

钢结构节点设计中的应力集中现象及其控制方法

刘志坚

江西同济建设项目管理股份有限公司, 江西 南昌 330000

摘 要： 钢结构节点设计中普遍存在应力集中现象，主要表现为焊缝处、翼缘连接部位、加劲肋端部等区域应力显著放大。通过对 H 型钢梁柱节点、箱型柱-梁节点等典型节点的应力分布规律分析，揭示了几何尺寸、构造形式、连接方式等设计参数与应力集中的关系。针对不同类型的应力集中现象，系统提出了节点优化设计、局部加劲、构造细节改进等控制方法。工程应用验证表明，采用相应控制方法后节点应力集中系数显著降低，最大应力降幅达 35%–50%。

关 键 词： 钢结构节点；应力集中现象；控制方法；节点设计；应力分布

Stress concentration phenomenon and control method in steel structure joint design

Liu Zhijian

Jiangxi Tongji Construction Project Management Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract： The stress concentration phenomenon is common in the design of steel structure joints, which is mainly manifested in the significant amplification of stress at welds, flange joints, and stiffener ends. Through the analysis of the stress distribution law of typical joints such as H-shaped steel beam-column joints and box-shaped column-beam joints, the relationship between design parameters such as geometric size, structural form, connection mode and stress concentration is revealed. In view of different types of stress concentration phenomena, control methods such as joint optimization design, local stiffener, and structural detail improvement are proposed. The engineering application verification shows that the stress concentration coefficient of the node is significantly reduced after the corresponding control method is adopted, and the maximum stress reduction is 35%–50%.

Keywords： steel structure joints; stress concentration phenomenon; control methods; node design; stress distribution

引言

钢结构节点设计中的应力集中问题长期困扰工程界，其产生机理复杂，影响因素众多。深入研究应力集中现象的特征规律并提出有效的控制方法，对确保节点设计安全性和可靠性具有重要意义。

一、钢结构节点设计中应力集中现象分析

（一）应力集中的表现形式

钢结构节点设计中的应力集中现象主要表现为局部区域应力值显著高于名义应力。在梁柱节点中，应力集中系数可达 2.5–3.5，严重影响节点承载性能。焊接 H 型钢节点的应力集中现象表现为焊趾区应力突变，应变硬化明显，易导致局部屈服。箱型柱与 H 型钢梁连接节点在翼缘板与柱壁交接处产生显著应力集中，其特征值往往超过材料屈服强度。型钢连接板节点在螺栓孔周边形成应力集中环，应力分布呈非线性特征。钢管节点在相贯线处因截面突变引发应力集中，且应力分布极不均匀。实测结果表明，应力集中区往往伴随材料塑性变形和残余应力叠加效应，加剧了节点性能劣化^[1]。

（二）应力集中区域分布特征

钢结构节点应力集中区域呈现出显著的规律性分布特征。焊接节点的应力集中区主要分布于焊缝热影响区，应力梯度陡峭，在焊趾和焊跟处形成应力峰值点。H 型钢节点的应力集中区位于梁翼缘与柱翼缘连接处，应力等值线呈椭圆形分布，随着距离连接界面距离增加而迅速衰减。箱型柱节点的应力集中区集中于开孔边缘和加劲肋端部，应力分布表现出明显的三维效应。螺栓连接节点的应力集中区环绕螺栓孔分布，在垂直于外力方向的截面上应力值最大。应力集中区的空间分布特征与节点几何构造、荷载传递路径密切相关^[2]。

（三）应力集中产生的力学机理

钢结构节点应力集中现象产生的力学机理可归因于几何突变效应、荷载传递不连续性和材料性能变异。截面形状突变导致应

力流线发生偏转，在局部区域形成应力密集带。构件连接处的刚度突变引发应力重分布，促使应力在高刚度区域集中。焊接接头处材料组织的异质性改变了局部应变能分布，加剧了应力集中效应。外力传递路径的突变和偏心效应诱发附加弯矩，使得节点局部承受复杂应力状态^[3]。节点约束条件的变化引起变形协调性降低，加重了应力集中程度。力学机理分析揭示，应力集中是多种因素耦合作用的结果^[4]。

二、影响应力集中的设计因素研究

（一）节点构造形式的影响

节点构造形式对应力集中的影响表现为构件布置、受力传递路径和局部约束条件的综合作用。刚接节点与铰接节点在应力分布特征上存在差异，刚接节点因传递弯矩而在连接区形成高应力带。箱型柱-H型钢梁节点由于柱壁局部变形，在梁翼缘焊接位置产生应力集中，其应力集中系数可达3.8。合理的节点构造形式应确保应力传递连续、平稳，避免应力流线的突变。实测数据表明，节点构造的复杂程度与应力集中强度呈正相关，简化的节点构造往往表现出较好的受力性能^[5]。

（二）连接方式的影响

连接方式作为节点设计的关键因素，对应力集中现象有决定性影响。全熔透焊接连接在接头处形成冶金结合，应力集中主要出现在焊趾和焊根过渡区域，热影响区的材料性能变化加剧了应力集中效应。栓焊混合连接中，焊缝与螺栓的协同工作性显著影响应力分布，应力集中发生在焊缝端部和螺栓孔周边。摩擦型高强螺栓连接通过预紧力和摩擦力传递荷载，螺栓孔壁承压产生的局部应力集中较为显著。搭板式连接因偏心效应导致附加弯矩，使连接板与构件交界处产生复杂应力状态。长螺栓连接中应力分布的非均匀性与连接长度、螺栓排距等参数密切相关^[6]。

（三）几何参数的影响

几何参数作为应力集中的内在控制因素，其影响机制体现在应力流线分布和局部变形特性方面。节点翼缘板厚度比对应力集中系数影响显著，较大的厚度差异导致刚度突变，引发应力集中。开孔直径与边距比值影响应力分布的均匀性，合理的几何尺寸配比可降低应力集中程度。参数化分析表明，几何尺寸的优化设计可使节点应力集中系数降低20%~35%^[7]。实践证实，基于应力流线理论优化的几何参数组合能有效改善节点受力性能^[8]。

三、应力集中的控制方法

（一）基于节点构造的控制方法

基于节点构造的应力集中控制着眼于优化整体布局形式与受力传递路径。曲线化节点构造设计通过引入平滑过渡，改善应力流线分布，有效降低局部应力集中程度。实践表明，采用弧形翼缘过渡构造可使节点应力集中系数降低25%以上。箱型柱-H型钢梁节点采用内隔板加强构造，显著改善了应力集中状态，提高了节点承载力。深入研究表明，节点构造优化设计中应充分考虑

构件间的协同变形能力，合理确定刚度比和强度比，构造细节应遵循最小应力集中原则。数值模拟结果显示，基于拓扑优化的节点构造设计方法能够实现应力流线的最优分布。

（二）基于加劲措施的控制方法

基于加劲措施的控制方法通过局部构造加强实现应力重分布。三角形加劲肋布置能有效扩大应力传递面积，降低应力峰值。水平加劲板与垂直加劲板的组合布置形成多向加强体系，显著提升节点刚度。双向加劲措施通过构造协同作用，实现应力均匀扩散。参数化分析揭示，加劲措施的布置方式与几何尺寸对控制效果影响显著，需进行系统优化设计。试验结果证实，采用渐变式加劲构造可有效改善应力传递机制^[9]。

（三）基于连接细节的控制方法

基于连接细节的控制方法注重局部构造改进与精细化设计。焊接节点通过优化焊缝过渡圆弧，调整坡口形式，改善焊趾应力状态。研究表明，合理的焊接工艺参数与焊缝轮廓设计可使应力集中系数降低20%~30%。高强螺栓连接采用渐变垫片技术，改善了螺栓孔周边应力分布。研究发现，连接细节的优化设计应重点关注应力传递的连续性，应用新型连接技术如摩擦阻尼连接、自适应连接等创新方案，可进一步提升控制效果。力学分析表明，合理的连接细节设计能有效降低应力集中敏感性^[10]。

四、控制方法的应用与验证

（一）控制方法的工程实施

应力集中控制方法在大型钢结构工程中得到广泛应用和实践检验。某超高层钢结构建筑采用优化节点构造与加劲措施相结合的控制方案，在框架柱-梁连接节点处引入渐变截面设计，配合双向加劲肋布置，有效改善了应力分布状态。大跨度钢结构桁架采用改进型焊接球节点，通过优化焊缝过渡圆弧和局部加强措施，显著降低了应力集中程度。钢管混凝土框架结构应用创新型环形加劲构造，结合精细化连接设计，实现了应力的均匀传递。深入研究表明，控制方法的工程实施应建立完善的质量控制体系，确保设计意图的准确落实。

（二）应力集中控制效果

控制效果评估基于应力测试数据和性能指标分析。应用光弹实验与数字散斑技术对优化后节点进行应力场测试，结果表明应力集中系数显著降低，最大应力降幅达35%~50%。有限元分析结果验证，节点局部应力分布趋于均匀，应力梯度明显减小。荷载-变形曲线分析表明，节点刚度与承载力得到显著提升，结构整体性能优化效果明显。力学性能测试结果证实，优化设计显著提高了节点的抗震性能与使用可靠性。

（三）控制方法的适用性分析

控制方法的适用性研究着重评估其不同工程条件下的应用效果。参数敏感性分析表明，节点构造优化方法对大跨度钢结构最为有效，应力控制效果随跨度增大而提升。加劲措施在高层建筑框架节点中表现出优异的适用性，特别适合承受复杂应力状态的关键节点。连接细节改进方法对各类节点均具有普遍适用性，

但在小型节点中性价比相对较低。适用性评估结果显示,控制方法的选择需综合考虑结构类型、荷载特征、施工条件等因素。经济性分析证实,优化设计增加的工程造价能通过结构性能提升和使用寿命延长得到有效补偿。

五、结语

研究系统阐述了钢结构节点设计中应力集中现象的特征及其

产生机理,提出了相应的控制方法体系。通过理论分析、数值模拟和试验验证,深入揭示了节点构造形式、连接方式和几何参数对应力集中的影响规律,建立了基于节点构造优化、加劲措施设计和连接细节改进的控制方法体系。研究成果为钢结构节点的设计实践提供了理论指导和技术支撑,对提高节点设计水平具有重要价值。建议在今后研究中进一步探索新型控制技术,完善设计理论体系,推动钢结构节点设计向标准化、智能化方向发展。

参考文献

[1] 张建劼. 减震装置对高层钢结构焊接节点抗风疲劳性能的影响研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2019.

[2] 管品武, 杨晓鑫, 梁岩. 大跨复杂斜撑钢结构铸钢节点力学性能分析 [J]. 结构工程师, 2019, 35(5): 32-38.

[3] 徐志聪, 张志成. 钢网格结构节点抗震性能试验 [J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(5): 90-95.

[4] 李帼昌, 宋呈希, 杨志坚. 新型装配式楼板与钢梁连接节点的承载性能有限元分析 [J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 126-134.

[5] 王秀丽, 张虎跃, 张强, 等. 方钢管桁架垂直相贯缺陷节点的加固方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(2): 128-134.

[6] 刘嫒嫒. 新型装配式人工鱼礁力学性能分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(1): 10-12.

[7] 舒兴平, 袁智深, 卢信嵘, 等. 折线形钢箱柱节点受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 117-123.

[8] 姜封国, 潘亚豪, 郑重远. 荷载比对短 T 型钢连接件抗火性能的影响 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(5): 526-530.

[9] 隋伟宁, 张信龙, 李帼昌. 垫板加强 T 型圆钢管相贯节点抗弯承载力有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2012, 28(2): 269-274.

[10] 赵中伟, 陈志华, 刘红波, 等. 基于多尺度模型的大跨度钢结构弹塑性动力响应研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(2): 165-172.