

低碳理念下废旧沥青混合料在乡村道路基层设计中的应用与性能优化

陈泽聪

汕尾市交投工程设计咨询有限公司, 中国·广东 汕尾 516600

摘要: 随着双碳目标推进与乡村振兴战略实施, 乡村道路建设面临环保与经济的双重需求。废旧沥青混合料 (RAP) 的再生利用, 可有效减少道路建设对天然骨料的消耗及旧料废弃带来的环境负担, 契合低碳发展理念。本文围绕 RAP 在乡村道路基层中的应用展开研究, 分析其材料特性、设计要点及性能优化路径, 结合乡村道路荷载轻、施工条件有限等特点, 提出适配的应用方案, 为乡村道路低碳化建设提供理论与实践参考。

关键词: 低碳理念; 废旧沥青混合料; 乡村道路; 基层设计; 性能优化

Application and Performance Optimization of Recycled Asphalt Mixtures in Rural Road Base Design Under the Low-Carbon Concept

Chen Zecong

Shanwei Jiaotou Engineering Design Consulting Co., Ltd., China Guangdong Shanwei 516600

Abstract: With the advancement of the dual carbon goals and the implementation of the rural revitalization strategy, rural road construction faces both environmental and economic demands. The recycling of reclaimed asphalt pavement (RAP) can effectively reduce the consumption of natural aggregates in road construction and the environmental burden caused by waste materials, aligning with the concept of low-carbon development. This paper focuses on the application of RAP in the base layers of rural roads, analyzing its material properties, design considerations, and performance optimization paths. Considering characteristics such as light road loads and limited construction conditions in rural areas, it proposes suitable application schemes to provide theoretical and practical references for the low-carbon construction of rural roads.

Keywords: Low-carbon concept; Reclaimed asphalt pavement; Rural roads; Base layer design; Performance optimization

0 引言

乡村道路是农村基础设施的重要组成部分, 其建设质量直接影响农村生产生活与经济发展。传统乡村道路基层多采用天然砂石、水泥稳定碎石等材料, 存在资源消耗大、碳排放较高的问题。与此同时, 我国每年产生大量废旧沥青混合料, 若直接废弃, 不仅占用土地资源, 还会造成环境污染与资源浪费。在低碳理念指引下, RAP 再生利用成为道路建设领域实现降碳减排的重要途径。与城市道路相比, 乡村道路具有交通量小、轴载轻、对路面性能要求相对较低的特点, 为 RAP 在基层中的应用提供了适宜场景。将 RAP 应用于乡村道路基层, 既能降低建设成本 (减少天然骨料采购与旧料处理费用), 又能减少碳排放与资源消耗, 符合乡村建设绿色低碳、经济实用的原则。然而, RAP 中含有老化沥青, 其级配、强度及水稳定性等性能与天然材料存在差异, 直接应用可能影响基层质量。因此,

研究 RAP 在乡村道路基层中的应用技术与性能优化方法, 对推动乡村道路低碳化、可持续建设具有重要意义。

1 废旧沥青混合料 (RAP) 的材料特性分析

1.1 RAP 的基本组成与性能特点

RAP 主要由老化沥青、骨料及少量矿粉组成, 其性能受原路面结构、服役年限、交通荷载及环境因素影响较大, 核心特性如下: 骨料特性: RAP 中的骨料经长期碾压, 表面光滑度降低, 棱角性有所损失, 但整体强度仍能满足乡村道路基层对骨料的基本要求。不过, 部分旧料可能存在骨料破碎、级配不均匀的问题, 需通过筛分调整。老化沥青特性: 原沥青在长期使用中, 受光、热、氧气等作用发生老化, 表现为针入度减小、软化点升高、延度降低, 黏性与脆性增加。老化沥青会影响 RAP 的黏结性能与抗裂性, 是制约其应用的关键因素。整体力学性能: RAP 的抗压强度、回弹模量等力学指标随旧料掺量、老化程度变化。

未处理的 RAP 松散性较强,需通过添加结合料改善其整体性与强度。

1.2 乡村道路基层对 RAP 的性能要求

乡村道路基层需具备足够的强度、稳定性及一定的抗变形能力,以承受车辆荷载与环境作用。基于乡村道路特点,对 RAP 的性能要求可归纳为:强度要求:基层需满足一定的抗压强度与弯拉强度,确保在轻型交通荷载下不发生过大变形或破坏。RAP 再生基层的 7d 无侧限抗压强度宜不低于 2.0MPa。水稳定性要求:乡村道路多位于露天环境,基层需具备良好的水稳定性,避免雨水渗透导致强度衰减。RAP 再生基层的浸水残留强度比应不低于 75%。

施工和易性要求:乡村道路施工设备与技术条件有限,RAP 再生混合料需具备良好的拌和、摊铺与压实性能,便于现场施工操作。经济性要求:需在保证性能的前提下,最大化利用 RAP,降低材料成本与施工成本,契合乡村道路建设的经济需求。

2 RAP 在乡村道路基层中的应用设计要点

2.1 基层结构形式选择

结合乡村道路荷载特点与 RAP 性能,适宜采用的基层结构形式主要有以下两种:水泥稳定 RAP 基层:以水泥为结合料,将 RAP 与少量新骨料(若级配不足)按比例混合、压实成型。水泥可有效改善 RAP 的整体性与强度,施工工艺成熟,与乡村道路常用的水泥稳定基层施工设备兼容,适用性强。石灰-粉煤灰稳定 RAP 基层:以石灰、粉煤灰为复合结合料,利用石灰的激发作用与粉煤灰的填充、胶结作用,提升 RAP 基层的强度与稳定性。该形式成本较低,且粉煤灰的利用可进一步实现固废资源化,低碳效益更显著,但早期强度较低,需注重养护。

2.2 RAP 的预处理与级配设计

2.2.1 预处理工艺

RAP 在使用前需进行预处理,以保证材料均匀性与性能稳定性,步骤如下:破碎:采用颚式破碎机或反击式破碎机将废旧沥青路面铣刨料破碎,破碎后颗粒最大粒径控制在 31.5mm 以内(适配乡村道路基层厚度)。筛分:通过振动筛对破碎后的 RAP 进行筛分,分析其级配组成。若级配偏粗或偏细,需掺加新骨料(如石屑、碎石)或矿粉进行调整,使混合级配符合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)中基层材料的级配要求。杂质清除:去除 RAP 中的泥土、杂草、金属等杂质,避免影响基层强度与稳定性。

2.2.2 级配优化设计

乡村道路基层对级配的要求以密实稳定为主,需通过级配优化确保 RAP 再生混合料具有良好的压实性与强度。设计原则如下:控制 RAP 中粒径大于 26.5mm 的颗粒含量不超过 15%,避免颗粒过大导致压实困难;0.075mm 以下颗粒含量控制在 3%~8%,确保混合料的黏结性与水稳定性;通过调整新骨料掺量,使级配曲线处于规范推荐范围的中值附近,提升密实度。

2.3 结合料掺量设计

结合料掺量直接影响 RAP 再生基层的强度与经济性,需根据 RAP 老化程度、级配情况及性能要求确定:水泥稳定 RAP:水泥掺量通常为 3%~6%。RAP 老化严重、级配较差时,可适当提高水泥掺量(5%~6%);若 RAP 性能较好,掺量可控制在 3%~4%,以降低成本与碳排放。石灰-粉煤灰稳定 RAP:石灰掺量一般为 4%~8%,粉煤灰掺量为 10%~15%(均为占混合料干重的百分比)。石灰与粉煤灰的比例宜为 1:2~1:3,利用二者协同作用提升基层性能。

2.4 施工工艺设计

乡村道路施工条件有限,RAP 再生基层施工需简化工艺、适配小型设备,核心流程如下:拌和:采用小型强制式拌和机,将预处理后的 RAP、新骨料、结合料与水按比例拌和。拌和时间控制在 30~60s,确保混合料均匀,无灰团与花白料。摊铺:采用小型摊铺机或人工摊铺,摊铺厚度按设计要求控制(乡村道路基层厚度一般为 15~20cm),摊铺速度保持均匀,避免离析。压实:选用小型振动压路机(10~12t),遵循先轻后重、先慢后快、先边后中的原则压实。碾压遍数一般为 6~8 遍,直至压实度达到 96%以上(重型击实标准)。养护:压实完成后,及时覆盖土工布或洒水养护,养护期不少于 7d。养护期间禁止车辆通行,避免基层早期破坏。

3 RAP 再生基层的性能优化路径

3.1 材料层面优化

3.1.1 老化沥青再生改性

RAP 中的老化沥青是影响基层性能的关键因素,可通过添加再生剂或活性材料改善其性能:再生剂添加:对于老化严重的 RAP,可掺入 0.3%~0.8% 的再生剂(如糠醛抽出油、废机油改性剂),软化老化沥青,恢复其黏结性与塑性,提升混合料的抗裂性。活性材料激发:在石灰稳定 RAP 中,可掺入少量水泥(1%~2%)作为激发剂,加速石灰与粉煤灰的水化反应,生成更多胶凝物质,提升基层

早期强度与水稳定性。

3.1.2 级配与骨料优化

骨架密实型级配设计：通过调整 RAP 与新骨料的比例，构建粗骨料形成骨架、细骨料与结合料填充空隙的级配结构，提升基层的强度与抗变形能力。骨料预处理：对 RAP 中的粗骨料进行清洗，去除表面附着的老化沥青与杂质，增强骨料与结合料的黏结性能；对破碎后的细骨料进行筛分，控制含泥量不超过 3%。

3.2 结构层面优化

3.2.1 基层厚度适配设计

根据乡村道路交通量（一般为轻交通，轴载 $\leq 10\text{t}$ ），结合 RAP 再生基层的强度指标，合理设计基层厚度：当 RAP 掺量为 50%~70%、水泥掺量为 4%~5% 时，基层厚度可设计为 15~18cm；

当 RAP 掺量 $\geq 80\%$ 或结合料掺量较低时，可适当增加基层厚度至 18~20cm，或在基层与面层之间设置 1~2cm 的下封层，增强层间黏结与防水性能。

3.2.2 复合基层结构设计

对于交通量相对较大的乡村主干道，可采用 RAP 再生基层加水泥稳定碎石上基层的复合结构：下基层采用 RAP 掺量 70%~80% 的水泥稳定 RAP，厚度 12~15cm；上基层采用水泥稳定碎石（水泥掺量 5%~6%），厚度 8~10cm；复合结构既最大化利用 RAP，又保证基层整体强度与稳定性，兼顾低碳与实用。

3.3 施工与养护优化

3.3.1 施工参数优化

拌和含水率控制：根据现场气候条件（温度、湿度），将混合料含水率控制在最佳含水率 $\pm 1\%$ 范围内，避免因含水率过高导致基层干缩开裂，或含水率过低影响压实度。压实温度控制：对于热再生 RAP 混合料（若采用现场热再生工艺），摊铺温度宜控制在 120~140℃，压实温度不低于 100℃，确保沥青充分软化，提升压实效果。

3.3.2 养护工艺优化

保湿养护强化：采用塑料薄膜加土工布双层覆盖养护，减少水分蒸发，确保结合料充分水化；在干旱地区，可每隔 2~3h 洒水一次，保持基层表面湿润。早期强度提升：在混合料中掺入少量早强剂（如硫酸钠、氯化钙，掺量 0.5%~1%），缩短养护周期，满足乡村道路快速通车的需求。

4 应用案例分析

4.1 案例概况

某乡村道路改造工程，原道路为水泥混凝土路面，因

破损严重需翻修。工程全长 2.5km，路面宽度 4.5m，设计为 18cm RAP 再生基层加 5cm AC-13 沥青面层。项目共产生废旧沥青混合料约 800t，全部用于基层施工，替代天然骨料约 600t。

4.2 材料与设计参数

RAP 预处理：将铣刨后的 RAP 破碎、筛分，级配调整为：31.5mm 通过率 100%、26.5mm 通过率 95%、4.75mm 通过率 35%、0.075mm 通过率 5%。结合料选择：采用水泥稳定，水泥掺量 4.5%，最佳含水率 6.8%，最大干密度 $2.25\text{g}/\text{cm}^3$ 。施工工艺：采用小型强制式拌和机拌和，人工配合小型摊铺机摊铺，10t 振动压路机压实，养护期 7d。

4.3 性能检测与应用效果

4.3.1 性能检测结果

7d 无侧限抗压强度：2.8MPa（满足设计要求 $\geq 2.0\text{MPa}$ ）；浸水残留强度比：82%（满足设计要求 $\geq 75\%$ ）；压实度：97.5%（满足设计要求 $\geq 96\%$ ）；弯沉值： $23.5 \times 10^{-2}\text{mm}$ （满足轻交通道路弯沉要求 $\leq 30 \times 10^{-2}\text{mm}$ ）。

4.3.2 经济与环境效益

经济效益：RAP 再生利用减少旧料处理费用约 4 万元，节省天然骨料采购费用约 6 万元，总造价较传统水泥稳定碎石基层降低 15%。环境效益：减少天然骨料开采约 600t，降低碳排放约 120t（按每吨天然骨料开采与运输碳排放 0.2t 计算），避免旧料占用土地约 200m²，实现了资源循环、低碳减排的目标。

5 结语

低碳理念下，将 RAP 应用于乡村道路基层，可实现资源循环利用与碳排放降低，同时降低建设成本，契合乡村道路经济、环保的建设需求。RAP 的预处理与级配优化是保证基层性能的基础，需根据 RAP 性能调整新骨料与结合料掺量，构建适配的级配结构。水泥稳定 RAP 基层因施工工艺成熟、强度稳定，更适合乡村道路施工条件；通过添加再生剂、激发剂或采用复合基层结构，可进一步优化 RAP 再生基层的强度、水稳定性与抗裂性。工程案例表明，在合理设计与施工条件下，RAP 再生基层的性能可满足乡村道路要求，兼具经济、环境与实用效益。未来可进一步研究低成本、高效能的 RAP 再生剂与激发剂，提升老化沥青再生效果与基层长期性能。针对乡村道路施工特点，开发小型化、便捷化的 RAP 再生施工设备，降低施工门槛，推动技术普及。建立 RAP 在乡村道路基层

中应用的技术标准与质量控制体系，为工程实践提供更完善的指导。探索 RAP 与其他固废协同再生利用技术，进一步拓展固废资源化路径，提升乡村道路建设的低碳化水平。

参考文献：

[1] 刘文伟. 废旧沥青混合料再生利用技术探讨. 时代汽车, 2025(13).

[2] 谢胜加, 于晓晓, 倪文全. 废旧沥青混合料在路基路面中的应用. 城市道桥与防洪, 2025(05).

[3] 雷建. 废旧沥青混合料再生在高速公路修复中的应用. 时代汽车, 2025(17).

[4] 都伟, 张明欣, 王彦敏等. 废旧沥青混合料在路面基层中的应用研究进展. 材料导报, 2024(S1).

作者简介：陈泽聪（1994.04-），男，汉族，广东省惠来县人，本科，汕尾市交投工程设计咨询有限公司，市政路桥设计工程师，研究方向：公路与桥梁设计及项目管理。