

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310006



温湿耦合循环对 SBS 改性 沥青胶浆的性能影响

谭波^{1,2}, 樊雨竹^{1,2}, 李青^{1,2}, 谢恩连³, 刘敬霜³

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西 桂林 541004;

3. 广西田新高速公路有限公司, 广西 崇左 532800)

摘要: 为探究 SBS 改性沥青胶浆在自然环境中受到温度和湿度共同作用下的性能变化,模拟温湿耦合循环环境进行室内试验。在不同温度区间的循环条件下,采用锥入度试验、软化点试验、延度试验、布氏旋转黏度试验和双边缺口拉伸试验评价 SBS 改性沥青胶浆的宏观性能变化;结合红外光谱测试,从化学成分角度探究其性能变化机理。研究表明:随着温湿耦合循环次数增加,SBS 改性沥青胶浆出现变硬、变脆等老化现象,其宏观性能发生衰退;在相同试验条件下,温度区间的温差越大,对胶浆性能的影响越大;在温湿耦合循环后,SBS 改性沥青胶浆的亚砷基指数增大,丁二烯指数下降。

关键词: SBS 改性沥青胶浆; 湿热环境; 耦合老化; 微观分析; 老化性能

中图分类号: U 414

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)04-0478-09

Effect of Temperature and Humidity Coupling Cycles on Performance of SBS Modified Asphalt Mastic

TAN Bo^{1,2}, FAN Yuzhu^{1,2}, LI Qing^{1,2},
XIE Enlian³, LIU Jingshuang³

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources,

Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Guangxi Tianxin Expressway Limited Company, Chongzuo 532800, China)

Abstract: In order to investigate the performance changes of SBS modified asphalt mastic under the joint action of temperature and humidity in the natural environment, indoor tests were carried out to simulate the temperature and humidity coupling cyclic environment. Under the cyclic conditions of different temperature intervals, the cone penetration test, the softening point test, the ductility test, Brookfield viscosity test, and double-edge-notched tension test were used to evaluate the macroscopic property changes of SBS modified asphalt mastic; combining with the infrared spectrometer, the mechanism of the performance change was studied from the perspective of chemical composition. The results show that: with the increase of the number of temperature and humidity coupling cycles, the SBS modified asphalt mastic appears to become hard, brittle and other aging phenomena, and its macroscopic properties declines; under the same test conditions, the higher the tem-

收稿日期: 2023-10-10

通信作者: 谭波(1977-),男,教授,博士,主要从事路基路面工程及新型建筑材料的研究。E-mail: bbsz2004@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52268039)

perature difference between the intervals of the mastic has a greater impact on its performance; the sulfoxide index of SBS modified asphalt mastic increases after the temperature and humidity coupling cycle, and the butadiene index also decreases.

Keywords: SBS modified asphalt mastics; hot and humid environment; coupled aging; micro-analysis; aging property

我国季冻区夏季高温多雨和冬季寒冷干燥交替情况出现,这样的极端环境使沥青路面长期处于温度和湿度的耦合作用下,造成沥青材料出现内部损伤,容易出现车辙、坑槽、松散等路面病害,严重影响了沥青路面的使用寿命和路用性能^[1-3]。

国内外学者对沥青和沥青混合料在极端环境下的变化规律进行了研究。李海军等^[4]对沥青进行热-氧-水老化,研究发现水分的存在会加速沥青的老化。Chen 等^[5]对不同水老化条件下的沥青疲劳性能进行研究,并建立模型预测水老化后沥青的疲劳寿命。念腾飞等^[6]通过灰色关联熵理论对沥青在冻融循环下的流变性能参数与沥青特征官能团进行关联度分析。张勤玲等^[7]对比研究了基质沥青和 SBS 改性沥青在干湿-冻融条件下的化学特性变化,发现 SBS 改性沥青的抗水老化性能要优于基质沥青。吴建涛等^[8]通过自主研发的试验装置模拟高温、高湿环境,研究回收沥青在水分-老化耦合作用下各项性能的变化规律。王龙等^[9]通过原子力显微镜,研究发现冻融循环后沥青胶浆的微观结构遭到破坏。Cheng 等^[10]通过建立的数学模型和粘弹性连续损伤理论评估了冻融循环下沥青和沥青胶浆的流变性能。郭庆林等^[11]发现在高温、高湿的环境下,沥青混合料的抗拉强度、低温杨氏模量和中温动态劲度模量降低。关于温度和湿度对沥青性能影响的研究已成为业界颇为关注的问题,但目前针对不同温差变化和湿度共同作用下 SBS 改性沥青胶浆的影响研究却较少。

本文采用一种更符合自然环境中高低温变化和湿度耦合的模拟试验方式,在不同温湿循环条件下,进行锥入度试验、软化点试验、延度试验、布氏旋转黏度和双边缺口拉伸试验(DENT)以评估 SBS 改性沥青胶浆的性能变化,并结合傅里叶变换红外光谱(FTIR)从化学成分角度探究其性能变化机理。

表 1 SBS 改性沥青的技术指标

Tab. 1 echnical index of SBS modified asphalt				
技术指标		试验值	规范值	试验方法
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm		46.1	40~60	T 0604
软化点/℃		85.6	≥60	T 0606
延度(5 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm		24.6	≥20	T 0605

1 材料与方法

1.1 材料及指标

采用 SBS 改性沥青,其技术指标,如表 1 所示,满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》。矿粉为石灰石粉,其技术指标,如表 2 所示,满足 JTJ E42—2005《公路工程集料试验规程》。

表 2 矿粉的技术指标

Tab. 2 Technical index of mineral powder							
技术指标	试验值	规范值	试验方法	技术指标	试验值	规范值	试验方法
表观密度/g·cm ⁻³	2.706	≥2.50	T 0352	通过率(颗粒范围<0.6 mm)/%	100.0	100	T 0351
含水量/%	0.4	≤1	T 0332	通过率(颗粒范围<0.15 mm)/%	91.6	90~100	T 0351
亲水系数	0.4	<1	T 0353	通过率(颗粒范围<0.075 mm)/%	81.7	75~100	T 0351
矿粉塑性指数/%	2.8	<4	T 0354				

1.2 沥青胶浆样品制备

将 SBS 改性沥青置于 170 ℃的烘箱中加热至流动状态,倒入 180 ℃的油浴锅中。将矿粉放入 105 ℃的烘箱加热 4 h 以除去水分,称取与沥青质量比为 1:1 的矿粉,少量多次加入沥青中;采用增力搅拌器进行搅拌,搅拌速率为 1 000 r·min⁻¹,时间为 30 min。将沥青胶浆倒入模具中,制成所需样品。

1.3 温湿耦合循环试验

参考文献[9-10]模拟室内温湿耦合循环试验。为研究不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的性能变化规律,设置不同的循环温度区间(−20~60 ℃,−20~40 ℃,0~60 ℃,0~40 ℃),其中,温湿耦合循环中的低温条件是由低温箱控制,高温高湿条件是由恒温水浴箱控制。先将 SBS 改性沥青胶浆样品放入

低温箱中持续冰冻 12 h,再放入恒温水浴箱中 12 h,此为一个循环。分别循环 3,6,9,12 次,重复循环过程完成不同次数的温湿耦合循环,循环结束后将样品取出,待样品静置至室温后,进行后续试验。

1.4 常规试验

参考 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对温湿耦合循环后的 SBS 改性沥青胶浆分别进行 15 和 40 ℃ 锥入度试验、软化点(环球法)试验和 5 ℃ 延度试验。沥青胶浆采用常规的针入度试验容易出现数据失真的情况^[12-13],因此,通过 15 和 40 ℃ 下的 SBS 改性沥青胶浆锥入度试验,分别评价其温湿耦合循环作用后的低温抗剪性能和高温抗剪性能。锥入度试验装置,如图 1 所示。参照 JTG E20—2011 中的针入度试验方法,将标准针换作锥针,得到不同工况下的 SBS 改性沥青胶浆锥入度,并计算其抗剪强度(τ),即

$$\tau=981Q \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)/\left(\pi h^2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)。(1)$$

式(1)中: Q 为锥针、连杆和砝码总质量; α 为锥针针尖角度; h 为锥入度。

1.5 布氏旋转黏度试验

参考 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,选用布氏旋转黏度仪测试 SBS 改性沥青胶浆在温湿耦合循环下不同温度(135,145,155,165,175 ℃)的黏度,并计算其黏流活化能。

1.6 双边缺口拉伸(DENT)试验

采取双边缺口拉伸试验评价 SBS 改性沥青胶浆在温湿耦合循环作用下的中温抗裂性能变化规律。参考 AASHTO TP 113—2015 规范,采用万能材料试验机,设置拉伸速率为 50 mm·min⁻¹,试验温度为 25 ℃。对同一种 SBS 改性沥青胶浆,制备 3 种不同韧带宽度(5,10,15 mm)的试件进行测试,试验模具,如图 2 所示。

1.7 傅里叶红外光谱(FTIR)试验

对不同工况下的 SBS 改性沥青胶浆进行傅里叶红外光谱测试,观察主要官能团振动谱带的变化情况,进一步探究 SBS 改性沥青胶浆在温湿耦合循环下的性能衰退机理。试验采用 Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪,测试范围为 4 000~500 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 32 次。



图 1 锥入度试验装置
Fig. 1 Cone penetration test device

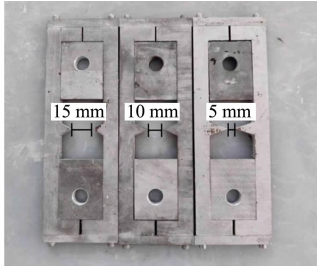


图 2 双边缺口拉伸试验模具
Fig. 2 Test mold of double-edge-notched tension

2 试验结果与分析

2.1 常规试验

2.1.1 锥入度 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆在试验温度(θ)为 15,40 ℃ 时的抗剪强度,如图 3 所示。图 3 中: θ_i 为循环过程的温度。

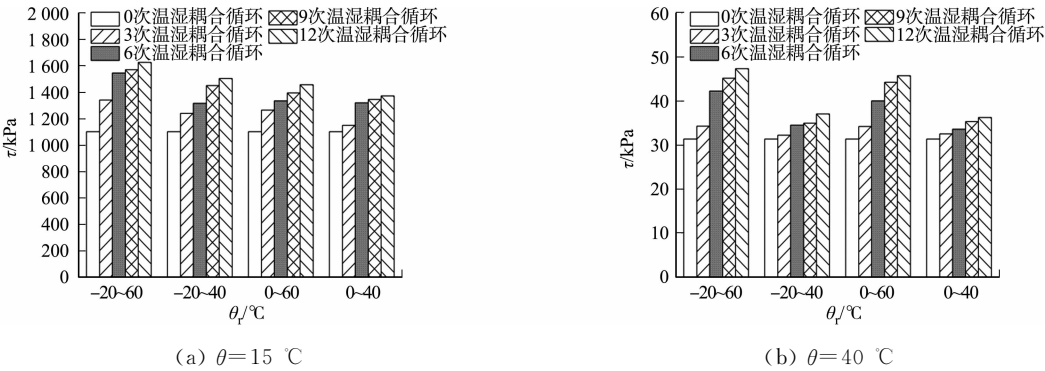


图 3 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆在 15,40 ℃ 下的抗剪强度

Fig. 3 Shear strength of SBS modified asphalt mastic at 15 and 40 ℃ under different conditions

由图 3 可知:不同温度差下 SBS 改性沥青胶浆的抗剪强度增幅存在差异,在温差更大的区间循环的 SBS 改性沥青胶浆抗剪强度的增幅更明显。具体表现为与未参与温湿耦合循环的对照组相比,SBS

改性沥青胶浆在温度区间为 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内循环 12 次后, 其 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的抗剪强度分别增大了 47.5%, 36.3%, 32.1%, 24.4%, 其 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的抗剪强度分别增大了 50.9%, 18.1%, 45.7%, 15.7%。随着温湿耦合循环作用的进行, 不同循环温度区间下的沥青胶浆抗剪强度均呈上升趋势, 说明随着温湿耦合循环作用的进行, 沥青质的质量增加, 轻质组分含量降低, SBS 改性沥青胶浆的弹性成分增多, 胶浆变硬、变脆。当试验温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间下循环的 SBS 改性沥青胶浆的抗剪强度增幅要明显小于在 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间下循环的沥青胶浆抗剪强度。说明在更高温度区间的温湿耦合循环下, SBS 改性沥青胶浆硬化现象越明显。

2.1.2 软化点 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的软化点试验结果, 如图 4 所示。

由图 4 可知: 在同样的循环温度区间下, 随着温湿耦合循环次数的增加, SBS 改性沥青胶浆软化点变化较小, 且未呈现出一致性的变化规律, 这一结果与文献[14]的研究结果一致, 说明用软化点难以表征其高温形状的变化。这可能是因为 SBS 改性沥青的软化点变化是由 SBS 改性剂和基质沥青综合作用决定, SBS 改性剂在 SBS 改性沥青胶浆内部形成了网络状结构包裹住了沥青, 使沥青结构变得更稳定, 而温湿耦合循环作用对 SBS 改性剂的网络状结构产生损害较少, 导致软化点变化不显著。

2.1.3 延度 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的延度试验结果, 如图 5 所示。图 5 中: l 为延度。

由图 5 可知: 在相同循环温度区间下, 随着温湿耦合循环次数的增加, SBS 改性沥青胶浆的延度变化趋势一致, 均呈现下降趋势, 此外, 不同温差大小对 SBS 改性沥青胶浆延度的影响程度不同, 循环温度区间的温差越大, 胶浆延度下降幅度越大; 而在循环温度区间温差相同的情况下, 在高温区间循环的胶浆延度受温湿耦合循环作用的影响要比在低温区间循环所受的影响更大。说明温湿耦合循环使胶浆的低温抗裂性能下降, 且温差越大、温度越高, 胶浆的低温抗裂性能下降越明显。主要是因为温湿耦合循环使芳香分向胶质和沥青质转化, SBS 改性沥青胶浆变硬, 低温延展性降低, 温差越大、温度区间越高, 越加剧了这种现象。

2.2 布氏旋转黏度试验

不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的布氏旋转黏度试验结果, 如图 6 所示。图 6 中: η 为黏度。

由图 6 可知: 在相同试验温度下, 随着循环次数的增多, SBS 改性沥青胶浆黏度总体呈现出递增的趋势, 温湿耦合循环后胶浆的黏度增幅在较低的试验温度内表现更加明显, 随着试验温度越高, 黏度增

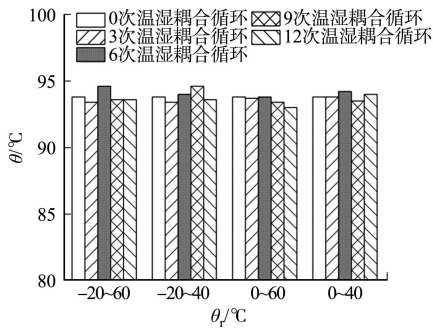


图 4 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的软化点试验结果

Fig. 4 Softening point test results of SBS modified asphalt mastics under different conditions

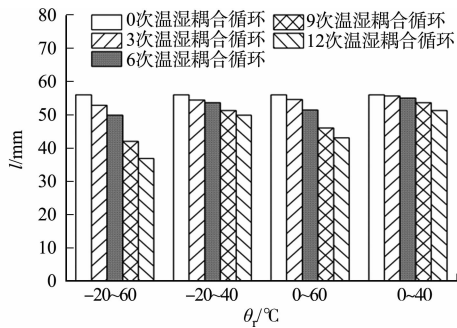
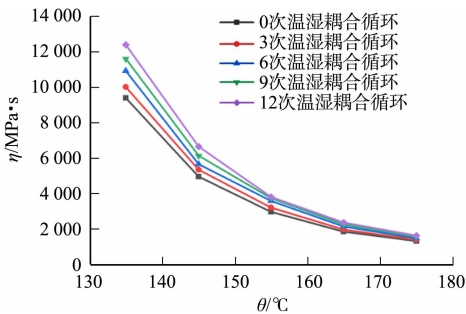
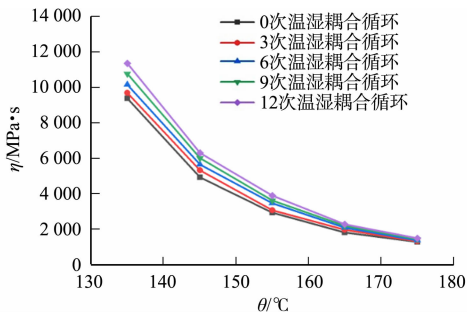


图 5 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的延度试验结果

Fig. 5 Ductility test results of SBS modified asphalt mastics under different conditions



(a) 温度区间为 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) 温度区间为 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

加幅度越小。在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间下进行循环的沥青胶浆黏度变化最显著, 当循环温度区间的温度差变

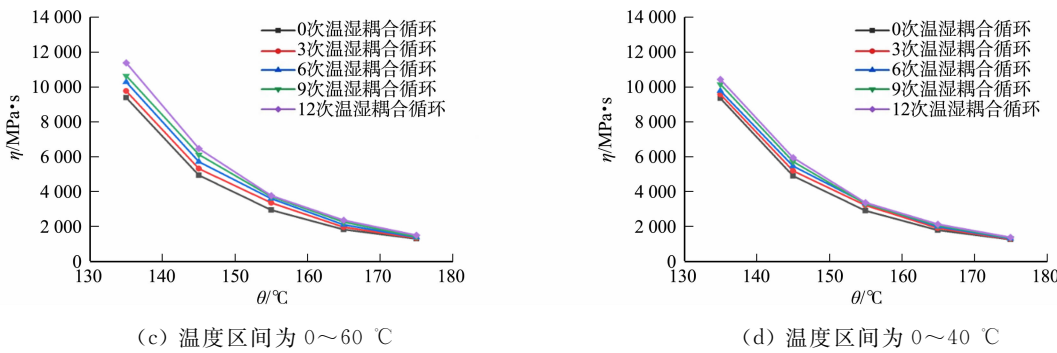


图 6 不同工况下 SBS 改性沥青胶浆的布氏旋转黏度试验结果

Fig. 6 Brookfield viscosity test results of SBS modified asphalt mastics under different conditions

小,沥青胶浆的黏度增幅减小。这是因为 SBS 改性沥青胶浆经过温湿耦合循环后,轻组分挥发或向重组分转化,重组分占比增大,导致胶浆内部分子间的运动阻力增大,黏度增大,在温差越大的区间内循环,反应速率越快。

Arrhenius 方程可以用来表征不同温度下化学反应速率的变化关系。SBS 改性沥青胶浆在进行温湿耦合循环过程中进行了复杂的化学反应,黏度发生变化,可以通过建立以黏度为参数的 Arrhenius 方程来表征 SBS 改性沥青胶浆在温湿耦合循环过程中的反应进程。

通过 Arrhenius 方程可以列出 SBS 改性沥青胶浆黏度与温度之间的关系为

$$\lg(\eta(\theta))=\lg K+E_{\eta}/(2.303R\theta)。$$

(2)

式(2)中: $\eta(\theta)$ 为温度 θ 时的黏度; K 为材料常数; R 为玻尔兹曼常数; E_{η} 为沥青黏流活化能。

黏流活化能是指高分子材料在流动过程中,流动单元(即分子链段)用于克服位垒,由原位置跃迁到附近“空穴”所需的最小能量。沥青黏流活化能 E_{η} 能够表征沥青胶浆流动的难易程度和温度敏感性^[15]。根据式(2),对 $\lg(\eta(\theta))$ 和 $1/\theta$ 作图,并对数据进行线性回归,所得直线斜率为 $E_{\eta}/(2.303R)$,即可得到 E_{η} 值。沥青黏流活化能计算结果,如表 3 所示。表 3 中: N 为循环次数; R^2 为决定系数。

表 3 沥青黏流活化能的计算结果

Tab. 3 Calculation result of visco-flow activation energy

温度区间	<i>N</i> /次	$\lg(\eta(\theta))-1/\theta$ 回归模型	R^2	<i>P</i>	E_{η} /kJ·mol ⁻¹
-20~60 °C	0	$y=3\ 923.8x-8.674\ 18$	0.990	0.000 3	75.13
	3	$y=3\ 965.9x-8.744\ 36$	0.993	0.000 1	75.94
	6	$y=3\ 978.1x-8.737\ 47$	0.994	0.000 1	76.17
	9	$y=4\ 011.8x-8.790\ 68$	0.995	0.000 1	76.81
	12	$y=4\ 062.6x-8.886\ 64$	0.994	0.000 1	77.79
-20~40 °C	0	$y=3\ 923.8x-8.674\ 18$	0.990	0.000 3	75.13
	3	$y=3\ 941.0x-8.691\ 52$	0.996	0.000 1	75.46
	6	$y=3\ 955.1x-8.697\ 30$	0.999	0.000 1	75.73
	9	$y=3\ 983.2x-8.740\ 42$	0.999	0.000 1	76.27
	12	$y=4\ 005.6x-8.770\ 71$	0.999	0.000 1	76.70
0~60 °C	0	$y=3\ 923.8x-8.674\ 18$	0.990	0.000 3	75.13
	3	$y=3\ 945.7x-8.695\ 62$	0.997	0.000 0	75.55
	6	$y=3\ 964.8x-8.714\ 20$	0.998	0.000 0	75.91
	9	$y=3\ 981.6x-8.733\ 65$	1.000	0.000 0	76.24
	12	$y=4\ 010.3x-8.780\ 18$	0.999	0.000 0	76.79
0~40 °C	0	$y=3\ 923.8x-8.674\ 18$	0.990	0.000 3	75.13
	3	$y=3\ 939.0x-8.687\ 76$	0.997	0.000 0	75.42
	6	$y=3\ 944.9x-8.686\ 74$	0.999	0.000 0	75.53
	9	$y=3\ 964.4x-8.719\ 90$	0.998	0.000 0	75.91
	12	$y=3\ 981.5x-8.748\ 41$	0.998	0.000 0	76.23

由表 3 可知:在不同温湿耦合循环次数下,SBS 改性沥青胶浆的 $\lg(\eta(\theta))$ 与 $1/\theta$ 有良好的线性关

系, 决定系数 R^2 均大于 0.990, P 值均小于 0.05, 表明回归方程与试验结果之间的差异具有统计学意义; 在不同循环温度区间内, 随着温湿耦合循环次数的增加, 黏流活化能 E_η 值均呈上升趋势, 但增幅存在差异; 在 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内循环的 SBS 改性沥青胶浆的 E_η 增幅最大, 其 12 次循环后的 E_η 达到了 $77.79\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 在 $-20\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$, $0\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内循环的沥青胶浆的 E_η 增幅次之, 在 $0\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内循环的沥青胶浆的 E_η 增幅最小, 其 12 次循环后的 E_η 为 $76.23\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。这可能是因为 SBS 改性沥青胶浆经过温湿耦合循环后, SBS 改性沥青胶浆在高温、高湿环境下生成亚砷基等极性含氧官能团, 相对分子质量增大, 分子间作用力变大, 导致沥青分子流动所需的能量变大; 同时, SBS 改性沥青胶浆在高温、高湿环境下, 组分发生变化, 轻质组分一部分挥发, 一部分转化为重组分, 沥青变稠, 改性剂与沥青间的作用力及界面粘滞作用变强, 沥青材料运动时需要克服的能垒越高, 因此, 经过温湿耦合循环后黏流活化能上升。

2.3 抗断裂性能变化

根据上述试验结果发现, 在 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内循环的 SBS 改性沥青胶浆的性能变化最显著, 因此, 选取 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内循环的 SBS 改性沥青胶浆作为研究对象。根据双边缺口拉伸试验结果, 绘制不同韧带宽度的 SBS 改性沥青胶浆的荷载-位移曲线, 如图 7 所示。图 7 中: P_a 为荷载; Δ 为位移; L 为试件的韧带宽度。

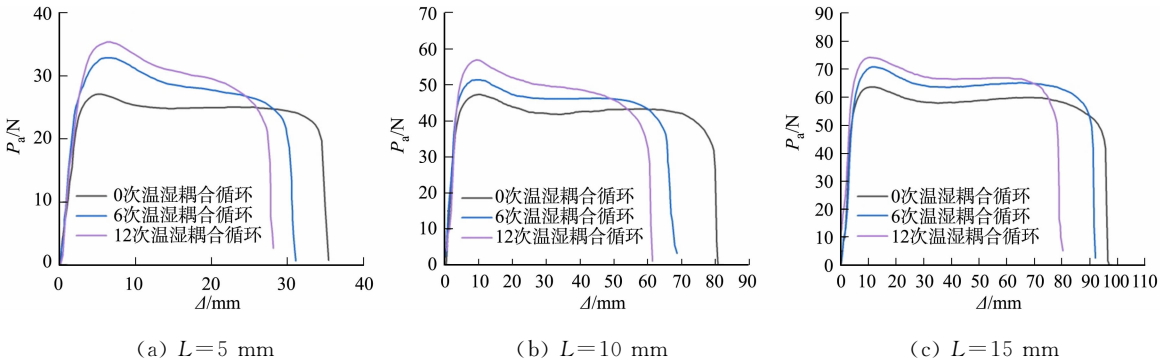


图 7 不同韧带宽度的 SBS 改性沥青胶浆的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of SBS modified asphalt mastics with different ligament widths

SBS 改性沥青胶浆总断裂功主要由基本断裂功和塑性变形功组成, 可由荷载-位移曲线面积确定, 其表达式为

$$W_t = W_e + W_p = w_e \times LB + \beta w_p \times BL^2. \tag{3}$$

式(3)中: W_t 为总断裂功; W_e 为基本断裂功; W_p 为塑性变形功; w_e 为断裂比基本功; w_p 为断裂比塑性功; B 为试样厚度; β 为描述塑性区形状的几何特征参数。

$$w_t = W_t / BL. \tag{4}$$

联立式(3)和式(4), 可得

$$w_t = w_e + \beta w_p \times L. \tag{5}$$

式(5)中: w_t 为总比断裂功。

根据式(5)对 w_t 断裂比基本功和韧带宽度 L 进行线性拟合, 得到的直线截距为 w_e , 斜率为 βw_p 。

根据韧带宽度 5 mm 的胶浆试件的峰值荷载和试样的几何尺寸, 计算得到试件净截面应力为

$$\sigma_n = P_{\text{peak}} / (\overline{B} \overline{L}). \tag{6}$$

式(6)中: σ_n 为净截面应力; P_{peak} 为峰值荷载; \overline{B} 表示韧带宽度为 5 mm 试件的平均厚度; \overline{L} 表示韧带宽度为 5 mm 试件的实测平均韧带宽度。

试件的临界裂纹尖端位移(CTOD)的计算式为

$$\delta_t = w_e / \sigma_n. \tag{7}$$

式(7)中: δ_t 为裂纹尖端张开位移, 即 CTOD。由于 CTOD 值与沥青混合料疲劳性能之间有高相关性^[16-17], 因此, CTOD 值能够表征沥青的中温抗断裂性能。

由图 7 可知: SBS 改性沥青胶浆的荷载-位移曲线变化呈现 3 个阶段, 第 1 阶段随着位移的缓慢增

加,荷载迅速增大;第 2 阶段在到达屈服荷载后,试件拉伸位移持续增加,但荷载缓慢下降;第 3 阶段荷载急剧下降至试件断裂。这可能是 SBS 改性剂在胶浆内部形成的交联网状结构引起的。

不同循环次数下 SBS 改性沥青胶浆的 DENT 结果,如表 4 所示。由图 7 和表 4 可知:随着温湿耦合循环次数的增加,沥青胶浆失效变形降低,峰值荷载增加,说明温湿耦合循环后,SBS 改性沥青胶浆变硬,延展性变差。

由表 4 可以看出:SBS 改性沥青胶浆 CTOD 随着温湿耦合循环次数的增加而减小,CTOD 越低,沥青胶浆越接近脆性状态,更容易遭受到永久性损伤,温湿耦合循环作用削弱了 SBS 改性沥青胶浆的中温抗断裂性能,循环次数越多,效果越显著,这与峰值荷载和失效变形的分析结果一致。原因可能是一方面在温度和湿度的共同作用下,SBS 改性沥青胶浆内部孔隙数量变多、孔径增大,进而为水进入胶浆内部提供通道,最终破坏胶浆内部结构;另一方面,SBS 改性沥青胶浆中的亲水极性分子和一些水溶性物质与水结合,导致胶浆变脆变硬^[18-19]。

2.4 化学成分变化

采用傅里叶变换红外光谱仪分别对 SBS 改性沥青、石灰石矿粉和 SBS 改性沥青胶浆,以及不同循环温度下循环 12 次后的 SBS 改性沥青胶浆进行测试,结果分别如图 8,9 所示。图 8,9 中:A 为吸光度; ν 为波数。

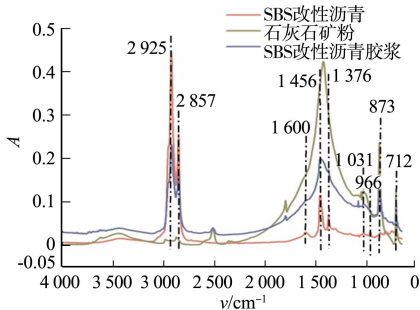


图 8 SBS 改性沥青、石灰石矿粉和 SBS 改性沥青胶浆的 FTIR 图谱

Fig. 8 FTIR spectra of SBS modified asphalt, limestone mineral powder and SBS modified asphalt mastics

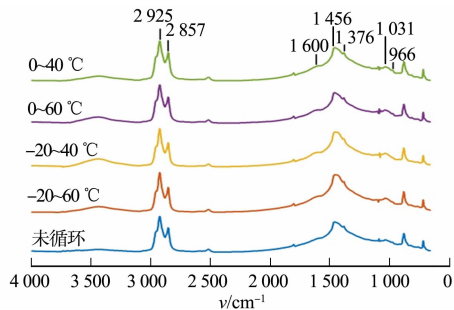


图 9 不同循环温度下 SBS 改性沥青胶浆的 FTIR 图谱

Fig. 9 FTIR spectra of SBS modified asphalt mastics in different cycling temperatures

SBS 改性沥青胶浆并没有产生新的特征吸收峰,其特征吸收峰是 SBS 改性沥青和石灰石矿粉的特征吸收峰的叠加,表明石灰石矿粉与 SBS 改性沥青主要通过物理吸附接触,没有发生明显的化学反应。结合图 8 可知,在温湿耦合循环作用下,石灰石矿粉的化学成分稳定,沥青胶浆的特征官能团的变化主要是因为沥青的特征官能团发生变化,因此,可以用沥青的特征官能团变化率来表征温湿耦合循环作用对沥青胶浆的影响。

1 700 cm^{-1} 处的羰基吸收峰、1 031 cm^{-1} 处的亚砷基吸收峰和 966 cm^{-1} 处丁二烯吸收峰的变化可以用来表征 SBS 改性沥青老化程度^[20-22]。根据朗伯-比尔定律,选取波长范围 2 000~600 cm^{-1} 的沥青指纹区域峰面积和作为基准,计算循环前、后胶浆的羰基指数($I_{\text{C=O}}$)、丁二烯指数(I_{B})、亚砷基指数($I_{\text{S=O}}$)。 $I_{\text{C=O}}$ 、 I_{B} 、 $I_{\text{S=O}}$ 的计算式分别为

$$I_{\text{C=O}} = A_{1\,700} / \sum A_{2\,000 \sim 600}, \tag{8}$$

$$I_{\text{B}} = A_{966} / \sum A_{2\,000 \sim 600}, \tag{9}$$

$$I_{\text{S=O}} = A_{1\,031} / \sum A_{2\,000 \sim 600}. \tag{10}$$

式(8)~(10)中: $A_{2\,000 \sim 600}$ 为选取波长范围 2 000~600 cm^{-1} 的沥青指纹区域峰面积和,即

$$A_{2\,000 \sim 600} = A_{1\,600} + A_{1\,456} + A_{1\,376} + A_{1\,162} + A_{1\,031} + A_{966} + A_{861} + A_{810} + A_{744} + A_{722}.$$

对温湿耦合循环前、后的 SBS 改性沥青胶浆的化学成分变化进行定量分析^[23-24],结果如表 5 所示。

表 5 循环前、后 SBS 改性沥青胶浆 FITR 图谱特征官能团指数计算结果

Tab. 5 Calculation results of characteristic functional group index in FITR spectra of SBS modified asphalt mastics before and after cycling

特征官能团指数	未循环	温度区间			
		-20~60 ℃	-20~40 ℃	0~60 ℃	0~40 ℃
I_B	0.006 86	0.002 82	0.004 35	0.003 85	0.005 48
$I_{S=O}$	0.016 32	0.031 71	0.024 95	0.024 54	0.024 99

结合图 9 和表 5 可知:温湿耦合循环前、后的 SBS 改性沥青胶浆在波长 1 700 cm⁻¹处均没有发现羰基吸收峰,可能是因为试验设置的温湿耦合变化较温和,羰基生成数量较少,未被检测到。在不同温度循环区间下,SBS 改性沥青胶浆的 $I_{S=O}$ 具有相同的变化趋势,随着温湿耦合循环次数的增加, $I_{S=O}$ 值不断增大,与未循环的沥青胶浆相比,-20~60 ℃,-20~40 ℃,0~60 ℃,0~40 ℃ 区间内循环 12 次后的沥青胶浆的 $I_{S=O}$ 分别增大了 94.30%,52.88%,50.37%,53.12%,温湿耦合循环作用后 SBS 改性沥青胶浆的亚砷基含量增加。温湿耦合循环次数和温度差的增加会不同程度地加剧 SBS 改性沥青胶浆的老化,这与前期常规试验、布氏旋转黏度试验及 DENT 试验的结果相吻合。这是因为沥青胶浆在高温和有氧的作用下,形成氢过氧化物,其作为氧化剂,将沥青分子中的硫醚、硫醇等含硫官能团氧化成亚砷基官能团。

而随着温湿耦合循环次数的增加, I_B 值呈下降趋势,-20~60 ℃ 区间内循环的沥青胶浆的 I_B 值降幅最大,达到 58.89%。表明 SBS 改性剂在温湿循环作用下发生了降解,水分子与 SBS 聚合物分子相互作用,加速了 SBS 改性剂中聚丁二烯链段中 C=C 双键断裂,破坏了 SBS 形成的网络状结构。

3 结论

1) 温湿耦合循环作用下,随着循环次数的增加,SBS 改性沥青胶浆的物理指标发生变化,主要变现为抗剪强度增加,延度降低,软化点变化不明显,黏度下降,沥青黏流活化能增加。说明 SBS 改性沥青胶浆在温湿耦合循环环境下,其宏观性能指标发生劣化,出现流动性下降、硬化变脆等老化现象。

2) 当温湿耦合循环次数相同时,循环区间温度差越大的 SBS 改性沥青胶浆老化现象越明显;在温差相同的情况下,在更高的温度区间内循环的 SBS 改性沥青胶浆的高温抗剪强度和延度变化更显著。因此,在实际环境中应该着重关注沥青路面在新疆、西藏等大温差地区的服役过程中的状态。

3) DENT 试验结果表明,随着温湿耦合循环次数的增加,SBS 改性沥青胶浆失效变形,CTOD 值降低,峰值荷载增加,说明温湿耦合循环作用削弱了 SBS 改性沥青胶浆的中温抗断裂性能。

4) FITR 测试结果表明,SBS 改性沥青胶浆在不同温度区间的温湿耦合循环作用下,1 700 cm⁻¹ 处没有出现羰基吸收峰,可能是由于试验环境对于羰基的生成来说较为温和;表征 SBS 改性沥青胶浆老化的亚砷基指数上升,丁二烯指数下降,且循环区间的温度差越大,变化越明显。温湿耦合循环次数和温度差的增加会不同程度地加剧 SBS 改性沥青胶浆的老化,FITR 测试结果与宏观性能结果相符。

参考文献:

[1] CHEN Mingyuan,GENG Jiuguang,CHEN Huaxin,*et al.* Effect of water aging on the fatigue performance of asphalt binders using the linear amplitude sweep[J]. Construction and Building Materials,2021,304:124679. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124679.

[2] GONG Yan,XU Jian,CHANG Rong,*et al.* Effect of water diffusion and thermal coupling condition on SBS modified asphalts' surface micro properties[J]. Construction and Building Materials,2020,273(s1):121758. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121758.

[3] 田煜,李廷,彭菲,等. SBS 改性沥青老化行为研究[J]. 化工新型材料,2017,45(5):37-39.

[4] 李海军,黄晓明,王宏畅. 道路沥青在使用过程中的水老化[J]. 石油学报(石油加工),2005,21(4):75-78. DOI:10.3969/j.issn.1001-8719.2005.04.012.

[5] CHEN Mingyuan,GENG Jiuguang,CHEN Huaxin,*et al.* Effect of water aging on the fatigue performance of asphalt

binders using the linear amplitude sweep[J]. Construction and Building Materials,2021,304:124679. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124679.

[6] 念腾飞,李萍,林梅.冻融循环下沥青特征官能团含量与流变参数灰熵分析及微观形貌[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(4):1045-1054. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20170802.

[7] 张勤玲,黄志义.干湿-冻融循环作用下沥青水老化的微观特性[J]. 建筑材料学报,2020,23(4):920-926. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2020.04.026.

[8] 吴建涛,马鑫源,陈俊,等.水分-老化耦合作用对沥青性能的影响[J]. 公路,2021,66(11):275-284.

[9] 王龙,马海龙,王天伟,等.石灰岩矿粉性质对沥青胶浆性能的影响因素及其技术标准[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(9):7-16. DOI:10.11918/202112048.

[10] CHENG Yongchun,WANG Haitao,WANG Wensheng,*et al.* Rheological evolution mechanisms of asphalt binder and mastic under freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials,2023,372:130780. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130780.

[11] 郭庆林,李懿明,胡俊兴,等.温湿度环境对沥青混合料中低温力学性能的影响[J]. 公路交通科技,2022,39(1):10-16. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2022.01.002.

[12] 冯新军,陈旺,李旺.硅烷偶联剂改性煤矸石粉沥青胶浆路用性能及改性机理[J]. 建筑材料学报,2020,23(5):1121-1129. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2020.05.018.

[13] 冯新军,解明卫,陈旺,等.活化煤矸石粉 SBS 改性沥青胶浆路用性能和改性机理[J]. 建筑材料学报,2020,23(6):1440-1449. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2020.06.024.

[14] 张争奇,崔文社,马良,等. SBS 改性沥青软化点试验特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2007,27(6):6-10. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.06.002.

[15] 李宁利,赵新坡,孙吉书,等.基于表观黏度的橡胶沥青老化动力学[J]. 合成橡胶工业,2016,39(3):229-233. DOI:10.3969/j.issn.1000-1255.2016.03.013.

[16] CHEN Yu,ZHENG Wenhua,XU Shibing,*et al.* Characteristics of mineral fillers and their effects on mastic fracture resistance at intermediate temperature 20 ℃[J]. Construction and Building Materials,2022,323:126568. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126568.

[17] 罗浩原,欧阳铨霏,冷慧康,等.基于临界裂纹尖端位移的沥青胶结料抗疲劳性能评价[J]. 建筑材料学报,2020,23(4):969-977. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2020.04.033.

[18] GAO Meiyi,ZHANG Haitao,YANG Hongsheng,*et al.* Research on surface morphology characteristics and micro-damage mechanism of asphalt mastic based on charge transfer principle[J]. Construction and Building Materials,2023,391:131686. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131686.

[19] NIAN Tengfei,LI Ping,WEI Xiyang,*et al.* The effect of freeze-thaw cycles on durability properties of SBS-modified bitumen[J]. Construction and Building Materials,2018,187:77-88. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.171.

[20] 崔亚楠,郭立典,陈东升. SBS 改性沥青的复合老化机理[J]. 建筑材料学报,2020,23(5):1183-1191. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2020.05.026.

[21] 张恒龙,徐国庆,朱崇政,等.长期老化对基质沥青与 SBS 改性沥青化学组成、形貌及流变性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019,39(2):10-18. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.002.

[22] 王永宁,李波,任小遇,等.不同老化时间的 SBS 改性沥青再生红外光谱分析[J]. 材料科学与工程学报,2020,38(4):643-647. DOI:10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2020.04.023.

[23] 林梅,李萍,念腾飞,等.再生沥青微观结构对流变性能的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(6):121-126. DOI:10.13245/j.hust.190622.

[24] 李萍,慕博博,念腾飞,等.红外光谱(FTIR)和荧光显微镜(FM)表征再生剂在老化沥青中的扩散行为[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(5):767-773,784. DOI:10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2022.05.007.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)