

基于响应面法的RAP再生冷补剂组分优化与性能研究

王立宸¹, 聂忆华¹, 瞿俊杰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25日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月20日

摘要

为提升废旧沥青混合料利用率, 开发专用再生冷补剂。以老化沥青为基体, 选取废机油、SBR胶乳及石油树脂为关键组分, 采用响应面法(Box-Behnken设计)分析三者掺量对冷补液60℃标准粘度的影响; 并试验研究SBR与石油树脂对再生沥青软化点与15℃延度的改善效果。结果表明: 废机油掺量是影响冷补液粘度的唯一显著因素($P < 0.0001$), 呈负向线性关系, 是控制施工和易性的关键参数; SBR与石油树脂能有效提升再生沥青的软化点和延度, 但石油树脂掺量超过1.5%会导致延度下降。基于“工作性优先, 性能优化”原则, 优化配合比(占老化沥青质量百分比)为: 老化沥青:SBR胶乳:石油树脂:废机油 = 100:5:1.5:10。该研究为RAP在冷补养护中的高效、高值化利用提供了有价值的技术方案和理论依据。

关键词

道路工程, 再生冷补剂, 响应面法(Box-Behnken设计), 废旧沥青混合料(RAP), 多组分优化

Optimization of Components and Performance of RAP Recycled Cold Patch Agent Based on Response Surface Methodology

Lichen Wang¹, Yihua Nie¹, Junjie Qu¹, 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 25, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 20, 2026

文章引用: 王立宸, 聂忆华, 瞿俊杰, 姚国森, 肖宏宇. 基于响应面法的 RAP 再生冷补剂组分优化与性能研究[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 664-675. DOI: 10.12677/ojtt.2026.155057

Abstract

To improve the utilization rate of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), a specialized recycled cold patch agent was developed. Using aged asphalt as the matrix, waste engine oil, SBR latex, and petroleum resin were selected as key components. The response surface methodology (Box-Behnken design) was employed to analyze the effects of their dosages on the 60°C standard viscosity of the cold patch liquid, and experiments were conducted to investigate the improvements of SBR and petroleum resin on the softening point and 15°C ductility of regenerated asphalt. Results indicate that waste engine oil dosage is the only significant factor affecting viscosity ($P < 0.0001$), with a negative linear relationship, serving as the key parameter controlling construction workability. The addition of SBR and petroleum resin effectively enhances both softening point and ductility of regenerated asphalt, but petroleum resin dosage exceeding 1.5% leads to a noticeable decrease in ductility. Based on the principle of “workability priority, performance optimization”, the optimized mix proportion (percentage by mass of aged asphalt) is determined as: aged asphalt:SBR latex:petroleum resin:waste engine oil = 100:5:1.5:10. This study provides valuable technical solutions and a theoretical basis for the efficient and high-value utilization of RAP in cold-patching maintenance.

Keywords

Road Engineering, Recycled Cold Patch Agent, Response Surface Methodology (Box-Behnken Design), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Multi-Component Optimization

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

沥青属于石油炼制过程中的副产物，是一类不可再生资源。在自然环境中，在雨水的冲刷、紫外线照射、氧气氧化以及温度变化等作用下易发生氧化老化，服役性能降低[1]。

随着我国公路交通事业的快速发展，沥青路面养护与改扩建产生的废旧沥青混合料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)数据急剧攀升。据统计，截至 2025 年，我国每年因道路养护、翻修产生的 RAP 已突破 2 亿吨，但其再生利用率仍不足 30%，远低于发达国家普遍达到的 80%~90%的水平。大量的 RAP 的堆存与填埋不仅占用土地资源，并造成“黑色污染”和资源的巨大浪费。将 RAP 资源化利用用于路面养护工程，既是缓解环境压力的迫切需求，也是实现交通行业绿色低碳循环发展的重要途径。

沥青路面坑槽的快速修补是养护工作的关键。冷补沥青混合料因其施工便捷、不受温度限制等优点，成为应急修补的重要手段[2]。然而，传统冷补料常存在初始强度低、成型慢、耐久性不足等问题，且多采用新集料，成本较高[3][4]。与此同时，RAP 中的沥青因长期服役已发生严重老化，其针入度降低、软化点升高、延度显著下降，直接用于冷补料难以满足路用性能要求，必须通过再生手段恢复其基本性能[5]。因此，开发一种能够兼顾 RAP 资源化利用与冷补施工要求的专用再生冷补剂，具有重要的工程应用价值和环境效益。

当前，冷补料根据胶结料类型主要分为溶剂型、反应型和乳化型。溶剂型冷补料以稀释剂(如柴油、煤油等有机溶剂)稀释沥青以降低沥青粘度、保证施工和易性，但存在强度形成慢、溶剂挥发污染等问题[6]；反应型冷补料(如环氧、聚氨酯改性)强度高、成型快，但成本昂贵[7]；乳化型冷补料依赖水分蒸发

破乳, 强度发展受环境影响大[8]。

三类冷补料在各自适用场景中均有优势, 但均未专门针对 RAP 中老化沥青的性能补偿需求进行系统设计。针对 RAP 的冷补再生应用, 需开发一种能够同时实现老化沥青性能恢复、保证冷施工和易性、且成本可控的专用冷补剂, 其技术核心在于稀释剂、再生剂与改性剂的多组分协同优化。

在组分选择方面, 废机油富含轻质油分和芳香烃组分, 既能作为稀释剂降低沥青粘度以改善施工和易性, 又能补充老化沥青中缺失的轻质组分以实现初步再生, 是一种兼具稀释与再生功能的经济型材料; 丁苯橡胶(SBR)胶乳作为弹性体改性剂, 能够在沥青中形成交联网络结构, 有效提升沥青的弹性恢复能力和低温变形能力[8]; 石油树脂作为一种增粘树脂, 可与沥青中的极性组分发生物理或化学作用, 提高沥青的粘结性与高温稳定性[9]。三者分别对应冷补剂对工作性、低温性能与高温性能的核心需求, 但其协同作用机制及最优掺配比例尚缺乏系统研究。

响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种高效的多元统计优化技术, 通过合理的试验设计能以较少的试验次数建立影响因素与响应值之间的数学回归模型, 并确定最优参数组合[10]。近年来, 响应面法已在沥青材料配方优化中得到广泛应用, 如 SBS/玄武岩纤维复合改性沥青掺配比设计、SBR/SBS/胶粉复合改性沥青最优掺量确定等领域均取得了良好效果, 但在 RAP 再生冷补剂组分优化方面的应用鲜见报道。

基于上述分析, 本研究以老化沥青为基体, 选取废机油(稀释/再生)、SBR 胶乳(增韧改性)和石油树脂(增粘改性)为关键组分。首先, 采用响应面法中的 Box-Behnken 设计, 建立三组分掺量与冷补液 60℃标准粘度之间的数学模型, 明确各因素对施工和易性的影响规律与显著性; 进而, 通过再生改性沥青性能试验, 系统研究 SBR 与石油树脂掺量对再生沥青软化点与 15℃延度的改善效果, 揭示二者对高温性能的作用机理; 最终, 综合“工作性优先、性能优化”的设计原则, 确定 RAP 再生冷补剂的最优配合比。研究成果旨在为 RAP 在冷补养护中的高效、高值化利用提供科学的配方设计方法与技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 原材料

(1) 沥青: 70 号道路石油沥青(A 级), 符合 JTG F40-2004 技术要求。老化沥青来源于某高速公路铣刨 RAP 料, 经三氯乙烯抽提回收获得。其基本性能指标为: 针入度(25℃, 100 g, 5 s)为 26.5 (0.1 mm), 软化点(环球法)为 56.7℃, 延度(15℃, 5 cm/min)为 33.2 cm。

(2) 废机油: 采用经沉降、过滤预处理的废旧发动机油, 作为稀释剂并补充轻质油分以辅助再生。

(3) SBR 胶乳: 阳离子型丁苯橡胶胶乳, 固含量约 50%, 用于改善沥青弹性与低温抗裂性。

(4) 石油树脂: 浅黄色固体颗粒, 用于提高沥青粘结性与高温稳定性。

2.2. 试验设计

2.2.1. 冷补液粘度响应面试验

以废机油掺量(A)、SBR 胶乳掺量(B)、石油树脂掺量(C)为因素(均以占老化沥青质量百分比计), 以 60℃标准粘度(s)为响应值(Y1)。采用 Design-Expert 软件进行 3 因素 3 水平 Box-Behnken 设计, 共 17 组试验。因素水平基于预试验设定, 见表 1。

2.2.2. 再生改性沥青性能试验

固定废机油掺量为 10%(基于前期工作性评估), 以 SBR 掺量(3%, 4%, 5%)和石油树脂掺量(0%, 1.5%, 3%)为变量, 进行 3×3 全面试验。对制得的再生改性沥青, 测试其软化点(表征高温性能)和 15℃延度(表征低温性能)。

Table 1. List of factors and levels of response surface methodology (Mass ratio, %)**表 1.** 响应面法因素与水平表(质量比, %)

序号	废机油	SBR 胶乳	石油树脂	冷补液标准粘度(s)
1	30	5	3.0	44.7
2	35	4	3.0	23.9
3	30	5	0	40.3
4	30	3	3.0	37.8
5	30	4	1.5	38.9
6	30	3	0	42.5
7	30	4	1.5	42.1
8	35	3	1.5	34.7
9	25	3	1.5	49.2
10	30	4	1.5	42.5
11	30	4	1.5	42.0
12	30	4	1.5	38.2
13	25	4	3.0	51.3
14	25	5	1.5	51.6
15	35	5	1.5	25.8
16	35	4	0	27.2
17	25	4	0	53.7

2.3. 试验方法

(1) 冷补液制备与粘度测试：按设计配比，将老化沥青加热至 120℃，依次加入废机油、SBR 胶乳、石油树脂，在 3000 r/min 转速下剪切混合 10 min，制得均匀冷补液。采用 SYD-0621 型沥青标准粘度计，于 60℃ 水浴中测定标准粘度。

(2) 再生改性沥青制备与性能测试：将老化沥青加热至流动状态，加入规定量废机油，剪切搅拌 10 min 进行初步再生；随后加入 SBR 胶乳和石油树脂，在 130℃ 下继续剪切共混 40 min，得到再生改性沥青样品。按 JTG E20-2011 测定软化点(T0606-2011)和 15℃ 延度(T0605-2011)。

3. 结果与讨论

3.1. 冷补液标准粘度响应面分析

对 17 组试验结果进行多元回归分析，通过多种模型比较(见表 2)，选择简化线性模型，得到冷补液标准粘度(Y1)的简化模型：

$$Y1 = 40.38 - 11.78A - 0.2250B - 0.7500C \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9003$$

方差分析(ANOVA, Analysis of Variance)结果见表 3。

由表 2 可知，模型 P 值 < 0.0001，极显著；失拟项 P 值 = 0.1587 > 0.05，不显著，表明模型拟合良好。在三个因素中，仅废机油掺量(A)的 P 值 < 0.0001，对粘度具有极其显著的负效应；SBR 胶乳和石油

树脂的 P 值均大于 0.05，影响不显著。这表明，在本研究设定的掺量范围内，冷补液的初始施工和易性主要由稀释剂废机油的用量控制。这一结论与冷补料设计中“稀释剂是调控工作性关键因素”的普遍共识一致[11][12]。模型显示，粘度随废机油掺量增加近似线性下降，为施工中通过调整废机油用量来精确控制流动性提供了依据。

Table 2. List of goodness-of-fit of models with different orders
表 2. 不同阶数模型拟合优度表

来源	序列 P 值	失拟 P 值	调整 R ²	预测 R ²	备注
线性模型	<0.0001	0.1587	0.8774	0.8048	推荐模型
两因子交互	0.1189	0.2327	0.9090	0.7629	
二次模型	0.7194	0.1310	0.8913	0.4305	
三次模型	0.1310		0.9471		存在混叠

Table 3. ANOVA for response surface model of standard viscosity
表 3. 标准粘度响应面模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1440.48	3	480.16	39.18	<0.0001	显著
废机油	1433.77	1	1433.77	117.02	<0.0001	显著
SBR 胶乳	0.52	1	0.52	0.04	0.8394	不显著
石油树脂	5.82	1	5.82	0.47	0.5029	不显著
残差	159.67	13	12.28			
失拟项	110.48	9	12.28	2.90	0.1587	不显著
纯误差	49.19	4	12.30			
总和	1600.15	16				

3.2. SBR 与石油树脂对再生沥青高低温性能的影响

固定废机油为 10%时，不同 SBR 与石油树脂掺量下再生沥青的性能的试验结果见表 4 和图 1~6。

Table 4. List of test results of modified asphalt with different components
表 4. 改性沥青各组分试验结果表

序号	SBR 胶乳	石油树脂	软化点/℃	15℃延度/cm
1	3%	0	52.7	115.2
2	3%	1.50%	57.4	117.3
3	3%	3%	60.1	116.8
4	4%	0	54.7	120.7
5	4%	1.50%	58.1	125.6
6	4%	3%	62.0	124.5
7	5%	0	54.7	122.9
8	5%	1.50%	58.6	126.4
9	5%	3%	62.3	124.7

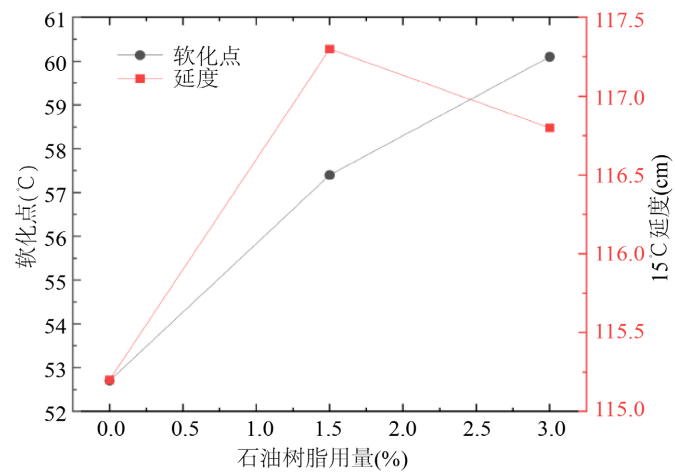


Figure 1. Curves of softening point and ductility change at 3% SBR content

图 1. SBR 掺量为 3% 时软化点与延度变化曲线

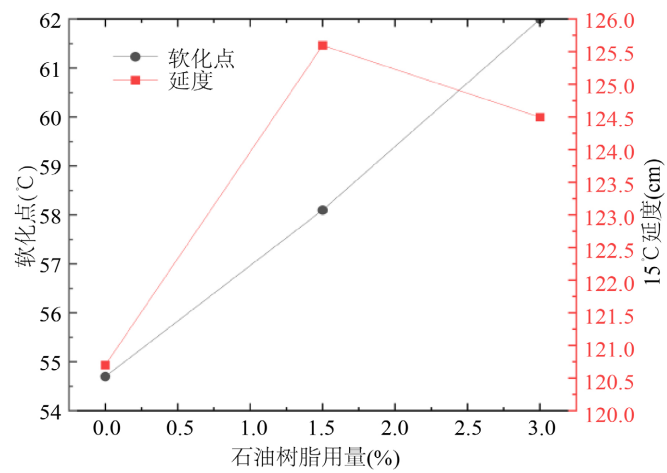


Figure 2. Curves of softening point and ductility change at 4% SBR content

图 2. SBR 掺量为 4% 时软化点与延度变化曲线

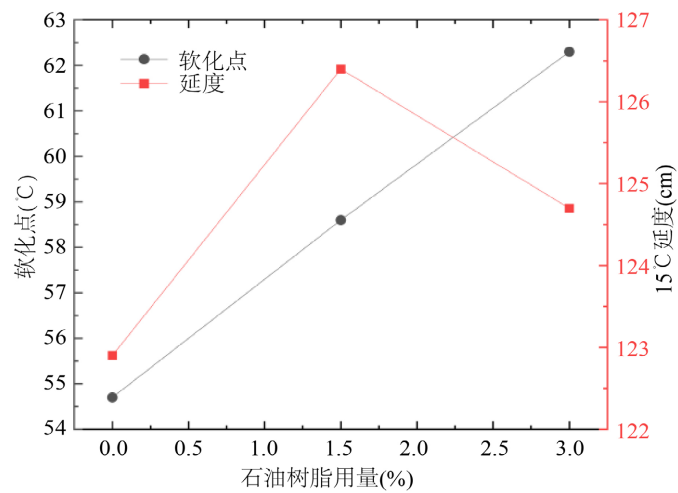


Figure 3. Curves of softening point and ductility change at 5% SBR content

图 3. SBR 掺量为 5% 时软化点与延度变化曲线

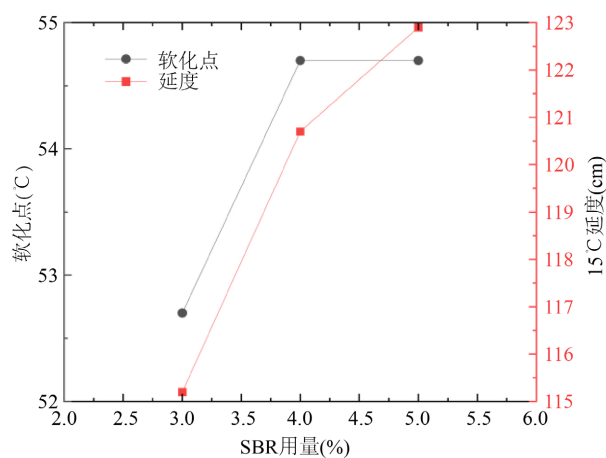


Figure 4. Curves of softening point and ductility change at 0% petroleum resin content

图 4. 石油树脂掺量为 0 时软化点与延度变化曲线

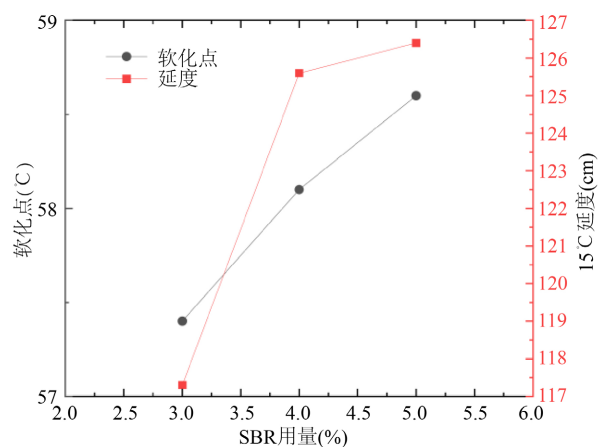


Figure 5. Curves of softening point and ductility change at 1.5% petroleum resin content

图 5. 石油树脂掺量为 1.5% 时软化点与延度变化曲线

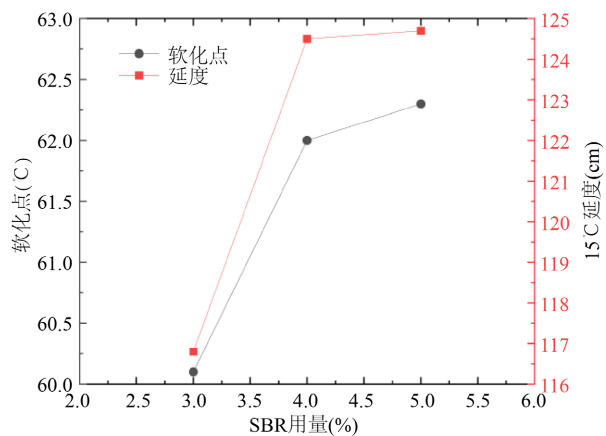


Figure 6. Curves of softening point and ductility change at 3% petroleum resin content

图 6. 石油树脂掺量为 3% 时软化点与延度变化曲线

由表 4 和图 1~6 分析可得:

(1) SBR 胶乳的影响: 在任一石油树脂掺量下, 随 SBR 掺量从 3% 增至 5%, 软化点和延度总体呈上升趋势。SBR 作为弹性体, 能形成网络结构, 有效提升沥青的弹性恢复能力和低温变形能力, 从而同时改善高低温性能。

(2) 石油树脂的影响: 在固定 SBR 掺量下, 随石油树脂掺量从 0% 增至 3%, 软化点持续显著提高, 表明石油树脂对提升沥青高温抗变形能力作用明显。然而, 当石油树脂掺量达到 3% 时, 与 1.5% 掺量相比, 延度出现下降。这可能是因为过量的石油树脂增强了沥青的刚性与粘性, 但牺牲了部分塑性, 导致低温延展性降低[9]。

在微观层面分析此现象, 石油树脂的掺入首先会吸附沥青中的轻质组分, 并以颗粒状形态分散于体系中。随着石油树脂掺量增加, 树脂相逐步富集, 与沥青基体之间的模量差异增大。当掺量达到 3% 时, 富集的树脂相在拉伸过程中成为应力集中点, 削弱了材料的均匀变形能力, 从而诱发微裂纹的早期萌生与扩展, 导致沥青延度下降。此外, 石油树脂作为增黏组分, 其玻璃化转变温度较高, 过量掺入会提高沥青体系的玻璃化转变温度, 降低分子链段在低温下的运动能力, 使材料表现出脆性增强、延展性降低的趋势。

沥青材料的塑性直接决定了其在低温条件下的应力松弛能力。当塑性降低时, 沥青抵抗低温收缩应变的能力减弱, 进而削弱路面的抗低温开裂性能。考虑到本研究拟将所研制的冷补剂应用于废旧沥青混合料的再生利用, 而自 20 世纪 90 年代末以来, SBS 改性沥青因其优异的高低温性能, 已在我国高速公路建设中得到广泛应用, 其在高温抗变形能力方面表现尤为突出。因此, 在优选石油树脂掺量时, 本研究在兼顾高温性能的基础上, 进一步强化对沥青塑性的提升要求。

经综合权衡, 最终选取 1.5% 的石油树脂掺量作为基准配比, 以实现在提升高温性能的同时, 避免因树脂过量掺加对低温性能造成负面影响。

为进一步揭示 SBR 胶乳和石油树脂改善再生沥青性能的内在机制, 本文进一步采用傅里叶变换红外光谱(FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy)和原子力显微镜(AFM, Atomic Force Microscopy)技术, 从化学结构变化和微观形貌演变角度分析改性组分对老化沥青体系的作用规律。

3.3. FTIR 分析: SBR 与石油树脂对再生沥青化学结构的影响

采用 FTIR 对老化沥青、废机油再生沥青、废机油 + 5% SBR 改性沥青及废机油 + 5% SBR + 1.5% 石油树脂复合改性沥青四组样品进行化学结构表征。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(如图 7 所示), 图片引至作者以往研究[13], 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。

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。选取 2920 cm^{-1} 处 C-H 伸缩振动峰作为内标峰, 建立亚砷基指数 $SI = A_{1030}/A_{2920}$ 。老化沥青中 1030 cm^{-1} 处亚砷基吸收峰明显(吸光度 0.05), 2920 cm^{-1} 处 C-H 峰高为 0.25, 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), 1030 cm^{-1} 处亚砷基峰强度降低, SI 值下降至 0.172, 降幅约 14.0%, 表明废机油能够有效稀释极性含氧官能团的相对浓度, 缓解沥青氧化程度。

SBR 样品中 966 cm^{-1} (反式聚丁二烯)和 697 cm^{-1} (聚苯乙烯单取代苯环)处出现 SBR 特征峰, 证实 SBR 已成功引入沥青体系; SR 样品中进一步出现石油树脂的芳香族取代特征峰, 但均未检测到新化学键生成。FTIR 结果表明, 废机油的再生作用以物理稀释和组分补充为主, SBR 与石油树脂的改性以物理共

混方式实现，三者共同构成“再生 - 改性 - 网络化”的物理调控体系。

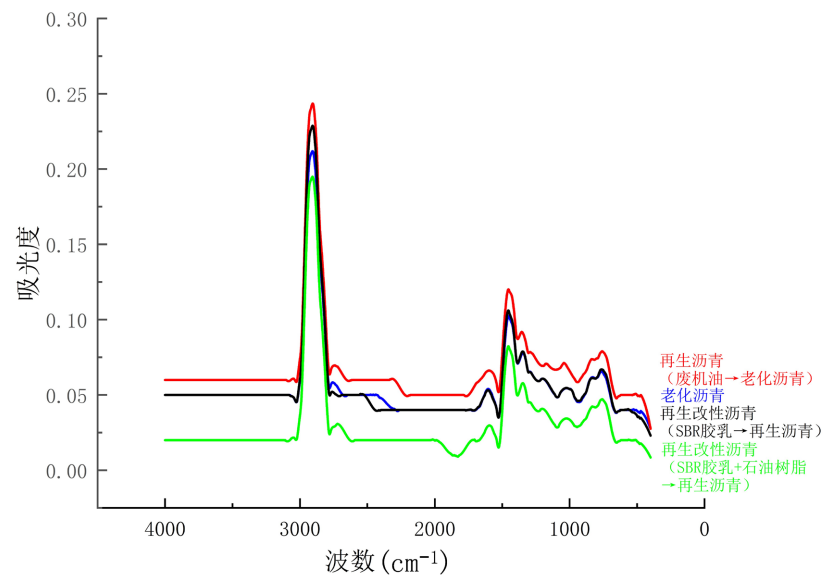


Figure 7. FTIR spectrum of regenerated modified asphalt
图 7. 再生改性沥青的 FTIR 谱图

3.4. AFM 分析：SBR 与石油树脂对再生沥青微观形貌的影响

采用 AFM 对四组试样进行表面形貌观测，粗糙度参数见表 5 (表格引自作者以往研究[13])。

Table 5. Surface roughness parameters and morphological characteristics of different asphalt samples
表 5. 不同沥青试样的表面粗糙度参数及形貌特征

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

老化沥青表面起伏剧烈，Rz 达 124.5 nm，呈现大量尖锐突起与深色沟壑。加入废机油后，Ra、Rq 和 Rz 分别降至 1.17 nm、2.07 nm 和 25.8 nm，表面趋于平整，证实废机油通过补充软质相、促进沥青质解絮凝实现了物理修复。掺入 SBR 胶乳后，Ra 升至 2.83 nm，Rz 升至 65.2 nm，表面出现均匀颗粒状分散相，形成微观应力缓冲区，有利于改善低温韧性。同时掺入 SBR 与石油树脂后，Ra 降至四组最低(1.15 nm)，Rq 降至 2.89 nm，但 Rz 显著升至 107.9 nm，表明石油树脂促进 SBR 分散相融合形成大尺度聚合物网络结构。AFM 分析从微观形貌层面揭示了“废机油修复平整→SBR 分散相增韧→石油树脂网络化增强”的逐级调控机制，与宏观性能变化规律相一致。

3.5. 再生冷补剂优化配合比的确定

在多组分配方优化过程中,各性能指标的优化方向存在差异,其中粘度属于望小特性,延度属于望大特性,而软化点属于望目特性。为实现施工和易性与路用性能的综合平衡,本研究采用期望函数法(Desirability Function Approach, DFA)对不同配比进行综合评价。该方法将各响应指标转化为0~1范围内的无量纲期望值,并通过综合期望值D评价各配比的整体性能。

根据响应面模型及性能试验结果,设定三个响应指标的优化目标:冷补液60℃标准粘度 ≤ 30 s,以保证施工和易性;15℃延度 ≥ 120 cm,以保证低温抗裂性能;软化点控制在 58 ± 2 ℃范围内,以兼顾高温稳定性和材料塑性。采用Design-Expert软件中的DFA模块进行计算,各响应权重均设为1。

计算结果表明,响应面试验范围内第8组配比(废机油35%、SBR3%、石油树脂1.5%)获得最高综合期望值 $D=0.872$,说明增加废机油掺量有利于改善冷补液流动性。然而,考虑到过量废机油可能降低胶结料有效组分比例,且最终配方需兼顾再生沥青路用性能,因此未直接采用该点作为最终优化方案。

结合3.2节中SBR与石油树脂对再生沥青性能的影响规律,确定废机油掺量为10%,SBR掺量为5%,石油树脂掺量为1.5%。该配比综合期望值 $D=0.856$,各响应期望值分别为 $d(\text{粘度})=0.92$ 、 $d(\text{延度})=0.88$ 、 $d(\text{软化点})=0.80$,具有较好的综合性能平衡。最终确定优化配合比(占老化沥青质量百分比)为:老化沥青:SBR胶乳:石油树脂:废机油=100:5:1.5:10。

期望函数法的引入使配方选择由单一指标控制转变为多指标综合评价,提高了优化结果的科学性与可靠性。

(1) 工作性控制:基于响应面分析,废机油是控制粘度的关键。为确保常温下良好的施工和易性,并参考工程经验,选定其占老化沥青质量的10%。

(2) 路用性能赋予:基于性能试验,5%的SBR胶乳能显著改善低温延度并提升软化点;1.5%的石油树脂能在显著提升软化点的同时,避免因过量掺加导致的延度损失。此组合下,再生沥青软化点约58.6℃,15℃延度约126.4 cm,综合性能较优。

综合上述两阶段分析,提出优化后的再生冷补剂配合比(占老化沥青质量百分比)为:老化沥青:SBR胶乳:石油树脂:废机油=100:5:1.5:10。该配比旨在实现施工便捷性与最终路用性能的最佳平衡。

3.6. 优化冷补剂在RAP冷补混合料中的性能验证

为验证优化配合比在实际RAP冷补混合料中的应用效果,采用100%油石分离RAP集料(0~5 mm:5~10 mm:10~15 mm=35:43:22)与优化冷补剂制备LB-13型冷补沥青混合料,油石比3.4%,依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)¹及《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)²对其路用性能进行系统评价,并与市售成品冷补料进行对比。

(1) 马歇尔试验结果表明,优化冷补混合料的初始稳定度为2.41 kN,满足建议技术指标(≥ 2.00 kN),优于海通(1.64 kN)和熠联(1.33 kN);成型稳定度为5.19 kN,高于行业技术指标(≥ 3.00 kN),优于熠联(3.14 kN),表明该冷补剂具有良好的早期强度与后期强度形成能力。

(2) 水稳定性方面,浸水残留稳定度(TSR)达到91%,高于行业技术指标要求的85%,优于京颜(88%)、海通(89%)及熠联(75%),表明优化冷补剂与RAP集料之间具有良好的黏附性能,能够有效抵抗水损害。

(3) 黏附性试验结果表明,优化冷补剂的黏附性等级为5级,满足行业技术指标要求,与京颜、熠联及试生产样品相当,进一步证实了优化冷补剂与集料之间具有良好的界面黏结能力。

¹<https://jtst.mot.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=da416e53e4fc222e26c31ddea128a5bf>

²<https://jtst.mot.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=1bc7f93b42d4c2c62889e14037ffb90c>

(4) 施工和易性方面, 贯入强度为 1.21 kg/cm^2 , 处于行业技术指标($0.5\sim 4 \text{ kg/cm}^2$)的较优区间, 优于京颜(3.15 kg/cm^2)、海通(2.45 kg/cm^2)、熠联(2.07 kg/cm^2), 表明优化配方具有良好的施工和易性。

综上, 基于优化配合比制备的冷补沥青混合料各项路用性能指标均满足规范要求, 验证了该再生冷补剂配方的合理性与工程适用性。

4. 结论与展望

(1) 采用响应面法分析了废机油、SBR 胶乳和石油树脂对 RAP 再生冷补液性能的影响。发现废机油掺量是影响冷补液 60°C 标准粘度的唯一显著因素, 且呈负线性关系, 是控制冷补施工工作性的关键。

(2) 通过再生改性沥青试验表明, SBR 胶乳能同时改善再生沥青的高温软化点和低温延度; 石油树脂可显著提高软化点, 但掺量超过 1.5% 时会对延度产生不利影响, 需谨慎控制, 为 RAP 在沥青路面冷补养护中的高效资源化利用提供了科学依据和可行方案。

(3) 基于“工作性优先, 性能优化”的系统优化思路, 推荐了一种适用于 RAP 坑槽冷补的再生冷补剂配合比: 老化沥青:SBR 胶乳:石油树脂:废机油 = 100:5:1.5:10。

本研究为 RAP 在冷补养护中的应用提供了胶结料层面的配方优化方案, 其兼顾施工和易性及路用性能。

后续研究将重点聚焦于: ① 采用该优化冷补剂制备完整的冷补沥青混合料, 系统评价其初始强度、成型强度、水稳定性、高温抗车辙及低温抗裂等全套路用性能, 并与传统冷补料进行对比; ② 开展现场试验, 验证其实际施工工艺适用性与长期服役性能; ③ 进一步从流变学、微观结构层面深入揭示各组分的作用机理。在此基础上, 结合材料成本、生产工艺、施工设备等要素, 开展技术经济性分析, 探索冷补剂的标准化生产与推广应用路径。

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(S202510534031)); 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损层技术研究与应用。

参考文献

- [1] 姚胜, 姚真, 李泉. 增塑剂对老化沥青再生的性能研究[J]. 湖南交通科技, 2025, 51(1): 17-21.
- [2] 徐文, 汪美慧, 罗蓉, 等. 冷补沥青的材料设计及其混合料性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(6): 1049-1054.
- [3] 李峰, 黄颂昌, 徐剑, 等. 高性能冷补沥青混合料在北京的生产和应用[J]. 公路, 2010(1): 175-179.
- [4] 康颖禄. 生物系冷补剂研发及冷补沥青混合料路用性能研究[D]. [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [5] 王杰, 曾蔚, 秦永春, 等. 再生沥青中高温流变性试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 88-94.
- [6] 郑木莲, 金佳宏, 刘侠, 等. 溶剂型冷补沥青的开发及性能评价[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 342-353.
- [7] 李璐, 李睿, 盛兴跃, 等. 高性能反应型沥青冷补液研究[J]. 公路工程, 2015, 40(2): 83-86.
- [8] 张争奇, 赵勤胜, 张伟, 等. 水性环氧-SBR 低温型冷补沥青研发及其混合料性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 731-737.
- [9] 李政, 聂鑫垚, 姚鸿儒, 等. C9 石油树脂/SBS 复合改性沥青性能研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 764-770.
- [10] 马涛, 马哲. 响应面法优化米糠调和油配比的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(11): 149-151, 156.
- [11] 杨彦海, 朱晓, 杨野, 等. 寒区冷补沥青液的制备及优化设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(2):

305-313.

- [12] 彭夏磊. WER-SBR 复合改性乳化沥青的制备及其性能表征[J]. 湖南交通科技, 2024, 50(1): 26-30, 67.
- [13] 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. <https://doi.org/10.12677/ms.2026.168172>