

基于环保理念的普通国省干线沥青路面冷再生技术探讨

文 / 赵来鹏 西安长安大学工程设计研究院有限公司

摘要：近几年来，我国公路工程发展速度持续增加，但随之而来的并非行业进步，而是较为严重的环保问题。经过部分学者大量实验研究发现，沥青路面冷再生技术可有效解决普通国省干线公路中的环保问题。因此，本文将基于环保理念，探讨普通国省干线沥青路面冷再生技术实施要点，希望供相关单位参考。

关键词：环保理念；普通国省干线；沥青路面；冷再生技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.058

引言

我国公路网规模在近几年来不断扩大，传统沥青路面养护产生的废旧沥青混合料（RAP）年均超2亿吨，若使用填埋处理方式，将会造成土地资源浪费、土壤污染。同时，热再生技术因高温能耗与温室气体排放问题，无法满足“双碳”目标要求。因此，通过使用冷再生技术，其可在常温条件下对RAP实施再利用，具有环保性与经济性双重优势，逐渐成为普通国省干线工程中的关键技术。

一、项目介绍

某普通国省干线项目，全长5.817km，起止位置为K27+000-K32+817。近年来，该地区经济飞速发展，某普通国省干线项目沿线车辆通行量大幅增加，持续的高负荷为该项目带来较大交通压力，导致该路段出现不同程度路面损害。经过路况调查，发现该路段存在多处损害现象，且在特定区段尤为严重，给过往车辆行驶安全造成严重威胁。为深入掌握路面损害成因，技术团队主要对病害类型、分布范围、潜在成因实施全面分析。

二、基于环保理念的普通国省干线沥青路面调查与设计

（一）调查

某普通国省干线项目作为区域内的关键干线公路，技术团队对该项目所在区域交通流量数据深入分析，得出该路段交通流特点：该路段主要通行小型客车，但也含有较多大型客车与中、大型货车，日常交通流量十分庞大^[1]。

对路面损害情况进行细致评估中，路面状况指数（PCI）为76.2，表示尽管路面存在损坏，但整体情况尚在可接受范围内；路面行驶质量指数（RQI）为89.1，表明车辆在该路段行驶时，舒适度保持在良好水平；路面质量指数（PQI）则为80.2，反映出路面整体质量良好。然而，路面强度系数（SSI）仅为0.584，路面强度指数（PSSI）仅为56.91，显示出路面结构强度不足，被评定为“中等”水平。为全面掌握路面实际情况，技术团队采取钻芯取样法进行深层检测。轻微病害区域表现为基层松散，严重病害区域发现面层裂缝贯穿、未能形成有效基层问题。

（二）方案设计

根据勘察与调研结果，技术团队制定系统道路改造设计方案，计划对某普通国省干线项目原有路面实施铣刨施工，移除厚度为12cm的沥青混合料层，清除潜在旧路面病害。接下来，施工单位铺设厚度为8cm的乳化沥青冷再生下面层，希望提高路面承载能力。在此基础上，还要再铺设厚度为4cm的AC-16热拌沥青混合料，确保形成更为平整耐用的路面表层。

三、冷再生技术原理

冷再生技术主要优点是能充分回收利用旧路面中报废沥青材料，节约经济成本。近几年来，人们开始意识到绿色公路建设重要价值，普通国省干线项目沥青路面再生利用工艺成为行业内关注焦点。在冷再生工艺领域，就地冷再生与厂拌冷再生是主要技术路径。本文将重点讨论就地冷再生技术，技术在应用过程中，技术人员需要向现有旧铺层材料中掺入适量新骨料，结合精准配比，加入添加剂、水等成分。在常温下，该工艺可连续完成拌和、摊铺、碾压等关键工序（图1），有效处理多种类型路面损害，全面恢复路面使用性能。

但在实际应用过程中，就地冷再生技术能保障旧沥青材料就地利用，有效减少材料浪费，增强基层强度。结合某普通国省干线项目实际应用效果数据可以看出，与传统施工技术相比，就地冷再生技术能节约约20%-50%的施工成本，同时该技术在应用中也不会对区域交通产生较大影响，进一步提高施工效果。

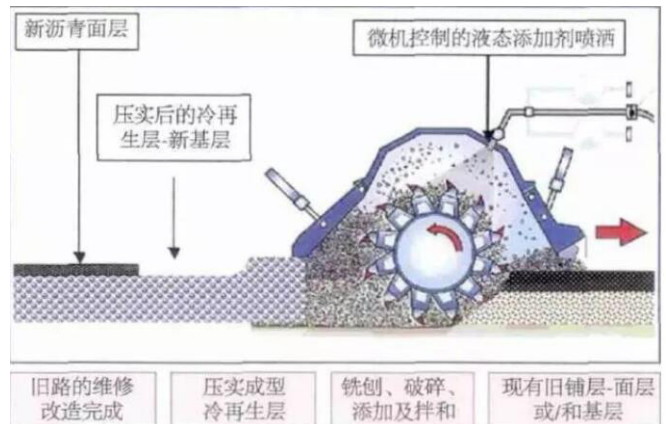


图1 沥青路面冷再生技术示意

四、基于环保理念的普通国省干线沥青路面冷再生技术要点

某普通国省干线项目再生沥青混合料应用过程中,当 RAP 掺量较少,并不会对再生混合料性能产生较大影响,随 RAP 含量增加,其各项性能指标如含水率、旧沥青老化程度、旧集料性能等都会发生变化,因此必须对废旧沥青混合料 RAP 特性进行深入研究^[2]。

(一) 性能分析

1. 含水量

公路施工通常在露天环境内进行,RAP 的回收存放也会暴露于空气中,受雨水和空气湿度等自然环境因素影响,RAP 含水率会发生变化。为保证再生混合料级配合理,技术人员必须在配比设计阶段考虑 RAP 含水率等相关问题,按照普通国省干线项目集料试验规范对其严格检测。

2. 旧沥青老化程度

研究发现,沥青老化的主要原因在于其在大气环境下,内部轻质油分氧化挥发。尽管路面投入使用后,沥青老化过程依然仍会持续,加之温度变化、压实度、空隙率等因素,沥青老化速度回进一步加快。沥青经过老化后,各项性能指标均会发生显著变化,包括针入度、延度降低,黏度与软化点升高,会严重影响沥青混合料耐久性,导致路面出现裂缝、松散等病害^[3]。

3. 旧集料性能

车辆荷载持续作用、自然环境持续影响背景下,普通国省干线项目沥青路面混合料内部结构会出现较多变化,包括集料粒径调整、级配转变。研究显示,随通车时间逐渐增加,路面混合料由于在运行过程中受到车辆碾压,集料粒径会细化,级配特性也随之发生变化。集料细化原因十分复杂,包括集料自身力学性能退化、车辆交通流量增大、使用时间延长等。

为获得适用于物理力学试验的纯净集料,通常采用离心抽提法去除集料表面沥青层,揭示旧集料真实特性,为后续研究提供可靠数据支持。在某普通国省干线项目中,经过严格、细致的检测流程,旧集料各项技术指标均在规范范围内。检验结果表明,车辆通行时,沥青混合料会经历细化过程,但其对集料物理、力学性能不会产生较大影响。因此,旧集料在沥青混合料再生施工中具有可行性,可被有效利用。

(二) 配比设计

在配比设计过程中,技术人员会结合前期回收沥青路面材料(RAP)的物理特性,同时还需预先评估乳化沥青再生体系适用条件,精确计算乳化沥青掺配比例。通过系统试验优化,确立乳化沥青冷再生混合料基准配比为^[4]。

(三) 拌和

在某普通国省干线项目应用就地冷再生施工技术时,

施工单位建立完善物料输送体系,应用专用提升装置将 RAP 材料输送至拌合系统高位仓。正式开始实施拌合作业前,施工单位完成计量系统动态标定,确保各矿质集料供料速率达到设计要求。在首次拌合前,施工单位进行试生产验证,根据骨料筛分数据动态修正施工配比,使合成级配满足设计目标要求,并将关键筛孔通过率偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内。与此同时,施工单位依据马歇尔试验确定沥青最佳用量,结合旋转压实成型试验结果完成生产配比验证,确定施工沥青用量区间为: $\pm 0.2\%$ 。

(四) 混合料运输

在物料运输环节,某普通国省干线项目施工单位积极开展污染防控工作,希望保障混合料性能。装载工作开始前,施工单位对运输车辆货箱实施全面清洁处理,采用高压气枪清除残留物,使用中性清洗剂擦拭内表面。为预防混合料粘附,在装料前 30 分钟于货箱底面及侧壁均匀涂抹专用防粘剂,涂层厚度控制在 0.2-0.3mm 范围内,避免出现积液。本项目中,施工单位采用“前-中-后”分阶段装载工艺,每装载段完成后及时调整车辆位置,确保混合料对称分布。运输过程中,全程覆盖防雨篷布,设置 GPS 温度监控装置,确保混合料到达摊铺现场时温度损失不超过 3°C 。

(五) 摊铺

本项目实施冷再生混合料铺筑作业时,确保其满足环境要求,即大气温度应高于 10°C ,无持续性降水,现场湿度控制在 $\text{RH}<85\%$ 范围。施工前,安排技术人员系统调试摊铺设备,重点检查液压系统压力参数(12-15MPa)、振动夯振幅设定值(4-6mm)。相比于传统热拌工艺来说,冷再生铺筑无需对熨平板进行预热处理,但要在接触面均匀涂布硅基隔离剂(涂布量 $0.8-1.2\text{L}/\text{m}^2$),防止混合料粘附影响铺面质量。

铺筑过程严格执行连续作业规程,摊铺机行进速度经试验段验证确定在 $2.1-3.8\text{m}/\text{min}$ 区间内,速度波动幅度不超过设定值 $\pm 10\%$ 。螺旋分料装置转速需与行进速度动态匹配,恒定在 $12-18\text{rpm}$ 范围内。同时,施工单位采用双基准线控制模式,钢丝绳张紧力达到 $800-1000\text{N}$,相邻支点间距 $> 5\text{m}$,高程误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内。当检测到局部离析现象(粗集料聚集面积 $>10\text{cm}^2$)时,立即启动离析修正程序:降低分料器转速 $20\%-30\%$,提升刮料板高度 $5-8\text{mm}$ 。

本项目中,施工单位根据松散摊铺系数设定要求,采用核子密度仪与激光断面仪进行双控检测。检测实施过程中,每 50m 布置三个检测断面,每断面取五点测量实际摊铺厚度,允许偏差为设计厚度 $\pm 5\%$ 。当连续三个检测点超差时,应调整熨平板仰角(调节精度 0.1°)并复核混合料供给量。平整度控制方面,施工单位确保 3m 直尺检测间隙不超过 5mm ,纵向高程标准差 $\leq 2.5\text{mm}$ 。

（六）碾压

冷再生混合料压实过程中，施工单位遵循“紧跟、慢压、高频”原则，形成初压→复压→终压三阶段工艺体系。初压阶段采用 12-14t 双钢轮振动压路机，振幅设定在 0.3-0.6mm 范围内，振动频率 35-45Hz，行进速度保持在 1.8-2.8km/h，完成 2-3 遍压实后，表面密度应达到理论密度 88%-92%。

复压阶段，组合使用 30t 轮胎压路机（充气压力 0.6-0.8MPa），同时使用 10t 双驱振动压路机，采用交错碾压模式，轮胎压路机碾压速度控制在 2.5-3.5km/h 范围内，振动压路机速度在 3.0-4.2km/h 之间，该阶段需完成 4-6 遍碾压，使密实度提升至 96%-98%。

终压采用静力式钢轮压路机（线荷载 300-350N/mm），以 2.0-2.5km/h 速度进行 2-3 遍修整碾压，重点消除直径 >5mm 的轮迹印痕，确保 3m 直尺检测轮迹深度 ≤ 2mm。如果遇到特殊部位，在处理过程中需遵循以下原则：一是路缘石周边采用 1-2t 小型手扶压路机补压；二是横向接缝处实施 45° 斜向碾压；三是超高路段的碾压顺序为由低向高。

另一方面，在本项目实施过程中，施工单位建立数字化压实监控系统，在安压路机内安装 GNSS 定位模块、加速度传感器（采样频率 200Hz），实时采集、碾压遍数热力图、振动频率波动曲线、行进速度分布云图、表面温度梯度等关键参数。当监测到局部区域压实功不足（碾压遍数偏差 ≥ 2 次）或过压实情况（密实度 >102%）时，系统会自动触发预警，生成位置坐标，指导技术人员实施补压或翻松处理。

（七）养护

某普通国省干线项目应用冷再生沥青混合料施工过程中，在正式开展铺设作业前，施工单位针对上层结构制定科学维护保养措施。施工单位安排专业技术人员、管理人员严格管控维护保养周期，确保其超过 7d。养护工作圆满完成后，对再生层核心样本实施完整性验证。另外，对于再生层含水率方面，施工单位严格控制其数据，保障其处于规定标准下，可有效提高材料性能稳定性。

养护过程中，施工单位首先实施交通封闭，为养护作业创造无干扰环境，提升养护效果。此外，若情况允许，可采取自然养护法，这种方式较为便捷，不需额外人力干预。如果由于特殊情况无法完全封闭交通，在碾压施工结束后需至少等待 24 小时，才可重新开放交通。在该过程中，为避免对养护效果造成不良影响，施工单位安排专职管理人员，严格监督道路上行驶车辆速度、类型，禁止重载车辆通行，如遇特殊情况，施工单位需要将车速限制在 40km/h 内，以防对新铺路面造成冲击损害。对于已完成施工路段，需特别关注车辆行驶行为，禁止其

在这些路段上急转弯、急刹车、掉头。另一方面，为提升养护质量，本项目施工单位还会适量喷洒慢裂型乳化沥青，该材料能增强路面耐久性、稳定性，进而延长普通国省干线项目使用寿命^[5]。

五、基于环保理念的普通国省干线沥青路面冷再生施工现场检测与质量评估

施工工序完后，施工单位对乳化沥青冷再生施工所用材料与质量状态进行细致检验。该过程旨在准确评估路面施工实际质量水平，核查是否存在破乳现象，确保铺筑作业质量符合相关标准。混合料轧制过程中，技术人员使用 3m 直尺等工具，对接缝及其他关键部位精确检查，确保这些区域紧密性、平整度、直线度符合既定设计标准。轧制作业完成后，施工单位测定路面压实度和总含水量，使用直径 < 150mm 的充砂筒，确保结果精确性。

养护工作结束后，为验证施工效果，施工单位采用钻芯取样方法，经过检测、数据分析，获取路面压实度值为 96.7%，高于最低要求，确认压实度完全符合施工标准。对于平整度方面来说，最大间隙实测值为 3.7mm，低于上限要求，表明路面平整度达到预期标准。芯样劈裂强度测试中，15℃ 条件下，测得劈裂强度为 0.68MPa，超过最低标准，显示该路面具备良好强度特性。并且，钻芯取样结果表明，芯样完整性实测值为 95%，高于标准即不低于 90%，证明芯样质量优异。

结语

某普通国省干线项目应用冷再生技术取得良好效果，有效解决废旧沥青材料处理问题，实现资源节约目标，显著提升路面使用性能，延长道路寿命。因此，在未来的普通国省干线项目中，应广泛应用冷再生技术，才可推动我国公路事业可持续发展。此外，还要加深技术创新深度，不断提高技术应用效果。

参考文献

- [1] 焦海楠. 旧沥青路面就地冷再生水泥稳定碎石基层施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10 (01): 68-70.
- [2] 欧阳亮西, 王文新. 乳化沥青厂拌冷再生技术在高速公路改扩建工程中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024, (24): 154-156.
- [3] 胡贵华, 欧阳剑, 周基, 陈小微, 孟岩. 再生剂对乳化沥青冷再生混合料性能影响的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (10): 65-72.
- [4] 温友江. 公路沥青路面冷再生稀浆封层及其摊铺压实技术应用要点 [J]. 工程机械与维修, 2024, (10): 152-154.
- [5] 杭传鹏. 不同压实作用对泡沫沥青冷再生混合料宏观性能的影响 [J]. 路基工程, 2025, (01): 115-120.