

大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略

唐中华

(甘肃准文伟志建设工程有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要 系统阐述大跨度空间钢结构节点疲劳的相关理论基础, 详细分析影响节点疲劳性能的各类因素, 包括节点构造形式、荷载特性、材料性能等; 全面剖析当前大跨度空间钢结构节点在疲劳性能方面存在的问题与挑战; 深入探讨从节点设计优化、材料选择与处理、施工工艺改进到监测与维护等多维度的疲劳性能优化策略, 旨在为土木工程领域提供大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化参考, 助力提升大跨度空间钢结构的安全性及耐久性, 推动土木工程行业的可持续发展。

关键词 大跨度空间钢结构; 节点疲劳性能; 土木工程; 结构安全

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.003

0 引言

随着现代建筑技术的不断发展, 大跨度空间钢结构因其独特的优势, 如空间利用率高、结构轻盈、造型美观等, 在体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑中得到了广泛应用。然而, 大跨度空间钢结构在长期使用过程中受到各种动态荷载的作用, 节点部位作为结构传力的关键环节, 承受着复杂的应力状态, 容易产生疲劳损伤。节点的疲劳破坏可能引发结构的局部失效甚至整体倒塌, 严重威胁人民生命财产安全。因此, 深入研究大跨度空间钢结构节点疲劳性能的优化策略, 对于提高结构的可靠性、延长结构使用寿命、保障工程安全具有重要的现实意义, 已成为土木工程领域的研究热点之一。

1 大跨度空间钢结构节点疲劳理论基础

疲劳是指材料或结构在循环加载下, 在局部高应力区形成裂纹并逐渐扩展, 最终导致结构破坏的现象。大跨度空间钢结构节点在实际使用中, 承受着风荷载、地震荷载、人群活动荷载等动态荷载的反复作用。根据疲劳破坏机理, 节点疲劳过程可分为裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在裂纹萌生阶段, 由于节点处应力集中、焊接缺陷等因素, 在局部高应力区域形成微观裂纹。随着荷载循环次数的增加, 裂纹逐渐扩展, 当裂纹扩展到一定尺寸时, 结构的承载能力急剧下降, 最终发生断裂破坏。

疲劳寿命是衡量节点疲劳性能的重要指标, 通常采用应力-寿命 (S-N) 曲线来描述材料或结构在不同应力水平下的疲劳寿命^[1]。S-N 曲线通过大量的疲劳试验得到, 反映了材料或结构在给定应力幅下能够承受

的循环次数。对于大跨度空间钢结构节点, 其疲劳寿命不仅与应力水平有关, 还受到节点构造形式、材料性能、焊接质量等多种因素的影响。在实际工程中, 需要根据结构的受力特点和使用环境, 准确评估节点的疲劳寿命, 为结构设计和维护提供依据。

2 影响大跨度空间钢结构节点疲劳性能的因素

节点构造形式对节点疲劳性能有显著影响。不同的节点连接方式, 如焊接连接、螺栓连接、铆接连接等, 其应力分布和传力路径不同, 导致疲劳性能存在差异。焊接节点由于焊缝处存在热影响区, 材料性能发生变化, 且焊缝处容易产生焊接缺陷, 如气孔、夹渣、裂纹等, 这些缺陷会引起应力集中, 降低节点的疲劳强度。螺栓连接节点在长期使用过程中, 由于螺栓松动、预紧力损失等原因, 可能导致节点刚度下降, 应力分布不均匀, 从而影响疲劳性能。此外, 节点的几何形状、尺寸大小等也会影响应力集中系数, 进而影响节点的疲劳性能。复杂的节点几何形状和突变的截面尺寸容易产生较高的应力集中, 降低节点的疲劳寿命。

荷载特性是影响节点疲劳性能的关键因素之一。动态荷载的幅值、频率、加载顺序等都会对节点疲劳寿命产生影响。荷载幅值越大, 节点所承受的应力水平越高, 疲劳裂纹萌生和扩展的速度越快, 疲劳寿命越短。荷载频率对节点疲劳性能的影响较为复杂, 在某些频率范围内, 疲劳裂纹扩展速度可能会加快, 而在其他频率范围内, 疲劳裂纹扩展速度可能会减缓。加载顺序也会影响节点的疲劳寿命, 例如: 先加载高幅值荷载后加载低幅值荷载, 与先加载低幅值荷载后加载高幅值荷载相比, 节点的疲劳寿命可能会有所不

同^[2]。此外,随机荷载的作用也会增加节点疲劳分析的复杂性,需要采用相应的随机疲劳分析方法来评估节点的疲劳性能。

材料性能对节点疲劳性能起着决定性作用。钢材的强度、韧性、疲劳极限等性能指标直接影响节点的疲劳寿命。高强度钢材具有较高的屈服强度和抗拉强度,但在某些情况下,其疲劳极限并不一定与强度成正比。钢材的韧性对疲劳裂纹的扩展具有抑制作用,韧性好的钢材能够吸收更多的能量,延缓疲劳裂纹的扩展速度。此外,钢材的冶金质量、内部缺陷等也会影响其疲劳性能。杂质含量高、内部存在缺陷的钢材,容易在节点处产生应力集中,降低节点的疲劳强度。

施工质量对大跨度空间钢结构节点疲劳性能的影响不容忽视。在施工过程中,焊接质量、螺栓紧固程度、构件安装精度等都会影响节点的力学性能。焊接质量不良,如焊缝尺寸不足、焊接不牢固、存在焊接缺陷等,会导致节点处应力集中加剧,降低节点的疲劳强度^[3]。螺栓紧固程度不足,会使节点在使用过程中出现松动,影响节点的传力性能和疲劳性能。构件安装精度不够,会导致节点处受力不均匀,增加节点的应力水平,从而影响疲劳寿命。因此,严格控制施工质量,确保节点的施工符合设计要求,是提高节点疲劳性能的重要保障。

3 当前大跨度空间钢结构节点疲劳性能面临的问题与挑战

目前,大跨度空间钢结构节点的疲劳设计主要依据相关规范和经验公式,但这些方法存在一定的局限性。规范中的疲劳设计曲线往往是基于大量试验数据统计得到的,对于复杂节点构造和特殊荷载工况的适应性不足。经验公式在计算应力集中系数等参数时,可能存在较大误差,导致疲劳寿命计算不准确。此外,现有的疲劳设计方法大多没有充分考虑材料性能的变异性、施工质量的不确定性以及结构在使用过程中的环境因素等,使得设计结果与实际情况存在偏差。

为满足建筑功能和造型要求,大跨度空间钢结构节点的构造往往较为复杂。复杂的节点构造容易产生应力集中,使得节点局部区域的应力水平远高于平均应力,加速疲劳裂纹的萌生和扩展。例如:在一些大型体育场馆的钢结构节点中,采用了多杆件交汇的连接方式,节点处的应力分布极为复杂,应力集中系数较高,给节点的疲劳性能带来了严峻挑战^[4]。大跨度空间钢结构在长期使用过程中,受到环境因素(如温度、湿度、腐蚀介质等)的影响,钢材的性能会逐渐退化,

疲劳极限降低。同时,施工过程中存在的质量问题,如焊接缺陷、螺栓松动等,在结构使用过程中可能会进一步发展,导致节点疲劳性能下降。这些材料性能退化和施工质量问题在实际工程中往往难以被及时发现和处理,给结构的安全带来了潜在风险。

目前,对于大跨度空间钢结构节点疲劳性能的监测与维护手段相对有限。传统的监测方法主要依靠人工巡检,难以实现对节点疲劳状态的实时、全面监测。虽然一些先进的监测技术,如应变片监测、光纤传感监测等已在部分工程中应用,但这些技术在实际应用中仍存在成本高、可靠性不足等问题。此外,由于缺乏完善的监测数据评估体系和维护策略,即使监测到节点存在疲劳损伤,也难以准确判断损伤程度和发展趋势,无法及时采取有效的维护措施,保障结构的安全运行。

4 大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略

在节点设计阶段,需将疲劳性能作为核心考量要素,从构造优化层面构建抗疲劳的基础框架。首要任务是简化节点连接逻辑,通过减少传力路径中的复杂转折,从根源上降低应力集中风险。具体而言,在节点几何形态设计中,应避免采用尖锐转角与截面尺寸突变的形式,通过平滑过渡的轮廓设计分散局部应力;在焊缝布局上,需结合结构受力模拟结果,将焊缝位置避开长期承受高应力的关键区域,同时优化焊缝形式以减少热影响区对材料性能的干扰。对于多杆件交汇等复杂节点,需借助有限元分析等数值模拟技术,精准捕捉节点内部应力分布规律,针对应力峰值区域进行针对性改进,如通过增设过渡连接板、优化杆件交汇角度等方式平衡应力。在连接方式选择上,需结合结构的受力特征与使用环境综合研判:焊接连接需重点控制焊缝质量以规避缺陷引发的疲劳隐患,螺栓连接则需关注预紧力稳定性以避免松动导致的应力重分布,通过对比不同连接方式的疲劳性能差异,选择适配场景需求的方案。设计中还需充分纳入材料性能波动、施工工艺偏差等不确定性因素,通过预留合理的安全裕度,提升节点在长期服役过程中的抗疲劳可靠性,为保障结构全生命周期安全奠定基础。

选择优质的钢材是提高节点疲劳性能的基础。应选用强度高、韧性好、疲劳极限高的钢材,并严格控制钢材的冶金质量,减少内部缺陷。对于特殊环境下使用的钢结构,如处于腐蚀环境中的结构,可选用耐腐蚀钢材或对钢材进行表面防护处理,如热浸镀锌、喷涂防腐涂料等,以延缓钢材的腐蚀速度,保持材料

性能的稳定。此外,对钢材进行适当的热处理,如正火、回火等,可改善钢材的组织结构和性能,提高其疲劳强度。严格控制施工质量,改进施工工艺,是提高节点疲劳性能的关键环节^[6]。在焊接施工中,应采用先进的焊接设备和工艺,确保焊缝质量。例如:采用自动焊接技术,提高焊接精度和质量稳定性;严格控制焊接参数,避免出现焊接缺陷;对焊缝进行无损检测,及时发现和处理焊接质量问题。在螺栓连接施工中,应严格按照设计要求进行螺栓紧固,确保螺栓的预紧力符合规定。同时,加强对施工过程的质量监督和管理,提高施工人员的技术水平和质量意识,确保节点的施工质量符合设计要求。

建立完善的大跨度空间钢结构节点疲劳性能监测与维护体系,及时发现和处理节点的疲劳损伤。采用先进的监测技术,如分布式光纤传感技术、无线传感技术等,对节点的应力、应变、位移等参数进行实时监测,实现对节点疲劳状态的在线评估。建立监测数据评估模型,结合结构力学分析和疲劳理论,对监测数据进行分析处理,准确判断节点的疲劳损伤程度和发展趋势。根据监测结果,制定合理的维护策略,及时采取加固、修复等措施,保障结构的安全运行。此外,定期对钢结构进行全面检查和维护,及时发现和处理材料性能退化、施工质量问题等潜在隐患,延长结构的使用寿命。引入可靠性理论,对大跨度空间钢结构节点进行基于可靠性的设计与评估。考虑材料性能、荷载作用、施工质量等因素的不确定性,采用概率统计方法对节点的疲劳寿命进行评估。通过可靠性分析,确定节点在不同可靠度水平下的疲劳寿命,为结构设计和维护提供科学依据。在设计中,以可靠性指标为目标,优化节点设计参数,提高节点的可靠性。同时,在结构使用过程中,根据监测数据和可靠性评估结果,及时调整维护策略,确保结构始终处于安全可靠的状态。

5 大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略的应用前景

在科技日新月异、工程实践经验持续累积的大背景下,大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略于土木工程领域的应用前景极为广阔。从建筑设计层面看,未来设计人员能够借助先进的建模与仿真软件,对节点进行更为精准且全面的疲劳性能模拟分析。在设计初始阶段,便将优化理念深度融入,通过反复调整节点形状、连接方式以及构件布局等参数,实现节点设计的最优化,从根源上降低应力集中现象,增强节点抗疲劳能力。在施工环节,先进的施工工艺与设备将

得以广泛运用。例如:智能化的焊接机器人能够依据预设程序,以极高的精度完成复杂节点的焊接作业,极大地提升焊接质量,减少人为因素导致的焊接缺陷,确保节点的力学性能稳定可靠。

优质材料的选用也将更加多元且精准。随着材料科学的发展,新型钢材不断涌现,这些钢材不仅具备更高的强度、韧性以及疲劳极限,还可能拥有诸如自修复、耐腐蚀等特殊性能。在特殊环境下的建筑项目中,如沿海地区的大跨度桥梁,可选用具有抗海水腐蚀性能的钢材,配合先进的表面防护技术,进一步保障结构的耐久性。完善的监测与维护体系将成为常态。借助物联网技术,传感器能够实时采集节点的应力、应变、温度等多维度数据,并通过大数据分析 with 人工智能算法,快速准确地评估节点的疲劳状态,预测潜在的疲劳损伤发展趋势。一旦发现异常,便能及时启动维护预案,采取针对性措施,如局部加固、更换受损构件等,确保结构始终处于安全稳定运行状态。基于可靠性的设计与评估策略,将促使设计人员在设计过程中充分考虑各种不确定性因素,以更为科学严谨的方式确定结构的可靠度指标。

6 结束语

大跨度空间钢结构节点疲劳性能的优化是土木工程领域的重要研究课题。通过对节点疲劳理论基础的深入研究,分析影响节点疲劳性能的因素,剖析当前面临的问题与挑战,提出从节点设计优化、材料选择与处理、施工工艺改进到监测与维护等多维度的优化策略,并对其应用前景进行展望,为大跨度空间钢结构的设计、施工和维护提供了全面的技术支持。在未来的工程实践中,应持续关注大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化技术的发展,不断创新和完善优化策略,提高大跨度空间钢结构的安全性及耐久性,为土木工程行业的发展做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 李明,王伟.大跨度空间钢结构节点疲劳破坏机理及寿命预测[J].建筑结构学报,2020,41(05):180-187.
- [2] 赵强,陈辉.节点构造形式对大跨度钢结构疲劳性能影响研究[J].土木工程学报,2021,54(07):88-95.
- [3] 刘畅,孙明.荷载特性与大跨度空间钢结构节点疲劳寿命关系分析[J].工程力学,2022,39(09):152-159.
- [4] 张悦,王华.材料性能对大跨度钢结构节点疲劳强度的影响探究[J].建筑材料学报,2023,26(03):521-527.
- [5] 周洋,吴宇.大跨度空间钢结构节点疲劳性能监测技术与评估方法[J].工业建筑,2024,54(04):101-107.