

DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.032

温拌胶粉改性沥青砂浆在冻融作用下的低温性能研究

冯蕾, 杨鑫, 常俊鹏

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为研究冻融循环作用下热拌胶粉改性沥青砂浆(CR-HMA)和添加表面活性剂SDYK型温拌胶粉改性沥青砂浆(CR-WMA-S)的低温性能,在不同的盐环境(质量分数0.8%)和冻融循环次数(0.5次、10次、15次、20次、25次)条件下进行小梁三点弯曲试验,研究盐冻融循环作用对温拌胶粉改性沥青砂浆低温性能的改善效果,分析盐冻融循环作用对温拌胶粉改性沥青砂浆开裂特性的影响。结果表明:温拌胶粉改性沥青砂浆经冻融循环后,其低温指标的变化规律为:抗弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲应变能密度显著降低,弯曲劲度模量增大,有盐环境会对沥青砂浆的抗裂性能盐侵蚀更为严重;随着冻融循环次数的增加,两种沥青砂浆的断裂韧度均有所降低,但SDYK型温拌剂对盐冻融循环作用后的沥青砂浆低温性能有较好的改善效果。

关键词:温拌胶粉改性沥青砂浆;低温特性;小梁弯曲试验;盐冻融循环

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 前言

在内蒙古中部寒冷地区,漫长而低温的冬季容易产生积雪和冰冻现象,不仅影响道路结构的完整性,而且会影响其使用并引发不必要的交通事故^[1]。为保证道路的通畅,经常采用除冰盐来融雪化冰^[2-3]。除冰盐不仅会使沥青路面在冻与融循环之间造成早期病害,而且路面也容易在低温环境下发生开裂,降低沥青路面的低温性能,影响沥青路面的使用寿命和服务水平^[4-6]。

目前国内外学者大多是在冻融循环和盐浓度各自影响因素下,分析沥青混合料低温抗开裂性能^[7-10],除冰盐对沥青砂浆低温抗开裂性能的影响研究较少,对温拌胶粉改性沥青砂浆的低温性能研究更为少见。沥青砂浆作为沥青混合料的重要组成部分,通常认为沥青砂浆的低温开裂是由于沥青材料温度的降低,胶结料成分会因各自的收缩系数差异而产生不同步的收缩引发温度应力导致开裂,沥青砂浆抗开裂性能的好坏直接影响混合料的低温性能,因此研究胶粉改性沥青砂浆低温抗开裂性能具

有重要意义。

本文选用不同冻融循环次数和除冰盐浓度对内蒙古中部寒冷地区沥青砂浆的损伤进行研究,通过有无除冰盐溶液及不同的循环次数作用下,对热拌和温拌胶粉改性沥青砂浆进行小梁三点弯曲试验,基于断裂力学理论分析盐冻融循环对两种沥青砂浆开裂特性的影响,以及温拌剂的添加对改性沥青砂浆低温抗裂性能的改善效果,为今后温拌胶粉改性沥青混合料在内蒙古中部地区的推广使用提供相应参考。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用基质沥青为盘锦90#沥青,集料采用0~5 mm玄武岩,石灰岩矿粉,胶粉改性剂采用30目橡胶粉颗粒,温拌剂采用SDYK型表面活性剂。基于课题组的研究成果,确定胶粉、表面活性剂SDYK最佳掺量分别为沥青质量的20%、0.6%,其物理技术指标均满足规范要求,结果见表1。其中油砂比以AC-16型密级配沥青混合料为基础采用 δ 体积修正法计算得沥青砂浆油砂比为12.3%。

收稿日期:2023-06-08(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:11762012)

作者简介:冯蕾,女,硕士,副教授.E-mail:568042714@qq.com

表1 90#基质沥青和胶粉改性沥青性能参数

沥青种类	针入度(25℃)/(0.1mm)	软化点/℃	延度(5℃)/cm
90#基质	91.5	51.5	9.4
CR-HMA	43.3	72.2	13.4
CR-WMA-S	37.5	79.6	17.8

1.2 试验方案

1.2.1 试验设计

为研究冻融循环对沥青砂浆低温性能的影响,试验选用冻融循环次数和盐环境两个影响因素。根据课题组的研究成果可知:盐浓度为8%对砂浆小梁的破坏最为严重,故选取有盐环境(盐浓度8%)和无盐环境(盐浓度0),冻融循环次数为0、5次、10次、15次、20次和25次。

试验前,首先将小梁试件在水及盐溶液中真空饱水(真空度97.3 kPa下保持15 min),恢复常压后放入水溶液及盐浓度溶液中静置1 h;之后将试件放入试验盒并注入相应浓度溶液直至没过试件,最后将

试验盒及试件放入高低温湿热交变试验箱中;在-20℃下延续冰冻试件16 h,再升温至60℃维持8 h,完成一次盐冻融循环,如此往复进行5次、10次、15次、20次、25次冻融循环。

1.2.2 试验方案

采用SNYS-810万能试验机进行小梁三点弯曲加载试验,选用位移控制的加载方式进行试验,位移加载速率为3 mm/min,试验温度为10℃,为了减小偶然误差,保证试验结果的准确性,每组条件下的小梁设置3个平行试件。

2 三点弯曲试验结果分析

2.1 最大抗弯强度与最大弯曲应变分析

在有盐与无盐环境以及不同冻融循环次数作用下,热拌胶粉改性沥青砂浆(CR-HMA)、SDYK型温拌胶粉改性沥青砂浆(CR-WMA-S)破坏时最大抗弯强度 R_B 、最大弯曲应变 ϵ_B 的变化规律如图1所示。

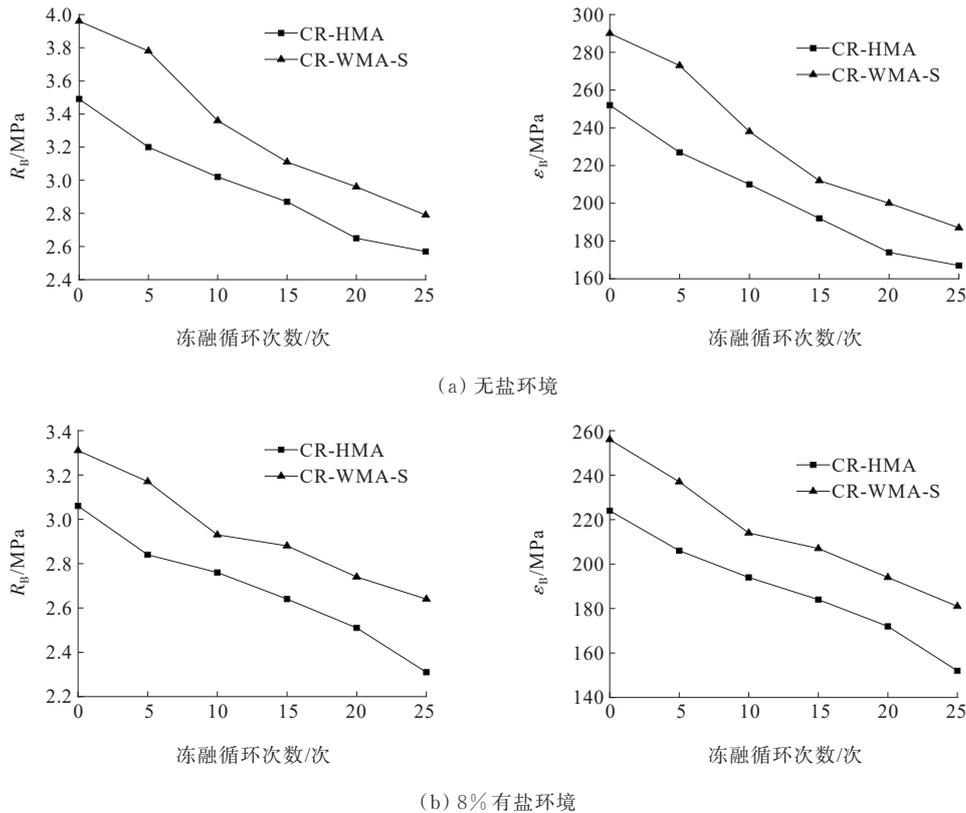


图1 冻融循环及盐侵蚀对胶粉改性沥青砂浆弯曲性能的影响

由图1可以看出:①不论有无盐环境,CR-HMA和CR-WMA-S的最大抗弯强度和最大弯曲应变均随着冻融循环次数的增加呈下降趋势,表明冻融循

环会降低这两种胶粉改性沥青砂浆的低温力学性能。分析产生此现象的原因为:水的冻胀压力和溶液自身的侵蚀力,当沥青砂浆试件经真空饱水之后,

溶液会渗入试件内部的微小空隙,随着外界温度的降低,孔隙中的液态水转化为体积微膨胀的固态冰,产生的膨胀力使得孔隙微裂纹进一步扩大;当温度上升固态冰又开始融化,在空隙负压的作用下会有更多的溶液充满空隙,对沥青与集料之间的黏结起到剥离作用,在此反复冻融循环作用下,迫使试件的集料与沥青膜黏结力降低造成试件结构变得松散,导致这两种胶粉改性沥青砂浆的抗开裂性能逐渐衰减;②在同种盐环境和冻融循环次数下,CR-WMA-S的最大抗弯强度、最大弯曲应变值均大于CR-HMA。是因为温拌剂的加入提高了胶粉改性沥青自身的流动性和裹附性,同时还能有效地减小沥青与骨料之间的接触角,从而减缓溶液通过试件表面向内部结构的渗透速度,降低对沥青材料的破坏,也有效地提升了沥青砂浆低温抗开裂变形能力;③在相同的冻融循环次数下,与无盐环境相比,有盐环境下的这两种胶粉改性沥青砂浆最大抗弯强度和最大弯曲应变值衰减幅度更大,盐溶液对热拌胶粉改性沥青砂浆的低温抗开裂性造成更不利的影响,而对温拌胶粉改性沥青砂浆低温性能影响偏小。

2.2 劲度模量变化率

劲度模量作为一个有量纲的低温性能指标,它不仅受到沥青材料不均匀性的影响,而且还受成型小梁差异性的影响,故采用无量纲的劲度模量变化率作为评价指标^[11],用绝对值来客观反映砂浆小梁力学性能。在有无盐环境下,随着冻融次数的增加沥青砂浆弯曲劲度模量变化率如图2所示。

由图2可见:①在无盐环境下,沥青砂浆随着冻融循环次数的增加,其劲度模量变化率呈现先增长后降低的趋势,且冻融15次的变化率最大,此时砂浆小梁的劲度模量增长速度极快,小梁自身的性能也从弹性急速向脆性发展;在无盐环境相同冻融次数下,掺有温拌剂的砂浆劲度模量变化率较小,即温拌剂的加入会对沥青砂浆低温抗开裂性能有所改善;②在有盐环境下,沥青砂浆随着冻融循环次数的增加,其劲度模量变化率在冻融15次左右出现反常现象,而其余冻融循环次数掺有温拌剂的砂浆劲度模量变化率较热拌胶粉改性沥青砂浆的低,这是因为沥青砂浆试件经真空饱水之后,溶液会渗入试件内部的微小孔隙,随着温度的降低,会在小梁试件内部产生膨胀力,伴随着冻融次数的增加使得孔隙扩展

越来越大,沥青砂浆试件内部膨胀力在一定程度上有所释放,表现出先增加后减缓的趋势,但试件中集料与沥青膜的黏结力总体降低,造成试件结构变得松散,导致胶粉改性沥青砂浆的低温抗开裂能力越来越差。

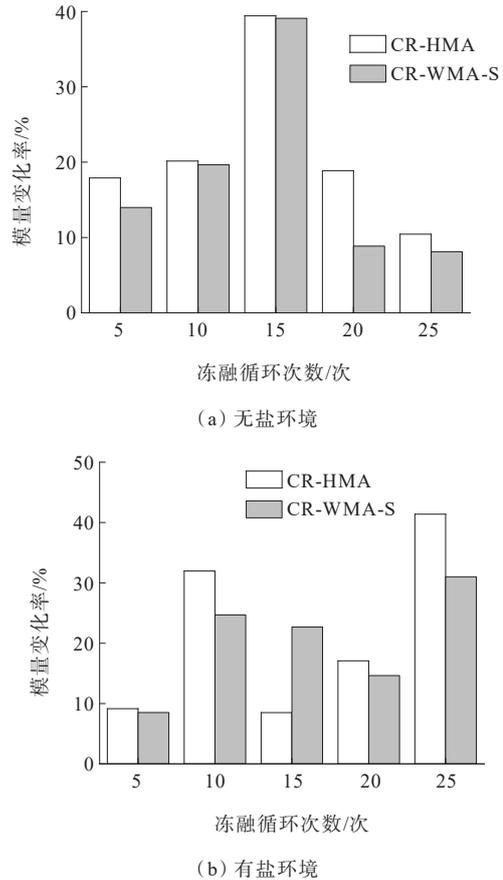


图2 不同盐溶液环境下沥青砂浆弯曲劲度模量的变化率

3 力学变形性能变化规律分析

3.1 应变能变化规律分析

材料在加载过程中能量的耗散可以综合反映该材料抵抗变形的能力,当荷载达到最大时对应着材料的临界变形能,其值越高则破坏时所需要的能量越多,相反该材料韧性较低越容易被破坏。依据弯曲应变能密度函数表达式:

$$\omega_f = \frac{d_w}{d_v} = \int_0^{r_f} \delta_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: ω_f 为应变能密度函数; δ_{ij} 、 ε_{ij} 分别为应力和应变分量。

低温小梁弯曲试验得到的应力-应变关系符合三次多项式形式:

$$\delta = A + B\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 \quad (2)$$

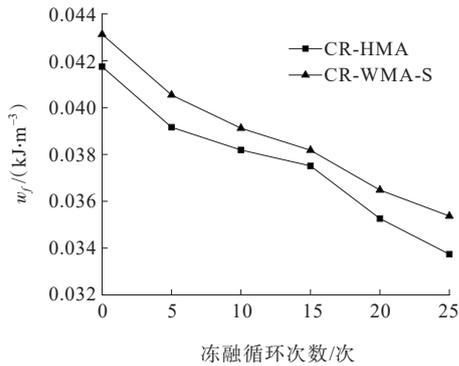
式中: δ 为应力(MPa); ε 为应变; A 、 B 、 C 、 D 为材料基本参数,由应力-应变曲线拟合获得。

将式(2)代入式(1)中,可得:

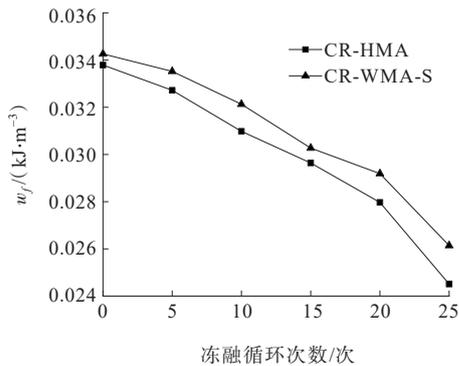
$$w_f = \frac{d_w}{d_v} = A\varepsilon_0 + \frac{B}{2}\varepsilon_0^2 + \frac{C}{3}\varepsilon_0^3 + \frac{D}{4}\varepsilon_0^4 \quad (3)$$

式中: ε_0 为应力-应变曲线中应力峰值所对应的应变值。

不同冻融循环次数作用下两种胶粉改性沥青砂浆的弯曲应变能密度 w_f 计算结果如图3所示。



(a) 无盐环境



(b) 有盐环境

图3 冻融循环及盐侵蚀对胶粉改性沥青砂浆弯曲应变能密度的影响

由图3可知:①不论何种盐环境,CR-HMA和CR-WMA-S的弯曲应变能均随着冻融循环次数的增加表现为降低的趋势,即这两种胶粉改性沥青砂浆的低温抗变形能力变差;②对比无盐环境,有盐环境下两种胶粉改性沥青砂浆弯曲应变能衰减程度更大,表明与水侵蚀相比,盐侵蚀对沥青砂浆的低温抗裂性能损伤更大;③在相同盐环境和相同冻融次数下,添加温拌剂的砂浆小梁破坏所需的应变能较大,其低温性能表现得更为优越,造成这种现象是因为温拌剂的加入,会降低沥青砂浆的拌和压实温度,减缓沥青老化的同时,在温拌剂极性与非极性基团的

牵引下能较好地与集料表面相接触,增加了它们之间的黏附性,在冻融循环过程中对集料的剥离较为缓和,使得材料不会迅速开裂,提高了沥青砂浆的低温抗裂性能。

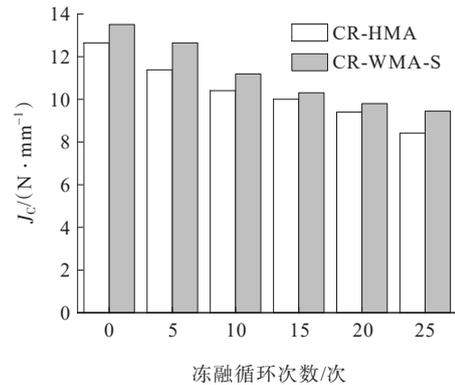
3.2 断裂韧度变化规律分析

为研究材料的开裂性能,通常采用断裂韧度作为材料的抗开裂指标^[12-19],根据线弹性断裂力学理论,材料在断裂的过程中当超过某一临界值,裂纹进入非稳定扩展阶段,因此选用 J 积分作为弹塑性断裂力学的一种基本研究方法,用以评价沥青砂浆的抗开裂性能是合理的^[12]。断裂韧度 J_C 的计算公式如下^[13]:

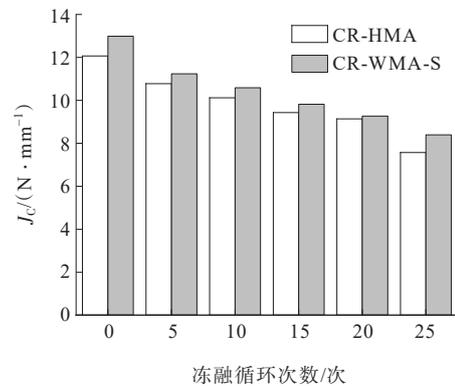
$$J_C = \frac{2U_T}{W(H-a)} \quad (4)$$

式中: J_C 为断裂韧度(N/mm); U_T 为试件破坏时吸收的总应变能,根据荷载-位移曲线中荷载达到最大值时曲线下的面积来计算(N·mm); W 为试件宽度(mm); H 为试件高度(mm); a 为裂缝深度(mm)。

根据荷载-位移曲线得出CR-HMA和CR-WMA-S两种沥青砂浆的总应变能结果如图4所示。



(a) 无盐环境



(b) 有盐环境

图4 冻融循环及盐侵蚀对胶粉改性沥青砂浆断裂韧度的影响

对于砂浆小梁试验从总应变能 U_T 计算所得的断裂韧度 J_c 可以看出:① 当试件处于盐环境时,两种胶粉改性沥青砂浆的断裂韧度 J_c 均表现为随冻融循环次数的增加而降低,即沥青砂浆的抗裂性能随着冻融循环次数的增加而降低,这种现象的出现与试件内部微裂纹、微空隙内的溶液在反复冻融作用下产生的膨胀压力有关,降低试件内部各组分之间的黏结力,影响试件的强度;② 8% 浓度下的断裂韧度与 0 浓度下的有类似的变化规律,且 8% 浓度下的断裂韧度 J_c 值均小于 0% 浓度下的 J_c 值,以 0 次冻融循环为例,与无盐环境相比,8% 浓度下 CR-HMA 和 CR-WMA-S 的 J_c 值分别从 12.646、13.509 变化为 12.069、12.987,分别下降了 0.577 和 0.522,说明 SDYK 表面活性剂温拌剂的添加提高了沥青的流变性,增加沥青和集料之间的黏附性,可有效降低溶液的侵蚀,减缓试件内部因为冻胀作用产生的冻胀力造成的破坏,同时也抑制试件内部空隙的增长速率,使胶粉改性沥青砂浆中的成分与盐溶液的接触面积减少,有效地阻止了盐溶液对沥青材料的侵蚀,提高了沥青砂浆的低温抗裂性能,因此与热拌型胶粉改性沥青砂浆相比,温拌胶粉改性沥青砂浆的抗裂性更好;③ 在相同条件下,CR-WMA-S 断裂韧度均高于 CR-HMA,从线弹性断裂理论出发,可知这是因为温拌剂的添加使得沥青与集料形成较强的黏结力,在小梁加载开裂破坏过程中对裂纹扩展产生一定的黏结阻碍作用,因此裂纹进入非稳定阶段所需的时间更长,宏观上表现出 CR-WMA-S 具有较好的低温抗开裂性能。

3.3 断裂韧度比分析

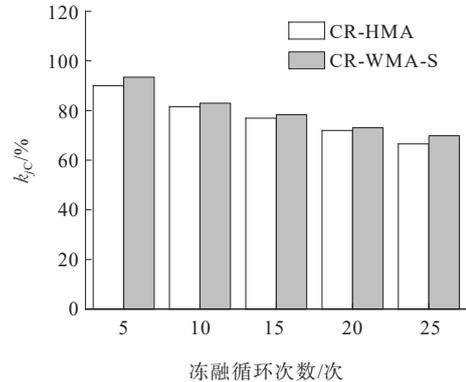
沥青混合料冻融劈裂试验中从定义劈裂抗拉强度比 R_{TSR} 的公式出发,采用断裂韧度比 $k_{jc}/\%$ 评价盐冻循环作用下沥青砂浆的抗裂性能,分析沥青砂浆经盐冻循环作用后的残余断裂韧度,其值越大,低温抗裂性能越好。

根据冻融劈裂抗拉强度比 R_{TSR} 定义断裂韧度比的计算公式如下:

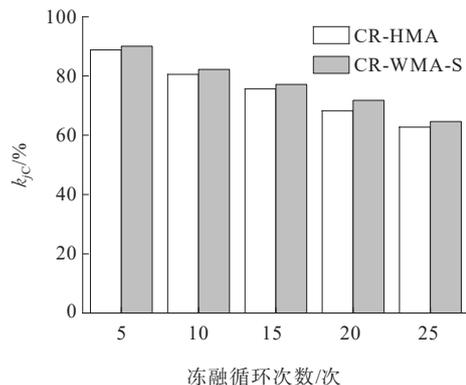
$$k_{jc} = \frac{\bar{J}_{c_n}}{\bar{J}_{c_1}} \times 100 \quad (5)$$

式中: k_{jc} 为断裂韧度比(%); \bar{J}_{c_n} 为冻融循环 n 次后试件断裂韧度平均值(N/mm); \bar{J}_{c_1} 为未冻融试件断裂韧度平均值(N/mm)。

不同盐环境下沥青砂浆断裂韧度比结果如图 5 所示。



(a) 无盐环境



(b) 有盐环境

图 5 不同盐环境对沥青砂浆断裂韧度比的影响

由图 5 可知:不论在水溶液中还是在 8% 浓度的盐溶液中,CR-HMA 和 CR-WMA-S 两种胶粉改性沥青砂浆的断裂韧度比 k_{jc} 均呈现出随冻融循环次数的增加而降低的趋势,但在相同条件下 CR-WMA-S 的断裂韧度比 k_{jc} 均高于 CR-HMA 的值,说明温拌剂的加入能有效地改善砂浆的低温性能;对于同种沥青砂浆材料在不同的盐环境中,有盐环境下沥青砂浆断裂韧度比均小于无盐环境下的值,说明盐环境会降低砂浆小梁的低温抗开裂性能,会对路面整体性造成破坏。

4 结论

(1) 沥青砂浆在不同浓度的盐环境中,都随着冻融循环次数的增加,其最大抗弯强度和最大弯拉应变值均呈下降趋势,弯曲劲度模量变化率均为正值,即弯曲劲度模量的积累量在不断增大。

(2) 在相同的盐环境和冻融循环次数下, CR-WMA-S的最大抗弯强度、最大弯曲应变值均大于CR-HMA,即SDYK型温拌剂的添加能够改善沥青与集料之间的黏附性,提高胶粉改性沥青砂浆的低温抗开裂性能。

(3) 两种胶粉改性沥青砂浆的弯曲应变能均随着冻融次数的增加而减小,且不论何种环境下的CR-WMA-S弯曲应变能值均高于CR-HMA,说明CR-WMA-S相比于CR-HMA具有更好的韧性和低温抗裂性。

(4) 对于沥青砂浆的抗开裂指标断裂韧度而言,两种砂浆的值均随着冻融循环次数的增加呈现下降的趋势,但在相同条件下CR-WMA-S的断裂韧度 \bar{J}_c 较CR-HMA大,且断裂韧度比也呈现出相同的规律,这与应变能相对应,即温拌剂的加入能提高砂浆的低温抗开裂性能。

参考文献:

- [1] 朱俊.严寒冰雪天气条件下的行车安全[J].机电安全, 2018(1):29-32.
- [2] 冯蕾,王乐,崔亚楠,等.盐冻循环对胶粉改性沥青混合料性能的影响[J].公路工程,2014,39(4):117-123.
- [3] LIU Y H, ZHANG H, WANG X L, et al. The weakening effect of the snow-melting agent on the performance of municipal asphalt pavement in the severe cold region[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 953/954:1604-1608.
- [4] 胡艳民,赵伟.沥青混合料复合小梁疲劳因素正交试验分析[J].中外公路,2018,38(6):219-222.
- [5] LV S T, HU L, XIA C D, et al. Development of fatigue damage model of asphalt mixtures based on small-scale accelerated pavement test[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260:119930.
- [6] SAHEBZAMANI H, ALAVI M Z, FARZANEH O. Impact of different levels of oxidative aging on engineering properties of asphalt mixes at low temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242:118036.
- [7] 张争奇,唐周鸣,李杨,等.自融雪剂对沥青混合料性能影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(7):92-99.
- [8] ZHANG Q L, HUANG Z Y. Investigation of the microcharacteristics of asphalt mastics under dry-wet and freeze-thaw cycles in a coastal salt environment[J]. *Materials*, 2019, 12(16):2627.
- [9] 单鸣宇,王岚,张宝鑫.盐冻融循环下温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):467-473.
- [10] 李永麟,陈雄飞,缪幸龙,等.温拌沥青混凝土路用性能研究及应用[J].中外公路,2018,38(6):298-300.
- [11] 常睿,郝培文.盐冻融循环对沥青混合料低温性能的影响[J].建筑材料学报,2017,20(3):481-488.
- [12] 刘敬辉,王端宜,刘宇.采用J积分对沥青混合料抗裂性能进行评价[J].固体力学学报,2010,31(1):16-22.
- [13] 张东,黄晓明,赵永利.沥青混合料抗裂性能评价指标对比研究[J].建筑材料学报,2012,15(2):222-226.
- [14] 邢超.基于数字散斑方法沥青混合料变形特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [15] 张飞,王岚,邢永明.温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].中外公路,2022,42(3):174-179.
- [16] 苑苗苗.基于数字散斑相关方法的沥青混合料疲劳破坏机理研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [17] 杨三强,孙爽,李倩等.胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J].中外公路,2023,43(2):227-233.
- [18] 李萍,马科,念腾飞,等.基于权函数法的沥青混合料预切口小梁的断裂理论与裂纹扩展试验的研究[J].公路交通科技,2016,33(5):21-27.
- [19] WILLS J, CARO S, BRAHAM A. Influence of material heterogeneity in the fracture of asphalt mixtures[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20(7):747-760.