

赤泥基复合胶凝材料在道路基层中的应用及环境安全性评价

白艳红

中铝山西新材料有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i2.3074

[摘要] 为破解赤泥堆存造成的环境压力,实现工业固废资源化高效利用,本文提出一种以赤泥为主要原料,协同矿粉、粉煤灰、脱硫石膏及矿物碱激发剂制备免烧型复合胶凝材料的技术方案。通过室内试验研究材料配合比、养护制度对路用力学性能的影响,结合微观机理分析揭示水化反应机制,采用浸出毒性检测、长期环境监测等方法开展环境安全性评价,并依托工程示范验证材料实用性。结果表明,当赤泥掺量15%~20%、矿粉40%~45%、粉煤灰20%~25%、脱硫石膏15%~20%、激发剂(电石渣)掺量1.0%~1.5%时,材料7d无侧限抗压强度 ≥ 3.5 MPa,28d强度 ≥ 4.5 MPa,满足道路基层设计要求;盐冻耦合环境下10次循环后强度损失率仅3.95%,重金属浸出浓度均低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007)限值。该材料在清镇市工业园区道路基层应用中,单段工程消纳赤泥1828吨,钻芯强度与弯沉值均优于设计标准,实现了固废减排与工程效益的协同,为赤泥规模化路用提供技术支撑。

[关键词] 赤泥; 复合胶凝材料; 道路基层; 力学性能; 环境安全性

中图分类号: J314.7 文献标识码: A

Application of Red Mud-Based Composite Cementitious Materials in Road Base Layers and Environmental Safety Assessment

Yanhong Bai

Chinalco shanxi new materials co.,LTD

[Abstract] To address the environmental pressure caused by red mud storage and achieve efficient resource utilization of industrial solid waste, this paper proposes a technical solution for producing non-fired composite cementitious materials using red mud as the primary raw material, in conjunction with mineral powder, fly ash, desulfurization gypsum, and mineral alkaline activators. Through indoor experiments, the effects of material mix proportions and curing regimes on road mechanical performance were studied. Combined with microscopic mechanism analysis, the hydration reaction mechanism was revealed. Environmental safety evaluations were conducted using methods such as leaching toxicity testing and long-term environmental monitoring, with practical application validated through engineering demonstrations. The results indicate that when the red mud content is 15%–20%, mineral powder 40%–45%, fly ash 20%–25%, desulfurization gypsum 15%–20%, and activator (calcined slag) 1.0%–1.5%, the material achieves an unconfined compressive strength of ≥ 3.5 MPa at 7 days and ≥ 4.5 MPa at 28 days, meeting the design requirements for road base layers. Under salt-freeze coupled environments, the strength loss rate after 10 cycles is only 3.95%, and heavy metal leaching concentrations all fall below the limits specified in the "Identification Standard for Hazardous Waste—Leaching Toxicity Test" (GB 5085.3-2007). In the application of this material for road base layers in Qingzhen Industrial Park, a single project segment utilized 1,828 tons of red mud, with core drilling strength and deflection values exceeding design standards, achieving synergistic benefits of waste reduction and engineering efficiency. This provides technical support for large-scale utilization of red mud in road construction.

[Key words] red mud; Composite cementitious materials; Road grassroots; Mechanical properties; Environmental safety

1 引言

我国作为氧化铝生产大国,每年产生赤泥超1亿吨,累计堆

存量已达20亿吨,其强碱性及重金属特性易导致土壤盐碱化、地下水污染等环境问题,而综合利用率仅27.0%,固废处置与资源

化矛盾突出。道路建设领域对胶凝材料需求量巨大,若能将赤泥制备为道路基层用复合胶凝材料,既可消纳大量固废,又能替代传统水泥降低碳排放,契合“双碳”目标与绿色交通发展理念。

现有赤泥基胶凝材料研究多聚焦于单一固废替代或化学碱激发,存在赤泥掺量低(通常低于15%)、生产能耗高、极端环境耐久性不足等问题。Metilda等人研究表明,赤泥替代水泥比例超过15%时,材料力学性能显著下降;国内专利技术多依赖煅烧或高浓度化学碱,限制了规模化应用。此外,赤泥路用的环境安全性评价多停留在短期浸出检测,缺乏长期服役环境下的系统监测数据,制约了其工程推广。基于此,本文构建多源固废协同体系,采用矿物碱激发剂替代化学碱,优化配合比以提升力学性能与耐久性,同时建立“短期检测-长期监测”一体化环境评价体系,结合工程示范验证技术可行性,为赤泥基材料在道路基层的规模化应用提供理论与实践依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验所用赤泥为烧结法赤泥,取自贵州某氧化铝厂,经烘干粉磨后比表面积为 $480\text{m}^2/\text{kg}$,主要化学成分为: CaO 32.5%、 SiO_2 21.3%、 Fe_2O_3 18.7%、 Al_2O_3 10.2%、 Na_2O 2.8%, pH值11.8,符合路用原料基本要求。矿粉选用S95级钢渣矿粉,比表面积 $420\text{m}^2/\text{kg}$,活性指数97%;粉煤灰为II级粉煤灰,烧失量7.2%,需水量比95%;脱硫石膏取自电厂脱硫废渣,比表面积 $520\text{m}^2/\text{kg}$, SO_3 含量41.5%;激发剂采用电石渣,主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,有效含量 $\geq 85\%$,作为矿物碱替代传统化学碱。试验用水为自来水,水灰比固定为0.32。

2.2 配合比设计

基于多因素协同优化思路,以赤泥(A)、矿粉(B)、粉煤灰(C)、脱硫石膏(D)为变量,激发剂掺量(E)为调节因素,设计四因素三水平正交试验,各因素水平如表1所示,以28d无侧限抗压强度为核心评价指标,筛选最优配合比。

表1 赤泥基复合胶凝材料正交试验因素水平表

因素	水平1(%)	水平2(%)	水平3(%)
赤泥(A)	15	20	25
矿粉(B)	40	45	50
粉煤灰(C)	15	20	25
脱硫石膏(D)	15	20	25
激发剂(E,外掺)	0.8	1.2	1.6

注:各组分比例基于赤泥、矿粉、粉煤灰、石膏总质量计算,激发剂为外掺量。

2.3 试验方法

力学性能测试参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009),将原料按配合比混合均匀后,以静压法成

型 $\phi 50\text{mm}\times h50\text{mm}$ 试件,压实度 $\geq 96\%$,置于温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 95\%$ 环境中标准养护,分别测定3d、7d、28d无侧限抗压强度。耐久性测试模拟盐冻耦合服役环境,将28d龄期试件浸泡于复合盐溶液($0.03\text{mol/L Na}_2\text{SO}_4 + 0.04\text{mol/L Na}_2\text{CO}_3 + 0.05\text{mol/L NaCl}$)4d后,进行 -23°C 冰冻12h、 25°C 融化12h的冻融循环试验,测定2、4、6、8、10次循环后的质量损失率与强度损失率。

环境安全性评价采用《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557-2010),制备浸出液后,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测As、Hg、Pb、Cr等重金属浓度,同时测定浸出液pH值;结合工程示范路段,布设土壤、地下水监测点,持续跟踪监测6个月,分析材料对周边环境的影响。微观机理采用扫描电子显微镜(SEM)观察水化产物形貌,结合X射线衍射(XRD)分析物相组成。

3 试验结果与分析

3.1 最优配合比确定

正交试验结果显示,各因素对28d抗压强度的影响显著性排序为:矿粉掺量 $>$ 赤泥掺量 $>$ 脱硫石膏掺量 $>$ 激发剂掺量。当赤泥20%、矿粉45%、粉煤灰20%、脱硫石膏15%,激发剂掺量1.2%时,材料综合性能最优,记为最优组;同时设置赤泥掺量25%的对比组(矿粉40%、粉煤灰20%、石膏15%,激发剂1.5%)与传统水泥稳定碎石组(水泥掺量4%)作为参照,力学性能测试结果如表2所示。

表2 不同组别赤泥基复合胶凝材料力学性能测试结果表

组别	3d抗压强度(MPa)	7d抗压强度(MPa)	28d抗压强度(MPa)	28d弹性模量(GPa)
最优组	2.8	3.8	4.7	18.2
赤泥25%组	2.1	3.2	4.1	16.5
传统水泥组	3	4	4.8	18.5

由表2可知,最优组28d抗压强度达4.7MPa,接近传统水泥稳定碎石组,且满足高速公路基层材料强度要求($\geq 4.5\text{MPa}$);赤泥25%组强度略低,但仍满足一级公路基层设计标准,可根据工程等级灵活选用。矿粉的高掺量为水化反应提供了充足的硅铝活性成分,脱硫石膏作为硫酸盐激发剂促进了AFM相生成,电石渣则通过碱性激发强化了硅铝酸盐的水化反应,三者协同弥补了赤泥掺量增加带来的强度损失。

3.2 耐久性分析

盐冻循环试验结果表明,最优组在不同循环次数下的性能稳定性显著优于赤泥25%组。10次冻融循环后,最优组质量损失率为1.62%,强度损失率为3.92%,均低于赤泥25%组的2.31%和6.75%;传统水泥组10次循环后强度损失率为5.13%,最优组耐久性更优。SEM观察显示,最优组水化产物形成了致密的网状结构,AFM相与水化硅酸钙(C-S-H)凝胶相互交织,填充了内部孔隙,有效抑制了盐溶液侵入与冻胀破坏;而赤泥25%组因水化产物不足,孔隙率较高,冻融后出现明显微裂缝。

XRD分析表明,水化产物主要为C-S-H凝胶、AFM相、羟基钙石(CH)及少量钙矾石(Aft),赤泥中的硅酸二钙参与水化反应,进一步补充了胶凝成分。矿物碱激发剂的使用,避免了化学碱带来的体积稳定性问题,同时提升了材料的抗腐蚀能力,为其在盐渍、寒冷地区的应用提供了可能。

3.3 环境安全性评价

浸出毒性检测结果显示,最优组浸出液pH值为8.9,处于弱碱性范围,无强碱性污染风险;As、Hg、Pb、Cr(VI)等重金属浸出浓度分别为0.021mg/L、0.001mg/L、0.035mg/L、0.008mg/L,均远低于GB 5085.3-2007标准限值(分别为0.5mg/L、0.1mg/L、0.5mg/L、0.1mg/L),说明材料对重金属的固化效果优异。这一结果得益于壳聚糖与凹凸棒石的协同作用,其通过物理吸附与化学络合反应,将重金属离子固定于水化产物网络中,降低了浸出风险。

工程示范路段6个月长期监测数据显示,路基周边土壤pH值维持在7.5~8.2,无盐碱化趋势;地下水各项指标均符合《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)III类标准,重金属浓度无明显波动,放射性检测结果达标,表明赤泥基复合胶凝材料在道路基层应用中对周边环境无负面影响,环境安全性可控。

4 工程应用示范

基于试验成果,在贵州清镇经开区电子信息产业园内部道路开展工程示范,路段全长320m,宽12m,基层采用双层结构设计:上层为16cm改性赤泥复合胶凝材料水稳层(最优配合比,材料掺量2%),下层为16cm改性固化赤泥水稳层(赤泥掺量89%、固化剂11%)。施工过程中,原料采用集中厂拌,控制含水率为最佳含水率±1%,碾压采用重型压路机分层压实,压实度≥97%,养护期7d后开放交通。

第三方检测结果显示,路段钻芯强度达3.2MPa,弯沉值为29.3(0.01mm),优于设计标准(钻芯强度≥2.5MPa,弯沉值≤30(0.01mm));通车1年后跟踪检测,路面无裂缝、沉陷等病害,基层完整性良好。该工程累计消纳赤泥1828吨,替代水泥用量约30%,减少CO₂排放约210吨,实现了固废资源化与工程建设的协同增效,验证了技术的实践可行性。此外,贵州华锦与贵州高速集团在赤泥堆场开展的模拟高速路基试验表明,该材料各项指

标可满足高速公路修筑要求,具备规模化推广潜力。

5 结论与展望

本文提出的多源固废协同型赤泥基复合胶凝材料,通过优化配合比与矿物碱激发技术,解决了传统赤泥基材料强度低、耐久性差、环境风险高的问题,主要结论如下:赤泥掺量20%、矿粉45%、粉煤灰20%、脱硫石膏15%,激发剂(电石渣)掺量1.2%为最优配合比,其28d无侧限抗压强度达4.7MPa,盐冻循环10次后强度损失率仅3.92%,力学性能与耐久性满足道路基层设计要求;材料重金属浸出浓度均低于国家标准,长期环境监测无不良影响,环境安全性可控;工程示范验证了材料在工业园区道路的适用性,单段工程消纳大量赤泥,兼具环境效益与经济效益。

未来研究可聚焦三方面:一是优化改性剂配比,进一步提升材料在极端温湿度环境下的耐久性;二是开展大规模长期服役试验,完善性能衰减模型与环境风险预警体系;三是探索赤泥与其他工业固废的协同利用路径,拓展材料应用场景至高速公路改扩建工程,推动赤泥资源化利用向全量化、高值化升级。

【参考文献】

[1]朱雷,段赢,王赛,等.补充胶凝材料和骨料类型对工程水泥基复合材料力学性能的影响[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2025年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册).中交二公局东萌工程有限公司,2025:748-753.

[2]何小军,王海彦,陈文秀,等.基于复合胶凝材料体系的板梁铰缝灌浆料配合比及性能[J].河北科技师范学院学报,2025,39(02):41-49.

[3]杨胜江.基于复合胶凝体系的水泥路面快速修补材料分析[J].交通科技与管理,2025,6(11):89-91.

[4]丁锐,陈玉琦,刘清顺,等.固废胶凝材料协同尾砂制备胶结充填材料的研究进展[J].北方建筑,2024,9(05):40-43.

[5]刘洋,李鹏飞,陈智勇,等.振动搅拌对复合胶凝材料混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2024,(08):16-21.

作者简介:

白艳红(1979--),男,汉族,山西五台人,大学本科,环保工程师,研究方向:污染治理,生态修复,低碳减排,环境智能管控。