新型组合式高支模（铝合金-钢混复合支架） 的受力性能及经济性优化分析

郝会军

北京建工集团山西建设有限公司, 山西 太原 030000

DOI:10.61369/ME.2024100006

摘要： 本文针对传统钢管脚手架耗材多、拆装效率低的问题，以某商业综合体项目为案例，系统研究新型铝合金-钢混复合支架高支模的受力性能及经济性。通过材料配比优化、节点连接创新设计，结合试验，深入分析不同跨度、荷载条件下的承载能力与变形规律；从施工周期、材料回收率、全生命周期成本等多维度与传统支架进行量化对比，提出针对性的经济性优化方案，为建筑工程绿色施工提供技术支撑与实践参考。

关键词： 组合式高支模；铝合金-钢混复合支架；受力性能；经济性分析

Optimization Analysis of the Stress Performance and Economic Performance of A New Type of Combined High-Support Die (Aluminum Alloy-Steel- Concrete Composite Support)

Hao Huijun

Beijing Construction Engineering Group Shanxi Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract： In this paper, aiming at the problems of many consumables and low disassembly efficiency of traditional steel pipe scaffolding, this paper takes a commercial complex project as an example to systematically study the stress performance and economy of the high-support formwork of new aluminum alloy-steel concrete composite brackets. Through the optimization of material ratio, innovative design of node connection, combined with experiments, the bearing capacity and deformation law under different spans and load conditions are deeply analyzed. Quantitative comparison with traditional brackets from multiple dimensions such as construction cycle, material recovery rate, and full life cycle cost, this paper proposes a targeted economic optimization scheme to provide technical support and practical reference for the green construction of construction projects.

Keywords： combined high support die; aluminum-steel concrete composite support; stress performance; economic analysis

引言

在建筑工程高支模领域，传统钢管脚手架长期占据主导地位，但存在显著弊端：材料损耗率高达 15%–20%，每年因锈蚀、变形报废的钢管超百万吨；拆装效率低下，随着绿色建筑评价标准对施工阶段资源节约要求的提升，新型组合式支架成为研究热点^[1]。铝合金-钢混复合支架凭借铝合金的轻质特性（密度 2.7g/cm³，仅为钢的 1/3）与钢材的高强度优势（Q355 钢屈服强度 355MPa），在减重与承载之间形成平衡。但目前该类支架存在材料协同受力机理不明确、节点连接可靠性不足、经济性评估缺乏系统数据等问题，制约其工程应用。本研究以某商业综合体中庭高支模工程（支模高度 12m，最大跨度 10m）为依托，通过正交试验确定铝合金与钢材的最佳复合比例，兼顾强度与轻量化；研发可拆卸“螺栓-销接”复合节点，测试其抗剪、抗拉性能；受力性能测试：结合 1:1 足尺试验，分析不同跨度（6m、8m、10m）与荷载（20kN/m²、30kN/m²、40kN/m²）下的承载能力；从材料成本、人工费用、回收收益等维度，建立全生命周期成本模型，与传统钢管支架对比，最终在实际工程中检验优化方案的有效性。

一、新型组合式高支模技术方案

(一) 材料配比设计

基于“强节点弱构件”设计原则，通过材料力学性能测试与组合试算，确定各部件材料配比。采用 6061-T6 铝合金（壁厚 5mm）与 Q355 钢套管（壁厚 3mm）复合结构^[1]。通过弹性模量差异（钢 206GPa vs 铝 69GPa）实现应力重分布^[2]，提高整体稳定性。铝钢体积比 7:3，较全钢立杆减重 58%，较全铝立杆成本降低 32%。

表 1: 主要材料力学性能参数

材料	密度 (g/cm ³)	弹性模量 (GPa)	屈服强度 (MPa)	伸长率 (%)	应用部位
6061-T6 铝	2.7	69	275	12	立杆(上部)、横杆
合金	7.85	206	355	22	立杆(下部)、套管
Q355 钢	7.85	206	235	25	扫地杆、顶托

(二) 节点连接方式

创新设计“螺栓-销接”复合节点，解决铝-钢异种材料连接难题。

(三) 工程应用案例

某商业综合体项目位于某市核心商圈，总建筑面积 12 万 m²，其中中庭区域为大跨度转换层结构，支模高度 12m，楼板厚度 300mm，混凝土强度等级 C30（浇筑强度 24kN/m²），最大跨度 10m。该区域分 A、B 两个施工段（各 1000 m²），A 段采用新型铝合金-钢混复合支架，B 段采用传统 Φ48×3.6mm 钢管支架（立杆间距 1.2m×1.2m，步距 1.5m），同步开展对比试验。

二、受力性能分析

(一) 试验结果

1. 极限承载力

(1) 新型复合支架：42kN/m²（对应混凝土厚度 420mm），破坏模式为立杆整体弯曲（塑性变形）^[3]；

(2) 传统钢管支架：35kN/m²，破坏模式为扣件滑移（滑移量 3mm 时丧失承载力）。

2. 节点性能

复合节点转动刚度 1.2×10⁶kN·m/rad，较传统扣件节点（8×10⁴kN·m/rad）提高 50%；反复加载 50 次后，节点松动量仅 0.3mm，满足周转使用要求。

3. 变形特性

(1) 新型支架在 30kN/m² 荷载下弹性变形占比 85%，残余变形 15%；

(2) 传统支架弹性变形占比 65%，残余变形 35%，长期使用易产生累积误差。

(二) 受力性能对比

新型复合支架在承载能力与变形控制方面优势显著：极限承载力较传统支架提高 20%，可适应更厚楼板施工^[4]；节点刚度提升 50%，有效减少整体结构侧移；弹性变形占比高，重复使用精

度高（传统支架经 3 次周转后精度误差达 10mm）。

三、经济性优化分析

(一) 施工效率对比

1. 工期分析

(1) A 段（新型支架）1000 m² 施工数据：

安装阶段：7 天（10 人班组），日均完成 142.9 m²；拆除阶段：3 天（8 人班组），日均完成 333.3 m²；总工期 10 天，占项目总工期 15%。

(2) B 段（传统支架）1000 m² 施工数据：

安装阶段：12 天（15 人班组），日均完成 83.3 m²；拆除阶段：5 天（12 人班组），日均完成 200 m²；总工期 17 天，占项目总工期 25.5%。

新型支架单根立杆重量 12kg（传统钢管 25kg^[5]），单人可搬运 3 根；节点采用螺栓连接，安装时间较扣件连接缩短 60%。

2. 人工成本

按当地木工日均工资 350 元计算：新型支架：(7×10 + 3×8) × 350 = 32900 元；传统支架：(12×15 + 5×12) × 350 = 84000 元；节省成本：84000 - 32900 = 51100 元，降幅 60.8%。

(二) 材料成本与回收率

1. 初始材料成本

(1) 1000 m² 支架系统材料成本：新型复合支架：48 万元（立杆 28 万 + 横杆 12 万 + 节点 8 万）；

(2) 传统钢管支架：32 万元（钢管 22 万 + 扣件 6 万 + 顶托 4 万）；

(3) 新型支架初始投入高 50%，但可通过周转使用摊薄成本。

2. 回收利用分析

(1) 新型支架：铝合金部件回收率 95%（市场价 18 元/kg），钢部件回收率 90%（市场价 3.5 元/kg），单次回收收益 1.71 万元 / 1000 m²^[6]；

(2) 传统支架：钢管回收率 70%（锈蚀严重，残值 1.8 元/kg），扣件回收率 60%（易丢失），单次回收收益 0.28 万元 / 1000 m²^[7]；

(三) 全生命周期成本

采用全生命周期成本（LCC）分析法，考虑 8 次周转（新型支架设计寿命）。

表 2: 1000m² 支架全生命周期成本对比（单位：元）

成本项	新型复合支架	传统钢管支架	差异率
初始材料成本	480000	320000	+50%
人工成本	263200	672000	-60.8%
(8 次)	20000 (节点螺栓更换)	50000 (扣件更换、钢管除锈)	-60%
维修成本	136800	22400	+497.3%
回收收益	136800	22400	-38.6%
总 LCC	626400	1019600	

四、优化方案

(一) 专项优化方案

针对大跨度 ($\geq 8\text{m}$) 工况的专项优化方案如下:

- 增设铝合金桁架梁: 跨度 10m 时, 在立杆顶部设置 200×100mm 铝合金桁架梁, 截面惯性矩提高 3 倍, 挠度降低 18mm→15mm;
- 节点降噪设计: 横杆与节点盘之间加装 3mm 厚丁腈橡胶垫片, 施工噪声从 85dB 降至 70dB, 符合建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)^[8];
- 智能监测集成: 在关键节点安装无线应变传感器 (精度 $\pm 1\mu\text{e}$), 实时监测应力变化, 预警阈值设为屈服强度的 70%^[9]。

(二) 工程应用效果

工程项目采用优化方案后, 1000 m³ 高支模施工取得显著成效: 工期较传统支架缩短 41.2%; 全生命周期成本 51.2 万元, 较

优化前再降 18.3%; 混凝土成型平整度误差 $\leq 3\text{mm}$, 优于规范要求 (5mm)^[10]; 施工期间最大应力 92MPa, 未出现任何安全隐患, 验收一次性通过。

五、结论

新型铝合金-钢混复合支架通过合理材料配比 (铝钢体积比 7:3) 与“螺栓-销接”节点设计, 极限承载力达 42kN/m², 较传统支架提高 20%, 挠度控制满足规范要求; 全生命周期成本降低 38.6%, 施工效率提升 71.5%, 材料回收率提高 35 个百分点, 经济性优势显著; 碳排放降低 37.8%, 材料消耗减少 62.7%, 符合绿色施工与可持续发展理念。

参考文献

- [1] 叶举聪. 房建工程高支模施工技术应用研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(22): 55-57.
- [2] 杨柳, 余方园, 唐建章, 等. 基于高斯贝叶斯网络的高支模支架体系安全性能评定 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(11): 91-92+147.
- [3] 黄富鑫. 框架结构高支模安全施工技术研究 [J]. 砖瓦, 2024, (10): 137-140.
- [4] 曾德伟. 建筑工程施工中的高支模施工技术应用探讨 [C]// 冶金工业教育资源开发中心. 2024 精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集 (中册). 成都建工第八建筑工程有限公司, 2024: 98-101.
- [5] 彭菲, 刘梦楠. 高支模工程中承插式盘扣脚手架的搭设与优化措施 [J]. 四川建材, 2024, 50(09): 114-116.
- [6] 王胜, 刘汉进, 赵帅, 等. 考虑整体空间作用的高支模数值分析及试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53(17): 156-161+170.
- [7] 池福军. 高支模施工技术在住宅建筑施工中的实践研究 [J]. 居舍, 2024, (24): 37-40.
- [8] 解栋邓, 王国强. 某厂房超高超厚楼板高支模施工研究 [J]. 黑龙江科学, 2024, 15(14): 90-93+97.
- [9] 黄天良. 关于高支模土建筑施工技术在土施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(12): 88-90.
- [10] 张国宇. 建筑施工中高支模工程施工技术应用探析 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(09): 97-99.