

现代工业厂房中钢结构的设计与优化

韩锡涛

上海二十冶建设有限公司 上海 201900

摘要：本文探讨了现代工业厂房中钢结构的设计与优化方法，介绍了钢结构材料特性和工业厂房荷载特点，为设计提供了基础。详细阐述了钢结构设计的要点，包括结构体系选型、构件设计、节点连接设计及防腐与防火设计。在优化方面，提出了结构尺寸、布局、材料和施工过程的优化策略。文章还评估了钢结构的承载力、抗震性能和耐久性，以确保结构的安全和可靠性。本文旨在为工业厂房钢结构设计提供实用指导，促进钢结构在现代工业建筑中的广泛应用。

关键词：工业厂房；钢结构；设计与优化

1 现代工业厂房钢结构设计基础

1.1 钢结构材料特性

钢结构主要采用钢材，钢材具有高强度、良好的塑性和韧性等优点。高强度使得钢结构能够承受较大的荷载，在相同承载力要求下，相比其他结构形式可减少构件截面尺寸，降低材料用量。良好的塑性使钢结构在承受较大荷载时，能通过塑性变形吸收能量，避免发生脆性破坏，提高结构的安全性。韧性则保证了钢结构在动力荷载作用下，如地震、风荷载等，具有较好的抗冲击性能，不易发生断裂。此外，钢材还具有良好的加工性能，便于进行切割、焊接、螺栓连接等加工操作，能够实现各种复杂形状构件的制作，满足工业厂房多样化的设计需求。

1.2 工业厂房荷载特点

工业厂房的荷载具有多样性和复杂性的特点。恒载方面，主要包括厂房结构自身的重量、设备重量以及长期固定在厂房内的物料重量等。活载则涵盖生产过程中产生的可变荷载，如人员走动、物料搬运、设备运行时的振动荷载等。此外，工业厂房还可能受到特殊荷载的作用，例如在有吊车的厂房中，吊车行驶及起吊重物时会产生较大的轮压和冲击力；在一些有爆炸危险的厂房中，还需考虑爆炸荷载；在沿海地区或高海拔地区的厂房，还要考虑风荷载和雪荷载的特殊影响。这些荷载的组合和作用方式复杂多样，对钢结构的设计提出了较高要求^[1]。

2 现代工业厂房钢结构设计要点

2.1 结构体系选型

结构体系的选型需结合厂房的跨度、高度、荷载特点及生产工艺要求。门式刚架结构体系适用于跨度15m至30m、柱高6m至12m的中小型工业厂房，其由门式刚架、

屋面檩条、墙面檩条等组成，具有自重轻、施工速度快的优势，钢材用量通常为 30kg/m^2 至 50kg/m^2 。某电子元件厂采用门式刚架结构，单跨24m，檐高8m，从钢结构加工到安装完成仅用45天，较混凝土结构工期缩短50%。排架结构体系常用于跨度20m至40m、设有吊车的工业厂房，由屋架、柱、基础等组成，柱与屋架采用铰接连接，柱与基础采用刚接，可承受较大的竖向荷载和水平力。当厂房内设置5t至50t吊车时，排架结构能通过合理的截面设计满足吊车运行的力学要求，某机械加工厂30m跨度排架厂房，配备20t吊车，柱距6m，经计算验证，结构在吊车水平荷载作用下的侧向位移控制在规范允许范围内。框架结构体系适用于多层工业厂房或荷载较大的单层厂房，梁柱节点采用刚接，整体刚度大，抗侧移能力强，跨度可达10m至20m，层高3m至6m。多层钢结构厂房常采用框架结构，如某汽车装配车间为三层框架，跨度18m，每层均布置生产线设备，通过框架柱的合理布置，满足了设备安装和工艺流程的空间需求；网架结构体系适用于大跨度（40m以上）、大柱距的工业厂房，如飞机装配车间、大型仓库等，其由众多钢杆件通过节点连接形成空间网格结构，具有受力均匀、刚度大、跨度大的特点。某航空制造厂房采用螺栓球节点网架结构，跨度60m，柱距15m，屋面活荷载 0.7kN/m^2 ，经有限元分析，网架最大挠度为跨度的1/250，满足设计要求。

2.2 构件设计

构件设计需保证强度、刚度和稳定性。钢梁设计应根据弯矩和剪力组合确定截面形式，常用H型钢梁，其截面高宽比一般为1.5至2.0，对于跨度较大的梁（15m以上），可采用变截面H型钢，在弯矩较小的部位减小截面高度，以节省材料。某重型厂房的24m跨度钢梁，采用变截面H型钢，最大截面高度1200mm，最小截面高度

600mm, 较等截面梁节省钢材15%。钢柱设计需考虑轴向力、弯矩和剪力的共同作用, 实腹式钢柱(H型钢柱、箱型柱)应用广泛, H型钢柱适用于单向弯矩较大的情况, 箱型柱适用于双向弯矩作用或有防腐要求的环境。柱的长细比应控制在规范限值内, 一般不大于150, 以保证整体稳定性。某厂房钢柱采用Q355B箱型柱, 截面尺寸400mm×400mm×16mm, 长细比120, 在轴力和弯矩组合作用下, 强度和稳定性均满足要求; 檩条和支撑系统是保证结构整体刚度的重要构件。屋面檩条常用C型钢或Z型钢, 跨度一般为3m至6m, 间距1.5m至2.0m, 需验算挠度和承载力, 挠度限值为跨度的1/200。支撑系统包括水平支撑、垂直支撑和隅撑, 水平支撑布置在屋架上弦和下弦平面, 传递水平力并保证屋盖刚度; 垂直支撑与水平支撑形成空间体系, 增强结构的抗侧移能力; 隅撑连接檩条与钢梁, 防止钢梁受压翼缘失稳^[2]。

2.3 节点连接设计

节点连接设计需满足强度、刚度和延性要求, 焊接连接是钢结构节点的主要形式之一, 适用于受力较大的部位, 如梁柱刚接节点的翼缘焊接采用坡口焊, 腹板采用角焊缝, 焊接质量需达到二级焊缝标准, 确保焊缝强度不低于母材强度。某框架结构厂房的梁柱节点, 翼缘采用全熔透坡口焊, 经无损检测, 焊缝合格率100%, 在荷载作用下节点未出现塑性变形; 螺栓连接分为高强度螺栓连接和普通螺栓连接, 高强度螺栓连接通过预紧力产生的摩擦力传递荷载, 适用于承受动力荷载的节点, 如吊车梁与柱的连接, 常用8.8级或10.9级高强度螺栓, 螺栓直径16mm至24mm, 接触面经喷砂处理以提高摩擦系数。普通螺栓连接适用于受力较小的部位, 如檩条与钢梁的连接, 螺栓直径8mm至16mm, 需验算螺栓的剪切和承压承载力; 节点构造应避免应力集中, 在梁柱节点处, 梁翼缘与柱翼缘的连接应采用圆弧过渡, 减少直角转折; 螺栓布置应均匀对称, 间距满足规范要求, 端距不小于2倍螺栓直径, 以防止钢板被剪断。某厂房吊车梁与柱的连接节点, 因螺栓间距过小导致钢板局部承压破坏, 经整改后增大螺栓间距, 问题得到解决。

2.4 防腐与防火设计

防腐设计需根据厂房环境确定防腐等级, 工业区环境中的钢结构一般采用中等防腐等级, 涂层体系为底漆+中间漆+面漆, 总干膜厚度不小于150μm。底漆常用环氧富锌底漆, 干膜厚度60μm至80μm, 具有良好的阴极保护作用; 中间漆采用环氧云铁中间漆, 干膜厚度40μm至60μm, 增强涂层的屏蔽性; 面漆采用聚氨酯面漆或氟碳面漆, 干膜厚度30μm至50μm, 提供装饰和耐候性。

某化工厂房钢结构采用该涂层体系, 经5年使用, 涂层完好率达90%以上, 锈蚀面积小于5%。镀锌防腐适用于腐蚀性较强的环境, 如食品加工厂、制药厂等, 热浸镀锌层厚度不小于85μm, 锌层与钢材结合牢固, 耐腐蚀性是普通涂层的3至5倍, 但初期成本较高。某食品厂车间钢结构采用热浸镀锌处理, 10年内未进行防腐维护, 锌层仅局部轻微磨损; 防火设计需根据厂房火灾危险性类别确定防火等级, 丙类工业厂房的钢结构柱耐火极限要求不低于2.5h, 梁不低于1.5h, 楼板不低于1.0h。喷涂防火涂料是常用的防火措施, 厚型防火涂料(厚度25mm至50mm)耐火极限可达3.0h以上, 适用于柱、梁等承重构件; 薄型防火涂料(厚度3mm至7mm)耐火极限1.0h至2.0h, 适用于檩条等次要构件。某木器加工厂钢结构采用厚型防火涂料, 经耐火试验, 柱在火灾作用下3h内未丧失承载力, 满足设计要求。

3 现代工业厂房钢结构优化方法

3.1 结构尺寸优化

结构尺寸优化以最小化用钢量为目标, 在满足强度、刚度和稳定性约束条件下, 通过优化算法确定构件最优截面尺寸。以H型钢梁为例, 可建立以梁的高度、翼缘宽度、腹板厚度为设计变量, 以强度和挠度为约束条件的优化模型, 采用遗传算法求解。某厂房20m跨度钢梁经优化后, 翼缘宽度从300mm减至280mm, 腹板厚度从10mm减至8mm, 用钢量减少8%, 且各项指标仍满足规范要求。对于钢柱, 可根据轴力和弯矩的分布特点优化截面尺寸, 在轴力较大的部位采用较大截面, 弯矩较大的部位增加翼缘厚度。某排架结构厂房钢柱, 通过分段优化截面尺寸, 柱底截面尺寸400mm×300mm, 柱顶截面尺寸300mm×200mm, 较等截面柱节省钢材12%。

3.2 结构布局优化

结构布局优化通过合理布置柱网、支撑系统等, 提高结构的受力合理性和空间利用率。柱网布置应与生产工艺相协调, 在满足设备安装和运输通道要求的前提下, 增大柱距可减少柱子数量, 扩大使用空间, 某装配车间将柱距从6m增至9m, 虽然单根柱截面尺寸有所增大, 但总用钢量减少5%, 且车间布局更灵活^[3]。支撑系统的优化布置可在保证结构刚度的前提下减少支撑数量, 通过有限元分析确定支撑的最优位置和截面尺寸, 避免支撑布置过多导致材料浪费。某门式刚架厂房经支撑系统优化后, 去除了部分次要支撑, 结构侧向位移仅增加5%, 仍在规范允许范围内, 用钢量减少3%。

3.3 材料优化

材料优化包括选用高性能钢材和合理利用钢材强

度, Q460钢等高强度钢材屈服强度比Q355钢提高30%以上, 在相同荷载条件下可减小构件截面, 某重型厂房采用Q460钢替代Q355钢, 梁截面高度减少100mm, 用钢量减少15%。钢材的合理混用也是材料优化的重要方式, 在受力较大的部位采用高强度钢材, 次要部位采用普通钢材, 如厂房的主梁采用Q460钢, 次梁和檩条采用Q355钢, 既保证结构安全, 又降低成本。某多层厂房通过材料混用, 整体用钢量降低6%。

3.4 施工过程优化

施工过程优化可提高施工效率, 降低施工成本。钢结构工厂预制化生产能提高构件加工精度, 减少现场作业时间, 某厂房钢结构构件在工厂完成加工和预拼装, 现场仅进行吊装和连接, 施工周期缩短30%, 安装质量合格率达98%。吊装方案优化需根据构件重量和现场条件选择合适的吊装机械和吊装顺序, 大型构件采用分段吊装, 减少吊装机械的负荷, 某网架结构厂房采用“分块吊装、高空拼装”的方案, 使用25t汽车吊即可完成吊装, 较整体吊装方案节省机械租赁费用40%。

4 现代工业厂房钢结构性能评估

4.1 承载力评估

承载力评估通过结构计算和试验验证, 确保钢结构在各种荷载作用下的安全。采用有限元软件建立结构模型, 模拟恒荷载、活荷载、风荷载等作用下的应力分布, 评估构件和节点的强度。某厂房在承载力评估中发现, 吊车梁在最大轮压作用下局部应力超过屈服强度, 经增加翼缘厚度后, 应力降至安全范围。静载试验是评估承载力的重要手段, 对关键构件或节点施加静荷载, 测量其变形和应力, 验证结构的实际承载能力。某网架屋盖进行1.2倍设计荷载静载试验, 最大挠度为12mm, 小于规范限值15mm, 卸载后残余变形2mm, 表明屋盖承载力满足要求^[4]。

4.2 抗震性能评估

抗震性能评估需考虑结构在地震作用下的动力响应, 采用反应谱法或时程分析法计算结构的地震作用效应, 评

估结构的位移和延性。根据厂房所在地区的地震烈度, 确定相应的抗震设防烈度, 如7度区厂房的抗震措施应保证结构在多次地震下不损坏, 罕遇地震下不倒塌。某位于地震烈度8度区的工业厂房, 经抗震性能评估发现, 框架柱的延性比不足, 通过在柱端设置耗能支撑, 提高了结构的延性和耗能能力, 满足抗震设计要求。

4.3 耐久性评估

耐久性评估考虑钢结构在使用环境中的腐蚀、疲劳等因素, 预测结构的使用寿命。根据环境腐蚀性等级和防腐措施, 计算钢结构的锈蚀速率, 评估截面损失率, 当截面损失率超过10%时, 需进行防腐修复或构件更换。某沿海地区厂房钢结构经耐久性评估, 预测在现有防腐涂层下, 使用寿命可达15年, 建议10年后进行涂层维护。疲劳性能评估针对承受动力荷载的构件, 如吊车梁、制动梁等, 根据荷载循环次数和应力幅, 评估构件的疲劳寿命。某厂房吊车梁经计算, 在吊车荷载作用下的疲劳寿命为200万次, 满足50年使用期内的荷载循环要求。

结束语

综上所述, 现代工业厂房钢结构的设计与优化是一个复杂而关键的过程, 涉及多个方面和技术要点。通过合理选型和精细设计, 可以确保钢结构在满足强度、刚度和稳定性要求的同时, 实现材料的有效利用和施工效率的提升。随着技术的进步和设计理念的更新, 钢结构将在未来工业厂房建设中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]何建梁.工业厂房结构设计中钢结构设计的应用[J].陶瓷,2024,(02):210-212.
- [2]油美美.某工业厂房结构设计探析[J].江西建材,2024,(03):123-125.
- [3]李洁琼.“工民建”中钢结构施工要点研究[J].房地产世界,2024(04):125-127.
- [4]刘镇.门式钢架轻型钢结构工业厂房结构设计[J].石材,2024(04):22-24+66.