

PET 化学解聚物对 SBS/CR 复合改性沥青的影响规律研究

邢泽奇, 蔡能, 钟亚聃, 沈凡

(武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 随着废弃聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 所造成的环境问题日益严峻, 将其资源化利用于沥青改性已成为道路工程领域的重要方向, 但现有研究多集中于 PET 单独改性 SBS 或橡胶沥青, 其对 SBS/CR 复合改性体系的影响尚缺乏系统认识。因此, 本文采用胺解法制备 PET 化学解聚物 (PET-EA), 分别掺入低掺量 (3%SBS+5%CR) 和高掺量 (7%SBS+10%CR) 复合改性沥青中, 研究不同 PET-EA 掺量对沥青性能的影响规律, 同时采用荧光显微分析其作用机理。研究结果表明: PET-EA 在 SBS/CR 复合改性沥青体系中均可以提升沥青的软化点和粘度, 但对其延度有一定负面影响; 且高掺量 SBS/CR 复合改性沥青体系中作用更为显著, 当 PET 掺量为 7%, 改性沥青软化点提升 4.8°C, 135°C 粘度增加约 185%, 延度拉伸的最大应力增加 85%, 但延度由 19.7cm 降至 6.4cm; PET-EA 在 SBS/CR 复合改性体系中, 仍然能够发挥稳定剂的作用, 抑制改性剂在高温储存中的沉降与相分离, 提升了改性沥青的储存稳定性; PET-EA 中的酰胺基团能够促进沥青中的轻质组分填充至 SBS 相, 使 SBS 进一步发生溶胀, 从而影响到沥青的三大指标和粘度等宏观性能。综上, PET-EA 可作为 SBS/CR 复合改性沥青的有效外加剂, 兼顾性能增强与稳定作用, 本研究结果可为 PET-SBS-CR 复合改性沥青的制备提供一定的理论参考。

关键词: PET; 三元复合体系; 改性沥青; 物理性能; 荧光显微镜

中图分类号: U414

文献标志码: A

Effect of PET-Derived Additive on SBS/CR Composite Modified Asphalt

Xing Zeqi, Cai Neng, Zhong Yadan, Shen Fan

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: As environmental concerns caused by waste polyethylene terephthalate (PET) become increasingly severe, utilizing it as a resource for asphalt modification has emerged as an important direction in road engineering. However, existing studies have predominantly focused on PET-modified SBS or rubber asphalt individually, leaving the effects of PET-derived additives on SBS/CR composite modified systems inadequately understood. In this study, a PET chemical depolymerization product (PET-EA) was prepared via aminolysis and incorporated into both low-content (3% SBS + 5% CR) and high-content (7% SBS + 10% CR) composite modified asphalts at various dosages. The influence of PET-EA content on asphalt properties was systematically investigated, and fluorescence microscopy was employed to elucidate the modification mechanism. The results show that PET-EA increases the softening point and viscosity of the SBS/CR modified asphalt systems, while adversely affecting ductility; these effects are more pronounced in the high-content system. Specifically, at 7% PET-EA, the softening point increases by 4.8 °C, the viscosity at 135 °C rises by approximately 185%, and the maximum tensile stress during ductility testing increases by 85%, whereas ductility decreases from 19.7 cm to 6.4 cm. Furthermore, PET-EA acts as a stabilizer in the composite system, inhibiting sedimentation and phase separation of the modifiers during high-temperature storage, thereby improving storage stability. The amide groups present in PET-EA promote the migration of light components from the asphalt into the SBS phase, facilitating further swelling of SBS, which in turn affects macroscopic properties such as the three conventional indices and viscosity. Overall, PET-EA can serve as an effective additive for SBS/CR composite modified asphalt, offering both performance enhancement and stabilization. The findings provide a theoretical reference for the preparation of PET-SBS-CR composite modified asphalt.

Key words: PET; ternary composite system; modified asphalt; physical properties; fluorescence microscopy

收稿日期: 2026-06-08

基金项目: 武汉工程大学研究生教育创新基金 (CX2025104)

近些年来，在道路工程领域，将固体废弃物资源化应用于沥青路面，已成为消纳工业固废、推动可持续发展的重要途径。其中，废旧轮胎橡胶因体积庞大、难以自然降解，堆放时易引发火灾，非法焚烧则释放二噁英等强致癌物，被称作“黑色污染”^[1]。与此同时，废弃塑料作为另一种亟待处理的固体废弃物，产量巨大、自然降解周期极长，给环境带来沉重负担^[2]。而以聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）为原料的塑料瓶则尤为典型，其年产量极高，有效回收率却很低。因此，若能在沥青中实现废弃橡胶与 PET 的协同利用，有望同步解决上述两类固废难题。

针对 PET 的回收利用，若将其直接掺入沥青混合料当中，因其熔点高、刚性强且不溶于沥青，会削弱集料与沥青的粘结，损害混合料的抗热开裂与水稳定性^[3-4]。为了克服这一缺陷，常采用化学解聚将 PET 转化为沥青外加剂，以提升沥青整体性能^[5-6]。在诸多解聚方法中，胺解法因无需催化剂且反应热较低，被广泛采用^[7-8]。胺解所得的 PET 外加剂与 SBS 改性沥青及橡胶沥青均能产生良好的化学结合，可增加其粘度与刚性、提升其软化点，并有效抑制橡胶颗粒在沥青中的沉降^[9-11]。例如，Xiong Xu 等^[9]和 Zhen Leng 等^[10]研究表明，胺解 PET 衍生添加剂能改善橡胶沥青的储存稳定性与流变性，提升抗车辙和抗疲劳性能；Rabindra Kumar Padhan 等^[11]将胺解回收的 PET 添加剂与 SBS 联用，同样观察到高温性能和疲劳寿命的增强。同时，为了保证改性沥青的各项性能以及固废利用效果，道路工程领域常常将 SBS 与橡胶两者复配后制备改性沥青^[12-13]，但目前有关 PET 改性沥青的研究集中于其单独改性 SBS 或橡胶沥青，PET 对 SBS/CR 复合改性沥青的影响规律则鲜有报道。

因此，本文采用胺解法制备 PET 化学解聚物（PET-EA），将 PET-EA 分别掺入低、高掺量的 SBS/CR 复合改性沥青中，通过测试改性沥青的三大指标、布氏粘度、离析软化点差，系统研究 PET-EA 掺量对复合沥青性能的影响，并结合荧光显微镜分析其改性机理，研究结果可为 PET-SBS-CR 复合改性沥青的制备提供一定的理论参考。

1 原材料及实验方案

1.1 原材料

本实验采用了 40 目废弃轮胎橡胶粉（Crumb Rubber，简称 CR）、YH-791 型线性 SBS、70#A 级道路石油沥青、废弃 PET 材质塑料瓶、乙醇胺(C₂H₇NO/分析纯、简称 EA)作为实验原材料。其中 70#A 级道路石油沥青满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求，具体技术指标见表 1 所示。

表 1 70#A 道路石油沥青技术指标

Tab.1 Technical specifications of 70#A road petroleum asphalt

测试项目		技术要求	实验结果
针入度（25℃，100 g，5 s）/（0.1mm）		60~80	67
软化点 TR&B /℃		≥46	48.5
溶解度/%		≥99.5	99.7
延度（5 cm/min，15℃）/cm		≥100	>100
密度（15℃）/（g/cm ³ ）		实测	1.016
质量变化/%		±0.8	0.203
RTFOT 后残留物	延度（10℃、5 cm/min）/cm	≥6	11
	25℃针入度比/%	≥61	64

1.2 PET 及其化学解聚物

本文采用了与相关研究^[14-17]类似的胺解法制备 PET 外加剂：将废弃 PET 塑料瓶去掉标签洗涤后裁剪至 1 cm² 的薄片，经过干燥后与乙醇胺在质量比 1 : 2、温度 140 °C、空气氛围下反应 4 h 后进行冷却、抽滤、干燥后得到纯白色 PET 外加剂样品 (PET-EA)，制备流程如图 1 所示。

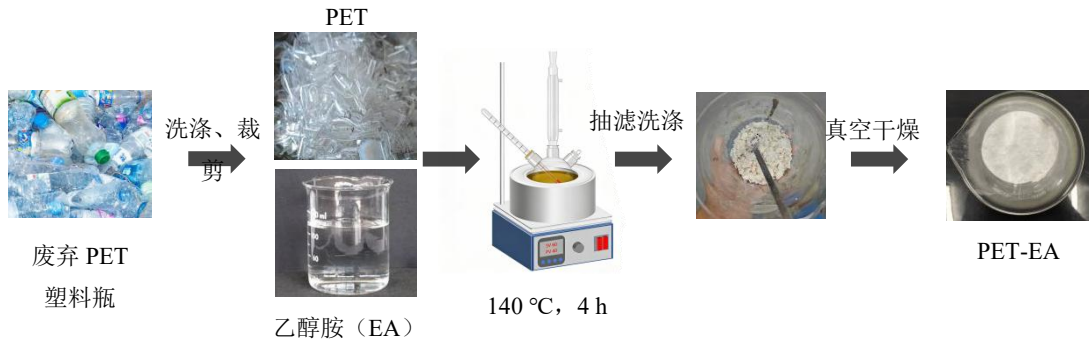


图 1 PET-EA 制备流程图

Fig.1 Preparation flow chart of PET-EA

为验证改性效果，分别对原料 PET 及反应产物 (PET-EA) 进行了红外光谱 (FTIR)、X 射线衍射 (XRD) 及同步热分析 (TG-DSC) 表征。

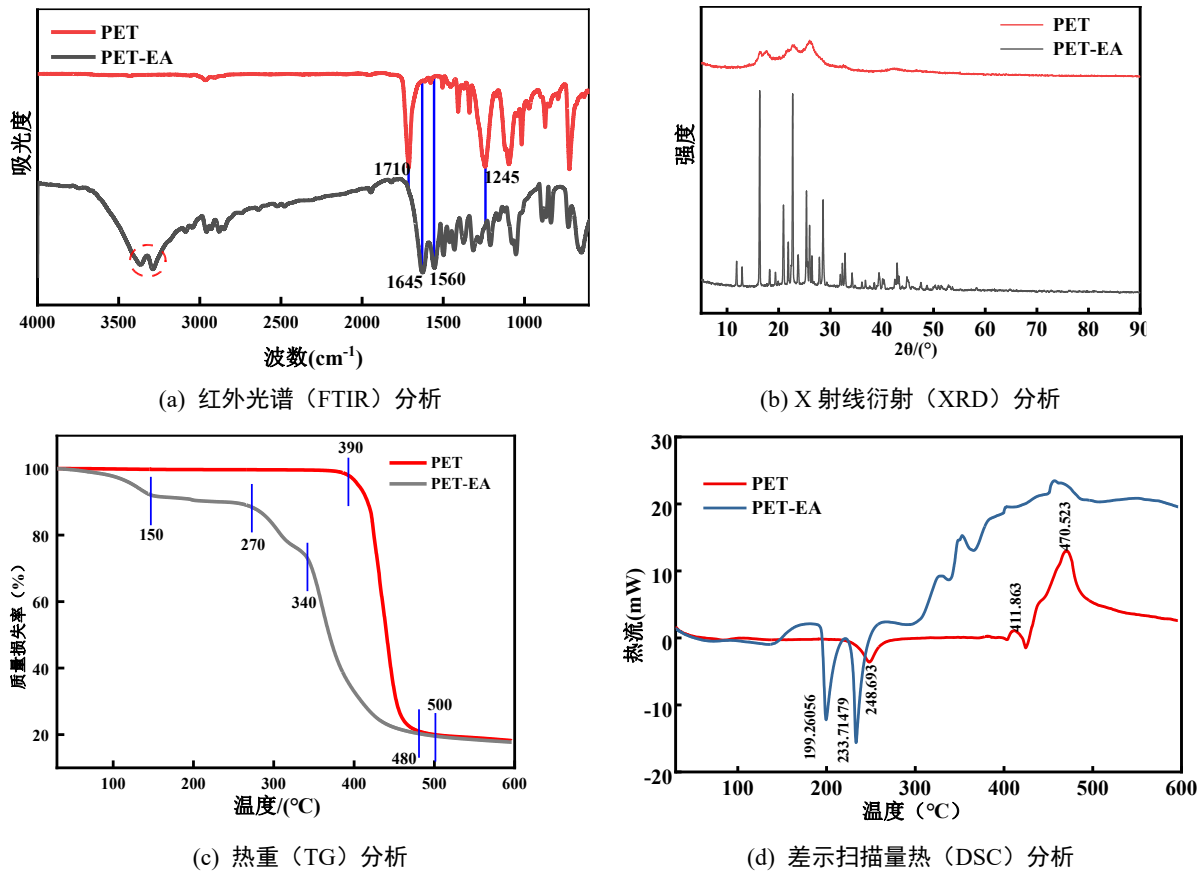


图 2 PET 及 PET-EA 测试表征结果

Fig.2 Characterization results of PET and PET-EA

由图 2 可知：红外光谱中，PET-EA 中原位于 1 701 cm⁻¹ 处的酯基 C=O 伸缩振动峰、1 245 cm⁻¹ 处的 C-O-C 醚键峰强度均显著减弱，表明 PET 分子链中的酯键已发生断裂，大分子骨架被破坏。在 3 300~3 500 cm⁻¹ 范围内，PET-EA 呈现出典型的双吸收峰（约 3350 cm⁻¹ 和 3190 cm⁻¹），归属于伯酰胺 (-CONH₂) 的不对称 N-H 伸缩振动；同时该吸收带底部较宽，表明羟基 (-OH) 的 O-H 伸缩振动与之重叠。结合 1645 cm⁻¹

处的酰胺 I 带和 1560 cm^{-1} 处的酰胺 II 带，可以确认胺解反应成功将 PET 中的酯键转化为酰胺结构，产物中同时含有酰胺和羟基官能团。XRD 图谱显示，PET 原料仅呈现无定形弥散峰，而 PET-EA 在 2θ 为 18° 、 23° 和 29° 处出现了尖锐的晶体衍射峰，说明解聚产物中形成了有序的晶体结构。同步热分析进一步表明，PET 原料为单一热分解过程，熔融峰位于 250°C 左右；相比之下，PET-EA 呈现多阶失重，在 200°C 附近出现晶型转变峰，于 234°C 处出现熔融峰，熔融温度明显降低。以上分析结果表明，PET 经胺解处理后，PET 发生了解聚，形成了具有一定结晶度的小分子低聚物。

1.3 实验方案

1.3.1 改性沥青制备

将基质沥青加热至 180°C ，加入 SBS 与 CR，分别制备低掺量（掺 3%SBS+5%CR）与高掺量（掺 7%SBS+10%CR）两种 SBS/CR 复合改性沥青；再在上述沥青中加入基质沥青质量 3%、5%、7% 的 PET-EA。在加料过程中，使用剪切机以 700 r/min 的速率搅拌 10min，加料完成后再以 $6\,000\text{ r/min}$ 的速率高速剪切 50 min；最后将样品置于 160°C 烘箱中溶胀发育 30 min，制备流程如图 3 所示。

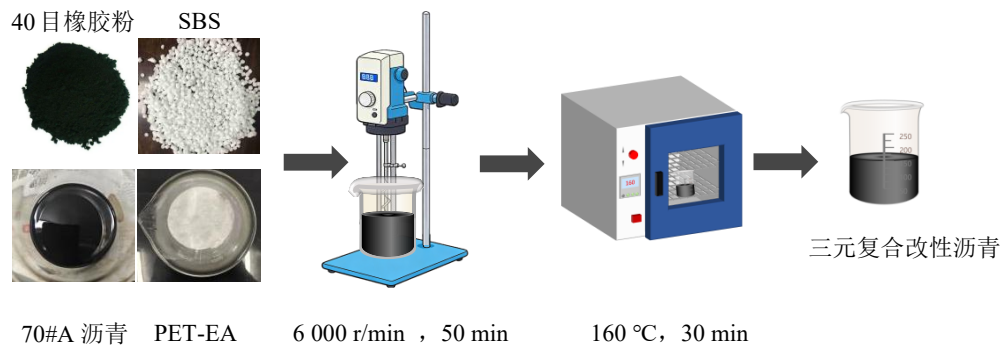


图 3 复合沥青制备流程图

Fig.3 Preparation flow chart of composite modified asphalt

1.3.2 沥青性能测试

对改性沥青样品分别进行针入度（0.1 mm）、 5°C 延度（cm）、软化点（ $^\circ\text{C}$ ）、离析软化点差（即试管上下段软化点之差， $^\circ\text{C}$ ）以及布氏黏度（ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）测定，研究不同 PET-EA 掺量对 SBS/CR 复合改性沥青性能的影响规律。测试方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20- 2011）进行，其中 5°C 延度测试过程中，额外测定其最大应力值（N）。

1.3.3 荧光显微测试

采用荧光显微镜，在蓝激光（470~495 nm）条件下，研究 PET-EA 掺量对 SBS/CR 复合改性沥青中 SBS 分布情况的影响规律，揭示 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青的改性机理。

2 结果与讨论

2.1 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青三大指标的影响

不同 PET-EA 掺量下，低掺量（3%SBS+5%CR）与高掺量（7%SBS+10%CR）两种 SBS/CR 复合改性沥青的针入度、软化点、 5°C 延度及延度最大应力的实验结果见图 4。

由图可知，在低掺量 SBS/CR 改性沥青体系中，随着 PET-EA 掺量增加，针入度下降，软化点略有提升，表明沥青稠度提高，高温性能有所改善； 5°C 延度下降，但对应的延度最大应力提高，说明沥青的低温延展性降低，但黏聚力增加。

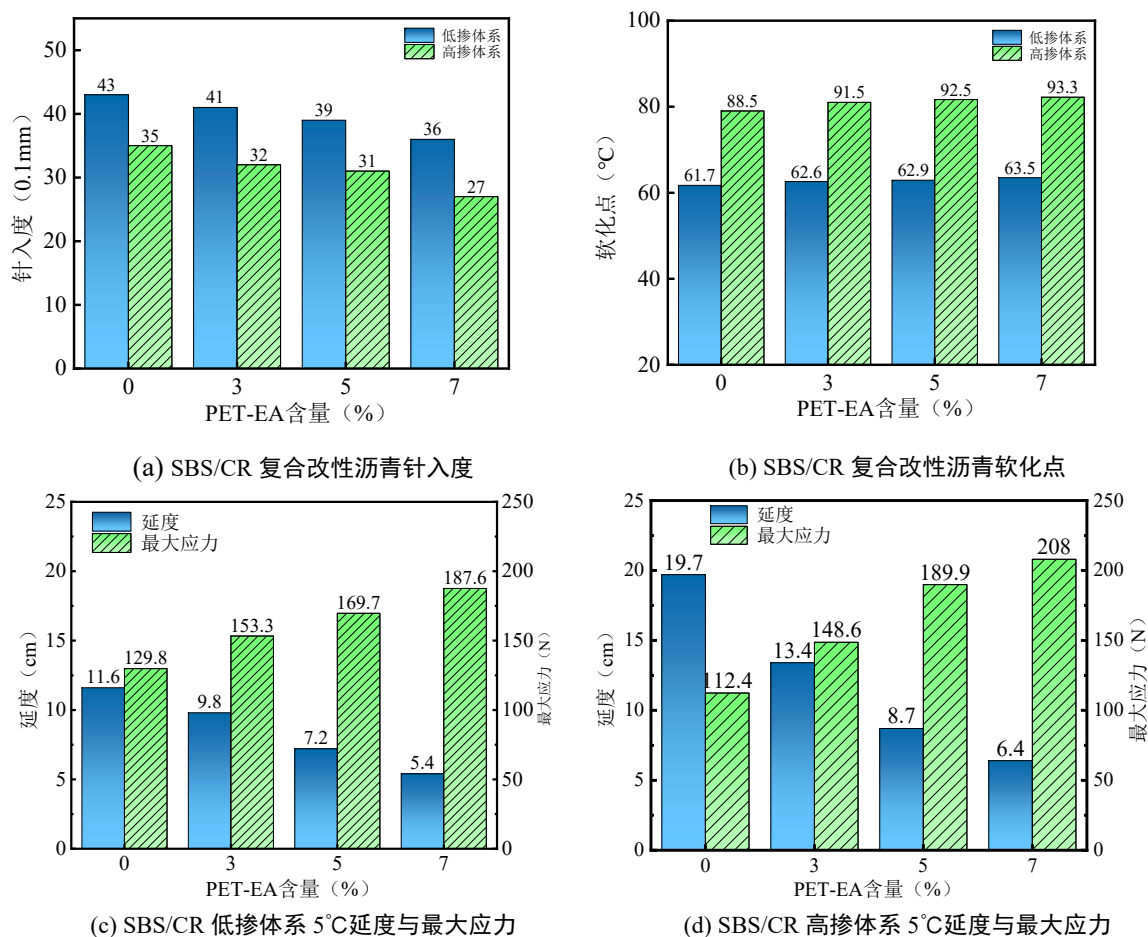


图 4 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青三大指标的影响

Fig.4 Effect of PET-EA on the three major indicators of SBS/CR composite modified asphalt

在高掺量 SBS/CR 体系中, PET-EA 的改性规律与低掺量 SBS/CR 体系的规律类似, 但效果更为显著。当 PET-EA 掺量增至 7% 时, 针入度、软化点、5°C 延度、延度最大应力分别为 27 (0.1 mm)、93.3 °C、6.4 cm、208 N, 较空白样品, 针入度下降 22.9%, 软化点增加 5.4%, 5°C 延度下降 67.5%, 延度最大应力增加 85%。上述变化表明, PET-EA 在高掺量体系下可显著增强沥青的高温性能和黏聚力, 但材料在低温下表现出明显的劲度上升、塑性下降的特征。结合图 2 中热分析结果可知: PET-EA 熔融温度为 234 °C, 其在沥青中主要是以固体状态存在; 因此在 SBS/CR 改性体系中加入 PET-EA 能够提升沥青的稠度和刚度, 从而使改性沥青的针入度和延度下降、软化点和延度最大应力值上升。此外, 高掺量 SBS/CR 体系中, PET-EA 对沥青三大指标的改性效果更为显著, 说明 PET-EA 可能与 SBS/CR 复合改性体系中的 SBS 或 CR 发生了一定的物理化学作用。

2.2 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青粘度的影响

不同 PET-EA 掺量下, 低掺量 (3%SBS+5%CR) 与高掺量 (7%SBS+10%CR) 两种 SBS/CR 复合改性沥青 135、150、165、180 °C 的布氏粘度随温度变化的曲线见图 5。

研究结果表明, 在低掺量 SBS/CR 改性沥青体系中, 随着 PET-EA 掺量增加, 各温度下的粘度均呈逐渐上升趋势; 高掺量 SBS/CR 改性沥青体系也表现出类似的规律, 但效果更为显著, 高掺量体系各温度下的粘度均随 PET-EA 掺量升高而明显增大; 以 135 °C 粘度为例, 掺加 7% PET-EA 后, 粘度较空白样品增加了 185%。这是由于 PET-EA 在沥青中主要是以固体状态存在, 加入沥青后能够限制沥青的流动, 从而提升沥青的粘度。此外, 高掺量 SBS/CR 条件下, PET-EA 对沥青粘度的改性效果更为显著, 也进一步说

明 PET-EA 可能与 SBS/CR 改性体系中的 SBS 或 CR 发生了一定的物理化学作用。

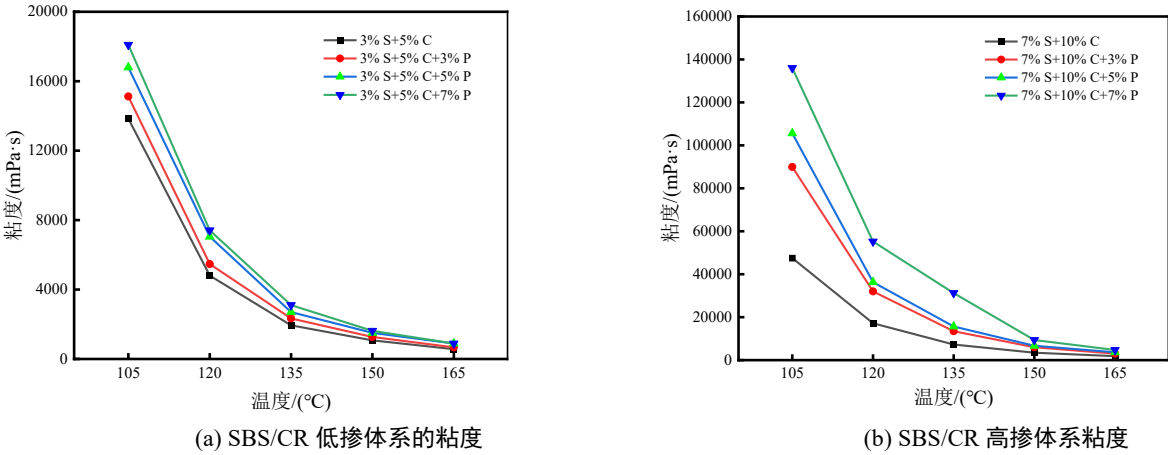


图 5 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青粘度的影响

Fig.5 Effect of PET-EA on the viscosity of SBS/CR composite modified asphalt

2.3 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青离析软化点差的影响

不同 PET-EA 掺量下，低掺量（3%SBS+5%CR）与高掺量（7%SBS+10%CR）两种 SBS/CR 复合改性沥青的沥青软化点差实验结果见图 6。

研究表明，PET-EA 能够降低 SBS/CR 复合改性沥青的离析软化点差，从数值来看，低掺量 SBS/CR 体系改性效果更为显著，在 PET-EA 掺量为 7% 时，改性沥青的离析软化点差从 7.7 °C 降低至 1.3 °C，降低了 6.4 °C。而在高掺量 SBS/CR 体系中，PET-EA 掺量为 7% 时，离析软化点差虽然较空白样品仅降低 1.5 °C，但这是由于空白样品的初始软化点差本身较低所致，加入 PET-EA 仍然对于改性沥青的储存稳定性有一定的改善作用。综合来讲，加入 PET-EA 均能够抑制 SBS 和 CR 颗粒的分层，促进了聚合物相与沥青相的均匀融合，提升了 SBS/CR 改性沥青的储存稳定性。有研究表明^[9-12]：PET 经过乙醇胺处理后，胺解反应打断了 PET 的惰性长分子链，并引入了酰胺、羟基等活性基团，能够与沥青中的极性组分形成氢键，从而将 SBS 沥青或 CR 沥青中的改性组分稳定地固定下来，抑制高温下的相分离，提高改性沥青的储存稳定性。对于本文研究的 SBS/CR 复合改性沥青体系，PET-EA 稳定改性剂的作用仍然存在，能够提升 SBS/CR 复合改性沥青的储存稳定性。

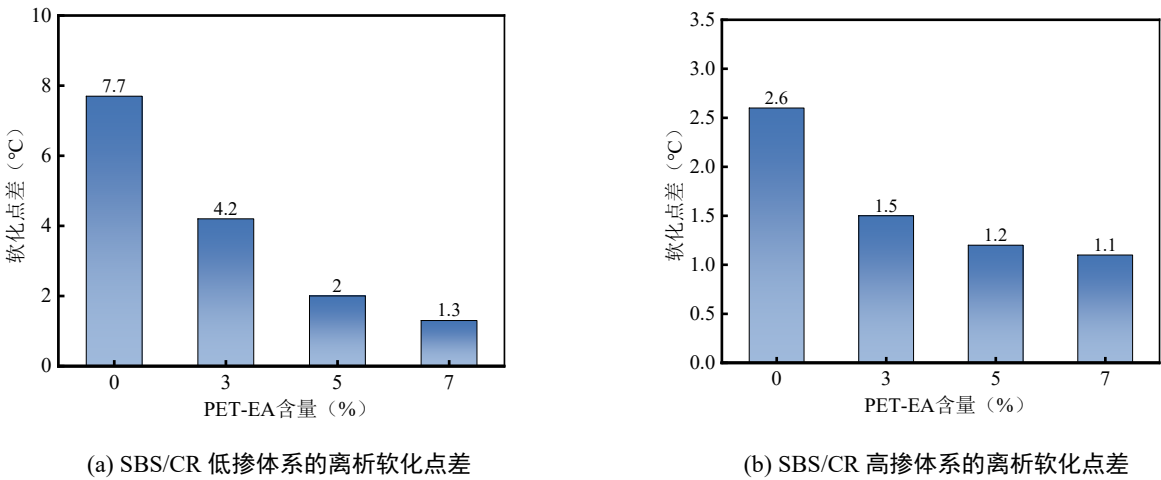


图 6 PET-EA 对 SBS/CR 复合改性沥青离析软化点差的影响

Fig.6 Effect of PET-EA on the segregation softening point difference of SBS/CR composite modified asphalt

2.4 荧光显微分析

不同 PET-EA 掺量下，低掺量（3%SBS+5%CR）与高掺量（7%SBS+10%CR）两种 SBS/CR 复合改性沥青的荧光显微镜观测结果见图 7。本实验在蓝激光（470~495 nm）条件下进行观察，激发条件下 SBS 具有荧光效应，能够呈现出绿色或者黄绿色的光^[18]。由图可知，不同 PET-EA 掺量下，改性沥青均呈现出绿色斑点图像且分布均匀，说明改性剂能够在沥青中均匀的分布。随着 PET-EA 掺量的增加，绿色斑点逐渐变大，分布依然较为均匀，说明 SBS 有“粗化”的趋势且没有发生团聚现象，这一作用在高掺量 SBS/CR 复合改性沥青中更为显著。

有研究表明^[19]：改性沥青中含有酰胺类塑料可促使沥青轻质组分填充至 SBS 相。本文研究的 PET 经乙醇胺解聚后，反应物含有酰胺基团，也能够起到促进沥青中的轻质组分填充至 SBS 相的作用，轻质组分进入 SBS 后进一步促进了 SBS 的溶胀，SBS 溶胀粗化，荧光斑点变大。SBS 的溶胀效果会直接影响到沥青的三大指标和粘度等宏观性能^[20-22]；因此，本文在上述改性沥青三大指标及粘度的研究中均发现，加入 PET-EA 后能够改变 SBS/CR 改性沥青的性能，并且也解释了高掺量 SBS/CR 条件下三大指标及粘度等宏观性能改性效果更为明显的原因。

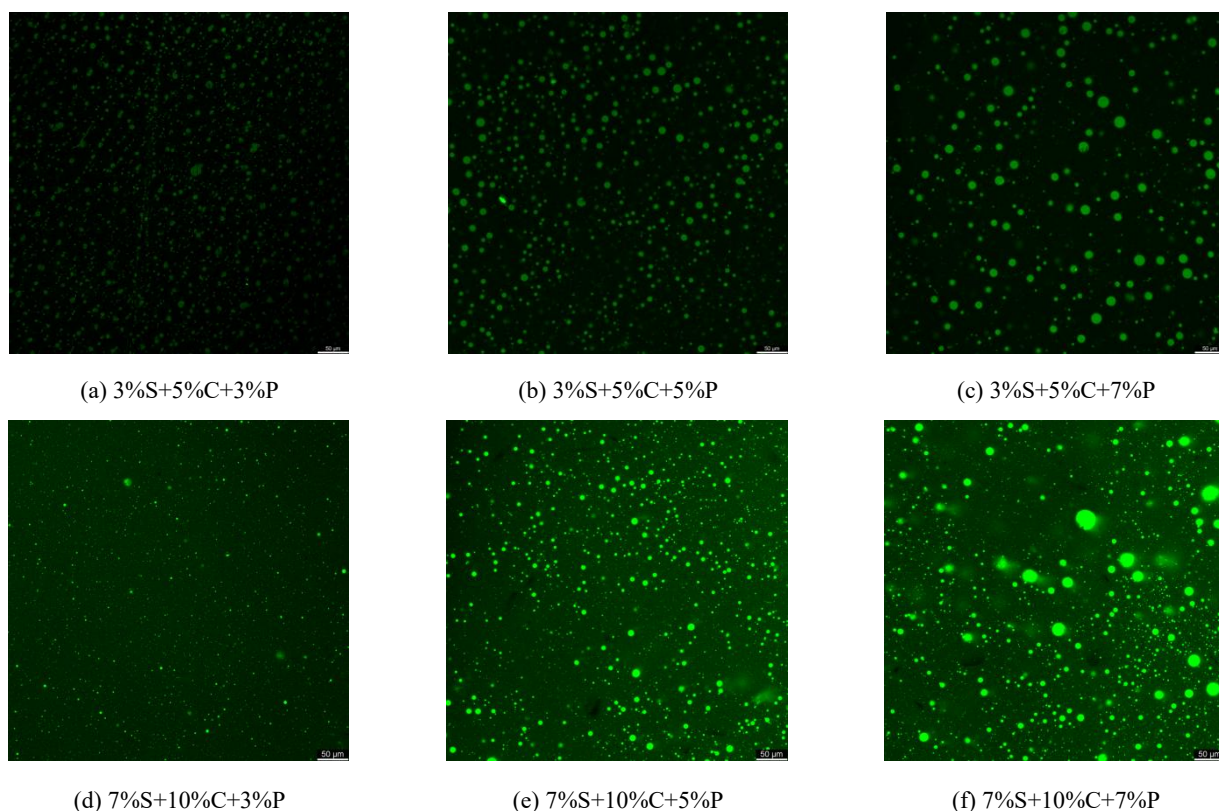


图 7 荧光显微镜测试结果

Fig.7 Fluorescence microscopy results

3 结论

1) PET-EA 的掺入使 SBS/CR 复合改性沥青的针入度下降、软化点和粘度上升, 5 °C 延度降低但延度拉伸最大应力增加, 表明材料高温抗变形能力和内聚力增强, 而低温塑性有所下降; 其中高掺量 SBS/CR 复合改性沥青的作用更为显著。

2) PET-EA 在 SBS/CR 复合改性体系中, 仍然能够发挥稳定剂的作用, 抑制改性剂在高温储存中的沉降与相分离, 降低了改性沥青的离析软化点差, 提升了改性沥青的储存稳定性。

3) 随着 PET-EA 掺量的增加, 改性沥青的荧光照片中绿色斑点逐渐变大但分布依然较为均匀, 说明 SBS 有“粗化”的趋势且没有发生团聚现象, PET-EA 中的酰胺基团能够促进沥青中的轻质组分填充至 SBS 相, 使 SBS 进一步发生溶胀, 从而改变沥青的三大指标和粘度等宏观性能。

参考文献:

- [1] 董丽梅. 生态环保视角下废弃轮胎的再生回收利用技术研究 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025 (4): 21-23.
Dong Limei. Research on recycling technology of waste tire from the perspective of ecological protection [J]. China Tire Resources Recycling, 2025 (4): 21-23.
- [2] 康君. 废旧塑料回收利用现状及建议对策 [J]. 资源再生, 2022 (5): 30-33.
Kang Jun. Current situation and proposed countermeasures of waste plastics recycling [J]. Resource Recycling, 2022 (5): 30-33.
- [3] Yao Linyi, Leng Zhen, Lan Jingting, et al. Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: a case study in Hong Kong [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 336: 130405.
- [4] Movilla-Quesada D, Raposeiras A C, Silva-Klein L T, et al. Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen [J]. Waste Management, 2019, 87: 751-760.
- [5] Raheem A B, Noor Z Z, Hassan A, et al. Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 1052-1064.
- [6] Liu Shiwei, Zhou Lin, Li Lu, et al. Isooctanol alcoholysis of waste polyethylene terephthalate in acidic ionic liquid [J]. Journal of Polymer Research, 2013, 20 (12): 310.
- [7] Khoonkari M, Haghighi A H, Sefidbakht Y, et al. Chemical recycling of PET wastes with different catalysts [J]. International Journal of Polymer Science, 2015, 2015: 124524.
- [8] Carta D, Cao G, D'Angeli C. Chemical recycling of poly (ethylene terephthalate) (pet) by hydrolysis and glycolysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10 (6): 390-394.
- [9] Xu Xiong, Leng Zhen, Lan Jingting, et al. Sustainable practice in pavement engineering through value-added collective recycling of waste plastic and waste tyre rubber [J]. Engineering, 2021, 7 (6): 857-867.
- [10] Leng Zhen, Padhan R K, Sreeram A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 682-688.
- [11] Padhan R K, Leng Zhen, Sreeram A, et al. Compound modification of asphalt with styrene-butadiene-styrene and waste polyethylene terephthalate functionalized additives [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 124286.
- [12] 吉泽中, 刘嘉伟, 徐凯. 橡胶/SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (4): 124-128, 132.
Ji Zezhong, Liu Jiawei, Xu Kai. Study on properties of CR/SBS composite modified asphalt and mixtures [J]. New Building Materials, 2018, 45 (4): 124-128, 132.
- [13] 黄卫东, 周艳, 傅星恺. 有关 Terminal Blend 胶粉改性沥青研究的文献综述 [J]. 华东交通大学学报, 2017, 34 (1): 52-60.
Huang Weidong, Zhou Yan, Fu Xingkai. Literature review of study on terminal blend rubberized asphalt [J]. Journal of East

China Jiaotong University, 2017, 34 (1) : 52-60.

- [14] Liu Hao, Zhang Suyu, Zhang Zengping, et al. Anti-ageing performance and mechanisms of the modified asphalt with chemically recycled products from waste polyethylene terephthalate (PET) [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12 (6) : 114891.
- [15] Liu Hao, Zhang Zengping, Yu Xinhe, et al. Preparation of polyol from waste polyethylene terephthalate (PET) and its application to polyurethane (PU) modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2024, 427: 136286.
- [16] Li Ruiduo, Wang Menghao, Tan Dingbin, et al. Road performance and modification mechanism of waste polyethylene terephthalate-modified asphalt [J]. Coatings, 2025, 15 (8) : 902.
- [17] Baradaran S, Aliha M R M, Maleki A, et al. Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature [J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138426.
- [18] 樊亮, 马士杰, 林江涛, 等. 荧光显微分析技术在沥青研究中的应用 [J]. 公路工程, 2011, 36 (6) : 70-73.
Fan Liang, Ma Shijie, Lin Jiangtao, et al. Application of fluorescent microscopy analysis on asphalt study [J]. Highway Engineering, 2011, 36 (6) : 70-73.
- [19] 王鹏, 刘凯, 刘悦, 等. 低损耗因子复合改性沥青疲劳和自愈特性 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (10) : 1061-1069.
Wang Peng, Liu Kai, Liu Yue, et al. Fatigue and self-healing performances of composite modified asphalts with low loss factor [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25 (10) : 1061-1069.
- [20] 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.
- [21] 周艺, 李泉, 童瑶, 等. 再生剂对 SBS 改性沥青宏观性能与微观结构的影响 [J]. 公路, 2022, 67 (6) : 302-309.
Zhou Yi, Li Quan, Tong Yao, et al. The effect of regenerator on the macro performance and microstructure of SBS modified asphalt [J]. Highway, 2022, 67 (6) : 302-309.
- [22] 李杰, 甘新立, 唐晖, 等. 基于荧光显微图像分析的 SBS 改性沥青中改性剂掺量及均匀性分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47 (1) : 154-157, 162.
Li Jie, Gan Xinli, Tang Hui, et al. Analysis of modifier content and uniformity in SBS modified asphalt based on fluorescence microscopic image analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47 (1) : 154-157, 162.



第一作者: 邢泽奇 (2001—) 男, 硕士, 研究方向为道路材料。



通信作者: 沈凡 (1985—) 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为道路材料。