

## 商品混凝土搅拌站骨料含水率实时监测与配比自动修正技术研究

范学芳

沂南县鲁碧新型建材有限公司, 山东 临沂 276317

**[摘要]**露天堆放砂石骨料含水量非稳态是造成预拌混凝土成品性能的关键因素。依据骨料内部孔隙存水、表层附着水分两类水分形成原理,采用 2.45GHz 双方向微波检测设备,搭建能消除吸水滞后干扰的动态水分校正算法,整套监测系统分为现场感知、现场运算、数据存储三层运行结构。经实际使用检验,这套设备能精准把控砂石含水情况,快速调整搅拌加水用量,提升混凝土成型后的强度稳定性。同时配套搭建满足住建行业溯源规范的线上责任记录台账,清晰划分试验、生产中控、质量管控各岗位的数据管理范围,解决以往只重视现场检测设备、忽略纸质电子资料合规留存的管理漏洞。

**[关键词]**预拌混凝土;骨料二元含水率;正交极化微波;配合比动态修正

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20057

中图分类号: TU528

文献标识码: A

## Research on Real time Monitoring of Aggregate Moisture Content and Automatic Correction of Proportions in Commercial Concrete Mixing Plants

FAN Xuefang

Yinan Lubi New Building Materials Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276317, China

**Abstract:** The non steady state of moisture content in sand and gravel aggregates stored outdoors is a key factor affecting the performance of pre-mixed concrete products. Based on the principles of moisture formation in the internal pores of aggregates and surface adhesion, a dynamic moisture correction algorithm that can eliminate water absorption hysteresis interference is built using a 2.45GHz bidirectional microwave detection device. The entire monitoring system is divided into three layers of operation structure: on-site perception, on-site calculation, and data storage. Through practical use and testing, this equipment can accurately control the moisture content of sand and gravel, quickly adjust the amount of water added to the mixing process, and improve the strength stability of concrete after forming. At the same time, an online responsibility record ledger that meets the traceability standards of the housing and construction industry will be set up to clearly define the data management scope of each position, including testing, production control, and quality control. This will solve the management loophole of only focusing on on-site testing equipment and neglecting the compliance retention of paper and electronic materials in the past.

**Keywords:** pre-mixed concrete; binary moisture content of aggregate; orthogonal polarized microwave; dynamic adjustment of mix proportion

### 引言

预拌混凝土质量管控最核心的问题在于密闭储存的胶凝材料含水率稳定,而露天堆放砂石骨料含水率波动大<sup>[1]</sup>。试验室出具的配合比都是按骨料饱和面干状态计算,但潮湿天气里,砂石会通过毛细吸水、空气返潮、表面凝露三种方式不断吸水,粗细骨料含水变化还不同步,细砂子吸水速度是碎石的 4.2 倍,很容易造成实际搅拌配比达不到设计要求<sup>[2]</sup>。目前相关研究存在明显割裂:设备硬件相关研究不深究骨料吸水的微观原理,整套管控体系研究不贴合工地检测合规的岗位职责,台账资料类研究没能打

通不同系统数据不兼容的问题。基于此,探究商品混凝土搅拌站骨料含水率实时监测与配比自动修正技术。

### 1 骨料含水率波动机理与传统管控系统性缺陷

#### 1.1 骨料二元水分赋存及吸附滞后机理

砂石骨料内部水分按照流动性可划分为表面游离水、毛细吸附水、骨架结合水三类,其中仅表面游离水与大孔径毛细吸附水可参与水泥水化反应,属于有效拌合水<sup>[3]</sup>;微孔骨架结合水受范德华力束缚,无法脱离骨料孔隙,不参与水化,该部分水分是传统含水率检测扣水过量的核心诱因。同时骨料存在显著吸湿-脱湿吸附滞后效应:相同

环境温湿度下,骨料吸湿过程的平衡含水率比脱湿过程高 0.4%~0.7%,人工烘干抽检无法区分骨料当前干湿路径,静态含水率参数无法匹配实时吸湿状态,这也是相同含水率参数下混凝土坍落度波动依然超标的隐性原因。料仓内部含水率空间分布遵循毛细水梯度规律,料仓底部 0~1.2m 区域受地基土壤毛细水补给,含水率沿竖向每米递增 1.9%;料仓侧壁受仓壁散热冷凝影响,含水率比中心区域高 1.2%~1.5%。传统单点出料口取样属于下游均质化取样,无法反映料仓储料区真实含水率,抽样系统误差具备不可逆性,无法通过增加抽检频次消除<sup>[4]</sup>。

### 1.2 离线人工检测的合规与时效双重缺陷

现行骨料含水率法定检测方法包含电热鼓风烘干法、负压干燥法两类,其中负压干燥法为国家标准推荐的快速基准检测工艺,相较传统烘干法综合能耗降低 62%,但二者均为离线间断式检测,数据输出存在显著滞后性<sup>[5]</sup>。以县域商品混凝土搅拌站日均 1800m<sup>3</sup> 产能工况测算,砂石骨料含水率波动最短周期仅 12min,而人工完整检测流程耗时不少于 35min,检测结果天然存在时序滞后,仅可实现事后质量追溯,无法完成生产配合比前置动态修正。

传统人工检测体系存在三重溯源管控缺陷:其一,取样、称量、恒温干燥、数据演算全流程未关联温湿度等环境溯源参数,质量事故倒查阶段无法判定检测工况合规性;其二,纸质原始试验记录存在涂改、事后补录、日期倒签等合规风险,原始数据真实性难以闭环管控;其三,含水率检测数据采用线下人工传递模式,与中控系统投料时间戳时序偏移普遍超 20min,时序逻辑不匹配将直接导致配合比调整资料丧失合规效力

### 1.3 现有在线配比修正模型的底层漏洞

市面主流商用在线修正系统统一采用总含水率静态扣水模型,模型公式为 $W_t = W_0 - S \cdot w_s - G \cdot w_g$ ,直接扣除骨料全部含水,未区分有效游离水与无效结合水。在骨料脱湿工况下,微孔结合水占比提升至总含水率 22%以上,静态模型会过度扣除拌合用水,造成混凝土浆体流动性不足、包裹性变差;在吸湿工况下,毛细吸附水转化为游离水速率滞后于含水率检测速率,模型扣水不足,引发坍落度超标、离析。同时现有系统工控数据传输采用 TCP 协议,无线传输时延波动 5~12s,高产能连续出料时,时延会导致前序骨料含水参数匹配后序投料,形成时序错配。

## 2 无损含水率监测技术多维度定量对比

结合搅拌站高粉尘、宽温域(-12℃~42℃)、骨料级配波动、表面裹泥随机扰动四大恶劣工况,选取当前行业

三类主流无损在线监测技术,从检测穿透深度、环境温漂系数、裹泥干扰率、法定比对适配性、传输时延五项核心指标开展定量对比。

### 2.1 介电谐振传感技术

介电谐振技术依托骨料混合料等效介电常数与含水率的非线性关联测算水分,检测穿透深度 0~25mm,仅覆盖骨料表层颗粒。其核心缺陷为介电常数受骨料石英含量、裹泥矿物组分干扰极强,骨料含泥量每提升 1%,检测误差增加 0.53%,温漂系数达到 0.08%/℃,冬季低温工况下系统漂移严重。该技术仅适用于洁净均质机制砂,无法适配鲁南地区天然河砂含泥量 3%~5%的常规工况,且无法区分二元水分,模型适配性极差。

### 2.2 中子散射传感技术

中子散射通过氢原子散射计数测算水分,检测精度最高、穿透深度可达 500mm,不受骨料材质、粉尘干扰,但存在致命合规缺陷:设备属于放射性二类射线装置,需要生态环境部专项审批、年度辐射剂量检测、操作人员持证上岗,县域中小型搅拌站不具备审批条件,运维成本年均增加 12.8 万元,普及性极低,仅适用于大型央企自建搅拌站。

### 2.3 正交极化微波衰减传感技术

选用改进型正交极化 2.45GHz 工业微波传感,区别于普通单极化微波,采用正交收发天线抵消骨料颗粒散射杂波,检测穿透深度稳定 120mm,可覆盖料仓出料断面骨料全粒径层。温漂系数仅 0.012%/℃,通过内置热敏电阻动态补偿微波衰减系数;骨料表面裹泥≤6%时,水分检测干扰率低于 0.18%,完全满足天然砂石工况。同时该设备属于无源非放射性设备,适配县域搅拌站合规与成本双重需求。传感硬件布设采用断面分布式布设,细骨料出料皮带上下对称布设 2 组正交极化天线,粗骨料单侧布设 1 组天线,避免皮带物料偏载导致断面含水率检测偏差,采集频率统一为 5Hz,兼顾数据冗余与系统算力负荷。

## 3 考虑吸附滞后效应的配合比动态修正模型构建

### 3.1 二元水分参数界定

结合骨料吸附滞后机理,重新定义模型核心参数,全部参数可通过试验岗季度基准试验标定,实现岗位可控:

(1) 饱和面干含水率 $w_{sd}$ : 试验室标准环境下骨料饱和面干临界含水率,为固定常数;

(2) 实时总含水率 $w_t$ : 微波传感器实测骨料全水分含量;

(3) 吸附滞后系数 $\phi$ : 区分吸湿/脱湿路径的修正系数,吸湿工况 $\phi \in [0.82, 0.88]$ ,脱湿工况 $\phi \in [0.91, 0.96]$ ,

由试验岗通过干湿循环试验按月更新;

(4) 无效结合水占比 $\lambda$ : 微孔束缚水占总含水率的比例, 与骨料孔隙率正相关。

### 3.2 动态扣水模型推导

剔除无效结合水、吸附滞后偏差后, 粗细骨料有效游离水计算公式:

$$W_s = S \times w_{t1} \times (1 - \lambda_s) \times \phi_s \quad (1)$$

$$W_g = G \times w_{t2} \times (1 - \lambda_g) \times \phi_g \quad (2)$$

式中:  $W_s$ 、 $W_g$  分别为细、粗骨料有效游离水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $S$ 、 $G$  为饱和面干基准配合比骨料用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $w_{t1}$ 、 $w_{t2}$  为粗细骨料实时检测含水率。

考虑工控传输时延的实际拌合用水量修正公式:

$$W = W_0 - W_s - W_g + \Delta W_\tau \quad (3)$$

其中  $\Delta W_\tau$  为时延补偿水量, 依据边缘计算层实测数据传输时延  $\tau$  动态计算,  $\tau \leq 3s$  时  $\Delta W_\tau = 0$ ,  $3s < \tau \leq 8s$  时线性补偿  $0.3 \sim 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$  拌合水, 消除时序错配缺陷。

相较于传统静态模型, 本模型新增吸附滞后、无效结合水、时延补偿三重变量, 全部变量依托试验检测岗常规原材料试验标定, 无需额外购置检测设备, 贴合现有岗位工作内容, 解决以往模型参数脱离试验实操、无法落地的问题。

### 3.3 边缘计算层数据滤波与联动逻辑

皮带落料、扬尘遮挡会产生瞬时异常含水率数据, 本文采用中位数-卡尔曼双重滤波算法替代传统滑动平均滤波。中位数滤波剔除脉冲式异常数据, 卡尔曼滤波消除温漂随机噪声, 数据有效率提升。边缘计算层本地完成滤波、模型计算、时延补偿, 不依赖云端服务器, 断网状态下可独立稳定运行 90 天, 所有计算日志本地加密存储, 杜绝云端数据丢失风险。联动逻辑采用单向数据传输: 含水率传感数据单向传入边缘网关, 网关单向输出拌合水修正参数至中控 PLD 系统, 中控人员无权限修改原始传感数据, 从底层隔离人为篡改风险。

### 4 标准化对照试验与误差敏感性分析

设置等温恒湿标准试验室环境, 温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $60 \pm 3\%$ , 设置三组平行对照: 组 1 人工负压干燥抽检+手动扣水、组 2 普通单极化微波+静态扣水、组 3 正交极化微波+吸附滞后动态扣水, 每组 42 组平行试样, 开展误差敏感性分析。

#### 4.1 检测精度与时延对照结果

组 1 人工检测含水率平均误差  $\pm 1.07\%$ , 数据平均时

延 37.2min, 误差主要来源于抽样代表性不足与人工称量偏差; 组 2 普通微波检测误差  $\pm 0.41\%$ , 时延 4.8s, 误差来源于骨料散射杂波与吸附滞后未补偿; 组 3 优化方案检测误差  $\pm 0.24\%$ , 时延 2.3s, 满足国标  $\pm 0.5\%$  管控阈值。对比结果表明, 杂波干扰与吸附滞后是在线检测主要系统误差, 占总误差的 72%, 远高于温漂、粉尘等次要干扰。

### 4.2 混凝土性能稳定性对照

三组试样 1h 经时坍落度变异系数分别为 14.89%、7.26%、3.91%; 28d 抗压强度变异系数分别为 15.32%、6.74%、3.97%。组 3 性能稳定性大幅提升, 核心原因是动态模型精准匹配有效游离水, 锁定水胶比波动范围  $\leq 0.008$ , 同时时延补偿消除投料时序偏差。组 2 性能波动主要源于吸附滞后未补偿, 干湿循环工况下水胶比隐性漂移。

### 4.3 模型参数误差敏感性分析

通过单因素敏感性分析得出: 吸附滞后系数每偏差 0.05, 水胶比偏差 0.012, 强度偏差 3.1MPa; 无效结合水占比每偏差 1%, 水胶比偏差 0.005, 强度偏差 1.4MPa; 传输时延敏感性最低, 仅当时延超过 8s 才会产生显著性能影响。该结论明确试验岗参数标定优先级, 优先保证吸附滞后系数月度标定精度, 次要管控结合水占比, 优化岗位试验工作排布。

## 5 试验检测及资料管理岗位合规化管控体系

### 5.1 分层级基准比对标定制度

破除“在线监测替代人工试验”误区, 建立三级法定比对机制: 日度比对, 试验岗每日随机抽取 2 组骨料, 采用负压干燥法与在线实时数据比对, 核查日间漂移; 月度比对, 开展骨料干湿循环试验, 更新吸附滞后系数; 季度比对, 开展 20 组全域断面取样比对, 校准天线偏移误差。所有比对原始数据同步纳入试验台账, 作为在线监测数据合法使用的前置依据, 满足监管部门检测数据溯源核查要求。

### 5.2 异构数据统一溯源台账设计

针对中控生产数据、试验复核数据、传感原始数据异构问题, 设计统一溯源主键: 以混凝土生产任务单号为唯一主键, 绑定传感原始含水率数据、边缘网关修正日志、试验岗复核电子签名、投料执行数据四类异构数据。采用国密 SM4 对称加密算法, 数据写入后禁止删除、修改、覆盖, 仅可追加备注, 台账自动同步本地双备份与市级智慧砼监管平台, 消除政企数据两张皮。同时明确资料归档时效: 所有数据生产完成后 15min 内自动归档, 无需人工干预, 资料人工处理工时降低。

### 5.3 多场景异常权责处置流程

结合县域搅拌站常见四类异常工况, 划分岗位权责:

一是传感天线粉尘覆盖超标,由试验岗每日班前完成外观核验,自动触发除尘提醒;二是在线数据比对偏差超标,试验岗暂停自动配比修正,切换人工动态扣水,同步填报异常处置台账;三是监管平台数据断连,边缘层本地留存 90 天数据,网络恢复后自动补传,无需人工补录;四是骨料极端饱和吸湿,系统自动预警,试验岗评估骨料可用性,出具原材料停用意见,纳入原材料不合格处置台账。所有异常处置全程留痕,实现质量问题可溯源、可追责。

## 6 结论

商品混凝土搅拌站骨料含水率动态波动的核心诱因因为孔隙毛细吸附迟滞效应与微孔隙束缚无效化合水共存,传统全域总含水率静态减水补偿模型未对两类赋存形态水分做差异化解析,是引发混凝土力学性能离散化的底层机理。正交极化微波传感单元搭载杂波抑制算法与温漂补偿模块,检测计量误差稳定管控至 $\pm 0.24\%$ 区间。构建嵌入吸附迟滞修正系数、无效束缚水体积占比参量的动态补偿演算模型,可将混凝土抗压强度变异系数约束于 4%阈值以内,拌合体系水胶比波动幅值收敛至 0.008。搭建落

实一岗双责责任制的异源多维度数据全链路溯源电子台账,单监测站点成套改造成本相较于中子散射在线检测方案降幅超 90%。适配集料规格:公称最大粒径 $\leq 31.5\text{mm}$ 致密岩浆岩骨料,泥质杂质含量限值 $\leq 6\%$ 。

## [参考文献]

- [1]郭建军.搅拌站砂石骨料级配优化及杂质控制技术[J].四川水泥,2026(4):14-15.
- [2]彭庆彬.再生混凝土配合比设计及试验研究[J].江西建材,2025(7):41-43.
- [3]马明刚,贾金生,孟继慧,等.非接触式骨料含水率在线监测应用研究[C].北京:中国建筑工业出版社,2023.
- [4]杨小兵.论工程混凝土搅拌站技术现状及信息化发展趋势[J].散装水泥,2022(6):61-63.
- [5]刘俊岩.全自动在线测量细骨料含水率及其对混凝土性能影响的研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.

作者简介:范学芳(1984—),女,山东临沂人,毕业于青岛理工大学土木工程专业,现就职于沂南县鲁碧新型建材有限公司,从事试验检测及资料管理等。