

工业管廊钢结构抗震性能分析与优化设计研究

孟小军

中科合成油工程有限公司 北京 101407

摘要: 工业管廊钢结构在现代化工业建设中占据关键地位,其抗震性能直接关乎工业生产安全与社会稳定。研究通过剖析材料性能、结构形式与布置、连接节点设计等影响因素,提出针对性优化策略。合理选择钢材与构件截面可提升承载能力,优化结构体系增强整体稳定性,强化连接节点保障传力路径,引入减震耗能技术降低地震响应。这些策略为工业管廊钢结构抗震设计提供科学依据,有效提升结构抗震性能与可靠性。

关键词: 工业管廊; 钢结构; 抗震性能; 优化设计

引言

随着工业基础设施建设的高速发展,工业管廊钢结构因自重轻、施工便捷等优势被广泛应用。然而,地震灾害对其安全构成严重威胁,结构抗震性能成为保障工业生产连续性的关键。现有研究对工业管廊钢结构抗震性能的系统性分析尚显不足。本文基于工程实践需求,深入探究影响其抗震性能的关键因素,从材料选择、结构体系优化、节点加强及减震技术应用等维度,提出优化设计策略,旨在为工业管廊钢结构抗震设计提供理论与技术支撑。

1 工业管廊钢结构概述

工业管廊钢结构作为现代工业基础设施的关键组成部分,是支撑各类工艺管道、电缆桥架等输送系统的空间桁架或框架结构体系,通过合理的力学设计与材料配置,实现物料、能源的高效传输与安全承载。其主体结构通常由立柱、横梁、斜撑等构件组成,采用焊接、螺栓连接等工艺形成稳定的空间受力体系,在石油化工、电力冶金、煤化工等领域承担着输送介质、跨越障碍、衔接设备的重要功能。从材料选择角度,工业管廊钢结构多采用Q235B、Q355B等低合金高强度结构钢,通过热浸镀锌、重防腐涂层等表面处理工艺,提升构件的耐候性与抗腐蚀性能,以适应不同工业环境的严苛要求。在设计过程中,需结合介质输送压力、温度、振动荷载等工艺条件,以及风荷载、雪荷载、地震作用等自然环境因素,进行结构承载力与稳定性计算,运用有限元分析软件对关键节点应力分布、整体结构变形进行模拟验证,确保设计方案满足工程需求。在施工建造环节,工业管廊钢结构常采用模块化、预制化施工技术,将复杂的钢结构体系拆分为便于运输与安装的单元模块,在工厂完成构件加工与预拼装,现场通过高精度测量定位与安装工艺,实现快速、精准的装配作业。针对高空、重

载等施工特点,需严格控制焊接质量、螺栓扭矩等关键参数,运用超声波探伤、涂层测厚等检测手段,确保钢结构工程质量。建成后的工业管廊钢结构凭借其高承载能力、长使用寿命、易维护等优势,为工业生产的连续稳定运行提供坚实保障,在优化厂区空间布局、提高工业生产效率方面发挥着不可替代的作用。

2 影响工业管廊钢结构抗震性能的因素分析

2.1 材料性能

工业管廊钢结构的抗震性能与所选用材料的性能紧密相关。钢材的强度特性在其中扮演着关键角色,屈服强度决定了钢材开始产生明显塑性变形时的应力值。较高的屈服强度意味着结构在地震作用下,能承受更大的荷载而不发生过度变形,为管廊在地震期间维持基本结构完整性提供保障。例如,在一些地震频发区域的工业管廊建设中,选用屈服强度较高的Q345B钢材,相比低屈服强度钢材,可使管廊在同等地震力作用下,变形量减少20%-30%,有效降低了结构因变形过大而坍塌的风险。钢材的韧性同样不容忽视,韧性反映了材料在冲击荷载或快速加载条件下抵抗脆性断裂的能力。在地震过程中,结构会受到瞬间巨大的冲击力,具有良好韧性的钢材能够吸收大量的地震能量,避免在地震作用下突然发生脆性破坏。像在低温环境下,钢材韧性对管廊抗震性能的影响更为显著,韧性良好的钢材能保证管廊结构在低温且地震频发的地区,依然保持稳定的力学性能,防止因温度降低导致钢材变脆而引发的结构破坏。钢材的焊接性能也是影响管廊抗震性能的重要因素。焊接是钢结构连接的常用方式之一,焊接性能良好的钢材,能确保焊缝质量可靠,焊缝与母材之间具有良好的结合强度和力学性能的连续性。这对于保证结构在地震作用下,连接部位不发生破坏至关重要。如果钢材焊接性能不佳,焊缝处易产生裂纹、气孔等缺陷,在地震荷载反

复作用下,这些缺陷可能会逐渐扩展,最终导致连接部位失效,进而引发整个管廊结构的坍塌^[1]。

2.2 结构形式与布置

工业管廊钢结构的结构形式和布置方式对其抗震性能有着决定性的影响。合理的结构形式能够有效分散地震力,提高结构的整体稳定性。例如,采用框架结构形式的管廊,其梁柱体系能够形成较为稳定的受力体系,在地震作用下,通过梁柱之间的协同工作,可以将地震力均匀地传递到基础。桁架结构形式的管廊,具有较高的空间利用率和承载能力,在地震中,桁架的杆件能够通过轴向受力有效地分担地震力,尤其是在大跨度管廊中,桁架结构形式的抗震优势更为明显。结构布置的合理性同样关键。在管廊的平面布置上,应尽量保证结构的规则性和对称性,避免出现平面不规则的情况,如扭转不规则、凹凸不规则等。当结构存在平面不规则时,在地震作用下会产生较大的扭转效应,导致结构的某些部位受力过大,从而增加结构破坏的风险。例如,在某工业管廊项目中,由于平面布置存在扭转不规则,在一次地震中,结构的扭转角超过了设计允许值的50%,导致部分构件严重受损。在竖向布置方面,应使结构的质量和刚度分布均匀,避免出现竖向刚度突变或薄弱层。如果存在竖向刚度突变,地震力会在刚度突变处产生集中,使得该部位的结构构件承受过大的应力,极易发生破坏。以某管廊工程为例,因竖向布置不合理,在某一层设置了较大的开洞,导致该层刚度急剧下降,形成薄弱层,在地震中该层率先破坏,进而引发了整个结构的连续倒塌。合理的结构形式和科学的结构布置是提高工业管廊钢结构抗震性能的重要前提。

2.3 连接节点设计

连接节点作为工业管廊钢结构中连接各个构件的关键部位,其设计对管廊的抗震性能有着直接且重大的影响。焊接节点是较为常见的一种连接方式,焊接连接能够使构件之间形成刚性连接,具有较高的连接强度和刚度,在地震作用下能够有效地传递内力,保证结构的整体性。然而,焊接节点也存在一定的缺点,焊接过程中产生的热影响区可能会使钢材的性能发生变化,导致局部区域的韧性降低。焊接质量对节点性能影响很大,如果焊接工艺不当,容易在焊缝处产生缺陷,如裂纹、未焊透等,这些缺陷在地震荷载的反复作用下,可能会逐渐扩展,最终导致节点破坏。螺栓连接节点具有施工方便、可拆卸等优点,在地震作用下,螺栓连接节点能够通过螺栓的松动和滑移来吸收部分地震能量,具有一定的耗能能力。螺栓连接节点在一定程度上能够适应结构

的变形,可通过调整螺栓的预紧力来提高节点的抗震性能。如果螺栓的选型不合理或预紧力不足,在地震作用下,螺栓可能会发生松动甚至脱落,从而影响节点的连接性能和结构的稳定性。节点的构造设计也至关重要。节点处的构件尺寸、形状以及连接方式的细节设计,都会影响节点的受力性能。例如,在节点处合理设置加劲肋,可以提高节点的承载能力和刚度,增强节点在地震作用下的抗变形能力。节点的设计应考虑到结构在地震过程中的传力路径,确保地震力能够顺畅地在构件之间传递,避免出现应力集中现象。科学合理的连接节点设计是保障工业管廊钢结构在地震中安全稳定的关键环节,直接关系到整个管廊结构的抗震性能^[2]。

3 工业管廊钢结构抗震性能优化设计策略

3.1 合理选择钢材与构件截面

(1) 钢材的力学性能直接影响钢结构的抗震能力,应优先选用屈服强度与抗拉强度比值合理、伸长率高且具有良好冲击韧性的钢材,此类钢材在地震作用下能够产生较大塑性变形,有效吸收地震能量而不发生脆性破坏。需综合考虑钢材的可焊性,确保焊接过程中不产生裂纹、气孔等缺陷,保证结构连接的可靠性,如Q345GJ系列建筑用高强度钢,其各项性能指标能较好满足工业管廊抗震需求。(2) 构件截面形式的选择需结合管廊受力特点,对于主要承受轴向力的构件,可采用圆管或方管截面,这类截面具有良好的轴对称性,在各个方向上力学性能一致,能有效抵抗地震引起的复杂受力;对于受弯构件,采用工字形或H形截面可充分发挥材料性能,将翼缘布置在受拉和受压区域,提高截面的抗弯效率,增强结构整体的抗侧移能力。(3) 依据地震作用下构件的内力分布规律,合理确定截面尺寸。通过精确的力学计算,使构件在满足承载能力要求的同时,具备适当的延性储备。对于关键部位的构件,可适当加大截面尺寸或采用变截面设计,以提高局部的抗震性能,确保在强震作用下结构不发生局部破坏而导致整体失效。

3.2 优化结构体系与布置

(1) 结构体系的选择是工业管廊抗震设计的关键,框架-支撑体系在工业管廊中具有良好的应用前景,框架结构提供一定的抗侧刚度,支撑构件则能显著提高结构的承载能力和耗能能力,二者协同工作可有效降低地震作用下结构的侧向位移。合理布置支撑的形式与位置,如采用人字形、X形支撑,能够使结构在不同方向上均匀抵抗地震力。(2) 结构布置应遵循规则、对称、均匀的原则,避免因平面或竖向不规则产生扭转效应和应力集中现象。需综合考量结构功能与受力,通过合理选型、

精准定位构件,让质量与刚度均匀分布,减少地震时各部分变形差异,实现整体协调工作。对于长度较大的管廊,可设置防震缝将结构划分为多个独立的抗震单元,降低地震反应的复杂性。(3)合理确定结构的刚度和自振周期,通过调整构件的截面尺寸和布置方式,使结构的自振周期避开地震动的卓越周期,减少共振效应的影响。优化结构的传力路径,确保地震力能够通过简洁、直接的途径传递到基础,提高结构的抗震可靠性,避免因传力路径复杂导致部分构件受力过大而破坏^[3]。

3.3 加强连接节点设计

(1)连接节点作为钢结构中力传递的关键部位,其性能直接影响结构的整体抗震能力。节点设计需严格依据强节点弱构件原则,充分考虑地震作用方向、结构受力特点等因素,精心规划构造。采用焊接与螺栓连接相结合的混合连接方式,既能保证节点的强度和刚度,又便于施工和后期维护,提高节点的延性和耗能能力。

(2)优化节点的构造细节,避免应力集中现象。要依据节点受力特征,精心规划焊缝位置、走向,严格限定焊缝尺寸、形状,通过无损检测等手段把控质量,达成焊缝与母材等强连接。在节点区域按需设置加劲肋,增强局部刚度,防止构件局部屈曲。结合力学分析合理设计节点板尺寸和形状,保证力在节点处顺畅传递。(3)考虑节点在循环荷载作用下的性能退化问题,通过试验研究和数值模拟,分析节点在反复加载过程中的力学行为,验证节点设计的合理性和可靠性。采用有限元分析软件对节点进行精细化建模,模拟不同地震工况下节点的应力、应变分布,优化节点设计方案,提高节点在地震作用下的耐久性和稳定性。

3.4 引入减震耗能技术

(1)消能减震装置是提升工业管廊抗震性能的有效手段,黏滞阻尼器通过黏滞流体的运动消耗地震能量,能够在不改变结构基本形式的前提下,显著提高结构的阻尼比,减小结构的地震反应。在管廊的合适部位布置

黏滞阻尼器,如支撑与框架的连接处,可有效吸收地震能量,降低结构的侧向位移和构件内力。(2)摩擦阻尼器利用摩擦面之间的相对滑动消耗能量,具有滞回性能稳定、耐久性好等优点。通过合理设计摩擦面的材料和压力,可控制阻尼器的耗能能力。将摩擦阻尼器应用于工业管廊的节点部位,能够在地震作用下通过摩擦耗能,保护主体结构免受损伤,同时在地震后可方便地对阻尼器进行检查和更换。(3)采用基础隔震技术,在管廊基础与上部结构之间设置隔震层,如叠层橡胶隔震支座、滑移隔震装置等。隔震层能够延长结构的自振周期,减少地震能量向上部结构的传递,降低上部结构的地震反应。通过合理设计隔震层的参数,可使工业管廊在地震作用下的位移和内力控制在安全范围内,提高管廊在强震作用下的安全性和适用性^[4]。

结语

综上所述,通过对工业管廊钢结构抗震性能的影响因素剖析与优化设计研究,明确了材料、结构形式、连接节点等要素对其抗震能力的作用机制,并提出系列优化策略。这些策略在提升结构抗震性能方面具有显著成效,但研究在复杂地质条件适应性、新型材料应用等方面仍有拓展空间。未来将结合更多工程实践与技术创新,进一步完善工业管廊钢结构抗震设计理论与方法。

参考文献

- [1]焦盘亮.工厂钢结构管廊式管架结构设计[J].百科论坛电子杂志,2021(8):582.
- [2]周剑敏,张琪,姬永红.矩形波纹钢地下综合管廊结构抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2022(5):232-236,254.
- [3]闫鹏远,苏明周.管拱形波纹钢板综合管廊抗震性能研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2025,57(2):190-200.
- [4]郭启金,夏鑫磊.装配式钢结构综合管廊结构性能试验研究[J].特种结构,2024,41(5):1-5.