

固废基胶凝材料混凝土的配比优化 与全周期技术管控研究

程玉平

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/UAID.2024120006

摘要： 本文围绕固废基胶凝材料混凝土展开研究，阐述其矿物组成及活性，介绍用 XRD、SEM 等测试手段研究其性能。论述配合比优化设计，采用响应面法结合遗传算法等实现。还涉及固废材料预处理、原材料均质化、生产工艺控制等技术管控。通过工程应用验证可行性，并进行碳排放计算、效益分析，介绍区块链溯源等技术，为其应用提供支撑。

关键词： 固废基胶凝材料混凝土；配合比优化；技术管控

Research on the Optimization of Concrete Mix Proportion and Full Cycle Technical Control of Solid Waste based Cementitious Materials

Cheng Yuping

Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article focuses on the research of solid waste based cementitious material concrete, elaborating on its mineral composition and activity, and introducing the use of XRD, SEM and other testing methods to study its properties. Discuss the optimization design of mix proportion, using response surface methodology combined with genetic algorithm for implementation. It also involves technical control such as solid waste material pretreatment, raw material homogenization, and production process control. Through engineering application verification of feasibility, carbon emission calculation, benefit analysis, and introduction of blockchain traceability technology, support is provided for its application.

Keywords : solid waste based cementitious materials concrete; optimization of mix proportion; technical control

引言

《“十四五”循环经济发展规划》（2021 年颁布）强调要加强大宗固废综合利用，推动资源循环利用产业发展。在此政策背景下，对固废基胶凝材料混凝土的研究意义重大。该材料以粉煤灰、钢渣等工业固废为主要组成，具有显著的环境与经济效益。围绕其展开的研究涵盖多个方面，从材料特性分析到配合比优化设计，从智能算法应用到生产工艺控制，再到工程应用及效益分析等，系统探讨了其配比优化理论与技术管控方法，为其在工程领域的广泛应用提供有力支撑，助力实现绿色、高效发展目标。

一、固废基胶凝材料的物理化学特性分析

（一）固废基胶凝材料的组成与来源

固废基胶凝材料主要由工业固废组成，如粉煤灰、钢渣等^[1]。粉煤灰作为燃煤电厂排出的主要固体废物，其矿物组成主要包括玻璃体、莫来石、石英等。玻璃体含量较高，使其具有潜在的火山灰活性，在碱性激发剂作用下能与氢氧化钙发生反应，生成具有胶凝性能的水化产物。钢渣是炼钢过程中产生的废渣，主要矿物相为硅酸三钙、硅酸二钙、铁铝酸钙等，这些矿物相赋予钢渣一定的水硬活性。工业固废具有巨大的资源化潜力，将其应用于胶凝材料体系，不仅能解决固废处置问题，还能降低胶凝

材料生产成本，具有显著的环境与经济效益。在胶凝体系中，粉煤灰和钢渣等通过与水泥熟料及其他添加剂相互作用，影响胶凝材料的水化进程、强度发展及耐久性等性能，阐明其作用机理对优化固废基胶凝材料性能至关重要。

（二）材料物理化学性能表征

采用 XRD（X 射线衍射）测试手段，能够精准确定固废基胶凝材料中各种矿物相的种类与含量^[2]。通过分析 XRD 图谱中的衍射峰位置和强度，可明晰其晶体结构信息，这对于了解材料的化学组成及潜在活性具有关键意义。利用 SEM（扫描电子显微镜），则可直观观察固废材料的微观形貌，如颗粒形状、尺寸分布以及表面纹理等，深入探究其粒形特征。同时，结合活性指数测

试, 衡量固废材料在特定条件下参与水化反应的能力, 进一步研究其活性程度。通过对水化特性的研究, 分析固废基胶凝材料在水化过程中的热效应、反应速率及产物生成情况, 从而全面揭示固废材料的粒形特征、活性指数及水化特性与混凝土性能之间的关联规律, 为后续的配比优化与技术管控提供坚实的理论依据。

二、固废基混凝土配合比优化设计方法

(一) 多目标优化模型的构建

在固废基混凝土配合比优化设计中, 多目标优化模型的构建极为关键。建立一个综合优化模型, 该模型需涵盖强度发展、成本控制与环境影响等多个重要方面。强度发展关乎混凝土能否满足工程实际使用要求, 成本控制决定其在实际应用中的经济性, 而环境影响则体现了绿色可持续发展理念。通过此模型确定矿物掺合料替代率、水胶比等关键参数^[9]。矿物掺合料替代率的改变会影响混凝土的工作性能、强度及耐久性, 水胶比更是对混凝土强度和耐久性有着决定性作用。综合考虑这些因素构建的多目标优化模型, 可实现固废基混凝土配合比的科学、合理优化, 平衡各方面性能, 满足工程多方面需求。

(二) 智能优化算法应用

在固废基混凝土配合比优化设计中, 智能优化算法发挥着关键作用。这里采用响应面法结合遗传算法进行配比优化^[4]。响应面法能够通过构建数学模型, 快速且精准地反映各因素与响应值之间的关系, 将复杂的混凝土配合比设计问题简化为数学优化问题。而遗传算法模拟自然选择和遗传机制, 具有全局搜索能力, 可有效避免陷入局部最优解。将二者结合, 先利用响应面法初步构建因素与性能间的函数关系, 再借助遗传算法对配合比参数进行全局寻优, 相比单一算法, 能更高效准确地解决固废基混凝土配合比设计中的非线性优化问题, 精准找出最优配合比, 提高固废基混凝土性能的同时, 最大化利用固废资源, 实现经济与环境效益的统一。

三、全周期技术管控体系构建

(一) 原材料质量管控技术

1. 固废材料预处理标准

固废材料预处理对固废基胶凝材料混凝土性能至关重要。针对破碎研磨, 应明确其粒度要求, 确保颗粒尺寸分布合理, 比如将平均粒径控制在特定范围, 以保证后续胶凝反应充分且均匀, 这直接影响混凝土的强度与工作性^[9]。对于化学活化, 需确定活化剂种类、用量及反应条件等技术指标。活化剂的精准用量既能有效激发固废材料活性, 又不会因过量而产生负面影响。同时, 建立严格的质量控制标准, 对预处理后的固废材料进行多方面检测, 如活性指数、颗粒级配等指标检测, 只有符合标准的材料才可进入下一环节, 从而保证固废基胶凝材料混凝土的整体质量与性能。

2. 均质化控制方法

为实现固废基胶凝材料混凝土原材料的均质化, 建立原材料批次差异的统计过程控制方法至关重要。通过对不同批次的固废基材料各项指标, 如粒度分布、化学组成、活性指数等进行详细测定与分析, 运用统计过程控制技术, 绘制控制图, 及时发现批次间的

异常波动^[9]。依据控制图所反馈的信息, 精准调整后续批次材料的处理工艺, 例如优化破碎筛分流程以调控粒度, 改进煅烧条件来稳定化学活性, 从而减小批次间差异, 确保物料稳定性。这不仅为配合比设计提供稳定可靠的原材料基础, 也极大提高了配合比的准确性, 保障固废基胶凝材料混凝土在生产与应用过程中的质量均一性, 有效降低因原材料不均质导致的性能波动风险。

(二) 生产工艺过程控制

1. 拌合工艺参数优化

在固废基胶凝材料混凝土的生产工艺过程控制中, 拌合工艺参数优化极为关键。研究搅拌时间对新拌混凝土工作性的影响规律, 若搅拌时间过短, 各种材料难以充分混合, 会导致混凝土匀质性差, 影响其工作性能; 而搅拌时间过长, 可能会使混凝土过度搅拌, 出现离析等问题。投料顺序同样不容忽视, 不同的投料顺序会影响材料间的相互作用, 从而对新拌混凝土工作性产生影响。比如, 先投入骨料, 再加入胶凝材料和水, 与先将胶凝材料和水搅拌均匀后再加入骨料, 所得到的混凝土工作性会有所差异。通过深入研究这些工艺参数对新拌混凝土工作性的影响规律^[7], 可为拌合工艺参数的优化提供科学依据, 从而提升固废基胶凝材料混凝土的质量。

2. 养护制度智能调控

在固废基胶凝材料混凝土的生产工艺过程控制中, 养护制度智能调控至关重要。通过开发基于温湿度传感的蒸汽养护自动控制系统, 可实现养护制度的智能化。该系统借助温湿度传感器实时监测养护环境中的温湿度数据^[6], 基于这些精准数据, 系统能够自动调节蒸汽的供应, 从而优化水化反应进程控制。合适的温湿度条件对固废基胶凝材料混凝土的水化反应影响重大, 智能调控能确保混凝土在各个阶段都处于最佳的养护环境, 促使水化反应充分、有序进行, 提高混凝土的强度、耐久性等性能, 保障固废基胶凝材料混凝土的质量稳定性, 有效减少因养护不当导致的质量问题。

四、工程应用与综合效益评价

(一) 典型工程应用案例分析

1. 道路工程应用实践

在某市政道路工程中, 针对固废基胶凝材料混凝土开展应用实践。施工前, 依据前期配比优化成果确定具体配合比, 并做好材料准备。施工时, 精确采集现场各类施工数据, 包括混凝土的搅拌时间、运输距离与浇筑温度等。同时, 对混凝土的坍落度、和易性等工作性能进行实时监测, 确保满足施工要求。道路建成后, 展开长期性能监测, 定期检测路面的平整度、抗滑性能以及结构承载能力等指标。通过长期跟踪, 发现固废基胶凝材料混凝土在该道路工程中性能稳定, 不仅有效利用了固废资源, 还降低了工程成本。这些现场施工数据和长期性能监测结果, 为后续固废基胶凝材料混凝土在道路工程中的广泛应用提供了有力支撑^[9]。

2. 建筑结构应用验证

在装配式建筑构件应用固废基胶凝材料混凝土时, 其应用效果和结构安全性备受关注。以某实际装配式建筑项目为例, 在构件生产过程中采用优化配比的固废基胶凝材料混凝土。经检测, 构件的外观质量良好, 尺寸精度符合要求。对构件进行力学性能

测试,其抗压、抗弯等强度指标均满足设计标准。同时,通过有限元模拟分析与现场实体检测相结合的方式评估结构安全性。模拟结果显示,在正常使用荷载及设计荷载组合下,结构的应力应变分布合理。现场实体检测表明,装配式建筑结构在建成后的实际运行过程中表现稳定,未出现影响结构安全的裂缝等问题^[9]。这充分验证了固废基胶凝材料混凝土在建筑结构应用中的可行性与可靠性。

(二) 环境效益量化评价

1. 碳足迹核算模型

基于生命周期评价(LCA)方法构建固废混凝土全生命周期碳排放计算模型,能精准量化其碳足迹。在模型构建中,需全面考虑固废基胶凝材料混凝土从原材料获取、生产制造、运输、使用到最终废弃处置等各个阶段的碳排放源。将原材料开采与加工过程中的能源消耗,如固废收集与预处理、水泥及其他添加剂生产的能耗所产生的碳排放纳入其中;考虑混凝土生产环节设备运行能耗的碳排放;运输阶段不同运输方式及距离的碳排放;使用阶段的潜在碳排放,如建筑物运行能耗间接关联等;以及废弃处置阶段处理方式带来的碳排放。通过对各阶段关键参数的准确测量与数据收集,依据相关碳排放因子,整合计算,实现对固废基胶凝材料混凝土全生命周期碳足迹的精确核算,为其环境效益量化评价提供核心支撑。

2. 固废资源化效益分析

在固废资源化效益分析方面,工业固废替代率的提升,能极大推动固废的资源化利用。以固废基胶凝材料混凝土为例,更多固废被掺入,意味着大量原本可能堆积或填埋的工业固废得到有效利用,减轻了固废处理压力。从经济价值看,降低了固废处理成本,同时节约了天然资源,减少了对新原材料的开采。例如,每提高一定比例的固废替代率,就能相应减少砂石等天然骨料的使用量,按市场价格计算,可得出节约的直接经济成本。而且,随着固废资源化规模扩大,还可能带动相关产业发展,创造新的经济效益,进一步凸显其在经济与环境协调发展中的重要意义,实现资源的高效循环利用与经济价值的提升。

(三) 质量追溯与管控系统

1. 区块链溯源技术应用

在工程应用中,区块链溯源技术为固废基胶凝材料混凝土的

质量追溯与管控系统带来了革新。将区块链技术融入原材料采购环节,可详细记录固废来源、运输路径及批次信息,确保其可追溯性。在生产阶段,实时上传混凝土配比数据、搅拌参数、生产时间等,构建不可篡改的生产档案。在施工现场,记录浇筑时间、部位等信息,实现全流程质量追踪。从综合效益看,该技术提高了产品质量可信度,增强了工程各方对固废基胶凝材料混凝土的信心,利于其推广应用。同时,通过精准追溯问题源头,减少质量事故风险,降低经济损失,实现经济效益与社会效益的统一。

2. 数字孪生管控平台

数字孪生管控平台在固废基胶凝材料混凝土的工程应用中发挥着关键作用。该平台以数字化方式对混凝土的配比、生产过程及性能进行实时模拟与监控,可精准复现实际工况。通过建立与物理实体对应的虚拟模型,能及时发现潜在问题并进行优化。例如,当监测到原材料参数波动时,平台可迅速调整配比模拟,评估对最终性能的影响,为实际操作提供准确指导。从综合效益看,数字孪生管控平台显著提升了工程质量,降低因错误配比或生产异常导致材料浪费与返工成本,同时增强了产品质量稳定性,有力推动固废基胶凝材料混凝土在各类工程中的广泛应用,实现经济效益与环境效益的双赢。

五、总结

本文围绕固废基胶凝材料混凝土展开深入研究,系统总结了其配比优化理论与技术管控方法。在配比优化方面,通过研究不同固废材料特性及相互作用,确定了满足多种性能需求的配比方案。在技术管控上,从原材料选择到生产施工全流程,制定了针对性管控措施。在此基础上,提出适用于不同工程场景的技术路径,充分考虑不同场景对混凝土性能的特殊要求。此外,还对固废资源化与智能化管控技术的发展方向进行展望,期望未来能实现更高层次的固废利用及更精准高效的管控。通过这些研究,为固废基胶凝材料混凝土在工程领域的广泛应用提供理论与技术支撑,推动其朝着绿色、高效方向发展。

参考文献

- [1] 陈昱蔚. 基于 CGA-LSO-BP 神经网络的固废基胶凝材料混凝土强度预测研究 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [2] 秦琳. 喷射固废基胶凝材料混凝土配合比研究与应用 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [3] 刘沛. 复合固废基胶凝材料透水混凝土的制备与性能研究 [D]. 太原理工大学, 2023.
- [4] 朴世玮. 高强喷射固废基胶凝材料混凝土的配制及性能研究 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [5] 杜超. 固废基胶凝材料体系设计及应用技术研究 [D]. 武汉理工大学, 2022.
- [6] 刘树龙, 李公成, 刘国磊, 等. 基于响应面法的矿渣基全国固废胶凝材料配比优化 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 187-193.
- [7] 朱增超, 刘贤平, 水中和, 等. 固废基复合胶凝材料配比优化设计及其协同效应研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4368-4377.
- [8] 朱庚杰, 朱万成, 齐兆军, 等. 固废基充填胶凝材料配比分步优化及其水化胶结机理 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1304-1315.
- [9] 谢瑞兴, 岳光亮, 郭文倩, 等. 固废基胶凝材料混凝土增强剂的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(1): 52-55.
- [10] 高道峨, 刘益良, 周天俊, 等. 固废基胶凝材料研究进展 [J]. 江西建材, 2023(3): 4-5.