

盐—冻融循环作用下废旧轮胎橡胶粉改性 沥青混合料性能研究

李智文

(珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000)

摘要:该文采用三轴蠕变试验和低温小梁弯曲试验,以蠕变速率、5 000次循环对应的应变、抗弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量、应变能密度等指标对盐冻循环条件下热拌、温拌沥青混合料的高、低温性能进行了研究。结果表明:沥青混合料在经历盐冻循环后,蠕变速率和5 000次循环对应的应变都增大,高温性能下降,且冻融循环次数相较于盐溶液浓度对沥青混合料高温性能影响更大;抗弯拉强度、最大弯拉应变、应变能密度显著降低,弯曲劲度模量增大,低温性能降低,且盐冻融循环作用的初期,各指标衰变程度较大;盐溶液浓度在10%附近时,对沥青混合料的高、低温性能影响最大;温拌沥青混合料的高、低温性能都优于热拌沥青混合料。

关键词:道路工程;盐冻循环;胶粉改性沥青混合料;高、低温性能;应变能密度

1 引言

大量研究、实践证明:胶粉改性沥青路用性能优良,被较多地应用于筑路行业。但在中国北方寒冷地区和季冻地区,冬季降雪频繁,路面极易产生积雪、结冰现象,在这种路面行车时极易发生车祸。针对这一现象,常用的处理办法是在路面上撒布融雪剂,相较于传统的机械除冰、电热除冰,撒布融雪剂价格低廉、操作简便,但由于融雪剂中含有大量盐分,在进入沥青路面内部后,尤其是在季冻地区冻融循环作用下,会使路面出现大量早期病害,降低路面的使用寿命,不宜大量

使用,这就使得许多学者对融雪剂和冻融循环作用下沥青混合料的性能进行了大量研究。

侯曙光等采用疲劳试验的方式,得到了冻融前后沥青混合料的耗散能疲劳方程,证明了冻融循环会严重降低混合料的疲劳寿命;李兆生等在对冻融循环中沥青混合料的力学性能进行研究时得到了类似的结果;熊锐等将硫酸盐腐蚀与冻融循环复合,研究此种状况下的沥青混凝土得出:硫酸盐可以加速冻融循环对沥青混合料的破坏,沥青混凝土抗冻融腐蚀性能可以通过掺加水镁石纤维进行改善,微、纳米级材料也可以改善除冰剂的影响;杨全兵对冻融循环条件下混凝土内部饱水度和吸入溶液量、溶液结冰压和结冰膨胀率

- *****
- [6] Yu H. Y., Leng Z., Xiao F. P., et al. Rheological and Chemical Characteristics of Rubberized Binders with Non-Foaming Warm Mix Additives[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 671-678.
 - [7] Huang Y., Bird R. N., Heidrich O. A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 52(2): 58-73.
 - [8] Ambarish B., Andre D. F. S., Prozzi J. A. The Effect of Long-Term Aging on the Rheology of Warm Mix Asphalt Binders[J]. Fuel, 2012, 97: 603-611.
 - [9] Ghavibazoo A., Abdelrahman M., Composition Analysis of Crumb Rubber during Interaction with Asphalt and Effect on Properties of Binder[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(5): 517-530.
 - [10] Leng Z., Gamez A., Al-Qadi I. L. Mechanical Property Characterization of Warm-Mix Asphalt Prepared with Chemical Additives[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 26(2): 304-311.

收稿日期:2020-11-16(修改稿)

基金项目:珠海市规划设计研究院科研项目(编号:2018KY-ZT16)

作者简介:李智文,男,高级工程师.

与 NaCl 浓度的关系进行研究后,分析了混凝土的盐冻破坏机理:NaCl 浓度升高会降低溶液结冰膨胀率和结冰压平衡值,但会显著提高溶液结冰压的临界饱和度;水溶液中混凝土内部饱和度明显低于 NaCl 溶液;盐浓度较低时,混凝土的盐冻破坏更为严重。关于盐冻融循环对沥青混合料性能的影响,常睿等认为盐冻融循环次数增加、盐溶液质量分数提高,冻融温度降低都会使沥青混合料的低温性能降低;单鸣宇等发现 8% 的除冰盐溶液对温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能影响最大;周晓东等发现对于胶粉改性沥青混合料而言,其疲劳寿命随着冻融次数增加而显著降低;8% 的盐浓度下,疲劳寿命达到最低,疲劳性能最差;冯蕾等研究得出胶粉改性沥青混合料的水稳定性与冰冻温度、融雪盐浓度和冻融循环次数都有关,其水稳定性的劣化主要是由于融雪盐晶粒进入沥青与集料界面与混合料的空隙,影响沥青的黏结性;以及融雪盐形成的盐类冰晶在混合料中膨胀与消融,产生内应力,使混合料结构受损。上述研究已经取得了一定的成果,但是研究大多集中在普通沥青混合料方面,随着人们环保

意识的逐渐增强,采用胶粉改性沥青的用量越来越大,因此研究冻融循环作用下胶粉改性沥青的各种性能非常必要。

2 原材料与试验方法

2.1 试验材料

(1) 基质沥青。试验所采用的基质沥青为 SK-90[#] 重交沥青,其各项指标如表 1 所示。由表 1 可以看出:基质沥青各项指标满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中 90[#] 道路石油沥青 A 级要求。

(2) 胶粉。试验采用的废旧轮胎橡胶粉(简称胶粉)为小汽车轮胎加工而成,胶粉目数为 80 目(0.18 mm),具体性能如表 2 所示。

(3) 橡胶粉改性沥青。对于胶粉的掺量,借鉴国内外已有研究成果,采用 18% SK-90[#] 基质沥青的胶粉,室内采用高速剪切仪加工制成橡胶粉改性沥青,胶粉改性沥青的基本性能测试结果见表 3。

表 1 SK-90[#] 重交沥青性能

技术指标	单位	检验结果	技术要求	检验方法	
针入度(25℃,100g,5s)	0.1 mm	89.3	80~100	T0604—2000	
针入度指数 PI		-0.73	-1.5~+1.0		
软化点 T _{R&B}	℃	46	≥44	T0606—2000	
延度(10℃,5cm/min)	cm	74.9	≥20	T0605—1993	
延度(15℃,5cm/min)	cm	>100	≥100		
溶解度(三氯乙烯)(质量比)	%	99.5	≥99.5	T0607—1993	
密度	15℃ g/cm ³	1.061	实测记录	T0603—1993	
旋转薄膜加	质量损失	%	0.507	≥±0.8	T0610—1993
热试验	针入度比	%	61	≥57	T0604—2000
(163℃,85min)	延度(10℃)	cm	8.35	≥8	T0605—1993

表 2 小车轮胎胶粉化学组分(质量分数)

橡胶烃/ %	碳黑/ %	灰分/ %	丙酮抽出 物/%	胶种鉴定
60.1	27.4	8.1	4.2	聚异戊二烯+聚丁二烯橡胶(顺丁胶)

表 3 胶粉改性沥青性能

25℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延 度/cm	弹性恢 复/%	密度/ (g·cm ⁻³)
55.3	58.7	12.2	82	1.039

2.2 试件制备

温拌剂采用表面活性剂,沥青混合料级配为 AC-13,矿料级配见表 4,油石比为 4.9%。

表 4 AC-13 胶粉改性沥青混合料配合比

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16	99.8	1.18	24.4
13.2	94.1	0.60	17.4
9.5	79.4	0.30	11.5
4.75	43.3	0.15	7.5
2.36	33.8	0.075	5.3

参考相关的文献,温拌沥青混合料采用 140 °C 的压实温度,热拌沥青混合料采用 165 °C 的压实温度,按照规范要求,室内成型马歇尔试件。

2.3 试验方案介绍

(1) 室内采用食用盐配制盐水溶液,浓度(质量分数)分别为 0%、5%、10%、15%,将成型好的试件在 -18 °C 冰箱中冷冻 16 h 后,放置在 60 °C 恒温水浴保持 24 h,即为一个循环,冻融循环次数分别为 0、5、10、15、20 次。

(2) 三轴重复蠕变试验采用 UTM-100 材料试验机,试验温度为 60 °C,偏应力为 0.7 MPa,采用加载 0.1 s、卸载 0.9 s 的半正弦波方式加载,当应变达到 5 000 $\mu\epsilon$ 时或循环次数达到 10 000 次,试验停止。

(3) 按照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》设计沥青混合料的小梁低温弯曲试

验,现行小梁弯曲试验分为多点加载和单点加载两种模式,该试验采用单点加载模式,在温度为 -10 °C、加载速率为 50 mm/min 条件下加载至小梁试件破坏。依据规范进行抗弯拉强度 R_B 、最大弯拉应变 ϵ_B 、弯曲劲度模量 S_B 计算,应变能密度的计算参照材料损伤准则。

3 改性沥青混合料高温性能

3.1 盐水浓度的影响

在三轴重复蠕变试验中,沥青混合料的高温性能可以通过蠕变速率 k 和 5 000 次循环对应的应变 $\epsilon_{5\,000}$ 来表征, k 和 $\epsilon_{5\,000}$ 越小,沥青混合料的高温抗变形能力越好。盐浓度对 k 、 $\epsilon_{5\,000}$ 的影响结果如图 1、2 所示。

由图 1、2 可知:盐浓度对沥青混合料试件的蠕变

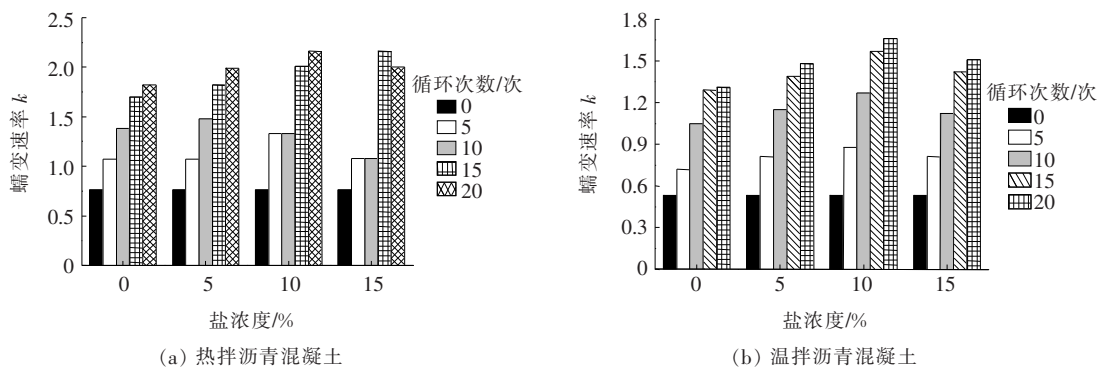


图 1 不同盐浓度下蠕变速率 k

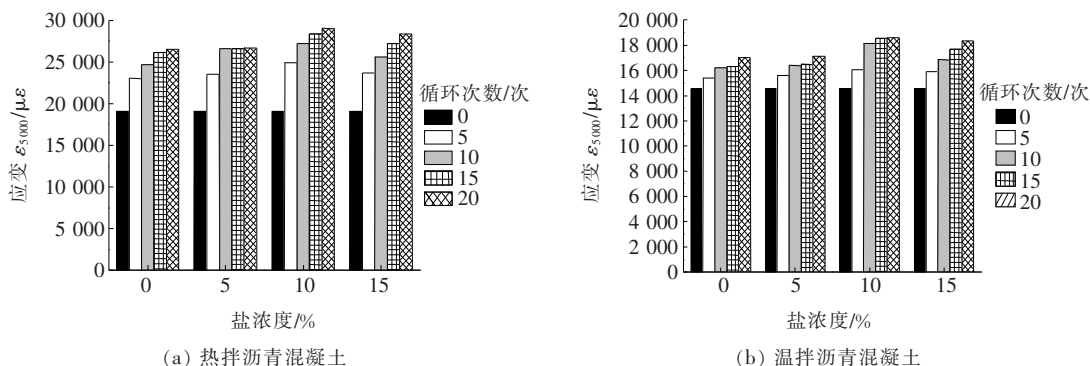


图 2 不同盐浓度下 5 000 次循环对应的应变 $\epsilon_{5\,000}$

速率 k 和 5 000 次循环对应的应变 $\epsilon_{5\,000}$ 值影响较小;以循环次数 10 次为例,热拌和温拌沥青混凝土在溶液中添加盐分后,其 k 值和 $\epsilon_{5\,000}$ 值都会略微增大,热拌沥青混凝土 k 值在 5% 的盐溶液中最大,温拌沥青混凝土 k 值在 10% 的盐溶液中最大;热拌和温拌沥青混凝土的 $\epsilon_{5\,000}$ 值都在 10% 的盐溶液中最大;温拌沥青

混凝土的 k 值和 $\epsilon_{5\,000}$ 值要明显小于热拌沥青混凝土。

3.2 冻融循环次数的影响

不同冻融循环次数对改性沥青混合料高温性能 k 、 $\epsilon_{5\,000}$ 的影响结果如图 3、4 所示。

由图 3、4 可以看出:随着冻融循环次数增加,沥青混合料试件 k 值不断增加,且 10% 浓度盐溶液中的 k

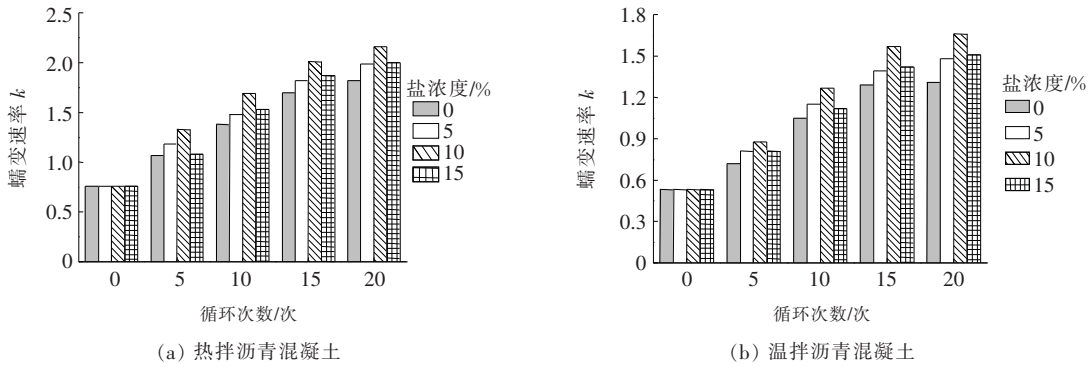


图 3 不同冻融循环次数下蠕变速率 k

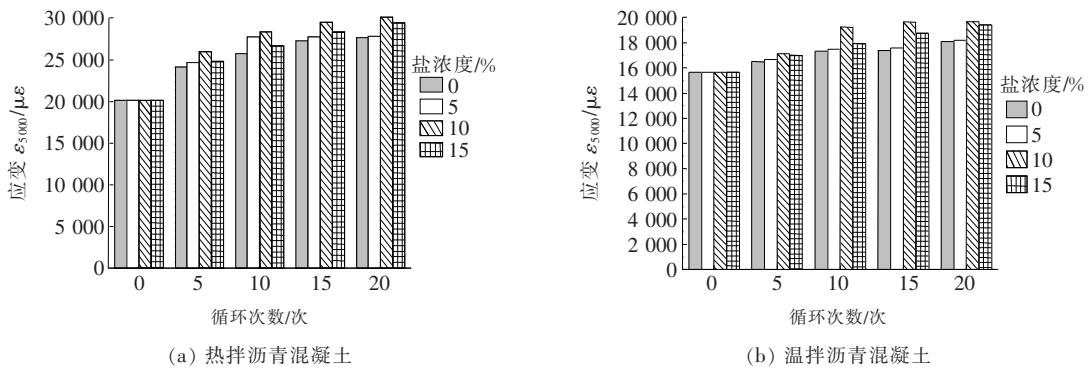


图 4 不同冻融循环次数下 5 000 次循环对应的应变 $\epsilon_{5,000}$

值明显大于其他浓度盐溶液; $\epsilon_{5,000}$ 的值也随着冻融循环次数的增加而增加, 同样 10% 浓度盐溶液中的 $\epsilon_{5,000}$ 值明显大于其他浓度盐溶液。这说明 10% 浓度的盐溶液对沥青的高温性能影响较大, 且温拌沥青混凝土 k 值和 $\epsilon_{5,000}$ 值要明显小于热拌沥青混凝土。

4 改性沥青混合料低温性能

4.1 盐冻融对小梁弯曲试验参数的影响

在小梁弯曲试验中, 沥青混合料的低温性能可以由抗弯拉强度 R_a 、最大弯拉应变 ϵ_B 、弯曲劲度模量

S_B 3 个力学性能指标来表征。 R_a 、 ϵ_B 越大, S_B 越小, 沥青混合料低温性能越好。图 5~7 为盐冻融条件下沥青混合料力学性能指标变化情况。

由图 5、6 可知: 沥青混合料试件的最大弯拉应变 ϵ_B 与抗弯拉强度 R_a 的变化规律相同, 仅改变盐溶液浓度, 不进行冻融循环时, 沥青混合料试件的抗弯拉强度 R_a 和最大弯拉应变 ϵ_B 无变化; 在施加冻融循环后, R_a 值和 ϵ_B 值随着冻融循环次数的增加显著降低, 在冻融循环次数为 20 次时, 热拌沥青混合料试件的 R_a 值仅为未施加冻融循环时的 60% 左右, ϵ_B 值仅为未施加冻融循环时的 38% 左右; 控制冻融循环次数不

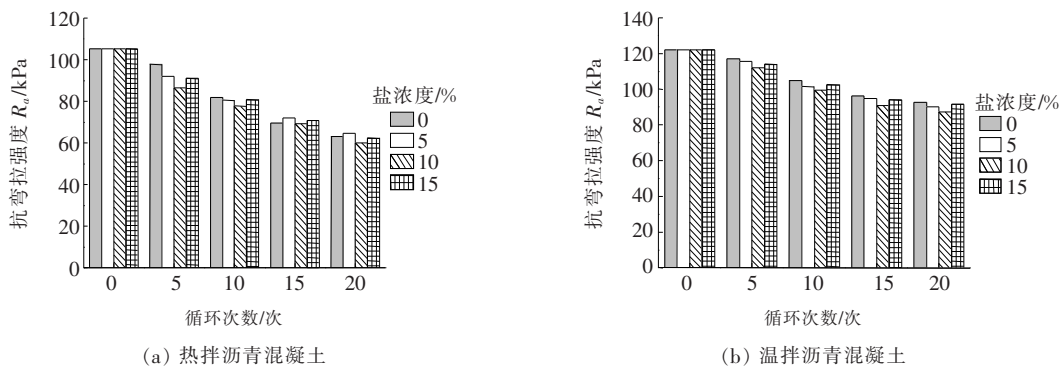
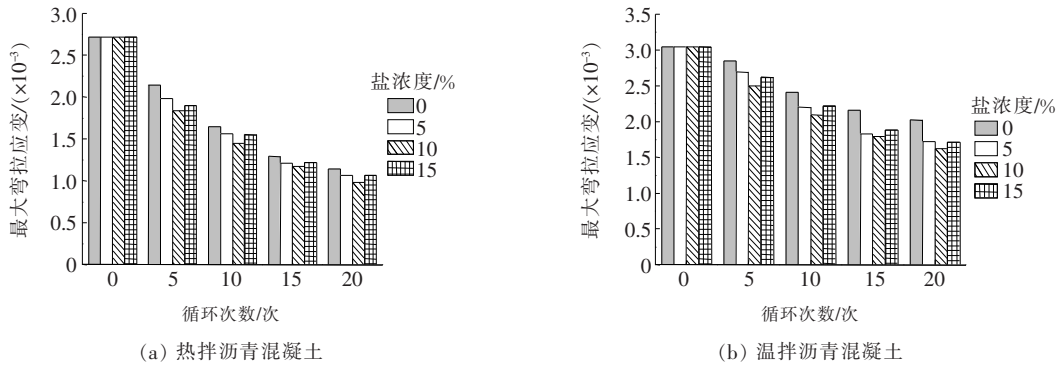
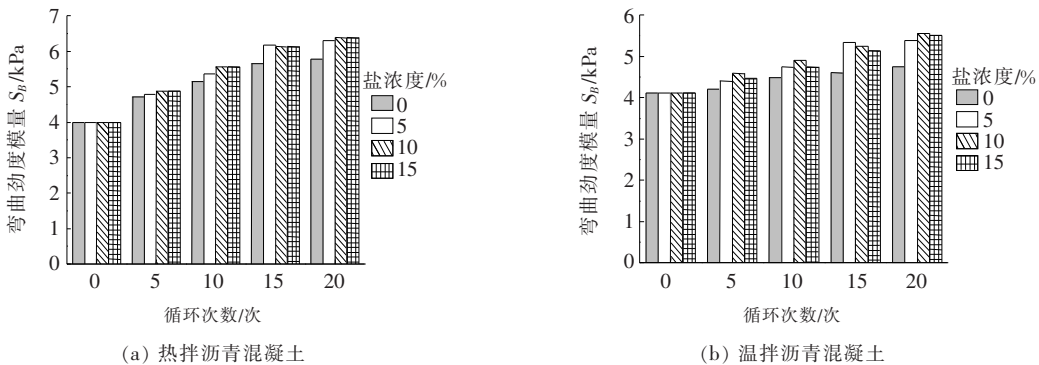


图 5 盐冻融条件下小梁弯曲试验抗弯拉强度 R_a

图6 盐冻融条件下小梁弯曲试验最大弯拉应变 ϵ_B 图7 盐冻融条件下小梁弯曲试验弯曲刚度模量 S_B

变,改变盐溶液浓度 R_a 值和 ϵ_B 值也会变化,在盐溶液浓度为 10% 时 R_a 值和 ϵ_B 值最小;温拌沥青混合料试件的 R_a 值和 ϵ_B 值大于热拌沥青混合料,且在盐冻融循环条件下其性能劣化的程度优于热拌沥青混合料。

由图 7 可知:在盐冻融循环条件下,沥青混合料试件的弯曲刚度模量 S_B 随着冻融循环次数的增加显著增大;盐溶液浓度的升高也会增加 S_B 值,但在浓度由 10% 增加到 15% 时 S_B 值会有所下降;温拌沥青混合料试件的 S_B 值小于热拌沥青混合料试件。

4.2 弯曲应变能密度 W_f

沥青是黏弹性材料,但在低温环境中,沥青混合料表现出弹性性质,可以视为弹性材料。沥青混合料的低温抗裂性能与其内部所存储的弹性应变能有关,开裂就是其内部能力耗散的一个过程,这样就可以将沥青混合料的材料损伤与单位体积内的能量状态对应起来,以 dw/dv 来表征, dw/dv 称为应变能密度,其表达式如下:

$$\frac{dw}{dv} = \int_0^{\epsilon_0} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量; ϵ_{ij} 为应变分量; ϵ_0 为临界应变(最大应力对应的应变)。

在低温弯曲小梁试验中,其应力应变关系为三次多项式:

$$\sigma = A + B\epsilon + C\epsilon^2 + D\epsilon^3 \quad (2)$$

式中: σ 为应力; A 、 B 、 C 、 D 为材料基本参数。

将式(1)、(2)合并:

$$\frac{dw}{dv} = A\epsilon_0 + \frac{B}{2}\epsilon_0^2 + \frac{C}{3}\epsilon_0^3 + \frac{D}{4}\epsilon_0^4 \quad (3)$$

沥青混合料弯曲应变能密度计算结果见图 8。

由图 8 可知:在经历盐冻融循环后,沥青混合料试件的弯曲应变能密度会明显下降,其下降的幅度随着冻融循环次数的增加逐渐降低,以热拌沥青混合料试件为例,冻融循环次数由 0 次增加到 5 次时,应变能密度约降低 50%;冻融循环次数由 15 次增加到 20 次时,应变能密度约降低 20%,这说明在盐冻融循环作用初期,沥青混合料的低温性能下降较快,较好地解释了寒冷地区在撒布融雪剂后更易出现早期病害的现象;并且相同冻融循环次数下,10% 浓度的盐溶液中应变能密度下降幅度更大;温拌沥青混合料的应变能密度要大于热拌沥青混合料。

分析图 8 发现:在冻融循环次数一定,盐溶液浓度为 0%~10% 时,随着盐溶液浓度的增加,沥青混合料的低温性能下降。这是由于在较低浓度时,盐溶液浓

度的增加使混凝土内部饱水度显著增加,降低了沥青混合料的低温性能。当盐溶液浓度由 10% 增加到 15% 时,各项指标的变化已经不太明显,甚至有一定的回升趋势,可能是由于盐溶液浓度在 10% 左右时,沥

青膜内部与混合料空隙中盐分已经饱和,继续增大盐溶液浓度会降低溶液结冰压和结冰膨胀率,使得溶液产生结冰压的临界饱水度上升,对沥青混合料的盐冻剥蚀破坏起到一定缓解作用。

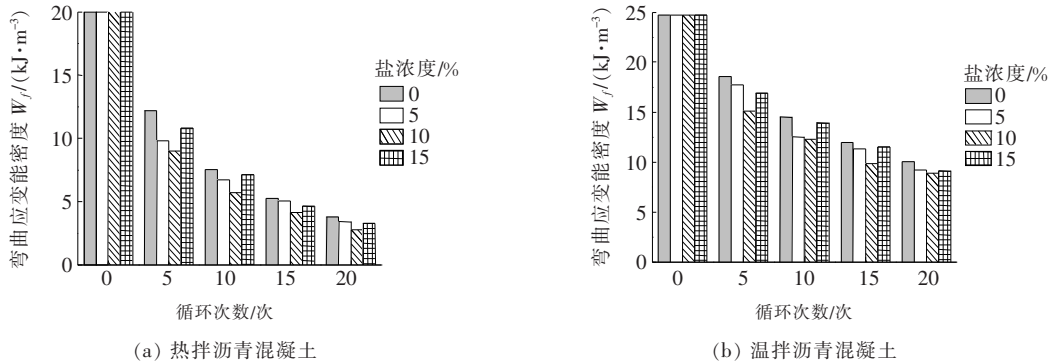


图 8 沥青混合料弯曲应变能密度 W_f

5 结论

(1) 盐冻循环作用使沥青混合料高温性能降低,其中冻融循环次数占主要作用,冻融循环次数一定条件下,盐溶液浓度的改变对其高温性能影响不大。

(2) 盐冻循环作用使沥青混合料小梁弯曲试验中的抗弯拉强度 R_a 、最大弯拉应变 ϵ_B 、弯曲劲度模量 S_B 3 个力学性能指标和应变能密度 W_f 变化显著,即沥青混合料的低温性能显著降低;盐冻融循环作用的初期,沥青混合料的低温性能下降更快。

(3) 盐溶液浓度为 10% 左右时对沥青混合料的高、低温性能影响最大,再增加盐溶液浓度可使沥青混合料的高、低温性能有一定回升,因此在实际应用中应避免撒布此浓度的融雪剂。

(4) 温拌沥青混合料的高、低温性能都优于热拌沥青混合料。

参考文献:

[1] 杨志峰,李美江,王旭东. 废旧橡胶粉在道路工程中应用的历史和现状[J]. 公路交通科技, 2005(7).
 [2] SHIXianming, AKIN M, PAN Tongyan, et al. Deicer Impacts on Pavement Materials: Introduction and Recent De-

velopments [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2009, 3: 16-27.

[3] 侯曙光,王宏畅,黄晓明,等. 低温地区沥青混合料冻融疲劳特性分析[J]. 公路交通科技, 2006(4).
 [4] 李兆生,谭忆秋,吴思刚,等. 冻融循环对沥青混合料力学性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(3).
 [5] 熊锐,陈拴发,关博文,等. 冻融与腐蚀耦合作用下沥青混凝土性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011(2).
 [6] GOH S, AKIN M, YOU Z, et al. Effect of Deicing Solutions on the Tensile Strength of Micro-Ornano-Modified Asphalt Mixture[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 195-200.
 [7] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(II): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012(6).
 [8] 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(3).
 [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(3).
 [10] 周晓东,常春清,王岚. 盐冻融循环对温拌胶粉改性沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020(3).
 [11] 冯蕾,崔亚楠,李超. 盐冻循环条件下胶粉改性沥青混合料的水稳性能[J]. 建筑材料学报, 2014(5).
 [12] 葛折圣,黄晓明,许国光. 用应变能密度方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002(4).