

基于FTIR与AFM的冷补沥青再生及改性机理研究

王立宸¹, 聂忆华¹, 瞿俊杰¹, 倪一哲¹, 姚国森¹, 肖宏宇²

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²赣州康大高速公路有限责任公司, 江西 赣州

收稿日期: 2026年7月9日; 录用日期: 2026年8月9日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

为探究冷补沥青混合料中再生剂与改性剂对老化沥青的微观作用机制, 本文基于傅里叶变换红外光谱(FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy)与原子力显微镜(AFM, Atomic Force Microscopy)技术, 系统分析了废机油(再生剂)、SBR胶乳及石油树脂(改性剂)对老化沥青的化学结构及微观形貌的影响。FTIR结果表明, 再生与改性过程中未生成新的官能团, 再生、改性作用属于物理共混; AFM图像显示, 废机油能有效“削平”老化沥青表面的粗糙结构, SBR与石油树脂则进一步构建出均匀致密的聚合物网络, 提升了材料的力学性能。研究进一步将微观形貌演变与宏观路用性能建立关联, 结合多尺度评价体系理念, 为冷补沥青再生剂的配方优化提供了微观层面的理论支持。

关键词

冷补沥青, 再生剂, 改性剂, FTIR, AFM, 微观机理

Study on the Regeneration and Modification Mechanisms of Cold-Patch Asphalt Using FTIR and AFM

Lichen Wang¹, Yihua Nie¹, Junjie Qu¹, Yizhe Ni¹, Guosen Yao¹, Hongyu Xiao²

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Ganzhou Kangda Expressway Co., Ltd., Ganzhou Jiangxi

Received: July 9, 2026; accepted: August 9, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

To investigate the microscopic interaction mechanisms of rejuvenators and modifiers on aged

文章引用: 王立宸, 聂忆华, 瞿俊杰, 倪一哲, 姚国森, 肖宏宇. 基于 FTIR 与 AFM 的冷补沥青再生及改性机理研究[J]. 材料科学, 2026, 16(8): 30-42. DOI: 10.12677/ms.2026.168172

asphalt within cold-patch asphalt mixtures, this study systematically analyzed the effects of waste engine oil (rejuvenator), SBR latex, and petroleum resin (modifiers) on the chemical structure and micro-morphology of aged asphalt using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Atomic Force Microscopy (AFM). The FTIR results indicate that no new functional groups are generated during the rejuvenation and modification processes, suggesting that the modification is a physical blending process. AFM images reveal that waste engine oil effectively “flattens” the rough structure on the surface of aged asphalt, while SBR and petroleum resin further construct a uniform and dense polymer network, thereby enhancing the mechanical properties of the material. Furthermore, this study establishes a correlation between the evolution of micro-morphology and macroscopic pavement performance, and incorporates the concept of a multi-scale evaluation system, thereby providing microscopic theoretical support for the formulation optimization of cold-patch asphalt rejuvenators.

Keywords

Cold-Patch Asphalt, Rejuvenator, Modifier, FTIR, AFM, Microscopic Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

依据拌和温度的不同, 沥青路面修补材料可分为热补沥青混合物与冷补沥青混合物两大类[1]。传统热拌沥青混合物(Hot Mix Asphalt Mixture, HMA)的生产和施工作业, 需将沥青与集料加热至高温状态, 能耗巨大, 且伴随显著的温室气体排放[2]。相比之下, 冷补沥青混合物(Cold Patch Asphalt Mixture, CPAM)具有无须加热、流动性好、易于储存、施工简便、对施工环境要求较低等突出优点, 目前, 该材料在道路日常保养与紧急修复中的应用频率持续攀升。已有研究表明, 冷补混合物配合比设计参数(如集料级配、结合料类型与用量、添加剂及养护制度等)从根本上控制着其各项室内性能指标, 涵盖高温稳定性、集料黏附性、内聚强度、施工操作便利性、抗永久变形及抗水损坏等多个方面。此外, 引入结合宏观性能测试与细观结构分析的多尺度评价体系, 有助于科学量化孔隙分布与集料骨架特征对修复耐久性的影响[3]。目前, 针对溶剂型、乳化型及反应型这三种冷补沥青混合物, 国内外学者已开展了诸多探索与实践[4]。

然而, 现有冷补材料仍面临亟待解决的技术瓶颈。一方面, 传统冷补沥青混合物普遍存在初期强度不足、耐久性欠佳等问题[5]; 另一方面, 冷补剂的组成与性质直接决定了混合料的施工和易性、强度发展规律及长期耐久性, 但当前对冷补剂作用机理的微观层面研究仍显不足。近年来, 我国公路养护与改扩建工程规模持续扩大, 随之而来的废旧沥青混合物(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)产出量亦呈现出逐年增长的趋势[6]。基于此, 将再生技术与冷补工艺相融合, 研发适用于 RAP 的高性能再生冷补材料, 以推动废旧沥青混合物向高附加值方向转化, 兼具工程实用价值与环境保护效益。

在材料组成优化方面, 研究表明通过正交试验优化水泥和膨润土等填料的比例, 可显著提高 CPAM 的成型强度、残留稳定性和冻融劈裂强度, 其机理在于填料在沥青中的均匀分散与水化反应[7]。同时, 循环利用废食用油(WCO)、塑料及 RAP 等可持续材料开发坑洼修补材料, 不仅表现出优异的力学性能, 还兼具环保效益[8]。

沥青老化是制约 RAP 再生利用的根本症结所在。老化主要是由沥青中轻质组分的氧化与挥发所致, 导致老化沥青的黏度与脆性相较新沥青显著增加。从化学成分来看, 老化沥青呈现出轻质组分(即饱和分

与芳香分)占比下降,重质组分(胶质与沥青质)占比上升的明显趋势。微观形貌方面,老化沥青表面表现出明显的凹凸起伏与沟槽状分布特征。传统石油基再生剂(以芳烃油、烷烃油及轻质油等为代表)通过回补老化过程中流失的轻质油分来实现对沥青性能的修复,然而此类再生剂在生产与应用环节仍伴随可观的CO₂排放量。近年来,废弃机油(Waste Engine Oil, WEO)作为一种可持续的再生剂材料受到广泛关注[9]。此外,丙烯酸酯化环氧大豆油(AESO)等反应型稀释剂也被用于替代部分传统溶剂,在降低沥青粘度的同时通过光引发固化提升流变性能[10]。废机油的再生功效主要源于其低分子量组分(饱和分与芳香分)对老化沥青的稀释增柔作用,以及对沥青质聚集体所产生的溶解与解絮凝效应。尽管如此,当前针对废机油再生沥青在微观尺度的作用机制探索仍有待深入,微观响应与宏观表现两者间的关联机制尚不明确[11]。

在冷补沥青改性领域,SBR胶乳与石油树脂是两种应用较为普遍的改性材料。其中,SBR胶乳即丁苯橡胶(Styrene-Butadiene Rubber)乳液,可显著改善沥青的低温延展性与弹性恢复性能[12];石油树脂凭借较强的黏附性能,能够有效强化沥青与集料之间的界面黏结效果,并使混合料的整体稳定性和抗水损坏性能得到有效提升。已有研究指出,SBR与石油树脂能够在沥青体系中构建出稳定的高分子网络结构。类似地,SBS与单组分湿固化聚氨酯复合改性也被证实能在沥青体系中构建多尺度孔隙结构,既促进稀释剂挥发又利于聚氨酯固化,从而显著提升冷补沥青砂浆的性能与结构稳定性[13]。然而,SBR与石油树脂复配改性冷补沥青的微观作用机制仍有待深入揭示。

为在分子层面阐明再生剂及改性剂对老化沥青的作用机理,本研究选用傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)与原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)作为微观尺度下的表征手段[14][15]。其中,FTIR用于检测沥青中官能团的变化特征,以判断改性过程是物理共混还是化学反应;AFM则用于观测沥青表面的微观形貌及其纳米尺度的力学特性。除FTIR与AFM外,扫描电子显微镜(SEM)与X射线计算机断层扫描(CT)等微观测试技术也被广泛用于分析沥青结合料及混合料的内部形貌与孔隙分布特征[16]。

本研究利用FTIR与AFM技术,从分子层面解析废机油(再生剂)、SBR胶乳及石油树脂(改性剂)对老化沥青基体的改性机理,以期为再生冷补剂的配方优化与工程应用提供微观层面的理论支撑[17]。

2. 材料与方法

2.1. 原材料

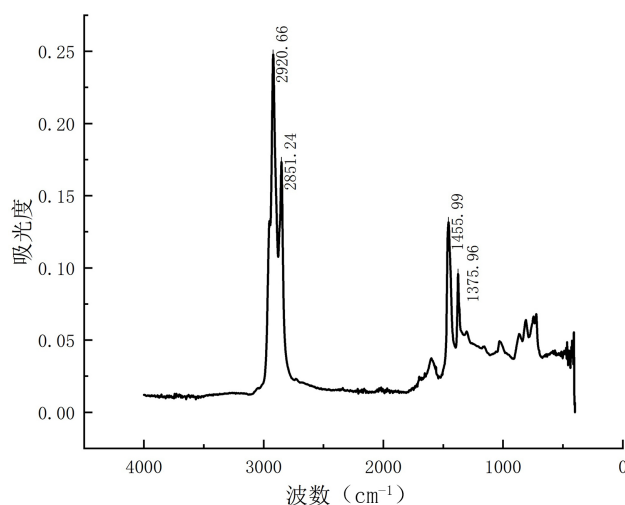


Figure 1. FTIR spectrum (aged asphalt)

图 1. FTIR 谱图(老化沥青)

本研究选用老化沥青作为基体材料,其 FTIR 谱图如图 1 所示。图中 2920 cm^{-1} 、 2851 cm^{-1} 处为 C-H 伸缩震动峰, 1456 cm^{-1} 、 1376 cm^{-1} 处为 C-H 弯曲振动与 O-H 弯曲振动峰,表明材料中存在饱和烃结构与含氧官能团,符合老化沥青典型特征。老化沥青采用 70 号基质沥青制备,老化温度为 $163^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$,时间为 85 min,旋转速率为 15 r/min。废机油为处理后的饱和烃-芳香烃复合再生油,使用前经静置沉淀 24 h 去除底部杂质及游离水; SBR 胶乳为阳离子型丁苯橡胶乳液,固含量约为 45%,最低成膜温度 $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$;石油树脂为热塑性增粘补强烃树脂,软化点 $90^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$,使用前粉碎为粒径 $\leq 5\text{ mm}$ 颗粒。轻质烃类稀释剂为 0 号柴油。

再生剂采用废机油,改性剂采用 SBR 胶乳与石油树脂,其 FTIR 谱图分别如图 2~4 所示。各材料特征吸收峰明显,便于后续混合体系的结构分析。

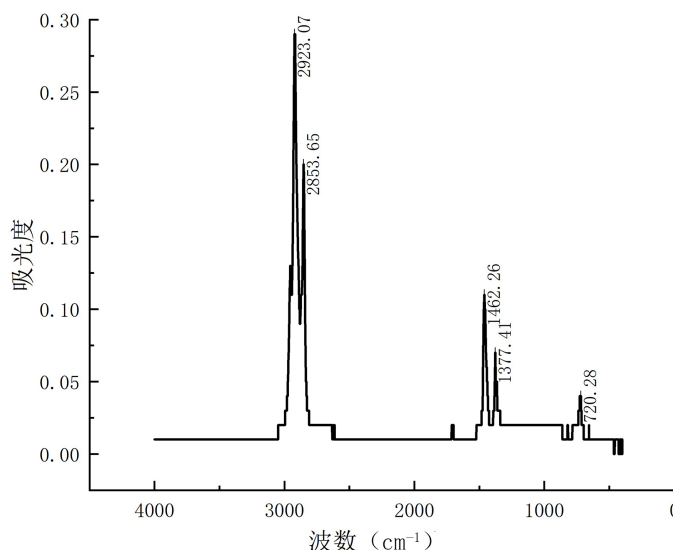


Figure 2. FTIR spectrum (waste engine oil)

图 2. FTIR 谱图(废机油)

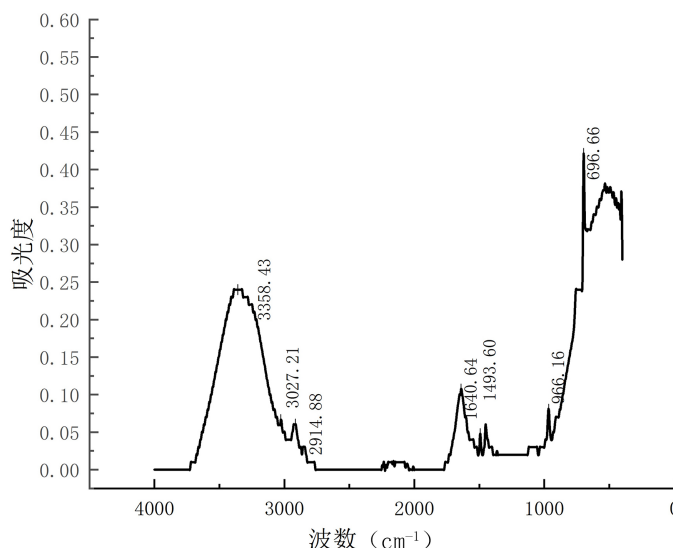


Figure 3. FTIR spectrum (SBR latex)

图 3. FTIR 谱图(SBR 胶乳)

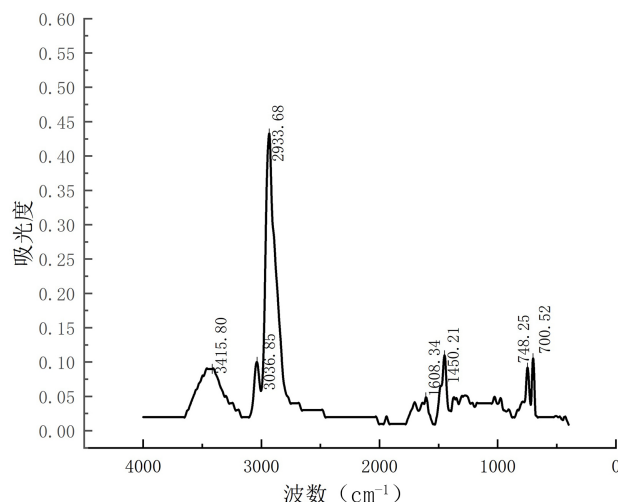


Figure 4. FTIR spectrum (petroleum resin)

图 4. FTIR 谱图(石油树脂)

2.2. 试样制备

将老化沥青与废机油按质量比为 10:1 混合剪切(剪切温度为 120℃~140℃, 转速 300~500 r/min, 剪切时间 10~15 min)制得再生沥青;在此基础上,分别掺入石油树脂(掺入质量为再生沥青质量的 1.5%, 于 120℃~140℃、300~500 r/min 搅拌 10~20 min 至树脂完全熔融,随后降温至 80℃~100℃,以 150~200 r/min 搅拌 15~30 min)与 SBR 胶乳(掺入质量为再生沥青质量的 5%, 须在降温至 80℃~100℃后,以 150~200 r/min 继续搅拌 10~20 min),制备得再生改性沥青试样,用于 FTIR 与 AFM 测试。

2.3. 测试方法

采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对试样进行测试,扫描范围设定为 4000~400 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次,分辨率 4 cm^{-1} ,以分析共混前后官能团的变化特征。采用原子力显微镜(AFM)在轻敲模式下观测试样表面的三维微观形貌,扫描范围为 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,扫描频率为 1 Hz。通过仪器自带软件计算表面粗糙度参数:算术平均粗糙度、均方根粗糙度以及轮廓最大高度(R_z , 即 Z 轴范围)。

2.4. 宏观性能测试方法

为验证微观结构变化与宏观性能之间的关联,对四种沥青试样开展基本性能及流变性能测试。进行针入度、软化点及延度测试。其中针入度用于评价沥青稠度变化,软化点用于表征高温稳定性能,延度用于评价低温变形能力。

3. FTIR 分析

3.1. 原材料的 FTIR 特征分析

四种原材料的 FTIR 特征吸收峰位与归属分析如表 1 所示。

由表 1 可知,四种原材料中均含有饱和烃结构,在多处呈现 C-H 伸缩振动特征吸收峰,与沥青及石油基材料的化学组成特征相一致。

老化沥青谱图(图 1)中 1030 cm^{-1} 处检测到 S=O 伸缩振动峰,归属于亚砷基,这是沥青老化过程中硫元素被氧化的特征产物,可作为老化程度的化学标记。此外,老化沥青在 810 cm^{-1} 处呈现芳香族取代苯环的 C-H 弯曲振动峰,表明其含有一定比例的芳香族结构单元。

Table 1. Main FTIR characteristic absorption peaks and their assignments of four raw materials
表 1. 四种原材料的 FTIR 主要特征吸收峰及其归属

样品名称	特征吸收峰(cm^{-1})	吸光度	官能团归属	对应结构特征
老化沥青	2920	0.25	C-H 伸缩振动	饱和烃结构($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$)
	2851	0.17	C-H 伸缩振动	饱和烃结构($-\text{CH}_2-$)
	1456	0.13	C-H 弯曲振动	烷烃链骨架
	1376	0.10	O-H 弯曲振动	醇类或含氧化合物
	1030	0.05	S=O 伸缩振动	亚砷基(老化氧化产物)
	810	0.06	C-H 弯曲振动	芳香族取代苯环
	723	0.07	C-H 弯曲振动	长链烷烃($-(\text{CH}_2)_n-$, $n \geq 4$)
废机油	2921	0.29	C-H 伸缩振动	饱和烃结构($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$)
	2852	0.20	C-H 伸缩振动	饱和烃结构($-\text{CH}_2-$)
	1462	0.11	C-H 弯曲振动	烷烃链骨架
	1377	0.07	O-H 弯曲振动	微量含氧化合物
	965	0.02	C=C 弯曲振动	不饱和烃微量成分
	722	0.04	C-H 弯曲振动	长链烷烃($-(\text{CH}_2)_n-$, $n \geq 4$)
SBR 胶乳	3363	0.24	O-H 伸缩振动	乳化剂或水残留
	2921	0.07	C-H 伸缩振动	饱和烃结构
	1637	0.12	C=C 伸缩振动	聚丁二烯中不饱和双键
	1493	0.07	C-H 弯曲振动	聚苯乙烯环骨架振动
	1452	0.08	C-H 弯曲振动	烷烃链骨架
	966	0.10	C=C 弯曲振动	反式聚丁二烯特征
	697	0.46	C-H 弯曲振动	苯环单取代(聚苯乙烯特征)
石油树脂	3440	0.18	O-H 伸缩振动	含氧化合物/水分
	3040	0.18	C-H 伸缩振动	不饱和烃 C-H
	2932	0.51	C-H 伸缩振动	饱和烃结构($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$)
	1604	0.13	C=C 伸缩振动	不饱和 C=C 键
	1451	0.19	C-H 弯曲振动	烷烃链骨架
	1375	0.13	O-H 弯曲振动	含氧化合物
	1029	0.13	C-N 伸缩振动	含氮杂质
	975	0.13	C=C 弯曲振动	不饱和烃特征
	747	0.18	C-H 弯曲振动	芳香族邻位取代
	699	0.23	C-H 弯曲振动	芳香族单取代

废机油的 FTIR 谱图(图 2)以 2921 cm^{-1} 和 2852 cm^{-1} 处的饱和烃 C-H 伸缩振动为主导, 其 2921 cm^{-1} 处吸光度为 0.29, 略高于老化沥青的 0.25, 表明废机油中饱和烃的相对含量更高。这一组分特征与废机油作为发动机润滑油的基本属性一致, 即富含饱和分与芳香分等低分子量轻质组分, 为其作为再生剂补充老化沥青流失的轻质油分提供了直接的化学依据。

值得注意的是, SBR 胶乳的 FTIR 谱图(图 3)与常规沥青材料差异显著。其最强吸收峰出现在 697 cm^{-1}

处(吸光度 0.46), 归属于聚苯乙烯链段中苯环的单取代 C-H 弯曲振动; 1493 cm^{-1} 处的环骨架振动进一步佐证了苯环结构的存在。 1637 cm^{-1} 处的 C=C 伸缩振动峰及 966 cm^{-1} 处的反式聚丁二烯特征峰, 归属于聚丁二烯链段中的不饱和双键。上述特征峰的联合出现, 明确了 SBR 胶乳的丁苯共聚物化学本质。此外, 3363 cm^{-1} 处的宽峰归属于乳化剂或体系中残留水的 O-H 伸缩振动, 这是胶乳类样品的典型特征。

石油树脂的 FTIR 谱图(图 4)以 2932 cm^{-1} 处极强的 C-H 伸缩振动峰(吸光度 0.51)为主导, 表明其主体结构为饱和烃。 3040 cm^{-1} 处的弱峰归属于不饱和 C-H 伸缩振动, 1604 cm^{-1} 处的 C=C 伸缩振动峰及 975 cm^{-1} 处的 C=C 弯曲振动峰, 共同表明石油树脂中含有少量不饱和键。 747 cm^{-1} 与 699 cm^{-1} 处的特征峰归属于芳香族取代苯环的 C-H 弯曲振动, 暗示其结构中存在芳香族侧基。 3440 cm^{-1} 及 1375 cm^{-1} 处的含氧基团特征峰, 可能来源于树脂合成过程中的残留极性杂质。与废机油相比, 石油树脂的谱图更为复杂, 反映了其作为聚合树脂的多元化学组成特征。

3.2. 再生改性沥青的 FTIR 分析及机理探讨

图 5 为老化沥青、再生沥青及两种再生改性沥青共四组试样的 FTIR 叠加谱图。其中, 蓝线代表老化沥青, 红线代表再生沥青, 黑线代表掺入 SBR 胶乳的再生改性沥青, 绿线代表同时掺入 SBR 胶乳与石油树脂的再生改性沥青。

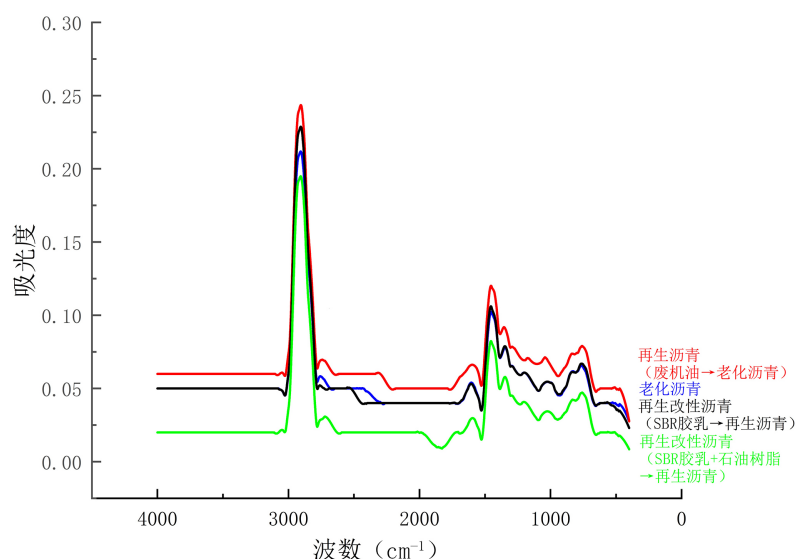


Figure 5. FTIR spectrum of regenerated modified asphalt

图 5. 再生改性沥青的 FTIR 谱图

从图 5 可以直观看出, 四组试样的特征吸收峰位置与谱图形状基本一致, 均以 $2920/2921\text{ cm}^{-1}$ 及 2851 cm^{-1} 处的饱和烃 C-H 伸缩振动为主导峰, 未出现新的吸收峰。这表明共混体系的红外谱图基本为各原材料谱图的线性叠加, 各组分分子间未发生化学键合, 仅通过分子间作用力实现物理共混[18]。这一结论与复合改性冷补沥青中改性剂与沥青形成稳定网络但未发生化学反应的机理相呼应[13]。物理共混的特性保证了再生改性过程不会产生不可逆的化学副产物, 有利于材料在储存和使用过程中的结构稳定性。该物理共混特征与 Lesueur 等对聚合物改性沥青的研究结论一致——SBR 在沥青中以微米级分散相形式存在, 其分散形态受聚合物分子量与沥青组分极性的显著影响[19]。FTIR 未检出新峰的事实进一步佐证了再生改性过程仅涉及分子间物理作用。

为进一步定量评价废机油对老化沥青氧化程度的改善作用, 采用 FTIR 峰高比方法对亚砷基(S=O)含

量进行半定量分析。由于 2920 cm^{-1} 附近 C-H 伸缩振动峰主要来源于沥青中的饱和烃结构，在老化过程中具有较好的稳定性，因此选取该峰作为内标峰，建立亚砷基指数(Sulfoxide Index, SI):

$$SI = \frac{A_{1030}}{A_{2920}}$$

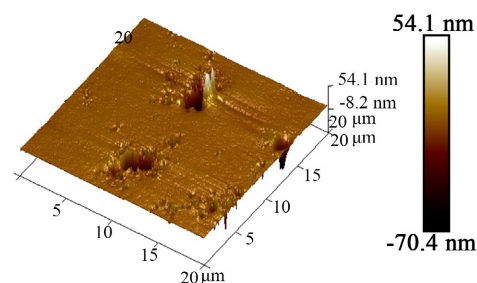
式中， A_{1030} 和 A_{2920} 分别表示 1030 cm^{-1} 处亚砷基(S=O)特征峰及 2920 cm^{-1} 处 C-H 伸缩振动峰的吸光度。

由表 1 可知，老化沥青中 1030 cm^{-1} 处亚砷基吸收峰明显，其峰高为 0.05，而 2920 cm^{-1} 处 C-H 峰高为 0.25，因此计算得到老化沥青 SI 值为 0.200。加入废机油后，再生沥青中 2920 cm^{-1} 处 C-H 峰高保持稳定(0.29)，而 1030 cm^{-1} 处亚砷基峰强度降低至 0.05，对应 SI 值下降至 0.172。相比老化沥青，废机油再生后亚砷基指数降低约 14.0%，表明废机油能够有效减少老化过程中形成的氧化极性结构，缓解沥青氧化程度。

4. AFM 分析

4.1. 废机油对老化沥青微观形貌的修复作用

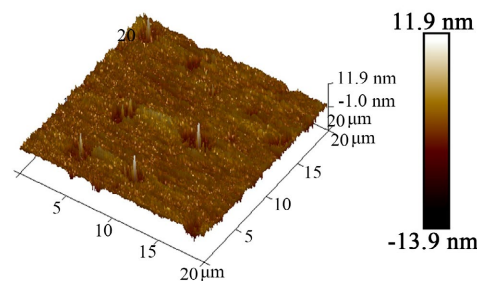
图 6 为老化沥青的 AFM 三维形貌图。表面起伏剧烈，Z 轴范围达 124.5 nm，呈现大量尖锐突起与深色沟壑，反映出沥青质聚集、轻质组分散失的老化特征。理想的再生剂应能补充软质相，平滑表面结构。



Height Sensor

Figure 6. AFM-3D image (aged asphalt)

图 6. AFM-3D 图像(老化沥青)



Height Sensor

Figure 7. AFM-3D image (Recycled asphalt (aged asphalt with waste engine oil))

图 7. AFM-3D 图像(再生沥青(掺入废机油的老化沥青))

图 7 为加入废机油后再生沥青的 AFM 图像。对比可见，表面粗糙结构被有效“削平”，突起高度显著降低，深色沟壑变浅。这直观地验证了废机油通过补充软质相、促进沥青质聚集体解絮凝与再分散，

实现了对老化沥青表面的物理修复，为后续改性剂的网络构建提供了平整的基体。

4.2. SBR 胶乳的影响

图 8 为加入 SBR 胶乳后共混体系的 AFM 图像。表面起伏有增加，出现均匀分布的颗粒结构，表明 SBR 在沥青中形成微小分散相，与沥青有良好的相容性。这种微观尺度的颗粒分散相增加了表面的纳米粗糙度，形成大量微观应力缓冲区，有助于改善材料在低温条件下的韧性与变形能力，从微观形貌层面解释了 SBR 胶乳提升沥青低温抗裂性能的机理。Masson 等利用 AFM 力谱技术发现 SBR 富集相区域表现出较低的弹性模量和较高的粘附力，为聚合物低温增韧提供了微观证据[20]。本研究中 SBR 颗粒分散相($R_a = 2.83 \text{ nm}$)作为微观应力缓冲区，在形貌层面与之对应。

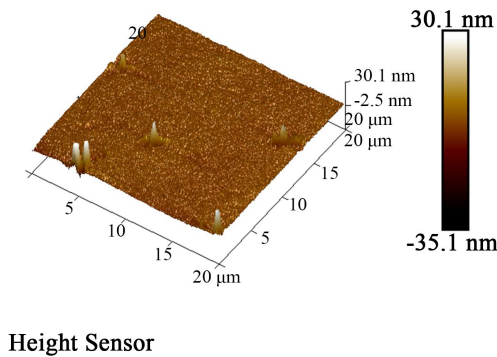


Figure 8. AFM-3D image (Rejuvenated modified asphalt (rejuvenated asphalt with SBR latex))
图 8. AFM-3D 图像(再生改性沥青(掺入 SBR 胶乳后的再生沥青))

4.3. 石油树脂的影响

图 9 为加入石油树脂后体系的 AFM 图像。表面更加光滑，聚合物网络结构更为致密，推测石油树脂促进了 SBR 颗粒的融合与网络化，形成类似于复合改性中多尺度网络的结构[13]。这种致密的聚合物网络能够有效约束沥青分子的运动，从而提高材料的抗车辙与抗裂性能。

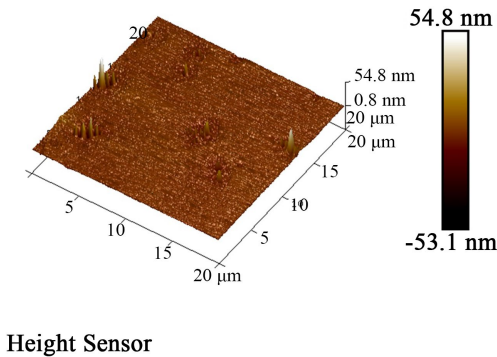


Figure 9. AFM-3D image (Rejuvenated modified asphalt (rejuvenated asphalt with SBR latex and petroleum resin))
图 9. AFM-3D 图像(再生改性沥青(掺入 SBR 胶乳与石油树脂的再生沥青))

4.4. AFM 粗糙度参数综合分析

不同沥青试样的 AFM 表面粗糙度参数如表 2 所示。由表 2 可知：
老化沥青的 R_z 为 124.5 nm， R_a 为 3.52 nm，表明老化表面虽在 Z 轴方向起伏剧烈，但微观平均粗糙

度处于中等水平。其中 Rq (11.25 nm)显著大于 Ra (3.52 nm)，表明表面存在少量极高或极低的极端值(即尖锐突起与深沟壑)，与 AFM 图像“大量尖锐突起与深色沟壑”的特征一致，反映出沥青质聚集、轻质组分分散失所导致的表面结构劣化。

Table 2. AFM surface roughness parameters of different asphalt samples
表 2. 不同沥青试样的 AFM 表面粗糙度参数

试样	Ra (nm)	Rq (nm)	Rz (nm)	表面形貌特征描述
老化沥青	3.52	11.25	124.5	表面起伏剧烈，大量尖锐突起与深色沟壑，沥青质聚集明显
再生沥青 (掺入废机油的老化沥青)	1.17	2.07	25.8	表面趋于平整，突起被“削平”，沟壑被“填满”
再生改性沥青 (掺入 SBR 胶乳后的再生沥青)	2.83	6.16	65.2	表面分布均匀颗粒状突起，SBR 分散相形成
再生改性沥青 (掺入 SBR 胶乳与石油树脂的再生沥青)	1.15	2.89	107.9	表面出现大尺度起伏，聚合物网络结构形成

注：Ra 为算术平均粗糙度(Arithmetic Mean Roughness)；Rq 为均方根粗糙度(Root Mean Square Roughness)；Rz 为轮廓最大高度(Maximum Height)，即 Z 轴范围。

加入废机油后，Ra 降至 1.17 nm (降幅 66.8%)，Rq 降至 2.07 nm (降幅 81.6%)，Rz 降至 25.8 nm (降幅 79.3%)。三个粗糙度参数同步大幅下降，从定量层面证实了废机油对老化沥青表面“削峰填谷”的修复效果——废机油通过补充软质相、促进沥青质再分散，使表面粗糙度大幅降低。

进一步掺入 SBR 胶乳后，Ra 升至 2.83 nm，Rz 升至 65.2 nm，Rq 升至 6.16 nm。SBR 胶乳的加入使三个粗糙度参数均显著增加，这与图 8 AFM 图像中“均匀分布的颗粒结构”一致——SBR 在沥青中形成微小分散相颗粒，增加了表面的微观粗糙度。这种微观粗糙度的增加有利于改善材料在低温条件下的韧性与变形能力。

同时掺入 SBR 胶乳与石油树脂后，Ra 降至四组中最低的 1.15 nm (较掺入 SBR 胶乳的再生改性沥青降幅 59.4%)，Rq 降至 2.89 nm (降幅 53.1%)，表明石油树脂有效促进了 SBR 分散相颗粒的融合，使微观表面趋于均匀平整；然而 Rz 却升至 107.9 nm，接近老化沥青水平，反映出在更大尺度上形成了新的起伏结构。这一“Ra、Rq 降，Rz 升”的矛盾趋势表明，石油树脂的加入改变了 SBR 在沥青中的分散形态——从原先大量微小颗粒均匀分布(掺入 SBR 胶乳的再生改性沥青)，转变为融合后形成更大尺度的网络化结构(掺入 SBR 胶乳与石油树脂的再生改性沥青)，导致微观局部平整度提高而宏观表面起伏增大。该微观形貌变化与 FTIR 分析中“未生成新官能团、改性为物理共混”的结论相互印证。

综上，AFM 图像直观验证了废机油对老化沥青表面的再生修复作用，以及 SBR 胶乳与石油树脂对沥青微观形貌的调控作用——前者通过分散相颗粒增韧，后者通过促进聚合物网络融合进一步优化微观结构，二者共同为再生冷补剂的配方优化提供了微观层面的形貌依据。

4.5. 宏观性能与微观结构关联分析

为进一步验证再生剂及改性剂对老化沥青性能恢复与提升的作用，结合针入度、软化点和延度作为宏观性能指标，对不同沥青试样的性能变化与 AFM 微观形貌演变规律进行关联分析，探讨再生改性作用机制。不同沥青试样基本性能指标如表 3 所示。

结合表 2 和表 3 可知，AFM 粗糙度参数变化与宏观性能演变之间具有较好的对应关系。老化沥青 Rz

最高(124.5 nm),同时表现出最低针入度(26.5)和最小延度(33.2 cm),说明长期氧化导致沥青质聚集和组分分布不均,使表面高度起伏增大,并伴随明显硬化和脆化行为。加入废机油后,Ra、Rq 和 Rz 分别降低66.8%、81.6%和 79.3%,同时针入度提高至 60.5,延度增加至 110.2 cm,表明废机油通过补充轻质组分、促进沥青质重新分散,使微观表面结构趋于平整,并实现老化沥青柔韧性的恢复,该结果支持了废机油“削峰填谷”的物理修复机制。

Table 3. Basic performance indicators of different asphalt samples
表 3. 不同沥青试样基本性能指标

试样	针入度(25℃, 100 g, 5 s)	软化点(环球法)	延度(15℃, 5 cm/min)
老化沥青	26.5	56.7	33.2
再生沥青 (掺入废机油的老化沥青)	60.5	52.1	110.2
再生改性沥青 (掺入 SBR 胶乳后的再生沥青)	62.4	54.7	122.9
再生改性沥青 (掺入 SBR 胶乳与石油树脂的再生沥青)	61.5	58.6	126.4

SBR 胶乳加入后,Ra、Rq 和 Rz 均有所增加,同时针入度提高至 62.4,延度进一步增加至 122.9 cm,软化点由 52.1℃提高至 54.7℃。结合 AFM 图像可知,SBR 在沥青体系中形成均匀分布的颗粒分散相,其弹性链段能够提供应力缓冲作用,从而改善材料的变形恢复能力和温度稳定性。

当 SBR 与石油树脂共同加入后,复合改性沥青软化点提高至四组最高值(58.6℃),Ra 降低至最低值(1.15 nm),而 Rz 增加至 107.9 nm。这种“Ra 降低、Rz 升高”的变化趋势表明,石油树脂促进了 SBR 分散相之间的融合,使局部微观区域更加均匀,同时推动体系由颗粒分散结构向大尺度网络结构转变,从而增强材料结构稳定性。

综上,废机油、SBR 胶乳和石油树脂在再生改性沥青体系中发挥协同作用:废机油通过补充轻质组分恢复老化沥青胶体结构,SBR 通过形成弹性分散相改善材料韧性,石油树脂进一步促进聚合物网络构建,提高体系稳定性。针入度、软化点和延度等宏观性能变化与 AFM 微观形貌演变规律相互对应,建立了再生改性沥青“微观形貌-宏观性能”的多尺度关联关系。崔亚楠等研究发现废机油能减少老化沥青表面的“峰状”结构、降低粗糙度,与本研究 AFM 结果一致[11]。与上述研究相比,本研究的核心差异在于:废机油不仅直接再生老化沥青,还为后续 SBR/石油树脂复合改性提供了平整基体,体现了“再生-改性-网络化”的逐级调控特征。针对 Safaei 等指出的再生剂在恢复低温性能的同时常伴随高温性能下降的矛盾[21],本研究中石油树脂的引入使软化点由 54.7℃提升至 58.6℃,在一定程度上缓解了该问题。

5. 结论

本研究基于 FTIR 与 AFM 技术,系统分析了再生剂与改性剂对老化沥青微观结构与化学特性的影响,得出以下结论:

- 1) 废机油作为再生剂,主要通过补充软质相、促进沥青质再分散的方式,实现对老化沥青表面的“削峰填谷”与物理修复;
- 2) SBR 胶乳与石油树脂通过形成均匀致密的聚合物网格结构,提升沥青的力学性能;其中石油树脂促使 SBR 从颗粒分散向大尺度网络融合转变;

3) FTIR 分析表明, 再生与改性过程均为物理共混, 未发生化学反应;

4) AFM 图像直观验证了再生剂与改性剂对沥青微观形貌的调控作用, 为再生冷补剂的配方优化提供了理论依据。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目: 低碳固路——100% RAP 再生沥青冷补料修补技术研究(教高司函[2025] 10 号)。

湖南省大学生创新创业训练计划项目: 低碳固路——100% RAP 再生沥青冷补料修补技术研究(湘教通〔2025〕141 号(202510534031))。

江西省交通运输厅科技项目(项目编号: 2025YB046): 冷拌冷铺全玄武岩长效超粘磨耗层技术研究与应用。

参考文献

- [1] 韩赣, 高明月. 沥青路面坑槽快速修补技术施工工艺研究[J]. 科学技术创新, 2021(8): 116-117.
- [2] 朱沉峰. 不同添加剂温拌沥青混合料使用性能比较[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [3] 史宝红. 增韧环氧沥青冷补料设计与路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [4] Xie, W., Li, L. and Yang, R. (2025) Multiscale Evaluation System for Cold Patch Asphalt Mixtures: Integrating Macro-Performance Tests and Meso-Structural CT Analysis. *Applied Sciences*, **15**, Article 7121. <https://doi.org/10.3390/app15137121>
- [5] 许龙, 彭馨彦, 洪晶, 等. 水反应型高耐久沥青常温修补料性能试验评价[J]. 中国公路, 2023(7): 103-105.
- [6] 程跟成. 布敦岩沥青厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [7] Bi, C., Wang, X., Fu, J., Zhao, H., Zheng, M. and Xu, J. (2025) Study on the Filler Composition Optimization and Performance Evaluation of Cold-Patch Asphalt Mixture. *Materials*, **18**, Article 3894. <https://doi.org/10.3390/ma18163894>
- [8] Zhang, K., Xiong, J., Ruiz, C. and Zhang, J. (2024) Design and Performance Assessment of Sustainable Road Pothole Patching Materials Using Waste Cooking Oil, Plastic, and Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **429**, Article 136426.
- [9] 汤帅冰. 废机油底渣再生沥青低温性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [10] Yang, S. (2022) Study on Performance of Reactive Dilution Cold Patching Asphalt Mixture. Master's Thesis, Beijing University of Civil Engineering and Architecture.
- [11] 崔亚楠, 崔树宇, 郭立典. 废机油再生 SBS 改性沥青的性能及机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 164-170.
- [12] 张洁. PU/SBR 复合改性沥青及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(5): 155-159+170.
- [13] Fan, X., Ma, C., Wang, S., *et al.* (2025) Development and Evaluation of Composite Modified Cold Patch Asphalt and Cold Patch Asphalt Mortar. *Construction and Building Materials*, **495**, Article 143666.
- [14] 孙强, 李广兵, 隋国栋, 等. 脱硫胶粉复合改性高模量沥青制备及其混合料性能分析[J]. 森林工程, 2025, 41(5): 1062-1072.
- [15] 李宁宇. 植物油再生沥青宏观流变特征及其微观再生机理研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江师范大学, 2021.
- [16] Wang, T., Dra, Y.A.S.S., Cai, X., *et al.* (2022) Advanced Cold Patching Materials (CPMs) for Asphalt Pavement Pothole Rehabilitation: State of the Art. *Journal of Cleaner Production*, **366**, Article 133001.
- [17] 朱莉. SBS/REOB 对老化沥青的复合改性再生行为与机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东交通学院, 2022.
- [18] 吴文娟, 金永灿, 吴建涛, 等. 木质素改性沥青的红外光谱分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 120-124.
- [19] Lesueur, D. (2009) The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, **145**, 42-82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- [20] Masson, J., Leblond, V. and Margeson, J. (2006) Bitumen Morphologies by Phase-Detection Atomic Force Microscopy.

- Journal of Microscopy*, **221**, 17-29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2006.01540.x>
- [21] Safaei, F., Lee, J., Nascimento, L.A.H.D., Hintz, C. and Kim, Y.R. (2014) Implications of Warm-Mix Asphalt on Long-Term Oxidative Ageing and Fatigue Performance of Asphalt Binders and Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, **15**, 45-61. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927050>