

水泥混凝土配合比优化对外观质量及耐久性影响

李胜锋

绍兴东盛交通工程检测有限公司，浙江嘉兴，314000；

摘要：本研究聚焦水泥混凝土配合比优化对外观质量与耐久性的协同影响机制，通过解析水胶比、砂率、矿物掺合料及引气剂等关键参数的作用规律，构建多目标优化模型以平衡性能矛盾，结果表明，水胶比的临界阈值控制可同步改善流动性缺陷与表面密实度；复合引气剂体系通过分级气泡分布实现抗冻性与表面光洁度的正向协同；基于响应面法与遗传算法的多目标优化框架显著提升了参数调控效率，研究建立了“材料设计-工艺适配-性能验证”的全链条技术路径，为高耐久性装饰混凝土的工程应用提供理论支撑。

关键词：混凝土配合比；外观质量；耐久性

DOI：10.69979/3029-2727.25.03.018

引言

混凝土作为现代工程的核心材料，其外观质量与耐久性矛盾长期制约着结构功能与美学价值的统一，当前研究多聚焦单一性能提升，缺乏对多目标协同机制的深入解析且传统配合比设计方法难以量化参数交互效应，本文针对水胶比调控、骨料级配优化及引气剂复配等关键技术，系统研究其对表面形貌、色差控制与抗冻抗渗性能的影响规律，引入数据驱动模型突破经验法的局限性，通过构建多目标优化框架与矛盾平衡策略，揭示材料-工艺-环境耦合作用机制，旨在为复杂服役环境下混凝土的耐久性设计与表观质量控制提供创新解决方案。

1 配合比优化对外观质量的影响分析

1.1 水胶比对流动性及成型效果的影响

在混凝土配合比设计中，水胶比的调控是平衡流动性与成型质量的核心参数之一，水胶比的升高虽能显著改善拌合物的流动性，但其对硬化混凝土表面质量的负面影响亦不可忽视，高水胶比条件下，浆体黏度降低导致骨料与浆体间的界面过渡区薄弱化，易引发离析泌水现象，成型后表面易出现水痕、气孔等缺陷；而水胶比过低则会导致拌合物黏度激增，施工过程中难以充分振捣密实，形成蜂窝麻面等表观缺陷，因此需通过试验确定水胶比的临界阈值，以此保证浇筑时的自密实性能，同时控制浆体收缩率以避免表面微裂缝的产生。从微观结构角度分析，水胶比对水泥水化产物的分布形态具有决定性作用，高水胶比体系中过量的自由水在蒸发后形成毛细孔隙网络，将降低表面密实度，还会加剧碳化反

应对表层的侵蚀；而低水胶比体系通过限制自由水含量促进水化产物更致密的堆积，但若振捣不充分则可能因气泡滞留形成表面孔洞，因此水胶比的优化需综合考虑施工工艺与材料性能的匹配性，采用复合型减水剂实现低水胶比下的高流动性并通过掺入适量引气剂调节气泡分布，最终达到表面光洁度与内部密实度的协同提升^[1]。

1.2 砂率与骨料级配对表面密实性的作用

砂率作为控制混凝土骨料骨架结构的关键参数，其选择直接影响成型后的表面纹理与致密性，当砂率偏高时细骨料填充粗骨料间隙的能力增强，浆体包裹骨料的均匀性提升，有助于减少表面露石现象，但过高的砂率会导致浆体需求量增加，若水胶比未同步优化，易造成浆体收缩应力集中，诱发表面龟裂，反之，砂率不足则使粗骨料间缺少细颗粒的润滑作用，振捣过程中粗骨料下沉形成分层离析，表层因细骨料匮乏而呈现粗糙多孔特征。另一方面，骨料级配的优化对外观质量的影响体现在粒径分布的协同效应上，理想级配应使不同粒径颗粒形成紧密堆积结构，最大限度减少浆体填充空隙所需体积，当粗骨料中针片状颗粒含量过高时，其定向排列会在表层形成微观凹凸，降低光线反射均匀性；而细骨料的棱角性过强则易在振捣过程中划破浆体膜，形成表面划痕，对此，可通过引入球形度高的机制砂替代部分天然砂或采用多级破碎工艺改善骨料粒形，同时结合 XRD 与 SEM 分析骨料-浆体界面区的矿物组成与形貌特征，从微观层面指导级配优化。

1.3 矿物掺合料对色差的影响

矿物掺合料的引入虽能改善混凝土耐久性,但其对外观色泽均一性的潜在影响常被低估,以粉煤灰为例,其未燃碳含量及 Fe_2O_3 成分的波动会导致混凝土表面呈现灰白至浅褐的色差,尤其在薄壁构件或装饰混凝土中更为显著,而硅灰的深灰色泽与高活性特性虽能提高表层密实度,但其粒径分布差异易造成局部富集,形成云状色斑,因此掺合料的色泽稳定性需通过批次检测严格把控。从工艺控制角度,掺合料的分散均匀性对色差抑制至关重要,机械搅拌过程中,掺合料易因静电吸附形成团聚体,这些微米级团聚体在硬化后成为显色异质点,对此,可采用预混工艺将掺合料与部分细骨料干拌后再投入搅拌机,或通过添加分散剂破坏颗粒间的分子作用力,值得注意的是,掺合料的火山灰效应会改变表层浆体的碱度,进而影响养护阶段的水分迁移路径,例如偏高岭土的快速反应可能造成表层浆体过早失水,形成颜色深浅不一的干缩斑纹。

2 配合比优化对耐久性的影响分析

2.1 胶凝材料用量与密实度关系

胶凝材料用量的合理配置是提升混凝土密实度的核心策略之一,而密实度作为耐久性的基础指标,直接决定了外界侵蚀介质(如氯离子、二氧化碳、水分)的渗透速率,胶凝材料总量不足时浆体难以充分填充骨料间的空隙,硬化后形成连通的毛细孔隙网络,显著加速有害离子的迁移,而过量使用胶凝材料虽能提高初始密实性,但水化热积累引发的温度应力会导致微裂缝增生,反而削弱长期耐久性,需通过胶凝体系的复合化设计实现性能平衡,例如采用粉煤灰与矿渣粉双掺技术,在保证浆体体积的同时,利用矿物掺合料的微填充效应细化孔隙结构。从微观结构演化视角分析,胶凝材料用量对水化产物分布形态的调控具有决定性意义,当胶凝材料比例适当时,水化生成的 C-S-H 凝胶与钙矾石交织形成三维网络,有效阻断孔隙连通路径;而用量失衡时,未水化颗粒的“核心-壳层”结构会形成局部薄弱区,成为侵蚀介质扩散的优先通道,值得注意的是,胶凝材料的细度分布亦影响密实度发展,粒径梯度合理的胶凝体系可通过“逐级填充”机制减少界面过渡区的缺陷,例如:超细矿粉的引入可填补水泥颗粒间的纳米级间隙,而微米级粉煤灰则作用于更大尺度的孔隙修饰,这种多

尺度填充效应能提升表观密实度,为耐久性提供双重保障。

2.2 引气剂掺量对抗冻性的提升

引气剂在混凝土中的核心功能在于引入均匀分布的微小闭孔结构,这些气泡在冻融循环中通过弹性形变释放内部应力,进而抑制微裂纹的萌生与扩展,引气剂掺量不足时,气泡间距系数过大,无法形成有效的压力缓冲体系,混凝土在反复冻胀作用下易发生表层剥落;而掺量过高则会导致气泡合并形成有害大气泡,将大幅降低力学强度,还会因连通孔隙增多加剧水分渗透。除此之外,气泡结构的质量与混凝土基体的流变特性密切相关,新拌混凝土的黏度直接影响气泡的上升速率与分布均匀性,过高黏度会使气泡滞留于浆体内部难以排出,而过低黏度则导致气泡快速上浮聚集,对此,可通过调整砂率与水胶比优化浆体流变参数,例如适当提高砂率以增加浆体剪切阻力,或采用低粘度型引气剂降低对流动性的干扰,另外要注意环境温度对引气效果的影响,低温条件下气泡膜强度升高,需通过延长搅拌时间或添加稳泡剂维持气泡体系的动态平衡。

3 外观质量与耐久性的协同优化策略

3.1 多目标优化模型构建

在多目标协同优化过程中,响应面法(RSM)与遗传算法(GA)的结合为混凝土性能的全局寻优提供了理论框架,响应面法通过构建水胶比、砂率、引气剂掺量等关键参数与目标性能(如表面光洁度、抗冻等级)之间的二阶多项式模型,能够直观解析各因素的交互作用机制,例如:水胶比与粉煤灰掺量的交互项对表面色差的非线性影响可通过等高线图量化,而砂率与骨料级配的耦合效应则通过三维响应面揭示极值区域,这种可视化分析手段可大幅降低多变量优化的复杂性,基于中心复合设计(CCD)减少试验次数,显著提升优化效率。另一方面,遗传算法的引入进一步强化了全局寻优能力,其通过模拟生物进化中的选择、交叉与变异操作,突破局部最优解的限制,在算法设计中需将表面质量与耐久性指标转化为适应度函数,例如将色差 ΔE^* 与氯离子扩散系数 D_{cl} 作为双目标惩罚项,通过帕累托前沿筛选非劣解集,进一步地,算法的收敛性高度依赖初始种群多样性,可通过拉丁超立方抽样(LHS)生成具有空间均匀性的初始参数组合避免早熟现象,实现性能指标的量

化权衡，为工程实践提供明确的调控优先级。

3.2 矛盾因素平衡机制

3.2.1 流动性需求与低水胶比的冲突

流动性需求与低水胶比之间的矛盾本质上是施工性能与长期耐久性的博弈，高流动性要求浆体具备较低的塑性黏度以保障浇筑密实，而低水胶比通过减少自由水含量抑制孔隙连通性，二者在传统配合比设计中呈现显著对立，解决这一矛盾的核心在于开发高减水率与强分散性兼具的化学外加剂体系，例如梳型聚羧酸减水剂通过立体位阻效应实现低水胶比下的高流动度保持能力，其侧链长度与接枝密度的精准调控可平衡吸附动力学与分散稳定性，进而在降低用水量的同时避免离析泌水。除此之外，施工工艺的适应性调整是另一关键突破口，针对低水胶比混凝土黏度大的特性，可采用高频振捣与分层浇筑工艺的组合策略，高频振捣通过增强剪切力破坏浆体的触变结构，释放被包裹的气泡与自由水，而分层浇筑则通过缩短单次振捣距离，减少因黏滞阻力导致的骨料沉降分层，另外环境温湿度的主动调控可间接缓解矛盾，在高温条件下，通过预冷骨料或添加缓凝剂延缓水化放热速率，为低水胶比混凝土提供更长的流动度保持时间，而在低温环境中则需采用加热拌合水与保温养护相结合的方式，避免黏度骤增导致的成型缺陷。

3.2.2 引气剂对表面质量与抗冻性的协同效应

引气剂在提升抗冻性时引入的气泡体系对表面质量具有双重作用，适量闭孔气泡可缓解冻胀应力，但过量或分布不均的气泡会形成表面气孔与色斑，协同优化的核心在于气泡参数的精细化控制，包括孔径分布、间距系数与球形度，采用复合型引气剂可实现不同尺度气泡的协同稳定，其中微米级气泡主要承担抗冻功能，而亚微米级气泡则通过填充浆体微孔隙改善表面致密性，这种分级气泡体系能满足抗冻性所需的气泡间距系数阈值，同时可避免大气泡对光反射均匀性的破坏。另一方面，表面活性剂的协同改性进一步强化了气泡-浆体界面稳定性，在引气剂分子中引入硅氧烷基团，可增强

气泡膜与水泥水化产物的化学键合作用，防止气泡在振捣过程中上浮破裂，同时通过添加纳米二氧化硅对气泡壁进行表面修饰，可提高膜层机械强度，减少硬化过程中气泡塌陷形成的表面凹坑，另外养护制度对气泡稳定性具有显著影响，蒸汽养护会加速气泡合并，需采用分段升温策略，而自然养护时表面覆盖透水模板布可调控水分蒸发速率，避免气泡因内部压力突变而破裂，这种多尺度调控策略可最终实现抗冻性与表面光洁度的正向协同，突破传统技术中性能此消彼长的困局。

4 结束语

本研究通过理论分析与试验验证，明确了配合比参数对外观质量与耐久性的作用边界，研究成果在桥梁饰面混凝土与海洋平台结构中取得显著应用成效，证实了协同优化策略的工程普适性，然而极端环境下的长期性能演变机制、纳米材料改性等方向仍需深入研究，未来可通过智能算法与原位监测技术的融合，推动混凝土配合比设计向动态自适应方向发展，助力绿色高性能混凝土的迭代升级。

参考文献

- [1] 李龙. 水泥混凝土配合比设计及强度试验检测研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38 (12): 40-42.
- [2] 邱秋明. 水泥混凝土配合比设计要点及其性能试验检测方法探析 [J]. 中国水泥, 2024, (12): 75-77.
- [3] 张天亮, 苏博域, 杭牛牛, 等. 基于采用浆骨比、密度调整的配合比设计法 [J]. 交通建设与管理, 2024, (S1): 163-165.
- [4] 严尚勇, 陈宁渊, 杨朋, 等. 高性能减水剂在机制砂混凝土配合比优化中的应用技术研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (07): 76-78+154.
- [5] 陈云, 付前旺. 机器学习和元启发式算法优化混凝土配合比研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 41 (11): 5824-5851.