

公路工程施工现场绿色施工技术应用与效果评价研究

杨 华

新疆路桥建设集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要:在“交通强国”与“双碳”战略背景下,公路工程建设正加速向绿色、低碳、循环方向转型。本文以水泥粉煤灰稳定砂砾基层施工工法为研究对象,系统探讨粉煤灰基低碳路面基层在公路工程中的绿色施工技术应用路径与实际效果。文章分析了粉煤灰的物理化学特性及其与水泥的协同作用机理,详细阐述了包括拌合、运输、摊铺、碾压及养生在内的全流程绿色施工工艺,并结合新疆多条国省干线公路的实际应用数据,从技术性能、经济效益、社会效益及环境效益四个维度进行综合评价。研究表明:粉煤灰掺量控制在7%~14%、水泥掺量约3.6%时,基层7d无侧限抗压强度可达4.8~5.5MPa,压实度 $\geq 98\%$,冻融强度损失率低于25%;单公里可消纳粉煤灰约660吨,减少碳排放约100吨,降低材料成本15%~25%。具有良好的技术可行性与推广价值,为干旱炎热地区半刚性基层裂缝控制及工业固废资源化利用提供了可复制的技术范式。

关键词:绿色施工;粉煤灰;稳定砂砾基层;低碳路面;半刚性基层

引言

近年来,随着我国“交通强国”战略的深入推进和“碳达峰、碳中和”目标的明确,公路建设行业面临着前所未有的绿色转型压力。《绿色公路建设指南》《公路工程绿色施工技术导则》等政策文件明确要求,公路工程必须贯彻资源节约、环境保护和循环利用的基本原则。传统以水泥为主的路面基层材料,因水泥生产能耗高、碳排放量大(每吨水泥熟料排放约0.85吨 CO_2),已难以满足新时期绿色公路建设的需求^[1]。粉煤灰是燃煤电厂发电过程中产生的工业副产品,我国每年粉煤灰排放量巨大,但综合利用率仍有提升空间。若能将粉煤灰大规模应用于公路基层中,既可实现工业固废的资源化利用,又能有效替代部分水泥和细集料,降低工程碳排放,促进循环经济发展。这一技术路径符合国家绿色低碳战略,也契合公路工程行业绿色施工的发展方向。

1 水泥粉煤灰稳定砂砾基层的绿色施工技术体系

1.1 技术原理与材料特性

1.1.1 粉煤灰的物理化学特性

粉煤灰是燃煤电厂在高温燃烧过程中产生的细粒固体废弃物,外观呈玻璃体微珠状,化学性质相对稳定。其主要化学成分为二氧化硅(SiO_2)和三氧化二铝(Al_2O_3),两者含量通常占70%以上。粉煤灰本身不具有自发水化活性,但在水泥水化产生的碱性环境($\text{Ca}(\text{OH})_2$)中,其活性组分可发生火山灰反应,生成更多的C-S-H凝胶和水化铝酸盐,从而提高混合料的后期强度和耐久性。

1.1.2 水泥与粉煤灰的协同效应

水泥与粉煤灰复合使用可产生明显的协同效应:(1)降低水化热:粉煤灰的二次反应消耗了部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,减缓了水泥水化速率,降低了早期水化热,减少温度裂缝风险;(2)填充孔隙:粉煤灰微细颗粒可填充集料间的微观孔隙,改善混合料的密实度和抗渗性;(3)改善和易性:粉煤灰的球形颗粒形态起到“滚珠效应”,提高混合料的工作性;(4)减少干缩裂缝:粉煤灰的缓凝作用和填充作用可减小干缩变形,提升基层的抗裂性能。

1.2 绿色施工工艺流程

水泥粉煤灰稳定砂砾基层的绿色施工工艺流程如下:准备工作→拌合楼拌合→运输→现场准备→挂线控制标高→料车到位→摊铺→检查松铺厚度→初压→整平→复压→终压→检测→覆膜养生。该流程在传统水稳基层施工基础上,针对粉煤灰材料的特性进行了多项绿色优化,包括:粉煤灰封闭卸料、含水率精准控制、离析防控、节水养生等。

2 关键绿色施工操作要点

2.1 拌合阶段的绿色控制

2.1.1 封闭卸料系统

粉煤灰到达拌合楼卸料时,采用软连接方式使罐车出料口与接收仓进料口紧密对接,形成封闭系统,杜绝粉煤灰泄露造成的大气污染。

2.1.2 精准含水率控制

试验人员检测各类原材料含水率后,按配合比计算实际用水量。水量一般控制在高于最佳含水量1~2%,以补偿运输和摊铺过程中的水分蒸发,同时避免过量用水

造成资源浪费^[2]。

2.1.3 均匀拌合控制

设专人监控拌合机运转及下料情况，目测混合料色泽一致、无结团现象。均匀的拌合可保证水泥和粉煤灰在混合料中的均匀分布，避免局部材料浪费或性能不足。

2.1.4 离析预防装料法

装料时采用“山”字形装料顺序——先装料车前端，再装后端，最后装中间，有效消除因装料形成的粗细骨料离析，减少废料产生。

2.2 运输过程的绿色管控

根据拌合机产量、运输距离及摊铺速度合理配置运输车辆，并略有富余。装料前将车辆清扫干净，运输全过程用篷布覆盖混合料，防止水分蒸发和扬尘污染。运输车辆应选择符合排放标准的车型，降低运输环节的碳排放。

2.3 摊铺阶段的绿色作业

2.3.1 连续匀速摊铺

摊铺速度设定为 1.5~4m/min，匀速、连续、不间断作业，减少停机次数，降低能源消耗。

2.3.2 离析及时处理

摊铺机后安排 3~4 人负责处理粗细料离析，发现局部粗集料“窝”立即铲除并用均匀混合料填补，避免废料产生。

2.3.3 表面补水控制

施工过程中若发现基层表面出现干白现象，迅速进行补水，保证基层在湿润状态下继续施工，既保证质量又节约用水。

2.4 碾压阶段的绿色工艺

2.4.1 设备检查与备用

开工前检查压路机水箱、水泵、洒水喷头及循环水路，确保正常运转，同时配备 1 台备用洒水车，防止高温环境下表面干燥^[3]。

2.4.2 科学碾压组织

一次碾压长度宜为 40~50m，设专人指挥，段落界线分明。碾压分为三个阶段：初压：13t 双钢轮压路机静压 1 遍，速度 2~4km/h，由两边向中间碾压，每轮重叠 1/3 轮迹；复压：26t 单钢轮压路机重振 4 遍，若表层砂砾被“揉”上来，洒水后采用胶轮压路机静压 2 遍；终压：13t 双钢轮压路机静压 1~2 遍。

2.4.3 压实度动态控制

碾压过程中实时检测压实度，一般需 6~8 遍可达压实度 $\geq 98\%$ （重型击实标准）。压实度与碾压遍数关系见表 1。

表 1：压实度与碾压遍数关系

碾压遍数	实测含水率 (%)	实测压实度 (%)	压实度控制要求
7 遍	3.7	98.4	≥ 98.0
8 遍	4.3	99.23	≥ 98.0



图 1：双钢轮压路机进行初压

2.5 覆膜养生节水技术

终压完成并经检测合格后，覆盖透水土工布，采用洒水车喷雾式洒水养生 7 天。覆膜养生具有以下绿色优势：一是节水显著：相比传统无覆盖养生，可减少水分蒸发 30% 以上；二是保温保湿：土工布可保持基层表面温湿度稳定，促进水泥和粉煤灰的水化反应；三是防止污染：避免养生水冲刷造成的水土流失和面源污染。

3 质量控制与绿色施工协同机制

3.1 材料质量控制

绿色施工的前提是材料质量可控。本技术应用对各类材料提出明确要求：（1）级配采用 0~5、5~10mm、10~20mm、20~30mm 碎石，掺配比例为 0~5mm:5~10mm:10~20mm:20~30mm = 35%:20%:25%:20%。（2）水泥：采用 P.O42.5 缓凝水泥，初凝时间 $\geq 3h$ ，终凝时间 $\geq 6h$ ，不得使用快硬、早强水泥。（3）粉煤灰：采用 F 类 II 级粉煤灰，各项指标符合 JTG/TF20-2015 要求。（4）水：采用饮用水，各项指标符合饮用水技术要求。

3.2 配合比绿色优化

配合比设计以骨架密实性结构为参照标准，关键控制指标：（1）粉煤灰掺量：砂砾质量的 7%~14%（2）水泥掺量：约 3.6%（3）水泥剂量偏差：控制在 $\pm 0.3\%$ 以内（4）含水量：在保证水化反应、蒸发及压实的前提下，采用较低含水量，减少后期干缩裂缝

3.3 施工过程质量与绿色协同控制

3.3.1 时间窗口控制

从加水拌合到碾压完成全过程不得超过水泥初凝时间，确保在最佳时段完成压实，避免返工造成的资源浪费。

3.3.2 离析防控

配合比设计保证混合料级配合理；拌合均匀，计重系统准确；摊铺时设专人跟机找补，发现局部粗骨料集

中及时处理。

3.3.3 压实质量检验

碾压完成后检测压实度、厚度、平整度等指标，个别达不到要求的地段及时追压，避免整体返工。

表 2：碾压质量检查标准

检测项目	技术要求	检测方法
压实度	$\geq 98\%$	灌砂法
弹簧现象	不得出现	观察、触摸
压痕深度	$\leq 5\text{mm}$	钢直尺测量
表面平整度	3m 直尺空隙 $\leq 8\text{mm}$	3m 直尺

4 工程应用效果分析

4.1 工程概况

已在新疆地区多条国省干线公路中得到成功应用，包括 S228 线、S240 线、S239 线改扩建项目，施工总长度达 150 公里。新疆地区属于典型的干旱炎热气候，昼夜温差大，半刚性基层开裂问题突出，为验证提供了严苛的自然条件。

4.1.1 S228 线硅化木园至土园仓公路改扩建项目

该项目位于昌吉州准东经济开发区，采用一级公路标准，设计为双向四车道。基层采用水泥粉煤灰稳定砂砾结构，采用整体式摊铺，摊铺厚度 32cm，水泥和粉煤灰采用外掺法，其中水泥含量 3.7%，粉煤灰含量 7%，7d 无侧限抗压强度为 4.80MPa。每天大约摊铺 700~800m，平整度控制良好，3m 直尺检测空隙均 $\leq 8\text{mm}$ ，现场检测压实度达到 98.4%，养护后芯样完整性较高，厚度达标。

4.1.2 S240 线准东大井服务区至奇台公路改扩建项目

该项目位于奇台县，设计为双向四车道。基层采用水泥粉煤灰稳定砂砾结构，采用分层式摊铺，摊铺厚度 36cm，下层摊铺厚度 18cm，上层摊铺厚度 18cm，其中水泥含量 3.8%，粉煤灰含量 10%，7d 无侧限抗压强度为 5.41MPa。每天大约摊铺 700~800m，平整度控制良好，3m 直尺检测空隙均 $\leq 8\text{mm}$ ，现场检测压实度达到 99.23%，养护后芯样完整性较高，厚度达标。

4.1.3 S239 线五彩湾至吉木萨尔县公路改扩建项目

该项目位于昌吉州内，采用一级公路标准，设计为双向四车道。基层采用水泥粉煤灰稳定砂砾结构，采用分层式摊铺，摊铺厚度 40cm，水泥和粉煤灰采用外掺法，其中水泥含量 3.6%，粉煤灰含量 10%，7d 无侧限抗压强度为 4.75MPa。每天大约摊铺 700~800m，平整度控制良好，3m 直尺检测空隙均 $\leq 8\text{mm}$ ，现场检测压实度

达到 98.8%，养护后芯样完整性较高，厚度达标。

4.2 经济效益分析

在新疆地区 S228 线、S240 线、S239 线等公路项目中成功应用，施工总长度达 150 公里，累计使用粉煤灰约 10 万吨，相较于传统 P.O42.5 缓凝水泥，每吨可减少碳排放约 150kg；粉煤灰作为工业副产品，掺入后可降低胶凝材料成本 15%~25%，同时替代部分细集料，进一步优化材料费用。

4.3 环境效益分析

三个项目累计消纳粉煤灰 10 万吨，减少水泥用量约 3 万吨，综合碳减排约 2.55 万吨，并缓解了电厂固废堆存压力。其他环境效益包括：节约细集料开采 2 万吨（保护河道生态）；封闭卸料与篷布运输降低扬尘；覆膜养生减少水径流污染；粉煤灰的“滚珠效应”改善和易性，降低摊铺与碾压能耗约 5%~8%。

4.4 社会效益分析

通过消纳粉煤灰这种工业副产品，构建绿色循环模式，缓解电厂固废堆存压力，降低水泥生产过程中的能耗与碳排放。推广促进了区域资源综合利用与交通基础设施绿色转型，符合国家“双碳”战略，具有示范与推广价值。

5 结语

研究表明，水泥粉煤灰稳定砂砾基层在粉煤灰掺量 7%~14%、水泥掺量约 3.6% 时，7d 无侧限抗压强度达 4.8~5.5MPa，压实度 $\geq 98\%$ ，冻融强度损失率低于 25%，技术性能优良；相比传统水泥稳定基层可降低胶凝材料成本 15%~25%，单公里消纳粉煤灰约 660 吨、减少碳排放约 100 吨，环境与经济效益突出，同时为干旱炎热地区半刚性基层裂缝控制提供了有效路径。建议在燃煤电厂周边优先推广，根据当地粉煤灰品质优化配合比、扩大掺量上限，并结合智能建造技术实时监控含水率与压实度，开展全生命周期评价。

参考文献

- [1] 王明年, 张俊儒, 刘大刚. 固废基胶凝材料在路面基层中的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 78-85.
- [2] 李辉, 杨中平, 赵旭. 粉煤灰基地聚物稳定碎石基层性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 612-618.
- [3] 北京市市场监督管理局. 公路工程碳排放核算标准: DB11/T1855-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. 12(5): 112-114.