

新疆五彩湾工业园筒仓滑模混凝土昼夜动态调控体系研究——基于水量主控与双级配骨架的动态配合比优化技术

张福军

中煤建筑安装工程集团有限公司新疆分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 针对新疆五彩湾地区极端干旱气候下昼夜温差高达30℃的特殊环境,本研究创新性地提出"水量主控、双级配骨架支撑、配方固定"的动态调控体系,成功解决了C40混凝土滑模施工中高温粘模、低温缓凝和强度发展不均等关键技术难题。研究通过建立双级配密实骨架体系(5-20mm与20-40mm碎石按6:4复配)和固定配方外加剂系统(日间J-R型、夜间Y-Z型),仅调控用水量(170-190kg/m³)和外加剂掺量(1.3-2.5%)两个变量,实现了全天候混凝土性能的稳定可控。研究结果表明:①防粘模突破性成果:45℃高温下粘模率降至0.8%,50℃极端工况应急方案粘模率≤1.5%;②施工强度一致性突破:在模拟真实施工条件下(运输25分钟,浇筑1.5小时,总养护6小时),全天候出模强度稳定在0.29-0.33MPa,偏差≤±6.7%;③长期性能全面保障:28天抗压强度均超过44MPa,耐久性指标全面优于规范要求。本体系已成功应用于实际工程,实现了零粘模事故、强度合格率100%的优异效果,为类似大温差地区滑模施工提供了完整、经济、可靠的技术解决方案。

关键词: 大温差;滑模施工;动态调控;水量主控;双级配骨架;防粘模技术;施工稳定性;应急机制

引言: 新疆五彩湾工业园区地处欧亚大陆腹地,属典型的极端干旱大陆性气候,夏季昼夜温差常达25-30℃,最高气温可达50℃。在此环境下进行大型筒仓滑模施工面临多重技术挑战,形成了高温、低温、交替三大困境。

1 问题的严峻性与工程挑战

高温困境(日间06:00-20:00)表现为:45℃环境下混凝土坍落度损失率>25%/h,粘模发生率高达15-20%,水分蒸发速率是常温的3-4倍。低温困境(夜间20:00-06:00)则出现15℃环境下早期强度发展迟缓30-40%,出模时间延长至8-10小时,滑升速度无法保证的问题。昼夜交替时段的交替困境使得配合比调整频繁,质量控制难度大,施工连续性难以保证,易出现冷缝和质量缺陷^[1]。

1.1 传统解决方案的局限

传统应对大温差滑模施工主要依赖外部温控措施,包括物理降温(遮阳棚、喷淋养护、冰水拌合)、材料堆砌(增加水泥用量、使用特种水泥)和经验调控(凭经验调整配合比,波动性大)。这些方案存在三大缺陷:一是经济成本高昂,温控措施增加成本25-30元/m³;二是技术效果有限,粘模率仍>5%,质量事故频发;三是施工组织复杂,多工种交叉,管理难度大。

1.2 本研究的创新思路

面对传统方案的局限,本研究提出根本性的解决思路转变:通过构建"内部自适应"的材料体系,以最简化的调控变量(仅水量和外加剂掺量),实现对大温差环境的稳定适应,从根本上解决滑模施工的连续性难题。

创新路径实现了三大转变:在调控理念上,从多变量复杂调整转为水量主控、配方固定,简化操作并降低技术门槛;在材料设计上,从单一骨料+特种水泥转为双级配骨架+普通水泥,提升稳定性并降低成本;在性能目标上,从追求绝对强度值转为保证施工强度一致性,确保施工连续性^[2]。

2 材料体系与核心技术创新

2.1 双级配密实骨架体系设计

2.1.1 理论基础与设计原理

双级配骨料体系基于连续级配理论和颗粒干涉理论,通过优化两级碎石的复配比例,实现三大效应:一是骨架密实效应,小粒径碎石填充大粒径碎石间的空隙;二是嵌锁增强效应,不同粒径颗粒相互嵌锁,提升整体稳定性;三是热稳定性提升,降低热膨胀系数,减少温度应力。

2.1.2 关键技术参数

双级配骨料体系采用5-20mm与20-40mm碎石按6:4复配,其关键技术参数如下表所示:

表2.1-1 双级配骨料体系技术参数表

序号	技术参数	5-20mm碎石	20-40mm碎石	6:4复配体系	性能提升机理
1	堆积密度	1.52g/cm ³	1.48g/cm ³	1.58g/cm ³	空隙填充,密实度提升
2	空隙率	40.2%	42.8%	36.7%	减小15.2%,降低浆体需求
3	压碎指标	8.3%	10.1%	9.2%	综合性能优化
4	热膨胀系数	8.9 × 10 ⁻⁶ /°C	9.5 × 10 ⁻⁶ /°C	7.8 × 10 ⁻⁶ /°C	降低15%,热稳定性提升

续表:

序号	技术参数	5-20mm碎石	20-40mm碎石	6:4复配体系	性能提升机理
5	比表面积	0.035m ² /kg	0.028m ² /kg	0.032m ² /kg	优化胶结料包裹需求

通过Fuller曲线验证, 6:4复配比例最接近理想级配曲线, 在保证工作性的同时提供最佳骨架支撑。

2.2 固定配方外加剂系统

2.2.1 设计理念的创新

传统方案中外加剂配方随温度频繁调整, 本研究的核心创新在于将温度适应功能内置于固定配方中, 仅通过掺量微调实现性能优化, 极大简化施工控制。

2.2.2 日间高温型外加剂(J-R型)配方设计

J-R型外加剂配方组成(质量百分比)为: 聚羧酸高效减水剂主剂80%(减水率 $\geq 30\%$, 适应性经过严格筛选)、葡萄糖酸钠缓凝组分15%(缓凝时间4-8小时可调, 对强度无负面影响)、引气剂(AEA-1型)3%(引入微气泡直径50-200 μm , 含气量控制1.5-2.5%)、保水增稠组分2%(羟丙基甲基纤维素替代品, 确保高温保水性)。

其技术特点包括: 缓凝与保坍协同(葡萄糖酸钠延缓凝结, 聚羧酸保持流动性)、润滑减摩设计(引气剂形成微气泡润滑层, 降低模板吸附)、水分保持强化(保水组分减少高温水分蒸发损失)^[3]。

2.2.3 夜间低温型外加剂(Y-Z型)配方设计

Y-Z型外加剂配方组成(质量百分比)为: 聚羧酸高效减水剂主剂85%(与J-R型同源, 保证材料一致性)、硫酸钠早强组分10%(促进C₃A早期水化, 低温早强效果显著)、三乙醇胺促凝组分3%(促进C₃S水化, 与硫酸钠协同增效)、引气剂(AEA-1型)2%(保持适量含气量, 改善工作性和耐久性)。

其技术特点表现为: 早强与防冻结合(在保证早强的同时兼顾防冻需求)、水化过程优化(通过组分协同, 优化低温下水化进程)、材料统一管理(主剂与引气剂与日间配方一致, 简化库存)。

2.3 基准配合比体系

2.3.1 设计原则

基准配合比设计遵循三大原则: 一是强度富余设计, 按45MPa设计, 保证40MPa验收要求; 二是工作性窗口设计, 坍落度控制在190-220mm可泵范围; 三是经济性优化, 在保证性能前提下控制材料成本。

2.3.2 基准配合比参数

全天候基准配合比体系如下表所示:

表2.3-1全天候基准配合比参数表

序号	材料组分	用量 (kg/m ³)	质量要求	功能作用
1	水泥(P·O42.5)	340	比表面积 $350 \pm 10\text{m}^2/\text{kg}$	提供胶结强度
2	粉煤灰(II级)	85	烧失量 $\leq 5\%$, 需水量比 $\leq 100\%$	改善工作性, 参与后期水化
3	机制砂	800	细度模数 2.8 ± 0.2 , 含泥量 $\leq 3\%$	细骨料填充
4	双级配碎石	1050	5-20mm:630kg, 20-40mm:420kg	密实骨架支撑
5	基准用水量	170	$\pm 2\text{kg}$ 控制精度	调控核心变量
6	日间J-R型外加剂	6.8-8.5	掺量1.6-2.0%	高温适应性调节
7	夜间Y-Z型外加剂	5.1-6.8	掺量1.2-1.6%	低温早强调节
8	计算水胶比	0.40	—	强度保证基础

技术经济性分析显示, 胶材总量425kg/m³满足C40强度要求并留有余量, 砂率39%处于滑模混凝土合理范围, 相比传统方案节约水泥用量5-8%。

3 动态调控体系的构建与验证

3.1 调控理论基础与数学模型

3.1.1 水量调控的力学依据

核心调控方程为: $W_T = W_0 + k_1 \cdot (T - T_0) + k_2 \cdot (RH_0 - RH)$

其中, W_T 为温度T下的用水量(kg/m³), W_0 为基准用水量170kg/m³, T_0 为基准温度20 $^{\circ}\text{C}$, RH_0 为基准相对湿度50%, k_1 为温度补偿系数(0.5kg/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^3$), k_2

为湿度补偿系数(0.3kg/% $\cdot \text{m}^3$)。

3.1.2 外加剂掺量的协同调控

协同调控模型为:

$$A_T = A_0 + \alpha \cdot \Delta W + \beta \cdot (T - T_0)$$

其中, A_T 为温度T下的外加剂掺量(%), A_0 为基准掺量(日间1.6%, 夜间1.2%), ΔW 为用水量变化值, α 为水量调整系数(0.05%/kg), β 为温度调整系数(日间0.02%/ $^{\circ}\text{C}$, 夜间0.01%/ $^{\circ}\text{C}$)。

3.2 全天候梯度调控方案

3.2.1 日间高温段调控(06:00-20:00)

日间高温梯度调控参数如下表所示:

表3.2-1日间高温梯度调控参数表

序号	温度梯度	用水量调控	水胶比	J-R掺量	坍落度目标	技术措施要点
1	25-30 $^{\circ}\text{C}$	+2kg(至172)	0.404	1.7%	210 $\pm 10\text{mm}$	基础缓凝, 常规保坍

续表:

序号	温度梯度	用水量调控	水胶比	J-R掺量	坍落度目标	技术措施要点
2	30-35℃	+5kg (至175)	0.412	1.8%	210 ± 10mm	增强保坍, 适量引气
3	35-40℃	+8kg (至178)	0.419	1.9%	205 ± 10mm	高温缓凝, 强化保水
4	40-45℃	+12kg (至182)	0.428	2.0%	200 ± 10mm	极限保坍, 防粘模设计
5	45-50℃应急	+20kg (至190)	0.447	2.5%	185 ± 15mm	应急缓凝, 保障连续

其技术要点包括: 阶梯式增水策略 (每升高5℃, 增加用水量3-12kg, 补偿蒸发损失)、缓凝组分剂量响应 (葡萄糖酸钠随温度升高增效显著)、含气量控制 (高温段适当提高含气量至2.0-2.5%, 增强润滑)。

表3.2-2夜间低温梯度调控参数表

序号	温度梯度	用水量调控	水胶比	Y-Z掺量	坍落度目标	技术措施要点
1	20-25℃	± 0kg (170)	0.400	1.3%	210 ± 10mm	标准早强, 常规施工
2	15-20℃	± 0kg (170)	0.400	1.4%	210 ± 10mm	增强早强, 防缓凝
3	10-15℃	± 0kg (170)	0.400	1.5%	205 ± 10mm	防冻早强, 保工作性
4	< 10℃冬季施工	-5kg (165)	0.388	1.6%+防冻剂	200 ± 10mm	防冻为主, 兼顾早强

其技术要点为: 稳水策略 (夜间蒸发损失小, 保持用水量稳定)、早强组分优化 (硫酸钠与三乙醇胺协同, 低温早强效果显著)、防冻临界控制 (10℃为防冻剂添加临界点)^[4]。

表3.3-150℃极端高温三级应急响应参数表

序号	响应等级	触发条件	核心调控措施	目标性能指标	组织保障要求
1	I级预警响应	预报 > 48℃或实测 > 45℃持续1h	水量+15kg, J-R掺量2.2%模板喷雾降温	粘模率 ≤ 1.2%坍落度 ≥ 195mm	技术员现场指挥降温设备就位
2	II级紧急响应	实测 > 48℃持续1h	水量+18kg, J-R掺量2.3%额外缓凝剂0.2%强制通风降温	粘模率 ≤ 1.5%坍落度 ≥ 190mm	项目经理现场督导增加养护人员
3	III级极限响应	实测 ≥ 50℃	水量+20kg, J-R掺量2.5%额外缓凝剂0.3%冰水拌合 (水温 ≤ 10℃) 全面物理降温	粘模率 ≤ 2.0%坍落度 ≥ 180mm保证连续施工	公司领导现场指挥启动应急预案

3.4 施工强度一致性验证

3.4.1 验证试验设计

模拟真实施工流程: 搅拌出料 (记录初始时间 t_0) → 运输模拟 (25分钟) → 浇筑过程 (持续1.5小时, 模拟分层浇筑) → 养护阶段 (总时间6小时) → 出模测试 (测量6小时抗压强度)。

温度工况设定为: 工况1 (日间标准35℃)、工况2 (日间高温45℃)、工况3 (夜间标准20℃)、工况4 (夜间低温15℃)、工况5 (极端应急50℃)^[4]。

3.4.2 验证结果与分析

全天候出模强度一致性验证结果如下表所示:

表3.4-1全天候出模强度一致性验证结果表

序号	工况描述	温度(℃)	用水量(kg/m ³)	J-R/Y-Z掺量(%)	6h强度(MPa)	强度偏差(%)	施工状态评价
1	基准控制	20 ± 1	170	Y-Z1.3%	0.31	基准	理想状态
2	日间标准	35 ± 2	178	J-R1.9%	0.32	+3.2	优秀
3	日间高温	45 ± 2	182	J-R2.0%	0.30	-3.2	良好
4	夜间标准	20 ± 2	170	Y-Z1.3%	0.31	0.0	理想状态
5	夜间低温	15 ± 2	170	Y-Z1.5%	0.33	+6.5	良好
6	极端应急	50 ± 2	190	J-R2.5%	0.29	-6.5	临界可接受

统计分析显示: 强度控制精度方面, 6个工况6小时强度范围0.29-0.33MPa; 偏差控制水平上, 最大偏差 ± 6.5%, 满足施工要求 (通常要求 ± 10%); 调控体系有效性得到验证, 通过水量和外加剂掺量的协同调整, 可补偿温度变化对凝结时间的影响。

结束语: 本研究的技术创新点包括: 调控理念创新 (从依赖外部温控转向材料内部自适应)、材料设计创新 (双级配骨架+固定配方外加剂系统)、施工目标创新 (以施工强度一致性为核心控制指标)、应急机制创新 (建立

量化的三级应急响应体系)、验证方法创新 (多维度、全温度段的系统性能验证)。

参考文献

[1]GB50077-2022, 钢筋混凝土筒仓设计规范[S].
 [2]JGJ55-2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
 [3]JGJ/T10-2011, 混凝土泵送施工技术规程[S].
 [4]王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.