再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的量化研究

陈武钊

广东金泰混凝土有限公司, 广东 云浮 527300

DOI:10.61369/ME.2025030005

摘要：本研究对再生骨料预处理工艺影响混凝土耐久性展开研究。通过多种测试方法分析骨料物理性能，设计化学预处理方案并分析微观结构变化，制定关键指标检测规程，开发数据采集系统，还研究了碳化、氯蚀等多方面，提出多种模型与方法，对工艺进行量化研究并归纳规律，提出配合比设计方法，揭示量化关系，展望未来发展方向。

关键词：再生骨料；预处理工艺；混凝土耐久性

Quantitative Study on the Influence of Recycled Aggregate Pretreatment Process on Concrete Durability

Chen Wuzhao

Guangdong Jintai Concrete Co., LTD. Yunfu, Guangdong 527300

Abstract： This study investigates the impact of recycled aggregate pretreatment processes on concrete durability. It analyzes the physical properties of aggregates using various testing methods, designs chemical pretreatment schemes, and examines changes in microstructure. The study also establishes key indicator testing procedures, develops a data collection system, and explores carbonation, chloride corrosion, and other aspects. Multiple models and methods are proposed to quantitatively study the process and summarize the underlying principles. Additionally, it proposes a mix design method, reveals quantitative relationships, and outlines future research directions.

Keywords： recycled aggregate; pretreatment process; concrete durability

引言

随着建筑行业对可持续发展的日益重视以及相关政策的不断推进，如《关于推动城乡建设绿色发展的意见》（2021年）强调了建筑材料的可持续利用。再生骨料作为一种可持续的建筑材料，其预处理工艺对混凝土耐久性的影响成为研究热点。本文通过多种测试方法对再生骨料的物理性能进行研究，探讨化学预处理工艺的影响机制，制定关键指标检测规程，开发数据采集系统，分析碳化、氯蚀等对耐久性的影响，提出相关修正公式和计算方法，并通过示范工程监测验证，旨在为再生骨料在混凝土中的应用提供理论支持和实践指导，推动建筑行业可持续发展。

一、再生骨料特性与预处理工艺关联性研究

（一）再生骨料物理特性分析

通过 CT 扫描与压汞法对原状及预处理再生骨料的孔隙率、吸水率等物理性能指标进行测试。CT 扫描能够清晰呈现骨料内部孔隙结构，为孔隙率的精确测定提供直观依据^[1]。压汞法可进一步量化孔隙特征，从微观角度揭示孔隙分布及大小情况。吸水率的测定则反映了再生骨料对水分的吸收能力，其与孔隙率密切相关。综合这些测试结果，建立物理参数数据库，为后续研究再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的影响提供基础数据支撑，以便深入探究再生骨料特性与预处理工艺之间的关联性。

（二）化学预处理工艺对比试验

为探究化学预处理工艺对再生骨料的影响，设计不同浓度盐酸/硅酸钠改性方案。通过对再生骨料进行不同浓度的盐酸和硅酸

钠处理，然后利用 SEM-EDS 技术分析其界面过渡区微观结构变化。盐酸处理可能会溶解再生骨料表面的一些杂质和薄弱部分，改变其表面粗糙度和化学组成，从而影响其与水泥浆体的粘结性能^[2]。硅酸钠处理则可能在再生骨料表面形成一层硅凝胶，填充孔隙并增强其与水泥浆体的结合力。借助 SEM-EDS 分析，可以清晰地观察到界面过渡区的微观形貌、元素分布等变化，进而了解不同预处理工艺对再生骨料特性的影响机制，为后续研究混凝土耐久性奠定基础。

二、实验室质量控制体系构建

（一）原材料检测标准化流程

再生骨料预处理前后关键指标的检测需制定严格规程及误差控制标准。对于含水率的检测，应规范取样方法、检测仪器及操

作流程, 确保结果准确可靠, 误差控制在合理范围内^[3]。含泥量检测同样如此, 明确取样部位、数量以及清洗和测量的具体操作, 以减小误差。除这两项外, 其余10项关键指标也需逐一制定详细检测规程, 包括但不限于颗粒级配、压碎指标等。从仪器设备的校准、操作环境的控制到检测人员的技能要求等方面都要进行规范, 从而构建起完整的原材料检测标准化流程, 为后续研究提供准确的数据基础。

(二) 耐久性试验数据采集系统

开发基于物联网的耐久性试验数据采集系统对于准确获取碳化深度、氯离子扩散系数等参数至关重要。该系统应具备高精度传感器, 能够实时感知耐久性相关指标的变化^[4]。传感器需合理分布在试验样本的关键位置, 确保数据的全面性和代表性。通过物联网技术, 实现数据的无线传输, 将采集到的数据及时发送至数据处理中心。在数据处理中心, 运用先进的算法对数据进行分析和处理, 去除异常值, 提高数据的准确性。同时, 建立数据存储库, 对历史数据进行有效管理, 以便后续研究人员进行查询和分析, 为再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的量化研究提供可靠的数据支持。

三、预处理工艺对耐久性影响机制

(一) 碳化进程定量表征

1. 碳化深度时变模型

碳化深度是衡量混凝土耐久性的关键指标之一。预处理工艺对再生骨料混凝土的碳化进程有显著影响。通过对碳化反应的基本原理分析, 可知CO₂浓度、湿度等环境因素以及骨料预处理程度均会影响碳化速率。为了定量表征碳化进程, 需要建立碳化深度时变模型。该模型应综合考虑上述影响因素, 建立碳化速率与CO₂浓度、湿度以及骨料预处理程度的耦合方程。通过大量试验研究和数据分析, 确定方程中的各项参数, 从而能够准确预测不同预处理工艺下再生骨料混凝土的碳化深度随时间的变化规律, 为评估其耐久性提供理论依据^[5]。

2. 化学预处理抑制机理

通过XRD分析界面Ca(OH)₂含量变化规律, 揭示酸处理增强抗碳化本质。研究发现, 化学预处理过程中酸液与再生骨料表面的Ca(OH)₂发生反应, 从而改变了骨料表面的化学组成和微观结构^[6]。这一变化影响了混凝土中碳化反应的进程, 因为Ca(OH)₂是碳化反应的重要反应物之一。酸处理减少了界面处可参与碳化反应的Ca(OH)₂量, 进而减缓了碳化速度, 增强了混凝土的抗碳化能力。同时, 这种微观结构的改变可能还影响了混凝土内部的孔隙结构和连通性, 进一步对耐久性产生影响, 但这需要进一步深入研究。

(二) 氯离子迁移规律研究

1. 扩散系数修正模型

基于骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的研究, 提出Fick第二定律修正系数计算方法。考虑预处理工艺改变了再生骨料的特性, 进而影响氯离子迁移规律。通过对不同预处理工艺下的氯

离子扩散试验研究, 分析其扩散系数的变化特征。发现预处理工艺可能影响骨料的孔隙结构、表面性质等, 这些因素与氯离子扩散密切相关。因此, 在建立扩散系数修正模型时, 需综合考虑预处理工艺带来的这些影响, 引入相关参数对Fick第二定律进行修正, 以更准确地描述氯离子在预处理再生骨料混凝土中的迁移规律^[7]。

2. 电化学加速试验验证

设计三电极体系加速腐蚀试验, 将不同预处理工艺下的再生骨料混凝土试件作为工作电极, 饱和甘汞电极作为参比电极, 铂电极作为对电极。通过调节外加电压, 加速氯离子向试件内部迁移。试验过程中, 定期测量试件的电位、电流等电化学参数, 分析其变化规律。同时, 采用化学分析方法测定试件内部不同深度处的氯离子浓度, 确定临界氯离子浓度。对比不同预处理工艺下的试验结果, 分析预处理工艺对临界氯离子浓度的影响, 从而验证预处理工艺对混凝土耐久性的影响机制^[8]。

四、配合比优化设计与工程应用

(一) 正交试验设计方法论

1. 多因素交互效应分析

在配合比优化设计与工程应用中, 正交试验设计方法论下的多因素交互效应分析至关重要。以再生骨料预处理工艺为例, 采用田口法研究预处理工艺参数与胶材用量、水胶比的交互作用机制。田口法通过合理安排试验因素和水平, 能够有效分析多个因素之间的交互影响。对于再生骨料预处理工艺参数, 如处理时间、处理温度等, 与胶材用量和水胶比共同作用时, 会对混凝土的耐久性产生复杂的影响。通过田口法设计的试验, 可以准确获取不同因素组合下的混凝土性能数据, 进而分析出各因素之间的交互效应, 为再生骨料在混凝土中的合理应用提供科学依据, 优化混凝土配合比, 提高其耐久性^[9]。

2. 耐久性综合评价模型

混凝土耐久性是一个复杂的多指标问题, 需要综合考虑碳化、氯蚀、冻融等多个方面。为了准确评估再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的影响, 构建碳化、氯蚀、冻融多指标权重分配的TOPSIS优化模型是一种有效的方法。该模型基于多属性决策理论, 通过确定各指标的权重, 对不同预处理工艺下的混凝土耐久性进行综合评价。在构建模型过程中, 需要考虑各指标之间的相互关系以及它们对混凝土耐久性的不同贡献程度。通过合理分配权重, 可以更准确地反映各指标的重要性, 从而提高模型的准确性和可靠性。同时, 该模型还可以为再生骨料预处理工艺的优化提供理论依据, 有助于提高混凝土的耐久性, 降低工程成本, 具有重要的工程应用价值^[10]。

(二) 生产级配调整策略

1. 骨料级配曲线优化

提出考虑预处理骨料粒径分布的连续级配修正公式是骨料级配曲线优化的重要内容。对于再生骨料, 其粒径分布因来源复杂而具有特殊性。传统的级配公式可能无法准确描述其特性, 因此

需要修正。通过对预处理后的骨料进行详细的粒径分析，确定不同粒径区间的颗粒含量比例。结合混凝土的性能要求，如流动性、强度等，对连续级配公式中的参数进行调整。例如，根据骨料的实际孔隙率和形状系数，修正与颗粒堆积密度相关的参数。这样可以使级配曲线更符合再生骨料的特点，从而优化混凝土的配合比，提高混凝土的性能和质量，更好地满足工程应用的需求。

2. 外加剂复合使用技术

减水剂与预处理骨料的适配性至关重要。一方面，预处理工艺可能改变骨料表面特性，影响减水剂的吸附和分散效果。合适的减水剂能有效降低水灰比，提高混凝土的密实性，从而增强耐久性。另一方面，研究发现不同类型的预处理骨料对减水剂的需求和反应不同。通过实验对比不同组合下的混凝土耐久性指标，如抗渗性、抗冻性等，量化适配性对耐久性的增益效应。同时，考虑外加剂之间的协同作用，复合使用外加剂时需综合考虑其与预处理骨料的相互影响，以达到最佳的配合比设计，提高混凝土在实际工程中的耐久性表现。

(三) 工程验证与经济分析

1. 示范工程监测数据对比

选取某桥梁工程作为示范工程进行为期3年的周期监测。通过在不同部位设置监测点，对混凝土的各项耐久性指标进行实时测量。将采用再生骨料预处理工艺的混凝土结构与传统工艺的结构进行对比，发现前者在抗渗性、抗冻性以及抗碳化性能等方面均有显著提升。在抗渗性方面，经过预处理的再生骨料混凝土结构的渗水高度明显低于传统工艺结构。抗冻性测试中，其冻融循环后的质量损失率和相对动弹模量变化率也更小。抗碳化性能上，

碳化深度明显变浅。这些监测数据有力地量化了再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的提升效果，为该工艺在实际工程中的进一步推广应用提供了可靠的依据。

2. 全生命周期成本模型

建立预处理工艺成本与维护费用间的动态平衡优化模型需综合考虑多方面因素。对于预处理工艺成本，涵盖设备投入、能源消耗、人力成本等。设备投入包括采购、安装及折旧费用，能源消耗取决于预处理工艺的复杂程度和处理量，人力成本则与操作工人数量和工资水平相关。维护费用涉及定期检查、维修以及可能因预处理工艺不足导致的额外修复费用。通过对不同预处理工艺在实际工程中的长期数据收集和分析，建立成本与维护费用随时间变化的函数关系，以确定在何种条件下能达到动态平衡优化，从而为再生骨料预处理工艺的选择和应用提供经济合理的决策依据。

五、总结

本研究对再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响进行了量化研究。归纳化学预处理对再生骨料性能改善规律，发现其能有效提升骨料性能。提出基于实验室质量控制的配合比优化设计方法，为混凝土生产提供科学指导。揭示预处理工艺参数与耐久性指标间量化关系，明确了工艺参数对耐久性的影响机制。未来应向智能化监测和低碳化处理工艺方向发展，智能化监测可实时掌握混凝土状态，低碳化处理工艺符合环保要求。本研究成果为再生骨料在混凝土中的应用提供了理论支持和实践指导，有助于推动建筑行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 江明超. 再生骨料海水海砂混凝土耐久性研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [2] 马书山. 再生骨料的改性及对混凝土性能影响的研究 [D]. 浙江理工大学, 2023.
- [3] 马锦雅. 醋酸改性再生骨料废液对水泥基材料水化及耐久性影响的研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 吕炎. 再生骨料化学强化及其对混凝土力学性能的影响研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2022.
- [5] 崔卜文. 再生混凝土骨料强化技术及其机理研究 [D]. 河南理工大学, 2022.
- [6] 吴琼, 胡忠君, 王健作, 等. 再生粗骨料碳化处理及其对再生混凝土性能的影响研究进展 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1347-1351.
- [7] 陈礼婧, 黄磊, 方黛妮. 再生骨料对混凝土性能的影响 [J]. 江西建材, 2022.
- [8] 陈晶亮. 再生骨料掺量对再生混凝土力学性能的影响研究 [J]. 散装水泥, 2023, (05): 185-187.
- [9] 沈振宗, 闫庆尧, 吕文龙, 等. 不同再生骨料替代率的振动搅拌混凝土耐久性研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(3): 26-28, 41.
- [10] 吴可燎. 全再生骨料再生混凝土的试验研究 [J]. 广东建材, 2023, 39(09): 39-41+130.