

泡沫沥青冷再生混合料性能及工程应用研究

王志雄¹, 王 玲², 周 敏³, 徐文怀¹, 李其霖¹, 陈 德¹, 张志阳¹, 孙 进¹, 殷 俊⁴

¹大冶市公路管理局, 湖北 黄石

²中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

³黄石市公路事业发展中心, 湖北 黄石

⁴武汉信达雅路桥技术有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年9月9日; 录用日期: 2026年9月30日; 发布日期: 2026年10月12日

摘 要

为实现旧沥青路面材料高效循环利用, 解决传统路面再生技术能耗高、污染大、施工成本高的问题, 有必要对泡沫沥青冷再生技术展开研究。通过室内试验优化沥青发泡工艺参数与混合料配合比, 分析各组分对混合料路用性能的影响规律, 明确最佳材料配比; 并结合实际道路养护工程, 阐述泡沫沥青冷再生施工关键工艺, 验证其工程适用性与经济环保效益。研究结果表明, 优化后的泡沫沥青冷再生混合料各项路用性能均满足规范要求, 旧料利用率可达85%以上, 可有效降低路面养护成本、减少碳排放, 为旧沥青路面再生养护工程提供技术参考。

关键词

泡沫沥青冷再生, 发泡参数, 配合比设计, 路用性能, 施工工艺

Study on the Performance and Field Application of Foamed Asphalt Cold Recycled Mixtures

Zhixiong Wang¹, Ling Wang², Min Zhou³, Wenhui Xu¹, Qilin Li¹, De Chen¹, Zhiyang Zhang¹, Jin Sun¹, Jun Yin⁴

¹Daye Highway Administration, Huangshi Hubei

²CCCC Second Highway Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

³Huangshi Highway Development Center, Huangshi Hubei

⁴Wuhan Xindaya Road and Bridge Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 9, 2026; accepted: September 30, 2026; published: October 12, 2026

文章引用: 王志雄, 王玲, 周敏, 徐文怀, 李其霖, 陈德, 张志阳, 孙进, 殷俊. 泡沫沥青冷再生混合料性能及工程应用研究[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 8-15. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510233

Abstract

To achieve efficient recycling and utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials and address the high energy consumption, severe environmental impacts, and high construction costs associated with conventional pavement recycling technologies, this study conducts a systematic investigation into foamed asphalt cold recycling technology. Laboratory tests were performed to optimize the asphalt foaming process parameters and mixture design, and the effects of different material components on the pavement performance of the recycled mixtures were analyzed to determine the optimal material composition. Furthermore, based on an actual pavement maintenance project, the key construction procedures of foamed asphalt cold recycling were introduced, and its engineering applicability as well as economic and environmental benefits were evaluated. The results demonstrate that the optimized foamed asphalt cold recycled mixture satisfies the specification requirements for all pavement performance indicators. The utilization rate of reclaimed asphalt materials exceeds 85%, effectively reducing pavement maintenance costs and carbon emissions. This study provides a technical reference for the application of foamed asphalt cold recycling technology in the rehabilitation and sustainable maintenance of reclaimed asphalt pavements.

Keywords

Foamed Asphalt Cold Recycling, Foaming Parameters, Mixture Design, Pavement Performance, Construction Technology

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

随着我国公路路网不断完善,大量早期建设的沥青路面逐渐进入养护维修阶段,每年产生数亿吨旧沥青路面铣刨料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)。传统路面大修通常采用废弃旧料、重新铺筑新路面的方式,不仅造成砂石、沥青等资源的大量浪费,还会引发环境污染问题,同时存在施工能耗高、工程成本高等不足。作为一种绿色养护技术,沥青路面再生技术已成为公路养护领域的重要研究方向。其中,泡沫沥青冷再生技术因具有常温施工、旧料利用率高、早期强度发展快以及施工便捷等优势,已在各等级公路基层和底基层养护工程中得到广泛应用[1]。

泡沫沥青冷再生技术是在常温条件下,将加热后的基质沥青与少量水混合,使沥青迅速膨胀形成泡沫沥青,降低其黏度后,与旧路面铣刨料、新集料、水泥及水等材料均匀拌和,经摊铺、碾压和养生后形成新型路面结构层的一种再生技术。该技术无需对旧路面材料进行高温加热,可有效减少沥青老化和有害气体排放,同时最大程度利用旧路面材料,实现资源循环利用。

目前,国内泡沫沥青冷再生技术在发泡工艺参数优化、混合料性能调控以及现场施工质量控制等方面仍存在进一步完善的需求。针对上述问题,本文结合室内试验与工程应用实践,系统研究泡沫沥青冷再生技术关键参数及施工工艺,分析混合料性能影响规律,为该技术的推广应用提供理论依据和工程参考。

2. 原材料性能与试验方案

2.1. 原材料基本性能

(1) 泡沫沥青

选用道路工程中常用的 70#A 级道路石油沥青, 其针入度(25℃)为 68.2 mm, 延度(15℃)为 125 cm, 软化点为 48.5℃, 各项技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)的相关要求。沥青发泡是泡沫沥青冷再生技术的核心环节, 发泡效果直接影响混合料的黏结性能。本试验通过调控沥青加热温度、发泡用水量及发泡压力等参数, 确定最佳发泡工艺条件, 以获得良好的发泡效果。

(2) 旧沥青路面铣刨料(RAP)

试验所用 RAP 取自 G316 大冶市牛角垄至胡家塘段路面改造工程铣刨料。经筛分及性能检测, 旧料中沥青含量为 4.6%, 集料压碎值为 22.3%, 粒径范围覆盖 0~31.5 mm 全级配范围。试验前剔除其中结块及杂质含量超标部分, 处理后的 RAP 用于后续混合料配合比设计试验[2]。

(3) 水泥

选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥作为活性填料, 用于提高混合料早期强度和水稳定性能。该水泥初凝时间为 3 h 15 min, 终凝时间为 5 h 20 min, 安定性检测结果合格。

(4) 新集料与水

新集料采用石灰岩碎石, 粒径为 5~10 mm, 主要用于优化 RAP 级配组成, 提高混合料级配连续性。拌和用水采用普通饮用水, 水质清洁, 无杂质及污染物。

2.2. 试验方案

(1) 沥青发泡性能试验

以膨胀比和半衰期为发泡性能评价指标, 采用三因素三水平正交试验设计, 研究沥青加热温度(150℃, 155℃, 160℃)、发泡用水量(2.5%, 3.0%, 3.5%)和发泡压力(0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa)对发泡性能的影响规律, 确定最佳发泡工艺参数。

(2) 混合料配合比设计试验

采用马歇尔试验方法, 以劈裂强度、浸水稳定性和冻融劈裂强度比为评价指标, 研究泡沫沥青掺量(2.2%, 2.5%, 2.8%, 3.0%)、水泥掺量(1.0%, 1.5%, 2.0%)及最佳含水率对混合料性能的影响, 确定泡沫沥青冷再生混合料的最佳配合比。

(3) 路用性能验证试验

依据《公路沥青路面再生技术规范》(JTGT 5521-2019), 对最佳配合比混合料开展路用性能验证试验, 检测其高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性能及抗压强度, 评价其是否满足工程应用要求。

3. 试验结果与分析

3.1. 沥青发泡参数优化

沥青发泡性能正交试验结果详见表 1。

Table 1. Test results under different foaming process parameters
表 1. 不同发泡工艺参数试验结果

序号	加热温度/℃	发泡用水量/%	发泡压力/kPa	膨胀比/%	半衰期/s
1	150	2.5	0.4	8.3	6.2
2	150	3	0.5	9.5	7.5
3	150	2.5	0.6	9.2	7.1
4	155	2.5	0.5	10.6	8.4
5	155	3	0.5	11.8	9.8

续表

6	155	3.5	0.4	10.9	8.6
7	160	2.5	0.4	11.2	9.5
8	160	3	0.5	12	10.3
9	160	3.5	0.6	11.5	9.7

正交试验结果表明, 沥青发泡效果受各因素影响的主次顺序为: 沥青加热温度 > 发泡用水量 > 发泡压力。其中, 沥青加热温度对发泡性能的影响最为显著, 发泡用水量次之, 发泡压力影响相对较小。

当沥青加热温度为 160℃、发泡用水量为 3.0%、发泡压力为 0.5 MPa 时, 泡沫沥青的膨胀比达到 12, 半衰期为 10.3 s, 均满足《公路沥青路面再生技术规范》规定的膨胀比不小于 10、半衰期不小于 8 s 的技术要求。因此, 该组合可确定为本试验的最佳发泡工艺参数。

试验结果表明, 沥青加热温度过高会加速沥青老化, 削弱其胶结性能; 温度过低则发泡不充分, 导致泡沫膨胀率和分散性能下降。发泡用水量对泡沫稳定性具有重要影响, 用水量过大会使泡沫迅速破裂, 缩短半衰期; 用水量不足则难以形成充分膨胀的泡沫, 影响发泡效果。在合理取值范围内, 发泡压力对发泡性能的影响相对较小, 当发泡压力为 0.5 MPa 时即可获得均匀、稳定的泡沫沥青, 能够满足混合料拌和施工要求[3]。

3.2. 混合料配合比优化

(1) 泡沫沥青用量优化

不同泡沫沥青用量与劈裂强度关系详见图 1。

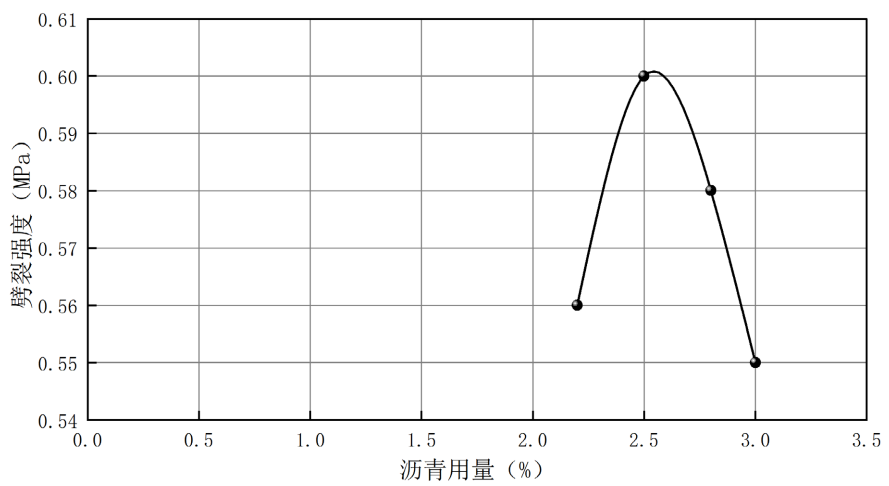


Figure 1. Relationship between foamed asphalt dosage and splitting strength
图 1. 泡沫沥青用量 - 劈裂强度关系曲线

劈裂强度呈现先升高后降低的变化趋势。当泡沫沥青用量为 2.5% 时, 混合料干劈裂强度达到最大值, 为 0.6 MPa。当沥青用量较低时, 沥青无法充分包裹集料表面, 导致混合料黏结性能不足; 当沥青用量过高时, 混合料内部自由沥青含量增加, 易引发泛浆和高温变形等问题。因此, 综合考虑混合料强度及稳定性, 确定最佳泡沫沥青用量为 2.5%。

(2) 水泥掺量优化

不同水泥掺量与浸水稳定性和冻融劈裂强度比关系曲线详见图 2 和图 3。

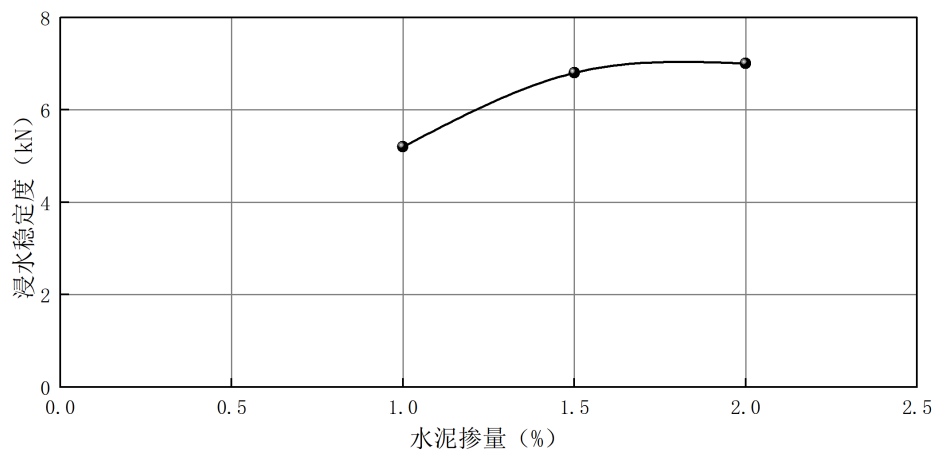


Figure 2. Relationship between cement dosage and immersion stability

图 2. 水泥掺量 - 浸水稳定度关系曲线

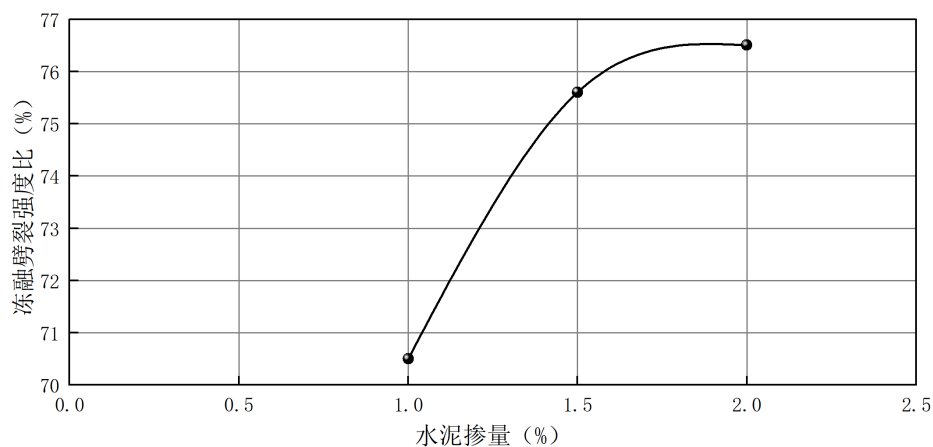


Figure 3. Relationship between cement dosage and freeze-thaw splitting strength ratio

图 3. 水泥掺量 - 冻融劈裂强度比关系曲线

随着水泥掺量由 1.0% 增加至 1.5%，混合料浸水稳定度和冻融劈裂强度比均显著提高。这主要是由于适量水泥水化生成的胶凝产物能够填充混合料内部孔隙，并在 RAP 颗粒、新集料及泡沫沥青胶结体系之间形成一定的胶结与嵌固作用，从而提高混合料的整体密实性、界面黏结强度及抵抗水损害的能力。当水泥掺量继续增加至 2.0% 后，混合料内部可供水泥发挥有效胶结作用的孔隙和颗粒接触界面逐渐趋于饱和，新增水泥所产生的有效增强作用有限，因此强度提升幅度逐渐减小。同时，过量水泥会提高混合料的整体刚度，使材料由相对柔性逐渐向半刚性特征转变，并可能因水化收缩和干缩作用增加内部微裂缝产生的可能性，从而削弱混合料的变形协调能力和低温抗裂性能。综合考虑混合料强度、耐久性、抗裂性能，确定最佳水泥掺量为 1.5%。

(3) 最佳含水率确定

对不同含水率的混合料开展击实试验，试验结果见图 4。根据击实试验确定混合料最佳含水率为 5.59%。在该含水率条件下，混合料压实度达到最大值，碾压成型效果最佳，内部结构更加密实。

综上，针对本工程所采用 RAP 材料，通过试验确定泡沫沥青冷再生混合料适宜配合比为：RAP 掺量 95%、新集料掺量 5%、泡沫沥青用量 2.5%、水泥掺量 1.5%、最佳含水率 5.59%。该配合比能够兼顾混合料强度、稳定性及施工和易性，可满足工程应用要求。

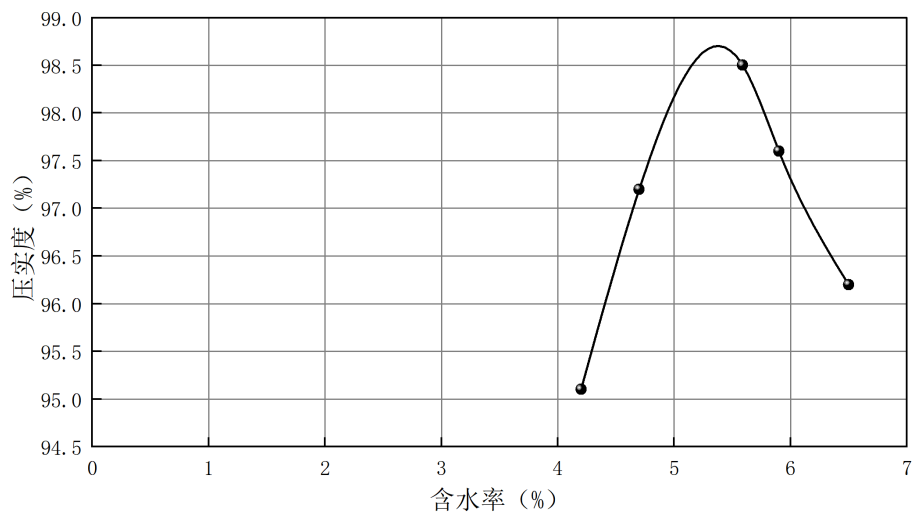


Figure 4. Relationship between moisture content and degree of compaction
图 4. 含水率 - 压实度关系曲线

3.3. 混合料路用性能

对最佳配合比泡沫沥青冷再生混合料进行路用性能测试, 结果表明: 混合料 60℃动稳定度达到 4186 次/mm, 具有良好的高温抗车辙性能; 冻融劈裂强度比为 75.6%, 水稳定性能满足重交通道路使用要求; -10℃低温弯曲破坏应变大于 1200 $\mu\epsilon$, 表现出较好的低温抗裂性能; 养生 7 d 后的无侧限抗压强度达到 1.8 MPa, 表明混合料早期强度发展较快, 有利于缩短施工养生周期[4]。

各项路用性能指标均满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521-2019)的相关要求, 说明该泡沫沥青冷再生混合料具有良好的路用性能和工程适用性, 可满足公路基层及底基层施工应用需求。

4. 泡沫沥青冷再生工程应用

4.1. 工程概况

G316 大冶市牛角垄至胡家塘段(K904 + 046-K923 + 346)路面改造工程, 其中 K904 + 046-K919 + 880 段路面出现大面积裂缝、松散等病害, 基层无明显病害。原有路面面层结构为 4 cm AC-13 沥青面层 + 5 cm AC-20 沥青面层。经检测, 基层整体强度尚可, 面层损坏严重, 采用泡沫沥青冷再生技术对老路面沥青砼进行现场再生, 作为改建路面的柔性下面层, 再生层厚度 9 cm, 上层重新铺设 4 cm AC-13 沥青混凝土面层。

4.2. 施工关键工艺

(1) 旧路面铣刨与集料预处理

采用铣刨机对旧沥青路面面层及基层上部结构进行铣刨, 铣刨料经现场回收后, 通过筛分设备进行分级处理, 去除超粒径颗粒及杂质, 并按照设计配合比掺入新集料, 混合均匀后堆放备用。

(2) 泡沫沥青制备

根据室内试验确定的最佳发泡参数, 将基质沥青加热至 160℃, 控制发泡用水量为 3.0%、发泡压力为 0.5 MPa。在制备过程中实时监测泡沫沥青的膨胀比和半衰期, 确保其发泡性能满足施工要求。

(3) 混合料拌和

采用冷再生设备进行现场就地拌和。首先将 RAP、新集料和水泥进行干拌 60 s, 使各组分充分混合

并保证粉料均匀分布；随后喷洒泡沫沥青和水，继续湿拌 90 s，确保混合料拌和均匀，避免出现花白料和离析现象。

(4) 摊铺与碾压

混合料拌和完成后，应及时采用摊铺机进行匀速摊铺，摊铺速度控制在 2~4 m/min，以保证路面摊铺平整度和结构厚度。碾压施工分为初压、复压和终压三个阶段：初压采用钢轮压路机静压 1 遍；复压采用振动压路机碾压 3~4 遍；终压采用胶轮压路机碾压 2 遍，直至混合料压实度达到 98% 以上。

(5) 养生与交通管制

碾压完成后，应及时覆盖土工布并洒水养生，养生时间不少于 36 h。养生期间应实施交通封闭，禁止车辆通行。养生结束后，喷洒透层油，并进行上层沥青面层施工。

4.3. 工程应用效果

工程完工后，对再生层进行现场钻芯取样及质量检测。根据检测报告，压实度、平整度、高程、横坡、车辙、路面摩擦系数等各项指标均满足设计及规范要求，路面整体质量良好(见图 5)。

该工程旧路材料利用率达到 95%。采用泡沫沥青就地冷再生技术施工的 9 cm 下面层，相较于传统挖除重铺方案，可减少工程造价 47.4 元/m²，综合成本降低 52.6%。施工过程中无需高温加热，能够有效减少二氧化碳、二氧化硫等有害气体排放，同时避免旧路材料堆放造成的土地占用问题，具有显著的经济效益和环保效益[5]。



Figure 5. Field application of foamed asphalt cold recycled pavement
图 5. 泡沫沥青冷再生路面实施效果图

经后期跟踪观测，通车半年后的再生路面未出现裂缝、车辙、松散等病害，路面平整度和承载能力保持良好，各项使用性能均满足道路运营要求，表明泡沫沥青冷再生技术具有良好的长期服役效果。

本研究所确定的最佳发泡参数及混合料配合比是 G316 大冶市牛角垄至胡家塘段路面改造工程 RAP 材料条件下获得的，其适用范围具有一定的材料依赖性。不同工程来源的 RAP 在原路面结构、原沥青类型及用量、服役年限、铣刨方式和存储条件等方面存在差异，因而其级配组成、旧沥青含量及老化程度往往具有明显离散性。这些差异会改变 RAP 颗粒的比表面积、旧沥青膜状态及颗粒间黏结特征，进而影响泡沫沥青在混合料中的分散、裹覆与胶结效果，并可能导致最佳泡沫沥青用量、最佳含水率及水泥掺量发生变化。因此，实际工程应用时，应首先对 RAP 的级配、旧沥青含量、老化程度及集料性能进行检测，并在此基础上重新开展发泡性能和配合比验证试验，以确定与具体 RAP 材料相适应的设计参数。

4.4. 推广应用前景

泡沫沥青冷再生技术具有明显的技术优势,可有效减少反射裂缝,提高路面高温稳定性,降低施工期间对交通运行的影响,并节约工程成本、减少环境负荷,保持路面结构完整性,符合绿色低碳和可持续发展的理念。冷再生设备集铣刨、拌和、再生等功能于一体,具备高精度找平、灵活输送及精准喷洒等功能,可适应不同施工宽度要求,有效提升再生材料性能和施工质量。该技术实现了公路养护的高效化、智能化和低碳化,具有较好的推广应用价值。

另外,泡沫沥青冷再生技术的工期优势主要体现在“减少工序、提高效率、缩短养生周期”等方面[6],与传统沥青路面大修工艺(铣刨、旧料外运、新料摊铺及高温养护)相比,该技术可减少施工环节,缩短工期约 30%~50%。

5. 结论

通过室内试验优化沥青发泡工艺参数与混合料配合比,分析各组分对混合料路用性能的影响规律,明确最佳材料配比;并应用于道路养护工程,阐述泡沫沥青冷再生施工关键工艺,验证其工程适用性与经济环保效益。具体研究结果如下:

(1) 通过试验研究确定沥青最佳发泡工艺参数,即加热温度 160℃、发泡用水量 3.0%、发泡压力 0.5 MPa。在该条件下,泡沫沥青发泡性能达到最优,能够满足冷再生混合料拌和及施工要求。

(2) 针对本工程所采用 RAP 材料,通过试验确定泡沫沥青冷再生混合料适宜配合比为:RAP 掺量 95%、新集料掺量 5%、泡沫沥青用量 2.5%、水泥掺量 1.5%、最佳含水率 5.59%。在该配合比条件下,混合料各项路用性能满足规范要求。对于不同来源和材料特性的 RAP,应结合其级配、旧沥青含量及老化程度重新开展配合比验证,不宜直接套用上述参数。

(3) 泡沫沥青冷再生技术具有施工工艺简便、旧料利用率高、经济效益和环保效益显著等优势,适用于二级及以上公路旧路面基层养护及改扩建工程。后续研究可进一步开展新型发泡剂对沥青发泡性能影响机制的研究,优化再生剂掺配方案,以改善老化沥青性能。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 5521-2019 公路沥青路面再生技术规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [2] 王开凤,曾鹏,朱云升. 基于最大黏聚力性能的泡沫沥青冷再生混合料配合比设计方法[J]. 中外公路,2018,38(2): 192-196.
- [3] 肖汉. 泡沫沥青冷再生技术在高速公路养护施工中的应用研究[J]. 中国水运,2026(14): 122-123+126.
- [4] 李秀君,周维维,李梦晨. 旧沥青混合料对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 上海理工大学学报,2013,35(1): 71-76.
- [5] 罗波. 沥青路面水泥碎石基层现场冷再生技术在普通国省干线公路养护工程中的应用[J]. 工程技术研究,2020,5(21): 138-139.
- [6] 曹禹. 浅谈泡沫沥青冷再生基层的施工质量控制[J]. 太原城市职业技术学院学报,2012(2): 166-168.