

热氧及紫外老化下硬质沥青与 SBS 改性沥青 多尺度特性对比研究

张海林

(山西省晋中路桥建设集团有限公司, 山西 晋中 030600)

摘要:为掌握硬质沥青和 SBS 改性沥青老化前后性能差异,基于元素分析法研究两种沥青热氧和紫外老化前后元素组成变化规律,并进行动态剪切流变(DSR)试验分析热氧和紫外老化对两种沥青流变性能及温度敏感性影响。结果表明:热氧及紫外老化后两种沥青 O 元素比例增加、 G^* 升高、 δ 降低,但紫外老化造成的上述三指标变化幅度更大,老化程度更深,老化条件相同时则是 AH-30 硬质沥青的变化幅度较小,抗老化性能优于 SBS 改性沥青;热氧及紫外老化前后 AH-30 硬质沥青抗车辙性能均优于 SBS 改性沥青,但随着老化程度加深两者差距呈减小趋势;热氧及紫外老化后两种沥青温度敏感性改善,尤其紫外老化后改善效果更好,老化条件相同时则是 AH-30 硬质沥青温度敏感性优于 SBS 改性沥青,且沥青老化程度越深表现越明显。

关键词:硬质沥青;SBS 改性沥青;热氧老化;紫外老化;流变性能

1 引言

沥青路面因具有行车舒适、建养周期短及可回收利用等优点在中国高速公路建设中得到广泛使用。但沥青为温度敏感性材料,高温时黏度下降,致使沥青路面在行车荷载作用下容易产生车辙病害,严重影响行车安全和路面使用寿命,因此如何提高沥青路面抗车辙性能一直是学者们研究的热点。采用硬质沥青是提高沥青路面抗车辙性能的有效方式之一,其相对各类改性沥青具有廉价和质量稳定等优点,因而对硬质沥青性能进行研究具有重要意义。

秦育彬等对硬质沥青性能进行了研究,发现硬质沥青及其胶浆和混合料抗变形能力均明显优于基质沥青,且抗疲劳性能良好;董雨明等基于实体工程对硬质沥青路面的高低温性能进行了验证,发现其高温性能优良,低温性能满足工程要求;杨光等对硬质沥青混合料的疲劳性能进行了研究,发现采用应力控制模式时,20℃和5℃条件下其疲劳性能优于改性沥青混合料,而采用应变控制模式时其各个温度下的疲劳性能均较改性沥青混合料差;杨瑞华等对硬质沥青混合料的抗

老化性能进行了研究,发现热氧老化后硬质沥青混合料的高温稳定性、劈裂强度和水稳定性均优于 SBS 及 AH-70 沥青混合料;何华等对比分析了硬质沥青混合料与 70# 沥青混合料路用性能的差异,发现硬质沥青混合料高温及水稳性能较 70# 沥青混合料更优,低温性能则稍差;王威等对硬质沥青热氧老化前后的流变性能进行了研究,发现老化后其弹一黏转变温度提高。

现有关于硬质沥青及其混合料的研究主要涉及高温、低温、抗老化及疲劳性能,其中关于抗老化性能的研究仅涉及热氧老化,而实际沥青路面还存在紫外老化,故有必要研究两种老化条件对硬质沥青性能的影响。同时,为便于比较,该文以目前应用最为广泛的 SBS 改性沥青作为参照,研究比较热氧和紫外老化条件下两种沥青性能的差异,对进一步掌握硬质沥青抗老化性能具有积极意义。

2 试验概况

2.1 原材料

采用 AH-30 硬质沥青进行试验研究,并以 SBS (I-D)改性沥青为参照,两者主要技术指标见表 1。

表 1 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青主要技术指标

试验项目	单位	AH-30	SBS(I-D)
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	27	56.0
延度(5 cm/min, 5 °C)	cm	—	30.0
延度(5 cm/min, 15 °C)	cm	22.2	—
软化点	°C	58.2	78.1
密度	g/cm ³	1.013	1.030
溶解度	%	99.8	99.7
质量变化	%	0.03	0.10
RTFOT 后 残留物			
针入度比(25 °C)	%	69	88
延度(5 °C)	cm	—	19.6

2.2 试验方法

2.2.1 沥青老化试验

(1) 热氧老化

将沥青试样置于 163 °C 条件 RTFOT 中保温 85 min 模拟短期老化,进而将短期老化沥青置于压力 2.1 MPa、温度 100 °C 的 PAV 中保温 20 h 制得长期老化沥青,此时相当于模拟自然条件下老化 5 年的沥青。

(2) 紫外老化

将短期老化沥青置于紫外加速老化箱进行沥青紫外老化试验,沥青试样厚度约为 1 mm,紫外光波长为 365 nm,辐射强度约为 0.03 W/cm²,试验温度为 60 °C,试验周期为 30 d,此时沥青所受老化辐射量为 777.68 MJ/m²,而统计发现中国上海地区年紫外线辐

射量为 149.6 MJ/m²,故此时室内加速紫外老化模拟效果约为上海地区室外老化 5.2 年。

2.2.2 沥青元素组成定量分析试验

采用 vario EL cube 型元素分析仪进行沥青元素组成定量分析试验,沥青试样质量为 4~6 mg,且采用锡舟包裹。通过元素分析确定沥青中 C、H、N、S 和 O 质量分数,并按式(1)计算氢碳摩尔比 $M(H/C)$ 进行沥青老化特性分析。其中 $M(H/C)$ 值越大,沥青中饱和烃成分越多, $M(H/C)$ 值越小,沥青中芳香环结构越多。

$$M(H/C) = 11.92(\omega_H/\omega_C) \quad (1)$$

式中: $M(H/C)$ 为沥青氢碳摩尔比; ω_H 为沥青中 H 元素质量分数(%); ω_C 为沥青中 C 元素质量分数(%)。

2.2.3 沥青高温流变性能试验

采用 DSR 试验对沥青高温流变性能进行分析,沥青试样直径为 25 mm,试验频率为 10 rad/s。DSR 试验能获得表征沥青高温抗变形能力的复数模量 G^* 及表征沥青中弹性成分比例的 δ , G^* 越大沥青抗变形能力越好, δ 越小沥青越接近完全弹性体,变形恢复能力越强。同时,可计算车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 表征沥青抗车辙性能,其值越大沥青抗车辙性能越好。

3 试验结果与分析

3.1 元素分析

分别对原样、短期老化、长期老化和紫外老化 10、20 和 30 d 的 AH-30 硬质沥青及 SBS 改性沥青进行元素分析,结果如表 2 所示。

表 2 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青老化前后元素分析结果

元素	单位	原样		短期老化		长期老化		紫外老化					
								10 d		20 d		30 d	
		AH-30	SBS										
C	%	84.12	84.38	84.12	84.30	83.22	83.16	83.51	83.75	82.95	82.75	82.45	82.01
H	%	10.51	10.14	10.36	10.01	9.88	9.52	9.95	9.51	9.52	8.99	9.21	8.36
N	%	0.33	0.35	0.31	0.34	0.26	0.31	0.29	0.30	0.25	0.25	0.23	0.21
S	%	4.84	4.92	4.73	4.81	4.59	4.75	4.70	4.71	4.61	4.50	4.45	4.32
O	%	0.20	0.21	0.48	0.54	2.05	2.26	1.55	1.73	2.67	3.51	3.66	5.10
$M(H/C)$		1.49	1.43	1.47	1.42	1.42	1.36	1.42	1.35	1.37	1.29	1.33	1.22

(1) 热氧老化分析

由表 2 可得:随着老化程度加深,沥青中 C、H、N 和 S 元素比例逐渐减少,O 元素比例逐渐增加,表明沥青受热老化的实质为氧化过程,此时氧原子在沥青

中形成羧基和亚砷基等具有永久偶极且能产生静电力的极性官能团,使沥青内部摩阻力增加,表现为黏度提高,抗车辙性能变好。此外,老化程度加深时沥青 $M(H/C)$ 值降低,此时沥青中芳香环结构增多,而芳香

环在沥青中旋转困难,故沥青耐高温性能提高。

由表2还可得:短期老化后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青的O元素比例分别增加0.28%和0.23%, $M(H/C)$ 值分别降低1.3%和0.7%,而长期老化后两者O元素比例较短期老化分别增加1.57%和1.68%, $M(H/C)$ 值则分别降低3.4%和4.2%,表明沥青受热老化过程中老化主要发生在长期老化阶段;AH-30硬质沥青O元素比例和 $M(H/C)$ 值随着老化程度加深的变化斜率低于SBS改性沥青,表明AH-30硬质沥青抗热氧老化性能更优。

(2) 紫外老化分析

随着紫外老化时间延长,AH-30硬质沥青和SBS改性沥青中C、H、N和S元素比例逐渐减少,O元素比例逐渐增加,表明沥青紫外老化的实质也是氧化过程,与热氧老化一致。

将两种沥青O元素比例和 $M(H/C)$ 值随紫外老化时间变化规律分别绘制于图1、2。

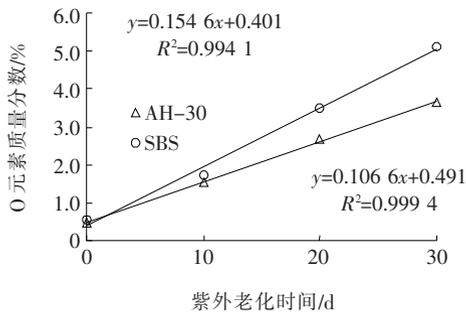


图1 两种沥青O元素比例随紫外老化时间变化规律

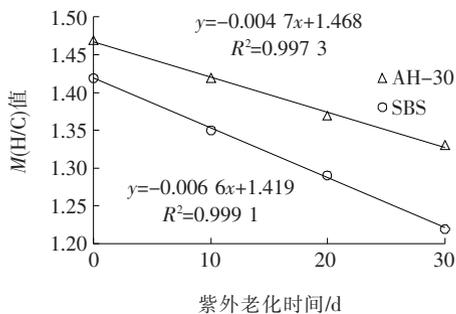


图2 两种沥青 $M(H/C)$ 值随紫外老化时间变化规律

由图1、2可得:随紫外老化时间增加,两种沥青O元素比例呈线性增加, $M(H/C)$ 值呈线性减小,回归分析中 R^2 值均在0.99以上,表明沥青老化程度线性加深。同时,AH-30硬质沥青O元素比例和 $M(H/C)$ 值随紫外老化时间变化线斜率分别为0.1066和0.0047,较SBS改性沥青的0.1546和0.0066分别减小31.0%和30.3%,表明AH-30硬质沥青抗紫外

老化性能优于SBS改性沥青。

(3) 热氧老化与紫外老化对比

沥青经PAV热氧长期老化或紫外老化30d后均约模拟现场使用5年状态。两条件下对应AH-30硬质沥青和SBS改性沥青的O元素比例见表2。

由表2可知:紫外辐射造成的沥青老化程度明显高于热氧老化,尤其对SBS改性沥青表现明显,其中紫外老化30d后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青O元素比例分别为PAV长期老化沥青的1.79倍和2.26倍,而 $M(H/C)$ 值分别为其0.94倍和0.90倍。

3.2 高温流变性能分析

分别对原样、短期老化、长期老化和紫外老化10、20和30d的AH-30硬质沥青及SBS改性沥青进行DSR试验。

3.2.1 高温流变性能

(1) 热氧老化

① 热氧老化前后沥青复数模量 G^* 和相位角 δ

原样、短期老化和长期老化后的AH-30硬质沥青和SBS改性沥青复数模量 G^* 和相位角 δ 变化见图3、4。

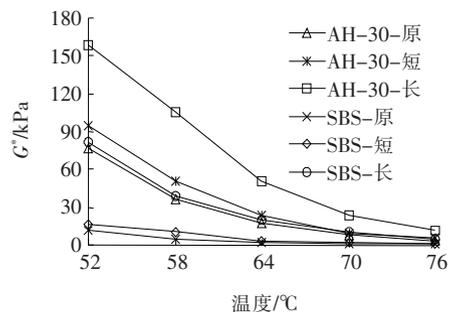


图3 3个阶段下两种沥青复数模量试验结果

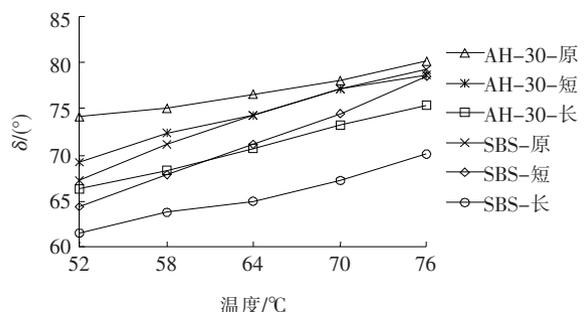


图4 3个阶段下两种沥青相位角试验结果

由图3、4可知:老化后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青 G^* 升高, δ 降低,表明老化使沥青抗变形能力增强,且沥青中黏性成分逐渐向弹性转化,变形恢复能力增强;短期老化后5个试验温度条件下AH-30

硬质沥青和 SBS 改性沥青的 G^* 平均值较原样沥青分别提高 29.4% 和 58.5%, δ 值降低 3.3% 和 3.5%, 而长期老化后两种沥青 G^* 平均值较短期老化沥青分别提高 89.3% 和 351.3%, δ 值降低 4.7% 和 8.1%, 表明长期老化对沥青造成的老化程度明显高于短期老化, 同时无论短期老化还是长期老化, AH-30 硬质沥青的抗老化性能都明显优于 SBS 改性沥青, 尤其长期老化阶段表现更为显著。此外, 热氧老化前后两种沥青 G^* 的变化幅度均明显高于 δ , 表明热氧老化过程对沥青中黏弹成分比例影响相对较低。

② 热氧老化前后沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$

原样、短期老化和长期老化后 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 结果如图 5 所示。

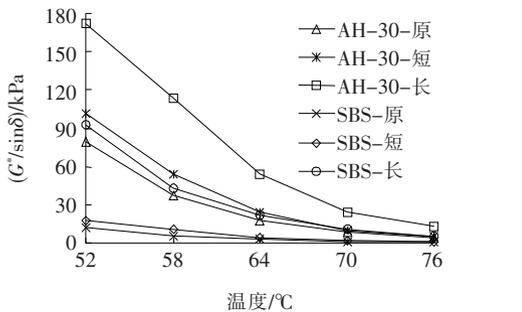


图 5 3 个阶段下两种沥青车辙因子试验结果

由图 5 可知: 5 种试验温度下原样、短期老化和长期老化 3 个阶段的 AH-30 硬质沥青 $G^*/\sin\delta$ 平均值分别较 SBS 改性沥青高 84.3%、80.8% 和 53.7%, 表明热氧老化前后 AH-30 硬质沥青高温抗车辙性能均优于 SBS 改性沥青, 但随着老化程度加深两者差距呈减小趋势。

(2) 紫外老化

① 紫外老化前后沥青复数模量 G^* 和相位角 δ

原样和紫外老化后的 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青复数模量 G^* 和相位角 δ 试验结果分别如图 6、7 所示。

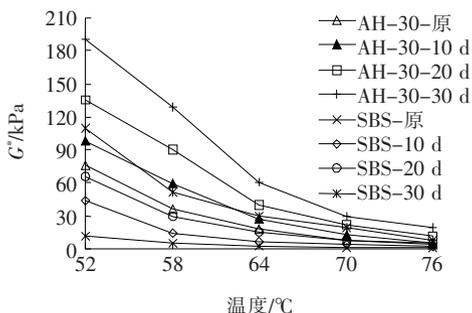


图 6 不同紫外老化时间下两种沥青复数模量试验结果

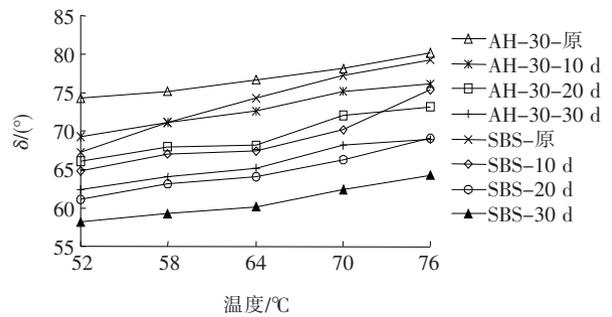


图 7 不同紫外老化时间下两种沥青相位角试验结果

由图 6、7 可知: 随紫外老化时间增加, AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青 G^* 升高, δ 降低, 此时沥青抗变形能力增强, 且沥青中弹性成分比例增加, 变形恢复能力增强; 随着试验温度增加, G^* 随温度变化斜率呈降低趋势, δ 随温度变化斜率则基本不变, 表明两种沥青处于较高温区时 G^* 温度敏感性降低, δ 温度敏感性则不变。

紫外老化 10、20 和 30 d 后 5 种试验温度条件下 AH-30 硬质沥青的 G^* 平均值分别为其原样沥青的 1.4、2.1 和 3.0 倍, SBS 改性沥青则分别为其原样沥青的 3.3、5.7 和 10.0 倍, 而 5 种试验温度条件下 AH-30 硬质沥青的 δ 平均值分别较其原样沥青降低 5.1%、9.5% 和 14.4%, SBS 改性沥青则分别较其原样沥青降低 6.6%、12.3% 和 17.6%, 表明两种沥青老化程度随紫外老化时间延长逐渐加深, 且老化后 AH-30 硬质沥青 G^* 和 δ 变化幅度较 SBS 改性沥青小, 抗老化性能更优。此外, 紫外老化前后两种沥青 G^* 的变化幅度明显高于 δ , 表明紫外老化过程对沥青中黏弹成分比例影响相对较低, 和热氧老化影响一致。

② 紫外老化前后沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$

原样和紫外老化后 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 结果如图 8 所示。

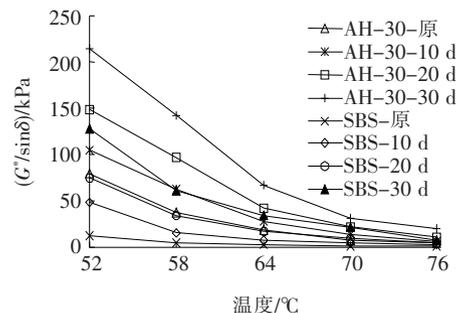


图 8 紫外老化时间对两种沥青 $G^*/\sin\delta$ 的影响

由图 8 可知: 5 种试验温度下原样及紫外老化 10、20 和 30 d 的 AH-30 硬质沥青 $G^*/\sin\delta$ 平均值分别

较SBS改性沥青高84.3%、63.7%、56.5%和46.8%，表明紫外老化前后AH-30硬质沥青高温抗车辙性能均优于SBS改性沥青，但随着紫外老化程度加深两者差距呈减小趋势，和热氧老化一致。

(3) 热氧老化与紫外老化对比

将经PAV长期老化和紫外老化30 d的AH-30硬质沥青和SBS改性沥青 G^* 、 $G^*/\sin\delta$ 和 δ 分别绘制于图9、10。

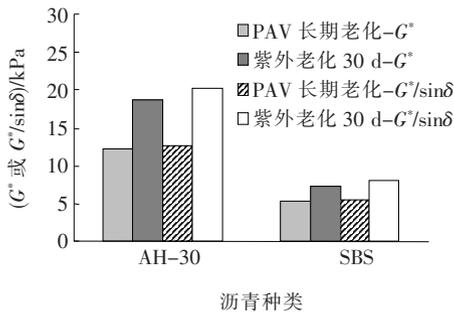


图9 两种老化条件下沥青复数模量和车辙因子

由图9、10可得：就老化前后沥青高温性能评价指标变化幅度而言，紫外辐射造成的沥青老化程度明显高于热氧老化，其中紫外老化30 d后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青 G^* 分别为PAV长期老化沥青的

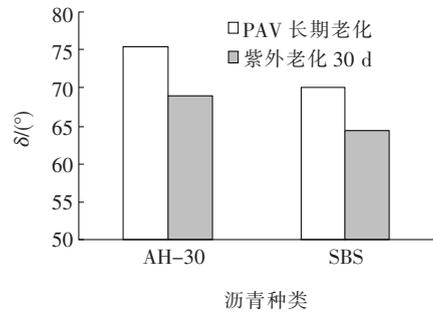


图10 两种老化条件下沥青相位角

1.53和1.38倍， $G^*/\sin\delta$ 分别为其1.59和1.45倍， δ 则分别为其0.91和0.92倍。

3.2.2 高温流变性能温度敏感性

研究认为，采用 G^* 取两次对数函数后与取一次对数的温度进行线性回归求取温度敏感性指数 GTS 对沥青感温性能进行评价适用性较好，其中 GTS 越小，表征温度敏感性越低。 GTS 根据式(2)求取，结果如表3所示。

$$\lg \lg G^* = GTS \cdot \lg T + C \quad (2)$$

式中： G 为复数模量(Pa)； GTS 为温度敏感性指数； T 为试验温度(K)。

表3 两种沥青老化前后温度敏感性分析结果

参数	原样		短期老化		长期老化		紫外老化					
							10 d		20 d		30 d	
	AH-30	SBS										
GTS	-4.28	-4.41	-4.11	-4.29	-3.48	-3.86	-4.04	-4.28	-3.42	-3.82	-3.12	-3.53
R^2	0.997 1	0.999 1	0.992 8	0.987 5	0.984 0	0.998 4	0.984 0	0.980 0	0.988 7	0.999 7	0.987 7	0.978 1

(1) 热氧老化

由表3可知：短期老化后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青 GTS 绝对值分别较原样沥青降低4.0%和2.7%，长期老化后两者则分别较短期老化沥青降低15.3%和10.0%，表明热氧老化能改善沥青温度敏感性，尤其是长期老化阶段表现明显；原样、短期老化和长期老化3个阶段AH-30硬质沥青 GTS 绝对值分别较SBS改性沥青低2.9%、4.2%和9.8%，表明AH-30硬质沥青高温流变性能温度敏感性较SBS改性沥青弱，且随热氧老化程度加深表现更加明显。

(2) 紫外老化

将表3中原样和紫外老化后AH-30硬质沥青和SBS改性沥青的 GTS 绘制于图11。

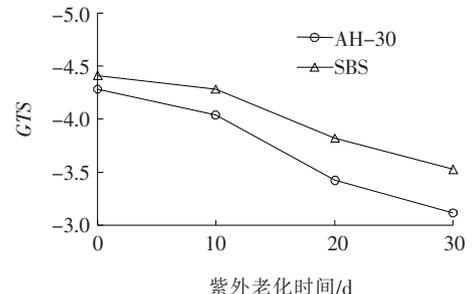


图11 紫外老化对沥青高温流变性能温度敏感性影响

由图11可知：随紫外老化时间延长，两种沥青 GTS 绝对值逐渐降低，表明其温度敏感性逐渐减弱，尤其紫外老化时间超过10 d后表现更为明显，其中紫外老化时间由0增加至10 d时，AH-30硬质沥青和SBS改性沥青 GTS 绝对值随紫外老化时间变化线斜

率分别为 0.024 和 0.013,而紫外老化时间由 10 d 增加至 30 d 时,平均斜率分别为 0.046 和 0.038;各个紫外老化时间下 SBS 改性沥青 GTS 绝对值均高于 AH-30 硬质沥青,表明紫外老化前后 AH-30 硬质沥青高温流变性能温度敏感性均弱于 SBS 改性沥青,且紫外老化时间越长表现越明显,其中未老化时 SBS 改性沥青 GTS 绝对值较 AH-30 硬质沥青高 3.0%,而紫外老化 30 d 后较其高 13.1%。

(3) 热氧老化与紫外老化对比

将经 PAV 长期老化和紫外老化 30 d 的 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青的 GTS 绘制于图 12。

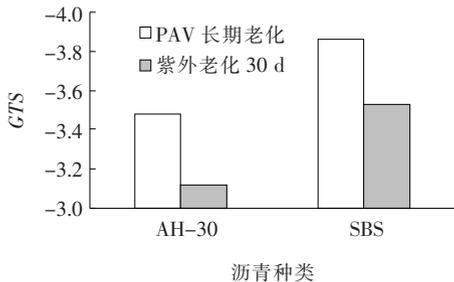


图 12 两种老化条件下沥青 GTS

由图 12 可得:紫外老化 30 d 后 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青的 GTS 分别较热氧老化后降低 10.3%和 8.5%,表明紫外老化后沥青高温流变性能温度敏感性更低,且 AH-30 硬质沥青表现相对明显。

4 结论

(1) 热氧及紫外老化后 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青 O 元素比例增加、 G^* 升高、 δ 降低,但紫外老化造成的上述三指标变化幅度更大,老化程度更深,尤其对 SBS 改性沥青表现明显,老化条件相同时则是 AH-30 硬质沥青的变化幅度较小,抗老化性能优于 SBS 改性沥青。

(2) 热氧老化过程中长期老化对 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青造成的老化程度明显高于短期老化,而紫外老化过程中两种沥青老化程度随紫外老化时间延长线性加深。

(3) 热氧及紫外老化后两种沥青温度敏感性改善,且紫外老化后改善效果更好,尤其是 AH-30 硬

质沥青表现明显,老化条件相同时则是 AH-30 硬质沥青温度敏感性优于 SBS 改性沥青,且沥青老化程度越深表现越明显。

(4) 热氧老化过程中长期老化阶段对 AH-30 硬质沥青和 SBS 改性沥青温度敏感性的改善效果明显高于短期老化,而紫外老化过程中老化时间超过 10 d 后对两种沥青温度敏感性的改善效果更加明显。

参考文献:

- [1] 宋秋萍. 硬质沥青及其混合料性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2015.
- [2] 胡曾兰. 硬质沥青技术指标及其混合料路用性能研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文,2011.
- [3] Lee H J, Lee J H, Park H M. Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements[J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(5):1 079-1 087.
- [4] Capitosd, Picado-Santos L. Assessing Permanent Deformation Resistance of High Modulus Asphalt Mixtures[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(5):394-401.
- [5] 秦育彬. 30# 硬质沥青及其混合料性能研究[J]. 中外公路,2013(6).
- [6] 董雨明. 硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文,2015.
- [7] 杨光,王旭东,时敬涛,等. 基于耗散能方法评价硬质沥青混合料抗疲劳性能[J]. 建筑材料学报,2018(6).
- [8] 杨瑞华,谭波,陆宏新. 硬质沥青混合料抗老化性能研究[J]. 公路工程,2013(2).
- [9] 何华,沈昆,李炜,等. 硬质沥青混合料的路用性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017(6).
- [10] 王威,马德崇,樊长昕,等. 硬质沥青老化前后流变分析及高温性能比较[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017(6).
- [11] 谢学成. 矿物填料种类与含量对沥青胶浆流变性能的影响[D]. 湖南大学硕士学位论文,2017.
- [12] 叶奋,黄彭. 强紫外线辐射对沥青路用性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005(7).
- [13] 杨震,张肖宁,虞将苗,等. 基质沥青老化前后多尺度特性研究[J]. 建筑材料学报,2018(3).
- [14] 金大中,钱国平,白献萍,等. 沥青紫外光老化研究进展[J]. 中外公路,2019(5).