

高大模板支撑体系在重型工业厂房施工中的稳定性研究

董黎明

河南省豫西建设工程有限责任公司 河南 三门峡 472399

摘要:随着我国工业化进程的不断推进,重型工业厂房作为现代制造业、能源产业和重化工业的重要基础设施,其建设规模与技术复杂度日益提升。此类厂房普遍具有层高大、跨度广、荷载重等特点,对混凝土结构施工中所采用的高大模板支撑体系提出了更高的安全性和稳定性要求。高大模板支撑体系一旦失稳,极易引发坍塌事故,造成重大人员伤亡和经济损失。本文系统梳理了高大模板支撑体系的基本类型与构造特点,深入分析了影响其稳定性的关键因素,包括材料性能、结构布置、荷载特性、施工工艺及环境条件等。在此基础上,结合工程实例,探讨了当前稳定性验算中存在的理论局限与实践误区,并提出了涵盖设计优化、过程监控、智能预警及管理强化在内的综合提升策略。研究表明,通过构建“设计—施工—监测—反馈”一体化的全过程管控体系,可显著提升高大模板支撑体系在重型工业厂房施工中的整体稳定性与本质安全水平,为类似工程提供理论参考与实践指导。

关键词:高大模板支撑体系;重型工业厂房;稳定性;施工安全;有限元分析

引言

重型工业厂房是国家工业体系的重要支柱,广泛应用于钢铁、石化、电力、重型机械制造等领域。其典型特征包括:单层或多层结构、层高普遍超过8m(部分可达20米以上)、柱网跨度大(常达24米甚至更大)、设备基础及楼板荷载集中且数值巨大。在此类建筑中,现浇钢筋混凝土结构仍占据主导地位,而高大模板支撑体系作为临时承重结构,承担着新浇混凝土自重、施工荷载及风荷载等多重作用,其稳定性直接关系到整个施工过程的安全。近年来,国内外因高大模板支撑体系失稳导致的坍塌事故频发,如2008年深圳某电厂冷却塔施工坍塌、2016年江西丰城发电厂冷却塔施工平台倒塌等重大安全事故,均暴露出在高支模设计、施工与管理环节存在的严重问题。究其原因,既有对支撑体系稳定性机理认识不足,也有施工过程中违规操作、监管缺位等因素。因此,深入研究高大模板支撑体系在重型工业厂房这一特殊场景下的稳定性问题,具有重要的理论价值与现实意义。

1 高大模板支撑体系的类型与构造特点

高大模板支撑体系是指搭设高度 $\geq 8\text{m}$,或搭设跨度 $\geq 18\text{m}$,或施工总荷载 $\geq 15\text{kN/m}^2$,或集中线荷载 $\geq 20\text{kN/m}$ 的模板支撑系统。在重型工业厂房中,常见类型主要包括:

1.1 扣件式钢管脚手架支撑体系

该体系由立杆、水平杆、剪刀撑、扣件等组成,具有材料通用性强、搭拆灵活、成本较低等优点,是我国应用最广泛的支撑形式。但在高大空间中,其整体刚度

相对较弱,节点为半刚性连接,易产生初始缺陷,对稳定性构成挑战。

1.2 盘扣式(或轮扣式)钢管支撑体系

盘扣式体系采用模块化设计,立杆上焊接有圆盘节点,横杆端部设有楔形插销,通过敲击实现快速连接。其节点刚度大、承载力高、搭设效率高,且几何尺寸标准化程度高,有利于减少人为误差。近年来在大型公建和工业项目中应用日益广泛。

1.3 门式钢管脚手架支撑体系

由门架、交叉支撑、连接棒等组成,整体性好,但适应复杂平面布局能力较弱,在重型工业厂房中多用于规则区域或辅助支撑。

1.4 液压爬升模板与滑模系统

适用于连续高耸结构(如筒仓、烟囱),虽非传统意义上的“支撑体系”,但在某些重型厂房的高耸设备基础或核心筒施工中亦有应用,其稳定性依赖于液压系统与附着装置的协同工作。

在重型工业厂房中,由于荷载大、空间高,常采用组合式支撑方案,如底层采用盘扣架+上部局部加强,或设置型钢格构柱作为主支撑,再辅以钢管架形成复合体系,以兼顾承载力与经济性。

2 影响高大模板支撑体系稳定性的关键因素分析

高大模板支撑体系的稳定性受多种因素耦合作用,可归纳为以下几类:

2.1 材料与构件性能

(1) 钢管壁厚与材质:实际工程中常存在使用壁厚不足(如标称3.6mm实测仅2.8mm)或劣质钢材的情况,

导致截面惯性矩和屈服强度下降,显著降低立杆承载力。(2)扣件抗滑移性能:扣件式体系中,直角扣件和旋转扣件的抗滑承载力是关键。若螺栓拧紧力矩不足($< 40\text{N}\cdot\text{m}$),节点易滑移,体系整体刚度骤降^[1]。(3)可调托撑与底座偏心:顶部U形托撑若未居中放置或承受偏心荷载,将产生附加弯矩,加速立杆失稳。

2.2 结构布置与构造措施

(1)立杆间距与步距:间距过大或步距过高会显著降低体系临界荷载。规范要求高支模立杆纵/横向间距不宜大于1.2m,步距不宜大于1.5m。(2)剪刀撑设置:水平剪刀撑与竖向剪刀撑是提高整体侧向刚度的核心措施。缺失或布置不合理(如角度过大、连续性不足)将导致体系在水平力作用下发生整体倾覆。(3)连墙件与抱柱措施:与周边已施工结构的有效拉结可显著提升抗侧移能力。在重型厂房中,常利用钢柱或混凝土柱设置抱箍式连墙件。

2.3 荷载特性与组合效应

重型工业厂房的荷载具有以下特点:一是混凝土自重荷载大:大截面梁(如 $1.5\text{m}\times 2.0\text{m}$)、厚板(如500mm以上)导致单位面积荷载远超常规民用建筑。二是施工荷载集中:泵送混凝土时的冲击荷载、堆载不均、人员设备集中作业等动态荷载易引发局部超载。三是风荷载不可忽视:高大开敞空间内风压分布复杂,尤其在沿海或高原地区,风荷载可能成为控制工况。

2.4 施工工艺与过程控制

(1)搭设顺序与精度:立杆垂直度偏差超标($> 1/500H$)、水平杆缺失、剪刀撑后装等违规操作,会引入初始几何缺陷,大幅降低稳定承载力。(2)混凝土浇筑顺序:不对称浇筑导致支撑体系受力不均,易引发局部失稳并连锁反应^[2]。(3)拆除时机不当:过早拆除支撑,混凝土未达设计强度,结构自承能力不足。

2.5 环境与地基条件

(1)地基不均匀沉降:重型厂房常建于软弱地基或回填区域,若支撑底部未做硬化或垫板不足,易发生差异沉降,导致立杆失稳。(2)温度与湿度变化:极端温差可能引起材料性能波动,潮湿环境加速钢管锈蚀,降低承载力。

3 高大模板支撑体系稳定性验算的理论与实践

3.1 规范验算方法及其局限

我国现行《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162-2008)及《建筑施工承插型盘扣式钢管支架安全技术规程》(JGJ231-2021)等标准,主要采用轴心受压构件稳定系数法进行验算:

$$N \leq \varphi A f$$

其中, N 为轴向压力设计值, φ 为稳定系数(由长细比 $\lambda = l_0/i$ 查表确定), A 为截面面积, f 为钢材抗压强度设计值。该方法操作简便,便于现场技术人员掌握,但其理论前提建立在理想边界条件和均匀受力假设之上,忽略了节点半刚性、初始几何缺陷、材料非线性以及体系整体失稳模式等复杂因素。尤其在重型工业厂房中,支撑体系往往处于高荷载、大变形状态,规范方法的简化处理可能导致验算结果过于乐观,掩盖局部薄弱环节,从而埋下安全隐患。因此,对于超危大工程,仅依赖规范验算已难以满足安全控制需求。

3.2 有限元数值模拟的优势与应用

为克服规范方法的不足,有限元数值模拟技术逐渐成为高大模板支撑体系稳定性分析的重要工具。通过建立三维实体模型,可真实反映支撑体系的空间受力状态。建模过程中,需合理模拟节点刚度(如采用弹簧单元)、引入规范允许的初始imperfection(通常取 $L/500$)、考虑钢材的弹塑性本构关系,并准确施加混凝土湿重、施工活载及风荷载等复合工况。特征值屈曲分析可初步判断体系的弹性失稳模态与临界荷载,而非线性屈曲分析(如Riks弧长法)则能进一步获得考虑几何与材料非线性的极限承载力,更贴近实际破坏过程。该方法不仅能识别整体失稳风险,还能精确定位局部应力集中区域,为设计优化提供科学依据。

4 重型工业厂房施工中提升高大模板支撑体系稳定性的综合策略

在重型工业厂房施工中,高大模板支撑体系(简称“高支模”)作为混凝土结构成型的关键临时结构,其稳定性直接关系到施工安全、工程质量乃至人员生命。近年来,随着建筑高度与跨度不断突破,高支模失稳引发的坍塌事故时有发生,凸显出提升其稳定性的紧迫性与系统性需求。为此,需从设计、施工、监测与管理四个维度构建综合策略,形成闭环管控体系。

4.1 设计阶段:精细化与冗余设计

设计是高支模稳定性的源头保障。首先,应全面推广建筑信息模型(BIM)技术,在三维空间中对支撑体系进行精细化建模,并开展碰撞检查,提前识别与结构梁柱、机电管线等构件的空间冲突,优化支撑布置方案。其次,贯彻“强节点、弱杆件”的结构设计理念,确保连接节点(如扣件、碗扣、盘扣节点)具备足够的刚度和承载力,避免因节点失效导致整体失稳^[3]。此外,应在关键受力区域(如大跨度梁底、转换层、悬挑部位)设置安全冗余,例如将承载力储备系数设定为不小于2.0,

以应对施工偏差、材料性能波动或突发荷载等不确定因素。最后,设计文件中必须明确混凝土浇筑顺序、速率及分层厚度,防止因集中堆载或不对称浇筑引发偏心受压或局部超载。

4.2 施工阶段:标准化与过程控制

施工是设计意图落地的关键环节。对于超过一定规模的危险性较大工程(超危大工程),必须严格执行专项施工方案专家论证制度,确保技术措施科学可行。推行“样板引路”机制,在大面积搭设前先行制作标准段样板,统一立杆间距、水平杆步距、剪刀撑设置等参数,杜绝随意搭设。在材料安装环节,使用扭矩扳手对扣件螺栓进行定量拧紧,确保力矩符合规范要求(通常为 $40\sim 65\text{N}\cdot\text{m}$),防止因松动导致节点滑移。同时,采用激光垂准仪或全站仪对高支模立杆垂直度进行全过程监控,偏差控制在规范允许范围内(一般 $\leq H/500$ 且 $\leq 50\text{mm}$)。混凝土浇筑过程中,应实施分区域、对称、分层浇筑策略,严格控制单次浇筑高度与速度,避免因偏载或冲击荷载诱发整体失稳。

4.3 监测预警:智能化与实时反馈

传统人工巡检难以满足高支模动态安全监控需求。近年来,基于物联网(IoT)的智能监测系统逐步推广应用。可在关键立杆上布设应变片、倾角传感器,实时采集杆件应力与倾斜角度;在支撑体系底部地基设置沉降观测点,监测基础不均匀沉降^[4]。所有传感数据通过无线传输模块实时上传至云平台,结合预设阈值(如应变超限、倾斜角 $>1^\circ$ 、沉降速率突增等)自动触发分级预警(黄、橙、红三级)。更进一步,可融合数字孪生技术,构建高支模虚拟模型,实现物理实体与数字模型的同步映射与动态仿真,辅助管理人员快速研判风险并制定应急响应措施。

4.4 管理机制:责任明晰与教育培训

技术措施的有效落地离不开健全的管理体系。应严格落实“建设单位负首要责任、施工单位负主体责任、监理单位负监督责任”的三方责任机制,形成齐抓共管格局。针对架子工、木工等一线作业人员,强化安全技术交底的针对性与实操性,不仅讲解“怎么做”,更

要说明“为什么这么做”,提升其风险识别与规范操作能力。建立高支模验收挂牌制度,由施工、监理、建设单位联合验收合格后悬挂“准予浇筑”标识牌,未经挂牌严禁进入混凝土浇筑工序。同时,推广“行为安全之星”等正向激励机制,对规范作业、主动报告隐患的工人给予物质或精神奖励,营造“人人讲安全、事事守规程”的文化氛围。

5 结语

本文通过理论分析得出以下结论:首先,重型工业厂房的高荷载、大空间特性使得高支模体系处于高风险状态,任何环节的疏漏都可能引发灾难性后果。其次,现行规范中的简化验算方法虽便于操作,但难以反映体系整体失稳行为,建议在超危大工程中强制引入有限元精细化分析,以识别潜在薄弱环节。再次,稳定性保障不能依赖单一手段,必须打破“重设计、轻施工”“重结果、轻过程”的惯性思维,构建覆盖设计、搭设、使用、拆除全生命周期的全过程管控体系。最后,融合BIM、物联网、大数据等新一代信息技术,实现高支模状态的实时感知、智能诊断与主动预警,是提升本质安全水平的必然趋势。未来研究可进一步聚焦于高支模与新浇混凝土结构的耦合作用机理、极端环境(如强风、地震)下的动力稳定性响应,以及基于机器学习的失稳早期预测模型等前沿方向,为我国重型工业建筑的安全高效建造提供更有力科技支撑。

参考文献

- [1]梁正宇,陈涛.高大模板支撑体系在某工业厂房项目中的运用[J].建筑技术开发,2023,50(10):38-40.
- [2]李沿东.浅析高大模板支撑体系在某工业厂房项目中的运用[J].四川水泥,2019,(12):286-287.
- [3]陈国扬,刘应辉.厂房工程高大模板施工技术要点分析——以梅州综合保税区厂房为例[J].中国建筑装饰装修,2022,(24):159-161.
- [4]张冲.某厂房工程高大模板施工技术应用——以某农业产业融合发展示范园项目为例[J].安徽建筑,2022,29(08):16-17+138.