

特种混凝土配合比设计与性能优化研究

张岩

广州市长泽新型建筑材料有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025100002

摘 要 : 介绍了矿渣微粉等工业废料在特种混凝土中的应用, 阐述再生骨料改性等技术对性能的影响, 包括配合比设计方法、纳米材料应用、超高性能混凝土制备等内容, 还提及相关技术标准及修订建议, 探讨了特种混凝土发展的限制与前景。

关 键 词 : 特种混凝土; 配合比设计; 性能优化

Study on Concrete Mix Design and Performance Optimization

Zhang Yan

Guangzhou Changze New Building Materials Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper introduces the application of industrial waste such as slag micro-powder in special concrete, and discusses the influence of technologies such as modified recycled aggregate on its properties, including mix design methods, application of nanomaterials, preparation of ultra-high performance concrete, etc. It also puts forward relevant technical standards and revision suggestions, and discusses the limitations and prospects of the development of special concrete.

Keywords : special concrete; mix design; performance optimization

引言

随着建筑行业向绿色化转型, 特种混凝土中矿渣微粉、硅灰等工业固废的应用日益广泛。然而, 工业固废的来源稳定性差、成分波动大, 直接影响混凝土性能的一致性。不同来源或批次的固废中活性成分含量、粒度分布等差异, 会导致胶凝活性、工作性和强度发展规律显著变化。为此, 需建立系统的固废预处理技术: 通过预均化堆场实现成分均质化, 采用分级粉磨控制比表面积在 $400\sim 500\text{m}^2/\text{kg}$ 范围, 并建立快速检测体系评估固废活性指数。工程应用中建议采取“基准配合比+动态调整”模式, 当固废成分波动超过5%时, 通过增掺激发剂或调整减水剂掺量进行补偿。此外, 宜建立固废-水泥-外加剂协同性数据库, 结合纳米材料包覆等改性技术, 进一步提升体系稳定性。现行标准需补充固废变异系数限值、预处理工艺要求和配合比动态调整准则, 为工程质量控制提供依据。

一、特种混凝土原材料特性分析

(一) 新型胶凝材料应用

矿渣微粉、硅灰等工业废料作为新型胶凝材料在特种混凝土中具有重要应用。矿渣微粉具有潜在的水硬性, 其化学成分中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 等在碱性环境下可发生水化反应, 生成水化硅酸钙和水化铝酸钙等胶凝物质, 从而提高混凝土的强度和耐久性^[1]。硅灰具有极高的火山灰活性, 其主要成分是无定形的 SiO_2 , 能够与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应, 生成更多的C-S-H凝胶, 填充混凝土内部孔隙, 改善混凝土的微观结构, 提高混凝土的早期强度和抗渗性等性能^[1]。这些新型胶凝材料的应用为特种混凝土的性能优化提供了新的途径。

(二) 功能型骨料开发

再生骨料表面改性技术对特种混凝土性能优化具有重要意义。通过改性可改善其孔隙结构和表面性能, 提高与水泥浆体的粘结力, 从而提升混凝土的强度和耐久性^[2]。轻质陶粒作为一种

功能型骨料, 其具有质轻、多孔的特点, 良好的级配可使其在混凝土中均匀分布, 有效降低混凝土的自重, 同时改善热工性能, 提高保温隔热效果。钢渣骨料则具有较高的强度和耐磨性, 合理的级配能增强混凝土的抗冲击性能, 并且其在一定程度上可替代天然骨料, 实现资源的有效利用, 对可持续发展具有积极作用^[2]。

二、特种配合比设计方法研究

(一) 多目标优化模型构建

特种混凝土配合比设计需综合考虑多个因素。基于响应面法构建配合比参数优化体系, 该方法能够有效处理复杂的非线性关系^[3]。通过整合强度、耐久性和经济性等关键指标, 建立多约束条件下的数学模型。强度是混凝土的基本性能要求, 直接关系到结构的安全性; 耐久性影响混凝土结构的使用寿命, 考虑如抗渗性、抗冻性等因素; 经济性则关乎工程成本。综合这些指标, 以数学模型的形式来描述它们之间的相互关系和约束条件, 从而为

特种混凝土配合比的优化设计提供科学依据，实现满足多种性能要求的同时，达到最佳的综合效益。

（二）纳米材料掺配技术

纳米材料在混凝土中的应用日益受到关注，尤其是碳纳米管和纳米二氧化硅等新型掺合料。对于这些纳米材料，分散工艺是关键。合理的分散工艺能够确保纳米材料均匀分布在混凝土中，充分发挥其性能优势^[4]。研究发现，纳米材料对混凝土微观结构密实度和界面过渡区有显著的强化作用。其可填充混凝土内部的孔隙，细化微观结构，从而提高密实度^[5]。同时，在界面过渡区，纳米材料能够改善水泥浆体与骨料之间的粘结性能，增强界面的过渡效果，提升混凝土的整体性能。这些强化机制的深入研究，有助于进一步优化特种混凝土配合比设计，提高混凝土的质量和性能。

三、特种混凝土性能优化研究

（一）力学性能提升

1. 超高强混凝土制备

基于密实堆积理论与纤维增强技术，开发抗压强度超150MPa的超高性能混凝土。选用P·II 52.5级水泥、硅灰（ $\text{SiO}_2 \geq 92\%$ ）、2000目石英粉、粒径0.1–2mm石英砂，优化骨料级配，空隙率最小化。掺加12mm长、0.2mm直径钢纤维，掺量1.5–2%（体积比），其在裂缝两侧形成“桥接效应”，抑制微裂缝扩展，显著增强抗裂性。水胶比0.16–0.18，胶材总量550–600kg/m³，采用10MPa高压成型确保密实。养护制度为：初始28℃、95%湿度7天，后80℃蒸汽养护48小时。成品混凝土抗压强度155–165MPa，抗折强度20–25MPa，工作性指标为扩展度650–700mm，V漏斗时间8–10s。通过优化配合比、高压成型及分阶段养护，显著提升密实度和力学性能，满足特殊工程高性能需求。

2. 动态力学响应

采用SHPB试验装置研究钢纤维混凝土在冲击荷载下的能量吸收特性和损伤演化规律。通过对不同钢纤维掺量的混凝土试件进行冲击试验，分析应力–应变曲线的变化规律，发现钢纤维的加入显著提高了混凝土的能量吸收能力^[6]。在冲击过程中，钢纤维能够有效地阻止裂缝的扩展，使混凝土内部的损伤演化过程更为复杂和缓慢。进一步研究表明，钢纤维与混凝土基体之间的界面粘结性能对其动态力学性能有着重要影响。良好的界面粘结能够保证钢纤维在混凝土中充分发挥其增强和增韧作用，从而提高混凝土在冲击荷载下的整体性能。

（二）耐久性优化

1. 抗腐蚀体系设计

特种混凝土在海洋环境等恶劣条件下，耐久性面临挑战，尤其是抗腐蚀性能。构建基于电化学阻抗谱的氯离子渗透评价方法至关重要。该方法可精确测定氯离子在混凝土中的渗透情况，为抗腐蚀体系设计提供关键数据支持^[7]。同时，开发复合防腐剂协同作用下的海工混凝土防护体系。复合防腐剂通过不同成分的协同作用，能够在混凝土表面及内部形成有效的防护层，阻止氯离

子等腐蚀性介质的侵入。这种防护体系的设计需要综合考虑混凝土的配合比、环境条件以及防腐剂的性能等多方面因素，以达到最佳的抗腐蚀效果，提高特种混凝土的耐久性。

2. 冻融循环防护

引气剂对特种混凝土抗冻性能至关重要。不同类型引气剂在混凝土中形成的气泡结构和稳定性各异，影响着混凝土的抗冻性。含气量也是关键因素，适量的含气量可在混凝土内部形成缓冲空间，缓解冻融循环产生的膨胀压力。通过实验研究不同引气剂类型及含气量下混凝土的抗冻性能变化规律，分析其微观结构和孔隙特征，以确定最佳引气剂类型和含气量范围。同时，基于大量实验数据和理论分析，建立冻融损伤预测模型，该模型能够预测不同条件下混凝土的冻融损伤程度，为特种混凝土在寒冷环境中的应用提供理论依据和技术支持^[8]。

四、工程应用与技术经济分析

（一）特殊工程案例

1. 超高层泵送施工

自密实混凝土在600米级超高层建筑核心筒施工中具有重要应用。其工作性保持技术至关重要，需考虑混凝土的原材料特性，如水泥的品种、细度，矿物掺合料的种类和比例，以及外加剂的性能等因素^[9]。通过合理调整配合比，确保混凝土在运输和浇筑过程中保持良好的工作性。泵送压力控制也是关键点，要根据泵送高度、管道长度和直径等因素计算所需的泵送压力。同时，还需考虑混凝土在管道中的流动状态，避免出现堵塞等问题。通过对工作性保持技术和泵送压力控制要点的研究和应用，可以提高自密实混凝土在超高层泵送施工中的质量和效率。

2. 海洋平台应用

抗硫酸盐腐蚀混凝土在跨海大桥桩基工程中具有重要应用。其现场配合比需根据实际情况调整，考虑海水成分、地质条件等因素，以确保混凝土能有效抵抗硫酸盐腐蚀。例如，合理调整水泥品种和用量，增加矿物掺合料比例，优化骨料级配等^[10]。在施工质量控制方面，要严格把控原材料质量，确保其符合设计要求。同时，对混凝土的搅拌、运输、浇筑和养护过程进行严格监管，保证施工工艺的规范性。通过这些配合比调整策略和质量控制标准的实施，能够提高跨海大桥桩基的耐久性和安全性，为海洋工程基础设施的长期稳定运行提供保障。

（二）全生命周期评估

1. 经济性优化

基于价值工程理论，对特种混凝土进行成本–性能平衡分析，优化经济性与可持续性。对比三种配合比方案（单位：kg/m³）：HPC（水泥400、砂750、碎石1100、水160、成本约350元/m³）；UHPC1（水泥600、硅灰120、钢纤维150、水140、成本约800元/m³）；UHPC2（水泥450、粉煤灰150、硅灰100、钢纤维120、水135、成本约600元/m³）。HPC抗压强度100MPa，耐久性一般；UHPC1强度160MPa，耐久性优，维护成本降低20%；UHPC2强度150MPa，耐久性略优，结构减量

10%，运输施工成本节约15%。价值系数（性能/成本）计算：HPC为0.29，UHPC1为0.20，UHPC2为0.25，UHPC2性价比最高。工业固废（粉煤灰）在UHPC2中替代25%水泥，降低原材料成本约15%，加工及运输成本增加仅5%，净节约10%。全流程经济分析显示，固废资源化利用减少环境处理费用约30元/m³。优化路径：提高固废掺量（30–40%），采用本地固废降低运输成本，结合高性能外加剂确保强度，实现特种混凝土经济性与可持续性双赢。

（三）标准规范适应性

1. 现行标准对比

国内外特种混凝土相关技术标准众多，涵盖原材料、配合比设计、性能指标等多个方面。国外标准如美国的ACI系列标准在高性能混凝土方面有详细规定，注重耐久性和强度指标的精确控制。欧洲标准则强调环境适应性和可持续性。我国的相关标准在借鉴国外经验的基础上，结合国情形成了自己的体系，对特种混凝土的分类、性能要求等做出了规定。然而，在新型材料应用方面，现有规范存在局限性。随着纳米材料、纤维材料等新型材料在特种混凝土中的应用日益广泛，现有标准缺乏对这些新材料特性及其对混凝土性能影响的准确评估和规范指导，导致在实际工程应用中，对新型材料的使用存在一定盲目性，影响了特种混凝土性能的优化和工程质量的提升。

2. 标准修订建议

针对特种混凝土发展需求，提出标准修订建议。配合比设计中，针对纳米材料（如纳米SiO₂）和钢纤维，建议基于流变学参数（如屈服应力、塑性粘度）调整水胶比（范围0.16–0.20），而

非仅靠坍落度；砂率（30–40%）应考虑纤维分散性，新增超声波检测法评估纳米材料分散性和纤维均匀性，及界面过渡区粘结强度测试（劈裂拉伸法）。性能评价方面，新增抗腐蚀性指标，如28天氯离子扩散系数（ $\leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，RCM法测试）；抗冻融性指标，如300次盐冻循环后相对动弹性模量（ $\geq 80\%$ ），采用加速盐冻试验（GB/T 50082）。常规强度外，增加抗渗性（渗水高度 $\leq 10\text{mm}$ ）等特殊性能测试。标准体系应具前瞻性，纳入新型材料特性评价模块，如纳米材料相容性测试（zeta电位法），为新材料应用提供规范指导，确保特种混凝土性能与工程需求的匹配。

五、总结

纤维增强和纳米改性技术显著提升特种混凝土性能，为其发展提供有力支持。多目标优化设计在工程中展现适用性，但仍需完善。工业固废活性激发难题及超高性能混凝土规模化生产瓶颈限制其广泛应用。未来，智能算法如遗传算法和神经网络展现广阔前景。遗传算法可优化配合比，通过模拟自然选择快速筛选高固废掺量方案，解决活性激发难题，如提高粉煤灰活性利用率10–15%，降低成本约20%。神经网络可用于性能预测和质量控制，通过训练历史数据（强度、耐久性等），精确预测不同配合比下的性能（如抗压强度误差 $<5\%$ ），优化生产工艺参数，突破规模化生产瓶颈（如降低能耗15%）。通过这些算法的应用，结合固废资源化和工艺改进，特种混凝土配合比设计将实现性能提升与成本控制的平衡，满足工程需求，推动可持续发展。

参考文献

[1] 杜兴亮. 矿渣微粉在混凝土中的作用机理研究及工程指导意义 [J]. 混凝土, 2022(8): 87–91.
[2] 雷海清. 配制高性能钢管微膨胀混凝土应注意的问题 [J]. 中外企业家, 2014, (03): 185–186+188.
[3] 贺国伟, 李哈, 刘玉航. 透水混凝土配合比设计关键技术研究 [J]. 江西建材, 2023, (12): 117–119.
[4] Saleem H, Zaidi S J, Alnuaimi N A. Recent advancements in the nanomaterial application in concrete and its ecological impact[J]. Materials, 2021, 14(21): 6387.
[5] Zhang J, Shen C, Diao G. Application and microstructure properties of nanomaterials in new concrete materials[J]. Journal of Nanomaterials, 2022, 2022(1): 7396295.
[6] 刘俐亨. 桥涵结构物水泥混凝土配合比设计及其性能优化的探讨 [J]. 四川水泥, 2018, (02): 85+84.
[7] 任秋兵, 李文伟, 李明超, 等. 水工高性能混凝土配合比多目标智能优化设计与分析方法 [J]. 水利学报, 2022, 53(01): 98–108.
[8] 潘本金, 王蒙蒙. 高性能混凝土配合比优化设计及施工 [J]. 山西建筑, 2021, 47(22): 81–83.
[9] 陈忠章, 王晓妍, 段木子, 等. 钢纤维高性能混凝土配合比设计研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54(23): 2899–2902.
[10] 李东. 混凝土配合比设计中高性能减水剂应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(06): 123–126.