

文章编号:1007-9629(2022)10-1061-09

低损耗因子复合改性沥青疲劳和自愈特性

王 鹏^{1,*}, 刘 凯^{2,3}, 刘 悦¹, 曹 承⁴, 王立志¹

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002; 3. 大宗固废材料在交通领域循环利用行业研发中心, 山东 济南 250002; 4. 北京首都国际机场股份有限公司, 北京 101300)

摘要:为探究损耗因子($\tan \delta$)对 SBS 改性沥青疲劳寿命的调控作用,借助塑料润滑剂乙撑硬脂酸酰胺,制备了 4 种改性沥青,采用红外光谱仪、原子力显微镜和差示扫描量热仪测试了其微观特性,通过动态剪切流变仪分析了其损耗因子及连续、间歇疲劳参数的变化.结果表明:经羟基化处理的乙撑硬脂酸酰胺(HPT)含胺基和羟基,使沥青中轻组分极易填充至 SBS 相,其复合改性沥青低温柔韧性无劣化,70 °C $\tan \delta$ 显著降低,疲劳寿命大幅增加,自愈特性增强;未经端基处理的乙撑硬脂酸酰胺(HPT-E)仅含胺基,可增强沥青间分子相互作用,其复合改性沥青 70 °C $\tan \delta$ 略小于 2,疲劳和自愈特性均得到改善;经脱胺处理的乙撑硬脂酸酰胺(HPT-R)仅含羰基,对聚合物相网络密度略有提升,其复合改性沥青低温柔韧性增强,70 °C $\tan \delta$ 小幅降低,疲劳特性与 SBS 改性沥青相近,自愈特性增强.

关键词:改性沥青;塑料润滑剂;损耗因子;微观相态;疲劳特性

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.010

Fatigue and Self-healing Performances of Composite Modified Asphalts with Low Loss Factor

WANG Peng^{1,*}, LIU Kai^{2,3}, LIU Yue¹, CAO Cheng⁴, WANG Lizhi¹

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong High-Speed Engineering Inspection Co., Ltd., Jinan 250002, China; 3. Bulk Solid Waste Materials Recycling Industry Research and Development Center in the Transportation Field, Jinan 250002, China; 4. Beijing Capital International Airport Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: To investigate the regulation of loss factor($\tan \delta$) on fatigue life of SBS modified asphalts, four types of modified asphalts were prepared with the ethylene stearic acid amide as a plastic lubricant. The microscopic characteristics of modified asphalts were analyzed by the infrared spectrometer, atomic force microscope, and differential scanning calorimeter. The parameters during continuous and intermittent fatigue processes and the loss factor($\tan \delta$) were measured by the dynamic shear rheometer. The results show that due to the hydroxyl and amino group, the hydroxylated ethylene stearic acid amide(HPT) promotes the lighter components in asphalt binder more easily fill to the SBS phase. The low-temperature flexibility of SBS+HPT composite modified asphalt is not deteriorated, its 70 °C $\tan \delta$ is significantly reduced, its fatigue life is greatly increased, and its self-healing performance is enhanced. The ethylene stearic acid amide without end group treatment(HPT-E), which only contains the amino group, can enhance the interaction between asphalt molecules. The $\tan \delta$ of SBS+HPT-E composite modified asphalt at 70 °C is slightly less than 2, and its fatigue and self-healing performance are also improved. The

收稿日期:2021-08-16; 修订日期:2021-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808322);山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2020KE007);山东省高校青创科技计划项目(2019KJG004)

第一作者(通讯作者):王 鹏(1984—),女,陕西洋县人,山东建筑大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: wangpeng0462@sdjzu.edu.cn

ethylene stearic acid amide treated by ammonia removal(HPT-R) only contains carbonyl, which slightly increases the network density of polymer phase. The low-temperature flexibility of SBS+HPT-R composite modified asphalt is improved while the 70 °C $\tan \delta$ is slightly decreased. The fatigue life of SBS+HPT-R composite modified asphalt is similar to that of the SBS modified asphalt, the self-healing performance is enhanced.

Key words: modified asphalt; plastic lubricant; loss factor; microscopic phase structure; fatigue performance

改性沥青的疲劳特性决定着沥青混合料的耐久性,然而现有的改性沥青配方设计对疲劳性能重视不足^[1-4]. 沥青作为一种典型的黏弹性材料,其受力变形具有应变滞后性^[5].当施加应力时,黏弹性材料内部会产生机械能,造成内部生热,以致材料在高温条件下弹性显著降低,易产生不可恢复变形和大量能量损耗^[6]. 沥青的能量损耗可通过损耗因子($\tan \delta$)来表征, $\tan \delta$ 越高,表明沥青中黏性组分越多,施加作用力时克服黏滞阻力的部分越多,能量损耗越高^[7-8]. 橡胶工业中,损耗因子 $\tan \delta$ 被认为与耐疲劳和使用寿命密切相关^[9-10]. 刘娟等^[11]通过研究橡胶轮胎补强配方指出,60 °C下 $\tan \delta$ 越小,轮胎的耐疲劳特性越强;Ganguly等^[12-13]认为橡胶的损耗因子越低,其内部生热越少,疲劳寿命越强.然而,沥青疲劳寿命与损耗因子的相关性研究尚未得到广泛关注.乙撑硬脂酸酰胺是优良的塑料润滑剂,可显著降低材料能耗,获得损耗因子较低的聚合物产品.鉴于此,本文采用经不同方式处理后的乙撑硬脂酸酰胺和苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS)复配改性沥青,获得70 °C下 $\tan \delta < 2$ 的低损耗因子复合改性沥青,并借助红外光谱仪、原子力显微镜和差示扫描量热仪来分析改性沥青的微观特性,采用动态剪切流变仪得出改性沥青的损耗因子,通过连续和间歇加载疲劳试验测试改性沥青宏观疲劳和自愈特性,探究损耗因子对改性沥青疲劳寿命的影响,揭示其微观作用机制,为设计高效、耐久的改性沥青配方提供数据支持.

1 试验

1.1 原材料

基质沥青选用SK70#沥青,改性剂选用岳阳石化生产的线型SBS(791-H),稳定剂为商用硫磺类稳定剂,相容剂为糠醛抽出油.塑料润滑剂选用3种,其中HPT-E的主要成分为乙撑硬脂酸酰胺,HPT为对HPT-E进行羟基化处理的产物,HPT-R为对HPT进行脱胺处理的产物.

1.2 样品制备

改性沥青制备工艺如下:将基质沥青预热至160 °C后,加入相容剂,通过低速剪切使其与沥青均匀混合;再升温至175 °C,加入SBS和HPT/HPT-E/

HPT-R,在3 500 r/min的剪切速率下剪切0.5 h;调至搅拌模式并持续控温175 °C,加入稳定剂,搅拌发育1 h后完成样品制备.为凸显塑料润滑剂对SBS改性沥青各指标的影响,并保证改性沥青技术指标满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》,固定SBS改性剂掺量为3.5%.此外,为满足性能和经济需求,经室内试验验证,确定HPT/HPT-R/HPT-E的适宜掺量为1.5%,稳定剂掺量为0.15%,相容剂掺量为2%.上述掺量均以沥青质量计.4种改性沥青的物理性能见表1,表1中SBS-MA表示未添加塑料润滑剂的SBS改性沥青,SBS+HPT表示SBS与HPT复合改性沥青,SBS+HPT-E表示SBS与HPT-E复合改性沥青,SBS+HPT-R表示SBS与HPT-R复合改性沥青.由表1可见,SBS+HPT和SBS+HPT-E的5 °C延度相比SBS-MA显著降低.原因是HPT、HPT-E加入后锚固在SBS分子链表面,低温拉伸时在改性沥青内部产生应力集中;而HPT-R与SBS作用效果不佳,其在改性沥青中多以游离态形式存在,可能使改性沥青具有较好的低温柔韧性.

表1 改性沥青的物理性能
Table 1 Physical properties of modified asphalts

Parameter	SBS-MA	SBS+ HPT	SBS+ HPT-E	SBS+ HPT-R
Softening point/°C	63.0	84.5	77.5	61.5
Penetration(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	51.5	52.0	52.5	70.0
Ductility(5 °C)/cm	41.5	21.5	23.0	59.5
Rotational viscosity (135 °C)/(Pa·s)	1.135	0.995	0.995	1.010
Segregation/°C	1.9	1.5	2.0	1.6
Residual penetration after film oven aging/(0.1 mm)	53.0	36.5	46.0	58.0
Residual ductility after film oven aging(5 °C)/cm	20.5	10.0	13.0	26.0

1.3 试验方法

采用全反射衰减红外光谱法(ATR-FTIR)测定样品红外官能团分布,以布鲁克Tensor II型全反射衰减红外光谱ATR附件为测试设备.测试的波数范围为4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为4 cm^{-1} ,扫描次数为128次.

采用Bruker Dimension Fast Scan原子力显微镜(AFM)观测沥青微观形貌,样品采用熔融法制备.将约2 g沥青热浇筑于载玻片上,置于烘箱中在163℃下烘5 min,使其表面形成平整的沥青膜,取出后在室温下静置12 h,待测.AFM测试采用轻敲模式,样品测试范围 $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$,扫描频率1 Hz,扫描分辨率256帧 $\times$ 256帧.

采用美国TA Instruments公司生产的Q200型差示扫描量热仪(DSC)分析改性沥青热性能,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试温度为 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,保护气为 N_2 .

损耗因子采用温度扫描试验测定,测试设备为美国Bohlin公司生产的CVO-100型动态剪切流变仪(DSR),试验温度为 $58\sim 94\text{ }^{\circ}\text{C}$,频率为 10 rad/s ,平行板直径25 mm,板间距1 mm,采用应力控制方式,其

幅值为100 Pa.借助DSR,以时间扫描试验分析沥青疲劳特性,包括连续加载试验和间歇加载试验.连续加载试验测试温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,平行板直径8 mm,板间距2 mm,在幅值0.2 MPa的应力控制条件下,采用频率10 Hz的正弦波进行加载;间歇加载试验采用“加载0.1 s,卸载0.9 s”的循环模式,其余试验条件和连续加载试验一致.

2 结果与讨论

2.1 改性沥青微观特性

2.1.1 全反射衰减红外光谱(ATR-FTIR)

采用ATR-FTIR测定塑料润滑剂及改性沥青红外官能团分布特性,并分析乙撑硬脂酸酰胺对SBS改性沥青官能团分布特性的影响,试验结果见图1.

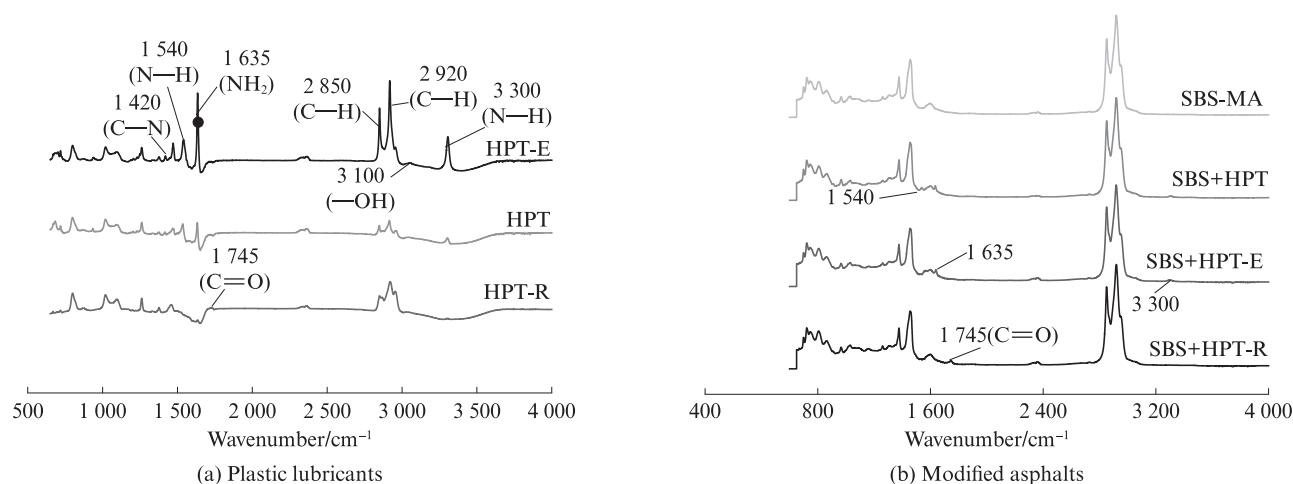


图1 塑料润滑剂及改性沥青的官能团分布特性

Fig. 1 Distribution characteristics of functional groups for plastic lubricants and modified asphalts

由图1(a)可知:乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂的红外官能团主要分布在 $3\,300$ 、 $2\,920$ 、 $2\,850$ 、 $1\,635$ 、 $1\,540$ 、 $1\,420\text{ cm}^{-1}$ 处,其中 $2\,920$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处分别为C—H的反对称伸缩振动和对称伸缩振动特征峰^[14], $3\,300\text{ cm}^{-1}$ 处为N—H的伸缩振动特征峰, $1\,635\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-\text{NH}_2$ 的面内变形振动特征峰, $1\,540\text{ cm}^{-1}$ 处为N—H的弯曲振动特征峰, $1\,420\text{ cm}^{-1}$ 处为C—N的伸缩振动特征峰^[15-16],上述特征峰均证明了胺基的存在;由于HPT-R进行了脱胺处理,故其在 $3\,300$ 、 $1\,540$ 、 $1\,420\text{ cm}^{-1}$ 处不存在特征峰,且 $1\,635\text{ cm}^{-1}$ 处峰强很弱;此外, $3\,100\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰证明HPT中含有羟基.

由图1(b)可知:4种沥青样品的红外光谱基本一致,但SBS-MA在 $3\,300$ 、 $1\,745$ 、 $1\,635$ 、 $1\,540\text{ cm}^{-1}$ 处均不存在吸收峰,而SBS+HPT在 $3\,300$ 、 $1\,635$ 、 $1\,540\text{ cm}^{-1}$ 处存在特征峰,SBS+HPT-E在 $3\,300$ 、

$1\,635\text{ cm}^{-1}$ 处存在吸收峰,此几处均主要为含N官能团;SBS+HPT-R在 $1\,745\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰归属于C=O官能团.通过红外光谱分析可知,HPT中含有胺基和羟基($-\text{OH}$),HPT-E中含有胺基,HPT-R中含有羰基(C=O).

2.1.2 原子力显微镜(AFM)

借助AFM研究乙撑硬脂酸酰胺对SBS改性沥青微观形貌的影响.图2为4种沥青样品的2D形貌图和3D相位图.

AFM形貌图反映了沥青组分间相互作用的差异.2D图中的“蜂状结构”与基质沥青的沥青质和微量元素含量等因素密切相关^[17-20].由图2(a)~(d)可知:SBS-MA和SBS+HPT-R可观测到清晰的“蜂状结构”,其中SBS-MA的“蜂状结构”分布均匀,尺寸小且数量最多,而SBS+HPT-R的“蜂状结构”数量相对较少且大小不一,说明HPT-R可提升SBS相

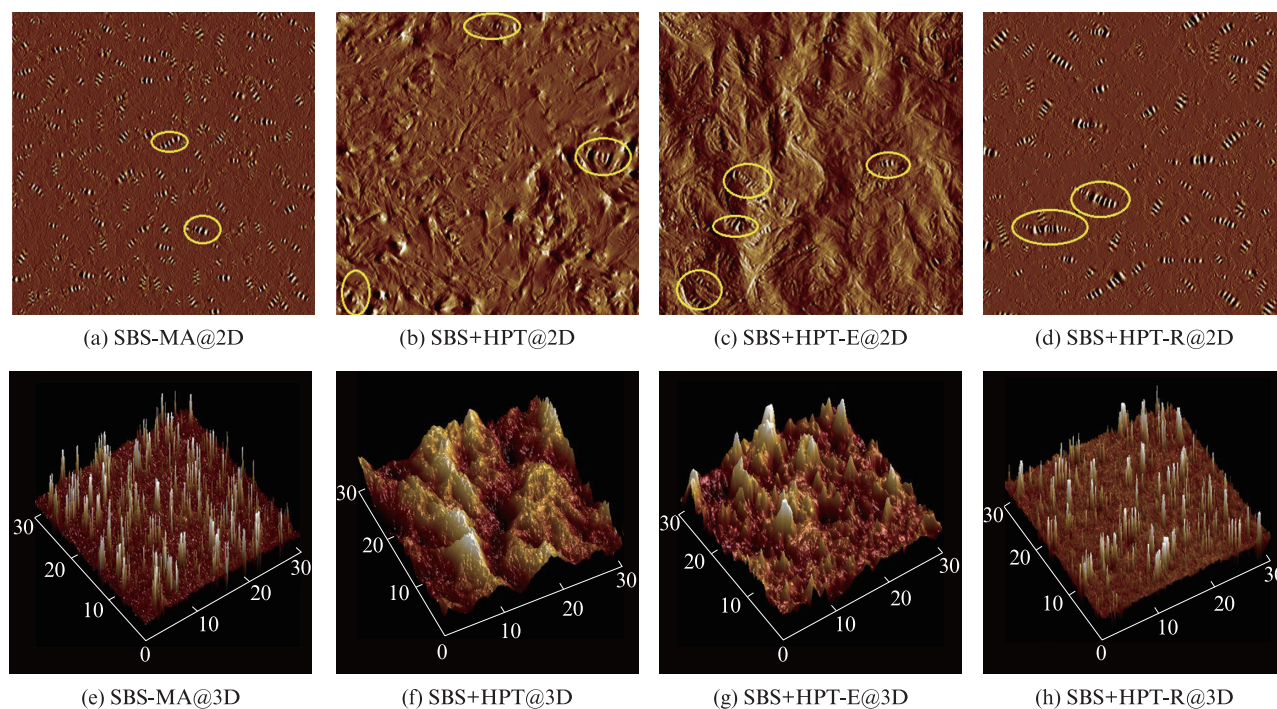


图2 4种沥青样品的2D形貌图和3D相位图

Fig. 2 2D topography and 3D phase diagram of four modified asphalt samples

的网络密度;与之相比,SBS+HPT和SBS+HPT-E的“蜂状结构”被包裹而未见全貌,说明HPT和HPT-E可促使沥青中更多的轻组分填充至SBS相中,导致“蜂状结构”被缠绕裹附于沥青之间。

由图2(e)、(h)可知,SBS-MA和SBS+HPT-R颗粒呈细长状,分散度高,其中SBS+HPT-R中的颗粒数量略少于SBS-MA。由图2(f)、(g)可见,SBS+HPT和SBS+HPT-E中的颗粒数量明显减少,颗粒尺寸增加,且聚集成团状。分析2D形貌图和3D相位图可得,乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂均可增强沥青组分与SBS间的相互作用,增大SBS溶胀面积,提升SBS相网络密度。3种塑料润滑剂在沥青组分与SBS间相互作用排序为:HPT>HPT-E>

HPT-R,造成这种差异的原因是塑料润滑剂中官能团不同,复合改性沥青的物理性能指标也体现了这一特点。

2.1.3 差示扫描量热分析

以DSC分析乙撑硬脂酸酰胺对改性沥青玻璃化转变温度(T_g)的影响,进而分析改性沥青分子链的低温柔韧性,测试结果如图3所示。

沥青是一种混合物,DSC热流率吸热峰的变化表征沥青组分聚集状态的变化。图3中改性沥青的热流率均随温度升高而呈下降趋势。由图3(a)可知,温度大于0℃时,改性沥青DSC曲线上均存在微小的吸热峰,SBS-MA与SBS+HPT-R的吸热峰分别出现在83、85℃,而SBS+HPT和SBS+HPT-E吸热

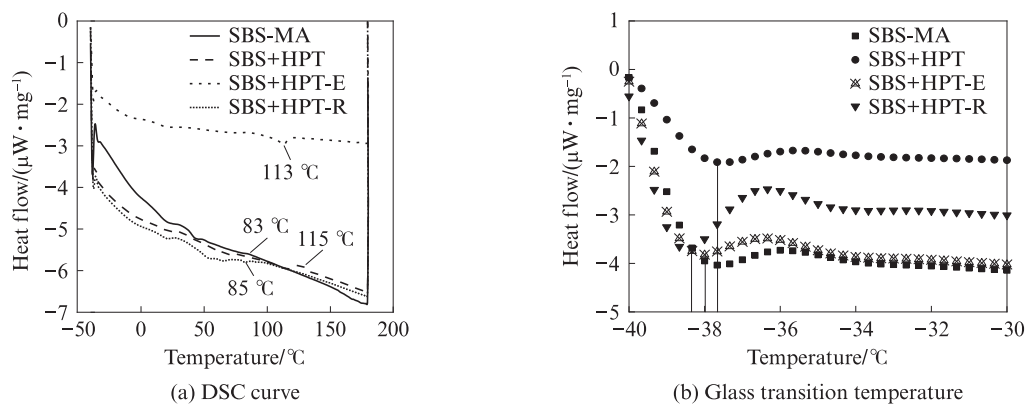


图3 改性沥青DSC曲线及玻璃化转变温度

Fig. 3 DSC curves and glass transition temperature of modified asphalts

峰对应的温度分别为115、113℃.这说明SBS-MA与SBS+HPT-R组分聚集特性相似,SBS+HPT与SBS+HPT-E具有相似的“蜂状结构”分布,图2(a)、(d)也论证了这一结论.

温度低于0℃时,吸热过程中热流率骤降后上升的拐点对应的温度即为玻璃化转变温度 T_g . T_g 越小,低温时沥青分子链的柔韧性越好.由图3(b)可知,吸热过程初期4种改性沥青 T_g 排序为:SBS+HPT-R<SBS+HPT-E<SBS+HPT=SBS-MA.故可认

为,HPT不会影响改性沥青的低温柔韧性,而HPT-R和HPT-E对SBS改性沥青低温柔韧性具有改善作用.

2.2 改性沥青宏观疲劳特性

2.2.1 损耗因子

以温度扫描试验分析4种改性沥青的相位角 δ 和复数模量 G^* ,并得出改性沥青在70℃条件下的损耗因子 $\tan \delta$,研究乙撑硬脂酸酰胺对损耗因子的影响.试验结果见图4、5.

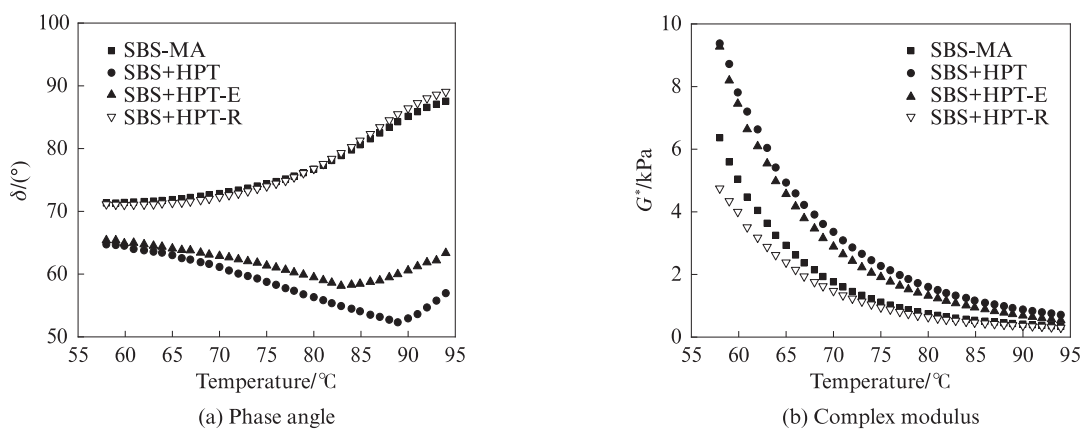


图4 温度扫描试验结果

Fig. 4 Results of temperature sweep test

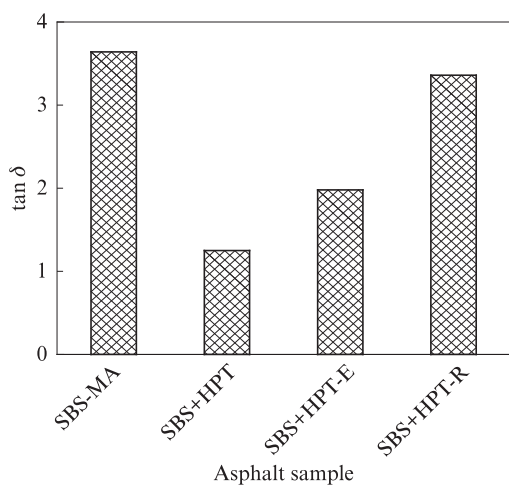


图5 沥青样品的70℃损耗因子

Fig. 5 Loss factor of asphalt sample at 70℃

沥青属于黏弹性材料,相位角 δ 表征沥青材料中黏性和弹性成分的比例, δ 越小,则沥青材料中的弹性成分越多.由图4(a)可知,SBS-MA和SBS+HPT-R的相位角随温度升高逐渐上升,而SBS+HPT和SBS+HPT-E的相位角随温度升高先减小,达到一定温度后又逐渐增大,且SBS+HPT和SBS+HPT-E的相位角转变温度与其高温PG分级温度接近.由图4(b)可知,在所测温度范围内,SBS+HPT的复数模量最大,SBS+HPT-E次之,

SBS+HPT-R最小.综上可知,HPT和HPT-E对SBS改性沥青的高温性能具有一定的改善作用,且HPT优于HPT-E,而HPT-R对SBS改性沥青高温性能影响不大.原因是HPT中胺基与羟基相结合,游离键较少,高温稳定性较好,而游离态的HPT-R导致SBS+HPT-R在高温条件下的结构稳定性较差.

损耗因子 $\tan \delta$ 表征沥青样品以热量形式散失的能量, $\tan \delta$ 越小,则沥青热损耗越低.由图5可知:加入乙撑硬脂酸酰胺后,3种复合改性沥青 $\tan \delta$ 均减小;SBS+HPT的 $\tan \delta$ 降低幅度最大,SBS+HPT-E次之,而HPT-R对SBS改性沥青 $\tan \delta$ 影响最小.由于以游离态形式存在的HPT-R未锚固在SBS链表面,高温时沥青易发生流动,因此SBS+HPT-R的70℃相位角较大;而SBS+HPT-E的 $\tan \delta$ 高于SBS+HPT,这是因为HPT-E中具有较多的不饱和键,致使其结构不稳定.

2.2.2 疲劳特性

借助DSR,以时间扫描试验分析4种改性沥青的疲劳、自愈特性.为了分析沥青的自愈特性,采用2种加载模式:连续加载和间歇加载.针对连续加载疲劳试验,采用复数模量 G^* 、耗散能 w_i 、耗散能变化率DR和累积耗散能比DER作为疲劳参数, w_i 、DR和

DER均以 G^* 和 δ 作为基本数据计算而得,具体计算方法参照文献[21-23],试验结果见图6.根据 G^* 、 w_i 、DR和DER可分别确定改性沥青疲劳寿命,即 G^* 降

低至初始模量的50%、 w_i 急速增加的拐点、DR急速增加的拐点和DER逐渐偏离直线 N 的20%拐点对应的加载次数.

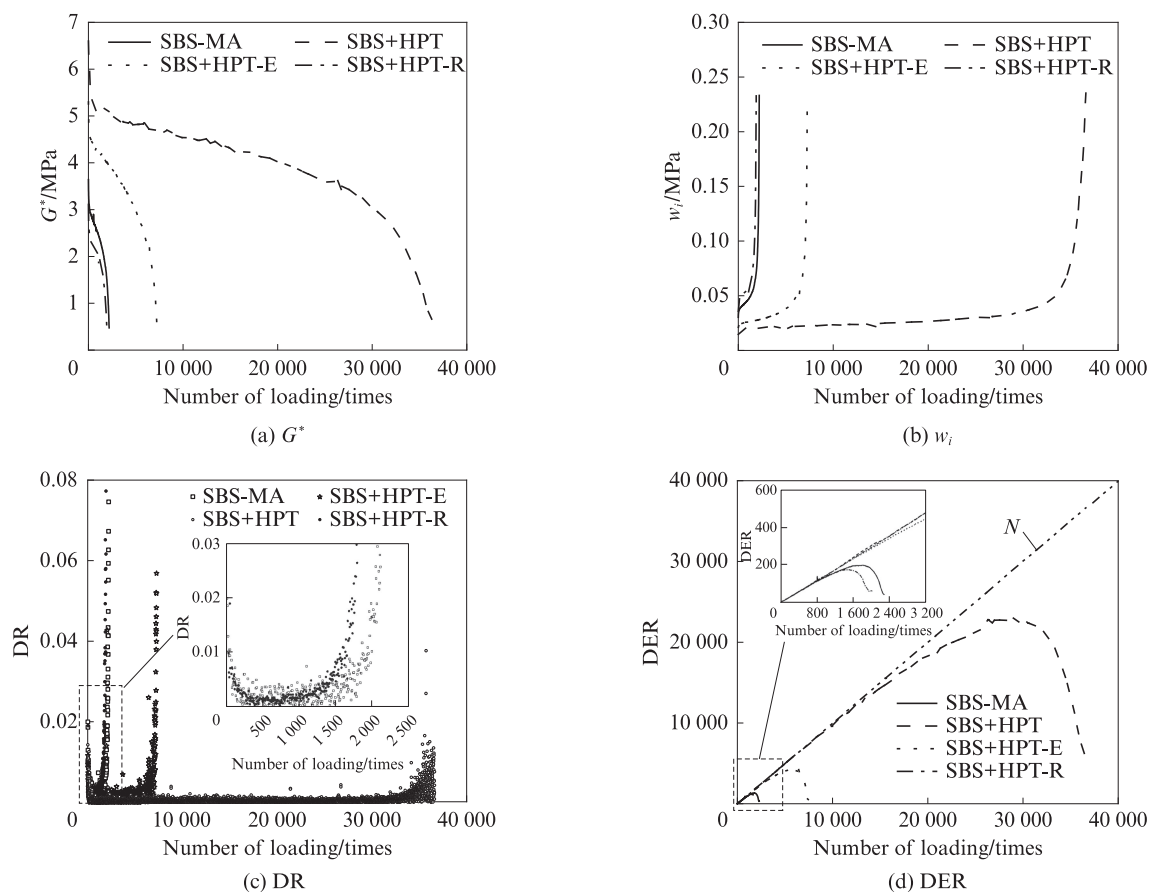


图6 改性沥青连续疲劳参数

Fig. 6 Fatigue parameters of modified asphalt under continuous loading

由图6(a)可知,4种改性沥青的复数模量 G^* 均随着加载次数的增加而逐渐下降,其中SBS+HPT的 G^* 降低速度最为缓慢,而SBS+HPT-R与SBS-MA的 G^* 几乎呈直线下降,这表明SBS+HPT具有最长的疲劳寿命.图6(b)、(c)显示,随着加载次数的增加,4种改性沥青的 w_i 和DR均先缓慢上升,接着在达到破坏点后急速增加.与2.1中微观特性规律一致,采用 w_i 、DR确定的SBS+HPT疲劳寿命明显大于另外3种改性沥青.由图6(d)可知,随着加载次数的增加,4种改性沥青的DER均先与直线 N 重合,后逐渐偏离直线 N .综上,通过 G^* 、 w_i 、DR和DER确定的疲劳寿命相近,4种改性沥青中SBS+HPT的疲劳寿命最佳,约为SBS-MA的16倍,其次为SBS+HPT-E,其疲劳寿命为SBS-MA的3倍多,而SBS+HPT-R对改性沥青连续加载条件下的疲劳性能有轻微劣化作用.

ATR-FTIR和AFM分析表明:因HPT中存在

胺基和羟基,故SBS+HPT具有最密实的网络结构,因此在相同的加载次数下,其疲劳寿命最高;HPT-R中的羰基不易与沥青或SBS改性剂发生分子相互作用,故此种添加剂并未对改性沥青的疲劳寿命产生显著影响;HPT-E中的胺基对SBS相网络密度的增加作用弱于HPT,但强于HPT-R(见图2(c)、(g)),故SBS+HPT-E的疲劳寿命介于SBS+HPT和SBS+HPT-R之间.

因连续加载条件下 G^* 、 w_i 、DR和DER确定的疲劳寿命相近,而向浩等^[22]认为将 G^* 作为疲劳参数是较为合理的.故在间歇加载试验中,仅将 G^* 和其对应的相位角 δ 列出,结果见图7.由图7可知,在间歇加载条件下,改性沥青 G^* 和 δ 的变化趋势相较连续加载条件下均有所减缓.在不考虑触变性影响的前提下,复数模量的降低表明改性沥青网络结构发生了一定程度的破坏,导致沥青内应力增加,从而发生损伤;而相位角的增加表示改性剂的作用减弱,使沥青向

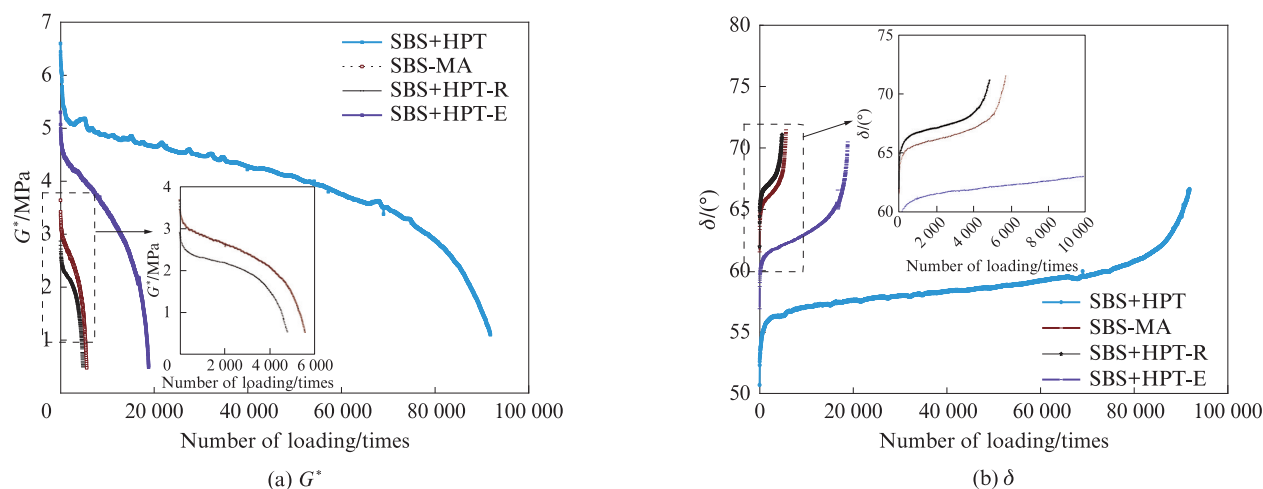


图7 改性沥青间歇疲劳参数

Fig. 7 Fatigue parameters of modified asphalt under intermittent loading

黏性流体靠拢.对比图6、7可见,随加载次数增加,SBS+HPT在间歇、连续加载条件下的复数模量、相位角变化缓慢,SBS+HPT-E居中,而SBS+HPT-R变化最快,基本接近SBS-MA.这说明在连续和间歇加载条件下,HPT和HPT-E均可增加SBS改性沥青的网络结构强度,延缓复数模量的衰减和相位角的增加,其中HPT的作用效果最佳.

根据连续和间歇加载条件下以 G^* 确定的疲劳寿命(见表2),可根据式(1)计算改性沥青的自愈合系数HI.HI越高,表明改性沥青的自愈合能力越好.自愈合系数HI的结果也列于表2.

$$HI = \frac{N_{p50-rest} - N_{p50}}{N_{p50}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_{p50} 、 $N_{p50-rest}$ 分别为在连续和间歇加载条件下基于 G^* 确定的疲劳寿命.

由表2可知:在连续和间歇加载条件下,SBS+HPT的疲劳寿命均最高,SBS+HPT-E次之;对于SBS+HPT-R,其在间歇加载条件下的疲劳寿命高于SBS-MA,而在连续加载条件下低于SBS-MA.间歇加载条件下改性沥青的疲劳寿命与微观试验结果相吻合,表明在进行疲劳性能测试时,应考虑其自愈特性,这也与沥青路面的实际情况相符.从自愈合系数来看,掺加乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂的SBS改性沥青HI值均高于SBS-MA,HI从大到小排序为SBS+HPT-R>SBS+HPT-E>SBS+HPT>SBS-MA,此结果表明,在25℃条件下,乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂可提升SBS改性沥青的自愈特性.

综上:HPT可显著延长SBS改性沥青在连续和间歇加载条件下的疲劳寿命,对自愈特性改善较弱;HPT-R对SBS改性沥青疲劳性能影响较小,而以其制备的改性沥青自愈合系数最大;HPT-E对SBS改

表2 改性沥青疲劳寿命及自愈合系数
Table 2 Fatigue life and self-healing parameter of modified asphalts

Parameter	SBS-MA	SBS+HPT	SBS+HPT-E	SBS+HPT-R
N_{p50}/times	1 758	28 330	5 775	1 559
$N_{p50-rest}/\text{times}$	5 064	86 975	21 187	5 947
HI/%	188.1	207.0	266.9	281.5

性沥青疲劳、自愈特性的作用效果介于HPT和HPT-R之间.

3 结论

(1)红外光谱和原子力显微镜测试结果显示,3种乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂均可促使沥青轻组分填充至SBS相,富含胺基和羟基的SBS+HPT具有密实的聚合物相网络结构,含胺基的SBS+HPT-E网络结构较SBS+HPT略差,而含羰基的SBS+HPT-R网络结构略优于SBS-MA.

(2)SBS+HPT和SBS+HPT-E具有相似的组分聚集状态,而SBS+HPT-R和SBS-MA的组分聚集状态相近;HPT对改性沥青低温柔韧性的影响不大,HPT-R可提高改性沥青的低温柔韧性.

(3)SBS+HPT和SBS+HPT-E的70℃损耗因子 $\tan \delta$ 相比SBS-MA显著降低,其中前者降低幅度较大,而与SBS-MA相比,SBS+HPT-R的70℃ $\tan \delta$ 降低幅度甚微;SBS+HPT具有最佳的疲劳寿命,其次为SBS+HPT-E,SBS+HPT-R的疲劳寿命与SBS-MA相近;3种乙撑硬脂酸酰胺类塑料润滑剂均可提高SBS改性沥青的自愈特性.

(4)改性沥青的官能团分布特性与微观相态分布密切相关,决定改性沥青组分聚集状态.结合微观

测试和宏观疲劳试验结果可知,对3种复合改性沥青而言,聚合物相网络结构越密实,损耗因子越低,疲劳性能越好.可见,合理选用塑料润滑剂可降低改性沥青的损耗因子,增加疲劳寿命.

参考文献:

- [1] 单丽岩. 基于粘弹特性的沥青疲劳-流变机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
SHAN Liyan. Fatigue and rheology mechanism of asphalt binder based on viscoelastic characteristic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] CAO W, WANG C. Fatigue performance characterization and prediction of asphalt binders using the linear amplitude sweep based viscoelastic continuum damage approach[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 119:112-125.
- [3] 李辉, 罗雪, 张裕卿. 基于耗散伪应变能的沥青疲劳动力学表征[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):115-124.
LI Hui, LUO Xue, ZHANG Yuqing. Pseudo energy-based kinetic characterization of fatigue in asphalt binders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10):115-124. (in Chinese)
- [4] 王明, 林发金, 刘黎萍. 基于简化能量耗散率的岩沥青改性沥青疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6):1024-1027, 1032.
WANG Ming, LIN Fajin, LIU Liping. Fatigue performance of rock asphalt modified asphalts based on reduced dissipated energy ratio[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):1024-1027, 1032. (in Chinese)
- [5] 谭华, 胡松山, 刘斌清, 等. 基于流变学的复合改性橡胶沥青黏弹特性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1):115-122.
TAN Hua, HU Songshan, LIU Binqing, et al. Study on viscoelastic properties of rubber modified asphalt based on rheology[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1):115-122. (in Chinese)
- [6] 王立志, 常志慧, 郑广顺, 等. 低阻尼改性沥青流变性能与微观结构研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(3):1-8.
WANG Lizhi, CHANG Zhihui, ZHENG Guangshun, et al. Rheological properties and microstructure of low damping modified asphalt[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(3):1-8. (in Chinese)
- [7] 李嘉, 陈硕, 张景伟, 等. 基于动态热机械分析的非水反应高聚物材料动态黏弹特性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1398-1409.
LI Jia, CHEN Shuo, ZHANG Jingwei, et al. Dynamic viscoelastic property of non-water reacted polymer materials based on dynamic thermomechanical analysis[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1398-1409. (in Chinese)
- [8] 张广泰, 李悦, 陈柳灼, 等. 废机油活化废旧轿车轮胎胶粉改性沥青的流变性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):320-326.
ZHANG Guangtai, LI Yue, CHEN Liuzhuo, et al. Rheological properties of the asphalt modified by the activated rubber in the presence of waste engine oil[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):320-326. (in Chinese)
- [9] 智杰颖. 橡胶黏弹性滞后生热及热氧老化的实验及多尺度模拟[D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHI Jieying. Experiment and multi-scale simulation of rubber viscoelastic hysteresis heat generation and thermo-oxidative aging [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [10] 高天明, 吕臻, 夏加亮, 等. 沥滤法制备低蛋白天然橡胶的性能表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(1):70-74, 82.
GAO Tianming, LÜ Zhen, XIA Jialiang, et al. Performance characterization of low-protein natural rubber prepared by leaching method[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2020, 36(1):70-74, 82. (in Chinese)
- [11] 刘娟, 高利, 刘亮亮, 等. 巨型工程机械子午线轮胎高弹性、低生热胎体胶的性能研究[J]. 轮胎工业, 2019, 39(2):99-101.
LIU Juan, GAO Li, LIU Liangliang, et al. Properties of carcass with high elasticity and low heat build-up for giant off-the-road radial tire[J]. Tire Industry, 2019, 39(2):99-101. (in Chinese)
- [12] GANGULY S, CHAKRABORTY S, BANERJEE A N, et al. Effect of meta-dihydroxy benzene as a surface modifier on filler-filler and filler-polymer interaction of carbon black polymer composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 85(9):2025-2033.
- [13] ALEX R, SASIDHARAN K K, KURIAN T, et al. Carbon black master batch from fresh natural rubber latex[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2011, 40(8):420-424.
- [14] WEIGEL S, STEPHAN D. Differentiation of bitumen according to the refinery and ageing state based on FTIR spectroscopy and multivariate analysis methods[J]. Materials and Structures, 2018, 51(5):130.
- [15] SUN X T, YUAN H F, SONG C F, et al. Rapid and simultaneous determination of physical and chemical properties of asphalt by ATR-FTIR spectroscopy combined with a novel calibration-free method[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230:116950.
- [16] LUO S, TIAN J H, LIU Z M, et al. Rapid determination of styrene-butadiene-styrene (SBS) content in modified asphalt based on Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and linear regression analysis [J]. Construction and Building Materials, 2020, 151:107204.
- [17] FISCHER H R, DILLINGH E C. On the investigation of the bulk microstructure of bitumen-introduction two new technique [J]. Fuel, 2014, 118:365-368.
- [18] POLACCO G, FILIPPI S, MERUSI F, et al. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 224, 72-112.
- [19] 李晓民, 魏定邦, 姚志杰, 等. 再生剂对老化沥青流变性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):992-999.
LI Xiaomin, WEI Dingbang, YAO Zhijie, et al. Effects of rejuvenators on rheological properties and microstructures of aged asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):992-999. (in Chinese)
- [20] 王明, 刘黎萍, 罗东. 纳米尺度沥青微观结构特征演化分析[J].

- 中国公路学报, 2017, 30(1):10-16.
- WANG Ming, LIU Liping, LUO Dong. Analysis of nanoscale evolution features of microstructure of asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1):10-16. (in Chinese)
- [21] 张红. 应力、应变控制模式下沥青疲劳损伤差异机理分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHANG Hong. Mechanism analysis of the differences of asphalt fatigue damage under stress and strain control mode[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 向浩, 何兆益, 陈柳晓, 等. 考虑自愈补偿的再生沥青疲劳性能分析[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):1005-1011.
- XIANG Hao, HE Zhaoyi, CHEN Liuxiao, et al. Fatigue performance analysis regenerated asphalt considering self-healing compensation[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 1005-1011. (in Chinese)
- [23] 陈柳晓, 向浩, 何兆益, 等. 基于DSR的沥青胶结料自愈合评价指标分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3):493-498.
- CHEN Liuxiao, XIANG Hao, HE Zhaoyi, et al. Analysis of self-healing evaluation index of asphalt binder based on DSR[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3):493-498. (in Chinese)