

水稳基层冷再生道路养护关键技术应用分析

李宁

新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]水稳基层冷再生技术作为一种绿色环保、经济高效的道路养护方式,近年来在我国公路工程领域得到广泛推广应用。该技术以就地冷再生方式对旧水泥混凝土路面进行利用,通过添加适量的新骨料、水泥和外加剂等,现场冷拌、冷铺、碾压而成的一种新型再生基层。本篇文章从再生混合料配合比设计、施工工艺要点及其质量控制、推广应用建议等方面,对水稳基层冷再生技术在道路养护工程中的应用进行系统分析。结合实际工程案例,对该技术的技术、经济、社会、环境等效益进行了综合评价。研究表明,在材料级配优化、水泥掺量合理、含水量控制得当、施工机械匹配的前提下,水稳基层冷再生技术可显著改善路面的力学性能和使用性能,延长使用寿命5~8年以上,节约养护成本30%以上,具有良好的推广应用前景。**[关键词]**公路工程;水泥稳定碎石;冷再生技术;施工工艺;应用效益

DOI: 10.33142/ucp.v1i6.15182

中图分类号: U417.67

文献标识码: A

Application Analysis of Key Technologies for Water Stable Base Cold Recycling Road Maintenance

LI Ning

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Water stabilized base cold regeneration technology, as a green, environmentally friendly, and economically efficient road maintenance method, has been widely promoted and applied in the field of highway engineering in China in recent years. This technology utilizes the old cement concrete pavement through on-site cold recycling, by adding appropriate amounts of new aggregates, cement, and additives, and forming a new type of recycled base layer through on-site cold mixing, cold paving, and rolling. This article systematically analyzes the application of water stable base cold recycling technology in road maintenance engineering from the aspects of mix design of recycled mixtures, key points of construction technology and quality control, and recommendations for promotion and application. Based on actual engineering cases, a comprehensive evaluation was conducted on the technical, economic, social, environmental, and other benefits of this technology. Research has shown that under the premise of optimizing material grading, reasonable cement dosage, appropriate water content control, and matching construction machinery, the water stable base cold recycling technology can significantly improve the mechanical and service performance of the pavement, extend the service life by more than 5~8 years, save maintenance costs by more than 30%, and have good prospects for promotion and application.

Keywords: highway engineering; cement stabilized crushed stone; cold regeneration technology; construction technology; application benefits

引言

我国已建成的高速公路通车里程已超过15万公里,普通国省干线公路超过40万公里。随着通车时间的增加和交通荷载的增长,大量路面出现了不同程度的病害,亟需采取有效养护措施,延续其使用寿命。传统的公路养护技术如铣刨重铺、就地热再生等,存在能耗高、污染大、成本高等问题,难以适应可持续发展的新形势新要求。水泥稳定碎石冷再生作为一种新型环保节能型养护技术,通过专用再生设备将旧路铣刨料与新集料、水泥、水等拌和均匀,再现场摊铺、碾压,形成再生基层。与传统养护方式相比,该技术具有就地利用旧料、施工速度快、能耗低、环境影响小等优点,符合节能减排、绿色养护的发展方向,在我国多个省市的公路养护工程中得到推广应用,取得了良好的技术经济效益。

1 再生混合料的配合比设计

1.1 铣刨料及新加材料的性能检测

旧路材料是水稳冷再生混合料的主要组成部分,其性能直接影响再生路面质量。本工程于拟养护路段选取具有代表性的路面进行试铣刨取样,按照JTG E42-2005公路工程集料试验规程的要求,对铣刨料进行颗粒级配、含水率、压碎值等理化性能指标的试验^[1]。试验结果表明,铣刨料的压碎值为19.2%,洛杉矶磨耗损失为22.3%,针片状颗粒含量为8.6%,细度模数为3.62,含水率为3.1%,各项指标均符合水泥稳定碎石基层用料标准。

选用的新集料为石灰岩碎石,其主要技术性能见表1。由表可知,新集料的压碎值、磨耗值、针片状颗粒含量等指标均优于铣刨料,可有效改善再生混合料的级配组成和力学性能。

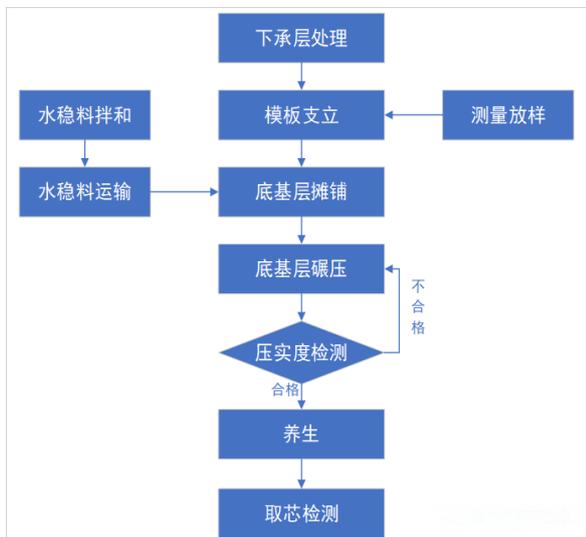


图 1 底基层施工工艺流程图

表 1 新集料技术性能指标

项目	压碎值 (%)	洛杉矶磨耗损失 (%)	表观密度 (g/cm ³)	针片状颗粒含量 (%)	细度模数
技术指标	13.4	17.5	2.71	4.2	3.15
规范要求	≤26	≤28	≥2.50	≤15	2.3-3.1

水泥采用强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥，其物理力学性能见表 2。水泥的各项指标均满足 JTG/T F30—2014 公路水泥混凝土路面施工技术细则的规定。拌合用水采用当地自来水，水质符合 JTG E30—2005 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程的要求。

表 2 水泥物理力学性能指标

项目	比表面积 (m ² /kg)	初凝时间 (min)	终凝时间 (h)	3d 抗折强度 (MPa)	3d 抗压强度 (MPa)	28d 抗压强度 (MPa)
技术指标	365	192	3.7	5.8	29.6	52.4
规范要求	≥300	≥45	≤10	≥4.0	≥17.0	≥42.5

1.2 再生混合料的级配设计与性能验证

再生混合料的级配是影响冷再生路面质量的关键因素之一。为优化级配组成，分别按铣刨料与新集料 5:5、6:4、7:3、8:2 四种不同比例组合，进行级配测定和力学性能测试。

随着新集料掺量的增加，再生混合料的级配曲线逐渐右移，集料粒径趋于粗化，但均落在规范范围内。当铣刨料与新集料比例为 7:3 时，再生混合料的级配最为合理，近似居中^[2]。

在最佳级配组成下，进一步优化水泥掺量。按水泥添加量 3%、4%、5%、6% 配制一组再生混合料，成型无侧限抗压强度试件和劈裂试件，经 7d 标准养生后进行强度测试。随着水泥掺量的提高，再生混合料的无侧限抗压强度和劈裂强度均呈增长趋势，但强度增长幅度逐渐减小。当

水泥掺量为 5% 时，7d 无侧限抗压强度可达 5.1MPa，劈裂强度达 0.72MPa，均满足水泥稳定碎石基层的强度要求。继续增大水泥掺量，强度提高不明显，但成本增加较多。

1.3 确定最佳施工配合比

在上述混合料配比试验的基础上，结合工程实际情况，确定了水稳冷再生混合料的最佳施工配合比：水泥掺量 5%，铣刨料与新集料比例 7:3，拌合含水率 6.5%（最佳含水率），最大干密度 2.31g/cm³，设计厚度 20cm。

为进一步验证该配合比的可行性，按最佳配合比拌和再生混合料，用平碾法成型轮碾试件，经 7d 养生后测定无侧限抗压强度、弹性模量等力学性能指标。同时，用自行车法测定再生混合料的拌和物离析系数。经多组平行试验，再生混合料的 7d 无侧限抗压强度平均值为 4.7MPa，弹性模量平均值为 1465MPa，拌和物离析系数为 6.8%。可见，按最佳配合比施工的再生基层，其强度和稳定性能良好，拌和均匀性高，能够满足实际工程的需求^[3]。

2 现场冷再生施工工艺

2.1 冷再生施工机械设备配置

冷再生施工对专用机械设备有较高要求，需根据工程规模、路面状况、环境条件等因素合理选型配置。本工程采用的主要施工设备包括：铣刨机 1 台（维特根 W2000 型）、混合料搅拌机 2 台（DMS800 型）、摊铺机 2 台（vogele super 1803-3i 型）、压路机 4 台（徐工 XP261、XP301 型）、洒水车 2 台、运料车若干。所选设备工作性能稳定可靠，能够适应不同施工工况。

2.2 施工材料用量计算

材料用量直接影响冷再生成本和路用性能，需进行准确计算。根据配合比设计，确定水泥、铣刨料、新集料、水的用量分别为 40kg/m²、420kg/m²、180kg/m²、39kg/m²。施工中还应考虑一定的损耗系数，通常取 1.05~1.1。如每 100m 需新集料 18.9t，水泥 4.2t。

2.3 施工工艺流程

基层铣刨，采用铣刨机对旧水稳基层进行铣刨，刨深控制在再生设计厚度以内。铣刨宽度与摊铺机工作宽度相匹配，铣刨速度 30~50m/min；运输集料，将新集料和水泥由运料车运至摊铺现场，在铣刨层表面均匀摊铺^[4]。新材料用量可采用皮带秤现场计量，控制在±2%以内；混合料拌制，采用混合料再生机将铣刨料、新集料、水泥、水按配合比充分混拌均匀，拌和时间 60~90s，直至混合料颜色一致、没有团聚；混合料摊铺，采用摊铺机将拌和均匀的混合料摊铺整平，摊铺速度 2~4m/min，保证摊铺厚度和横坡满足设计要求；混合料碾压，采用双钢轮振动压路机对摊铺混合料进行碾压成型，初压 1~2 遍，复压 2~4 遍。压实遍数和速度随现场密度检测结果调整；混合料养生，碾压结束后及时对再生层洒水湿润，并覆盖塑料薄膜进行封闭养生，一般不少于 7d。经检测合格后方可开放

交通。

2.4 施工质量控制要点

严格控制各材料用量,含水率应控制在最佳含水率的 $\pm 1\%$ 以内;铣刨层厚度偏差不大于1.5cm,拌和时间偏差不大于5s;摊铺层厚度每500m²测5点,允许偏差为 ± 0.5 cm;压实度每500m²测5点,应大于98%;平整度用3m直尺检测,高点低点高差小于5mm。通过对上述施工工艺参数和质量指标的有效控制,确保了水稳基层冷再生的施工质量,减少了返工和修补,为再生路面的长期使用奠定了基础^[5]。

3 水稳基层冷再生技术的推广应用建议

3.1 加强再生材料性能研究

再生混合料的路用性能是决定再生路面使用寿命和品质的关键因素。因此,亟需加强对再生混合料强度、刚度、抗疲劳、抗冻融、抗老化等方面的系统研究。重点应关注不同再生材料、配合比、养生条件下再生混合料性能的演变规律。

例如,通过室内试验研究不同再生料掺量、水泥剂量、养生温度等因素对再生混合料强度和刚度的影响规律,筛选出性能最优的材料配比参数。同时,开展再生混合料疲劳寿命、冻融循环、湿热老化等长期性能试验,探明在各种环境条件下再生混合料性能的演变趋势,预判路面的使用寿命。

此外,有必要充分利用加速载荷试验、野外环道试验等手段,开展再生路面结构的长期性能监测。通过对比分析不同路面结构、材料配比的动态响应特性,揭示影响再生路面长期性能的关键控制因素,形成可资借鉴的实证数据,为再生路面的结构设计、材料优选、寿命预估提供更加可靠的技术参数。

3.2 优化冷再生施工装备

为突破装备瓶颈制约,亟需加大科研投入力度,研制开发一批与水稳冷再生工艺相匹配的智能化、集成化施工装备。例如,可借鉴国外先进经验,开发集铣刨、筛分、计量、拌和于一体的多功能冷再生机,实现铣刨料的分级利用和精确计量;研制专用摊铺机,提高摊铺层的厚度控制精度和表面平整度;设计与压路机振动频率、振幅匹配的智能压实系统,实现压实过程的实时监控与动态反馈。与此同时,还应加快推进冷再生装备的智能化升级改造,如增设自动跟踪、无人驾驶、远程监控等模块,最大限度地减少人工操作和随意性,确保施工过程的标准化和可控性。只有通过成套装备的研发应用和数字化升级,构建与冷再生工艺要求相适应的施工装备体系,才能从根本上提升冷再生施工的工业化、精细化水平。

3.3 完善冷再生技术标准

应在系统总结既有工程实践经验的基础上,充分吸收

国内外冷再生领域的最新研究成果,进一步修编完善水稳冷再生技术标准。重点是细化量化再生材料的组成要求、性能指标,完善混合料配合比的设计方法、试验评价规程;创新冷再生路面结构的设计理念、方法和参数,提供典型设计实例;规范冷再生施工工艺流程、质量控制要点、验收评定标准,提高标准的可操作性。与此同时,还应加强部颁标准与地方标准、行业标准的衔接配套,建立分工明确、相互补充的标准体系,为水稳冷再生技术的规范化应用提供全过程的技术支撑。

3.4 加大冷再生技术推广力度

广泛开展冷再生技术培训,有针对性地为业主、设计、施工、监理等从业人员“量身定制”内容丰富、形式多样的培训课程,系统讲解水稳冷再生的基本原理、配合比设计、施工工艺、质量控制等关键技术,提高其专业技能水平和质量意识。定期组织现场观摩与经验交流活动,通过参观冷再生施工现场、考察养护绩效显著的典型路段,使参与各方直观感受冷再生技术的先进性和实用性,加深对其综合效益的认识,消除各种疑虑和担忧。整合国内外产学研资源,围绕冷再生基础理论、工艺技术、装备研发等前沿问题开展联合攻关,加快科技成果的转化应用,为水稳冷再生技术注入创新动力。发挥政府主管部门的引导作用,将水稳冷再生纳入绿色低碳循环发展的技术政策体系,制定差别化的养护项目招投标导向机制,在技术适用条件下优先选用冷再生技术。

4 工程案例

S省国道公路某路段自通车运营以来,交通量持续增长,原有水泥路面病害不断加剧,路况指数下降至70以下,运营安全面临挑战。为尽快恢复路况,延长使用寿命,S省公路局决定采用水稳基层冷再生技术对该路段实施养护工程,路段全长86.5km。

通过现场铣刨取样分析,原水稳基层厚度为18~24cm,强度为15~25MPa,局部路段出现网裂、板角破碎等病害,具备冷再生条件。经反复试验确定了最佳再生配合比:水泥掺量5%,新骨料掺量30%,拌合含水率6.8%,再生厚度20cm,7d无侧限抗压强度5.4MPa。

施工中采用德国维特根KMA220型移动式冷再生设备,配备两台摊铺机和三台压路机,日铺筑里程2.5km。为确保施工质量,项目部制定了严格的质量控制措施:水泥、新骨料、水的用量偏差分别控制在1%、2%、0.5%以内;摊铺层厚度每2000m²弯沉检测一次,弯沉值 ≤ 25 (.01mm);压实度每1000m²检测一次,压实度 $\geq 98\%$;平整度每500m抽检一次,3m直尺下允许高差 ≤ 5 mm。

经过3个月紧张施工,全线再生路面顺利完工。根据后期跟踪检测,再生路面在运营一年后各项性能指标仍保持良好,平整度、抗滑性和行车舒适性明显改善。养护前后的综合效益对比见表3。

表3 养护前后综合效益对比

项目	指标	养护前	养护后	效益提升
路况指数	PQI	65	92	路面性能大幅改善
综合路用成本	元/(m ² ·年)	35.5	27.6	养护成本节约 22%
施工工期	月	—	3	工期缩短 70%
材料利用率	% (铣刨料)	0	88	废料利用效益显著
环境影响	CO ₂ 排放 (kg/t)	83.5	32.7	温室气体减排 61%

可以看出,水稳基层冷再生技术在该工程的应用中,取得了显著的技术、经济、社会和环境效益。一方面,再生路面的路况指数较养护前提高了 27,综合路用成本降低了 22%,使用寿命可延长 6~8 年;另一方面,施工工期较常规养护工艺缩短 70%,旧料再利用率达 88%,施工过程的碳排放量降低 61%,环境效益十分明显。该工程的成功实践,为水稳基层冷再生技术在高等级公路养护领域的进一步推广应用提供了有益借鉴。

5 结语

当前,我国正处于由公路建设大国向公路养护大国转变的关键时期,路网规模不断扩大的同时,既有道路的养护压力也在持续加大。水稳基层冷再生作为一种绿色、环

保、高效的新型路面就地再生养护技术,较好地平衡了公路的使用功能、经济效益与资源环境影响。大量研究与实践表明,在混合料配合比优化、施工工艺控制、专用装备配套等方面,冷再生技术已日趋成熟,具备广泛推广应用的技术基础。

【参考文献】

- [1]李秀海.冷再生技术在公路水泥稳定碎石基层修复施工中的应用与影响[J].运输经理世界,2024(7):137-139.
 - [2]李秀丽.水稳基层冷再生技术在农村公路中的应用分析[J].北方交通,2023(10):55-58.
 - [3]李金娟.水泥稳定碎石冷再生技术在公路路面改造中的研究[J].四川建材,2020,46(9):157-158.
 - [4]张鹏.水泥稳定碎石冷再生基层施工质量控制探析[J].中国新技术新产品,2020(5):108-109.
 - [5]刘伟华.水泥稳定碎石冷再生技术在公路路面改造中的应用[J].交通世界,2018(29):82-83.
- 作者简介:李宁,性别:男,毕业院校:西安交大,土木工程专业,当前就职单位:新疆北新路桥集团股份有限公司,职务:项目负责人,职称级别:工程师。