

现场施工条件下老化温度对灌缝胶性能的影响

刘汉超,滕新华,张菁燕,张凯华,林辉

(常州市建筑科学研究院集团股份有限公司,江苏 常州 213000)

摘要:为研究短期老化温度对灌缝胶性能的影响,制备了灌缝胶,并模拟现场施工条件,对180~220℃下短期老化前后的灌缝胶性能进行测试,研究灌缝胶的黏弹性、物化特性与微观结构,对其性能变化的内在机制进行讨论。结果表明:老化后灌缝胶的锥入度、流动值降低,软化点、弹性恢复率升高,高温(>180℃)短时间和低温(160℃)长时间的老化均会造成较为明显的性能改变,而低温拉伸性能则并非随温度上升而单调降低。物化特性测试与微观结构表征结果显示:更高温度下老化的灌缝胶极性基团显著增加,组分玻璃化转变温度上升,储能模量升高;更高温度下制样的灌缝胶黏度更低,易渗入孔隙与黏结面形成机械锚固,同时,老化造成的极性升高会使其与黏结面产生更高的化学胶结力,进而提升黏结性能。然而,随着老化的不断加剧,灌缝胶黏度上升,黏结性能也会随之降低。因此,灌缝胶的综合性能并非随短期老化温度的上升而线性降低,而是其自身黏弹性及黏结性综合作用的结果。

关键词:道路材料;灌缝胶;短期老化;黏弹性变化;物化特性分析;微观结构表征;黏度演变;温度效应

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

Effect of Aging Temperature on Properties of Sealant under Field Construction Conditions

LIU Hanchao, TENG Xinhua, ZHANG Jingyan, ZHANG Kaihua, LIN Hui

(Changzhou Architectural Research Institute Group Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China)

Abstract: In order to study the influence of short-term aging temperature on the properties of sealant, a sealant was prepared, and field construction conditions were simulated. The properties of the sealant before and after short-term aging at 180–220 °C were tested. The viscoelastic properties, physicochemical properties, and microstructures of the sealant were studied, and the mechanism of property changes was discussed. The results show that the cone penetration and flow value of the aged sealant decrease, while the softening point and elastic recovery rate increase. Aging at high temperature (>180 °C) for a short time and low temperature (160 °C) for a long time will cause obvious property changes. The tensile properties under low temperatures do not decrease monotonically as the temperature increases. The results of the physicochemical property test and microstructure characterization show that the polar groups of the aged sealant at higher temperatures increase significantly, and the glass-transition temperature of the components increases. The storage modulus increases, while the sealant prepared at a higher temperature has a lower viscosity, which makes it much easier to penetrate into the pores at the bonding surface to form mechanical anchorage. Meanwhile, the increase in polarity due to aging generates a higher chemical interaction force with the bonding surface, thus improving the bonding performance. With ongoing aging, the viscosity of the sealant increases, and the bonding performance decreases. Therefore, the comprehensive properties of the sealant do not linearly decrease with the increase in short-term aging temperature but are affected by the viscoelasticity and bonding performance.

Keywords: road materials; sealant; short-term aging; viscoelasticity variation; physicochemical property analysis; microstructure characterization; viscosity evolution; temperature effect

收稿日期:2023-03-10(修改稿)

基金项目:江苏省基础研究计划项目(编号:BK20200181)

作者简介:刘汉超,男,博士.E-mail:1198400517@qq.com

0 引言

裂缝是沥青路面预防性养护中最为常见的病害之一,而灌缝胶则是处治沥青路面裂缝病害的常用材料。通常,灌缝胶由基质沥青、聚合物弹性体等组成构成,溶胀于沥青中的弹性体赋予灌缝胶优良的变形能力,使其可以适应因温差变化而造成的裂缝宽度变化,进而起到密封填充的作用^[1]。然而,与绝大多数路用材料一样,在使用过程中,灌缝胶会因老化而出现性能衰减。室内评价优良的灌缝胶在现场使用后,常常难以达到预期效果,甚至在短时间内即发生失效。灌缝胶的失效会造成雨水下渗,进而损坏路基,缩短道路寿命,造成预防性养护失效,使道路提前进入“大修”阶段。因此,灌缝胶的老化问题应引起从业者的重视。

与其他沥青类材料一样,灌缝胶的老化分为长期老化和短期老化。灌缝胶在长期老化过程中会经历紫外、热氧老化及雨水侵蚀等复杂条件,已有学者对其失效规律进行了相关研究^[2-5]。除材料本身性能外,长期老化中灌缝胶的使用效果受外界环境影响很大,可控性较低。灌缝胶的短期老化是指在施工过程中灌缝胶经历的短期高温热氧老化。灌缝胶的短期老化主要取决于其施工工艺,因此,短期老化对灌缝胶性能的不利影响可以通过优化工艺来改善。

加热温度是影响灌缝胶短期老化的重要因素,也是灌缝胶施工工艺中重要的参数。目前,已有学者对改性沥青的短期老化行为和老化温度间的关系进行了研究。结果表明:与基质沥青相比,改性沥青在不同短期老化条件下具有更高的稳定性,而根据老化温度的不同,改性沥青存在黏度增大、硬度增加、分子量降低、组分分解等不同现象,且不同体系的改性沥青短期老化后性能有显著的温度依赖性,但具体的老化行为规律则根据材料、测试方法的不同表现出差异^[6-10]。例如,王珺卓等^[7]采用旋转薄膜烘箱老化试验法发现,当老化温度为 150℃时,成品 SBS 改性沥青未表现出明显的老化,而老化温度为 170℃和 180℃时,不同 SBS 含量的沥青样品的复数模量老化指数随老化时长的延长而发生不同程度的增加;王民等^[10]采用红外光谱法和凝胶渗透色谱法对现场拌和的混合料取样进行老化研究,发现 SBS 改性沥青在 250℃的老化温度下,与 163℃老化相比

羰基峰提高了 17 倍,峰面积提高了 7 倍。尽管灌缝胶也属于改性沥青的一种,但其自身性质、短期老化形式与性能表现形式与其他改性沥青相比却有着很大不同:① 灌缝胶中弹性体掺量高于一般改性沥青。高掺量的弹性体会造成体系黏度显著升高,其施工灌注温度显著高于普通改性沥青的施工温度;② 施工时,灌缝胶储存在储罐中进行均质搅拌,其状态不同于改性沥青胶结料的薄膜态;③ 现场使用时,灌缝胶会在储罐中长时间加热;④ 灌缝胶使用效果的实现是基于黏结性、模量、弹性、松弛等性能的综合作用,各性能变化的机制以及对综合性能的影响更为复杂。然而,目前灌缝胶施工温度并没有统一标准,而关于灌缝胶不同温度下施工时,老化前后各性能变化、综合性能表现及内在的机制分析也鲜有报道。因此,本文以 SBS、橡胶颗粒为改性剂制备改性沥青灌缝胶,并模拟现场老化条件,研究不同施工老化温度下的热氧老化对其性能和结构的影响,为灌缝胶施工工艺的优化提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

SK-70#石油沥青;SBS 弹性体,SBS-1301;丁苯橡胶粉,80 目;橡胶油。

1.2 试验设备

高速剪切机 GS-1;油浴锅 HH-S;电动搅拌器 QHJ756B;动态剪切流变仪 kinexus DSR;差示量热扫描仪(DSC),Q-2000;傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,Thermo Scientific Nicolet 6700;高低温万能力学试验机 WDW-GD2。

1.3 试验方法

(1) 灌缝胶的制备

参考文献[11]的技术手段制备灌缝胶,具体步骤如下:先将 100 份基质沥青加热到 155℃,加入 5 份 SBS 溶胀 30 min;再将温度升至 175℃高速剪切 30 min;然后,加入 35 份橡胶粉,低速搅拌 90 min。最后,自然冷却至 140℃,加入 2 份橡胶油,在冷却过程中保持搅拌直至黏稠,即得灌缝胶。灌缝胶性能参数见表 1。参照《路面加热型密封胶》(JT/T 740—2015)性能指标,制得的灌缝胶属于普通型灌缝胶。

(2) 短期老化试验

模拟施工时的加热方式,将 150 g 样品置于烧杯

表1 灌缝胶性能参数

Table 1 Property parameters of sealant

锥入度/ (0.1 mm)	流动值/ mm	软化点/ ℃	弹性恢 复率/%	低温拉伸
75±2	3±0.3	84±2	55±2	-10℃, 50%, 3次循环通过

中,在160℃、180℃、200℃、220℃的油浴加热温度下加以搅拌,烧杯口覆盖锡箔纸避免组分挥发。老化前的灌缝胶样品编号为S,在不同温度下老化的样品标记为“S-老化温度”,例如在200℃下老化的样品标记为“S-200”。更具体地,不同温度下老化不同时间的样品则标记为“S-老化温度-老化时间”,例如,在200℃下老化3 h的样品编号为“S-200-3”,在200℃下制样而未老化的样品编号为“S-200-0”。

(3) 基本性能测试

将老化前后的灌缝胶进行制样,测试其软化点、锥入度、弹性恢复率、流动值及低温拉伸性能。在测试中,软化点、锥入度、弹性恢复率、流动值和低温拉伸参照《路面加热型密封胶》(JT/T 740—2015)中规定方法进行测试。除规范中规定的循环拉伸试验外,另于-10℃下进行拉伸破坏试验(拉伸破坏试验的拉伸速率为1.5 mm/min),以便更直观地对比分析材料破坏形式及性能^[12]。为模拟现场施工条件,低温拉伸试件制样温度与老化温度一致。例如,200℃时老化前后样品的制样温度均为200℃,180℃时老化前后样品的制样温度均为180℃。

(4) 温度扫描试验

采用流变仪进行温度扫描试验,使用25 mm平板,间隙设置为1 mm,剪切应变设置为1%,频率为10 rad/s,初始试验温度为100℃,以-2℃/min的降温速度降至-10℃。

(5) 应力松弛试验

采用流变仪进行应力松弛试验,使用25 mm平板,间隙设置为1 mm,应变为0.5%。

(6) 差示扫描量热(DSC)测试

升温速率为10℃/min,氮气氛围。

(7) FTIR红外光谱测试

采用全反射模式进行测试。

(8) 黏结拉伸试验

参考文献[13]的制样方法,先将混合料试块(40 mm×45 mm)与钢拉拔头用强力AB胶黏结,在

拉拔头上安装螺杆,制作拉拔试件。再将加热的灌缝胶倒于其中一个混合料试块表面,用另一混合料试块表面迅速按压至1 mm间隙,使用隔板控制间隙距离,并控制灌缝胶黏结面面积为40 mm×40 mm。然后将溢出的多余灌缝胶刮洗干净,得到试验样品。最后将样品降温至-10℃后平衡温度5 h之后,在-10℃环境箱中使用万能力学试验机进行拉伸试验。

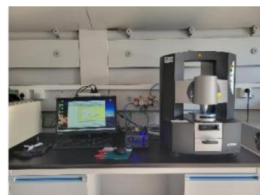
(9) 黏度测试

采用流变仪进行黏度测试,使用25 mm平板,间隙设置为1 mm,剪切速率设置为10 s⁻¹。各样品测试温度与对应的老化温度一致。

试验及测试方法中,部分试验装置及测试设备见图1。



(a) 老化试验



(b) 流变测试



(c) 高低温万能力学试验机



(d) 红外表征



(e) DSC测试

图1 试验装置及设备

Figure 1 Test equipment

2 结果与讨论

2.1 短期老化温度对灌缝胶性能的影响

不同温度下老化后灌缝胶的性能如图2所示。

由图2可知:

(1) 随着灌缝胶老化时间的增长,软化点和弹性恢复率逐渐升高,而锥入度和流动值则逐渐降低。160℃时短时间的老化对灌缝胶性能的影响不明显,当老化时间达到9 h以上时,性能才发生较为明显的变化。然而,180℃以上的老化温度下,短时间的老化就会对灌缝胶性能产生显著影响。

(2) 在160℃、180℃、200℃、220℃下老化3 h,灌缝胶软化点分别增长了0、1.2%、3.6%和6.0%;另

外,更高温度下长时间的老化会使灌缝胶性能产生极大变化:220℃下老化12h后,灌缝胶软化点和弹

性恢复率比老化前分别提升了27.4%和60%,而锥入度则下降了64%,同时,流动值降低至0。

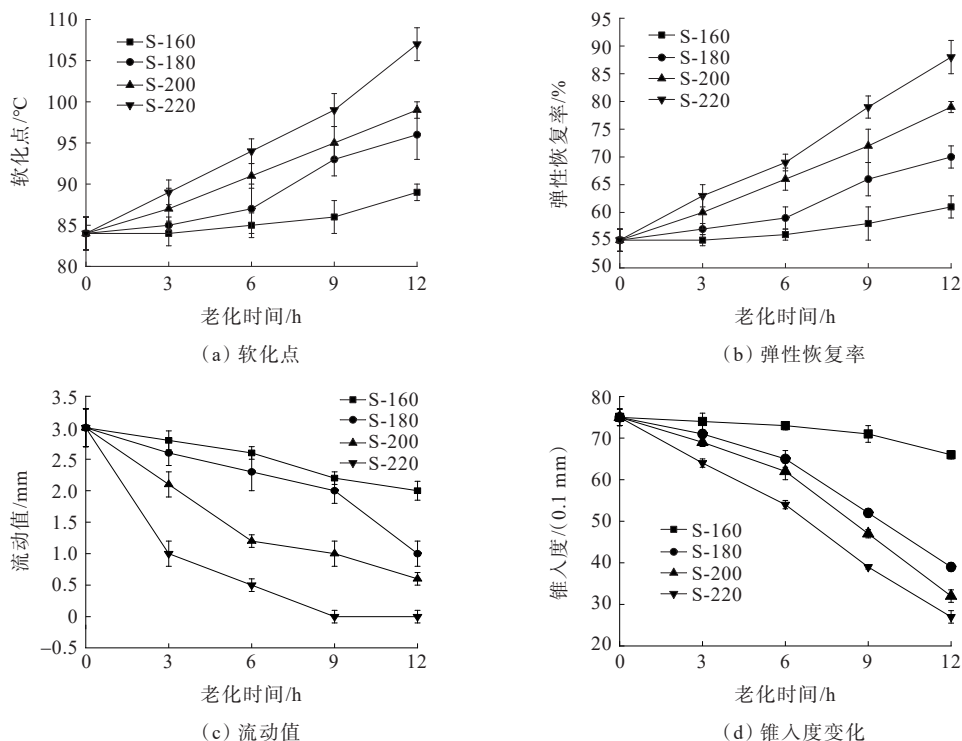


图2 不同温度下老化不同时间后灌缝胶性能

Figure 2 Properties of sealant after aging at different temperatures and time

老化前后灌缝胶的低温拉伸结果如图3所示。图3(a)~(c)展示了灌缝胶老化前、老化6h、老化12h后的低温拉伸曲线,图3(d)则汇总了不同温度及老化时间下灌缝胶破坏前的最大拉伸位移。由图3可知:老化前,制样温度越高,灌缝胶破坏时达到的伸长率越高,且最大试验力也越高。老化后,随着老化时间的增长,伸长率逐渐降低,拉伸曲线初段的斜率逐渐增加。其中,160℃制样、老化的灌缝胶直到老化12h其伸长率才出现一定的降低。180℃制样、老化的灌缝胶在老化9h以后出现伸长率的显著衰减,而200℃、220℃下制样、老化的灌缝胶则在加热3h后即出现了伸长率的显著降低。从图3(d)可以看出:老化前、老化3h,老化6~9h之间以及老化12h,破坏位移最大的样品分别为220℃、200℃、180℃、160℃下制样、老化的灌缝胶。值得注意的是,所有样品的破坏形式均为黏附性破坏。由此可见,灌缝胶的低温拉伸破坏位移并非随老化时间、老化温度的上升而单调降低。

2.2 黏弹性分析

由前文可以看出:短期老化后的灌缝胶高温性

能得到提升,而低温拉伸性能的变化规律则较为复杂。由于灌缝胶的性能表现是其黏弹性的反映,故对灌缝胶进行流变测试以研究其黏弹性变化。温度扫描测试结果如图4所示。

由图4可知:随着温度由100℃降至-10℃,灌缝胶体系中的沥青组分分子运动能力降低,溶胀的聚合物分子链及链段运动能力下降,所有灌缝胶的储能模量(G')均呈现出增加趋势。然而,不同老化温度下,老化后灌缝胶的模量增长趋势也呈现出差异。选取95℃和-5℃时各样品灌缝胶的模量进行对比[图4(e)、(f)]。160℃时,灌缝胶的储能模量在老化9h后出现较为明显的增长,180℃、200℃、220℃下,灌缝胶则会在短时间的老化后即出现明显的增加。因此,高温短时间和低温长时间的老化均会造成灌缝胶模量升高,而高温下长时间的老化则会造成灌缝胶模量成倍增加。结合性能测试结果,老化后灌缝胶储能模量的提升会使材料抵抗形变的能力增加,尤其是在200℃以上的高温下老化后,灌缝胶的储能模量出现大幅提升,进而在性能上表现为软化点和弹性恢复率显著升高,而锥入度和流动值降低,表现出显著的“硬化”特征。

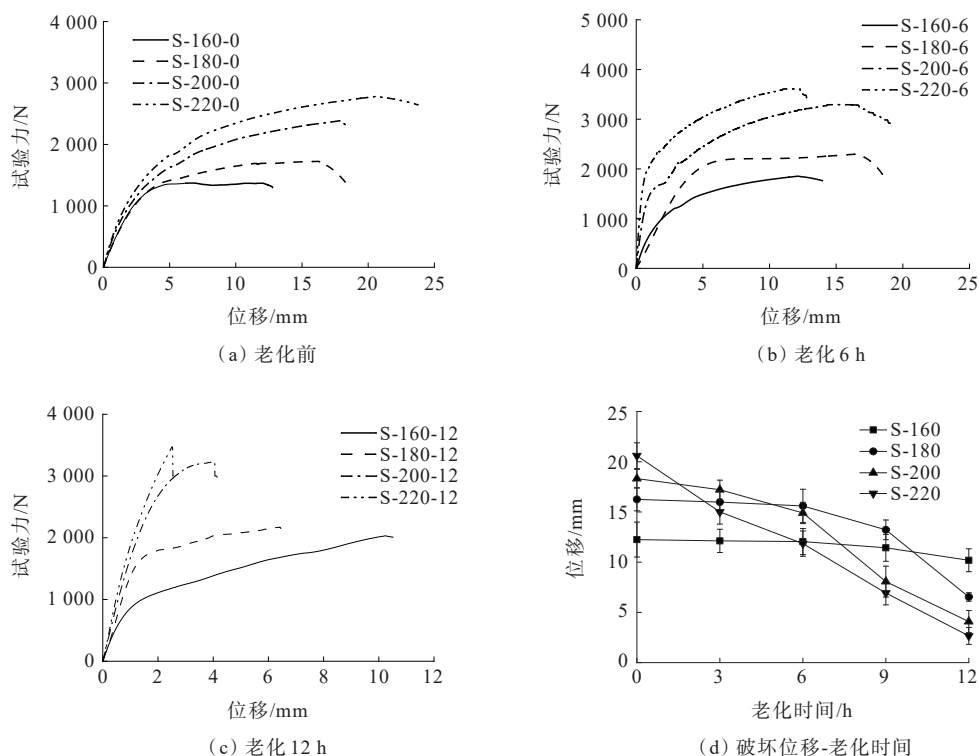


图3 不同温度下不同老化时长的灌缝胶拉伸性能

Figure 3 Tensile properties of sealant after aging at different temperatures and time

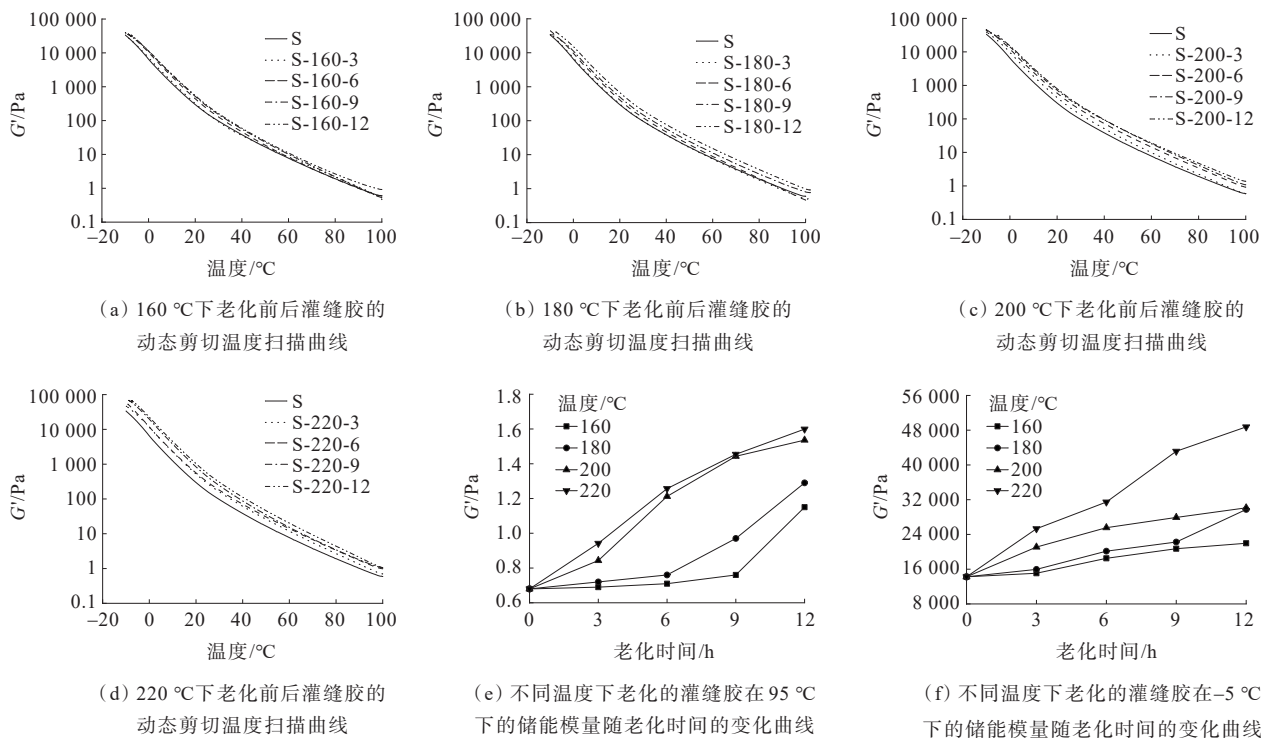
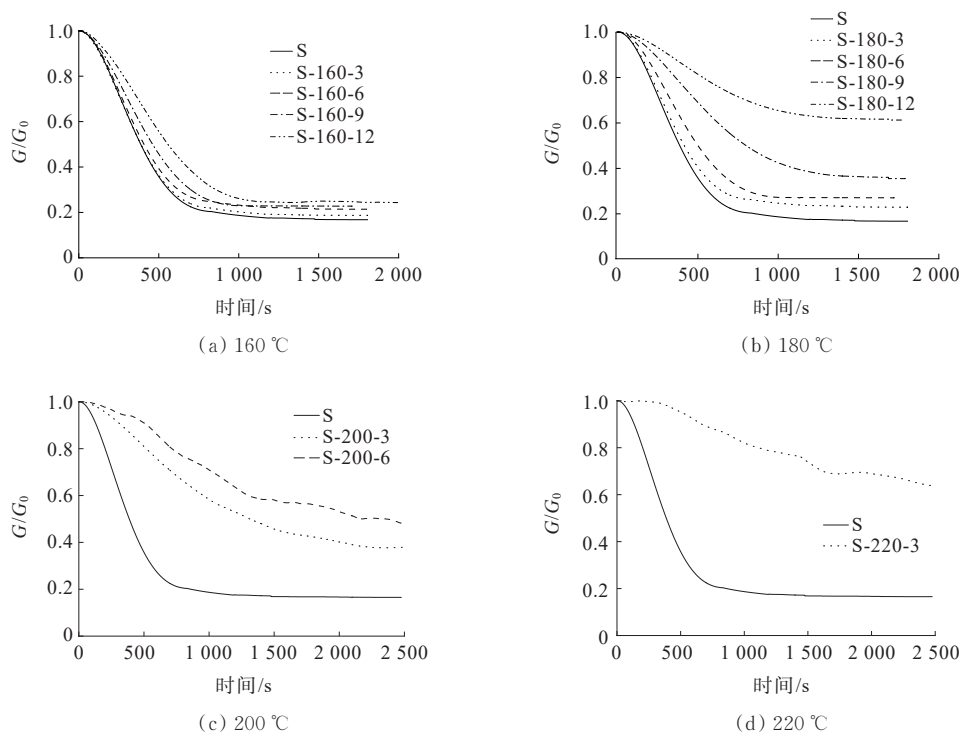


图4 温度扫描测试结果

Figure 4 Temperature scanning test results

为进一步探究灌缝胶老化后低温性能的变化规律,对样品进行了-8 °C下的应力松弛测试,将实时

应力与初始应力的比值(G/G_0)随松弛时间变化作图,结果如图5所示。

图5 不同老化时间灌缝胶在 -8°C 下的松弛曲线Figure 5 Relaxation curves of sealant after aging at different time at -8°C

由图5可知:随着老化温度的升高和老化时间的增长,灌缝胶的松弛速度变慢,且残余应力升高。160 $^{\circ}\text{C}$ 下老化的灌缝胶的松弛速度随老化时间的增加而缓慢降低,残余应力逐渐升高;180 $^{\circ}\text{C}$ 下老化的样品在老化到9 h后,松弛速度显著降低,灌缝胶的残余应力快速增加,达到初始应力的35.3%,弹性特征显著增强;在200 $^{\circ}\text{C}$ 以上老化的部分样品由于模量升高,弹性增强,测试时出现滑动,进而导致松弛曲线出现不规则漂移。尽管如此,仍可以看出:220 $^{\circ}\text{C}$ 下老化3 h,灌缝胶残余应力即达到了67.1%。200 $^{\circ}\text{C}$ 下老化9 h的样品以及在220 $^{\circ}\text{C}$ 下老化6 h以上的样品则由于模量大幅升高而难以达到目标应变,难以进行松弛测试。松弛行为减弱的本质在于老化后灌缝胶分子运动能力降低,分子间难以发生解缠和解离,在拉伸时表现为弹性、黏性特征显著减弱。这一点也体现在低温拉伸性能上:随着老化温度的上升和老化时间的延长,低温拉伸曲线不再出现屈服、细颈阶段的平台区,而是在达到最大试验力后即发生黏附性破坏。

2.3 黏结性能分析

考虑到灌缝胶的低温拉伸性能是其与基面黏结性能以及自身力学性能综合作用的结果,因此,对灌

缝胶老化前后的黏结性进行评价。不同温度下老化后灌缝胶与混合料的黏结试块与黏结拉伸试验结果如图6所示。为使试验尽量接近现场施工条件,灌缝胶各样品的制样温度与各自的老化温度一致。由图6可以看出:不同温度、老化时间下,灌缝胶的黏结性能表现出不同的变化规律。160 $^{\circ}\text{C}$ 时制样、老化的灌缝胶,其黏结强度随老化时间的增长而降低;180 $^{\circ}\text{C}$ 时制样、老化的灌缝胶,其黏结强度随老化时间的增长而增加;而200 $^{\circ}\text{C}$ 、220 $^{\circ}\text{C}$ 时制样、老化的灌缝胶,其黏结强度随老化时间的增长则出现了先增加后降低的趋势。然而,不论老化前后,更高温度下制样的灌缝胶表现出更优异的黏结性能。

2.4 物化特性与微观结构分析

2.4.1 FTIR红外表征

灌缝胶性能变化的本质在于其分子结构及分子聚集态形式的变化。为明确灌缝胶老化前后性能变化的机制,进一步对灌缝胶老化前后的微观结构进行分析。由于在160 $^{\circ}\text{C}$ 和200 $^{\circ}\text{C}$ 时老化的灌缝胶其黏弹性、低温拉伸性能以及黏结性能随老化时间、温度延长均呈现出明显差异,因此,选择160 $^{\circ}\text{C}$ 和200 $^{\circ}\text{C}$ 时老化不同时间的灌缝胶进行红外表征,结果见图7,各吸收峰的归属见表2。可以看出:160 $^{\circ}\text{C}$ 时老化的

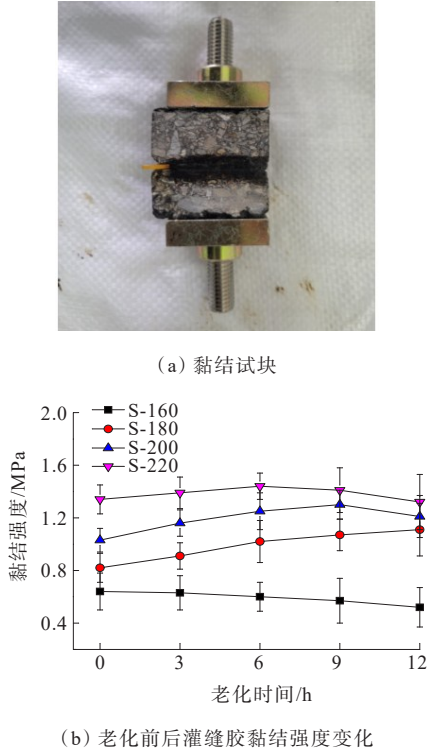


图 6 黏结拉伸试验结果

Figure 6 Bonding tensile test results

灌缝胶红外谱图中各吸收峰的强度变化不明显,老化 9 h 后,羰基($1\,700\sim 1\,750\text{ cm}^{-1}$)、亚砷($1\,020\sim 1\,030\text{ cm}^{-1}$)吸收峰出现一定增强。而在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时老化 3 h 后,样品中羰基、亚砷吸收峰强度即出现了显著增加,表明更高温度的老化会造成极性基团含量的快速增长。值得注意的是,在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时老化 9 h 后, $1\,200\sim 1\,250\text{ cm}^{-1}$ 处出现了新的吸收峰,判断为羧基伸缩振动吸收峰,而在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时老化的灌缝胶并未出现该处的吸收峰。在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,亚甲基自由基和羟基自由基稳定性相对较高,因而能保留更多的羧基基团(图 8);当温度升高后,自由基稳定性降低,而羟基自由基的高活性会导致其迅速进攻其他不饱和键而造成快速的消耗,进而造成图 8 中反应(2)变为主要反应路径,羰基变为主要产物^[14]。

2.4.2 DSC 测试分析

对 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下老化前后灌缝胶进行 DSC 测试以研究其分子聚集态变化,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出:灌缝胶中的复杂组分使其具有多个玻璃化转变温度(T_g)。基质沥青中饱和分和芳香分的 T_g 处于 $-30\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$,而沥青质的 T_g 处于 $45\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$,胶质则没有明显的相转变^[15]。灌缝胶中 SBS 弹性体的聚丁二烯相的 T_g 为 $-70\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,

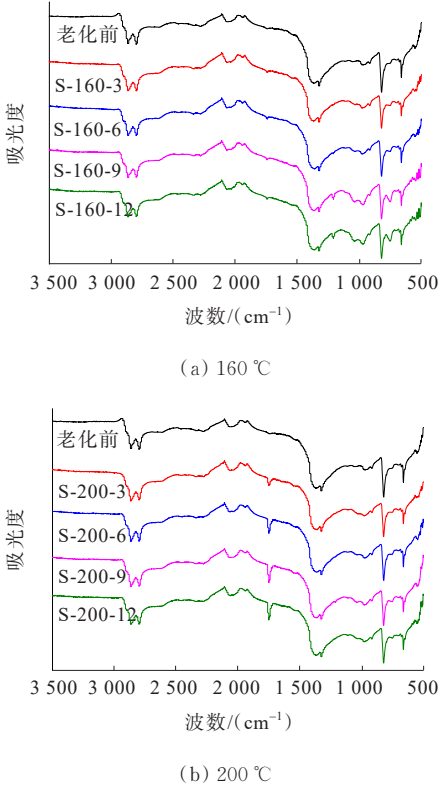


图 7 老化前后灌缝胶红外谱图

Figure 7 Infrared spectrum of sealant before and after aging

表 2 红外吸收峰对应官能团

Table 2 Infrared absorption peaks corresponding to functional groups

吸收峰波数/(cm^{-1})	官能团
2 700~3 000	—C—H 伸缩振动
1 700~1 750	—C=O 伸缩振动
1 500~1 690	—C=C—伸缩振动
1 300~1 500	芳环的骨架伸缩振动
1 200~1 250	—COOH 伸缩振动
1 020~1 030	—S=O 伸缩振动

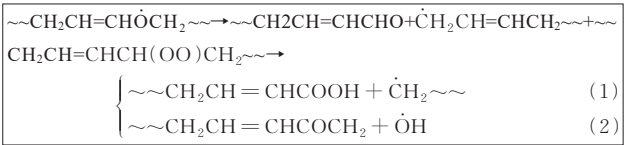
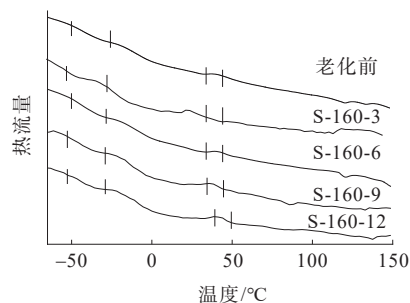


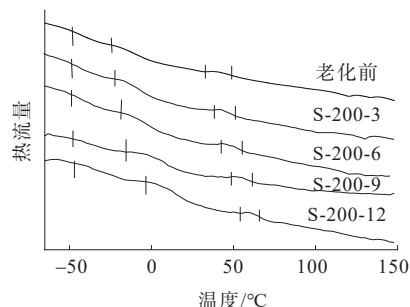
图 8 不饱和组分自由基演变反应式

Figure 8 Free radical evolution equation of unsaturated components

而丁苯橡胶颗粒的 T_g 则为 $-50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[16]。由此可以推断,老化前的灌缝胶中,在 $-50\sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间的玻璃化转变区域为弹性体组分与基质沥青中饱和分、芳香分和部分沥青质多组分混合溶胀后的相转变区,而 $30\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的吸热区则是为以沥青质为



(a) 160 °C



(b) 200 °C

图9 老化前后灌缝胶的DSC曲线

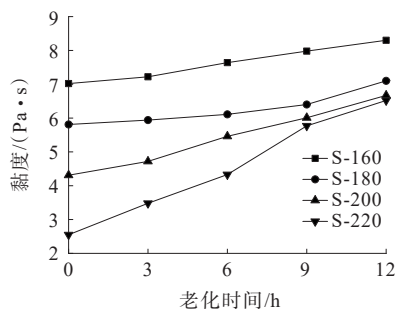
Figure 9 DSC curves of sealant before and after aging

主的组分的相转变区。对比老化前后灌缝胶的DSC曲线,160 °C下老化后,灌缝胶溶胀组分的 T_g 没有明显变化,而沥青质组分在老化12 h后相转变温度出现升高。在200 °C时老化3 h后,灌缝胶中溶胀组分和沥青质组分的 T_g 均出现升高,且随着老化的进行, T_g 显著上升,溶胀组分相转变区所在温度区间明显变宽。这一结果说明,160 °C的老化温度下,只有长时间的老化才会造成灌缝胶组分 T_g 出现较为明显的上升,且成因是沥青质组分相转变温度的升高,而混合溶胀的聚合物网络热力学性质变化不大。然而,在高的老化温度下,灌缝胶溶胀组分非均匀度升高,短时间内灌缝胶 T_g 迅速上升,其原因可能是组分分子量增加,或分子间作用增加导致分子运动能力下降,进而使得材料模量出现显著升高,变形能力减弱。

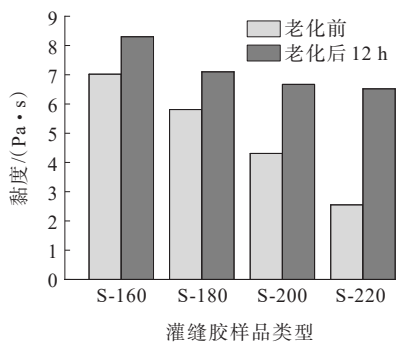
2.4.3 黏度测试

灌缝胶与混合料的黏结主要通过机械锚固力以及分子间范德华力或极性作用力,而灌缝胶是否能渗入混合料孔隙则是决定机械锚固力高低的重要因素,因此,对灌缝胶老化前后的黏度进行测试。考虑到施工工况,综合施工温度与短期老化对灌缝胶黏度的影响,特将各样品的测试温度调至与各自的老化温度一致,进行黏度测试,结果如图10(a)所示。

在各温度下,灌缝胶的黏度随老化时间的增长均呈现出上升的趋势。在160 °C下老化的灌缝胶黏度随老化时间的增长出现缓慢上升,而180 °C以上的温度下,灌缝胶黏度在短时间出现显著的增长。如图10(b)所示,在160 °C和220 °C时老化12 h后,灌缝胶黏度与老化前相比分别增长了17.1%和157.7%。老化前,更高的温度会增加灌缝胶内分子运动能力,黏度随温度上升而降低;在老化过程中,虽然在更高温度下加热的灌缝胶黏度增长更快,但其数值始终低于相同加热时间内低温下老化的灌缝胶黏度。这一结果说明,更高温度下加热施工的灌缝胶,在12 h的老化时间内,都具有更低的黏度,有利于灌缝胶渗入混合料孔隙,增加机械锚固力,进而产生更高的黏结力。



(a) 黏度-老化时间



(b) 黏度对比

图10 黏度测试结果

Figure 10 Viscosity test results

2.5 老化后性能变化机制讨论

灌缝胶老化后的性能表现是其自身黏弹性与混合料黏结性能综合作用的结果,而其性能变化的本质在于分子结构及溶胀体系组分的变化。FTIR和DSC结果显示:① 更高温度下老化的灌缝胶分子中含有更多的极性基团(羰基、亚砷等),导致聚合物网络内聚能密度增加。同时,高温下老化后,灌缝胶 T_g 显著升高,分子运动变得困难。在以上因素的综合

作用下,灌缝胶储能模量升高,松弛行为减弱,在性能上表现为弹性特征增强。在更高的老化温度下,短时间的老化就会造成灌缝胶极性基团显著增加和 T_g 的升高;而在160℃下,灌缝胶的微观结构在长时间老化后才出现较为明显的变化,且 T_g 增加不明显,因此,9 h以上的老化时长才会导致其性能发生一定程度的改变;②灌缝胶的黏结性能受到其黏度和极性的影响。黏度测试表明:更高的温度下灌缝胶黏度更低,有利于增加界面间锚固作用。同时,更高温度下老化后灌缝胶极性基团的增加,有助于灌缝胶与混合料壁面形成极性作用。然而,更高的温度会造成灌缝胶短时间内黏度迅速上升,不利于黏结。在各因素作用下,不同温度下老化、施工的灌缝胶的黏结性能便呈现出图6(b)中的变化趋势:160℃时,老化后灌缝胶黏度升高,其黏结性能降低;180℃时,尽管灌缝胶老化后黏度上升,但更强的极性增加了其黏结性;200℃及220℃时,灌缝胶黏度快速上升,其高黏度成为制约黏结力的主要因素,进而黏结性能随老化时间的延长而逐渐降低;③灌缝胶黏结性能与其自身黏弹性共同影响其低温拉伸性能。短的加热时间内,更高温度下灌缝胶的低黏度保证了优异的黏结性,使其具有更加理想的低温伸长率;随着老化时间的延长,更高温度下灌缝胶迅速增长的模量导致其黏结力难以抵抗拉伸时产生的应力,进而造成其低温伸长率不及更低温度下老化的样品,更易出现黏附性破坏。

3 结论

为研究短期老化温度对灌缝胶性能的影响,采用基质沥青、SBS、橡胶颗粒等制备了灌缝胶。模拟使用场景,对180~220℃下短期老化前后灌缝胶的性能进行测试及结构表征,结果表明:

(1)老化后灌缝胶的锥入度、流动值降低,松弛行为减弱,软化点、弹性恢复率及模量升高。高温(>180℃)短时间和低温(160℃)长时间的老化均会造成较为明显的性能改变,而高温下长时间的老化则会使灌缝胶发生显著“硬化”。低温拉伸性能则并非随温度上升而单调降低。

(2)更高温度下加热的灌缝胶短时间内极性基团会显著增加,且溶胀组分和沥青质组分的 T_g 均出现升高,非均匀程度增加。

(3)灌缝胶黏结性能与其极性、黏度有关。高温下灌缝胶黏度低,有利于增加界面间锚固作用,老化后极性的增加也有助于提高黏结性能。老化的加剧则会造成黏度上升,不利于黏结。

(4)在现场施工时,灌缝胶的综合性能并非随短期老化温度的上升而线性降低,而是受到黏结力、模量的综合作用。以本研究为例,3 h的施工时间内,200℃加热的灌缝胶为最佳加热温度;而当施工时间延长至9 h时,180℃的加热温度则更加合理。因此,在施工时,有必要根据施工时间调整加热温度,或根据加热温度调节每一批次的灌缝胶投料量,以最大程度发挥灌缝胶性能,并降低短期老化对灌缝胶性能的不利影响。

参考文献:

References:

- [1] 李侠,张爱勤,周晓静,等.高温型复合改性沥青灌缝胶正交试验研究[J].中外公路,2019,39(3):234-240.
LI Xia,ZHANG Aiqin,ZHOU Xiaojing,et al.Orthogonal experimental study on high temperature modified asphalt joint sealant[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(3):234-240.
- [2] 董岩岩.基于弱边界层理论的灌缝胶失效机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
DONG Yanyan.The failure mechanism of crack sealant based on the weak boundary layer theory[D].Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.
- [3] CAO L P,YANG C,DONG Z J,et al.Aging mechanism of hot-poured sealants for asphalt pavement under natural environmental exposure[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(2):197-206.
- [4] OZER H,YOUSEFI S S,AL-QADI I L,et al.Field aging and development of aging model for hot-poured crack sealants[J].Journal of the Transportation Research Board, 2015,2481(1):90-99.
- [5] WANG F,XIAO Y,CUI P D,et al.Correlation of asphalt performance indicators and aging degrees: A review[J]. Construction and Building Materials,2020,250:118824.
- [6] 陈钊,杜鑫,李良.多聚磷酸复合SBS改性沥青耐老化性能研究[J].中外公路,2021,41(4):341-344.
CHEN Zhao,DU Xin,LI Liang.Study on aging resistance properties of asphalt modified by polyphosphate and SBS [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):

- 341-344.
- [7] 王珺卓,徐国庆,张恒龙,等.不同热氧强度作用下SBS改性沥青性能的演变规律[J].公路交通科技,2020,37(10):35-45.
- WANG Junzhuo, XU Guoqing, ZHANG Henglong, et al. Evolution rule of SBS modified asphalt performance under different thermal-oxidative intensities[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020,37(10):35-45.
- [8] 杨永强,康秉铎,郭海东,等.活化胶粉/SBS复合改性沥青短期老化性能[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):23-33.
- YANG Yongqiang, KANG Bingduo, GUO Haidong, et al. Short-term aging performance of activated rubber powder/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021,41(5):23-33.
- [9] 周超.橡胶粉改性生物沥青的老化特性研究[J].中外公路,2022,42(4):237-243.
- ZHOU Chao. Study on aging characteristics of bio-asphalt modified by rubber powder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4):237-243.
- [10] 王民,李璐,梁乃兴,等.SBS改性沥青超热老化机理及疲劳特性[J].高分子材料科学与工程,2017,33(4):76-80,86.
- WANG Min, LI Lu, LIANG Naixing, et al. Epithermal aging mechanism and fatigue properties of SBS modified asphalt [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017,33(4): 76-80,86.
- [11] 李媛媛.沥青路面高性能热补密封胶的研发与性能研究[D].西安:长安大学,2013.
- LI Yuanyuan. Development and research on high-performance asphalt pavement hot sealant[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [12] 郭学东,方向阳,高春妹,等.温度和湿度对沥青路面裂缝修补粘附力的影响研究[J].中外公路,2009,29(5):83-87.
- GUO Xuedong, FANG Xiangyang, GAO Chunmei, et al. Study on the influence of temperature and humidity on the adhesion of asphalt pavement crack repair[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009,29(5):83-87.
- [13] 张旭.温度和湿度对沥青路面裂缝修补粘附力的影响研究[D].长春:吉林大学,2008.
- ZHANG Xu. Research on the influence to asphalt pavements crack sealing adhesion by temperature and humidity[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [14] 曹雪娟,雷运波.SBS热氧老化动力学研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(1):157-161.
- CAO Xuejuan, LEI Yunbo. Study on thermal oxidative aging kinetics of SBS[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010,29(1):157-161.
- [15] 陈华鑫,贺孟霜,李媛媛,等.沥青与沥青组分的差示扫描量热研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(2):207-210.
- CHEN Huaxin, HE Mengshuang, LI Yuanyuan, et al. DSC analysis on asphalt and asphalt fractions[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013,32(2):207-210.
- [16] 刘登祥.(化工产品手册)橡胶及橡胶制品[M].4版.北京:化学工业出版社,2005.
- LIU Dengxiang. (Handbook of chemical products) Rubber and rubber products[M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.