

文章编号:1007-9629(2011)06-0000-00

反复凝冰作用下沥青混合料性能研究

谭忆秋¹, 赵立东¹, 蓝碧武², 陈克群³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 广东省公路勘察
规划设计院有限公司, 广东 广州 510630; 3. 贵州省高等级公路管理局 贵州 贵阳 550003)

摘要: 针对南方高原潮湿路面, 采用沥青路面上面层常用密级配 AC-16 混合料, 首先根据相关文献和实际情况制定了反复凝冰的试验条件, 然后对经历不同凝冰次数的试件进行体积指标、力学性能、高低温性能以及水稳定性等各项性能的试验研究, 分析反复凝冰对混合料各项性能的影响. 结果表明: 混合料初始空隙率对反复凝冰过程中的混合料空隙率有重大影响; 高温稳定性随着凝冰次数的增加而衰减; 力学性能、水稳定性以及低温性能在反复凝冰后都有较大程度的衰减, 约前 8 次衰减较快, 之后趋于平缓.

关键词: 沥青混合料; 反复凝冰; 体积参数; 力学性能; 路用性能

中图分类号: U416. 217

文献标志码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2011. 06. 000

Performance of Asphalt Mixture under Repeated Ice

TAN Yi-qiu¹, ZHAO Li-dong¹, LAN Bi-wu², CHEN Ke-qun³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Guangdong Highway Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510630, China; 3. Highway Administration Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550003, China)

Abstract: The influence of repeated ice cycles on volume indexes, mechanical properties, high and low temperature performance and water stability of asphalt mixture were analyzed through related experiments. For southern plateau wet pavement, the dense gradation AC-16 mixture was adopted in experiments, which was used to be the top layer of local asphalt pavement. The experimental condition was established according to related references and actual condition; and kinds of performance experiments were executed with specimens under different ice cycles. The results showed that the initial void plays major role on the void of mixture during repeated ice cycles. The high temperature stability of mixture decreased with the increase of repeated ice cycles. The mechanical properties, water stability, and low temperature properties of mixture have greater degree of attenuation after repeated ice cycles, which decay rapidly at about first 8 cycles, then decay tended to be stable.

Key words: asphalt mixture; repeated ice cycles; volume parameter; mechanical property; road performance

沥青混合料在使用过程中, 由于水的表面张力比沥青大, 使得在有水环境下沥青膜极易沿集料表面脱落, 造成严重的水损害, 在我国高速公路的早期

损坏中水损害占了相当大的比例^[1]. 另外, 季节性冰冻区约占我国国土总面积的一半以上, 对于这些冰冻区来说, 沥青路面由水引起的损害不但有水的侵

稿日期: 2010-08-02; 修订日期: 2010-09-08

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2008BAG10B02)

第一作者: 谭忆秋(1968—), 女, 吉林德惠人, 哈尔滨工业大学教授, 博士, 博士生导师. E-mail: yiqiutan@126. com

通信作者: 赵立东(1984—), 男, 哈尔滨工业大学博士生. E-mail: 472110053zld@163. com

蚀,还有水分进入混合料空隙后由多次温度循环导致的冻融破坏。

在我国南方贵州、云南、四川等高原山区,由于海拔高度较大,地表高差变化剧烈,冬季极端最低温度一般在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而白天气温往往为 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,雨雪降落后会迅速融化结冰,产生非常普遍的凝冰现象.如果低温降水持续时间较长,则反复结冰形成冰的“生长”,路表面凝冰层厚度可达 20 cm 左右,2008年初发生在我国南方云贵川等地区的冰雪灾害就是很典型的例子.路面凝冰灾害和通常的路面积雪灾害不同,积雪灾害多发生于我国北方寒冷地区,由于当地气温和空气湿度持续较低,积雪不会在路面上留下融冰。

凝冰不但会导致路表面润湿,丧失抗滑能力,使交通事故频发,而且反复凝冰会降低路面沥青结合料与集料的黏结能力和沥青混合料的强度.由于水和冰在 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时体积变化最大,所以在这一温度范围内水和冰对沥青路面造成的损害也是最大的,会造成松散、网裂等病害,如图 1 所示.目前,针对冻融作用导致沥青混合料损伤的机理研究仍在深入开展,并且在一定层面上取得了共识,普遍认识到暴露在冻融环境中的沥青混合料将发生使用寿命的缩减^[2-4].然而,以往的研究重心主要集中于冻融作用对沥青混合料材料性能的影响,较少针对凝冰条件造成混合料体积参数等方面退化的规律进行系统研究.本文针对我国南方云贵川等地区的气候特点,制定了室内反复凝冰的试验条件,并选择该地区沥青路面上面层常用密级配 AC-16 型、70# 沥青混合料,分析了反复凝冰对沥青混合料体积指标、力学性能、路用性能等方面的影响。

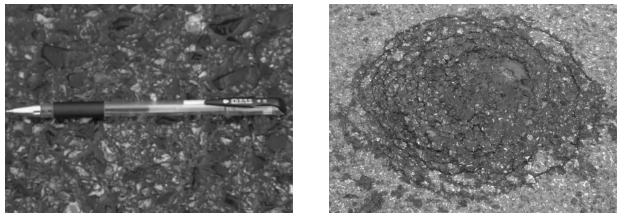


图 1 凝冰造成沥青混合料松散和网裂

Fig. 1 Asphalt mixture loose and net-shaped crack resulted from icing process

1 原材料性能

1.1 沥青胶结料性能

云贵川气候分区以 $2\sim 4$ 为主,全年最高温为 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温 $>-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,当地沥青路面多采用 70# 基质沥青.因而,本文试验采用 70# 基质重交通

沥青,其各项指标见表 1.由表 1 可知,所用沥青各项技术指标均符合规范技术要求。

表 1 70# 基质沥青常规性能

Table 1 Conventional performance of 70# Asphalt			
Item	Test result	Technical requirement	Test method
Penetration(100 g,5 s, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)/0.1 mm	68	$60\sim 80$	JTJ T 0604
Ductility(5 cm/min, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)/cm	>140	≥ 100	JTJ T 0605
Softening point/ $^{\circ}\text{C}$	49	≥ 45	JTJ T 0606
Relative density($15\text{ }^{\circ}\text{C}$)/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.009	Actual measure	JTJ T 0603

1.2 集料及填料性能

本文试验所用集料及填料(矿粉)的主要指标如表 2,3 所示.由表 2,3 可见,所用集料及填料的主要技术指标均满足规范技术要求。

表 2 粗集料力学指标

Table 2 Mechanical index of coarse aggregate				
Index	Test result			Technical requirement
	10~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	
Crushing value (by mass)/%	10.5	11.2	—	≤ 26
Water absorption (by mass)/%	0.35	0.48	0.51	≤ 2.0
Apparent density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.887	2.896	2.885	≥ 2.60
Adhesion		5		≥ 4
Flat grain content (by mass)/%	9.2	8.5	8.6	≤ 15

表 3 矿粉的技术指标

Table 3 Technical properties of the mineral powder		
Item	Mineral powder	Technical requirement
Apparent density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.740	≥ 2.45
$<0.6\text{ mm}$	100	100
Size range/ % $<0.15\text{ mm}$	95.0	90~100
$<0.075\text{ mm}$	89.0	75~100

1.3 混合料配合比设计

本文将粗集料逐档筛分,选择 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中 AC-16 中值级配进行配合比设计.经过配合比设计得出最佳油石比为 4.9% (质量分数),其混合料特性见表 4,其中的 VMA 为矿料间隙率,VFA 为饱和度。

表 4 混合料特性

Table 4 Mixture properties				
Void ratio (by volume)/%	VMA(by volume)/%	VFA(by volume)/%	Marshall stability/kN	Flow value/mm
3.6	15.3	74.71	12.58	3.60

2 反复凝冰对沥青混合料性能影响

沥青混合料经过多次冻融后的直接表现是空隙增大、沥青膜剥落、沥青与集料黏结力下降,最后导致混合料结构松散^[5]. 本文通过相关试验研究,评价反复凝冰对沥青混合料各性能的影响.

2.1 反复凝冰试验方法的确定

关于沥青混合料的冻融循环试验,国内外并没有统一的试验方法,一般公认为比较完善的方法是美国 AASHTO T283 试验(即 Lottman 试验),而针对反复凝冰的试验条件比较少见. 针对我国云贵川等地区冬季的气候特点,本文自行拟定了室内反复凝冰试验条件. 表 5 为贵州省黔东南州气象台提供的凯里市麻江县 2008 年 1 月的气温资料.

据调查,2008 年该地区冰雪灾害最严重时段发生在 1 月 12 日至 21 日,由表 5 可知这段时间低温一般均为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温一般为 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,昼夜温差很小. 路面一般都在晚上结冰,高速公路此时处于封闭状态,白天自然融化,让车辆通行. 凝冰严重时采用人工或撒盐除冰雪,但效率低、污染大. 参考以上实际环境条件,即沥青混合料经受多次凝冰的冰冻时间一般在晚上,大约在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下冰冻 10 h,白天在零上温度下融化,1 昼夜就能完成 1 次冻融循环,而且南方雨大潮湿,路面基本始终处于饱水状态. 同时考虑到工程应用中试验周期的可操作性,因此本文确定的反复凝冰过程为:将成型好的试件抽真空 (15 ± 1) min 并常温浸泡 30 min,使其饱水;考虑到

表 5 贵州省麻江县 2008 年 1 月气象资料

Table 5 Meteorological data of Majiang ,Guizhou Province in January, 2008 °C					
Date	Highest temperature	Lowest temperature	Date	Highest temperature	Lowest temperature
1	7.5	0.8	16	1.4	-4.2
2	6.4	-1.7	17	0.4	-3.8
3	6.7	3.1	18	1.2	-3.2
4	7.1	4.2	19	2.4	-3.8
5	11.0	4.3	20	2.3	-3.4
6	16.5	3.6	21	3.4	-4.3
7	14.1	3.5	22	-2.6	-4.2
8	15.1	8.7	23	-3.2	-3.9
9	18.5	4	24	-3.7	-5
10	18.7	13.1	25	-4.2	-5.3
11	21.8	14.3	26	-4.2	-5.5
12	15.5	-0.7	27	-5.3	-6.9
13	0.6	-2.6	28	-3	-5.6
14	2.6	-4.2	29	-1.6	-4
15	2.2	-4.8	30	-2.9	-4
			31	-2.9	-4.8

饱水后试件在冰箱中冷冻时上部水分会向下迁移,使试件内部水分分布不均匀,整体冷冻效果不好,所以试件饱水后采用保鲜膜密封包裹;然后放到预定温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气浴的低温箱内冷冻 5 h,且保证试件之间有 2 cm 的间隔;最后取出冻好的试件间隔 2 cm 放入常温(约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)水槽中融化,30 min 后慢慢撕掉试件表面的保鲜膜,融化时间为 6.5 h. 即单次循环共需 12 h,每 4 次单循环作为 1 个周期测其各指标.

2.2 反复凝冰对沥青混合料体积参数的影响

沥青混合料空隙率随冻融循环次数的增加而增大^[6-8],而空隙率又直接影响着混合料的路用性能,所以非常有必要研究反复凝冰对沥青混合料空隙率的影响. 对沥青混合料空隙率的测定多采用表干法,而表干法测空隙率需测量试件干燥时的质量,这对于处于反复凝冰过程中的同一批试件而言存在一定的操作困难. 因此本文从另一角度对空隙率进行分析,即选择试件的水中质量 m_w 随凝冰次数的变化来反映其空隙率变化. 具体过程为:

经过反复凝冰后混合料的水中质量变化 Δm_w 包括两部分,即:

$$\Delta m_w = \Delta m^+ + \Delta m^- \tag{1}$$

式中: Δm^+ 为由于空隙增大而造成混合料水中质量增加部分; Δm^- 为因松散而引起细小颗粒脱落所造成的质量减少部分.

在沥青混合料冻融过程中, Δm^+ 和 Δm^- 对 Δm_w 的贡献是同时存在的,当 $\Delta m_w > 0$ 时,说明在冻融过程中空隙增大起决定性作用,混合料水中质量将增加;反之,则说明混合料细小颗粒松散脱落引起的质量减少在起决定性作用,混合料的水中质量将减小.

对于 Δm^+ ,可由下面过程推出:

$$m_f = m_a + (v_0 + v_0^+ + v_1)\rho_w \tag{2}$$

$$m_w = m_a - (v_s - v_1)\rho_w \tag{3}$$

$$m_f - m_w = (v_0 + v_0^+ + v_s)\rho_w \tag{4}$$

式中: γ_f 为用表干法测定的试件毛体积相对密度,无量纲; m_a, m_w, m_f 分别为试件的空气中质量、水中质量及表干质量,g; v_s, v_0, v_0^+, v_1 分别为不包括开口孔隙的干燥试件体积、混合料原有的开口孔隙体积、在循环冻融作用下原有孔隙增大体积及在冻融作用下原有闭口孔隙变为开口孔隙的体积, cm^3 .

在沥青混合料反复凝冰过程中,原来空隙中的水结冰膨胀,使沥青结合料拉伸并因而导致空隙本身体积增大即 v_0^+ 增大,而 v_0 和 v_s 是不变的,由式(4)得知此时 $m_f - m_w$ 增大,因 m_a 不变,空隙率 VV

增大,最终造成式(1)中 Δm^+ 变大.

试件成型:制作 4.0%,4.5%,5.0%,5.5%,6.0%共 5 个油石比的马歇尔试件,双面击实各 75 次,每个油石比成型 4 个试件,共成型 20 个试件.每 4 次凝冰作用作为 1 个周期测定其水中质量,结果如图 2,3 所示,其中每个水中质量为 4 个试件的平均值.

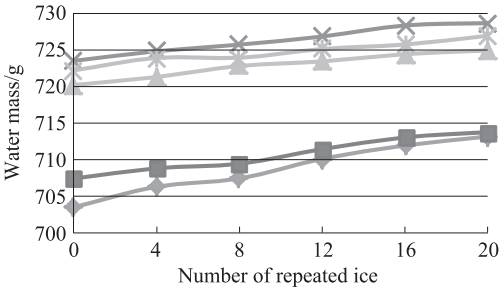


图 2 试件水中质量的变化

Fig. 2 Mass change of mixture in water

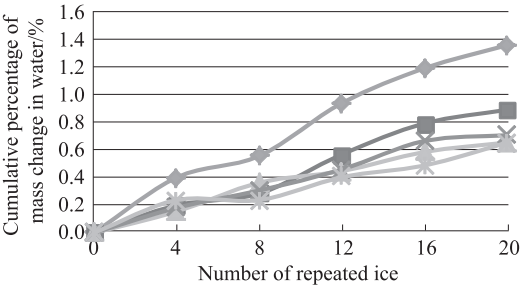


图 3 试件水中质量增加累计百分比

Fig. 3 Cumulative percentage of mixture mass change in water

由图 2 可见:沥青混合料的水中质量随着凝冰次数的增加而增大,说明水结冰后导致沥青结合料拉伸并使空隙本身增大占主导地位. 沥青混合料初始空隙率的大小对其反复凝冰后空隙率的变化具有重大影响,如图 3 可见,除了油石比为 5.0%的试件,其他试件基本是初始空隙率越大,反复凝冰后空隙率的变化幅度也越大. 初始空隙率较大的混合料内部连通空隙较多,进入混合料内部的水分也相应增多,凝冰过程中水分对混合料的冻胀力也越大;而且初始空隙率大的试件沥青用量较低,对集料黏结力较小,所以导致其空隙率增大幅度越大,经过若干次凝冰后沥青混合料内部的微损伤将逐渐发展为混合料的松散、开裂破坏,使混合料承载力下降,同时车辆荷载会加剧混合料的这种破坏. 但油石比为 5.0%的试件,由于其油石比接近最佳油石比 4.9%,结构较为合理,能产生明显的骨架密实结构,从而形成较为适当的空隙率,受水分影响相对较小. 因此,

建议沥青路面施工时务必保证施工质量,使得目标配合比得以很好实现,其中:混合料的沥青用量和合成级配波动要控制在合理范围内;混合料的压实度和空隙率等要满足设计要求,并防止出现离析等病害隐患,从而保证混合料形成合理的骨架密实结构,受水损害降到最低. 同时建议该地区适于采用空隙率较小的密集配沥青混合料.

2.3 反复凝冰对沥青混合料高温性能影响

在我国南方大部地区,冬季沥青路面普遍会遭到多次凝冰损坏,而夏季则要经受长时间高温天气的考验. 所以需要研究沥青混合料在冬季经受过多次凝冰后夏季的高温稳定性.

试件成型:制作 4.0%,4.5%,5.0%,5.5%,6.0%共 5 个油石比的马歇尔试件,每面击实 75 次,每个油石比成型 24 个试件,共成型 120 个试件. 稳定度试验:将未经过凝冰试验的试件抽真空,然后与每隔 4 次凝冰后的试件同时放入 60℃的恒温水槽内静置 30~40 min,采用 MTS 材料试验机按 T 0709—2000《沥青混合料稳定度试验》进行马歇尔稳定度试验,结果见图 4,5.

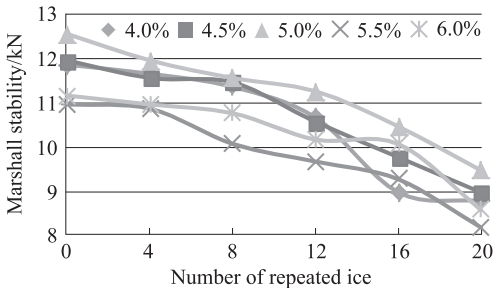


图 4 不同油石比稳定度的变化

Fig. 4 Stability of different bitumen aggregate ratio

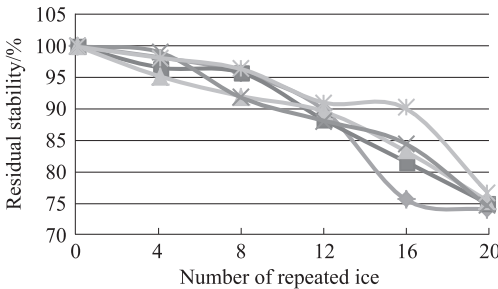


图 5 不同油石比残余稳定度

Fig. 5 Residual stability of different bitumen aggregate ratio

由图 4,5 可知,各种油石比试件的稳定度基本都随着凝冰次数的增加而减小,说明反复凝冰对沥青混合料的高温稳定性有较大影响. 另外,不同油石比试件稳定度的衰减速率基本一致,凝冰 20 次后基

本上都剩余残留稳定度 74%左右,表明混合料的沥青用量对凝冰后混合料马歇尔稳定度衰减程度的影响不大.

2.4 反复凝冰对沥青混合料力学性能影响

试件成型:采用 Superpave 规范中旋转压实成型高为(100±2) mm,直径为(100±2) mm 的圆柱体试件,共成型油石比为 5.0%的混合料试件 48

个,每个循环周期取 3 个做抗压强度试验,5 个做回弹模量试验.抗压强度及回弹模量试验:将未经过冻融循环的试件抽真空,然后与每隔 4 次凝冰后的试件同时放入 20℃的恒温水槽内保温 2.5 h,采用 MTS 试验机按照试验规程 T 0713—2000《沥青混合料单轴压缩试验》进行抗压回弹模量试验,结果见表 6.

表 6 凝冰后试件抗压强度及回弹模量
Table 6 Compressive strength and modulus of samples after repeated icing process

Number of repeated ice	Maximum load/kN	Compressive strength/MPa	Modulus/MPa	Strength degradation/%	Modulus degradation/%
0	34.8	4.4	1485.3	0	0
4	30.3	3.9	1197.1	13.0	19.4
8	29.5	3.8	852.0	15.2	42.6
12	20.5	2.6	728.0	41.0	51.0
16	18.9	2.4	723.3	45.7	51.3
20	17.9	2.3	696.7	48.5	53.1

随着凝冰次数的增加,用肉眼即可观察到试件表面的损伤情况.首先,原本光滑的试件表层逐渐变得粗糙,细骨料外露,进而部分表面起皮剥落,直至整个试件表层酥松脱落,露出粗大的骨料,部分棱角掉落.未冻融试件沥青混合料内部气孔大小适中,分布均匀;经反复凝冰后,气孔间出现明显的网状裂缝.

JTG F40—2004《公路沥青路面设计规范》中要求中粒式密级配,沥青针入度≤90 的沥青混合料其回弹模量为 1 000~1 400 MPa.由表 6 可知在 0~4 次凝冰时,试件回弹模量尚符合规范要求,但 4 次凝冰之后则开始衰减并低于规范要求.随着凝冰次数增多,试件抗压强度及回弹模量均逐渐降低,这是由于凝冰作用引发混凝土内部结构出现微损伤,并且随着次数增多损伤逐步积累扩展,使得试件结构变得酥松退化,进而导致混合料的刚度和承载能力均随之降低.前 4 次凝冰作用导致沥青混合料力学性能衰变较快,沥青混合料内部损伤进入发展阶段,裂缝延伸,内部结构发生明显酥化,刚度大幅度降低.12 次凝冰后,其抗压强度和回弹模量的衰减都趋于稳定.

2.5 反复凝冰对沥青混合料水稳性能影响

试件成型:制作油石比为 5.0%的马歇尔试件,双面击实各 50 次,共成型 20 个试件.常温劈裂抗拉强度试验:将未经过反复凝冰的试件抽真空,然后与每隔 4 次凝冰的试件同时放入 25℃的恒温水槽内保温 2 h,采用 MTS 试验机按照规程 T 0729—2000《沥青混合料冻融劈裂试验》进行常温劈裂抗拉强度

试验,结果见表 7.

表 7 凝冰后试件常温劈裂抗拉强度
Table 7 Splitting tensile strength of samples at room temperature after repeated icing process

Number of repeated ice	Maximum load/kN	Splitting tensile strength/MPa	Splitting strength ratio/%
0	10.04	0.98	100
4	8.59	0.82	83.7
8	8.36	0.81	82.6
12	7.91	0.76	77.6
16	7.84	0.76	77.4
20	7.74	0.74	76.1

由表 7 可知:经过多次凝冰,沥青混合料的劈裂抗拉强度在逐渐衰减,该衰减过程主要分为两个阶段:第一阶段是从未凝冰到凝冰 8 次,此阶段沥青混合料的劈裂强度下降迅速,主要是由于水分进入到试件内部产生冻胀引起的,但满足规范 0.8~1.2 MPa 的要求;第二阶段是 8 次凝冰以后,此阶段沥青混合料的劈裂抗拉强度下降趋势减缓.首先是侵入的水分在温度变化时引起的膨胀造成了沥青混合料内部的开口空隙增大,从而增加了混合料的内部裂缝,在下一凝冰过程中又将进入更多的水分,这样周而复始直到试件内部形成众多连通空隙,在试件承受荷载时产生应力集中而成为受力薄弱点,因此 0~8 次凝冰试件的劈裂抗拉强度大幅度下降.在接下来的凝冰过程中,由于冰冻过程中所形成的负温坡差作用,部分水分将通过这些增大的连通空隙排到混合料表面,从而减少了水分膨胀带来的强度损失,因此在凝冰 8 次以后,试件的劈裂抗拉强度下降幅度要

小很多。

2.6 反复凝冰对沥青混合料低温性能的影响

本文采用-10℃低温劈裂强度试验来评价冻融作用后沥青混合料低温性能变化情况。低温劈裂试验用于评价沥青混合料低温抗裂性能,亦可供沥青路面结构设计时选择沥青混合料的力学设计参数。

制作油石比为 5.0% 的马歇尔试件,双面击实

各 75 次,共成型 20 个试件。低温劈裂强度试验:将未经过冻融循环的试件抽真空,然后与每隔 4 次凝冰的试件同时放入(-10±0.5)℃的低温箱恒温空气浴不少于 6 h,试件之间的距离不少于 10 mm,采用 MTS 试验机按照规程 T 0716—1993《沥青混合料劈裂试验》进行试件低温劈裂抗拉强度及劲度模量试验,结果见表 8。

表 8 凝冰后试件低温劈裂抗拉强度和劲度模量

Table 8 Splitting tensile strength and stiffness modulus of samples at low temperature after repeated icing process

Number of repeated ice	Maximum load/kN	Tensile strain×10 ⁻⁶	Splitting tensile strength/MPa	Stiffness modulus/MPa	Splitting strength degradation/%	Stiffness degradation/%
0	52.5	2 526	5.3	3 632.9	100	100
4	47.2	2 859	4.7	2 844.8	88.7	78.3
8	42.0	2 707	4.3	2 737.7	80.9	75.4
12	41.4	2 936	4.3	2 497.5	80.1	68.8
16	39.9	2 979	4.1	2 350.4	76.4	64.7
20	35.6	3 119	3.6	2 000.7	68.1	55.1

Note: The Poisson's ratio μ is 0.25(-10℃).

由表 8 可知,沥青混合料低温劈裂强度和劲度模量都随着凝冰次数增多而衰减,开始几次衰减幅度较大,后来趋于平缓。这与试件的抗压强度和回弹模量变化情况相似,原因是前 4 次凝冰作用导致沥青混合料低温性能衰变较快,沥青混合料内部损伤进入发展阶段,而 8 次凝冰以后,混合料低温性能衰减幅度减缓。

3 结论

- (1)根据我国南方高原山区的沥青路面冬季经受反复凝冰损坏的实际情况,结合相关文献,提出了相应的室内试验研究方法。
- (2)沥青混合料的水中质量随着凝冰次数的增加而增加,试件初始空隙率对其反复凝冰过程中的空隙率有重大影响,我国云贵川地区适于采用空隙率较小的密集配沥青混合料。
- (3)沥青混合料高温稳定性随着凝冰次数的增加而减小,沥青用量对其凝冰后的马歇尔稳定度衰减程度影响不大。
- (4)沥青混合料力学性能、水稳定性以及低温性能在反复凝冰后都有较大程度衰减,且衰减规律基本一致,在前 8 次衰减较快,之后趋于平缓。

参考文献:

[1] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社,2008:122-138,140-153.

[2] 张宏超,孙立军. 沥青混合料水稳定性性能全程评价方法研究[J]. 同济大学学报,2002,30(4):324-327.

[3] TATARNIUK C,DONABUE R,SEGO D. Freeze separation of salt contaminated melt water and sand wash water at snow storage and sand recycling facilities[J]. Cold Regions Science and Technology,2009(57):61-66.

[4] 李智,张肖宁,王绍怀. 不同石料 SMA 沥青混合料水稳定性研究[J]. 中南公路工程,2006,31(6):29-32.

[5] 胡群芳. 公路路面结构使用性能评估与预测研究[D]. 郑州:郑州大学,2003.

[6] 冯俊领,郭忠印,陈崇驹. 高温多雨条件下沥青混合料水损害模拟研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(5):548-552.

[7] 李东庆,孟庆洲,房建宏,等. 沥青混合料抗冻循环性能的试验研究[J]. 公路,2007(12):145-147.

LI Zhi,ZHANG Xiao-ning,WANG Shao-huai. Moisture susceptibility evaluation of SMA with different aggregates[J]. Central South Highway Engineering,2006,31(6):29-32. (in Chinese)

FENG Jun-ling,GUO Zhong-yin,CHEN Chong-ju. Simulation study of water damage of asphalt mixtures in high-temperature and rainy weather[J]. Journal of Building Materials,2007,10(5):548-552. (in Chinese)

HU Qun-fang. The study of evaluation and forecast on pavement structure performance[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2003. (in Chinese)

SHA Qing-lin. Premature damage and its preservative measures of bituminous pavement on expressway[M]. Beijing:China Communication Press,2008:122-138,140-153. (in Chinese)

ZHANG Hong-chao,SUN Li-jun. Research on methods for evaluating water stability of hot mixed asphalt[J]. Journal of Tongji University,2002,30(4):324-327. (in Chinese)

LI Dong-qing,MEG Qing-zhou,FANG Jian-hong,etc. Test and research on performance of frost thawing resistance of asphalt mixture[J]. Highway,2007(12):145-147. (in Chinese)

[8] 房建果,郭忠印,王松根. 大粒径透水性沥青混合料水稳定性能对比研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(4):493-496.

FANG Jian-guo,GUO Zhong-yin,WANG Song-gen. Comparative study on moisture susceptibility of large stone porous asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):493-496. (in Chinese)