

山区公路冷再生沥青路面结构设计分析

文 / 孙亮亮 西安长安大学工程设计研究院有限公司

摘要: 为优化山区公路沥青路面病害处治方案,以冷再生技术为研究重点,依托山区公路工程实例,系统分析冷再生路面结构设计方法及关键实施环节。针对山区复杂地质特点,重点解析基底回弹模量计算原理、水稳基层材料性能指标要求及结构层组合优化路径,构建涵盖机械协同作业、材料配比动态调控的质量控制流程。工程实践表明,首次冷再生处治虽能实现路面功能修复,但存在结构承载力增幅不足、抗变形能力较弱等缺陷;经优化设计参数与施工工艺的二次处治方案,显著增强再生层与基层的协同作用,实体工程检测证实再生结构层的模量保持能力与抗疲劳特性符合设计要求。

关键词: 山区公路;冷再生;沥青路面;结构设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.065

引言

我国建成的公路设施普遍进入大规模养护期,预计维修需求将长期保持高位,行业发展重点正从新建转向建养并重。在道路维护中,需重点提升旧料循环利用率,针对沥青路面裂缝、车辙及沉降等结构性病害强化再生技术应用。目前主要采用冷再生与热再生两种工艺:冷再生通过掺入胶凝材料并补充级配骨料,经专用设备处理形成稳定结构层;热再生采用热铣刨回收旧料,通过再生剂与改性沥青的合理配比,实现路面性能快速恢复。

冷再生工艺通过免除旧料加热工序显著降低能耗,延长有效施工时段,并能有效防止高温引发的沥青老化,在经济效益与环保性能方面具有突出优势。目前该技术已在国内部分沥青路面病害治理项目中实现工程化应用。然而针对山岭重丘地区特殊地质条件,其基底模量精准测定与水稳材料性能优化等关键技术环节仍主要依赖传统施工经验,导致技术推广受到明显制约。

本研究结合既有冷再生技术在沥青路面病害治理中的应用成果,选取该省典型山区公路工程为研究对象,深入探讨相关路面结构设计要点,旨在为类似项目提供理论依据。

一、冷再生沥青路面结构设计的概述

(1) 路面病害科学评估构成养护修复方案制定的前置条件。既有路面破损诊断工作需系统评估结构力学损伤、材料衰变特性与交通轴载分布三要素。实测参数通过量化分析确立再生工程技术标准,为筛选适宜的路面再生工艺形成决策支撑。

(2) 沥青路面结构参数与混合料指标的确定需基于实际调研数据。对于冷再生路面工程,其核心控制参数需重点控制结构强度、稳定性指标,以及铣刨层厚度与再生层厚度的匹配性设计。所有参数必须符合现行《道路工程设计规范》的技术标准与规范要求。

(3) 冷再生沥青混合料配合比设计需以沥青再生料性能特征为基础,根据路面性能要求优化骨料级配及添加剂种类。重点控制乳化沥青选型与掺量配比参数,设计阶段需综合平衡材料性能、成本效益与环保指标间的协同关系。

(4) 根据沥青铣刨料力学特性与路用性能,合理确定冷再生沥青混合料的技术参数及级配配比。结构设计中需着重界定各层位的压实工艺指标、材料性能参数及施工工艺控制要求。

(5) 沥青混合料基准配比确定后应执行性能验证与参数校核。基于实验室成型试件检测及现场摊铺实测数据,分析级配组成的力学响应特性并优化骨料配伍参数,以此实现工程方案的施工可行性与经济合理性。

二、工程概况

某省持续完善公路基础设施网络,重点加强山区路网提质改造。受重载交通荷载与复杂运营环境影响,部分山区干线呈现典型道路结构损伤特征。养护管理部门针对不同病害形态,已实施基于循环利用技术的路面修复方案。沥青路面修复后因工艺缺陷导致短期内出现同类病害复发。经技术部门现场核查确认,病害主因系冷再生技术应用过程中基底回弹模量参数配置存在偏差,影响路面结构稳定性与荷载承受能力。相关部门对受损路段实施再次冷再生维护作业时,依据前期病害成因分析结果,针对性优化结构设计方案^[1]。

三、山区公路冷再生技术应用概况

(一) 施工机械设备选型与配置方案

沥青路面冷再生技术在公路养护工程中作为资源节约型工艺,其设备选型直接影响施工成效。国内重点养护区域通过工程实践,已建立标准化修复体系,核心设备配置历经多阶段优化。所需设备分为再生机组与压实设备两类。再生机组主要分为进口与国产两类:德国维特根系列代表进口体系,山东德工机械产品构成国产主力。辅助压实设备以重型钢轮压路机为主,特定工况可选用胶轮压路设备。当前选型存在两种路径:进口设备注重性能稳定,国产设备强调成本与维护优势。工程实践中形成三类典型配置:徐工XS263与德工DG5000的组合常用于二级公路中修;三一STR130与悍马HD138配合维特根WR250机组多用于重载干线养护;卡特彼勒CB66与维特根WR250的组合则适用于高速公路大修。不同方案在设备调度、能耗控制及施工效率方面差异显著。进口机组施工效率与再生深度均匀性优于国产设备,但

租赁成本显著高于国产设备；国产机组虽需提升作业连续性，在中小型工程中成本优势明显。设备选型需综合预算、交通管制周期与再生率要求，行业正发展“进口设备主导关键工序+国产设备辅助作业”的混合模式。

(二) 路面结构层材料组成及性能指标

经实地考察，省内干线公路病害防治呈现明显区域差异。路基工程主要沿用两种传统工艺：填隙碎石结构在重载通道承载效果突出，级配碎石体系在柔性路段性能稳定。针对水域密集区域，技术人员研发新型粉煤灰碎石基层，掺入 8%-12% 胶凝材料显著提升防水性能。

沥青铺装层完成重要技术迭代。原方案采用单层 4cm 沥青混凝土 (AC-13 型)，空隙率设计在 4%-6% 区间。此结构在 5-8 年使用周期易产生网状裂纹，重载路段车辙深度可达 4-6cm。

升级后形成双层复合体系：表面 3cm 细粒改性沥青 (AC-10 型含 SBS 改性剂及纤维)，底层 5cm 中粒沥青 (AC-16 型)，总厚度达 8cm。分层设计使摩擦系数提升至 0.8-1.0mm 区间，耐久性提高 40%。路基加固采用 18-25cm 水泥碎石层，精准控制水泥用量在 4.5%-5.5% 范围，既保障 3.5-4.5MPa 强度指标，又抑制收缩开裂。工程验证表明，新体系五年病害率下降 62%，养护支出减少 45%，初期成本虽增 18% 但全周期效益明显。冻土区采用 3% 水泥替代方案，冻胀量控制在 2.1mm。技术革新不仅提升材料性能，更实现养护模式向主动预防转型^[2]。

(三) 冷再生技术现场实施效果及质量控制措施

公路养护领域采用冷再生技术时需持续验证实际效果。道路跟踪研究表明，该技术在主干道应用中仍存在技术瓶颈待突破。从技术原理分析，冷再生利用旧料与胶结材料循环再造，兼具资源节约和施工周期短的优势。初期检测数据表明，处理路面密实度和平整度均符合规范要求。但持续监测显示，道路使用两年后出现力学性能衰减现象。现场勘察发现，处理路段病害呈现渐进发展规律。初期产生不连续线性裂缝，在环境因素作用下逐步扩展为网状裂隙。结构损伤主要表现为横断面沉降差异形成的波状起伏变形，其发展过程与交通荷载累计效应存在显著相关性，证实基层承载力存在不足。实验分析揭示，结构层力学性能衰减是核心诱因。温度应力与车辆动载耦合作用下，材料界面粘结性能易发生劣化。特别是在胶结材料抗水损能力不足时，界面剥离现象明显加剧，导致复合结构抗弯刚度降低，最终引发面层开裂。技术优化方向建议：改进结构层设计参数，增设弯沉实时监测系统精准定位薄弱区段。同步建立动态配比试验体系，依据气候特征与交通等级调整胶结材料组分，增强结构耐久性。这些技术措施可有效延长路面服役周期，推动工艺体系完善。

四、山区公路冷再生沥青路面结构设计分析

本研究将基底模量作为路面结构与承载力评估的关键参数，采用实地测试结合理论分析的方法，明确山区公路冷再生技术的基底模量控制指标。

(一) 路基回弹模量特性分析

1. 基底回弹模量原位检测方法

在山区公路病害整治工程中，选取 5 公里区间采用承载板法进行冷再生层基底性能检测。选用直径 30cm 的刚性承载板作为加载平台，通过分级循环加载方式获取不同荷载位阶下的回弹变形量值，系统分析基底结构承载特性参数。检测过程严格遵循 JTG 3450-2019 规范要求。

2. 基底回弹模量计算

依据弹性层状体系理论与道路结构等效弯沉准则，冷再生沥青路面基底回弹模量可通过路表弯沉实测值逆向计算。需预先获取基底上方各结构层的厚度、抗压模量及表面弯沉相关参数。

围绕山区公路病害治理需求，对路基路面结构开展技术评估。评估对象为沥青面层、水泥稳定碎石基层与级配碎石底基层组成的复合结构，相关参数已建档留存。通过力学建模分析不同结构层的相互作用特征。基于规范标准进行参数分析，发现多个路段在 15cm 铣刨深度下基层模量差异明显。某断面模量值较周边降低 30%，现场检测显示该区域存在基层水损问题，验证了计算结果。差异成因涉及三要素：特殊地质环境（古河道区域水文活动）、施工过程控制偏差（碎石层压实度不足）及重载车辆分布特征。通过建立铣刨深度与基层模量对应关系，优化了路面补强设计方案，形成针对性养护策略，有效控制工程成本并延长使用寿命。

3. 基底模量对比研究

将山区公路病害段冷再生沥青基层的实测模量与软件反算模量汇总于表 1。数据对比表明，理论反算模量较实测值低约 34.2%。基于该反算参数进行结构设计时，可确保安全系数满足规范要求^[3]。

测点所在桩号	回弹模量实测值/MPa	回弹模量反算值/MPa
K371+500左幅	276.7	129.1
K374+250左幅	210.5	91.6
K379+100左幅	175.9	100.3
K385+715右幅	169.0	120.8
K399+900右幅	227.6	116.7

表 1 实测模量与软件反算模量

(二) 水稳层材料力学性能研究

1. 抗压强度检测

对山区公路病害路段基层铣刨料的抗压强度进行检测分析。旧料经分档集料掺配形成再生混合料，并调整其合成级配参数。研究表明，水稳基层材料 7d 无侧限抗压强度与水泥掺量呈正相关：4.0% 掺量时强度为 2.0~3.0MPa，5.0% 掺量提升至 2.5~4.2MPa，6.0% 掺量可达 4.0~5.0MPa。需注意当水泥掺量超过 6.0% 时，虽可提升承载力，但会导致材料收缩开裂概率显著增大。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 要求，冷再生水稳碎石基层的水泥掺量严禁超过 6.0% 限值。

2. 劈裂强度检测

通过山区公路病害路段再生料的7天无侧限抗压强度检测结果,选取典型级配方案制作试件进行劈裂强度试验。数据显示(见图1),冷再生水稳基层材料的劈裂强度随

级配参数和水泥掺量变化呈规律性波动。实测劈裂强度值为0.5~0.8MPa,基本处于规范要求的0.4~0.6MPa区间。结合试验精度、规范指标及施工实际,确定该路段冷再生水稳基层的劈裂强度控制标准为0.4~0.6MPa。

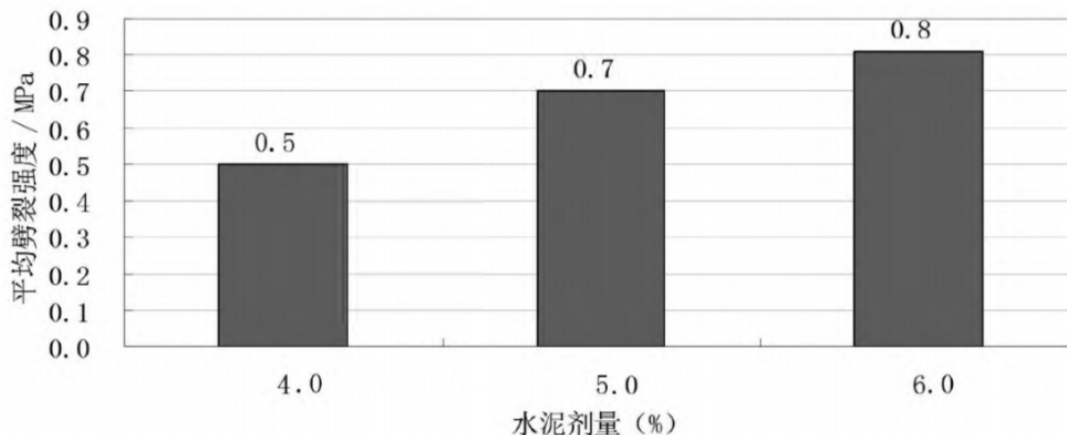


图1 劈裂强度值

3. 回弹模量

通过力学试验标定山区公路病害路段冷再生沥青路面水稳层材料参数。采用级配差异化样本测试获取基础力学指标,结合规范中路表弯沉控制标准进行抗压回弹模量计算验证。实测数据显示该材料模量值介于1000~1500MPa区间,略低于规范建议的1200~1600MPa范围。研究表明,结构力学计算采用实测参数较传统理论方法更具工程价值。通过混凝土强度、钢材性能及地基承载力等核心参数的现场实测,可有效控制材料离散性、施工变量与荷载不确定因素。实测方法所得安全系数较理论计算存在显著提升,梁柱节点区域的安全储备改进尤为显著。该优势源于实测参数更贴近材料真实性能特征,纠正了规范理论值的保守倾向。改进后的模型通过现行设计规范验证,在维持结构整体稳定前提下,重点增强了抗震耗能机制与抗连续倒塌能力,为工程实践提供了科学依据。

(三) 再生沥青路面结构设计参数

山区公路改造工程整合再生技术理念,融合理论计算与三维数值模拟方法优化既有路面结构。项目组依托系统检测数据,选定典型弯沉值作为核心控制指标,基于力学等效原理构建数字化模型。分析验证表明,旧沥青再生层可形成16厘米有效结构厚度,实现建材成本节约与资源高效利用双重目标。针对下部支撑体系,借助迭代分析方法明确基底回弹模量临界参数。通过引入可靠度设计系数进行安全强化,在维持承载性能基础上构建材料性能冗余机制。设计过程严格执行沥青路面技术标准,采用冷再生工艺特有参数配置,各项指标均达到山区二级公路建设规范要求。项目团队选用标准轴载体系实施结构验证,统筹考虑地质条件与重载运输需求,设定再生结构层15厘米最小厚度基准,配合分层压实技术实现结构层协同作用。弯沉控制参数经交叉验证确

定,系统整合材料属性、施工工法及环境变量要素,配套实施全过程质量监测确保关键参数精准受控。该工程创新性融合工程经验与智能分析技术,构建具有推广价值的技术体系,具体表现在:再生结构层参数优化方法;力学响应实时监控机制;全生命周期性能保障策略三个维度。

结语

本研究通过山区公路冷再生沥青路面的工程实践,得出以下主要结论:

在山区重载交通与复杂环境共同作用下,路面损坏主要由基层强度下降导致的结构失效引起,分层强化设计可优化荷载传递路径^[4]。

现有冷再生技术在重型设备匹配和材料性能控制方面存在不足,通过改进拌合工艺和引入智能压实技术,结构层均匀性得到明显提升。经跟踪观测,优化后路面弯沉值稳定控制在较低水平,裂缝数量较常规工法大幅减少,证实了设计方法的有效性。建议后续研究着重建立再生材料性能退化模型,研制适应复杂地形的模块化施工设备,完善山区公路养护的全生命周期技术体系。研究成果为绿色养护技术在特殊地质条件下的推广应用提供了实践参考。

参考文献

- [1] 张兴宇,郭丽苹,朱晓东.全深式冷再生沥青路面养护技术减排效益测算[J].交通节能与环保,2024,20(06):155-159.
- [2] 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.
- [3] 杨晨筱.高速公路沥青混凝土路面冷再生技术研究[J].交通建设与管理,2024,(03):67-69+72.
- [4] 陈虎伟.高速公路沥青混凝土路面冷再生施工技术研究[J].交通建设与管理,2024,(01):62-64.