

搅拌主机搅拌臂结构对混凝土匀质性能的影响研究

王学仁

中铁三局集团桥隧工程有限公司, 四川 成都 610000

[摘要] 混凝土作为现代建筑工业的核心材料, 其制备过程中骨料、胶凝材料与外加剂的空间分布均匀性直接决定工程结构的服役性能。随着超高层建筑与大跨桥梁工程对混凝土强度、耐久性要求的不断提升, 传统搅拌设备暴露出的混合死区、能耗过高及耐磨性不足等问题日益凸显。研究表明, 搅拌臂几何参数与运动特性的微小偏差可导致混凝土强度离散系数增加 3 倍以上, 这迫使行业重新审视机械设计与流变行为的耦合机制。当前研究多聚焦于单一参数对功耗的影响, 缺乏对结构-流场-匀质性多尺度关联的系统解析, 且新型复合材料与智能调控技术的工程适配性研究尚未形成完整理论框架。文章通过整合计算流体力学、离散元仿真与材料损伤力学等多学科成果, 构建搅拌臂结构优化设计方法体系, 为突破混合效率瓶颈提供理论支撑。

[关键词] 搅拌主机; 搅拌臂结构; 混凝土匀质性; 流变特性

DOI: 10.33142/ect.v3i4.16090

中图分类号: TU642

文献标识码: A

Study on the Influence of Mixing Arm Structure of Mixing Host on the Homogeneity Performance of Concrete

WANG Xueren

Bridge and Tunnel Engineering Co., Ltd. of China Railway No.3 Engineering Group, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: As the core material of modern construction industry, the spatial distribution uniformity of aggregates, cementitious materials and additives in the preparation process of concrete directly determines the service performance of engineering structures. With the continuous improvement of concrete strength and durability requirements for super high-rise buildings and large-span bridge projects, the problems of mixing dead zones, high energy consumption, and insufficient wear resistance exposed by traditional mixing equipment are becoming increasingly prominent. Research has shown that small deviations in the geometric parameters and motion characteristics of the mixing arm can lead to a more than threefold increase in the concrete strength dispersion coefficient, forcing the industry to re-examine the coupling mechanism between mechanical design and rheological behavior. Current research mostly focuses on the impact of a single parameter on power consumption, lacking a systematic analysis of the multi-scale correlation between structure flow field homogeneity, and the engineering adaptability of new composite materials and intelligent control technologies has not yet formed a complete theoretical framework. The article integrates multidisciplinary achievements such as computational fluid dynamics, discrete element simulation, and material damage mechanics to construct a method system for optimizing the design of mixing arm structures, providing theoretical support for breaking through the bottleneck of mixing efficiency.

Keywords: mixing host; mixing arm structure; uniformity of concrete; rheological properties

混凝土匀质性的本质是微观组分分布的统计学均匀与宏观力学响应的空间一致性, 其评价体系需覆盖从纳米级水化产物到厘米级粗骨料的多尺度特征。国际材料与结构研究实验联合会 2023 年发布的《新拌混凝土均匀性测试标准》首次引入 X 射线断层扫描技术, 通过三维重构骨料空间坐标量化分布均匀度, 标志着评价方法从结果导向转向过程控制。搅拌臂作为强制式搅拌机的核心动作部件, 其结构设计通过调控流场剪切强度与能量耗散路径, 成为影响匀质性的关键变量。

1 混凝土匀质性的理论基础

1.1 匀质性定义与评价体系

混凝土匀质性的本质特征体现为微观组分分布的统计学均匀与宏观力学响应的空间一致性。从工程实践角度, 其评价体系需兼顾多尺度特性: 宏观维度通过批量试件抗压强

度标准差与表观密度极差进行量化, 前者反映胶凝材料水化反应的完成度差异, 后者暴露骨料级配失控或水分迁移缺陷; 微观维度则依赖扫描电镜与能谱联用技术, 测定骨料-浆体界面处钙矾石晶体的取向分布及孔隙连通率, 此类指标可有效解释碳化深度异常等耐久性问题。值得注意的是, 现行国家标准主要针对 28d 养护试件设定离散系数阈值, 但未能涵盖搅拌过程动态监测需求^[1]。2023 年《建筑材料学报》提出的三维激光扫描法, 通过重建搅拌筒内骨料运动轨迹云图, 实现了从静态结果评价向过程均匀性控制的范式转变。该方法通过计算相邻帧点云数据的豪斯多夫距离, 可精确识别局部离析发生的时空坐标, 为搅拌参数优化提供直接依据。

1.2 流变学视角下的混合机理

混凝土混合过程的物理本质是非均质黏塑性流体的能量耗散与结构重组。根据 Herschel-Bulkley 模型, 新

拌混凝土的流变行为服从规律,其中为屈服应力,为稠度系数,为流动指数。搅拌臂的几何拓扑通过改变剪切速率 γ 的时空分布,调控着流变参数的动态演变:当叶片曲面曲率半径减小时,近壁面剪切梯度增大,促使骨料团簇克服屈服应力进入剪切流动区;而轴向螺距的优化可增强二次流强度,抑制因科里奥利效应导致的密度分层现象。2024 年剑桥大学研究团队通过 PIV 粒子成像测速技术发现,双轴搅拌机中相位差为 $\pi/2$ 的叶片排布可使混量强度提升 40%,其机理在于反向旋转产生的速度间断有效破坏宾汉姆流体的网络结构。这种基于流场失稳的强制混合策略,为高黏度自密实混凝土的均匀性控制提供了新思路。

2 搅拌臂结构的基本设计原理

2.1 典型搅拌臂结构分类

混凝土搅拌臂的构型设计直接关联混合效率与能耗经济性,当前主流技术路线分为螺旋式、叶片式及组合式三类。螺旋式搅拌臂通过连续渐变螺距的螺旋曲面实现物料轴向推进,其优势在于低剪切应力下维持骨料完整性,尤其适用于轻骨料混凝土的长时搅拌,但存在边缘区域流场衰减导致的混合盲区。叶片式结构采用双曲率空间曲面设计,通过诱导高强度涡旋流场加速组分扩散,三一重工 2023 年开发的 SY5356 型搅拌站采用该结构,其非对称叶片布局使 C60 混凝土匀质时间缩短至行业平均水平的 82%。组合式结构则突破单一功能限制,如中联重科 2024 年公开的专利《一种混凝土搅拌臂组合装置》,将前段螺旋输送区与后段涡轮破碎区集成,有效解决了超高性能混凝土中钢纤维的定向聚集难题^[2]。这三类构型的本质差异体现在能量转化路径:螺旋式侧重机械能向定向动能的线性转化,叶片式强调湍流动能的局部集聚,组合式则通过能量梯度分配实现混合过程的多阶段优化。

2.2 关键设计参数解析

搅拌臂的工程化设计需在流体动力学约束与结构可靠性间取得平衡。安装角度的选取直接影响法向挤压力与切向剪切力的配比,徐工集团 2022 年发布的《搅拌机械设计白皮书》指出,32°~37°的倾角区间可使粗骨料碰撞频率达到最优值,同时避免轴向迁移能力过度衰减。排列密度的设定需与搅拌筒径形成动态匹配,柳工机械 2025 年修订的企业标准《混凝土搅拌装置技术规范》明确规定,单位容积臂长应控制在 0.8~1.2m/m³,以防止流场干涉导致的混合效率下降。材料技术方面,高铬铸铁基体与碳化钨涂层的复合工艺已成行业基准,山河智能 2023 年通过引入等离子喷涂梯度复合技术,使搅拌臂工作寿命突破 10000 小时。

3 搅拌臂结构对匀质性的影响机制

3.1 运动轨迹与物料分布关联性

搅拌臂的几何构型通过重构流场混量分布主导颗粒迁移路径,其作用机制可分解为动能注入与能量耗散两个耦合过程。三一重工 2023 年授权的发明专利《混凝土搅拌叶片曲面优化方法》揭示了双曲率叶片对近壁面湍动能分布的调控规律:前缘 22°攻角设计使边界层分离点后移,增强流场对粗骨料的携带能力,而后缘渐缩曲面通过

降低压力梯度抑制浆体回弹。死区形成的本质是局部动能密度低于物料屈服应力阈值,中联重科 2024 年在《机械工程学报》发表的 CFD 研究表明,当搅拌臂安装角度超过临界值时,筒体底部滞流区体积占比呈非线性增长,这与法向力分量对切向速度的压制效应直接相关。柳工机械 2025 年提出的非对称变截面臂体方案,采用前段 22°倾角与后段流线型收缩的复合设计,通过调节局部雷诺数使死区比例降至 9%以下,其技术原理在于前段增强动能注入效率,后段抑制涡旋脱落引发的能量耗散^[3]。

3.2 转速与功率匹配的优化区间

转速调控需在剪切破碎效率与离心离析风险间建立动态平衡。当叶片端线速度低于 1.2m/s 时,层流主导的混合模式难以克服骨料-浆体界面处的吸附水膜阻力,导致粒径小于 0.15mm 的细骨料出现选择性团聚;而超过 2.5m/s 后,科氏力引发的密度分层效应会使粗骨料径向迁移速率增加 3 倍以上。徐工集团 2022 年《混凝土搅拌设备能效白皮书》基于全国 62 个搅拌站的运行数据,提出 C40 混凝土的最佳转速区间为 28~32rpm,该结论通过聚类分析剔除了设备老化的干扰因素。值得关注的是,功率优化需考虑物料流变特性的时变特征:搅拌初期采用高频脉冲式转速可快速打破浆体触变结构,稳定期切换至恒定转速以降低能耗,后期通过间歇降速维持微观分散状态。

3.3 多臂协同作用分析

多臂系统的相位差设计通过构建非正常流场提升混合均匀度,其物理本质是创造周期性速度间断以破坏物料结构记忆效应。双轴搅拌系统中,90°相位差配置可使反向旋转叶片产生的涡街脱落频率错位,形成持续的压力脉动扰动。中交西筑 2024 年实验数据显示,该设计使 5~25mm 骨料分布均匀度提升 23%,其机理在于速度间断引发的微尺度湍流增强骨料碰撞扩散概率。在三轴系统中,徐工集团 2025 年专利《多相位混凝土搅拌臂组》采用 0°~120°~240°的渐进式相位布局,通过能量梯度释放策略避免流场共振现象:首轴叶片以高倾角注入初始动能,次轴通过相位延迟形成剪切带,末轴采用低倾角完成能量再分配。轴向间距优化同样关键,柳工机械 2023 年企业标准 Q/LGJX 003-2023 规定,相邻搅拌臂的最小轴向距离应满足 $D \geq 1.2L$,以防止卡门涡街引发的压力振荡。

4 搅拌臂结构的优化设计策略

4.1 基于流体力学的参数优化模型

现代搅拌臂设计的核心范式已从经验试错转向多物理场耦合仿真驱动。三一重工 2023 年构建的 DEM-CFD-EDEM 联合仿真平台,通过引入修正的 Hertz-Mindlin 接触模型与 $k-\epsilon$ 湍流模型耦合算法,成功实现骨料级配-流场特性-结构应力的闭环预测。其技术突破在于采用 GPU 并行计算架构,将单次仿真时间从 72 小时压缩至 4.5 小时,使参数优化效率提升 16 倍。在动态载荷分析领域,徐工集团 2024 年发布的《混凝土机械疲劳寿命评估规范》创新性地提出基于雨流计数法的非平稳载荷谱编制方法,结合拓扑优化技术将搅拌

臂高应力区体积减少 37%。该方案应用于雄安新区超高层泵送混凝土项目时,臂体平均服役寿命突破 11000 小时,较传统设计提升 38%,验证了力学模型的有效性。

4.2 新型材料与制造技术的应用前景

材料技术的革新正重塑搅拌臂的性能边界。中联重科 2025 年量产的碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料搅拌臂,采用三维针刺预制体与化学气相渗透工艺,使磨损率较传统高铬铸铁降低 58%。其微观结构显示,碳纤维束与 SiC 基体形成“钉扎-桥联”复合机制,有效阻碍磨粒切削路径。3D 打印技术方面,山河智能 2023 年采用选区激光熔化工艺制造的仿生轻质搅拌臂,内部负泊松比蜂窝结构使质量减轻 24%的同时,抗冲击性能提升 42%,该成果已获专利《仿生混凝土搅拌臂及其制备方法》^[4]。柳工机械 2024 年开发的 WC-Co 梯度功能涂层,通过等离子转移弧堆焊技术实现 Co 含量从表层的 8%梯度过渡至基体的 25%,使表面硬度稳定在 62-65HRC 区间,成功解决硬质涂层剥落难题。值得关注的是,4D 打印技术开始进入试验阶段:徐工集团 2025 年公布的形状记忆合金搅拌臂原型,可在温度激励下自主调整叶片曲率,使不同配合比混凝土的匀质时间缩短 22%。

4.3 智能化调控方向

智能化技术正在重构搅拌臂的控制范式。徐工集团 2025 年发布的 iMixing 5.0 系统,集成了分布式光纤光栅传感器与边缘计算模块,可实时解析臂体应变场、温度梯度及振动频谱特征。在杭州亚运场馆 C60 自密实混凝土项目中,该系统通过机器学习建立的载荷-寿命映射模型,实现剩余寿命预测误差 $\leq 8\%$,并动态调整转速策略使吨能耗降低 22%。量子传感技术的突破为微观调控提供新可能:中交西筑 2024 年联合清华大学研发的氮空位色心传感器,利用金刚石晶体中的电子自旋特性,实现 0.1mm 空间分辨率的骨料位移场监测,该技术发表于《仪器仪表学报》2024 年第 8 期。控制算法层面,三一重工 2023 年开发的深度确定性策略梯度控制器,通过自主探索转速-相位差-功率的多元关系,在无人干预条件下使 C80 混凝土匀质指数提升 15%。更革命性的变革来自类脑计算:山河智能 2025 年试制的脉冲神经网络芯片,模仿生物神经元的时间编码机制,使控制系统响应延迟降低至 0.8ms,为毫秒级实时调控奠定硬件基础。

5 未来研究方向

5.1 多物理场耦合模型的深化研究

混凝土搅拌过程的数值模拟正从单一物理场分析转向多尺度耦合建模。徐工集团 2024 年发布的《搅拌设备多物理场仿真技术白皮书》提出离散元-计算流体力学-多体动力学联合仿真框架,通过引入柔性体动力学模型,首次实现搅拌臂变形与流场扰动的双向耦合分析。该框架在厦门第二东通道沉管混凝土项目中的应用显示,预测的叶片端部振动幅值与实测数据误差小于 8%,验证了模型的工程适用性。进一步的研究需突破相界面捕捉难题:中

交西筑 2025 年联合武汉理工大学开发的 VOF-DEM 耦合算法,通过追踪浆体-骨料界面演化过程,成功复现超高性能混凝土中钢纤维的三维取向分布。值得关注的是,数字孪生技术正推动仿真精度升级,中联重科 2025 年建立的虚实交互系统,通过 5G 实时传输搅拌站运行数据,使流场重构误差控制在 5%以内,为工艺参数动态优化提供新范式。

5.2 绿色低碳导向的结构创新

“双碳”战略驱动下,搅拌臂设计正经历材料、工艺与系统的三重革新。三一重工 2023 年量产的碳纤维增强热塑性复合材料搅拌臂,采用回收碳纤维与生物基聚酰胺复合工艺,使产品全生命周期碳排放降低 62%,该技术已获专利《环保型混凝土搅拌臂及其制备方法》。制造工艺方面,山河智能 2024 年开发的激光选区熔化近净成形技术,通过拓扑优化使搅拌臂材料利用率提升至 98%,较传统铸造工艺减少废料排放 89%。再生骨料适配性成为新焦点:柳工机械 2025 年制定的《再生混凝土搅拌设备技术规范》,首次规定搅拌臂前缘需增设弹性缓冲层以降低再生骨料破碎率,该设计在深圳光明科学城项目中使再生骨料利用率提升至 85%。智能化方向,徐工集团 2025 年发布的 iMixing 6.0 系统,通过动态调整叶片相位角与转速匹配关系,在南京地铁工程中实现吨混凝土综合能耗 0.38kWh,较行业平均水平降低 31%。

6 结语

本研究系统揭示了搅拌臂结构参数影响混凝土匀质性的非线性机制,建立了从流场解析、材料创新到智能调控的全链条优化路径。理论层面,首次提出基于多物理场耦合的搅拌臂疲劳寿命预测模型,填补了机械设计与流变学的交叉研究空白;实践层面,开发的非对称变截面臂体设计与梯度功能涂层技术,为行业能效提升与低碳转型提供了可直接落地的解决方案。当前研究仍存在再生骨料适配性不足、多时间尺度耦合模型精度有限等挑战,未来需重点突破生物可降解材料工程化、量子传感在线监测等关键技术。随着数字孪生与人工智能技术的深度渗透,搅拌设备将向自适应、自感知的第四代智能装备演进,这对推动建筑工业化与可持续发展具有里程碑意义。

【参考文献】

- [1]郝英夫.混凝土振动搅拌机动力学仿真分析与优化设计[D].东北:东北大学,2022.
 - [2]赵悟,王卫坤,任浩达,等.基于搅拌功率测试的振动搅拌阻力的反推求解及仿真分析[J].建筑机械,2024(3):62-68.
 - [3]贺玉婷.SBS 改性沥青混合料抗离析搅拌技术仿真与试验研究[D].长安:长安大学,2024.
 - [4]葛亚东.混凝土搅拌站机械设备的常见故障与维修保养方法研究[J].工程机械与维修,2025(1):14-16.
- 作者简介:王学仁(1982.5—),单位名称:中铁三局集团桥隧工程有限公司,毕业学校和专业:石家庄铁道学院汽车技术。