

建筑施工中混凝土结构裂缝控制技术的优化与实践研究

苑国华

中粤建设集团（海南）有限公司，海南海口，570100；

摘要：混凝土结构裂缝问题在建筑施工中广泛存在，严重影响结构安全与耐久性能，文章研究了不同阶段裂缝的成因类型，分析了配合比优化、养护工艺与支模体系等关键控制技术，探讨了裂缝控制措施在高温环境与大体积混凝土施工中的工程应用成效。研究结果可为裂缝控制技术路径优化提供理论支撑与实践参考，提升结构施工质量与全过程技术管控能力。

关键词：混凝土裂缝；成因分析；控制技术；养护措施

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.013

1 裂缝类型及成因分析

1.1 施工阶段裂缝的表现与诱因

施工阶段常见裂缝表现为浇筑初期产生的塑性收缩裂缝、中后期因沉降不均引发的结构裂缝以及由水化热梯度诱导的温度裂缝，塑性收缩裂缝主要发生在混凝土初凝前后，因表面失水速率高于内核补水速率形成张拉裂缝，常沿钢筋走向分布^[1]。沉降裂缝与模板间隙或钢筋分布不均有关，模板沉陷或钢筋穿插区阻碍下沉路径均易产生该类裂缝。大体积混凝土则易因温升不均形成内部热应力集中，引发开裂风险，尤其在交界面与角部位置更为明显。

1.2 使用阶段裂缝的演变机制

使用阶段裂缝具有缓慢发展与累积变形的特征，主要源于服役荷载长期作用下的应力重分布、干湿交替引发的体积变化以及徐变效应造成的结构附加位移^[2]。梁板类构件在承受恒载与活载反复作用后，结构内部拉压区出现疲劳微裂纹，其发展受钢筋锈蚀程度与混凝土保护层厚度影响显著。墙体及楼板裂缝则多与收缩徐变过程中的约束释放不均有关，钢筋与混凝土界面粘结性能弱化后，易形成贯通裂缝或沿筋裂缝。构造不合理、荷载偏心或支座沉降也会诱发区域性应力集中，从而导致开裂扩展。

1.3 环境因素对裂缝发展的影响

环境因素作为裂缝扩展的重要外部条件，在高温干燥、低温冻结与湿度循环等场景下显著改变混凝土的力

学行为与体积稳定性^[3]。高温气候下表面蒸发加剧造成干缩变形集中，引发表层横向裂缝；雨季湿干交替周期使得混凝土反复膨胀与收缩，导致微裂纹交叉连通形成面状损伤。寒冷地区的冻融循环作用在孔隙水结冰膨胀机制下加速开裂进程，尤其对未封闭毛细通道区域影响更为剧烈。氯离子侵蚀、碳化反应与硫酸盐侵入亦会诱导界面裂缝及内部结构破坏，进一步降低裂缝控制的稳定性。

2 裂缝控制关键技术路径

2.1 配合比优化对裂缝控制的作用

混凝土配合比参数直接影响混合物的干缩变形、温升速率与内部孔隙率等关键指标，降低水胶比有助于减少自由水蒸发带来的体积收缩，并提高胶凝材料的致密性，从而降低干缩裂缝的发生概率^[4]。适当提高矿物掺合料比例，尤其是粉煤灰与矿渣粉，可延缓水化放热速率，降低水化热峰值，抑制因温差梯度造成的热裂缝风险。在骨料级配方面，优化粗细骨料比例可减少浆体用量，降低界面过渡区弱化效应，使得结构整体收缩应力更均匀释放。

项目试验结果显示，不同水胶比及掺合料组合对抗裂性能的影响具有明显差异。在养护温度 25℃、湿度 70% 的恒定条件下，通过设置 5 组配合比方案，对比其收缩变形值、劈裂抗拉强度与水化温升峰值变化规律，明确了低水胶比+双掺型设计对控制早期裂缝具有显著作用。以下表 1 给出具体试验数据：

表 1 不同配合比下混凝土裂缝控制性能对比表

配合比类型	水胶比	掺合料组成	收缩变形值 ($\times 10^{-6}$)	水化热峰值 ($^{\circ}\text{C}$)	劈裂抗拉强度 (MPa)
普通配比	0.45	无掺合料	420	68.5	2.43
粉煤灰单掺配比	0.4	粉煤灰 20%	360	61.2	2.59
矿渣粉单掺配比	0.38	矿渣粉 25%	340	59.8	2.62
粉煤灰+矿渣双掺配比	0.36	粉煤灰 15% + 矿渣粉 15%	290	55.4	2.75
高强硅灰掺合抗裂配比	0.34	硅灰 10%	265	58.6	2.81

随着水胶比逐步降低,混凝土收缩变形值显著减小,劈裂抗拉强度稳步提升。双掺粉煤灰与矿渣粉的配比在控制水化热和提高抗裂性能方面表现较优,综合性能最为平衡。硅灰掺合虽然强度最高,但其水化热略高,适用场景需结合结构热控要求判断。

2.2 养护工艺改进的技术措施

为抑制早期收缩裂缝与温度应力裂缝,需从养护时效性、保水性能与温控调节三个维度构建针对性养护策略:

(1) 保湿覆盖法:在终凝前及时覆盖湿草袋或麻布,配合连续洒水措施,可显著降低表面蒸发速率,控制表层张拉变形,尤其适用于露天结构板、屋面板等水平构件;

(2) 喷雾养护系统:设置定时喷雾装置维持表层湿润状态,尤其在高温施工阶段能有效控制温度梯度不均所致表层开裂,适合大面积持续性浇筑区域

(3) 控温围护养护:在混凝土初期水化阶段设置围护棚体并采用保温材料(如岩棉板或复合膜)包裹,稳定内外温差并延缓温升速率,特别适用于大体积混凝土、结构转角部位及基础筏板区域。

(4) 智能化养护监测:应用内嵌式温湿传感器对养护期混凝土表层与芯部温湿变化进行实时采集,通过数据平台反馈控制洒水频率与保温时长,提升养护过程的响应性与精准性;

(5) 阶段性延时养护策略:针对多层施工节奏,可根据结构强度发展曲线调整拆模与继续养护时点,避免强度尚未充分发展即进入干缩阶段,造成裂缝隐患;

(6) 养护剂喷涂法:在不具备连续洒水条件的立面或遮挡区域,使用低挥发高成膜性能的养护剂进行喷涂封水处理,有效降低水分散失并保持界面湿润^[5]。

2.3 模板与支撑体系对结构变形的调控方法

模板系统作为施工阶段荷载传递与结构定型的直接载体,其支撑刚度、布设方式与承压能力直接影响混凝土成型质量与结构受力路径的稳定性^[6]。高位梁板结构若模板支撑过稀或受力不均,极易在浇筑过程中发生下沉变形,形成应力不均区,诱发板底裂缝。采用高强度可调节钢支撑与纵横交错布置形式,可有效提升模板体系整体刚度,并保持构件轴线稳定,减少早期因结构挠度差异造成的开裂风险。对墙体结构,应确保模板接缝严密,避免局部胀模或爆模影响界面过渡带性能。

对复杂结构部位如转角区、节点区与高跨度梁段,应结合荷载分布进行分区支撑设计,并配置临时限位构件防止侧移位累积。混凝土浇筑过程中支撑体系需动态检测侧压力变化,控制浇筑节奏与层高,避免瞬时侧压集中导致模板错位诱发斜裂缝。在高温季节施工中,

还应控制钢模板热膨胀变形,采用缓释模板脱模剂并设计弹性缝隙释放热应力,防止温度差变形诱导结构剪应力集中。加强模板体系刚度与变形控制,是保障裂缝控制效果的关键辅助措施。

3 工程实践中的技术应用

3.1 高温季节施工中的裂缝控制策略

高温施工环境下,混凝土早期水化热释放加速、表层水分蒸发强烈,极易形成温度裂缝与塑性收缩裂缝。控制策略需在浇筑时间、原材料温度、养护模式等环节协同展开。通过调整施工工序,将主要浇筑作业安排于夜间或清晨低温时段,可有效降低环境温差对混凝土水化过程的干扰^[7]。搅拌过程中采用冷却水与遮阳降温技术控制出罐温度不超过 28℃,可显著降低内部温升速率。运输与泵送阶段配备遮光布覆盖与冷却喷雾措施,确保混凝土入模温度稳定,避免因温差冲击引发表面开裂。

在成型与养护阶段,采用高反射保温材料包裹模板及裸露混凝土表面,有助于缓释环境热辐射影响。对高强混凝土结构构件,在浇筑后 24 小时内布设带状水管循环控温,结合智能喷雾系统维持表层湿度,可控制表面与核心温差低于 15℃。针对楼面与桥面薄构件,应设置临时遮阳棚体并延长养护周期,确保早期强度与水化过程同步发展,防止表面水分骤失导致张拉变形集中。保温与保湿措施需匹配结构位置、混凝土强度等级与施工进度,形成可控的热湿环境闭环调节机制。

3.2 大体积混凝土裂缝分区控制技术

大体积混凝土结构因体积大、散热慢、养护难度高,水化热积聚易导致核心温度远高于边缘区域,形成不均衡的温度场,从而产生温差收缩应力。该类应力若未及时释放,在温控不到位时极易引发贯穿性热裂缝,尤其在施工缝、墙体转角和基础底板下部等热应力集中区域表现显著。裂缝分区控制的核心在于分层分仓浇筑与冷却系统协同布局,使热量释放过程具备节奏性与区域性,进而降低大体积结构内部热应力峰值与梯度效应。

在分层施工中,需根据结构厚度与截面形式设定合理分层厚度,常规筏板推荐每层控制在 1.0 - 1.2 m 范围,浇筑间隔时间不低于 6 小时,确保下层温度充分释放后再浇上层,减少热量叠加效应。分仓区划应结合结构模数与钢筋布置设置隔离缝,设缝宽度一般控制在 20 - 30 mm,缝间设止水钢板并结合二次振捣技术压实缝边,增强缝区密实性。冷却管应埋设于混凝土核心位置,沿水平与竖向交错布设,端部布设换热排气装置并结合冷却回水系统动态调节流速,控制核心区域水化温升峰值在 60℃ 以下。施工缝设置需兼顾结构受力、温度释放路径与施工连续性,严禁在承压区或应力交界部位设置水平缝,以防热应力在缝边激化集中。

以下表 2 为典型筏板结构在不同冷却与分层控制方 案下的热力响应与裂缝表现数据：

表 2 大体积混凝土筏板结构冷却控制效果对比表

冷却方案类型	核心温度峰值（℃）	表面温度（℃）	最大温差（℃）	裂缝长度总计（m）
无冷却系统、一次性浇筑	74.2	42.8	31.4	17.2
单层分仓+风冷养护	66.5	44.3	22.2	9.5
分层浇筑+冷却管布设	61.8	45.1	16.7	3.8
分层+冷却管+自动控温养护	59.4	46	13.4	1.1

未设冷却管方案最大温差超过 30℃，裂缝延伸严重；而采用分层+冷却系统+自动养护组合策略后，最大温差控制在 13.4℃ 以内，裂缝长度减少至 1.1 m，验证了裂缝分区控制路径的热应力缓解效果。

3.3 已有工程案例的技术成效反馈

在合肥市轨道交通 4 号线某地下车站工程施工过程中，底板混凝土结构厚度达到 1.8 m，单次连续浇筑方量超过 1200 m³，项目地处中高温多雨气候区，施工季节温度波动剧烈，结构中心与边界热交换效率差异明显。为降低热裂缝风险，项目团队设计实施分层分仓浇筑策略，将整体筏板划分为 4×6 个浇筑单元，每个单元间设预留施工缝并布置止水钢板。每仓浇筑厚度不超过 1.2 m，间隔 8 h 进行下仓作业，保障水化热释放空间。

混凝土采用低水胶比 0.36、粉煤灰矿渣双掺的配合比方案，并预埋三层冷却管系统，设在筏板下、中、上三层高温敏感区。冷却系统注入 15℃ 冷却水，循环时间约 72 小时，结合喷雾装置控制表层养护温度低于 35℃，核心与表层最大温差维持在 8℃ 以内。施工期间布设 26 个裂缝监测点，涵盖角点、边界与中心区域。结构龄期 28 d 后回弹检测与裂缝复测结果表明，筏板开裂点仅集中于混凝土收缩约束边缘区域，总裂缝长度与宽度显著低于设计允许值。裂缝监测结果与温控数据汇总如下图 1 所示，反映了各关键区域在裂缝宽度、裂缝长度及温度梯度控制方面的实测效果。

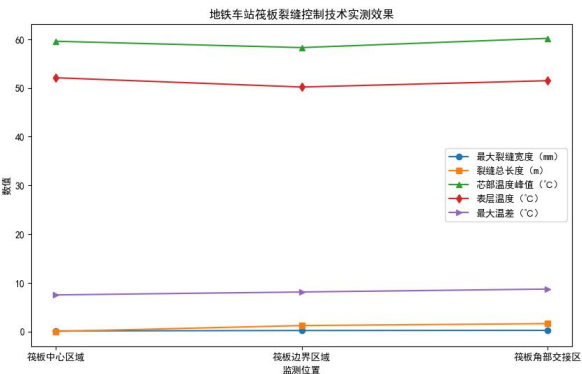


图 1 地铁车站筏板裂缝控制技术实测效果
该项目在复杂热湿条件下通过“配合比一分区施

工—控温管布设”三环联动策略，有效控制了结构内部热裂缝发展，裂缝宽度最大值为 0.21 mm，远小于设计警戒值 0.3 mm。中心区域未出现任何裂缝，边界与角部区域仅存在局部细微非贯通性裂缝，结构整体裂缝控制效果符合重载地铁底板裂缝限控标准。

4 结论

混凝土结构裂缝形成受施工节奏、材料特性与环境边界耦合影响，控制路径应以成因识别为前提，以参数优化、工艺调控与工程反馈为支撑。配合比中水胶比下降与双掺体系组合可有效降低收缩与水化热峰值，养护技术需构建分阶段控温保湿体系，模板刚度与支撑布设应匹配结构刚性需求以削减变形偏差。工程实践验证了高温浇筑控制与大体积结构分区降温策略在裂缝抑制中的技术适应性，裂缝指标实测均满足控制标准，后续研究可结合传感监测与温控反馈机制，构建实时调控型裂缝预警系统。

参考文献

[1] 蒋炳林. 房屋建筑结构和施工中的现浇混凝土裂缝控制对策[J]. 住宅与房地产, 2024, (05): 172-175.
[2] 周鸣, 蔡振苗. 建筑主体结构施工中裂缝的成因及控制预防施工应用[J]. 价值工程, 2023, 42(20): 114-116.
[3] 岳志合, 李宏立. 基于混凝土裂缝控制技术在房屋建筑施工中的应用[J]. 居业, 2022, (08): 62-64.
[4] 陈昌腾. 基于混凝土裂缝控制技术在房屋建筑施工中的应用[J]. 中国建设信息化, 2021, (03): 70-71.
[5] 刘秀凤. 浅谈建筑施工现浇混凝土结构裂缝产生的原因及控制措施[J]. 四川水泥, 2019, (09): 233.
[6] 曹涛. 高温环境下混凝土面层施工减少裂缝的控制措施研究[J]. 建材与装饰, 2019, (17): 27-28.
[7] 常学东. 房屋建筑现浇混凝土施工中裂缝原因及技术控制策略[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019, (16): 107.