

# 复杂钢结构节点疲劳性能提升策略研究

马建国

中电诚达工程设计(河北)有限公司

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17622

**[摘要]** 复杂钢结构节点作为现代大型建筑、桥梁及工业设施的关键传力部位,其疲劳性能直接关乎整体结构的安全性与耐久性。疲劳失效是钢结构节点在长期交变荷载作用下的主要破坏模式之一,具有隐蔽性强、突发性高的特点,一旦发生可能导致灾难性后果。本研究聚焦于提升此类节点的抗疲劳能力,系统分析了影响节点疲劳寿命的关键因素,包括焊接缺陷、残余应力集中、几何构造突变以及环境腐蚀作用等。在此基础上,深入探讨了具有工程应用价值的提升策略,涵盖焊接工艺优化、残余应力控制技术、节点构造优化设计、高性能材料选用及表面防护强化等核心方向。研究通过理论分析与工程实践相结合,旨在为复杂钢结构节点的疲劳性能提升提供系统性解决方案,保障重大工程结构的长寿命安全服役。最终提出了一套综合性的提升路径,强调了多策略协同应用的必要性。

**[关键词]** 钢结构节点; 疲劳性能; 焊接工艺; 残余应力; 节点优化

## 引言:

随着现代工程结构向大跨度、高层化、复杂化方向发展,钢结构因其优异的力学性能和施工便捷性得到了广泛应用。然而,钢结构,尤其是其关键连接节点,在服役过程中常常承受复杂的交变荷载作用,如风荷载、车辆荷载、地震作用以及机械振动等,极易引发疲劳损伤累积,最终导致节点疲劳断裂失效。这种失效往往无明显征兆,破坏突然,可能造成结构局部或整体倒塌,带来巨大的经济损失和人员伤亡风险。因此,深入研究复杂钢结构节点的疲劳破坏机理,并探索有效的性能提升策略,具有极其重要的工程意义和学术价值。国内外学者虽在疲劳机理和评估方法上取得了一定进展,但针对复杂节点在真实服役环境下的疲劳性能提升,特别是多因素耦合作用下的系统解决方案,仍需深入研究。本研究旨在弥补这一不足,从设计、制造、材料及防护等多维度提出切实可行的提升策略。

## 1 钢结构节点疲劳概述

### 1.1 钢结构节点的基本特性与疲劳问题

钢结构节点是结构中不同构件交汇并传递内力的关键部位,其构造形式多样,包括焊接节点、螺栓连接节点、混合连接节点等,尤以焊接节点在大型结构中应用最为广泛。复

杂节点往往涉及多向受力、空间交汇、截面突变等特征,导致应力状态极其复杂。在循环荷载作用下,节点区域因几何不连续或材料不连续极易形成显著的应力集中现象,成为疲劳裂纹萌生的源头。初始微观裂纹在交变应力作用下不断扩展,最终贯穿构件截面,造成节点承载力的突然丧失。相比于静力破坏,疲劳破坏具有显著的累积损伤特性,其寿命对荷载幅值、循环次数、应力集中程度以及环境因素极为敏感。

### 1.2 疲劳破坏机理与影响因素

钢结构节点的疲劳破坏过程通常经历裂纹萌生、稳定扩展和快速断裂三个阶段。裂纹萌生主要源于微观尺度上的缺陷或应力集中点,如焊缝内部的夹渣、气孔、未熔合等焊接缺陷,或焊缝趾部、焊根、截面突变处等几何不连续部位。裂纹一旦形成,便在循环应力作用下沿垂直于主拉应力方向逐步扩展。影响节点疲劳性能的因素众多,可归纳为内在因素与外在因素。内在因素主要包括节点自身的构造细节、焊接质量、材料本身的疲劳强度、焊接残余应力的分布与大小等。外在因素则主要指作用荷载的类型、幅值、频率、循环次数以及服役环境,如腐蚀介质的存在会显著加速裂纹扩展速率。

## 2 复杂钢结构节点疲劳性能的关键问题

### 2.1 焊接缺陷与应力集中的影响

焊接是复杂钢结构节点最主要的连接方式，但其过程不可避免地引入各种缺陷，成为疲劳裂纹萌生的潜在危险源。常见的焊接缺陷包括气孔、夹渣、未熔合、未焊透、裂纹等，这些缺陷在焊缝内部或表面形成微观缺口，极大地降低了局部的疲劳强度。更为关键的是，焊接接头本身即是一个几何不连续区域，焊缝与母材的过渡区域存在尖锐的几何变化，导致显著的应力集中。焊缝的趾部区域通常是应力集中系数最高的部位，也是最常见的疲劳裂纹起源地。焊接热输入的不均匀分布还会导致复杂的焊接残余应力场，特别是垂直于焊缝方向的残余拉应力，会与外部工作拉应力叠加，进一步加剧局部区域的应力水平，显著降低节点的疲劳寿命。

### 2.2 残余应力的不利作用

焊接过程中，金属材料经历局部快速加热和冷却，由于不均匀的热膨胀和收缩，在焊件内部产生自平衡的残余应力。在结构节点区域，尤其是厚板焊接、多道焊或复杂空间节点中，残余应力的大小和分布极为复杂。高水平的残余拉应力，特别是位于潜在裂纹萌生区域附近的残余拉应力，会显著降低材料的疲劳极限。在交变载荷作用下，残余拉应力相当于增加了一个平均应力，使得应力循环始终处于较高的拉应力水平，从而加速了疲劳裂纹的萌生和扩展速率。即使外部载荷处于较低水平，残余应力的存在也可能使局部应力超过材料的疲劳极限。残余压应力虽然对抑制裂纹萌生和扩展有一定益处，但在复杂节点中难以精确控制和利用。因此，如何有效测量、评估并采取技术措施降低或重新分布焊接残余应力，尤其是消除或转化关键区域的残余拉应力，是提升节点抗疲劳性能的核心挑战之一<sup>[1]</sup>。

### 2.3 材料性能与环境腐蚀的挑战

节点区域材料的微观组织和力学性能直接影响其抗疲劳能力。焊接热循环会改变热影响区的组织，可能导致晶粒粗化、硬化或软化，甚至产生不利的脆硬相，降低材料的韧性及抗疲劳裂纹扩展能力。母材与焊材的匹配性、材料的纯净度、强度等级以及断裂韧性指标都需精心选择。此外，钢结

构节点若暴露于腐蚀性环境，如海洋大气、工业污染或除冰盐环境，腐蚀作用将与疲劳损伤相互耦合，产生更为严重的腐蚀疲劳问题。腐蚀介质不仅会在节点表面形成蚀坑，成为新的疲劳裂纹源，更会加速裂纹尖端的化学腐蚀过程，显著降低裂纹扩展门槛值，加快裂纹扩展速率。即使是不锈钢或耐候钢，在特定环境下也可能面临点蚀引发的疲劳问题<sup>[2]</sup>。

## 3 复杂钢结构节点疲劳性能提升策略

### 3.1 焊接工艺优化与质量控制

焊接工艺的精细控制是提升节点疲劳性能的源头性措施。首先，应严格控制焊接热输入，采用较低的焊接线能量有助于减小热影响区宽度，降低晶粒粗化程度和不利相变风险，从而改善该区域的韧性和抗疲劳性能。预热和层间温度控制对于防止冷裂纹、减小焊接残余应力至关重要，特别是对于厚板和高强钢焊接。其次，优化焊接顺序和方向能有效控制焊接变形和残余应力的分布，例如采用对称焊、分段退焊等方法平衡焊接过程中的热输入。选用合适的焊接方法和参数，如采用低氢焊接材料、保护气体纯度控制、精确的坡口加工和装配间隙，可最大限度减少气孔、夹渣、未熔合等内部缺陷。焊后对焊缝表面进行修磨处理，如打磨焊缝趾部以形成平滑过渡，可显著降低该处的应力集中系数。实施严格的无损检测，如超声波、射线或磁粉检测，确保焊缝内部和表面质量符合高标准要求，是保障节点疲劳寿命的关键环节<sup>[3]</sup>。

### 3.2 残余应力控制与消除技术

针对焊接残余应力的不利影响，发展并应用有效的控制与消除技术是提升节点疲劳性能的核心策略之一。热处理是最传统且广泛应用的方法，通过整体或局部退火、去应力退火，利用高温下材料的蠕变特性松弛残余应力。整体热处理效果稳定，但对大型或复杂结构实施困难且成本高。局部热处理则更具灵活性，需精确控制加热区域和温度分布。机械应力消除法是另一种重要手段，包括振动时效和锤击喷丸处理。振动时效通过施加特定频率的机械振动使构件产生微观塑性变形，从而均化和降低残余应力，适用于大型复杂结构且能耗低。锤击喷丸则利用高速弹丸流轰击焊缝表面，引入有利的残余压应力层，该压应力层能有效抵消外部拉应力，

抑制表面裂纹萌生和早期扩展, 尤其适用于焊缝表面处理。近年来发展的超声冲击处理技术效果更佳, 其能量更集中可控, 能在焊缝及热影响区形成更深的残余压应力层并改善表层组织。此外, 针对关键部位, 可采用机械拉伸法或液压过载荷法, 施加一次或多次静力拉伸载荷, 使局部区域产生屈服, 重新分布残余应力<sup>[4]</sup>。

### 3.3 节点构造优化与细节设计

通过优化节点构造和细节设计, 从源头上降低应力集中程度, 是提升疲劳性能最经济有效的根本途径。设计时应遵循“平缓过渡、避免突变”的原则。对于焊接节点, 应优化焊缝布置, 避免焊缝过分集中或交叉, 优先采用对接焊缝而非角焊缝, 若必须使用角焊缝, 应确保足够的焊缝尺寸和熔深。焊缝端部应延伸至构件边缘或采用围焊, 避免端部形成高应力区。连接板设计需避免偏心, 确保传力路径顺畅。对于螺栓连接节点, 应优化螺栓排列方式, 减少螺栓孔周围的应力集中, 增加端距和边距, 必要时采用高强度螺栓预紧力连接以改善受力状态。节点区域的几何形状应尽可能平滑, 避免尖锐的凹角或突变。例如, 在梁柱连接节点中, 采用弧形加劲肋或腋板代替直角加劲肋; 在管节点中, 优化相贯线形状, 采用加强环或设置内部隔板等措施。利用现代结构优化设计方法和有限元分析技术, 在设计阶段即可对节点进行详细的应力分析, 识别高应力区并优化几何形状, 如增大过渡圆角半径、优化焊缝坡口形式等, 使应力分布更加均匀<sup>[5]</sup>。

### 3.4 高性能材料应用与防护强化

选用具有优异抗疲劳性能的材料是提升节点长期耐久性的重要保障。对于承受高疲劳风险的关键节点, 可选用高强度、高韧性、良好焊接性能的优质钢材, 其较高的疲劳强度极限和裂纹扩展阻力有助于延长疲劳寿命。开发和应用新型高性能钢材, 如具有更高强度和韧性的耐候钢、TMCP 钢或低屈服点钢, 为节点设计提供更多选择。焊材的选择应与母材匹配, 并注重其低氢特性和良好的熔敷金属韧性。在腐蚀疲劳风险高的环境下, 应优先选用具有内在耐腐蚀性的材料, 如耐候钢或不锈钢, 尽管成本较高, 但其长期维护成本可能

更低。表面防护是抵御环境侵蚀、防止腐蚀疲劳不可或缺的措施。高质量的防腐涂层体系至关重要, 包括高性能底漆、中间漆和面漆的组合, 确保良好的附着力、耐腐蚀性和耐磨性<sup>[6]</sup>。

### 结束语:

提升复杂钢结构节点的疲劳性能是保障重大工程结构安全服役的核心课题。本研究系统分析了影响节点疲劳寿命的关键因素, 包括焊接缺陷与应力集中、残余拉应力的不利影响、材料性能的局限性以及环境腐蚀的加速作用。在此基础上, 提出了多维度、系统性的提升策略: 通过优化焊接工艺参数、加强过程控制与无损检测, 从源头保障焊缝质量; 应用热处理、振动时效、喷丸强化等残余应力控制技术, 改善应力状态; 遵循平缓过渡原则进行节点构造优化与细节设计, 降低几何不连续性导致的应力集中; 选用高性能钢材及匹配焊材, 并辅以长效可靠的表面防护体系, 增强节点抵抗环境侵蚀的能力。

### [参考文献]

- [1] 李国强, 汪绍洋, 钟云龙. 半刚性可更换消能高强钢柱脚抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44 (10): 26-37.
- [2] 宗亮, 刘衡, 崔瑶. Q690D 高强钢低周疲劳性能及损伤演化规律研究[J]. 工程力学, 2024, 42 (11): 151-153.
- [3] 邓军, 李俊辉, 郭栋. 预应力碳纤维增强复合材料加固钢梁的耐久性能研究综述[J]. 工业建筑, 2024, 54 (6): 81-90.
- [4] 陈光, 丁克勤, 张继旺. 表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究[J]. 光通信技术, 2023, 47 (2): 6-11.
- [5] 彭振楠, 宋神友, 陈焕勇. 正交异性钢桥面板 U 肋全熔透焊接接头研发及疲劳性能研究[J]. 广东公路交通, 2024, 50 (6): 6-11.
- [6] 谢文舟, 班玄耀. 高强度钢在复杂应力状态下的疲劳性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2025 (13): 77-79.