指路面本身具有特殊的力学性能或构造,或利用太阳能、电能等能源,防止公路桥梁表面有雪滞留和产生坚冰。主动除冰雪技术中,目前常用的有路面自身应力铺装技术、蓄盐路面技术、自融雪沥青路面涂层技术和利用热能融冰雪铺装技术^[4-5]。作为主动除冰雪技术的一种,蓄盐路面技术的机理是当外部环境(包括大气的温湿度)与路面层和路深层发生差异时,路面受到行驶车辆荷载的作用发生形变、振动与磨损,此时蓄盐沥青路面中的抑冰融雪成分会通过路面内部的孔隙与毛细管缓慢迁移到路面层进行释放,在路面吸收空气中的水分发生潮解逐渐形成溶液^[6]。虽然蓄盐路面技术取得了良好的除雪效果,但在经济、环保与效能等诸多方面仍然存在不足,甚至会严重影响路面服役寿命及威胁道路周边环境。因此,亟待研发出一种经济、环保与高效的新型抑冰除雪方法。在国家“十四五”规划绿色发展的理念下,本研究依托京雄高速某路段,利用糠醛生物质热解废液提取非氯盐,以固废高炉矿渣粉作为载体,结合微胶囊技术研发一种缓释微胶囊自融冰剂,分别以溶液冰点、固体溶解速率、pH值和相对融冰化雪能力等指标对融雪材料的性能进行试验评价。

1 主要材料及制备流程

本试验所需主要原材料信息如表1所示,缓释微胶囊自融冰剂由自融冰剂和囊壁及水按一定比例搅拌而成,详细步骤见图1,成品见图2。

表1 主要原材料
Tab.1 Main raw materials

名称	规格	名称	规格
氯化钠	分析纯	碳酸氢钠	分析纯
氯化钙	分析纯	碳酸钠	分析纯
氯化镁	分析纯	偶氮二异丁腈	分析纯
氯化钾	分析纯	过氧化二异丙苯	分析纯
乙酸钙	分析纯	过氧化苯甲酰	分析纯
乙酸钾	分析纯	硅烷偶联剂 KH-570	分析纯
醋酸钠(糠醛生物提取物)	—	异丙醇	分析纯
氢氧化钠	分析纯	丙烯酸甲酯	分析纯
丙烯酸	分析纯	丙烯酸乙酯	分析纯
苯乙烯	分析纯	聚乙二醇	分析纯

2 缓释微胶囊自融冰剂微观试验

将缓释微胶囊自融冰剂替代矿粉掺入沥青混合料,抑冰融雪成分在毛细管作用、车辆行驶产生泵吸作用和环境的耦合作用下,逐渐向沥青路面析出,吸收空气中的水分形成溶液,溶液与冰雪之间存在蒸气压差,冰雪有蒸气压下降向液态蒸气压趋同的趋势,接触面冰雪融化降低了路面与冰层的黏结力,将路面冰点降低至-20℃。目前,国内外在蓄盐沥青路面方面的研究重点集中在材料研发、材料相关性能及对路用性能的影响。

响方面,鲜见对材料微观特性、微观机理方面的研究^[7-10]。本文采用红外光谱试验,对自制缓释微胶囊自融冰剂的作用机理与特性进行研究,缓释微胶囊自融冰剂红外光谱分析图谱见图 3。

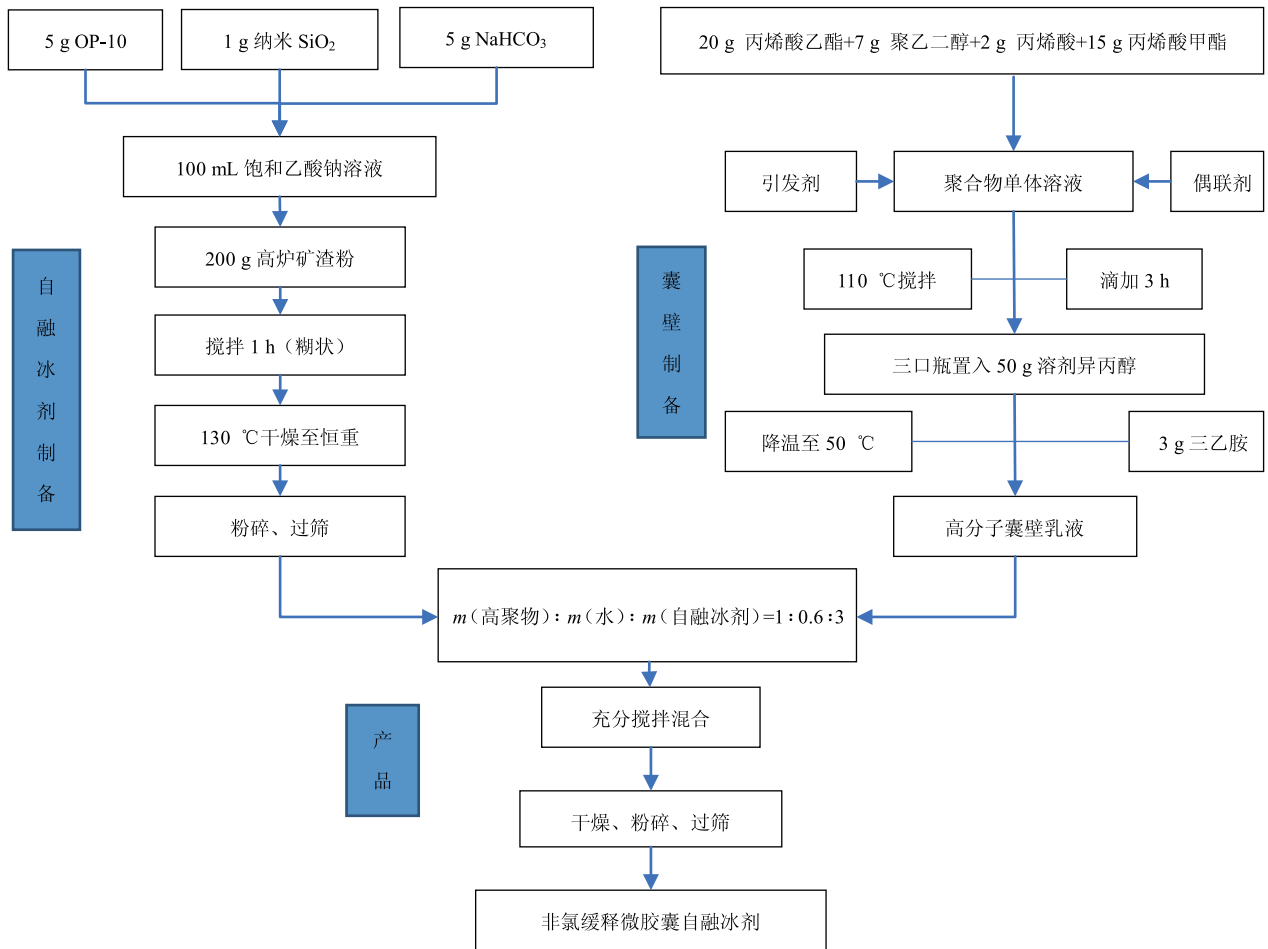


图 1 缓释微胶囊自融冰剂制备流程

Fig. 1 Preparation process of slow release microcapsule self melting ice agent



a) 磨碎自融冰剂

b) 自融冰剂样品

图 2 缓释微胶囊自融冰剂产品

Fig. 2 Slow release microcapsule self melting ice agent product

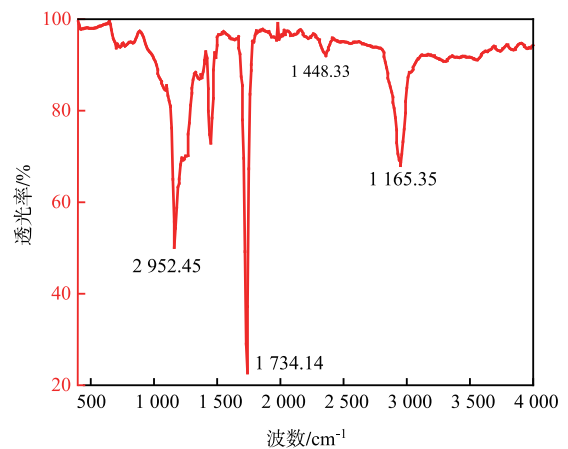


图 3 缓释微胶囊自融冰剂红外光谱图

Fig. 3 IR spectrum of slow release microcapsule self melting ice agent

由试验结果可知,2 952. 45 cm⁻¹ 处为甲基的伸缩振动峰,甲基在有机聚合物中为最常见基团;1 734. 14 cm⁻¹ 处为羰基伸缩振动峰,羰基的比例最大,且为非亲水基,可见高分子囊壁中以非亲水基团为主;1 448. 33 cm⁻¹ 处为甲基面内变角振动峰,1 165. 35 cm⁻¹ 处为碳氧碳反对称伸缩振动峰,碳氧碳本身为

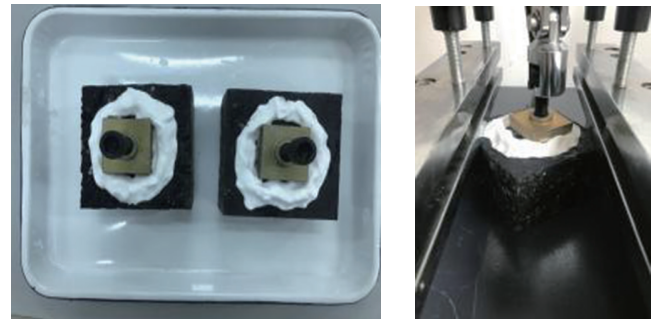
酮基,聚合物中碳氧碳带有羟基形成羧基,羧基为亲水基团,在高分子囊壁材料中作为微胶囊表面通道,使水分可以渗透,释放非氯盐。

3 缓释微胶囊自融冰剂材料融冰雪性能测试

3.1 冰点

沥青混合料中掺入盐化物融雪材料,会造成混合料表面冰点下降,故冰点是衡量蓄盐路面盐化物材料性能的重要指标之一。冰点是指冰雪在沥青路面开始发生冻结、黏结强度 ≤ 0.1 MPa时对应的温度,不同类型的路用融雪材料冰点不同,通常自融冰剂冰点越低意味着可以产生更显著的抑冰融雪效果^[11]。本试验对自制的缓释微胶囊自融冰剂的冰点进行测定,试验结果见图4。

将缓释微胶囊自融冰剂替代矿粉掺入沥青混合料,分别以缓释微胶囊在沥青混合料中比例为0%,2%,4%,6%和8%进行试验研究,结果见表2。



a) 混合料冰点精确试验准备

b) 拉拔试验确定冰点

图4 确定混合料冰点试验

Fig. 4 Test for determining the freezing point of mixture

表2 非氯盐沥青混合料冰点试验结果

Tab. 2 Results of freezing point test of non-chloride asphalt mixture

缓释微胶囊自融冰剂添加比例/%	0	2	4	6	8
沥青混合料冰点/℃	-2.5	-9.8	-17.5	-21.3	-24.6

由表2可知,普通沥青混合料冰点为 -2.5 ℃,说明冬季冰雪天气中,沥青路面在存水或积雪情况下,极易发生结冰现象,造成沥青路面的附着力下降,对行车安全造成威胁;缓释微胶囊自融冰剂掺量比例为4%时,冰点达到 -17.5 ℃;随着自制缓释微胶囊自融冰剂在沥青混合料中掺量的增加,沥青混合料的冰点呈现出下降趋势,缓释微胶囊自融冰剂掺入沥青混合料较少时冰点下降速率较快,随着掺加比例的增加,沥青混合料冰点下降速率减缓且出现“收敛”趋势。此现象是因为缓释微胶囊自融冰剂的抑冰化雪成分为生物质提取物A,A溶液的冰点为 -24.6 ℃,可见沥青混合料冰点受此影响存在下限。所以在含量持续升高的情况下,冰点下降的趋势开始减缓并趋于缓释微胶囊核心材料的冰点。

3.2 融冰率

对于功能性抑冰融雪材料融雪化冰能力的测试,国内外评价方法与种类繁多,目前尚没有固定的评价方法。按照中国目前现行的2个路用融雪材料标准,以融冰量作为评价指标测试抑冰融雪材料的融冰能力。由于篇幅所限,具体试验步骤省略,试验结果见表3及图5。

表3 非氯盐沥青混合料融冰率

Tab. 3 Melting rate of non-chloride asphalt mixture

编号	缓释微胶囊自融冰剂占比/%	初始冰质量/g	2 h 残冰质量/g	融冰率/%	规范要求
1	0	39.5	39.3	0.51	$\geq 20\%$
2	2	40.0	32.1	19.7	
3	4	39.7	21.1	46.9	
4	6	39.8	11.3	71.6	



a) 试验前

b) 试验后

图5 测试前后的融冰能力

Fig. 5 Ability of melt ice before and after the test

由结果可知,缓释微胶囊自融冰剂在沥青混合料中的比例越高,非氯盐沥青混合料的融冰率也越高,规范中盐化物沥青混合料的融冰率要求大于20%;试验过程中,普通沥青混合料与冰块共同恒温2h后,融冰率为0.51%,冰块与混合料表面发生黏结难以分开,冰块没有融化的趋势;加入非氯盐沥青混合料后没有出现立即停止融化的趋势,少量水在马歇尔试件与冰块接触界面出现再次冻结现象;缓释微胶囊自融冰剂比例

为 2% 时,融冰率为 19.7%,马歇尔试件与冰接触界面产生轻微冻结现象,用手稍微用力即可分离,可知自融冰剂已得到释放并发挥作用,冰块与马歇尔试件接触面已经发生融化,由于掺加量小,所以冰块融化现象并不显著;缓释微胶囊自融冰剂比例为 4% 时,融冰率为 46.9%,马歇尔试件与冰块未发生黏结,接触界面有部分融化的液态水,可知自融冰剂已发挥作用,且有较优的抗凝结与融冰效果;缓释微胶囊自融冰剂比例为 6% 时,融冰率达到 71.6%,冰块残留量较少,自融冰剂释放量足,非氯盐沥青混合料具有较低冰点,冰块融化速率较快。

3.3 盐分释出量

蓄盐沥青路面能否保持适当盐分的释放量,较大程度上影响着蓄盐路面的使用寿命。盐分释放量过快,抑冰融雪效果优良,但会在一定程度上缩短路面的使用年限,同时增加了路面的维护成本;随着盐分的快速释放,过量的盐分不仅对路面产生负面影响,还会导致道路周边土壤在一定程度上发生劣化,道路周边的生物也会因过量盐分的富集受到伤害,盐分释放量过慢时,达不到融雪抑冰的功能。依据现行路用融雪材料的规范要求,以盐分释出量为评价指标,可验证自制缓释微胶囊自融冰剂能够保证适当的释放速率。盐分释出量试验及结果,见图 6 和图 7。

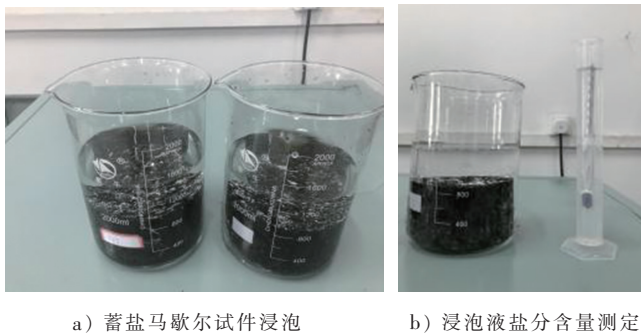


图 6 盐分释出量试验
Fig. 6 Salt release test

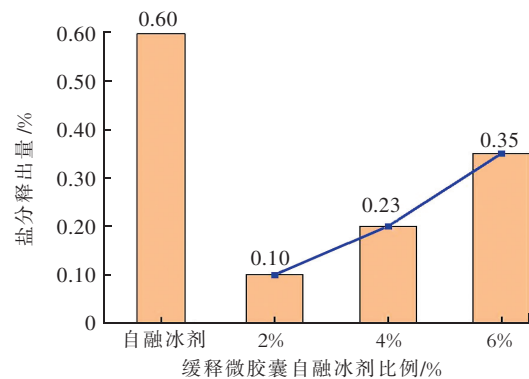


图 7 盐分释出量试验结果
Fig. 7 Results of salt release test

由图 7 可知,在相同自融冰剂掺量下,使用微胶囊囊壁改性处理过的自融冰剂成型的马歇尔试件,其盐分释出量满足规范要求($\leq 0.4\%$),而未经处理的自融冰剂成型的马歇尔试件则释放速率过快,不能满足长效释放的研究目标;不同掺量比例的马歇尔试件在试验中测得的盐分释出量数值不同,盐分释出量随缓释微胶囊自融冰剂在马歇尔试件内所占比例的增加呈现出增加的趋势。缓释微胶囊自融冰剂比例为 2% 时,盐分释出量为 0.10%;缓释微胶囊自融冰剂比例为 4% 时,盐分释出量达到 0.23%;当缓释微胶囊自融冰剂比例为 6% 时,盐分释出量达到 0.35%。由此可知,盐分释出量与缓释微胶囊自融冰剂在马歇尔试件中的含量呈正相关。由试验结果可知,含量为 4%~6% 时,可兼顾盐分释出量与马歇尔试件的水稳定性,在冰雪环境中使用可以达到较好的融冰雪效果,从而保障行车安全与路面的使用寿命。

3.4 pH 值

拌和后的沥青混合料,经过摊铺碾压后成型为沥青路面。随着温度的冷却,路面强度逐渐提高,在此过程中沥青与混合料中的粗细集料形成界面,对于沥青路面而言,有机物沥青与无机矿料间的界面是强度最为薄弱的部分。根据以往试验,碱性集料制备的沥青混合料性能远高于偏酸性集料制备的沥青混合料,集料与沥青间形成的界面也更稳定。沥青中含有酸酐,使得沥青本身的 pH 值略低于 7,弱酸性的沥青与碱性集料制备混合料时,一定程度上会发生中和反应,集料与沥青之间的黏结力得以加强,因此规范中要求沥青混合料的 pH 值为 7~9。试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,普通 SMA-13 沥青混合料的 pH 值为 8.2;非氯盐沥青混合料的 pH 值略低为 7.8。掺入 4% 缓释微胶囊自融冰剂后,混合料 pH 值下降 4.9%。2 种试件均呈弱碱性,符合规范要求的 7~9,说明材料对沥青混合料 pH 值的影响在规范要求之内。

表 4 pH 值测定试验结果

Tab. 4 Test results of pH value determination

试件种类	pH 值
普通马歇尔试件	8.2
6%缓释微胶囊自融冰剂马歇尔试件	7.8

3.5 吸湿率

吸湿率是评价融雪材料潮解能力的重要指标,根据规范要求,吸湿率应 $\leq 0.7\%$ 。本试验采用吸湿率对缓释微胶囊自融冰剂进行评价,结果见图8。

由图8结果可知,在相同的自融冰剂掺量下,使用微胶囊囊壁改性处理过的自融冰剂成型的马歇尔试件,其吸湿率满足规范要求($\leq 0.7\%$),而未经处理的自融冰剂成型的马歇尔试件则吸湿率过高,不满足规范要求;不同掺量比例的马歇尔试件在试验中测得的盐分释出量数值不同,吸湿率随缓释微胶囊自融冰剂在马歇尔试件内所占比例的增加呈现出增加的趋势。缓释微胶囊自融冰剂比例为2%时,吸湿率为0.29%;缓释微胶囊自融冰剂比例为4%时,吸湿率为0.40%;缓释微胶囊自融冰剂比例达到6%时,吸湿率为0.64%。由此可知,吸湿率与缓释微胶囊自融冰剂在马歇尔试件中的含量呈正相关。

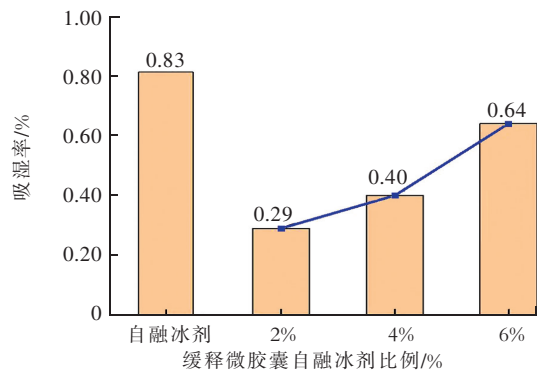


图8 缓释微胶囊自融冰剂吸湿率试验结果
Fig. 8 Test results of moisture absorption rate of slow release microcapsule self melting ice agent

4 蓄盐沥青路面路用性能研究

使用马歇尔试验确定最佳油石比为5.94%,进行SMA-13配合比设计检验,最优试验结果见表5。

表5 矿料掺配比例

Tab.5 Proportion of mineral admixture

项目	集料		机制砂	矿粉与自制材料混合物
	粒径为10~15 mm	粒径为5~10 mm		
掺配比例/%	36	39	15	10

4.1 高温稳定性测试

依据《公路沥青路面施工技术规范》对沥青路面相关路用性能的规定,采用车辙试验,检验缓释微胶囊自融冰剂沥青混合料的高温稳定性,碾轮法制备车辙试件及结果如图9及表6所示。根据《沥青路面使用性能气候分区》确定为夏热区,对沥青混合料的高温稳定性进行评价。车辙试验环境为60℃,0.7 MPa,在试验机上加载1 h,读取45 min及60 min时的车辙形变量,车辙试验测得结果能较好地反映出沥青混合料路面抵抗车辙的能力。

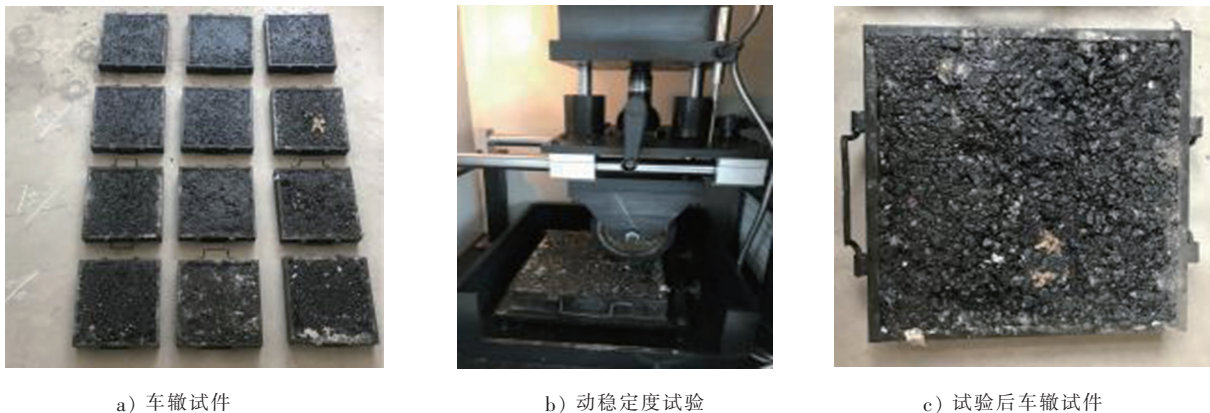


图9 高温稳定性试验

Fig. 9 High temperature stability test

表6 车辙试验动稳定度结果

Tab.6 Dynamic stability result of rut test

缓释微胶囊自融冰剂比例/%	0	2	4	6	规范值
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	6 631	6 701	6 057	5 391	$\geq 3 000$

由图 9 和表 6 结果可知,在相同油石比情况下,随着缓释微胶囊自融冰剂比例的增加,沥青混合料动稳定度所表现出来的主要趋势为下降,但是下降幅度有限。根据规范要求,河北高速应用路段属于夏季较炎热地区,要求动稳定度 $\geq 3\ 000$ 次/mm。试验结果显示,缓释微胶囊自融冰剂以几种比例掺入沥青混合料制备的车辙试件,动稳定度均大于 5 000 次/mm,满足规范要求。根据试验结果,缓释微胶囊自融冰剂比例为 2%时,沥青混合料动稳定度上升,这是由于缓释微胶囊自融冰剂替代部分矿粉后,矿料合成级配发生变化,沥青混合料高温稳定性反而提高了 1%;掺配比例为 4%时,比普通沥青混合料动稳定度下降 0.86%;掺配比例为 6%时,比普通沥青混合料动稳定度下降 18.7%,高温稳定性受到影响较小,均满足规范使用要求。

4.2 低温抗裂性

温缩裂缝是沥青路面发生开裂的主要形式之一^[12]。试验对非氯盐沥青混合料进行低温稳定性评价,采用小梁弯曲试验,以小梁破坏时最大应变作为低温稳定性的评价指标,试验环境温度为 $-10\ ^\circ\text{C}$,结果见表 7。

表 7 低温小梁弯曲试验结果

Tab. 7 Experimental results of beam bending at low temperature

缓释微胶囊自融冰剂占比/%	0	2	4	6	规范值
最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	4 255	4 230	3 967	3 817	$\geq 2\ 500$

由表 7 可知,与普通沥青混合料相比,非氯盐沥青混合料的最大弯拉应变有所降低,在缓释微胶囊自融冰剂比例为 6%时,弯拉应变下降 10.1%。根据中国对改性沥青路面低温抗裂性的规范要求:冬季气候较寒冷但仍有较温暖的地区,要求沥青路面最大弯拉应变 $> 2\ 500\ \mu\epsilon$;冬季寒冷地区,要求沥青路面最大弯拉应变 $> 3\ 000\ \mu\epsilon$ 。结果表明,几种掺入比例下,沥青混合料的低温抗裂性能均满足要求。其原因是,沥青混合料中矿粉替换为缓释微胶囊自融冰剂后,微胶囊高分子膜与沥青之间的黏结力低于沥青与矿粉之间的黏结力。混合料中集料间的黏结力下降,同时低温情况下沥青的抗剪切能力也会下降,导致非氯盐沥青混合料的强度略低于原沥青矿料,沥青混合料低温抗裂性能降低。

4.3 水稳定性

水损害是沥青路面重要的损害之一,沥青路面积水或冬季出现水冻融循环时,在持续的行车荷载作用下,沥青路面构造中和路面缝隙中存留的水会不断产生动水压力和负压抽吸的循环作用,受此作用,自由水逐渐渗透至沥青混合料内部,水渗透至沥青与集料界面时会造成沥青黏附性降低甚至消失。本研究从实际工程应用出发,结合现行规范,采用冻融劈裂试验与浸水马歇尔试验^[13],对自制非氯盐沥青混合料的水稳定性进行研究,结果见表 8,冻融劈裂试验结果见表 9。

表 8 浸水马歇尔试验结果

Tab. 8 Results of the Marshall immersion test

缓释微胶囊自融冰剂比例/%	浸水 0.5 h 稳定度/kN	浸水 48 h 稳定度/kN	残留稳定度/%	规范要求/%
0	12.68	12.12	95.6	≥ 80
2	10.72	9.74	90.8	
4	13.02	12.16	93.3	
6	11.01	9.64	87.6	

表 9 冻融劈裂试验结果

Tab. 9 Results of freeze-thaw split test

缓释微胶囊自融冰剂比例/%	0	2	4	6	规范要求
冻融劈裂强度比/%	83.7	84.8	86.7	85.1	≥ 80

由表 8 和表 9 可知,非氯盐沥青混合料马歇尔试件,水稳定性评价满足应用要求,掺入自制缓释微胶囊自融冰剂后,会造成沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度下降,而冻融劈裂强度比则比普通沥青混合料有所上升。

2 种水稳定性检验方法,试验得出相反的现象,其原因分析如下:以自制缓释微胶囊自融冰剂作为填料,替换集料中的矿粉,60 $^\circ\text{C}$ 恒温水浴浸泡后,沥青混合料受到水侵害,稳定度下降;冻融劈裂试验过程中,马歇尔试件首先被抽成真空,先冻后融,比较贴近实际地模拟了沥青路面在冬季的工作环境。融雪剂本身作为一

种低冰点功能材料,掺入沥青混合料后会对严寒环境有一定的抵抗能力,普通沥青混合料在严寒环境中的抵抗能力略低于前者,导致自制非氯盐沥青混合料的冻融劈裂强度比上升。

由水稳定性试验结果分析可知,自制微胶囊蓄盐路面高温抗水损害能力低于普通沥青混合料,在缓释微胶囊自融冰剂比例为6%时,仍满足规范要求,且抵抗冻融损害的能力高于普通沥青混合料。

4.4 抗动水冲刷稳定性

在路面服役期间,行车荷载作用下对沥青路面表面的空隙内存水形成泵吸作用,加速路面的破坏速率,降低路面的使用寿命^[14-15]。以缓释微胶囊自融冰剂作为填料,替换矿粉掺入沥青混合料,随着汽车荷载泵吸作用和毛细管作用反复循环,加速了融冰雪组分芯材的析出,甚至会造成沥青混合料中的部分填料流失^[16-18]。因此设计动水冲刷试验,对沥青路面抗动水冲刷稳定性进行评价。

试验过程中,动水以10 L/min的流量对马歇尔试件进行冲刷,以残留强度比作为评价指标。甲组以普通马歇尔试件作为对照组,乙组为缓释微胶囊自融冰剂比例为4%的马歇尔试件。将甲乙组在25℃恒温水箱中浸泡2 h,用动水进行10,20,30,60,90 min共5个冲刷时间的冲刷试验,测定甲乙组马歇尔试件的冻融劈裂强度比,试验结果见图10。

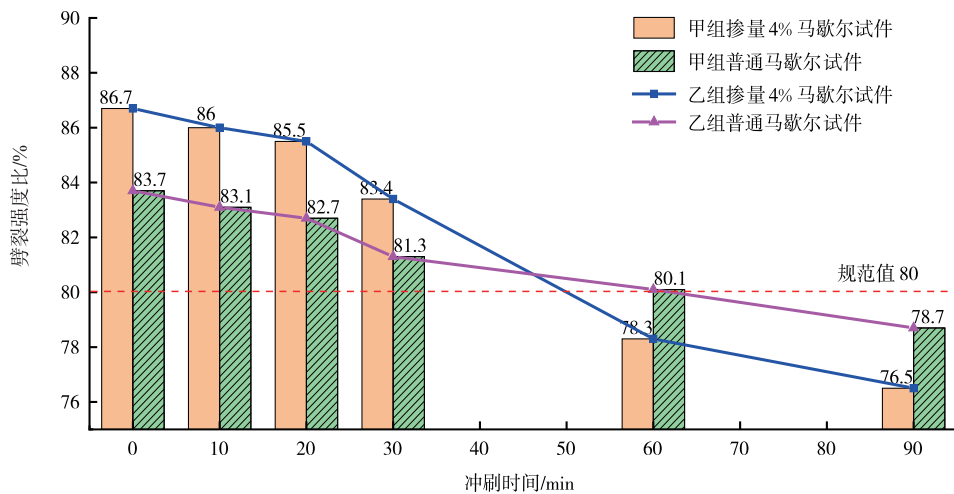


图10 抗动水冲刷稳定性试验结果

Fig. 10 Results of stability test against dynamic water scour

由图10可知,甲乙组马歇尔的残留强度比均随试验时间的延长而降低,普通沥青混合料残留强度比减小速率低于自制非氯盐沥青混合料产品,根据规范对残留强度比 $\geq 80\%$ 的要求,普通沥青混合料冲刷时间60 min后不满足规范要求,自制自融冰剂马歇尔试件冲刷时间90 min后不满足使用要求;冲刷时间为60 min时,缓释微胶囊自融冰剂比例为4%的马歇尔试件残留强度比是未冲刷试件的90.3%,普通马歇尔试件的残留强度比是未冲刷试件的95.7%;60 min时蓄盐马歇尔试件TSR是普通马歇尔试件的97.8%。说明沥青路面在动水冲刷后加剧了对材料的破坏,自制非氯盐沥青路面的抗动水冲刷损害能力略低于普通沥青路面,缓释微胶囊自融冰剂对沥青混合料抗动水冲刷稳定性能的影响在可控范围内。

沥青路面在缓释微胶囊自融冰剂掺量不足的情况下,抑冰除雪效果不佳^[19-20]。经对自制缓释微胶囊自融冰剂掺入沥青混合料后融冰化雪能力进行检验,发现掺入比例为2%符合规范中对融冰化雪能力的要求,掺入比例达到4%时,非氯盐沥青混合料的融冰率为46.9%。经过路用性能试验研究,发现6%以上掺量会导致道路路用性能下降,经济性下降,所以需要兼顾融冰化雪性能、路用性能和经济性确定一个适中的掺量。综合考虑,确定在工程应用中缓释微胶囊自融冰剂掺加比例的范围在4%~6%。

依托北京至雄安高速公路,在泗庄收费站(K64+992)~(K65+193.641)交叉主匝道4 cm厚SMMA表层添加5.5%缓释微胶囊自融冰剂,替代等量的矿粉。试验路段于2021年5月铺设,2021年底降雪。真实场景对比照片(见图11)显示融雪能力区别明显。截至目前,该道路性能良好,对该路段后续性能的监测也在持续进行中。

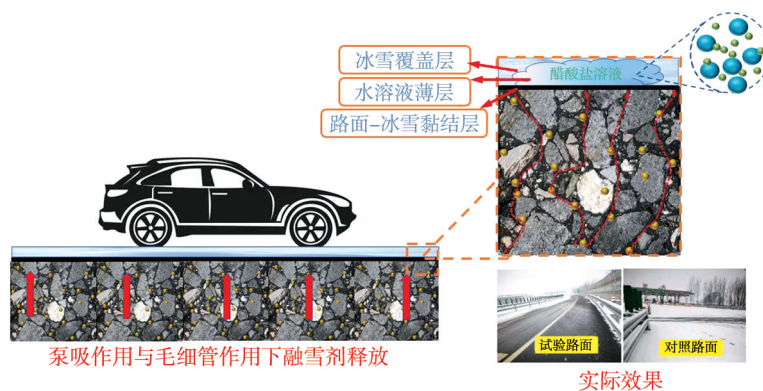


图 11 SMMA 工作原理及现场应用图

Fig. 11 SMMA working principle and field application diagram

5 结 语

1) 自主开发出一种缓释微胶囊自融冰剂, 主料为糠醛有机提取物, 通过固废载体将融雪盐芯材吸附至孔隙内, 在吸附芯材的载体表面进行高分子囊壁改性处理, 形成微胶囊结构, 达到了缓释效果, 同时简化了高分子胶囊壁的合成工艺, 便于实现规模化生产。

2) 对缓释微胶囊自融冰剂进行了微观测试和路用性能测试, 在满足规范要求的前提下, 确定了其替换矿粉掺入沥青混合料的最佳比例为 4%~6%, 在泗庄收费站(K64+992)~(K65+193.641)交叉主匝道进行的现场试验表明融冰效果显著。

3) 缓释微胶囊自融冰剂产品为非传统氯盐, 避免了对路面结构的腐蚀和环境污染, 达到了低碳环保的效果, 为沥青路面绿色环保防冰融雪剂的开发提供了新思路。

但是, 缓释微胶囊自融冰剂并不适用于水泥混凝土和既有沥青混凝土路面, 所研发的新材料通过载体和高聚物改性达到缓释效果, 芯材整年持续释放, 在冬季高于 0℃时会选择性释放。因此, 未来将针对智能温感缓释融雪涂层新材料进行更为深入的研究。

参考文献/References:

- [1] 崔禹晴, 吕丹, 王威. 融雪剂的研究进展及发展方向[J]. 广州化工, 2022, 50(12): 17-19.
CUI Yuqing, LYU Dan, WANG Wei. Research progress and development direction of snow melting agent[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(12): 17-19.
- [2] 许瑞芹. 橡胶颗粒沥青混合料破冰性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
XU Ruiqin. Research on Ice Breaking Performance of Crumb Rubber Asphalt Mixture[D]. Xi'an: Changan University, 2011.
- [3] 罗春阳, 唐爽, 王开宝, 等. 小型化道路积雪清扫压块装置研制[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2022, 23(4): 538-544.
LUO Chunyang, TANG Shuang, WANG Kaibao, et al. Development of miniaturization device for cleaning and briquetting road snow[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2022, 23(4): 538-544.
- [4] 张洪伟. 橡胶颗粒除冰雪沥青路面的研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHANG Hongwei. Research on the Antifreezing Asphalt Mixture by Crumb Rubber Modified[D]. Xi'an: Changan University, 2009.
- [5] 陈家锋. 橡胶颗粒和硅藻土复合改性沥青混合料破冰试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
CHEN Jiafeng. Research on Ice Breaking Test of Diatomite and Rubber Particles Composite Modified Asphalt Mixture[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [6] 刘状壮, 沙爱民, 蒋玮. 蓄盐沥青路面研究进展: 盐化物材料、混合料及其性能与评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 18-31.
LIU Zhuangzhuang, SHA Aimin, JIANG Wei. Advances in asphalt pavements containing salts: Additives, mixtures, performances, and evaluation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 18-31.
- [7] 白雪, 郭彦强, 熊涛, 等. 基于乙基纤维素构建缓释型 NaCl 微胶囊及性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(12): 3055-3059.
BAI Xue, GUO Yanqiang, XIONG Tao, et al. Construction and performance of sustained-release NaCl microcapsules based on ethyl cellulose[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12): 3055-3059.
- [8] 郭鹏, 高云, 孟献春, 等. 蓄盐类抗凝冰剂微观机理研究[J]. 应用化工, 2020, 49(1): 52-54.
GUO Peng, GAO Yun, MENG Xianchun, et al. Study on microscopic mechanism of salt-containing anti-icing agent[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(1): 52-54.

- [9] WU Shuyin, YANG Jun, YANG Ruochong, et al. Investigation of microscopic air void structure of anti-freezing asphalt pavement with X-ray CT and MIP[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 178:473-483.
- [10] 刘倩, 杜昭, 张美然. 分子筛吸附 VOCs 与微波脱附性能研究[J]. *河北科技大学学报*, 2020, 41(2):164-171.
LIU Qian, DU Zhao, ZHANG Meiran. Study on adsorption properties of zeolites for VOCs and microwave desorption[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2020, 41(2):164-171.
- [11] 孟定宇. 低冰点雾封层材料设计及性能评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
MENG Dingyu. Design and Performance Evaluation of Anti-Icing Fog Seal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 王继文, 姚晓光. 融雪剂对沥青路面水稳定性影响研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2016, 12(7):58-62.
WANG Jiwen, YAO Xiaoguang. Study on the influence of snow melting agent on the water stability of asphalt pavement[J]. *Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 2016, 12(7):58-62.
- [13] 段宝东, 李俊, 曹东伟, 等. 融雪剂对排水沥青混合料路面性能的影响[J]. *中外公路*, 2020, 40(3):288-291.
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):288-291.
- [14] 马广一. 长效抗凝冰剂的制备与应用研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
MA Guangyi. Study on Preparation and Application of Long Term Anticoagulant Ice Agent[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.
- [15] ZHENG Mulian, ZHOU Juanlan, WU Shujuan, et al. Evaluation of long-term performance of anti-icing asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84:277-283.
- [16] 张争奇, 罗要飞, 赵富强. 储盐类融雪抑冰材料对沥青混合料性能影响研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(6):2282-2294.
ZHANG Zhengqi, LUO Yaofei, ZHAO Fuqiang. Review of research on the effect of salt storage deicing material on the performance of asphalt mixture[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(6):2282-2294.
- [17] 刘俊. 盐化物沥青混合料融冰性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
LIU Jun. Study on Deicing Performance of Salinized Asphalt Mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [18] GUO Qinglin, LI Guangyao, GAO Ying, et al. Experimental investigation on bonding property of asphalt-aggregate interface under the actions of salt immersion and freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206:590-599.
- [19] MA Tao, DING Xunhao, WANG Hao, et al. Experimental study of high-performance deicing asphalt mixture for mechanical performance and anti-icing effectiveness[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(8). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002369.
- [20] TAN Yiqiu, FU Yongkang, LI Yunliang, et al. Responses of snow-melting airfield rigid pavement under aircraft loads and temperature loads and their coupling effects[J]. *Transportation Geotechnics*, 2018, 14:107-116.