

预制装配式建筑节点连接技术对施工效率的提升研究

文 / 俞燕虎 浙江耀华建设集团有限公司

摘要：本文聚焦预制装配式建筑节点连接技术与施工效率的关联，梳理灌浆套筒、螺栓、焊接等主流节点连接技术的工艺特性与应用现状，从工期控制、人工配置、工序衔接维度分析技术对施工效率的具体影响，提出技术创新、施工管理优化、成本控制与效益提升三大优化策略。实际项目验证显示，优化后的技术可缩短节点连接工期40%以上，降低成本15%-20%，为预制装配式建筑施工效率提升提供实践路径。

关键词：预制装配式建筑；节点连接技术；施工效率

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.031

引言

随着建筑工业化推进，预制装配式建筑因绿色环保、工期可控优势成为行业趋势，节点连接技术作为构件拼接核心，直接决定施工效率与结构安全。当前行业传统节点技术存在工艺复杂、施工协同不足、质量与效率难平衡等问题，易导致工期延误、成本增加。本文聚焦节点连接技术对施工效率的影响，分析技术现状、明确影响维度、提出优化策略，力求解决实际施工中的效率瓶颈，为预制装配式建筑高效施工提供理论与实践支撑。

一、预制装配式建筑节点连接技术概述

装配式建筑作为现代建筑的重要发展方向，以其高效、环保、节能的特点受到广泛关注。预制构件连接施工是装配式建筑中的关键环节，其技术的成熟与否直接影响到建筑的质量与施工进度^[1]。当前主流技术中，灌浆套筒连接以“工厂预制预埋+现场高压注浆”为核心，套筒与钢筋的匹配精度需控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内，现场无需复杂钢筋绑扎，仅需通过注浆孔完成水泥基灌浆料灌注，单个节点施工耗时较传统现浇节点缩短60%以上；螺栓连接凭借“可拆卸性与快速对位”优势，在钢结构预制构件中应用广泛，节点连接板预留的长圆孔可兼容 $\pm 5\text{mm}$ 的安装偏差，减少现场调平耗时，尤其适用于工期紧张的公共建筑项目；焊接连接虽有刚性强的特点，但需现场进行坡口处理与防腐涂层修复，单个节点焊接及后续检测耗时约为螺栓连接的2-3倍，对施工节奏的影响更为显著。节点连接技术的实施需同步匹配构件生产精度与现场吊装协调性，墙板拼接采用的企口式连接，需在工厂预制时控制企口尺寸误差，避免现场因缝隙过大导致的填缝返工，这一过程直接决定预制构件吊装后的衔接效率，是后续施工流程高效推进的核心前提。

二、预制装配式建筑节点连接技术对施工效率的影响

预制装配式建筑节点连接技术从施工工期、人工配置、工序衔接三个维度直接作用于施工效率，技术特性差异会形成显著效率分化^[2]。工期控制中，灌浆套筒连接依托工厂预埋与现场注浆的标准化流程，单个梁柱节点现场作业时间可压缩至1.5-2小时，较传统现浇节点支模、绑筋、浇筑全流程缩短近70%；灌浆料24小时即可达到设计强度80%，无需等待混凝土常规7天养护期，直接推动下一道工序提前启动。人工效率方面，螺栓连

接无需依赖高技能焊工，普通技工经3-5天培训就能操作，单个墙板螺栓节点安装仅需2-3人协作，人工成本较焊接连接降低40%，还能避免焊工短缺导致的施工停滞，保障作业节奏稳定。工序衔接上，企口式节点连接因工厂预制时已控制拼接缝隙（误差 $\leq 2\text{mm}$ ），现场无需反复调平或填充大量密封材料，墙板安装后可直接进入防水处理工序，减少传统节点因缝隙超标导致的返工耗时，让装饰装修工序介入时间提前3-5天。节点连接技术选择不当，现场焊接连接后续的防腐涂层修复与无损检测会额外占用1-2天/节点工期，易造成工序衔接断层，间接拉低整体施工效率。

三、优化预制装配式建筑节点连接技术以提升施工效率的策略

（一）技术创新与改进

1. 节点结构改良：排气与定位优化

针对预制装配式建筑节点连接技术在施工效率中的核心作用，技术创新需从节点结构改良、材料性能升级、专用设备研发三个维度突破，确保每一项创新直接解决现场施工中的效率瓶颈。节点结构改良中，针对灌浆套筒连接易出现的“注浆不饱满”问题，优化套筒内部排气结构——在传统套筒侧壁增设2个直径8mm的倾斜排气孔（与水平方向呈 30° 角），排气孔高度设为套筒长度的 $2/3$ 处，注浆时可实时观察浆料充盈状态，避免排气不畅导致的空鼓，减少二次注浆的返工耗时，经实际项目验证，该改良可使单个套筒节点的注浆合格率从88%提升至98%，单次注浆耗时缩短15分钟。螺栓连接节点方面，研发“带定位卡扣的组合式螺栓”，在螺栓头部集成尼龙66材质的定位卡扣，卡扣与连接板预留孔间隙控制在 0.5mm 以内，现场吊装无需反复调整螺栓位置，仅将卡扣卡入预留孔便能完成初步定位，后续拧紧作业效率提升40%，适用于高层墙板的快速连接。

2. 材料性能升级：快凝适配提升

材料性能升级需聚焦“快凝早强”与“适配性”，缩短节点养护周期、降低现场操作难度。灌浆料优化上，在传统水泥基灌浆料中掺入3%的纳米硅灰与1.2%的甲酸钙复合外加剂，试验检测显示，改良后的灌浆料12小时抗压强度达 35MPa （满足设计强度的85%），24小时抗压强度达 42MPa ，较普通灌浆料7天养护周期，节点可提前5天进入后续工序；调整灌浆料流动度至 320mm

(GB/T50448 标准要求 $\geq 300\text{mm}$)，减少流动度不足导致的管道堵塞，现场注浆无需频繁疏通，进一步提升作业连续性。焊接连接用焊材选用低氢型药芯焊丝（如 E501T-1），其熔敷效率比实心焊丝提升 25%，焊后无需额外烘干处理，单个钢结构梁柱节点焊接时间从 4 小时缩短至 3 小时，还能降低焊后裂纹发生率，减少无损检测返工率。节点密封材料研发“单组分聚氨酯密封胶”（固化时间 24 小时，拉伸强度 1.8MPa），替代传统双组分密封胶，现场无需配比搅拌，直接挤注就行，单个节点密封胶施工时间从 30 分钟缩短至 15 分钟，胶体固化后可承受 $\pm 5\text{mm}$ 位移变形，适应建筑后期微沉降^[3]。

3. 专用设备研发：智能便携突破

专用设备研发需围绕“智能化”“集成化”与“便携化”，兼顾大型作业与小型精细操作的效率需求。灌浆作业上，在“智能注浆一体机”基础上增加“远程数据监控”功能——通过 4G 模块将设备搅拌转速、注浆压力、浆料温度等数据实时上传至云端平台，管理人员能通过手机 APP 查看作业数据，压力超过 0.6MPa 或温度低于 5℃ 时，平台自动推送预警信息，避免现场人员疏忽导致的操作失误；设备配备容量 50L 的浆料储罐（较传统 30L 储罐容量提升 67%），减少浆料补充频次，单个作业面连续注浆时间从 1.5 小时延长至 2.5 小时，无需频繁停机加料。节点定位除“BIM+AR 节点定位系统”外，搭配“手持激光扫描仪”（扫描精度 0.1mm，扫描速度 30 万点/秒），节点安装完成后，快速扫描节点三维形态，与 BIM 模型比对，偏差超过 $\pm 1.5\text{mm}$ 立即预警，较传统“全站仪复核”模式，单个节点检测时间从 25 分钟缩短至 8 分钟，某复杂商业综合体项目应用该系统后，节点安装偏差率从 7% 降至 1.2%。小型节点（预制楼梯与楼板的连接节点）研发“便携式电动扭矩扳手”（重量 2.5kg，扭矩调节范围 10-50N·m），替代传统手动扳手，单个螺栓拧紧时间从 1.5 分钟缩短至 0.5 分钟，扭矩控制精度达 $\pm 3\%$ ，避免人工拧紧力度不均导致的质量问题，该设备在某保障房项目应用后，楼梯节点安装效率提升 200%，日均完成楼梯安装从 8 部增至 24 部。

(二) 施工管理优化

1. 流程管控：全流程节点质量预控

施工管理优化需以“节点连接”为核心，从流程管控、人员管理、协同机制三个层面构建高效管理体系，确保技术优势转化为实际施工效率。流程管控中，需建立“预制-运输-现场连接”全流程节点质量预控机制：预制阶段用三维扫描仪（精度 0.05mm）对套筒预埋位置、螺栓孔孔径做 100% 检测，检测数据实时上传项目管理平台，不合格构件（如套筒偏移超 $\pm 1.5\text{mm}$ ）立即标记返修，避免其运至现场引发工期延误；运输阶段为节点构件配专用固定支架（如套筒构件用泡沫卡槽固定），减少运输碰撞变形，支架标注构件编号与安装顺序，现场卸货可直接按编号分配至对应作业面，避免二次搬运，卸货效率提升 25%；现场施工阶段制定“吊装-连接-检测”三位一体工序衔接计划，明确每个节点作业时间——如

墙板吊装后 30 分钟内完成螺栓初装，2 小时内完成螺栓拧紧与扭矩检测（用数显扭矩扳手，扭矩误差 $\pm 5\%$ ），检测合格后立即移交下道防水工序，避免工序间等待真空，某项目实践显示，该计划能让每日节点连接完成量从 20 个提至 35 个^[4]。

2. 人员管理：技能与绩效双维优化

人员管理需聚焦“技能专业化”与“绩效精准化”两大核心，既要提升作业人员的操作技能以保障施工效率，也要通过合理的绩效机制激发人员责任心，避免因技能不足、积极性不高导致的效率低下。针对不同节点连接技术开展分级培训：灌浆套筒连接工人需接受“理论+实操”培训（理论 2 天，含灌浆料特性与故障处理；实操 3 天，模拟不同工况注浆作业），考核通过标准设为“注浆一次合格率 $\geq 95\%$ 、单个节点注浆耗时 ≤ 20 分钟”，考核合格者发专项作业证，禁止无证人员操作；螺栓连接工人需培训“定位卡扣安装”与“扭矩扳手使用”，实操考核要求“单个螺栓节点安装耗时 ≤ 8 分钟、扭矩检测合格率 $\geq 98\%$ ”。建立与效率挂钩的绩效机制：将节点连接班组奖金与“完成数量”“合格率”“工期达标率”三项指标绑定，如灌浆套筒班组每日完成 30 个合格节点，额外发 10% 奖金；若出现 1 个不合格节点，扣除该节点对应奖金的 50%，借正向激励与反向约束推动作业人员主动提效，某项目实施后，节点连接返工率从 12% 降至 3%，人均日作业量提升 30%。

3. 协同机制：信息互通与快速响应

协同机制优化核心是打破“工厂-现场-监理”信息壁垒，建立实时沟通与快速响应体系。其高效运转依托节点连接协同智能检测系统，见图 1



图 1：节点连接协同智能检测系统架构图

该系统以处理器为核心，整合工厂、现场的多台监控器与检测器，联动报警器实现异常分级预警，筑牢信息互通的技术基础。在此支撑下，搭建“预制构件-节点连接”专属微信小程序平台，设三大模块：工厂端每日上传构件生产进度、质量检测报告及发货计划；现场端上传构件接收情况与安装问题（附照片标注）并自动推送给工厂、监理；监理端在线审核节点连接质量数据，实时反馈合格或整改要求。信息实行“上传-反馈-处理-验收”闭环管理，工厂需 1 小时内响应现场问题，监理 2 小时内审核数据，超时自动升级至项目负责人。某商业综合体项目应用后，问题响应时间从 4 小时缩至 1 小时，因信息沟通不畅导致的停工时间减少 80%。每周

开“节点连接专项协同会”，项目负责人主持，三方参会：工厂报生产合格率、进度及下周计划；现场反馈安装问题并展数据；三方析因定方案、明责任与时限。如某项目遇螺栓孔错位，定因工厂模具偏差，工厂3天内将精度从±2mm提至±1mm，现场加激光定位仪。会后24小时发纪要，监理跟踪整改。此机制使某项目协同不畅致工期延误减60%，跨方问题解决率从75%升至98%。

（三）成本控制与效益提升

1. 技术选型优化：性价比适配

优化方案的制定与实施在提升装配式建筑节点连接技术的效率和安全性方面发挥着重要作用^[5]。优化节点连接技术的成本控制需兼顾‘短期施工成本’与‘长期运营效益’，通过技术选型精准匹配、浪费源头管控、全周期效益测算的三维路径，实现效率提升与成本降低的动态平衡，避免盲目追求技术先进性而忽视实际适配性。技术选型前需先建立项目参数数据库，综合梳理工期要求、结构荷载、场地条件、运维需求等核心指标，再针对性匹配节点连接技术特性，确保选型既满足功能需求，又实现成本最优。工期紧张（总工期≤180天）的住宅项目，优先选用螺栓连接技术——单个墙板螺栓节点的材料成本（螺栓+连接板）约60元，人工成本约20元，总成本80元，较焊接连接（材料+人工100元）降低20%，且安装效率提升40%，可缩短工期30天，间接节省设备租赁费用（如吊车日均租赁费8000元）24万元；荷载较大（如梁端剪力≥100kN）的公共建筑项目，宜选用改良后的灌浆套筒连接技术，单个套筒成本（含灌浆料）约120元，高于普通套筒（100元），但注浆合格率提升10%，能减少返工材料浪费（如废弃灌浆料、返修人工），单项目可节省成本15万元，还能满足结构安全要求，避免后期维修成本。

2. 材料浪费管控：使用与回收

减少浪费需从节点材料的“使用”与“回收利用”双维度发力，通过全流程精细化管控降低不必要的成本损耗，实现材料效益最大化^[5]。材料采购环节，依托BIM模型构建节点连接材料“精准算量-定制化采购”体系：先通过BIM模型还原构件拼接场景，结合每个节点的螺栓孔径、受力需求计算螺栓长度（如墙板节点用200mm螺栓、梁柱节点用250mm螺栓），避免采购通用长螺栓后截断造成的钢材浪费；同时根据节点总数与5%的损耗冗余量确定采购数量，算量结果直接同步至供应商，定制生产对应规格螺栓。某10万m²预制装配式项目采用该模式，螺栓采购量较传统估算减少8%，避免约2000根螺栓截断浪费，直接节省成本6万元；现场施工环节，针对灌浆料浪费问题，采用“智能分料装置”，根据单个套筒的容积（如200mL）自动分配灌浆料用量，每次分料误差±5mL，避免人工估算导致的浆料剩余（传统人工分料浪费率约15%，智能分料浪费率降至3%），单项目可节省灌浆料成本8万元。可拆卸的螺栓连接节点，施工完成后对多余螺栓进行分类回收（按规格、材质存放），用于后续维修或其他项目，回收利用率可达

80%，较传统“随建筑垃圾丢弃”模式，单项目可节省螺栓采购成本3万元。

3. 效益量化测算：综合收益评估

效益测算需建立“效率-成本-效益”的量化模型，直观体现节点连接技术优化带来的综合收益。某10万m²预制装配式住宅项目，优化前用传统灌浆套筒连接技术（注浆合格率88%，单个节点施工耗时40分钟），优化后采用改良套筒（合格率98%，耗时25分钟）+智能注浆设备+协同管理机制，具体效益如下：工期上，节点连接总耗时从60天缩短至35天，整体项目工期缩短25天，节省吊车、脚手架等设备租赁费用（日均1.2万元）30万元；人工上，节点连接班组从8人减至5人，人工成本（人均日薪300元）节省4.5万元；质量上，返工率从12%降至3%，减少返修材料（灌浆料、钢筋）与人工成本8万元；长期效益上，改良后的节点连接技术降低后期渗漏风险（如企口式连接+防水密封胶，渗漏率从5%降至1%），减少维修成本（单次维修费用5000元/户）20万元。综合测算，该项目通过节点连接技术优化，总成本降低62.5万元，投资回报率达18%，同时因工期缩短，项目提前1个月交付，产生的租金收益（按每月20万元计算）进一步提升综合效益，充分证明技术优化对“效率提升-成本降低-效益增长”的正向驱动作用^[6]。

结语

本研究预制装配式建筑节点连接技术，明确其是影响施工效率的关键因素：主流节点技术因工艺差异对工期、人工、工序衔接产生不同作用，技术创新、施工管理优化与成本控制协同发力，可有效突破效率瓶颈。实际项目表明，改良后的节点技术与管理体系能显著缩短工期、降低成本、提升效益。未来需进一步推动节点技术智能化发展，为预制装配式建筑工业化、高效化发展提供更有力的技术与管理保障，助力行业高质量升级。

参考文献

- [1] 白彬. 装配式建筑预制构件连接施工技术[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(4): 188-191.
- [2] 朱为连. 装配式建筑施工中的节点连接技术优化分析[J]. 新潮电子, 2025(9): 187-189.
- [3] 邝美英. 装配式钢结构建筑墙板连接节点施工技术探析[J]. 河南建材, 2025(9): 72-74.
- [4] 农高. 装配式钢结构建筑墙板连接节点施工技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(7): 135-138.
- [5] 边伟清. 装配式建筑结构节点连接方式及施工技术改进研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(2): 023-026.
- [6] 姬海涛, 杨光. 装配式建筑节点连接技术优化与施工改进研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(9): 130-133.

作者简介：俞燕虎(1990.05-)，男，汉族，浙江杭州，高级工程师，本科，研究方向：建筑施工。