

冷拌沥青与再生沥青路面混合材料的力学性能研究

郭有蒙, 黄方

中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月15日

摘要

本研究聚焦于冷拌沥青(CMA)与再生沥青路面(RAP)混合材料的力学性能。通过对不同沥青乳液掺量(2%~4%)的CMA-RAP混合料进行多种实验测试, 包括回弹模量、间接拉伸强度、车辙和疲劳试验, 分析其在不同养护时间和干湿条件下的性能表现。结果表明, 4%沥青乳液掺量的混合料综合性能最佳, 增加沥青乳液掺量可提高抗车辙和抗疲劳能力。本研究为CMA-RAP混合料在道路工程中的应用提供了重要参考, 有助于推动环保经济型沥青路面材料的发展。

关键词

冷拌沥青, 再生沥青路面, 力学性能, 沥青乳液掺量

Study on Mechanical Properties of Cold Mix Asphalt and Recycled Asphalt Pavement Mixture

Youmeng Guo, Fang Huang

Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., LTD, Wuhan Hubei

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

This study focuses on the mechanical properties of cold mix asphalt (CMA) and recycled asphalt pavement (RAP). The CMA-RAP mixture with different asphalt emulsion content (2%~4%) was tested by a variety of experiments, including resilience modulus, indirect tensile strength, rut and

fatigue tests, to analyze its performance under different curing time and dry and wet conditions. The results show that the mixture with 4% asphalt emulsion content has the best comprehensive performance, and increasing the asphalt emulsion content can improve the rutting resistance and fatigue resistance. This study provides an important reference for the application of CMA-RAP mixture in road engineering, which is helpful to promote the development of environmentally friendly and economical asphalt pavement materials.

Keywords

Cold Mix Asphalt, Recycled Asphalt Pavement, Mechanical Properties, Asphalt Emulsion Content

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

在道路工程领域,随着城市化进程的加速和交通流量的迅猛增长,对路面材料的性能要求愈发严苛。传统的热拌沥青(HMA)在生产过程中需要将集料加热至较高温度[1]-[3],这不仅消耗大量的能源,还会排放出大量的温室气体,对环境造成严重的污染。据相关研究表明,HMA每生产1吨沥青,其碳足迹可达53.6 kg,生产温度高达190℃。相比之下,冷拌沥青(CMA)在生产过程中无需加热集料,大大降低了能源消耗和温室气体排放,其生产温度仅约40℃,每生产1吨CMA的CO₂排放量约为36.1 kg,具有显著的环保优势。

同时,再生沥青路面(RAP)作为一种可回收利用的材料[4]-[10],其来源广泛。在道路维护和重建过程中,会产生大量的废弃沥青路面材料,这些RAP若能得到合理利用,不仅可以减少对天然集料的依赖,降低资源开采对环境的破坏,还能有效解决废弃物的填埋问题,降低生产成本。例如,2018年美国仅收集的RAP就高达1亿吨,若用于道路建设,可节省约6140万立方米的填埋空间。

目前,已有部分研究致力于探索CMA和RAP混合使用对路面性能的影响[11]-[15]。一些研究成果显示,这种混合能够在一定程度上改善路面的力学性能,使路面更加经济实用。然而,现有研究中针对高含量RAP,尤其是100%RAP作为原生集料替代物的研究相对较少。在实际工程应用中,不同地区的气候、交通荷载等条件差异较大,了解高含量RAP的CMA混合料在各种复杂条件下的性能对于充分发挥其优势、确保路面质量至关重要。因此,本研究旨在深入分析以100%RAP替代原生集料的CMA混合料的性能,确定最佳配合比,以制备出既环保又经济、且能满足结构和耐久性要求的沥青材料。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本研究采用的RAP取自武汉市某改建道路产生的废弃沥青。在获取RAP后,首先使用RAP破碎机对其进行破碎处理,使其颗粒大小符合后续实验要求。随后,进行筛分和粒径分布测试。具体粒径分布数据如图1所示。

在进行进一步测试之前,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)、《公路工程集料试验规程》(JTGE42-2005)等规范对RAP的初始含水量、最佳含水量、颗粒密度、沥青含量和针入度等指标进行测定,结果如下表1所示。

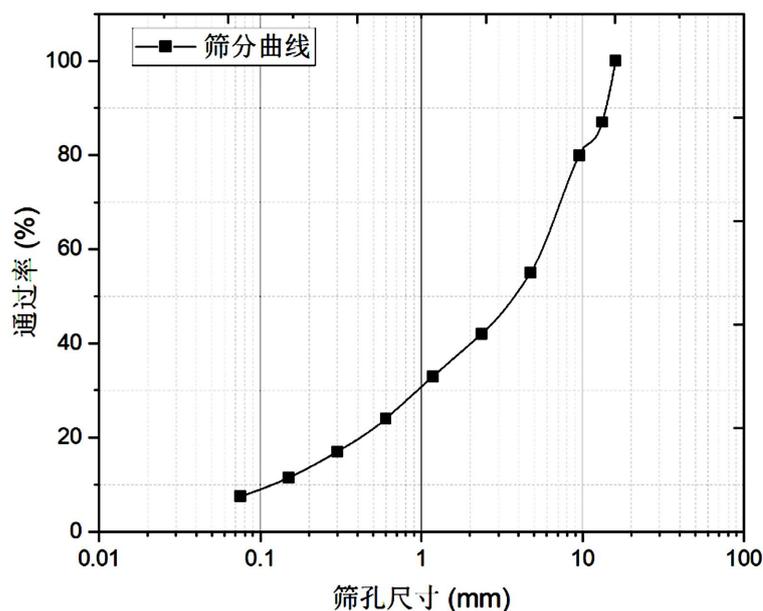


Figure 1. RAP screening curve

图 1. RAP 筛分曲线

Table 1. RAP main parameter index

表 1. RAP 主要参数指标

参数	单位	数值
颗粒密度	(g/cm ³)	2.32
沥青含量	(%)	4.40
针入度	(10 ⁻¹ mm)	8.00
含水量	(%)	0.60

本研究选用的沥青乳液为阳离子慢凝型(CSS), 该乳液具有化学稳定性高、慢凝特性, 能更好地包裹 RAP 材料, 适用于 CMA。乳液及相关结合料的特性参数如表 2 所示。

Table 2. Main parameters of asphalt emulsion

表 2. 沥青乳液主要参数指标

指标	pH	凝结时间	密度转换	沥青熔点	沸点
数值	2.5	>8 min	985 (L/te)	>100℃	>250℃

2.2. 混合料设计

本实验设计中, 沥青乳液的添加比例分别为 2%、2.5%、3%、3.5%和 4%, 且全部采用 100% RAP 材料。具体的混合料材料用量详见表 3。

采用搅拌机进行沥青混合料的制备, 通过精确调控搅拌速度和时间, 模拟实际沥青生产过程, 以此保证混合料的均匀性。制备好的 CMA 混合料依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 340-2020), 使用马歇尔击实仪进行压实操作。每个试件双面均需各击实 75 次, 同时, 制作尺寸为 305 mm × 305 mm × 50 mm 的沥青混合料车辙板, 这样能够较好地模拟实际路面的压实效果。

Table 3. Scale for mixing materials**表 3.** 混合料材料用量表

沥青乳液 添加量	乳液中沥 青含量	总沥青 含量	乳液含 水量	总含 水量	达到 OMC 需添加水量	马歇尔试 件质量(kg)	车辙试件 质量(kg)	RAP 质量 (kg)	沥青乳液用 量(kg)	需添加水量 (kg)
2.00%	1.20%	5.60%	0.80%	1.40%	3.70%	1.5	10	23.5	0.47	0.87
2.50%	1.50%	5.90%	1.00%	1.60%	3.50%	1.5	10	23.5	0.5875	0.82
3.00%	1.80%	6.20%	1.20%	1.80%	3.30%	1.5	10	23.5	0.705	0.78
3.50%	2.10%	6.50%	1.40%	2.00%	3.10%	1.5	10	23.5	0.8225	0.73
4.00%	2.40%	6.80%	1.60%	2.20%	2.90%	1.5	10	23.5	0.94	0.68

2.3. 测试方法

对制作好的试件进行养护, 养护时间分别设置为 1 周、4 周、8 周和 12 周, 以模拟沥青混合料的初始性能和长期性能。最后进行一系列实验室测试, 包括间接拉伸强度、回弹模量、车辙试验和四点弯曲疲劳试验。

2.3.1. 间接拉伸强度测试

间接拉伸强度测试旨在评估混合料的抗破坏能力, 测试时, 试件在 25℃ 的环境下, 以 50 mm/min 的加载速率进行加载。每种条件下制备并测试 5 个试件, 将不同干湿条件下的试件测试结果与泡沫沥青稳定材料的间接拉伸强度测试结果进行对比, 以此评估 100% RAP 的 CMA 混合料的性能。

2.3.2. 回弹模量测试

回弹模量测试使用万能材料试验机(UTMs)进行。测试温度设定为 25℃, 加载上升时间为 40 ms, 脉冲重复周期为 3000 ms, 恢复水平应变为 50 ± 20 微应变。

2.3.3. 车辙试验

车辙试验试件厚度为 50 ± 5 mm, 垂直荷载为 700 ± 20 N, 车轮行驶速率为 42 ± 0.5 次/min, 测试温度为 60 ± 1 °C, 最少荷载通过次数为 10,000 次。根据车辙深度评估沥青混合料的性能, 车辙深度小于 3.5 mm 为优, 大于 13 mm 为差。

2.3.4. 四点弯曲疲劳试验

四点弯曲疲劳试验测试梁的宽度为 63.5 ± 5 mm, 垂直深度为 50 ± 5 mm, 长度为 390 ± 5 mm。试验在应变控制模式下进行, 测试温度为 20℃, 加载频率为 10 ± 0.5 Hz, 直至达到 1,000,000 次加载循环或达到初始弯曲强度 50% 对应的加载循环次数, 记录试件的疲劳寿命。

3. 结果及分析

3.1. 间接拉伸强度测试结果

间接拉伸强度测试结果见图 2。在干燥条件下, 沥青乳液掺量为 4% 的混合料间接拉伸强度值最大, 达到 561 kPa。总体上, 总乳液含量较高的试件强度更大, 而沥青含量较低的试件在加载过程中容易沿裂缝破坏。这是因为沥青作为一种粘结材料, 其含量的增加能够增强集料之间的粘结力, 使混合料在承受拉伸荷载时能够更好地传递应力, 从而提高试件的强度。

与干燥试件相比, 浸泡后的试件间接拉伸强度值明显降低。从图 2 可以看出, 在养护 4 周时, 所有沥青乳液掺量的干湿试件间接拉伸强度值均较低。综合考虑, 沥青乳液掺量为 4% 的混合料在实现最大间接拉伸强度值方面表现最佳, 养护 12 周干燥条件下的 100% RAP 混合料的最大间接拉伸强度值为 561

kPa, 而养护 1 周时的最低值为 230 kPa。这表明增加沥青乳液掺量可以提高混合料的间接拉伸强度, 且较长的养护时间有利于强度的发展。同时, 水的存在会降低混合料的间接拉伸强度, 在实际工程中应考虑路面防水措施, 以保证路面结构的稳定性。例如, 可以在路面表面铺设防水层, 或者优化路面排水系统, 减少水分在路面结构中的滞留时间, 从而降低水分对路面强度的不利影响。

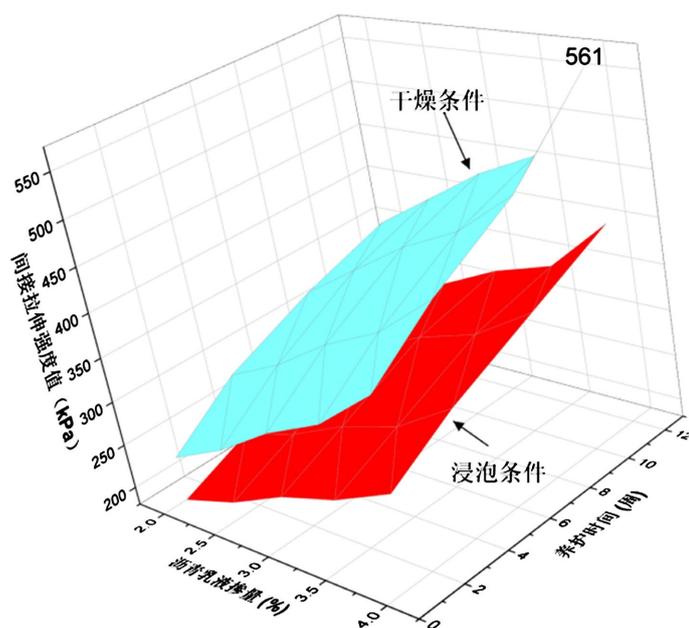


Figure 2. Indirect tensile strength under different working conditions
图 2. 不同工况条件下间接拉伸强度值

3.2. 回弹模量测试结果

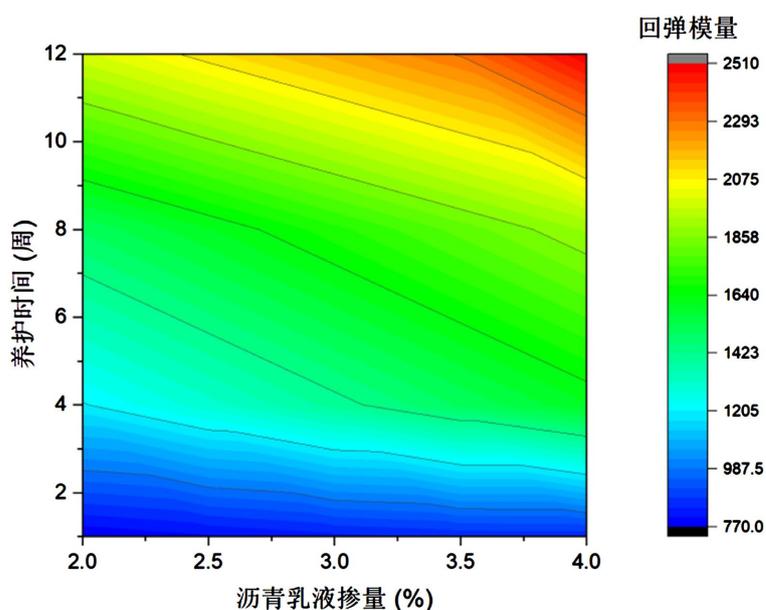


Figure 3. The modulus of rebound under different working conditions
图 3. 不同工况条件下回弹模量值

不同养护时间下回弹模量测试结果见图 3。从图中可以清晰看出, 养护 1 周的试件回弹模量值最低, 在沥青乳液掺量为 2% 时, 回弹模量为 771 MPa; 掺量为 4% 时, 回弹模量为 851 MPa。而养护 12 周的试件回弹模量值最高, 范围在 1995~2510 MPa 之间。随着养护时间的增加, 回弹模量呈现出明显的上升趋势。这是因为在养护过程中, 沥青乳液中的水分逐渐挥发, 沥青与 RAP 之间的相互作用不断增强, 使得混合料的结构更加致密, 从而提高了抵抗变形的能力。这一结果对于道路工程的设计和施工具有重要意义, 更高的回弹模量意味着路面在长期使用过程中能够更好地保持平整度, 减少因车辆荷载反复作用而产生的变形, 延长路面的使用寿命。

3.3. 车辙试验结果

车辙试验结果见表 4。基于 RAP 材料混合料的重量分析, 4% 沥青乳液掺量的混合料表现出更好的抗车辙性能, 这是因为较高的沥青乳液掺量有助于沥青混合料更均匀地形成结构, 增强了混合料的内聚力和抗变形能力。

Table 4. Rutting test results

表 4. 车辙试验结果

沥青乳液添加量(%)	荷载通过 2000 次车辙深度(mm)	荷载通过 4000 次车辙深度(mm)	荷载通过 6000 次车辙深度(mm)	荷载通过 8000 次车辙深度(mm)	荷载通过 10,000 次车辙深度(mm)
2.00	5.0	8.0	10.5	12.5	13.6
2.50	4.5	7.0	9.0	10.8	12.0
3.00	4.0	6.0	7.8	9.0	10.5
3.50	3.5	5.2	6.5	8.0	9.5
4.00	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0

在进行车辙试验时, 发现当测试含有 3~4% 沥青乳液的试件时, 会出现泛油现象。试件在进行车辙试验前养护 5 天, 从车辙深度数据来看, 随着沥青乳液掺量从 2% 增加到 4%, 车辙深度逐渐减小, 2% 沥青乳液掺量的试件车辙深度为 13.6 mm, 4% 掺量的试件车辙深度为 9 mm。这表明增加沥青乳液掺量可以有效提高混合料的抗车辙能力, 在实际道路应用中, 可减少路面因车辆荷载产生的永久变形, 延长路面使用寿命。然而, 泛油现象也可能对路面的抗滑性能产生一定影响, 在实际工程中需要综合考虑沥青乳液掺量与路面性能之间的平衡关系。例如, 可以通过添加适量的抗剥落剂或调整级配等方式, 在保证抗车辙性能的同时, 改善路面的抗滑性能。

3.4. 四点弯曲疲劳试验结果

四点弯曲疲劳试验结果见图 4 和图 5。从图 4 可以看出, 随着沥青乳液掺量从 2% 增加到 4%, 试件的疲劳寿命显著增加, 从 102,245 次循环增加到 152,654 次循环。

同时, 随着沥青乳液掺量的增加, 初始弯曲刚度也有所提高(见图 5)。2% 沥青乳液掺量的试件初始弯曲刚度为 4152 MPa, 4% 掺量的试件初始弯曲刚度为 5018 MPa。这表明增加沥青乳液掺量可以有效提高 CMA-RAP 混合料的抗疲劳性能, 在承受重复交通荷载时, 能够更好地抵抗疲劳破坏, 提高路面的耐久性。较高的初始弯曲刚度意味着路面在受到弯曲荷载时, 能够更有效地分散应力, 减少裂缝的产生和扩展, 从而延长路面的疲劳寿命。这对于交通流量大、车辆荷载频繁的道路尤为重要, 在道路设计和施工中, 可以根据实际交通情况, 合理调整沥青乳液掺量, 以满足路面的疲劳性能要求。

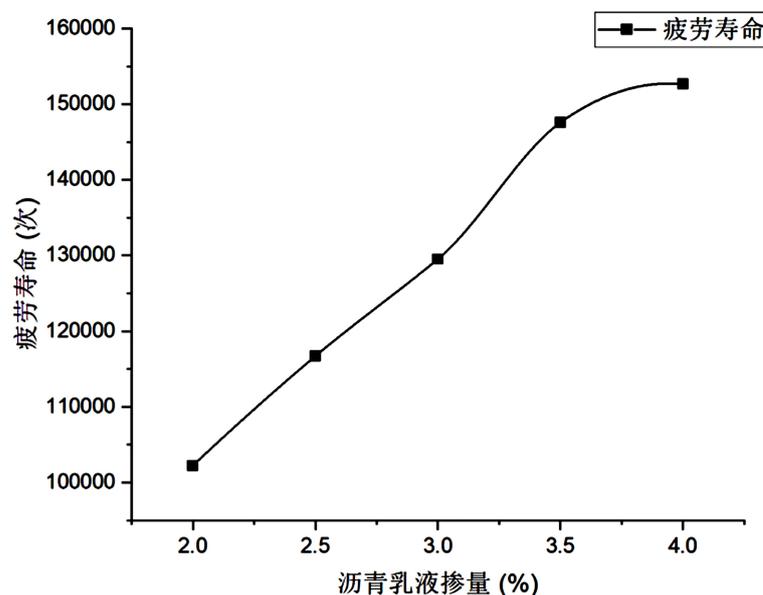


Figure 4. Fatigue life under different asphalt emulsion dosage

图 4. 不同沥青乳液掺量条件下疲劳寿命

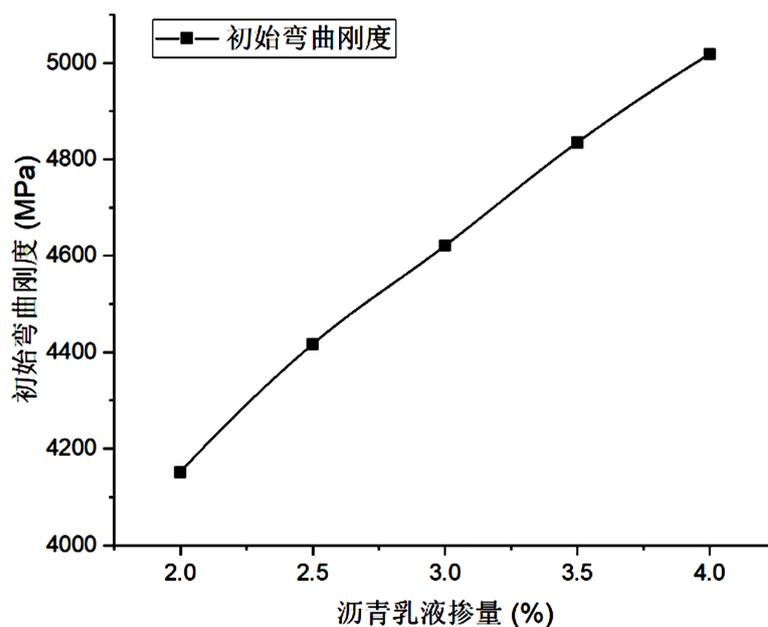


Figure 5. Initial bending stiffness under different asphalt emulsion dosage

图 5. 不同沥青乳液掺量条件下初始弯曲刚度

4. 结语

本研究通过对冷拌沥青(CMA)与 100%再生沥青路面(RAP)混合材料的力学性能进行全面研究, 得出以下结论:

(1) 综合各项实验结果, 含有 4%沥青乳液、总沥青含量为 6.8%的混合料表现最佳。在车辙试验中, 随着沥青乳液掺量从 2%增加到 4%, 车辙深度显著降低, 从 13.6 mm 降至 9 mm, 表明增加沥青乳液掺量可有效提高混合料的抗车辙能力。这为道路工程中提高路面抗车辙性能提供了具体的材料配比参考,

在实际应用中, 可以根据道路的交通流量和使用环境, 合理选择沥青乳液掺量, 以减少路面车辙病害的发生。

(2) 沥青乳液掺量对混合料的疲劳性能影响显著。当沥青乳液掺量从 2% 增加到 4% 时, RAP 混合料的疲劳寿命提高了 49.34%, 且初始弯曲刚度也有所增加, 这意味着混合料在承受重复荷载时的抗疲劳性能得到明显改善。这一结果对于提高道路的使用寿命具有重要意义, 特别是在交通繁忙的路段, 可以通过优化沥青乳液掺量, 增强路面的抗疲劳性能, 减少路面裂缝等疲劳病害的出现。

(3) 间接拉伸强度测试显示, 4% 沥青乳液掺量的混合料在干燥条件下的强度明显高于 2% 掺量的混合料, 且养护 12 周后的强度增长更为显著。同时, 干燥试件的间接拉伸强度值远高于浸泡后的试件, 说明水分对混合料的强度有不利影响。在实际道路工程中, 应重视路面的防水设计和施工, 采取有效的防水措施, 如设置防水层、优化排水系统等, 以减少水分对路面强度的损害, 确保路面结构的稳定性和耐久性。

(4) 回弹模量测试结果表明, 随着养护时间的增加, 回弹模量逐渐增大, 且 4% 沥青乳液掺量的混合料在较长养护时间下具有更高的回弹模量值, 反映出其抵抗变形的能力更强。干燥条件下的回弹模量值高于浸泡条件, 表明试件的含水状态对其变形性能有较大影响。这提示在道路施工和养护过程中, 应确保足够的养护时间, 以提高路面的回弹模量, 增强路面抵抗变形的能力。同时, 要注意防止路面长期处于潮湿状态, 避免因水分影响导致路面变形过大。

参考文献

- [1] 李广玲. 热拌沥青混合料施工节能技术研究[J]. 中华建设, 2023(30): 97-100.
- [2] 颜可珍, 高素云, 胡玥. 基于集对分析-可变模糊集的热拌沥青路面全生命周期能耗和环境排放评价模型[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 50-54, 150.
- [3] 毛文成. 热拌沥青混合料运输与摊铺节能减排技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [4] 曹源文, 黄兴生, 李成, 吴鹏, 仇晓骏. 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.
- [5] 黄志义, 陈雅雯, 张勤玲. 移动荷载作用下热再生沥青路面响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 107-113.
- [6] 陈宇亮, 黄毅, 彭孝南, 王宏祥. 就地热再生沥青路面建设期能耗与碳排放分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 30-39.
- [7] 罗振京. 再生沥青路面集料回弹模量与水分的相关性分析[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(11): 57-60.
- [8] 谭琴. 公路工程中冷再生沥青路面结构设计[J]. 交通世界, 2024(23): 113-115.
- [9] 韩璐玉. 冷再生沥青路面结构设计方法研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(9): 71-73.
- [10] 王琨, 敖琳波. 公路工程冷再生沥青路面结构设计[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(9): 10-13.
- [11] 王知乐. 聚氨酯改性乳化沥青冷拌重复再生集料路面修补料的试验研究[J]. 科技通报, 2025, 41(1): 74-78.
- [12] 李实成, 陈金华. 冷拌再生改性沥青混合料在重载密集山区干线公路养护上的应用研究[J]. 价值工程, 2024, 43(22): 5-7.
- [13] 王知乐. 重复再生集料掺量对冷拌路面修补料的性能影响研究[J]. 公路, 2024, 69(9): 22-27.
- [14] 张绪财, 赵亮. 铣刨料乳化沥青冷拌混合料配合比设计[J]. 运输经理世界, 2024(22): 156-158.
- [15] 王争愿, 李九苏, 娄梦雷, 方克俭, 石扬, 王平. RAP 掺量对反应型冷拌再生沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 35-41.