

常规钢框架小型精细化工一体化厂房抗震优化结构设计

陆 彬

河北英科石化工程有限公司宁夏分公司 宁夏 银川 750000

摘 要: 小型精细化工一体化钢框架厂房荷载工况复杂、设备布局集中, 常规结构存在刚度不均、节点抗震薄弱、地震影响不佳等问题, 易引发化工次生灾害。本文依据现行抗震标准, 从构件参数、节点构造、整体布局及阻尼体系开展抗震优化设计。通过有限元数值模拟对比分析优化前后结构性能, 结果表明, 优化方案可均衡结构刚度、减小地震变形与应力集中, 有效提升厂房抗震能力, 且经济与实用性良好, 可为同类工程提供参考。

关键词: 常规钢框架; 小型精细化工一体化; 厂房抗震; 优化结构设计

引言: 精细化工一体化厂房采用集约化钢框架结构, 生产连续性强、设备荷载特殊, 地震作用下极易发生结构损坏与物料泄漏、爆炸等次生事故, 抗震设防标准要求严苛。传统常规钢框架厂房存在刚度分布失衡、节点耗能不足、易产生共振等缺陷, 难以满足化工生产安全需求。为此本文针对性开展结构抗震优化设计, 通过精细化结构改良, 全面提升厂房抗震稳定性与安全储备, 保障化工生产安全运行。

1 小型精细化工一体化钢框架厂房结构及抗震特性分析

1.1 小型精细化工一体化厂房结构特征

1厂房整体布局与功能特点。小型精细化工一体化厂房不同于普通工业厂房, 采用生产、存储、辅助设备一体化集成布局, 空间集约化程度高。摒弃传统分散分区模式, 将反应、提纯、仓储、输送等核心设备整合于同一框架体系, 贴合化工工艺流程线, 适配连续化、密闭化生产作业, 整体功能性与整体性更为突出。2钢框架结构体系组成。厂房采用纯钢框架承重体系, 核心由H型钢柱、焊接箱型柱、H型钢梁、焊接钢梁、十字交叉支撑体系、压型钢板组合楼板及高强螺栓节点构成。构件按中等荷载标准选型, 支撑体系均匀布置以保障结构侧向刚度, 楼板兼顾承载力与防渗性, 节点采用刚性连接, 契合厂房紧凑化、轻量化的设计要求^[1]。3化工厂房特殊荷载工况。厂房荷载工况具备化工行业特殊性, 除自重、风、雪等常规荷载外, 还包含设备恒载、工艺操作活载、管道介质附加荷载等专项荷载。同时需叠加地震、化工微振动荷载, 通过多工况荷载组合, 形成适配精细化工生产的复合荷载体系。

1.2 钢结构厂房抗震设计理论与标准依据

1钢结构抗震基本理论。核心涵盖结构动力特性、地震响应原理、延性抗震与耗能减震理论。钢结构凭借良

好塑性变形能力, 可通过构件局部屈服消耗地震能量, 有效缓解结构整体震动响应, 降低坍塌风险。2现行厂房抗震设计标准要求。设计严格遵循《建筑抗震设计规范》《钢结构设计标准》, 结合厂区场地类别、设防烈度, 确定厂房抗震设防等级、场地特征周期、阻尼比等核心参数, 标准构件截面选型与抗震构造设计。3精细化工厂房抗震特殊设计要求。基于化工行业防爆、防泄漏特性, 厂房抗震设计需额外满足设备锚固稳固、管道抗震防脱落、结构密闭性防护要求, 避免地震作用引发物料泄漏、爆炸等次生灾害。

1.3 常规钢框架厂房抗震薄弱环节分析

1结构刚度分布不均。因生产设备集中布置, 厂房局部荷载密集, 导致钢框架局部刚度偏弱、整体刚度分布失衡, 地震作用下易出现局部受力过载、变形不均的问题。2节点连接抗震性能缺陷。梁柱、支撑节点为抗震薄弱部位, 地震往复荷载作用下, 节点易出现应力集中、螺栓滑移、焊缝开裂等问题, 导致节点刚度退化, 丧失承载抗震能力。3整体结构动力响应短板。部分厂房自振周期、阻尼比设计不合理, 与地震波频率易产生共振, 引发结构层间位移、变形超标问题, 大幅降低厂房整体抗震储备能力。

2 常规钢框架小型精细化工一体化厂房抗震优化结构设计方案

2.1 抗震优化设计原则与优化目标

1优化设计基本原则。本次厂房抗震优化遵循安全可靠、经济合理、工艺适配、施工便捷的核心原则, 依托现行抗震标准, 优先保障结构在多遇、罕遇地震下的整体稳定, 规避坍塌、设备脱落等安全隐患。结合精细化工一体化厂房集约化生产特性, 兼顾抗震性能与生产实用性, 不盲目扩增构件截面及钢材用量, 严控造价, 适配设备布置、管线敷设与连续生产需求, 保障方案落

地性与施工便捷性。2结构性能优化目标。聚焦厂房抗震核心性能设置量化指标,优化层间位移角,使其符合钢结构厂房抗震限值标准。均衡提升结构整体刚度与抗侧力承载力,改善受力不均问题,优化构件延性与耗能能力,通过塑性变形耗散地震能量、规避脆性破坏,弱化地震扭转及共振效应,全面提升厂房抗震储备与防灾能力。3优化约束条件。优化设计严控工程约束,构件尺寸不得占用生产、设备及管线通行空间;在原设计基础上合理优化钢材用量,控制造价增量。整体布局适配现有化工工艺与设备布置,不改动核心生产分区,同时采用成熟简洁的构造形式,适配狭小场地、短周期的施工条件。

2.2 结构构件参数优化设计

1钢柱截面参数优化。结合厂房地震受力模拟分析结果,对原有钢柱截面进行精细化优化。摒弃单一截面设计形式,根据竖向荷载与地震侧向力分布差异,分区调整钢柱截面尺寸,设备密集受力区域采用加厚箱型柱截面,边角受力较小区域适度优化截面规格。通过优化截面惯性矩与抗弯模量,有效提升钢柱竖向承载能力和抗侧移性能,解决原有钢柱地震下局部承压不足、侧向变形过大的问题。2钢梁体系优化设计。针对原有钢梁地震下弯曲变形、应力集中缺陷,开展体系优化设计。结合厂房跨度与荷载分布,调整钢梁截面规格,统一优化主次梁匹配参数,替换部分刚度不足的薄壁型钢构件。同时优化钢梁跨度布置,规整受力体系,减小钢梁跨中弯矩与剪力峰值,均衡各区域钢梁受力状态,有效降低地震往复荷载作用下的弯曲变形与疲劳损伤,提升整体受力稳定性^[2]。3支撑系统优化布置。基于厂房刚度分布不均的问题,优化抗震支撑系统。合理调整十字中心支撑、偏心耗能支撑的布置位置与数量,在结构刚度薄弱区、设备集中加密支撑构件,规整支撑对称布置形式,消除刚度偏心问题。同时匹配构件规格,提升支撑体系的整体协同工作能力,强化结构侧向刚度,增强地震能量耗散效果,有效抑制结构层间位移与整体晃动幅度。

2.3 节点抗震构造优化设计

1梁柱连接节点优化。对比传统刚性节点与半刚性节点的抗震性能,传统全刚性节点易出现焊缝脆裂、应力集中等问题,半刚性节点耗能能力更强。本次优化结合厂房受力特点,关键承重区域采用改良刚性节点,增设连接板、加劲板加固,次要区域采用半刚性节点。优化节点螺栓排布与焊缝构造,降低应力集中程度,提升节点延性与抗变形能力,实现强节点、弱构件的抗震设计要求^[3]。2支撑连接节点优化。针对原有支撑节点连

接单薄、易疲劳破坏的缺陷,优化支撑与梁柱的连接构造。采用加厚端板、高强螺栓群连接方式,替换老旧简易搭接构造,增大节点接触受力面积,避免地震往复荷载下出现螺栓滑移、节点撕裂问题。同时优化节点过渡构造,消除棱角应力集中现象,大幅提升节点抗地震破坏、抗疲劳性能,保障支撑体系持续稳定受力。3局部薄弱区域构造加强。针对性加固厂房抗震薄弱区域,对设备集中荷载较大的楼面区域,增设局部加劲肋、次梁,提升局部刚度与承载力。对墙体洞口、设备吊装洞口等应力集中部位,设置洞口加固框、补强钢板,弥补断面削弱带来的刚度损失。通过局部构造强化,解决厂房局部受力不均、易先行破坏的短板,提升结构整体抗震均匀性。

2.4 结构整体布局优化

1结构刚度均匀化布局优化。针对原有结构刚度分布不均、偏心明显的问题,微调钢柱、钢梁及支撑的整体布置,实现结构平面、竖向刚度对称均匀分布。修正竖向刚度突变、平面刚度偏心缺陷,有效减小地震作用下的结构扭转效应,避免局部构件受力过载,提升结构整体协同抗震性能。2设备荷载适配布局优化。结合精细化设备自重、摆放位置及工艺荷载特点,优化承重构件布置。在重型设备下方对应加密梁柱构件、优化构件截面,让设备荷载可垂直、均匀传递至基础,避免局部荷载集中导致的受力失衡,降低地震下荷载不均引发的结构变形与破坏风险。3阻尼结构优化设置。在厂房楼层、支撑关键位置合理增设阻尼构件,依托阻尼器的耗能特性,消耗地震输入能量,有效降低结构自振响应、减小层间位移与振动幅度。通过被动阻尼减震优化,弥补钢结构自身阻尼比偏小的短板,大幅提升厂房整体抗震耗能能力,增强结构地震自适应防护性能^[4]。

3 优化后钢结构厂房抗震性能数值模拟与结果分析

3.1 有限元模型建立与参数设定

1建模软件选取与建模思路。本文采用通用结构有限元分析软件开展数值模拟,依据小型精细化工一体化厂房实际尺寸、结构布置方案建立整体三维精细化模型。建模遵循保真且适度简化的原则,完整保留钢柱、钢梁、支撑体系及节点构造,忽略对整体抗震性能影响较小的围护构件、小型附属配件,严格按照优化后的结构方案复刻构件布局,保证模型与实际工程结构高度契合。2材料参数与单元类型设定。模型钢材统一选用Q355B,设定弹性模量、泊松比、屈服强度等标准参数,贴合工程实际用材性能。结构梁柱构件采用空间梁单元模拟,可精准还原构件弯曲、轴向受力及变形特性;楼

板采用壳单元模拟,保障楼面刚度传递与荷载扩散的真实性,支撑构件采用桁架单元,适配其轴向受力的工作特性,匹配钢结构受力变形规律^[5]。3边界条件与荷载工况施加。模型底部采用固支边界条件,模拟厂房基础对上部结构的约束作用,限制底部位移与转角。荷载工况严格贴合化工厂房实际,依次施加结构自重、设备恒载、工艺活载、风荷载,并依据抗震标准导入多遇、罕遇地震波,完成多维度荷载组合施加,真实还原厂房正常使用与地震工况下的受力环境。

3.2 模态分析与结构动力特性验证

1优化前后自振周期与振型对比。通过模态分析提取结构前阶自振周期与振型,对比优化前后动力特性参数。优化后厂房整体自振周期趋于合理,有效规避地震共振风险,结构振型以平动为主,扭转振型显著减弱,相较于优化前杂乱的振动形态,结构整体动力稳定性大幅提升。2结构刚度与质量分布合理性分析。结合模态数据对结构刚度、质量分布进行核验,优化后通过构件与布局调整,消除了原有结构局部刚度偏弱、质量集中的问题,结构平面与竖向刚度分布均匀,质量与刚度匹配度更高,有效改善了结构受力不均、动力响应紊乱的缺陷。

3.3 地震作用下结构响应对比分析

1层间位移与位移角对比。对比多遇、罕遇地震下优化前后的层间位移及位移角指标,结果表明,优化后结构层间变形显著减小,层间位移角完全满足标准限值,变形均匀性大幅提升,有效解决了原有结构地震变形超标、局部晃动过大的问题,变形控制效果良好。2结构应力与应变分布对比。地震荷载作用下,优化前节点、设备区域应力集中现象明显,局部构件应变超标;优化后整体应力分布更为均衡,薄弱部位应力峰值显著降低,节点与局部加固区域受力状态良好,无明显应力集中与塑性变形,薄弱部位优化加固效果显著。3结构耗能及延性性能对比。优化后结构支撑、构件可充分发挥塑性耗能作用,地震能量耗散效率明显提升,结构延性性能进一步改善。相较于原结构,优化后结构塑性发展均匀,无局部构件过早塑性破坏问题,整体抗震冗余储备大幅

增强。

3.4 优化方案经济性与实用性分析

1钢材用量经济性对比。通过核算整体钢材消耗量,优化方案采用局部补强、构件合理配比的设计方式,未大幅增加钢材用量,相较于原结构,在大幅提升抗震性能的基础上,有效控制了工程造价,具备良好的经济合理性。2工程施工实用性分析。优化后的构件规格统一、节点构造简洁,均采用成熟的钢结构施工工艺,构件加工、现场拼接与安装难度较低,适配小型厂房施工条件,施工便捷性强,可有效保障施工进度,具备极高的工程落地性。3化工工艺适配性分析。本次结构优化仅调整构件参数与布局,未改动厂房功能分区与设备安装空间,完全适配精细化工生产、设备集成及管线敷设需求,不影响厂房正常生产工艺运行,满足化工厂房长期安全使用要求。

结束语

本文完成了小型精细化工钢框架厂房的抗震优化设计,有效解决了原结构刚度不均、节点薄弱、地震变形超标等核心问题。优化后的结构动力特性显著改善,应力分布更为均衡,抗震耗能能力与整体稳定性大幅提升。同时优化方案未改动生产工艺布局,可控制造价、施工便捷,适配化工生产需求,能够有效提升厂房地震防护能力,为同类精细化工厂房抗震设计提供有效技术参考。

参考文献

- [1]徐通.工业厂房钢结构抗震优化设计策略探究[J].建筑技术与创新,2025,2(4):28-31.
- [2]吴长青.钢结构梁柱节点加强型抗震性能研究综述[J].土木工程,2025,14(11):263-265.
- [3]刘阳,赵凯.化工厂房钢框架结构基于位移的抗震优化设计方法[J].工业建筑,2024,54(7):102-107.
- [4]张恒,王磊.低多层钢框架工业厂房抗震结构体系优化研究[J].建筑结构,2023,53(12):78-83.
- [5]王俊杰.分层分级性能化抗震设计在钢框架支撑结构中的应用[J].钢结构,2025,40(4):45-51.