



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406579

引用格式:张齐超,王鹏,徐涛,等. SBS溶胀程度对其改性沥青流变性能影响及内在机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(20): 8674-8681.
Zhang Qichao, Wang Peng, Xu Tao, et al. Influence of SBS swelling degree on rheological properties of modified asphalt and its internal mechanism[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8674-8681.

SBS溶胀程度对其改性沥青流变性能影响 及内在机理

张齐超, 王鹏*, 徐涛, 董晓康, 郑祺栋, 王海雨, 李璐

(山东建筑大学交通工程学院, 济南 250101)

摘要 由于苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性沥青结构与性能之间的本构关系不明确,目前提高SBS改性沥青性能的方式仍是单纯提高其SBS含量,然而路面早期病害依旧频发。为了在不增加SBS含量情况下,探明SBS的溶胀程度对改性沥青流变性能的影响及其内在机理。采用荧光显微镜观察SBS改性沥青微观形貌,以动态剪切流变仪分析SBS改性沥青的常规性能与流变性能,利用分子动力学揭示SBS溶胀程度对其改性沥青性能影响的内在机理。结果表明:完全溶胀状态的星线共混型SBS改性沥青具有更高的溶胀面积,在常规性能,流变性能以及抗老化性能方面具有明显的性能优势。分子模拟则表明SBS的完全溶胀使得SBS改性沥青的径向分布函数峰更高,提升了SBS改性沥青中SBS分子与轻组分之间的交互作用,在保持了原有稳定沥青胶体结构的基础上使得SBS苯乙烯端相互连接,形成 π - π 共轭,提升了SBS网络的韧性。

关键词 苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青;溶胀网络;微观结构;流变性能;分子动力学模拟;分子交互作用
中图分类号 U414; **文献标志码** A

Influence of SBS Swelling Degree on Rheological Properties of Modified Asphalt and Its Internal Mechanism

ZHANG Qi-chao, WANG Peng*, XU Tao, DONG Xiao-kang, ZHENG Qi-dong, WANG Hai-yu, LI Lu

(School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

[Abstract] Due to the unclear constitutive relationship between the structure and performance of styrene-butadiene-styrene block copolymer(SBS) modified asphalt, the current way to improve the performance of SBS modified asphalt is still to simply increase its SBS content. However, early pavement diseases are still frequent. To explore the effect of swelling degree of SBS on the rheological properties of modified asphalt and its internal mechanism without increasing SBS content. The microstructure of SBS modified asphalt was observed by fluorescence microscope. The conventional properties and rheological properties of SBS modified asphalt were analyzed by dynamic shear rheometer. The internal mechanism of the influence of SBS swelling degree on the performance of SBS modified asphalt was revealed by molecular dynamics. The results show that the fully swollen star-line blended SBS modified asphalt has a higher swelling area, and has obvious performance advantages in terms of conventional performance, rheological properties and anti-aging properties. Molecular simulation shows that the complete swelling of SBS makes the radial distribution function peak of SBS modified asphalt higher, which improves the interaction between SBS molecules and light components in SBS modified asphalt. On the basis of maintaining the original stable asphalt colloid structure, SBS styrene ends are interconnected to form π - π conjugate, which improves the toughness of SBS network.

[Keywords] styrene-butadiene-styrene block copolymer(SBS) modified asphalt; swelling network; microstructure; rheological properties; molecular dynamics; molecular interaction

在沥青改性领域,苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性沥青不仅提高了路面的耐久性,还降低了维护成本^[1-3],是目前提高沥青应用性能的有效方法。SBS

是一种具有双边相形态的热塑性弹性体,由硬段的聚苯乙烯(polystyrene, PS)和软段的聚丁二烯(polybutadiene, PB)组成。当适量SBS与沥青混合时, PB吸收沥青中的轻组分发生溶胀,而PS基本不变,从

收稿日期: 2024-09-02; 修订日期: 2025-04-27

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023ME037)

第一作者: 张齐超(2000—),男,汉族,山东济南人,硕士研究生。研究方向:路面材料。E-mail:wo775779361@163.com。

*通信作者: 王鹏(1984—),女,汉族,新疆伊犁人,博士,副教授。研究方向:路面材料。E-mail:wangpeng0462@sdjzu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

而在沥青中形成“刚柔并济”的三维网络结构,极大改善了沥青的抗病害能力。然而,因为对结构-性能之间本构关系的不明确,盲目地提高 SBS 的含量,即使它们在改性沥青工厂时达到了质量标准,仍会导致路面耐久性不足,且在高温存储过程中的相分离严重,早期路面病害频发。

目前,学者们基于荧光显微镜图像提出了改性剂的均匀分散和粒度特征参数^[4-6],探究 SBS 改性沥青微观结构与宏观性能之间的联系^[7-8]。陈向东等^[9]、屈鑫等^[10]利用荧光显微镜、动态剪切流变仪观察到,特定的显微形态参数可以较好地软化点、复数模量等宏观性能进行预测。庞拓等^[11]、Qian 等^[12]研究发现,SBS 掺量及其在沥青中的溶胀分散程度会影响改性沥青的流变性能,但这种关系的确切联系尚不明确,该研究仅限于对 SBS 改性沥青性能改善的措施,而没有系统地研究影响其改性沥青性能的内在机理。

分子动力学(molecular dynamics, MD)是一种强大的工具,被广泛应用于各领域的微观研究^[13],可以从分子层面上了解改性沥青的分子相互作用和纳米结构演变^[14-15]。Yang 等^[16]采用分子动力学预测了聚丁二烯、聚苯乙烯和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物的物理性能,证实了 MD 在材料设计上的可行性。汪海年等^[17]对分子模拟在沥青中的应用进行了系统综述。Wheeler^[18]关注 SBS 与沥青组分之间的相互作用,认为 SBS 相的分布与 SBS 的含量密切相关^[19]。研究表明,沥青中 SBS 含量会影响分子之间的相互作用,进而影响改性沥青的流变性能,但并不明确在一定 SBS 含量情况下的 SBS 溶胀分散状态对其改性沥青分子相互作用的影响,以及与性能之间的关系。

鉴于此,为综合 SBS 改性沥青宏观性能与微观纳米结构,阐明 SBS 溶胀程度对其改性沥青流变性能的影响及其内在的分子相互作用机理,解决现有 SBS 改性沥青性能衰减过快导致早期病害频发的问题。首先,通过荧光显微镜实验,观察不同溶胀程度下改性沥青的微观结构,并通过宏观性能对比,分析不同溶胀程度下对星线共混型 SBS 改性沥青性能的影响;利用分子动力学研究 SBS 改性沥青的纳米结构特征,包括改性沥青的胶体结构,SBS 分子扩散系数,SBS 的相态分布,了解 SBS 之间以及 SBS 与轻组分之间的选择性聚集,以从分子层面验证宏观实验所得出结论的可靠性。

1 实验材料与测试方法

1.1 实验材料

采用齐鲁 70 #基质沥青,性能如表 1 所示。

表 1 齐鲁 70 #基质沥青基础指标

Table 1 Basic indexes of Qilu 70 # matrix asphalt

沥青种类	针入度(25 °C)/ 0.1 mm	软化点/ °C	延度(15 °C)/ cm	老化后延度 (15 °C)/cm
齐鲁 70#	69	48.3	>100	5.2

研究星线共混型 SBS 改性沥青,线型采用独山子 6302-SBS 改性剂,星型采用中石化 4303-SBS 改性剂。稳定剂为大山路桥硫磺交连稳定剂。采用液体橡胶油降低改性沥青的黏度,增加轻组分提升聚合物溶胀程度。选用 A16 作为外添加剂,阻止沥青质分子聚集,提高沥青质分子稳定性。

1.2 SBS 改性沥青制备配方及工艺

通过调整橡胶油的掺量制备 4 种不同溶胀程度的 SBS 改性沥青,分别为线型对比样品,完全溶胀样品,部分溶胀样品及未溶胀样品,并对其进行旋转薄膜烘箱沥青短期老化试验获得沥青短期老化样品,具体 SBS 改性沥青制备方法如下。

(1)将基质沥青放入烘箱中加热至流动状态。

(2)使用剪切机进行剪切,温度控制在(175 ± 5) °C。当剪切速率达到 4 000 r/min 时,向基质沥青中加入星型 SBS 改性剂、线型 SBS 改性剂与外添加剂,剪切 30 min。

(3)更换为搅拌机,温度定为 177 °C,搅拌速度调至低速,以 800 r/min 的搅拌速率向沥青中加入橡胶油及稳定剂搅拌 2.5 h。

1.3 测试方法

1.3.1 荧光显微镜(FM)试验

荧光显微镜是常用的表征 SBS 改性沥青形态的直观方法,SBS 相由于其独特的结构,会出现黄色荧光,利用荧光显微镜可以清晰直观地观察到两相结构的分布,对 SBS 的溶胀程度进行定量分析^[20-21],且可基于荧光显微图像进行 SBS 面积比计算^[22],分析 SBS 的溶胀程度。观察 4 种 SBS 改性沥青荧光显微镜图,并利用 MATLAB 软件处理荧光显微图得到 SBS 颗粒溶胀面积,对其进行对比分析研究。

1.3.2 动态剪切流变仪(DSR)试验

动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)是评价高分子化合物流变性的一种通用设备,可对沥青进行高温稳定性、抗疲劳等性能测试。温度扫描试验温度控制在 52 ~ 76 °C,间隔 6 °C,频率固定(10 rad/s),绘制抗车辙因子曲线。频率扫描试验温度控制在 45 ~ 75 °C,间隔 10 °C,频率 1.0 ~ 100 Hz,并对频率扫描数据进行处理,绘制复数模量主曲线。剪切实验是在 60 °C 条件下持续施加 60 s 剪切率为 2 s⁻¹的作用力,来测算沥青的剪切力,并通

过式(1)计算网络强度^[23],表征 SBS 改性沥青维持网络结构不被破坏的能力。

$$I = \frac{S_p}{S_s} \quad (1)$$

式(1)中: I 为网络强度; S_p 为剪切应力峰值; S_s 为剪切应力平缓值。

1.3.3 分子动力学模拟

采用组装法构建沥青分子模型,以四组分代表性化合物为输入参数构建分子模型。对于构建后的分子模型使用 Forcite 模块进行模拟,得到平衡后的分子模型,并分析其径向分布函数及均方位移。径向分布函数是以给定粒子为原点,以此为圆心寻找半径为 r 的球体内粒子出现的概率,代表所分析分子的聚集状态。均方位移是体系内的所有粒子经过一定时间后,其移动的距离与所有粒子移动距离绝对值差的平方和,代表粒子在体系内的扩散及位移的程度。

2 结果与讨论

2.1 SBS 改性沥青中 SBS 的溶胀程度分析

使用荧光显微镜对老化前后 8 个样品进行微观形貌观测,如图 1 所示。

通过控制橡胶油的添加量得到 SBS 不同的溶胀状态,随着橡胶油掺量的增加,SBS 溶胀程度逐步增高。从图 1(a)、图 1(b)可以看出,完全溶胀状态下的 SBS 分布均匀,大小相似,分散程度、网络结构状态表现良好。图 1(c)表明部分 SBS 轻组分吸收不足,无法完全溶胀,因此 SBS 颗粒大小不同,且分散程度较差,图 1(d)中 SBS 颗粒大小不同的现象更加明显。老化后的荧光显微图,图 1(e)~图 1(h)表现与老化前特征相似。借助图像处理软件分析图 1 中荧光面积所占比例,变化趋势如图 2 所示。

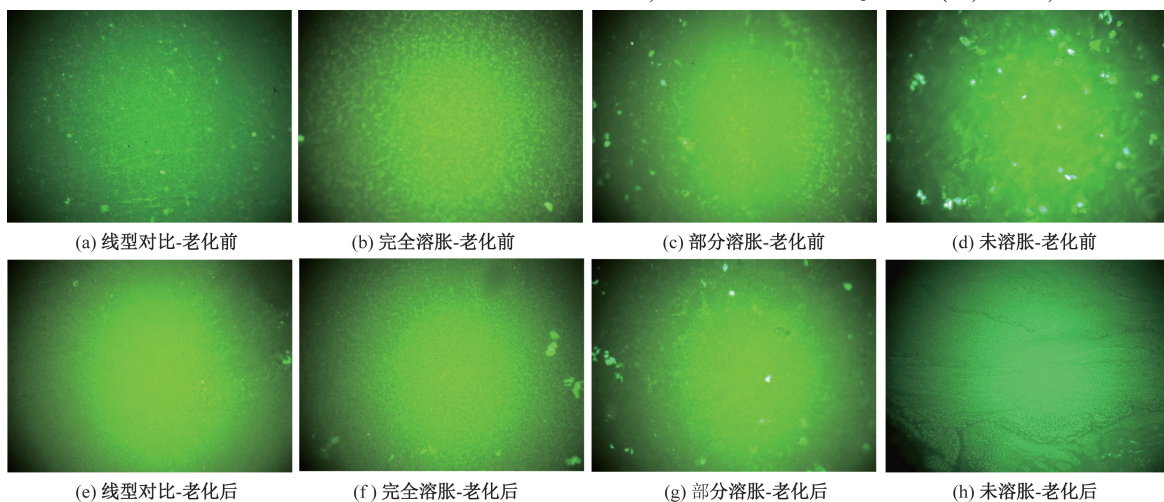


图 1 SBS 改性沥青荧光显微图(20×)

Fig. 1 Fluorescence micrograph of SBS modified asphalt(20×)

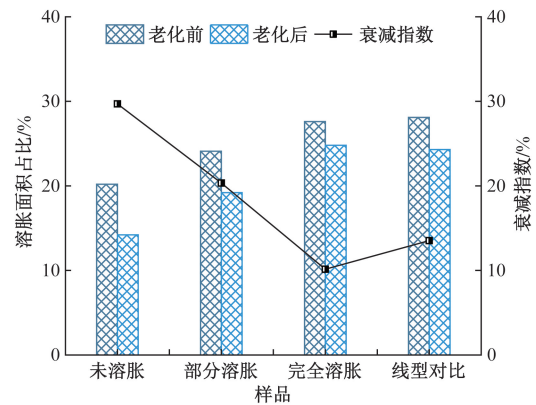


图 2 SBS 溶胀程度

Fig. 2 SBS swelling degree

线型对比样品相较其他样品提高 0.5% SBS 掺量,老化前具有更大的溶胀面积,但在与完全溶胀样品相同橡胶油掺量的情况下,并没有达到 SBS 的完全溶胀,老化后溶胀面积衰减指数更大。对比 3 种星线共混型 SBS 改性沥青,溶胀面积与橡胶油掺量呈正比,随着橡胶油掺量的增加,溶胀面积随之增加。衰减指数大小则表现出,溶胀面积越低,老化后的面积衰减更大。表明良好的溶胀状态可以有效抵抗老化后溶胀面积的减小。

2.2 SBS 改性沥青关键技术性能分析

2.2.1 常规性能指标

SBS 改性沥青常规性能,以老化前后延度、老化前后软化点及针入度为表征指标,结果如图 3 所示。

由图 3(a)可知,对于延度,完全溶胀样品老化前后延度均最大,而部分溶胀样品最小。除未溶胀样品衰减指数较大为 35% 之外,剩余 3 种样品衰减指数差距较小,处在 27%~30%。表明在 SBS 沥青延度方面,完全溶胀样品与线型 SBS 改性沥青相当,优于未溶胀样品。图 3(b)显示,老化前后部分

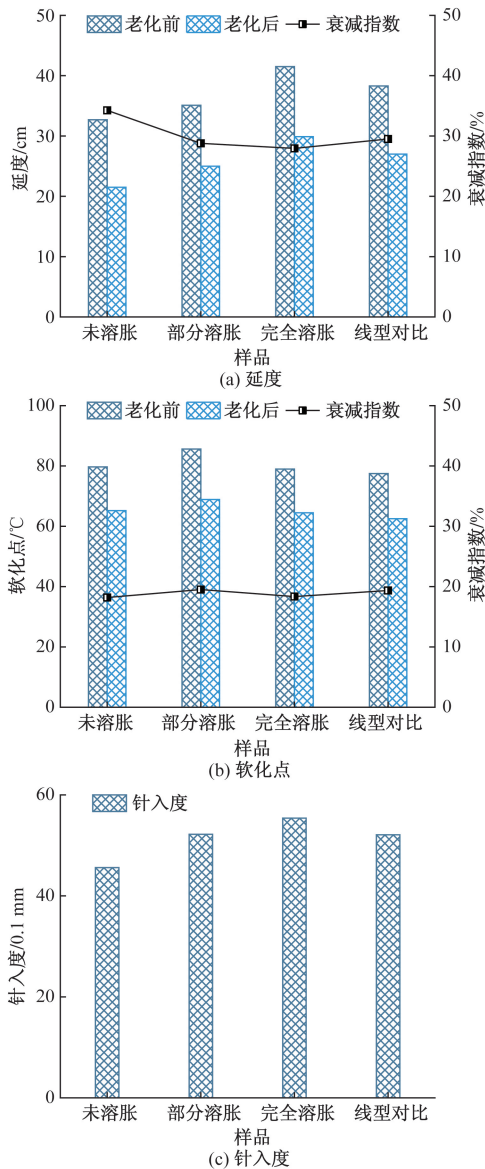


图3 老化前后 SBS 改性沥青常规性能指标

Fig. 3 Conventional performance indexes of SBS modified asphalt before and after aging

溶胀与未溶胀样品软化点高于完全溶胀与线型对比样品, 衰减指数差异较小。这是因为部分溶胀与未溶胀样品橡胶油掺量较低, SBS 无法进行完全的溶胀, 沥青偏硬, 导致软化点较高。分析图 3(c) 可知, 完全溶胀与线型对比样品则具有更高的针入度。表明随着橡胶油掺量的增加, 沥青内部轻组分含量增加, 降低了沥青硬度, 同时使得 SBS 完全溶胀, 从而具有更高的针入度。

2.2.2 流变性能分析

(1) 温度扫描试验。温度扫描试验温度范围为 52 ~ 76 °C, 温度间隔为 6 °C, 对老化前后 8 种沥青样品进行测试, 老化前后的车辙因子 ($G^*/\sin\delta$) 变化情况如图 4 所示, 其中, G^* 为动态剪切复数劲度

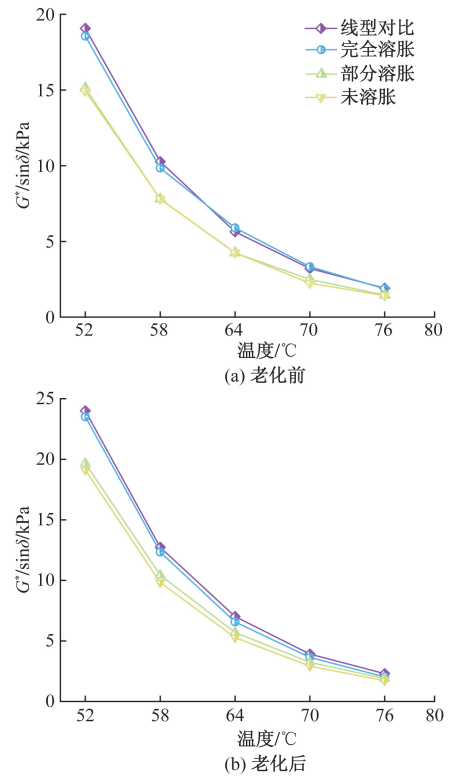


图4 老化前后 SBS 改性沥青抗车辙因子

Fig. 4 Anti-rutting factor of SBS modified asphalt before and after aging

模量, 相位角 δ 是沥青结合料的弹性 (可恢复部分) 与黏性 (不可恢复部分) 成分的比例指标。

从图 4 可以看出, 无论老化前后, 4 种 SBS 改性沥青随着温度的升高, 沥青的抗车辙因子降低。老化前后完全溶胀样品的 $G^*/\sin\delta$ 与线型对比样品相当, 抗车辙因子差别很小, 且高于相同 SBS 掺量的部分溶胀与未溶胀样品, 但老化后 $G^*/\sin\delta$ 显著增加。 $G^*/\sin\delta$ 升高代表沥青在发生形变时抵抗变形的能力增强, 老化后沥青质增多, 轻组分减少, 沥青在相同温度下表现为变硬变脆, 具有更强的抵抗变形的能力, 表明随着 SBS 的溶胀程度增加, 低 SBS 掺量但完全溶胀的星线共混型 SBS 改性沥青高温黏弹性能与更高 SBS 掺量的纯线型 SBS 改性沥青相当, 具有良好的高温稳定性。

(2) 频率扫描试验。借助动态剪切流变仪对所选沥青样品进行频率扫描试验, 并建立 G^* 主曲线, 如图 5 所示。可以看出, 4 种 SBS 改性沥青在老化前后, 其 G^* 主曲线的形态基本一致, 并且随换算频率的增加而增大。在高温低频区 G^* 较大, 则在高温低速行驶条件下, 沥青的抗变形性能较好, 其高温低频区 G^* 主曲线的具体大小排布为: 完全溶胀 > 线型对比 > 部分溶胀 > 未溶胀, 完全溶胀样品最优。在低温高频区 G^* 越小, 低温快速行车状态下材料

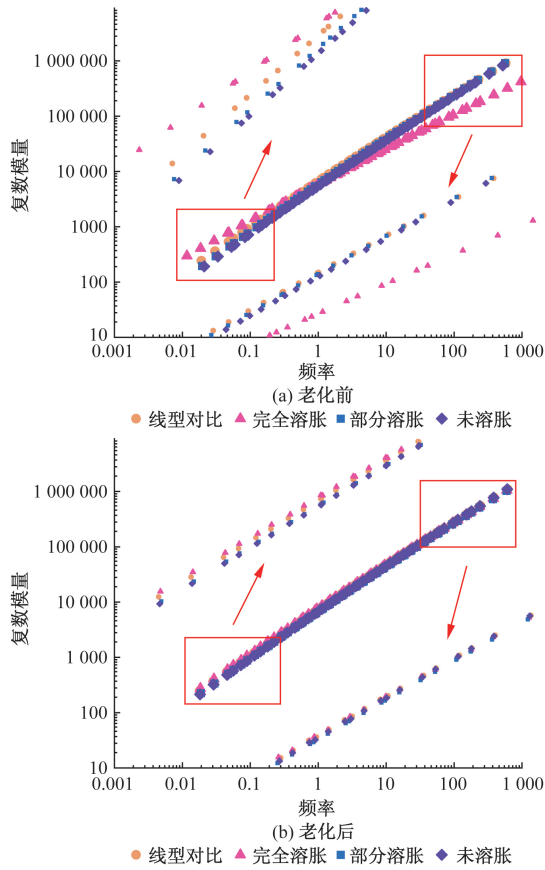


图5 老化前后 SBS 改性沥青复数模量主曲线
Fig. 5 Main curve of complex modulus of SBS modified asphalt before and after aging

抗开裂能力越好。老化前低温高频区 G^* 主曲线具体排布为:未溶胀 > 部分溶胀 > 线型对比 > 完全溶胀,老化后 4 种 SBS 改性沥青的 G^* 主曲线模量相差不多,抗开裂能力性能差距不大。综上所述,随着 SBS 的完全溶胀,低掺量星线共混型 SBS 改性沥青老化前后在低频区与高频区的模量均与更高 SBS 掺量的纯线型 SBS 改性沥青相当,优于 SBS 溶胀不完全的样品,具有良好的性能。

(3) 剪切试验。借助动态剪切流变仪,对所选 8 种沥青样品进行剪切试验,所得剪切应力与时间关系曲线如图 6 所示。老化前 SBS 改性沥青剪切应力变化从图 6 中难以观察到明显的峰值存在,因为 SBS 改性沥青老化前交联结构更强,短时间剪切应力不会降低,经过老化后的 SBS 改性沥青剪切应力会迅速到达某个峰值,而后逐步减小并趋于稳定。综合来看,4 种 SBS 沥青的峰值不同,峰值和平缓值的比率也有差异,可以用峰值和平缓值之比来描述 SBS 改性沥青的网络结构强度,记为 I 。老化前后 SBS 改性沥青样品网络强度 I 如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,无论老化前后,完全溶胀样品的 I 最高,线型对比样品次之,部分溶胀与未

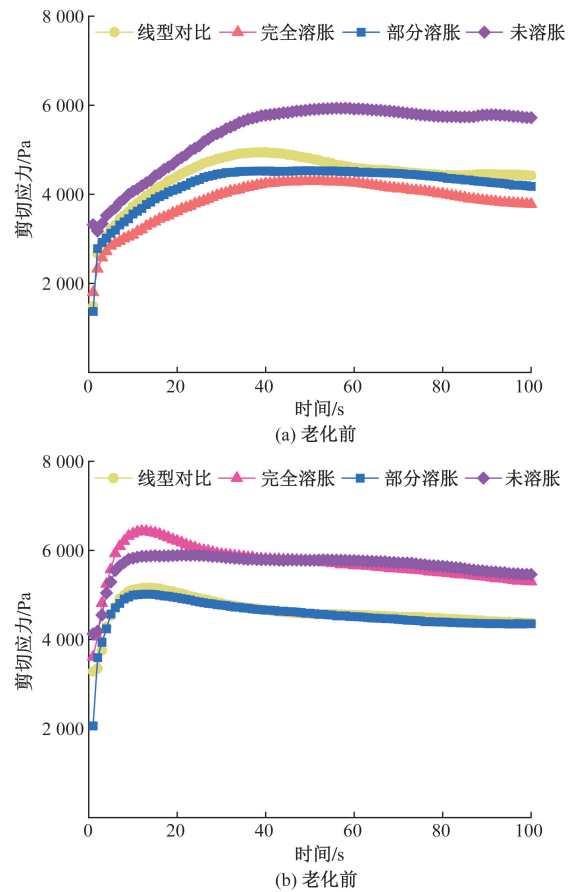


图6 SBS 改性沥青剪切应力
Fig. 6 SBS modified asphalt shear stress

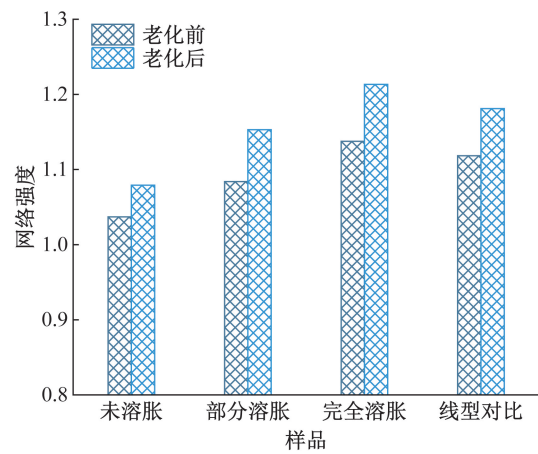


图7 老化前后 SBS 改性沥青网络强度
Fig. 7 Strength of SBS modified asphalt network before and after aging

溶胀样品 I 最低。SBS 在沥青中会不断地吸收轻组分进行溶胀,使得 SBS 分子链舒展,发生交联反应,随着 SBS 溶胀程度的增加,SBS 会与沥青产生整体的交联结构。综上所述,SBS 的溶胀对于网络强度有着增强作用。随着 SBS 溶胀程度的增加,可提高网络强度,使得完全溶胀的星线共混型 SBS

改性沥青可与更高 SBS 掺量的纯线型 SBS 改性沥青相当。

2.3 SBS 与沥青四组分交互作用分析

2.3.1 SBS 溶胀对其改性沥青胶体结构影响

对平衡后的 3 种 SBS 改性沥青分子模型的胶体结构进行分析得到图 8。单个 SBS 分子在沥青质中分散得很好,SBS 分子与沥青质紧密接触,共同构建极性胶体核,并被充足的饱和分和芳香分包围。即使完全溶胀的星线共混型 SBS 改性沥青分子模型中的 SBS 分子胶体结构分散最广,但对饱和分、芳香分的分散影响不大。因此,完全溶胀 SBS 改性沥青的纳米结构保留了沥青的胶体结构。

2.3.2 SBS 溶胀对分子交互作用影响

图 9 为对 3 种 SBS 改性沥青模型进行分析后得到的相态分布图与分子快照。

图 9(a) 显示线型对比样品相图颜色分布均匀且较浅,表明 SBS 整体在体系内的分布均匀但较为分散,SBS 之间的聚集行为较弱,形成的网络结构较弱。图 9(b) 在没有充分溶胀的情况下出现了线型 SBS 与星型 SBS 在某个位置的大分子聚集行为,在 SBS 聚集的位置相图颜色较深,其余地方则为空白,分布极不均匀。经过充分溶胀的 SBS 改性沥青图 9(c) 中 SBS 整体分布均匀相图颜色更深,形成的网状结构覆盖范围更广且强度更大。从图 9(d) ~ 图 9(f) 可以看出,线型对比样品与未溶胀样品的 SBS 分子仅为简单的堆叠排列聚集,没有形成强有力的 $\pi-\pi$ 双键。完全溶胀后的 SBS 聚集行为则表现为线型 SBS 穿插环绕包围于星型 SBS 的支链旁,且线型 SBS 的苯环与星型 SBS 支链上的苯环形成多个 $\pi-\pi$ 双键,既有平行结构也有垂直结构,宏观

上对于改性沥青的体系稳定及性能增强具有十分显著的改善。

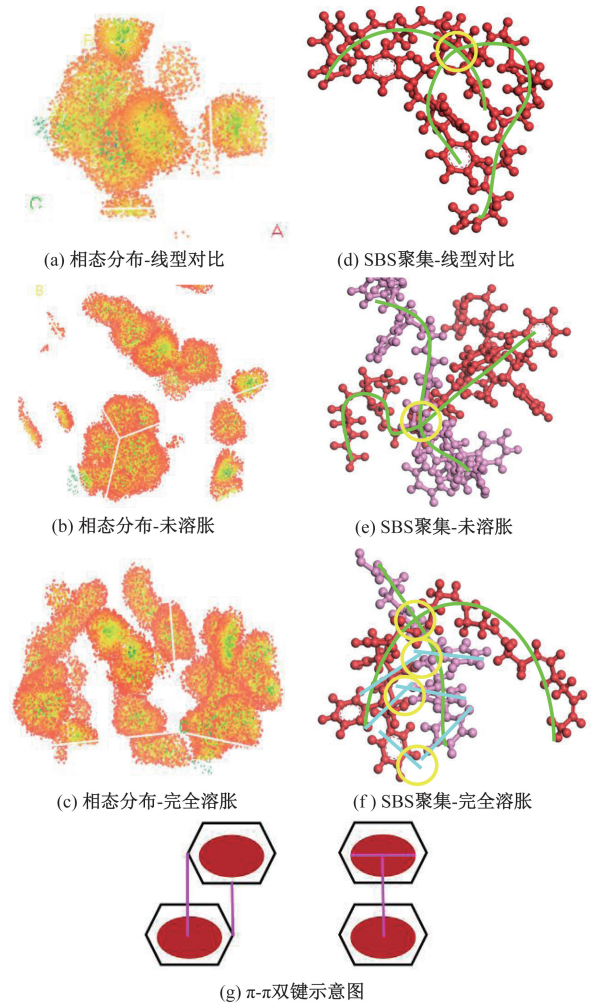


图 9 SBS 改性沥青模型中 SBS 的相态分布

Fig. 9 Phase distribution of SBS in SBS modified asphalt model

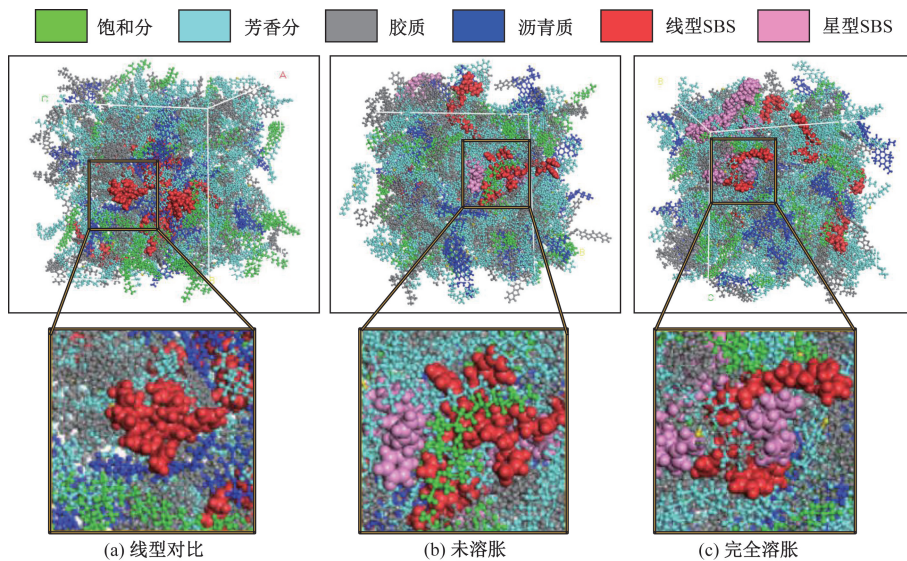


图 8 SBS 改性沥青的胶体结构

Fig. 8 Colloidal structure of SBS modified asphalt

径向分布函数的峰值越靠左、峰越高,则表明粒子的聚集越紧密、越强。图 10 为分子动力学模拟分析所得的径向分布函数曲线。

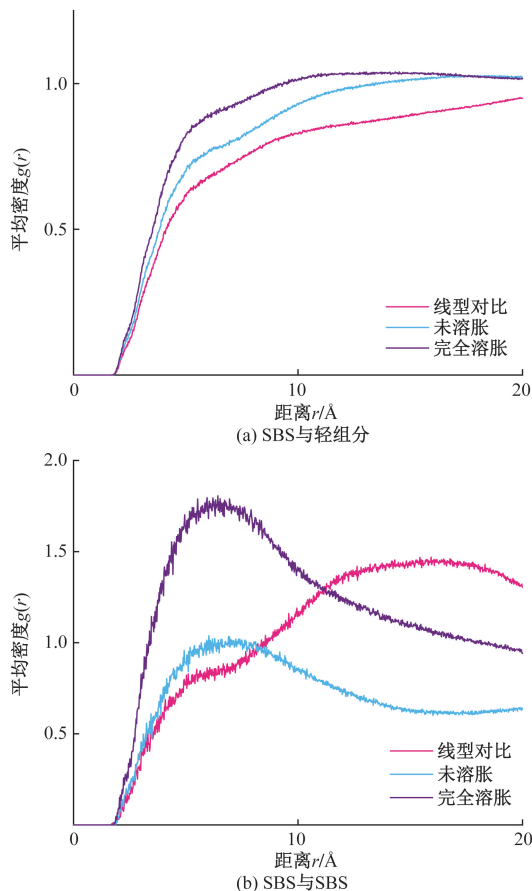


图 10 SBS 改性沥青模型的径向分布函数
Fig. 10 Radial distribution function of SBS modified asphalt model

由图 10(a)可知,完全溶胀样品 SBS 与轻组分之间的径向分布函数曲线最高,表明完全溶胀样品的 SBS 分子与轻组分结合的最好,验证了完全溶胀样品确实达到了较好的溶胀状态,且 SBS 的完全溶胀加强了 SBS 网络结构的形成。从图 10(b)可以看出,未溶胀样品 RDF 曲线峰值最小,径向分布函数值最小,而完全溶胀样品在 7 Å 处有明显的峰,显著高于其他样品的峰值且出现的更早,这证明了 SBS 的完全溶胀提高了 SBS 改性沥青体系中 SBS 的聚集行为,SBS 的聚集行为增强则在改性沥青体系中贡献了 SBS 网络的形成,使其更加稳定。

3 结论

(1)SBS 溶胀程度、溶胀面积随着橡胶油掺量的增加而增加。完全溶胀状态的 SBS 改性沥青,SBS 颗粒分布均匀,大小相似,网络结构状态良好。随着溶胀程度的增加,老化后的 SBS 溶胀面积衰减

更小。

(2)随着 SBS 溶胀程度的增加,其 SBS 改性沥青具有优异的常规性能,且抗车辙因子、复数模量、网络强度等流变性能均优于未溶胀样品。

(3)SBS 完全溶胀状态的 SBS 改性沥青分子模型仍保持了原有基质沥青的胶体结构,更加稳定,各组分遵循基质沥青胶体理论,其径向分布函数峰更高,SBS 与轻组分分子之间具有良好的交互作用。且 SBS 的完全溶胀使得 SBS 苯乙烯端相互连接,形成 π - π 共轭,提升了 SBS 网络的韧性。

参 考 文 献

- [1] Chen M, Geng J, Xia C, et al. A review of phase structure of SBS modified asphalt: affecting factors, analytical methods, phase models and improvements [J]. Construction and Building Materials, 2021, 294, 123610-480.
- [2] 朱洪洲, 谭祺琦, 杨孝思, 等. 纤维改性沥青混合料性能的研究现状与展望 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2573-2584.
Zhu Hongzhou, Tan Qiqi, Yang Xiaosi, et al. Research status and prospect of fiber modified asphalt mixture performance [J]. Science and Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2573-2584.
- [3] Wang Y, Yi H, Liang P, et al. Investigation on preparation method of SBS-modified asphalt based on MSCR, LAS, and fluorescence microscopy [J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7304-7315.
- [4] Luo Y, Zhang Z, Zhang H, et al. Performance optimization of high viscosity modified asphalt with SBS composite modifier and comparison of different high viscosity modified asphalts [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2021, 6: 1-13.
- [5] Lu P, Ye K, Jin T, et al. Design method for polyurethane-modified asphalt by using Kriging-particle swarm optimization algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105609.
- [6] Wang F, Zhu H, Li Y, et al. Microwave heating mechanism and self-healing performance of scrap tire pyrolysis carbon black modified bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127873.
- [7] 谭忆秋, 李冠男, 单丽岩, 等. 沥青微观结构组成研究进展 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 1-17.
Tan Yiqiu, Li Guannan, Shan Liyan, et al. Research progress on microstructure composition of asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 1-17.
- [8] 郭猛, 任鑫, 焦峪波, 等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 41-59.
Guo Meng, Ren Xin, Jiao Yubo, et al. Review on aging and anti-aging of asphalt and asphalt mixtures [J]. China Journal of Highways, 2022, 35(4): 41-59.
- [9] 陈向东, 邹佳慧, 李恩泽, 等. SBS 相对分子量对改性沥青性能影响分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(28): 12342-12349.
Chen Xiangdong, Zou Jiahui, Li Enze, et al. Analysis of the effect of relative molecular mass of SBS on the performance of modified asphalt [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(28):

- 12342-12349.
- [10] 屈鑫, 丁鹤洋, 汪海年. 道路沥青老化评价方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 205-220.
Qu Xin, Ding Heyang, Wang Hainian. Research progress of road asphalt aging evaluation methods[J]. China Journal of Highway, 2022, 35(6): 205-220.
- [11] 庞拓, 仰建岗, 张伟, 等. 高含量SBS改性沥青老化性能及老化机理[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6308-6316.
Pang Tuo, Yang Jiangan, Zhang Wei, et al. Aging performance and aging mechanism of high content SBS modified asphalt[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6308-6316.
- [12] Qian C, Fan W, Yang G, et al. Influence of crumb rubber particle size and SBS structure on properties of CR/SBS composite modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117517.
- [13] 李洪毅. 超临界二氧化碳萃取深层稠油组分的分子动力学模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12543-12550.
Li Hongyi. Molecular dynamics simulation of supercritical carbon dioxide extraction of deep heavy oil components [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12543-12550.
- [14] Liu Z, Cao L, Zhou T, et al. Multiscale investigation of moisture-induced structural evolution in asphalt-aggregate interfaces and analysis of the relevant chemical relationship using atomic force microscopy and molecular dynamics [J]. Energy Fuel, 2020, 34: 4006-4016.
- [15] 栗启. C9PR/SBS改性沥青组分交互作用的分子动力学研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
Li Qi. Molecular dynamics study on the interaction of C9PR/SBS modified asphalt components [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.
- [16] Yang K, Dun H Z, Qiang W. Fully atomistic molecular dynamics computation of physico-mechanical properties of PB, PS, and SBS [J]. Nanomaterials, 2019, 9: DOI: 10.3390/nano9081088.
- [17] 汪海年, 丁鹤洋, 冯珀楠, 等. 沥青混合料分子模拟技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 1-14.
Wang Hainian, Ding Heyang, Feng Pinnan, et al. Review of molecular simulation technology of asphalt mixture [J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(2): 1-14.
- [18] Wheeler S E. Understanding substituent effects in noncovalent interactions involving aromatic rings [J]. Accounts of Chemical Research, 2013, 46: 1029-1038.
- [19] Li G, Gu Z, Tan Y, et al. Research on the phase structure of styrene-butadiene-styrene modified asphalt based on molecular dynamics [J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: 126933.
- [20] Sengoz B, Isikyakar G. Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150: 424-432.
- [21] Rossi D, Filippi S, Merusi F, et al. Internal structure of bitumen/polymer/wax ternary mixtures for warm mix asphalts [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 129: 3341-3354.
- [22] 胡魁, 韩森, 周靓, 等. 基于荧光显微图像的SBS面积比计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 15-19.
Hu Kui, Han Sen, Zhou Liang, et al. Study on the calculation method of SBS area ratio based on fluorescence microscopic images [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(9): 15-19.
- [23] 王涵, 邓文广, 李佰昌, 等. 基于黏弹力学的SBS改性沥青改性剂网络结构研究[J]. 石油炼制与化工, 2017, 48(1): 53-56.
Wang Han, Deng Wenguang, Li Baichang, et al. Study on the network structure of SBS modified asphalt modifier based on viscoelastic mechanics [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2017, 48(1): 53-56.