Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2025, 14(3), 382-390
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2025.143044

Hans汉斯

高RAP掺量沥青混合料性能优化研究进展

朱　杰[1,2*]，银燕琼[1,2]，赖月漂[1,2]，薛　秀[1,2]

[1]南宁学院土木与建筑工程学院，广西 南宁
[2]南宁市环境友好型建筑材料与建筑性能提升工程技术研究中心，广西 南宁

收稿日期：2025年2月17日；录用日期：2025年3月9日；发布日期：2025年3月20日

摘　要

高RAP掺量沥青混合料在最大化利用废旧沥青、节约新材料消耗、减少环境负担方面具有显著优势，但同时面临黏弹性能下降、水稳定性不足、低温抗裂与疲劳性能衰减等问题。本文基于现有研究，从高RAP掺量对沥青混合料的性能影响机理、再生剂与改性剂的材料特性、配合比设计方法以及施工工艺优化等角度，系统梳理了高RAP掺量沥青混合料性能优化的研究进展。结果表明，科学选用再生剂和改性剂、合理配合比设计及精细化施工工艺控制均可在一定程度上弥补因高RAP掺量带来的性能劣化；此外，通过多尺度表征与数值模拟方法可进一步量化新旧沥青的融合过程，为材料设计的优化提供理论支撑。本文在分析现有优化高RAP掺量沥青混合料路用性能方法的同时，提出了存在的问题和未来的发展方向，供相关领域道路工作者参考。

关键词

高RAP掺量沥青混合料，再生剂，改性剂，配合比设计，施工工艺

Research Progress on Performance Optimization of High RAP Content Asphalt Mixtures

Jie Zhu[1,2*], Yanqiong Yin[1,2], Yuepiao Lai[1,2], Xiu Xue[1,2]

[1]College of Architecture and Civil Engineering, Nanning University, Nanning Guangxi
[2]Nanning Engineering Technology Research Center of Environment-Friendly Building Materials and Building Performance Enhancement, Nanning Guangxi

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 9th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 朱杰, 银燕琼, 赖月漂, 薛秀. 高 RAP 掺量沥青混合料性能优化研究进展[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 382-390.
DOI: 10.12677/hjce.2025.143044

Abstract

High RAP content asphalt mixtures offer significant advantages in maximizing the utilization of reclaimed asphalt pavement, reducing the consumption of new materials, and decreasing environmental burdens. However, they also face challenges such as diminished viscoelastic properties, insufficient water stability, reduced low-temperature cracking resistance, and fatigue performance degradation. Based on existing studies, this paper systematically reviews the research progress on performance optimization of high RAP content asphalt mixtures from the perspectives of the impact mechanisms of high RAP dosage on mixture performance, the material characteristics of rejuvenators and modifiers, mix design methods, and construction process optimization. The findings indicate that the scientific selection of rejuvenators and modifiers, rational mix design, and precise control of construction processes can to a certain extent compensate for the performance deterioration associated with high RAP content; moreover, multi-scale characterization and numerical simulation techniques can further quantify the blending process between new and aged asphalt, thereby providing theoretical support for optimized material design. In addition to analyzing the current approaches for enhancing the road performance of high RAP content asphalt mixtures, this paper also discusses existing issues and proposes future development directions for professionals in the field.

Keywords

High RAP Content Asphalt Mixture, Rejuvenator, Modifier, Mix Design, Construction Process

Copyright © 2025 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

随着经济与交通事业的快速发展，道路养护需求日益增长，大量废旧沥青路面材料(RAP)的再生利用逐渐成为行业热点。高 RAP 掺量沥青混合料在最大化回收利用废旧沥青、节约新材料消耗和减少环境负担等方面具有显著优势，然而其也面临着混合料黏弹性能下降、水稳定性不足、疲劳性能、耐久性降低等问题。如何科学地平衡高掺量 RAP 带来的性能波动，充分发挥再生剂与改性剂作用，并通过合理的配合比设计与施工工艺来优化材料性能，已成为当前道路工程领域亟待解决的重要课题。

本文从高 RAP 掺量对沥青混合料的性能影响机理、原材料、配合比设计和施工工艺等角度，系统梳理了关于高 RAP 掺量沥青混合料性能优化的研究进展，供相关道路工作者参考。

2. 高 RAP 掺量对沥青混合料性能影响机理研究

2.1. 宏观性能

RAP 材料的老化特性与复杂组分使其性能影响机理具有显著的非线性特征，不同掺量梯度下混合料的路用性能呈现动态演变规律。现有研究表明，再生沥青混合料的动态黏弹特性、抗疲劳能力、水稳定性能及温度敏感性等宏观指标与 RAP 掺量间存在密切关联，这种关联性既体现在材料本构模型的参数响应上，也反映在多重环境耦合作用下的性能衰减规律中。学者们通过动态模量测试、疲劳－愈合循环试验、流变特性分析等多元手段，系统揭示了再生剂作用机理、级配优化窗口、掺量阈值效应等关键问题，

为高 RAP 掺量沥青混合料宏观性能控制提供了理论支撑。

兰建丽等[1]发现再生剂的掺入使得混合料动态模量降低、相位角增大，并基于改进的 Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM)模型对再生沥青混合料的动态黏弹特性进行了分析。王鑫洋等[2]通过实验研究了不同类型与不同比例 RAP 温拌再生沥青混合料在多种温度和加载频率下的动态黏弹特性，利用时温等效原理构建动态模量主曲线，并建立了兼顾材料组成和工况参数的预测模型。

王雨露等[3]通过间接拉伸强度试验、间接拉伸疲劳试验评价了沥青混合料的强度、和疲劳性能，设计了四点弯曲疲劳—愈合—疲劳试验评价了沥青混合料的自愈合能力，建立了基于浸水时间的动态模量衰减预测模型。认为当前中国在进行沥青路面使用寿命设计时，并未将水分对沥青路面疲劳性能的影响充分纳入考虑，然而事实表明，浸水后沥青混合料的模量、强度、疲劳寿命以及愈合性能均会明显降低。Mannan 等[4]认为 RAP 料源对混合料疲劳性能的影响更为明显，并对传统的疲劳寿命预测方程进行了修正，效果良好。Giulia 等[5]调研了五个来自意大利不同地区的 RAP 样本的性能，认为应当评估其疏水性能和空隙率，以提升混合料的工作性能。

李雪连等[6]通过三轴重复压缩蠕变与直接拉伸松弛试验，采用永久变形及其对应的流变次数、松弛时间等指标，较系统地揭示了 RAP 含量和再生剂掺量对混合料高温稳定性与低温抗裂性能的影响机理。李希友[7]等利用水敏感测试仪(MIST)模拟真实车辆荷载环境下的动水作用，发现当 RAP 掺量超过 50%后，级配对水稳定性的影响趋于弱化，说明此时混合料性能更多取决于 RAP 本身或再生剂的特性。Ma 等[8]通过室内试验发现 RAP 掺量超过 50%后动稳定度和抗拉强度发生明显劣化，而 Hu 等[9]对实际试验路段的性能调查结论相对更谨慎：RAP 掺量超过 30%以后混合料即出现水稳定性和低温抗裂性能不达标的情况。王智超[10]等采用灰色关联分析方法洞悉 RAP 掺量与多项路用性能间的内在联系，结果表明 RAP 比例提高虽能增强高温稳定性，却在一定程度上削弱低温、抗疲劳及抗水损害能力，为实际应用中平衡与优化各项性能指标提供了重要参考。

2.2. 微观机理

在前述宏观性能研究的基础上，学者们逐步将关注点转移至高 RAP 掺量沥青混合料的微观机理演化。通过数字图像关联、原子力显微镜、傅里叶变换红外光谱等多尺度测试和表征手段，深入探讨老化组分分布、化学结构演变以及微裂纹扩展行为等关键因素，对提高沥青再生品质与性能稳定性具有重要指导意义。

程龙等[11]采用数字图像关联(DIC)技术结合 KD-tree 算法实时捕捉高 RAP 掺量 EMRAM 的微裂缝演化，并通过构建 Paris 主曲线揭示了环氧掺量显著提高其疲劳性能的机理，即提升材料的开裂应变阈值并降低裂缝扩展速率。

赵咨沣等[12]构建了水－温－光多场耦合加速老化体系，通过微观化学表征与宏观流变测试相结合的多尺度方法表明掺入胶粉与 RAP 能有效缓解沥青氧化、大分子聚合，从而显著提升回收沥青材料的弹性及抗变形性能。

特立尼达湖沥青(TLA)在老化沥青改性中的应用往往能提升高温稳定性，却难以改善低温及抗疲劳性能[13]。傅里叶变换红外光谱(FTIR)和原子力显微镜(AFM)的监测结果进一步佐证，其改性机制依赖于改变原沥青组分配比，而未产生新的官能团，属于物理改性范畴。与此同时，Sasobit 温拌剂的核心作用在于通过物理降黏实现对再生沥青及其混合料性能的调控，却无法影响老化沥青中羰基和亚砜基的振动特征，也无力恢复已降解 SBS 改性剂的性能[14]。这两种外部添加材料虽都能为再生沥青体系带来一定程度的性能变化，但在低温抗裂及抗疲劳等方面仍需更加系统、深入的策略来加以平衡与提升。

陈铁军等[15]利用磁铁矿探针代替部分新集料，并结合流变、傅里叶红外光谱、凝胶渗透色谱、原子

力显微镜以及荧光示踪等多尺度手段，研究了拌和时间对融合沥青性能、化学组分、微观形貌及 RAP 团聚颗粒分散状态的影响，结果表明延长拌和时间可以破碎 RAP 团聚颗粒、扩大新旧沥青接触面积，从而促进两者在分子层面的充分融合。

3. 基于原材料的性能优化研究

3.1. 再生剂类原材料

近年来，在废旧沥青材料再生利用领域，通过引入不同类型的再生剂来修复老化沥青性能、提升再生混合料的高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性，已成为较为成熟且广受关注的技术路径。研究者们分别采用仿生物基、餐厨废油脂、废机油、植物油和矿物油等多种再生剂，针对不同 RAP 掺量及关键施工参数展开大量试验与评估，探索性能改善机制。

陈禹衡等[16]构建了一个通过引入具有高渗透能力的扩散组分来激活老化沥青分子、实现分子级界面粘结的水性环氧树脂基胶结体系，发现在低胶结料掺量下，扩散组分的掺加有利于水稳定性的提升，且生物基扩散组分更有利于水稳定性的提升。

杨彦海等[17]发现仿生物基温拌再生剂能通过补充轻质组分和恢复 SBS 中丁二烯 C=C 结构，有效改善老化沥青性能。RAP 掺量对高温性能影响最显著，试件击实成型温度对水稳定性影响最显著。

梁磊等[18]通过废机油对冷再生沥青混合料进行改性，研究了不同 RAP 含量下冷再生混合料的路用性能，结果表明废机油能显著提升低温抗裂性能和疲劳寿命，但对高温性能和水稳定性能影响不明显。

傅珍等[19]以 DINCH 增塑剂与餐厨废弃油脂配制复合生物再生剂，提出增塑剂掺量在 1.6%时能取得最佳的再生效果。但是当 RAP 掺量超过 40%以后，其水稳定性不能满足规范要求。

刘芸等[20]利用废机油、餐厨废油、柴油作为稀释剂制备冷补沥青及再生沥青混合料，发现柴油冷补料水稳定性较差，而餐厨废油冷补料的水稳定性和高温稳定性都能满足规范要求。

侯芸等[21]利用新鲜植物油等多种生物油、矿物油再生剂，通过室内试验确定了不同 RAP 掺量沥青混合料各类再生剂的最佳掺量及油石比，对再生 SBS 改性沥青混合料的路用性能进行了全面的评价。结果表明使用三种植物油做再生剂形成的沥青混合料具有更好的高温稳定性和低温抗裂性。当 RAP 掺量超过 50%时，该类混合料在湿热地区不建议使用，因为其水稳定性表现不佳。

3.2. 沥青改性剂类原材料

在前面通过再生剂实现旧沥青活化与性能兼顾的研究之外，研究者们还从改性材料与胶结体系层面展开探索，利用玻璃纤维、粉煤灰与矿渣粉复合胶结料、地聚物以及环氧树脂等手段，多维度提升再生沥青混合料的力学与耐久性能，为 RAP 材料的高效再利用提供了更多可行路径。

张志萍等[22]将玻璃纤维加入到再生沥青混合料中，发现抗裂性能、抗车辙能力及耐久性均得到显著提升，其原因在于玻璃纤维能通过微观桥联效应阻断裂纹扩展。

刘富强等[23]将粉煤灰与矿渣粉按 2:1 配比、调控碱浓度、模数及水胶比，研制出一种新型碱激发地聚物胶结材料(S-FGeoPolymer)，用以提升 RAP 材料的性能，发现适量矿渣有利于早期形成 C-A-S-H 凝胶提升初期强度，而粉煤灰后期生成的 N–A–S–H 凝胶有助于微裂纹的修复和结构致密性增强，但过量碱或模数过高均会因抑制矿渣溶解或引起凝胶沉淀而降低力学性能。Singh 等[24]研究了粗颗粒再生沥青混凝土(RC)与细颗粒再生沥青混凝土(RF)在硫酸及盐酸环境中的适用性，并探究了硅灰(SF)、粉煤灰(FA)和甘蔗渣灰(BG)等矿物掺合料对 100% RC 配比混凝土的增强效果，结果表明 RC 混合料的抗腐蚀性能均显著优于 RF 混合料，硅灰对 RC 混合料的抗腐蚀性能提升最为显著。

董元帅等[25]进一步将地聚物应用于再生沥青混合料的制备，发现地聚物能改善骨料间的结合状态和增强黏结性能，显著提升混合料的整体力学性能和耐久性。

赵锋军等[26]自主开发了一种环氧树脂胶结料，可完全使用 RAP 构建快速交联高强弹性体系，能显著改善冷再生旧沥青混合料的抗水损、高温稳定性和低温抗裂性能。

水泥用量与其投放顺序对热再生沥青混合料早期性能具有显著影响，尤其在水泥掺量较低的范围内，少量增加水泥便能使再生混合料性能大幅提升[27]。另一方面，先加沥青后加水泥的工艺往往更能保证水稳定性。

玄武岩纤维在高 RAP 掺量热再生沥青混合料中展现出对整体路用性能的显著改善，但当 RAP 含量超过 40%时，水稳定性难以达到规范要求[28]。从抗裂角度看，玄武岩纤维通过优化再生沥青混合料内部的微观结构与应力传递模式，对裂缝扩展起到有效延缓作用[29]，为提升再生混合料耐久性提供了可行思路。

杨晓淼等[30]利用 RAP 料、钢渣等多源固废材料优化环氧沥青混合料配方，发现固废与环氧沥青通过物理化学协同作用构建稳定微结构网络，显著提升了再生沥青混合料的高温稳定性和水稳定性。

4. 基于配合比设计方法的性能优化研究

不同学者通过平衡设计法、响应面法、多点支撑骨架状态模型等多种配合比设计方法，针对多来源再生沥青路面材料(RAP)的级配、老化程度与活性等多源变异性展开了试验与分析，对材料的组成与关键性能指标进行了精准调控。相关研究成果表明，通过合理配比与改性，不仅能够有效提升再生沥青混合料的高温稳定性、耐久性以及水稳定性，还可实现各项性能指标的均衡优化与一致性。

肖庆一等[31]使用平衡设计法进行再生沥青混合料配合比设计，发现在低 RAP 掺量时平衡设计法可使沥青用量较低且高温性能更优。平衡设计法显著提升了混合料耐久性和水稳定性，同时使各项性能指标呈现较好的平衡和波动范围一致性。Guduru 等[32]基于破碎指数和空隙率提出了 RAP 的分类指标，并进一步提出了一个基于混合料性能特征的确定 RAP 掺量限值的框架。

姚玉权等[33]分析来自不同路段的 RAP 在矿料级配、沥青质量分数及老化程度等方面的多源变异性；通过响应面法设计试验，构建并验证了 RAP 掺量、RHMA 级配与沥青质量分数与 RHMA 马歇尔指标的二次回归模型，从而提出了一种基于实时预测与动态调整 RHMA 材料组成的控制策略，用以应对多来源 RAP 变异性高带来的施工质量不稳定问题。

吴军等[34]提出了一种基于改进多点支撑骨架状态模型的热再生沥青混合料配合比设计方法，综合考虑 RAP 废旧沥青部分活性及沥青膜厚度，构建连续骨架结构，在 40%的最佳 RAP 掺量下能显著提升高温稳定性和混合料密实性。

任自铭等[35]提出基于集料表面积和有效沥青膜厚度计算乳化沥青初选剂量，并通过对不同剂量乳化沥青处治 RAP 后的性能测试，最终确定最佳乳化沥青剂量范围的方法。有效提升了混合料的力学性能。

唐伟等[36]提出了基于 3D 形貌参数的废旧沥青混合料结团量化评估方法，并揭示了不同粒径间结团机理的差异性，建议以 5 mm 和 10 mm 为临界筛孔，将 RAP 筛分为三档，控制 RAP 整体的结团程度。

吴建涛等[37]构建了一个以分级结团质量和沥青黏度为特征参数的结团指标评价体系，系统探讨了再生沥青粒径与含量对结团程度的影响，建议尽可能减少小粒径 RAP 的使用量。

翟晓成等[38]利用响应面法构建的二阶回归模型揭示了再生沥青混合料中各级配参数对性能的影响，实现了关键指标预测误差低于 3%的精准优化。Jaczewski 等[39]综合考虑混合料类型、RAP 质量与掺量等参数，采用弹性、粘弹性模型进行计算，建立了一套针对含 RAP 的沥青混合料低温开裂概率预测方法。

刘嘉伟等[40]发现通过调控乳化沥青和再生添加剂的比例能重构混合料中新旧组分之间的粘结和传

力体系，从而实现冷再生混合料整体性能的提升。

5. 基于施工工艺的性能优化研究

近年来，研究者们从施工工艺角度对再生沥青混合料的压实度、材料变异性和新旧沥青融合等关键因素展开了系统探讨，探索通过优化拌和工艺、合理控制压实参数以及强化新旧沥青的融合效果来提升再生沥青混合料的整体力学与耐久性能。基于现有文献的分析可知，这些施工工艺的改进思路与方法对再生沥青混合料在实际工程中的有效应用起到了重要的支撑作用。

5.1. 压实度

余森开等[41]研究了级配、RAP 掺量和压实温度对再生沥青混合料空隙率、压实能量指数、压实速率和锁点的影响，结果表明级配是影响压实性能的主要内在机制，RAP 掺量对压实性能的影响程度相对较低。

吴建明等[42]研究了压实温度和 RAP 掺量对热拌再生沥青混合料压实特性的影响，认为压实度和温度、RAP 掺量呈正相关。同时，能量密实指数 CEI、压实速率 K 值和锁点均随温度升高和 RAP 掺量的增加而降低。

5.2. 材料变异性

冯振刚等[43]研究了不同取料方法对废旧沥青混合料变异性的影响，发现分堆取样法能显著降低 RAP 试样的含水量、老化沥青含量及矿料级配的变异性，从而获得更均质、能真实反映料堆整体性能的试样。

姚玉权等[44]运用 Fréchet 相似性与 K-Means 聚类理论提出了一种设计阶段就地热再生沥青混合材料(HIRAM)组成波动范围控制策略，实现了在 RAP 材料组成、原材料用油量具有显著差异的情况下令 HIRAM 具有稳定的路用性能。

唐伟等[45]采用数字图像处理技术对厂拌热再生沥青混合料的截面图像进行预处理，从中提取出最大的内切正方形区域，然后将这一正方形等面积细分为 16 个小方格，统计每个小方格内部集料所占面积的比例，基于这些数据构建了正态分布模型，并提出了均匀性评价指标 H 值。通过计算 H 值，对混合料中集料的分散均匀程度进行定量评估。

5.3. 新旧沥青融合

制备热再生沥青混合料时，常规拌和与新旧沥青完全融合两种施工方式，对不同 RAP 掺量下的路面性能表现显著差异，尤其在 RAP 掺量达到或超过 30%后[46]，新旧沥青融合程度对高温、低温、水稳定和抗裂等性能的影响尤为突出。因此，在设计热再生沥青混合料配合比时，必须充分考虑沥青融合效率这一因素，以保证混合料的整体性能表现。

郭晓阳等[47]的研究聚焦于热再生沥青混合料制备过程中不同参数(如搅拌时间、预热温度等)对沥青活性度(DoA)变化的影响，并详细探讨了“巴西果效应”在旧沥青与新沥青融合中的作用。研究结果表明，延长搅拌时间有助于提高沥青转移量，从而促进二者的更好融合。

郭思怡等[48]运用模糊意见集中决策法对再生沥青混合料的多指标生产参数进行综合评价，通过精准调控拌和温度、拌和时间、掺料次序和储存时间能有效促进新旧沥青的融合，进而显著改善混合料的综合路用性能。

曹源文等[49]建立了热再生沥青路面养护车原始与改进后搅拌加热机构的三维模型，通过离散元方法结合传热理论，对不同结构的 RAP 加热过程进行数值仿真。建议采用外圆螺旋升角为 35˚的三叶片螺

旋搅拌刀来优化 RAP 加热的均匀性，提升加热速度。

6. 结论与展望

现有研究表明，高 RAP 掺量沥青混合料在循环利用废旧资源和降低工程成本方面具有突出优势，但同时也面临老化组分复杂、黏弹性能衰减、水稳定性与低温抗裂性不足等现实挑战。为破解上述难题，学者们从性能机理、再生剂与改性剂技术、配合比与施工工艺优化等角度进行了深入探索；相关成果显示，充分掌握 RAP 的老化特性、合理选用再生剂与改性剂、并在施工环节精确控制温度与压实度，均可在一定程度上提高混合料的整体力学与耐久性能。对未来的研究方向有如下建议：

1) 开展更精细的微观机理与多尺度评价研究。未来应结合分子模拟、光谱与显微表征技术，多维度解析 RAP 老化成分分布与界面融合机理。在宏观尺度上进一步模拟真实的路面工作环境，构建水、温、光、荷载、氧化等多场耦合加速老化试验条件，模拟不同地区极端条件下再生沥青混合料的长期性能演化规律，为再生沥青配方及改性技术的迭代提供更坚实的数据支撑。

2) 可结合人工智能技术开发生物基或高分子创新材料，兼顾环保与性能需求。例如，利用机器学习筛选藻类提取物、木质素等生物基再生剂配方，通过分子动力学模拟优化其与老化沥青的界面融合效率；同时引入低能耗工艺，结合智能传感器实时调控温控参数，降低碳排放。通过 AI 预测材料自修复能力与抗裂性能，实现再生混合料设计与施工的智能化升级。

3) 针对多来源 RAP 的级配差异和老化程度，在配合比设计和施工参数选择上推行更智能化的监测与控制方法，例如开发基于深度学习的多目标优化算法，实现高 RAP 掺量沥青混合料的智能化配合比设计与性能预测。提升新旧沥青融合效率，保证工程质量稳定。

4) 应加强高 RAP 掺量沥青混合料在典型气候与交通荷载条件下的多指标考察，建立涵盖全寿命周期成本和环境影响的综合指标体系，进而完善相关标准与规范，为该技术在道路工程中的大规模应用奠定更加可靠的基础。

基金项目

广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1796)；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1880)。

参考文献

[1] 兰建丽, 高学凯, 孔繁盛. 基于 CAM 模型的热再生沥青混合料动态粘弹特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2454-2460.

[2] 王鑫洋, 苏纪壮, 高国华, 等. 高掺量 RAP 温拌再生沥青混合料动态黏弹特性研究[J]. 中国测试, 2024, 50(10): 175-184.

[3] 王雨露, 磨炼同, 曲良辰, 等. 长期高温浸水对热再生沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11409-11422.

[4] Mannan, U.A., Faisal, H.M., Hasan, M.M. and Tarefder, R.A. (2018) Evaluating the Effect of High RAP Content on Asphalt Mixtures and Binders Fatigue Behavior. *Journal of Testing and Evaluation*, **46**, 1749-1761. https://doi.org/10.1520/jte20170248

[5] Masi, G., Michelacci, A., Manzi, S. and Bignozzi, M.C. (2022) Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as Recycled Aggregate for Concrete. *Construction and Building Materials*, **341**, Article 127745. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127745

[6] 李雪连, 许杰, 叶峻宏, 等. 基于蠕变与松弛试验的再生沥青混合料高低温性能研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(8): 9-15.

[7] 李希友. 热拌再生沥青混合料水稳定性研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 242-248.

[8] Ma, T., Wang, H., Huang, X., Wang, Z. and Xiao, F. (2015) Laboratory Performance Characteristics of High Modulus Asphalt Mixture with High-Content Rap. *Construction and Building Materials*, **101**, 975-982. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.160

[9] Hu, X., Nie, Y., Feng, Y. and Zheng, Q. (2012) Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (Rap). *Journal of Testing and Evaluation*, **40**, 1-7. https://doi.org/10.1520/jte20120128

[10] 王智超, 胡槟, 沈明燕, 等. 基于路用性能的热再生沥青混合料RAP掺量研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(1): 10-17.

[11] 程龙, 张磊, 等. 基于 DIC 技术的高 RAP 掺量环氧改性热再生沥青混合料疲劳开裂特性研究[J/OL]. 中国公路学报, 2025: 1-22. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20250115.1741.004.html, 2025-02-06.

[12] 赵咨沣. 水-温-光多场耦合作用下橡胶沥青再生的回收沥青材料粘弹性演化规律[J/OL]. 中国公路学报, 2024: 1-27. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240430.1123.006.html, 2025-02-06.

[13] 崔鹏. 硬质沥青对老化沥青及沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 33-42.

[14] 仰建岗, 黄锦化, 高杰, 等. 温拌剂对再生沥青与沥青混合料性能影响及作用机理[J]. 公路交通科技, 2023, 40(7): 1-10.

[15] 陈铁军. 热再生沥青混合料 RAP 分散情况的多尺度分析[J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 17-26.

[16] 陈禹衡, 易军艳, 裴忠实, 等. 高比例冷再生用水性环氧树脂基胶结料性能研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 107-119.

[17] 杨彦海, 孙溢, 金鑫, 等. 仿生物基温拌再生沥青混合料路用性能影响因素研究[J/OL]. 建筑材料学报, 2024: 1-14. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20240810.1024.004.html, 2025-02-06.

[18] 梁磊, 李贤达, 王威. 废机油改性乳化沥青冷再生混合料疲劳性能[J]. 中国科技论文, 2023, 18(12): 1321-1325+1333.

[19] 傅珍, 杨鹏凯, 刘松然. 复合生物再生沥青及混合料路用性能[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 314-318.

[20] 刘芸, 李梓豪, 宋亮, 等. 基于废油稀释剂和 RAP 的路面坑槽冷补料制备及其性能评价[J]. 应用化工, 2024, 53(12): 2851-2857+2863.

[21] 侯芸, 董元帅, 李志豪, 等. 植物油再生 SBS 改性沥青混合料路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(8): 120-125.

[22] 张志萍, 董建明. 玻璃纤维增强再生沥青混合料性能研究[J]. 公路, 2023, 68(9): 80-87.

[23] 刘富强, 郭伟东, 陈二忠, 等. 胶结回收沥青混合料地聚物的力学性能研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(4): 108-115.

[24] Singh, S., Ransinchung R. N., G.D. and Kumar, P. (2018) Performance Evaluation of RAP Concrete in Aggressive Environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**.

[25] 董元帅, 侯芸, 朱琛, 等. 地聚物稳定再生沥青混合料力学性能研究[J]. 公路, 2021, 66(9): 323-329.

[26] 赵锋军, 李声豪, 韩赣, 张兴亮. 环氧树脂冷再生旧沥青混合料的路用性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 556-560.

[27] 谢宝山. 水泥对乳化沥青再生混合料早期性能影响研究[J]. 公路, 2022, 67(3): 292-295.

[28] 董俊杰. 玄武岩纤维对高 RAP 掺量热再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 化工新型材料, 2024, 52(S2): 289-293+298.

[29] 王国方, 李波, 肖鹏, 等. 玄武岩纤维再生沥青混合料抗裂性能分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2021, 24(3): 69-73.

[30] 杨晓淼, 黄卫, 刘晓东, 等. 基于多源固废的环氧沥青混合料路用性能及机理研究[J]. 公路, 2024, 69(4): 322-328.

[31] 肖庆一, 吴康威, 张恒, 等. 平衡设计法热再生混合料动态模量试验分析[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 608-615.

[32] Guduru, G. and Kuna, K.K. (2023) Allowable Limits for Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Content in Hot Mix Asphalt Using Simple Indicative Tests. *Materials and Structures*, **56**, Article No. 27. https://doi.org/10.1617/s11527-023-02112-0

[33] 姚玉权, 黄伯承, 宋亮, 等. 多来源 RAP 下 RHMA 材料组成的动态控制策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 79-88.

[34] 吴军, 夏海廷, 郭荣鑫, 官庆发, 张飞鸿. 基于改进多点支撑骨架状态模型的热再生沥青混合料配合比设计[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 178-184.

[35] 任自铭, 杜冰洁, 殷世林, 等. 基于黏附性的水泥稳定 RAP 混合料性能改善研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 138-142.

[36] 唐伟, 李宁, 于新, 等. 基于三维形貌的废旧沥青混合料结团量化表征[J]. 公路, 2023, 68(11): 1-7.

[37] 吴建涛, 焦岩, 夏新全, 等. 基于筛分试验的热再生沥青混合料结团量化分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 564-570.

[38] 翟晓成, 丁攀, 雷雨涛, 等. 基于响应曲面法的大掺量 RAP 厂拌热再生沥青混合料级配优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49(6): 119-128.

[39] Jaczewski, M., Pszczola, M., Alenowicz, J., Rys, D., Dolzycki, B. and Jaskula, P. (2023) Evaluation of Thermal Cracking Probability for Asphalt Concretes with High Percentage of Rap. *Construction and Building Materials*, **400**, Article 132726. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132726

[40] 刘嘉伟, 赵宇成. 高性能乳化沥青冷再生混合料性能研究[J]. 公路, 2024, 69(1): 343-350.

[41] 余森开, 仰建岗, 黄锦化, 等. 不同工况对再生沥青混合料压实特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 13102-13108.

[42] 吴建明, 李华平. 热拌再生沥青混合料压实特性分析[J]. 公路, 2021, 66(10): 345-351.

[43] 冯振刚, 刘思成, 曲建涛, 等. 基于不同取料方法的废旧沥青混合料变异性分析[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 590-595.

[44] 姚玉权, 仰建岗, 高杰, 等. 就地热再生沥青混合料的材料组成波动及控制策略[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 59-68.

[45] 唐伟, 李宁, 邹晓勇, 等. 基于图像处理技术的厂拌热再生混合料均匀性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 60-65.

[46] 郝培文, 李洪祥, 崔鹰翔, 等. 新旧沥青融合程度对热再生沥青混合料性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(11): 3837-3846.

[47] 郭晓阳, 郭乃胜, 褚召阳, 等. 考虑巴西果效应的热再生沥青混合料沥青活性度[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(3): 113-120.

[48] 郭思怡, 冯振刚, 曲建涛, 等. 基于模糊意见集中决策法的再生沥青混合料生产工艺[J]. 公路交通科技, 2024, 41(12): 67-76.

[49] 曹源文, 黄兴生, 李成, 等. 热再生沥青路面养护车 RAP 加热均匀性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(11): 112-117+160.