

钢结构厂房抗震设计优化策略与实践研究

王冠霖

镇海石化工程股份有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 钢结构厂房因轻质高强、施工便捷等优势广泛应用于工业建筑领域,但地震作用下其抗震性能关乎结构安全与生产连续性。研究结合结构体系、材料性能、节点构造等关键影响因素,提出优化结构体系选型、选用高性能材料及连接方式、引入隔震消能减震技术等策略。通过重型设备、石化压缩机、钢结构加工等不同类型厂房实践案例,验证策略可显著提升抗震能力,为钢结构厂房抗震设计提供科学依据与实践参考。

关键词: 钢结构厂房; 抗震设计; 优化策略; 实践

引言

随着工业现代化进程加速,钢结构厂房以其优越性能成为工业建筑主流。然而,地震灾害频发对钢结构厂房抗震性能提出严峻挑战。结构体系、材料特性及节点构造等因素相互关联,共同影响厂房抗震能力。本文基于对上述影响因素的深入分析,针对性提出抗震设计优化策略,并结合典型工程案例,探讨优化策略在实际项目中的应用效果,旨在为提升钢结构厂房抗震安全性提供理论与实践支持。

1 钢结构厂房抗震设计概述

钢结构厂房凭借强度高、自重轻、塑性韧性好及施工便捷等优势,在现代工业建筑中广泛应用,但其抗震性能受地震作用下结构动力响应特性影响显著。地震发生时,地面运动产生的惯性力通过基础传递至钢结构厂房,引起结构的振动响应,结构的自振周期、振型等动力特性决定了其在地震作用下的受力状态和变形模式,合理的抗震设计需充分考虑这些因素,确保结构在地震中保持稳定。钢结构厂房抗震设计基于结构动力学和材料力学理论,通过分析结构在地震作用下的力学行为,确定合理的结构体系和构件参数。框架结构、框架-支撑结构等不同的结构体系,其抗震性能和适用范围存在差异。框架结构具有较好的空间灵活性,但侧向刚度相对较低;框架-支撑结构通过设置支撑构件,有效提高了结构的侧向刚度和承载能力,增强了抗震性能。设计时需根据厂房的功能需求、建筑高度、场地条件等因素,选择合适的结构体系,并合理布置梁柱等构件,优化结构的抗侧力体系,使结构在地震作用下能够实现多道防线的耗能机制。材料的力学性能对钢结构厂房抗震能力至关重要。钢材的屈服强度、抗拉强度、伸长率等指标直接影响构件的承载能力和延性。在抗震设计中,应选用符合相关标准、具有良好延性和韧性的钢材,以保证结

构在地震作用下能够发生塑性变形,耗散地震能量,避免脆性破坏。连接节点作为钢结构的关键部位,其设计质量直接关系到结构的整体性能。合理的节点设计需保证节点的强度、刚度和延性不低于构件本身,使节点在地震作用下能够可靠传递内力,维持结构的整体性,从而提高钢结构厂房的抗震能力,保障工业生产设施在地震灾害中的安全性。

2 钢结构厂房抗震性能影响因素分析

2.1 结构体系

钢结构厂房的结构体系对其抗震性能起着决定性作用。框架结构通过梁柱刚性连接形成抗侧力体系,其延性和耗能能力依赖于构件的合理布置与刚度分配。当横向框架与纵向支撑协同工作时,能有效限制结构在地震作用下的水平位移,降低层间变形集中现象。桁架结构以其高效的受力模式,将地震荷载通过杆件轴力传递,可减少构件弯曲应力,在大跨度厂房中展现出优异的抗震性能,但需关注桁架与柱的连接节点以及支撑系统的稳定性。排架结构常用于单层工业厂房,其侧向刚度相对较弱,在地震作用下易发生平面外失稳,需通过设置合理的柱间支撑、系杆及屋盖支撑系统,增强结构整体空间刚度,避免薄弱层的出现。结构体系的选型与布置需综合考虑厂房的功能需求、跨度、高度等因素,通过优化构件尺寸、间距及连接方式,提升结构在地震作用下的整体协同工作能力与耗能性能^[1]。

2.2 材料性能

钢材的力学性能直接影响钢结构厂房的抗震表现。屈服强度与抗拉强度是衡量钢材承载能力的关键指标,较高的屈强比意味着钢材在达到屈服后仍有一定的强度储备,可避免结构在地震反复荷载作用下过早发生破坏。钢材的延性性能至关重要,良好的伸长率与断面收缩率能使结构在地震作用下产生较大的塑性变形,消耗

地震能量,防止脆性破坏。低周疲劳性能也是影响抗震性能的重要因素,地震荷载的往复作用易使钢材产生疲劳损伤,需选择具有良好抗疲劳性能的钢材,降低疲劳裂纹扩展风险。钢材的韧性指标,如冲击韧性,决定了结构在低温及动力荷载下的抗断裂能力,在寒冷地区或地震频发区域,需选用韧性良好的钢材,保证结构在复杂地震工况下的安全性。钢材的质量稳定性与均匀性同样不可忽视,生产工艺与质量控制水平直接影响钢材性能的离散程度,优质钢材能为结构抗震性能提供可靠保障。

2.3 节点构造

钢结构厂房的节点构造是确保结构整体性与抗震性能的关键环节。梁柱节点作为结构传力的枢纽,其设计与施工质量直接影响结构的抗震能力。刚性节点通过全熔透焊接或高强度螺栓连接,使梁柱间形成可靠的刚性连接,保证结构在地震作用下的内力传递与变形协调。刚性节点在地震反复荷载作用下,易在焊缝热影响区产生应力集中与脆性断裂,需合理设计节点形式,优化焊缝坡口与焊接工艺,减少残余应力。半刚性节点可通过节点转动释放部分地震能量,其力学性能介于刚性与铰接之间,需精确计算节点刚度与转动性能,确保与整体结构的力学性能匹配。支撑节点的构造形式决定了支撑系统的工作效率,合理的支撑连接方式能使支撑有效发挥抗侧力作用,避免支撑屈曲与节点失效。节点域的加强措施至关重要,通过增设加劲肋、提高节点域钢材厚度等方式,可增强节点域的抗剪承载力,防止节点域在地震作用下发生剪切破坏,保障结构在地震过程中的传力路径畅通与整体稳定性。

3 钢结构厂房抗震设计优化策略

3.1 优化结构体系选型

钢结构厂房抗震性能与结构体系选型密切相关,合理的结构体系可显著提升厂房在地震作用下的稳定性与耗能能力。框架-支撑结构体系是钢结构厂房常用选型之一,其通过布置竖向支撑构件,将水平地震力有效传递至基础,利用支撑的轴向拉压变形消耗地震能量,同时框架结构保证了厂房内部空间的灵活性。桁架结构体系在大跨度钢结构厂房中表现出色,通过三角形单元的几何不变性,增强结构整体刚度与抗侧移能力,地震作用下桁架各杆件协同工作,以轴力形式抵抗荷载,减小杆件弯矩,降低结构破坏风险。采用空间网格结构体系,如网架、网壳结构,利用空间传力特性,使荷载均匀分布,在水平与竖向地震作用下均能展现良好的受力性能,尤其适用于对空间要求高、跨度大的工业厂房。在选型过程中,需综合考虑厂房的功能需求、跨度大小、

高度以及地震设防烈度等因素,通过力学计算与结构分析,确定最优结构体系,实现抗震性能与经济性的平衡。

3.2 选用高性能材料与合理的连接方式

高性能钢材的选用是提升钢结构厂房抗震性能的关键环节。屈服强度高、延性好的钢材,在地震作用下能够承受较大变形而不发生脆性破坏,有效吸收地震能量。例如,低合金高强度结构钢,其良好的综合力学性能,可使结构在弹性阶段承受更大荷载,进入塑性阶段后又具备足够的变形能力,避免结构因突然断裂而倒塌。合理的连接方式是保障钢结构整体性的重要因素,焊接连接凭借其整体性强、传力直接的特点,能够使构件间形成刚性连接,增强结构的协同工作能力,但需严格控制焊接工艺,避免出现焊接缺陷导致应力集中。螺栓连接具有安装便捷、可拆卸的优势,在地震作用下,通过合理设计的高强度螺栓连接,可实现连接部位的塑性变形,耗散地震能量,同时便于震后结构的修复与加固。在实际工程中,根据构件受力特点与结构功能需求,将焊接与螺栓连接相结合,充分发挥两者优势,能够构建安全可靠、抗震性能优越的钢结构连接体系^[2]。

3.3 引入隔震与消能减震技术

隔震技术通过在钢结构厂房基础与上部结构之间设置隔震层,改变结构的动力特性,延长结构自振周期,减少地震能量向上部结构的传递。常见的隔震装置如橡胶隔震支座,其具有良好的竖向承载能力与水平变形能力,在地震作用下,隔震层发生水平剪切变形,使上部结构与地面运动解耦,降低结构的地震响应。消能减震技术则是在钢结构中设置消能部件,如黏滞阻尼器、金属阻尼器等,利用阻尼器在地震作用下的耗能特性,将地震动能转化为热能等其他形式的能量耗散掉。黏滞阻尼器通过黏滞流体的运动产生阻尼力,能够有效消耗地震输入的能量,限制结构的位移反应;金属阻尼器利用金属材料的塑性变形耗能,在小震作用下保持弹性,大震时进入塑性耗能,为结构提供额外的阻尼比。隔震与消能减震技术的引入,可显著降低钢结构厂房在地震作用下的损伤程度,提高结构的抗震安全性,同时为厂房内部设备与生产活动提供更可靠的保护。

4 钢结构厂房抗震设计优化实践

4.1 某重型设备制造钢结构厂房优化实践

(1) 针对重型设备制造厂房荷载大、设备振动频繁的特性,在抗震设计中采用偏心支撑框架与屈曲约束支撑组合体系。偏心支撑框架以消能梁段优先耗能控位移,屈曲约束支撑靠核心单元塑性变形吸能,二者协同显著提升结构耗能能力。在钢柱设计上,采用箱型截面

并加大腹板厚度,增强竖向承载与抗侧移性能,以抵御叠加效应。(2)考虑到厂房内部大型设备对结构动力响应的影响,运用有限元软件对结构进行精细化建模分析。通过时程分析模拟不同地震波作用下结构的加速度、位移响应,优化梁柱节点构造,采用全熔透焊接与高强度螺栓连接的混合节点形式,提高节点延性与整体性,避免地震中节点失效引发结构破坏。(3)屋面系统采用轻质高强的压型钢板复合保温板,减轻结构自重,降低地震作用效应。在吊车梁系统设置阻尼器,吸收吊车运行振动与地震作用产生的能量,减少对主体结构的影响。经多遇、设防、罕遇地震工况下的模拟分析验证,优化后的设计方案使厂房在不同地震强度下均能满足抗震性能目标,保障生产设备安全与厂房结构稳定^[3]。

4.2 某石化压缩机厂房隔震设计实践

(1)石化压缩机厂房对设备运行精度要求极高,为降低地震对精密压缩机设备的影响,采用天然橡胶隔震支座与铅芯橡胶隔震支座混合布置的隔震技术。天然橡胶隔震支座提供竖向承载力与弹性恢复力,铅芯橡胶隔震支座兼具较高的初始刚度和耗能能力,二者合理搭配,有效延长结构自振周期,避开地震卓越周期,减少上部结构地震力输入。(2)在隔震层设计中,精确计算隔震支座的平面布置与数量,通过优化调整使结构质心与刚心尽量重合,避免地震中产生扭转效应。对隔震支座与上部结构、基础的连接节点进行加强设计,采用预埋螺栓与连接钢板的可靠连接方式,确保地震时隔震层与上下部结构协同工作。(3)建立考虑隔震层非线性特性的结构分析模型,运用反应谱法与动力时程分析法进行抗震性能评估。分析结果显示,采用隔震设计后,上部结构地震作用大幅降低,层间位移角满足压缩机厂房对设备运行环境的严苛要求,在设防地震作用下,隔震层保持弹性工作状态,罕遇地震下,隔震支座通过耗能有效保护上部结构与精密设备安全,达到预期隔震效果。

4.3 某钢结构加工厂房消能减震设计实践

(1)钢结构加工厂房空间跨度大、内部生产线布局

复杂,针对其结构特点,在框架梁柱节点处设置黏滞阻尼器与金属阻尼器。黏滞阻尼器通过黏滞流体的运动消耗地震能量,金属阻尼器利用自身塑性变形耗能,两种阻尼器优势互补,有效增加结构附加阻尼比,降低地震作用下的结构响应。(2)基于性能化设计理念,根据厂房不同区域功能与重要性,差异化布置阻尼器。在生产线关键设备区域、大跨度空间部位适当加密阻尼器设置,提高这些区域的抗震性能。通过反复的试算与优化,确定阻尼器的规格、数量及布置位置,使结构在多遇地震下阻尼器保持弹性,设防地震与罕遇地震时充分发挥耗能作用。(3)采用有限元软件对设置消能减震装置后的结构进行弹塑性时程分析,模拟地震作用下结构的损伤发展过程。结果表明,消能减震设计显著减小了结构层间位移、加速度响应,有效控制结构塑性铰的发展部位与程度,使厂房在地震后可快速恢复生产功能,同时降低了结构构件的截面尺寸与用钢量,实现经济效益与抗震性能的平衡^[4]。

结语

综上所述,钢结构厂房抗震设计优化需综合考量结构体系、材料性能及节点构造等多方面因素。通过优化选型、高性能材料应用及隔震消能减震技术引入,可有效提升厂房抗震性能。实践案例表明,优化策略能显著增强钢结构厂房在地震作用下的安全性与稳定性。未来,随着抗震技术发展与新材料应用,钢结构厂房抗震设计将不断完善,为工业建筑安全筑牢防线。

参考文献

- [1]张文明,牛家乐.钢结构厂房抗震性能评估及减震设计优化[J].粘接,2025,52(3):173-176.
- [2]胡建锋.钢结构工业厂房抗震设计[J].石材,2024(1):43-45.
- [3]闫艳蕾.关于钢结构工业厂房的抗震设计分析[J].中国金属通报,2021(13):177-178.
- [4]万里鹏,周洋,王强.钢结构厂房抗震支吊架设计思路浅析[J].中国设备工程,2020(2):246-248.