

多参数协同优化下新型模块化节点的承载性能研究

周贇文*, 吴刚, 辜飘云, 邓映香

(江西应用科技学院 建筑学院, 南昌 330004)

摘要: 针对带中心区加强环的新型铝合金模块化节点承载性能优化问题,文中基于 ABAQUS 建立精细化有限元模型,系统性探究模块化单元厚度、加强环板厚、底部加劲板、螺栓布局等多参数的耦合影响规律。结果表明:将模块化单元底板厚度提升至顶板厚度的两倍,并增设 10 mm 厚底部加劲板,可使节点极限承载力最大提升 11.98%,同时节点位移降幅达 18.37%。通过对螺栓进行参数化分析,提出非对称优化配置方案,优化翼缘区与腹板区螺栓数量,既能改善节点受力分布,又可避免施工冗余。节点荷载-位移曲线显示,底部加劲板对刚度提升的贡献显著,其初始刚度较基准模型大幅提高,且曲线完全包围刚性单元的响应曲线。参数敏感性分析表明:底板厚度与加劲板设置对节点承载力增益呈强正相关,而腹板区螺栓超量配置仅带来 3.57% 的承载力提升,证实节点设计应优先优化关键构件。研究成果为铝合金模块化节点的精细化设计提供了理论依据与数据支撑。

关键词: 铝合金模块化节点; 弹塑性分析; 多参数耦合; 荷载-位移曲线; 承载性能; 参数敏感性分析; 精细化设计

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0048-10

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20250430002

Research on Load-Bearing Performance of New Modular Joints Under Multi-Parameter Collaborative Optimization

ZHOU Yunwen*, WU Gang, GU Piaoyun, DENG Yingxiang

(School of Architecture, Jiangxi Institute of Applied Science and Technology, Nanchang 330004, China)

*Corresponding author: 1228719550@qq.com

Abstract: This study investigates the optimization of load-bearing performance in novel aluminum alloy modular joints with a centrally reinforced annular structure through refined finite element modeling using ABAQUS. A systematic analysis is conducted to evaluate the coupled effects of key parameters, including modular unit thickness, annular reinforcement plate thickness, bottom stiffener thickness, and asymmetric bolt configurations. The results demonstrate that doubling the base plate thickness of modular units (relative to the top plate) combined with 10-mm-thick bottom stiffeners achieves an 11.98% improvement in ultimate load capacity and an 18.37% reduction in joint displacement. Parametric bolt configuration analysis reveals that an optimized asymmetric layout—adjusting bolt quantities in flange and web regions—effectively homogenizes stress distribution while eliminating construction redundancy. Load-displacement curves confirm the significant contribution of bottom stiffeners to stiffness enhancement, exhibiting complete envelopment of rigid unit responses and a pronounced increase in initial stiffness. Sensitivity analysis highlights a strong positive correlation between base plate thickness/stiffener thickness and load capacity gains, whereas excessive bolt deployment in the web region yields only marginal improvements (a 3.57%

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: 江西省自然科学基金(20232BAB214069)

作者简介:

周贇文(1995—),男,硕士,讲师,主要从事大跨空间结构方面的研究。E-mail: 1228719550@qq.com。(通信作者)

capacity increase), emphasizing the prioritization of critical component optimization. These findings provide theoretical and empirical foundations for the precise design of high-performance aluminum alloy modular joints.

Keywords: aluminum alloy modular joint; elastic-plastic analysis; multi-parameter coupling; load-displacement curve; load-bearing performance; sensitivity analysis; precise design

铝合金材料可焊性较差,因此铝合金网壳结构主要采用机械连接方式连接。现有常见的节点类型包括榫式节点、泰姆科节点(即板式节点)、螺栓球节点和铸铝节点,其中板式节点的应用最为广泛,国内单层铝合金网壳绝大部分均采用该类节点。钱宏等^[1]指出圆盘的厚度与直径、螺栓孔数量等是板式节点设计中的重要参数。在此基础上,郭小农等^[2-3]对大量板式节点开展了试验研究,考虑了螺栓安装缝隙、螺栓预紧力、节点板起拱度、加载模式等因素的影响。在节点有限元模拟研究方面,郭小农等^[4]对铝合金板式节点的网壳平面内抗弯刚度进行了模拟分析。尹建等^[5]考虑翼缘螺栓孔对铝合金板式节点抗拉和抗弯承载性能的削弱作用,运用ABAQUS进行有限元建模,得出影响加固效果的关键参数,并提出加固件的优化设计建议。

上述研究基本聚焦于传统铝合金板式节点,而传统板式节点在节点域内存在腹板不连续的问题,仅依靠圆形盖板提供节点的抗剪承载力,导致该类节点无法应用于对承载力要求更高的大跨度网壳结构。为此,本文在笔者团队前期提出的新型模块化节点(图1)构造基础上,针对该节点试验中呈现的破坏模式,重点开展多参数优化研究与分析。

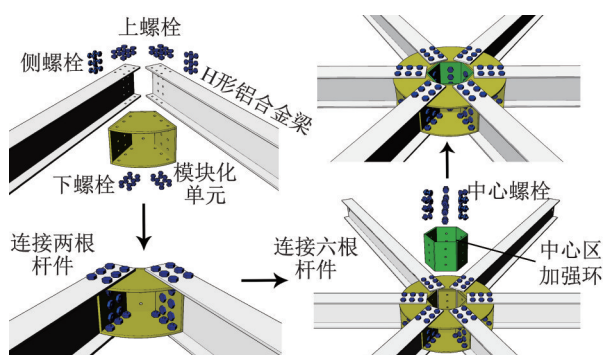


图1 新型模块化节点构造示意

Fig. 1 Diagram of new modular joint construction

1 有限元与试验的验证

结合笔者团队前期开展的试验研究(试件 SJ1~SJ4)^[6],及基于 ABAQUS 软件下的数值模拟结果(模型 JD1~JD3)^[7],绘制试验节点荷载-位移的有限元分析结果与实测值对比曲线,如图2所示。由该图可知,在弹性及弹塑性发展阶段,模拟曲线与试验数据吻合良好;随着

荷载进一步增大,试验中的螺栓群逐渐发生剪切破坏,导致试验曲线的刚度退化较模拟曲线的刚度退化更为显著,二者后期响应出现一定偏差。尽管如此,计算值与实测值的平均误差仍控制在5%以内,表明本文所建立的有限元模型具有较好的准确性,所采用的弹塑性分析方法能够可靠模拟该节点的力学性能。

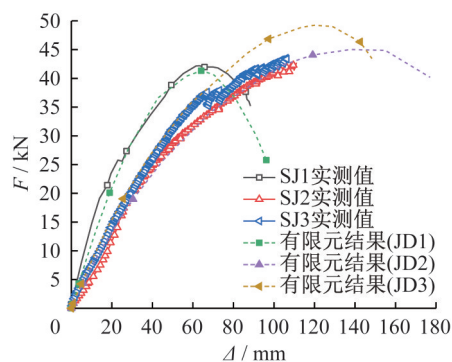


图2 节点的荷载-位移曲线对比

Fig. 2 Comparison of load-displacement curves of joints

文献[6]试验(试件 SJ2、SJ3)中螺栓群破坏情况严重,结果表明螺栓的合理布置对节点承载能力影响显著;文献[7](模型 JD3)结果表明,新型模块化节点的中心区加强环对提升节点的刚度、改善节点的力学性能具有重要意义。但模块化单元的屈曲变形会引发节点破坏,严重制约节点承载性能,导致其极限承载力的提升受限。

为充分发挥该新型模块化铝合金节点的材料优势,深入探究其承载能力,本文进一步运用 ABAQUS 有限元分析软件,以 JD3 为原始模型,研究模块化单元板厚、中心区加强环板厚、螺栓群数量与直径配置对节点承载力的影响规律,探寻新型模块化节点的最优参数配置方案,为后续该类节点的实际工程设计提供参考依据。

2 节点优化参数的选择

2.1 铝合金梁的简化处理

该节点的详细破坏机理、应力发展全过程及理论模型详见文献[6-7],本文不再赘述。由于本文的研究重点为模块化单元、中心区加强环及其连接螺栓的优化,并探究节点中心的荷载-位移关系。因此为提高参数分析效率,减少节点单元数量,将节点的6根H形铝合金梁的实体单元 C3D8R 简化成壳单元 S4R。简化后,节点的平均

单元数量从15万降低至10万,降幅达33%,软件的运行速度和收敛性得到显著提升,简化后的铝合金梁模型如图3所示。同时,模块化单元、中心区加强环、不锈钢螺栓均采用C3D8R实体单元建立模型,其中模块化单元与中心区加强环选用6061-T6型铝合金材料,螺栓则依据10.9级不锈钢材料参数建模。

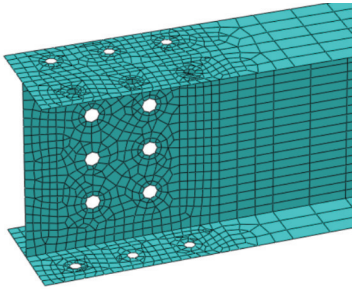


图3 简化后的铝合金梁

Fig. 3 Simplified aluminum alloy beam

优化节点的本构关系,铝合金屈服强度 f_y 按《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[8]的规定取240 MPa;紧固螺栓为不锈钢材料,10.9级不锈钢的屈服强度 f_y 取900 MPa。不锈钢螺栓的预紧力模拟参考《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.6—2014)^[9]及常规工程实践,取螺栓屈服强度的50%~70%作为预紧力施加值,本文建议取中间值0.6,计算 $P_0=0.6 \times 900 \times 20.1=10\ 854\text{ N}$,最终取预紧力为11 kN,并在分析步中通过“Bolt Load”功能实现预紧力施加,以保证连接的紧密性,模拟节点的真实受力状态。网格的精细化处

理等具体设置步骤与有限元模型建立方法^[7]保持一致,优化节点最终网格划分情况如图4所示。

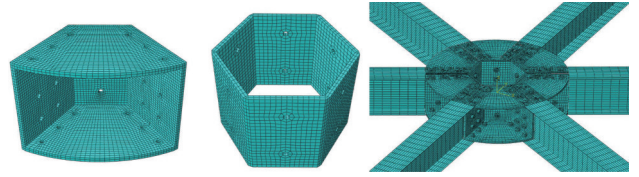


图4 简化后节点的网格划分情况

Fig. 4 Overall mesh generation of joints after simplification

2.2 新型模块化节点参数选取

文献[6]相关结论表明,新型模块化节点在屈服破坏阶段,模块化单元底板屈曲变形严重,中心区加强环下边缘受拉塑性区范围过大;顶板主要承受压力,其应力水平远低于底板应力水平,因此顶板厚度变化对节点整体性能的敏感性较低。同时,加强环易发生拉裂破坏,螺栓群大面积产生弯曲变形并且发生剪切破坏、脱离节点区域,导致节点后期约束度不足,这些现象均会对节点承载能力产生显著影响。

综上所述,本文从六种关键因素出发,对新型模块化节点的受力性能进行参数化分析,具体考量模块化单元底板厚度、中心区加强环板厚,增设加强环底部加劲板、翼缘区螺栓群数量、腹板区螺栓群数量、中心区螺栓群数量等对节点极限承载力的影响规律,探寻其最优参数配置方案。本次研究共设置22个模型,其中原始模型JD3命名为A0,其余优化节点模型编号及参数如表1所示。

表1 新型模块化节点优化的参数及分析模型编号汇总

Table 1 Summary of parameters and model numbering for new modular joint optimization

模型编号	铝合金梁规格/mm	模块化单元顶侧板厚/mm	模块化单元底板厚/mm	加强环厚/mm	加强环底部加劲板厚/mm	上翼缘螺栓数量/个	下翼缘螺栓数量/个	腹板螺栓数量/个	中心区螺栓数量/个
A0			5	5	0	6	6	6	3
A1			6	5	0	6	6	6	3
A2			7	5	0	6	6	6	3
A3			8	5	0	6	6	6	3
A4			9	5	0	6	6	6	3
A5	H110×60×5×5	5	10	5	0	6	6	6	3
A6			11	5	0	6	6	6	3
A7			12	5	0	6	6	6	3
B1			5	6	0	6	6	6	3
B2			5	7	0	6	6	6	3
B3			5	8	0	6	6	6	3

续表

模型编号	铝合金梁规格/mm	模块化单元顶侧板厚/mm	模块化单元底板厚/mm	加强环厚/mm	加强环底部加劲板厚/mm	上翼缘螺栓数量/个	下翼缘螺栓数量/个	腹板螺栓数量/个	中心区螺栓数量/个
B4			5	9	0	6	6	6	3
B5			5	5	3	6	6	6	3
B6			5	5	5	6	6	6	3
B7			5	5	7	6	6	6	3
C1			5	5	0	6	6	6	2
C2	H110×60×5×5	5	5	5	0	6	6	6	4
C3			5	5	0	6	6	6	6
C4			5	5	0	4	6	6	3
C5			5	5	0	6	8	6	3
C6			5	5	0	6	6	4	3
C7			5	5	0	6	6	8	3

3 模块化单元底板厚度优化分析

以设置铝合金加强环的新型模块化节点模型JD3(A0)为基础,研究模块化单元底板厚度对节点受力性能的影响,分别选取6 mm、7 mm、8 mm、9 mm、10 mm、11 mm、12 mm七种不同板厚进行建模分析。在ABAQUS中通过施加位移控制的静态加载(位移边界条件)开展准静态非线性分析,得到底板厚度为5 mm、7 mm、10 mm时的应力云图,其分析结果如图5所示,同时绘制八个节点模型的荷载-位移曲线如图7所示,统计曲线的主要参数见表2。

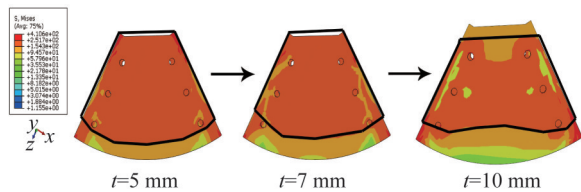


图5 模块化单元不同底板厚度的应力云图变化情况(单位:MPa)

Fig. 5 Variation of stress contour of modular units with different bottom plate thickness (unit:MPa)

由图5可知,随着底板厚度增加(6~12 mm),其塑性应力区范围(图中黑框范围)逐渐缩小,屈服程度减弱,表明材料受力状态得到改善;节点承载力随板厚增大呈先升后降趋势(图6),增幅为3%~12%,其中底板厚度为10 mm(顶板两倍)时优化效果最优,极限承载力由49.25 kN提升至55.15 kN,增幅达11.98%(表2)。荷载-位移曲线(图6)进一步验证了这一规律,底板厚度为顶板厚度的两倍时,曲线斜率显著高于其他工况的曲

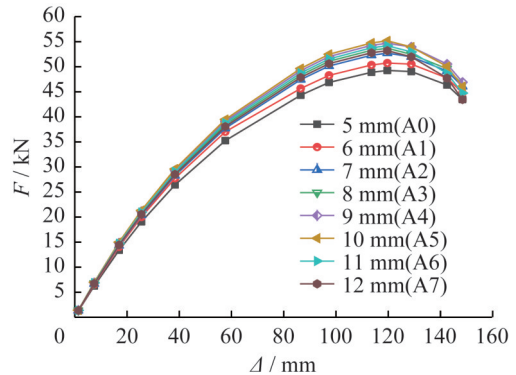


图6 模块化单元不同底板厚度的节点荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of joint load-displacement curves of modular units with different bottom plate thickness

线斜率,表明节点刚度与承载力实现同步提升。试验发现,顶板压力增幅仅为底板的一半,结合等强度理论分析,底板厚度取顶板的两倍可使两板应力均衡,实现材料利用率最大化。该结论与传统板式节点(盖板与腹板等厚)存在显著差异^[10],建议实际工程中将模块化节点底板厚度设为顶板厚度的两倍,以优化节点承载性能。

4 中心区加强环优化分析

4.1 板厚的优化

以模型JD3(A0)为基础模型,通过改变中心区加强环板厚,建立6 mm、7 mm、8 mm、9 mm四种节点模型并开展对比分析。在ABAQUS中通过施加位移控制的静

表2 模块化单元不同底板厚度的节点荷载-位移曲线主要参数

Table 2 Main parameters of joint load-displacement curves of modular units with different bottom plate thickness

模型编号	模块化单元底板厚/mm	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%
A0	5	49.25	119.68	0
A1	6	50.78	120.45	3.11
A2	7	52.72	121.11	7.04
A3	8	53.68	120.89	9.00
A4	9	54.68	119.45	11.02
A5	10	55.15	119.11	11.98
A6	11	54.29	118.89	10.22
A7	12	53.26	118.56	8.14

表3 不同板厚中心区加强环节点荷载-位移曲线主要参数

Table 3 Main parameters of load-displacement curves of joint with different thickness of stiffening ring in central region

模型编号	中心区加强环板厚/mm	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	位移增幅/%
A0	5	49.25	119.68	0	0
B1	6	50.72	113.83	2.98	-4.89
B2	7	50.33	108.19	2.19	-9.60
B3	8	49.84	104.43	1.19	-12.74
B4	9	48.26	101.91	-2.01	-14.85

态加载(位移边界条件)进行准静态非线性分析,得到三种不同板厚下中心区加强环的应力云图分析结果见图7所示,同时绘制五种不同板厚节点模型的荷载-位移曲线如图8所示,曲线的主要参数见表3。

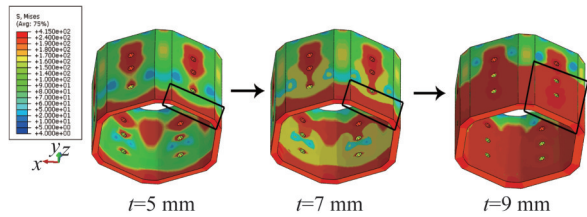


图7 不同板厚中心区加强环的应力云图变化情况(单位:MPa)

Fig. 7 Variation of stress contour of different thickness of stiffening ring in central region (unit:MPa)

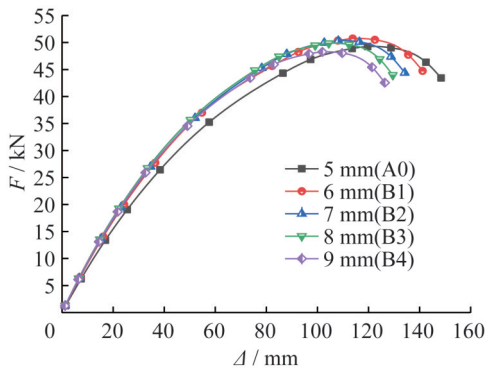


图8 不同板厚中心区加强环节点荷载-位移曲线对比
Fig. 8 Comparison of load-displacement curves of joint with different thickness of stiffening ring in central region

由图7可知,随着加强环板厚增加(5~9 mm),其下边缘塑性应力区(图中黑框范围)范围扩大,塑性屈服程度增强,表明加强环参与整体受力的程度提高,节点整体性得到改善;但承载力提升幅度有限(约3%),且板厚为9 mm时承载力出现下降趋势(表3)。此外,板厚增大显著降低节点中心位移,板厚为9 mm时,位移值由5 mm工况的119.68 mm降至101.91 mm,降幅达14.85%,证实加强环板厚增加对节点位移约束具有良好效果。综合考量承载力与位移约束效应,建议将中心区加强环板厚设为模块化单元板厚(顶板与底板的平均厚度)的1.2倍,既满足承载力提升需求,又能增大节点刚度,同时避免了因过度增厚导致的承载力下降及结构重量增大问题,为工程优化提供平衡方案。

4.2 增设底部加劲板的优化

为避免试验中试件SJ3加强环下边缘发生拉裂破坏,在中心区加强环处增设底部加劲板并完成有限元建模,结果如图9所示,同时建立底部加劲板板厚为3 mm、5 mm、7 mm的三种模型,分析不同底部加劲板厚度中心区加强环的应力云图,分析结果如图10所示。以上三个节点模型的荷载-位移曲线如图11所示,曲线的主要参数见表4。

由图10可知,增设底部加劲板可显著改善中心区加强环的受力性能,与未设置加劲板的模型相比(图7),加劲板使加强环下边缘塑性区范围缩减,应力转移至加劲板区域(图10红色区域);随着加劲板厚度增加(3~7 mm),加强环边缘塑性程度减弱,但上侧螺栓孔区域塑性区有所扩大。

表4数据显示,加劲板厚度增大可同步提升节点承载力与位移约束效果,板厚为7 mm时,承载力较无加劲板工况增幅达11.53%,中心位移降幅为18.37%;但板厚从

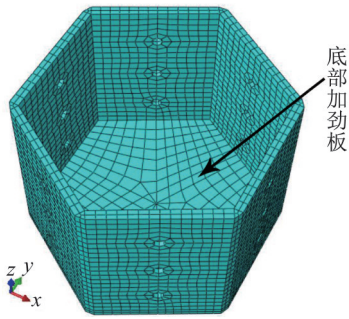


图9 设置底部加劲板的中心区加强环

Fig. 9 Central region stiffening ring with bottom stiffened plate

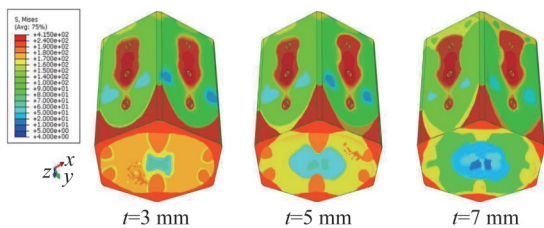


图10 不同底部加劲板厚度的中心区加强环应力云图(单位:MPa)

Fig. 10 Stress contour of central region stiffening ring with different thickness of bottom stiffened plates (unit:MPa)

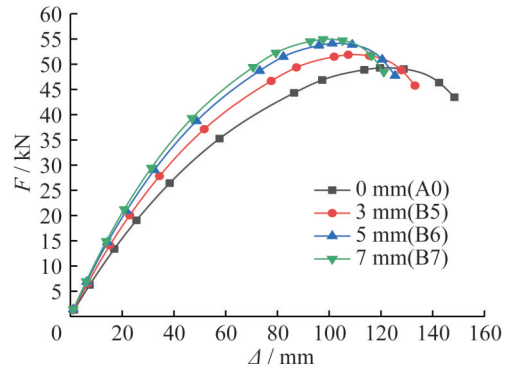


图11 不同底部加劲板厚度的节点荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves of joints with different thickness of bottom stiffened plates

5 mm增至7 mm时,承载力增幅仅提升1.67%,位移降幅减少2.93%,且结构重量显著增加。由图11可知,板厚为5 mm时曲线斜率与7 mm工况接近,且经济性更优。综上,对于本文所述尺寸的节点,设置5 mm厚加劲板时,承载力增幅为9.86%,位移降幅为15.44%,能在性能与经济性间取得良好平衡。对于其他尺寸的节点,建议将底部加劲板厚度设为与模块化单元顶板厚度一致,在保证节点整体刚度与承载性能的同时,避免过度增厚造成的材料浪费,为工程实践提供高效、经济的优化方案。

表4 不同底部加劲板厚度的节点荷载-位移曲线主要参数

Table 4 Main parameters of load-displacement curves of joint with different thickness of bottom stiffened plates

节点编号	底部加劲板厚度/mm	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	位移增幅/%
A0	0	49.25	119.68	0	0
B5	3	51.87	107.41	5.32	-10.25
B6	5	54.11	101.20	9.86	-15.44
B7	7	54.93	97.69	11.53	-18.37

5 多参数协同优化效应分析

前述分析主要聚焦于单一参数变化对节点性能的影响,为深入探究多参数耦合作用机制,本节选取对节点性能影响最显著的两个参数:模块化单元底板厚度与加强环底部加劲板厚度,开展多参数协同优化分析。通过构建参数协同分析矩阵,组合分析模型A5($t_b=10$ mm)与模型B5、B6、B7($t_s=3$ mm, 5 mm, 7 mm)等多种工况,系统考察参数交互作用对节点极限承载力及刚度的综合影响。

分析表明,底板厚度与加劲板厚度对节点性能的提升存在显著的协同效应。当底板厚度从5 mm增加至10 mm(模型A0~A5),且同时设置5 mm厚加劲板(模型B6)时,节点极限承载力提升至58.27 kN,较基准模型

(A0)增幅达18.27%;若在此基础上继续将加劲板厚度增至7 mm(模型B7),承载力虽进一步提升至58.98 kN,但增幅仅提高1.45%,边际效益显著降低。参数协同分析结果显示(表5),“A5+B6”组合工况的中心位移与“A5+B7”组合工况的中心位移较为接近,表明二者刚度性能相当,但前者经济性更优;同时对比B5~B7模型计算结果,存在类似现象。

综上,本文提出“优先优化关键构件,再匹配辅助强化”的协同设计策略:优先将模块化单元底板厚度增加至顶板厚度的2倍,再匹配设置与模块化单元顶板厚度一致的加强环底部加劲板。该策略可在显著提升节点承载力与刚度的同时,避免材料浪费,实现性能与经济效益的协同优化,体现了多参数协同优化在节点设计中

表5 参数协同分析矩阵及计算结果

Table 5 Parameter collaborative analysis matrix and calculation results

组合工况编号	模块化单元底板厚度 t_b /mm	加强环底部加劲板厚度 t_s /mm	极限承载力 F_{max} /kN	承载力增幅/%	中心位移 Δ /mm	位移增幅/%
A0	5	0	49.25	0(基准)	119.68	0(基准)
D1(A5+B5)	10	3	56.92	15.57	110.53	-7.65
D2(A5+B6)	10	5	58.27	18.31	98.75	-17.49
D3(A5+B7)	10	7	58.98	19.76	95.36	-20.31

的重要性,为工程应用提供了更具指导意义的设计依据。

6 螺栓群数量的优化分析

6.1 中心区螺栓群的优化

针对文献[6]中试件JD4螺栓脱落的问题,本文以JD3(A0)模型为基础,通过调整中心区螺栓布置开展对比分析,设置单排中距55 mm(模型C1)、单排27.5 mm(模型A0)、双排55 mm(模型C2)、双排27.5 mm(模型C3)四种螺栓配置方案,具体节点模型布置如图12所示,重点考察不同螺栓间距与排数对节点性能的影响。

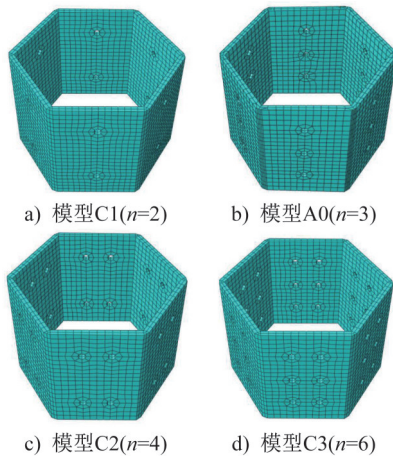


图12 中心区不同螺栓数量的加强环网格划分
Fig. 12 Mesh generation of stiffening ring with different bolt numbers in central region

提取各模型中心区加强环板内的应力分布进行分析,如图13所示。结果表明,当中性轴处未设置螺栓时(图13a、c),下侧螺栓孔应力显著高于上侧螺栓孔应力,塑性区(红色区域)向下边缘贯通扩展;而中性轴增设螺栓后(图13b、d),应力分布反转,上侧螺栓孔受力占优,下边缘塑性区范围缩小且未贯通。需注意的是,图13d)中上侧螺栓群因高约束作用产生横向张拉趋势,可能导致该区域发生横向拉裂破坏。由此可见,在中性轴处布置螺栓可优化应力传递路径,减少边缘塑性贯通风险,显著提升节点整体受力性能。

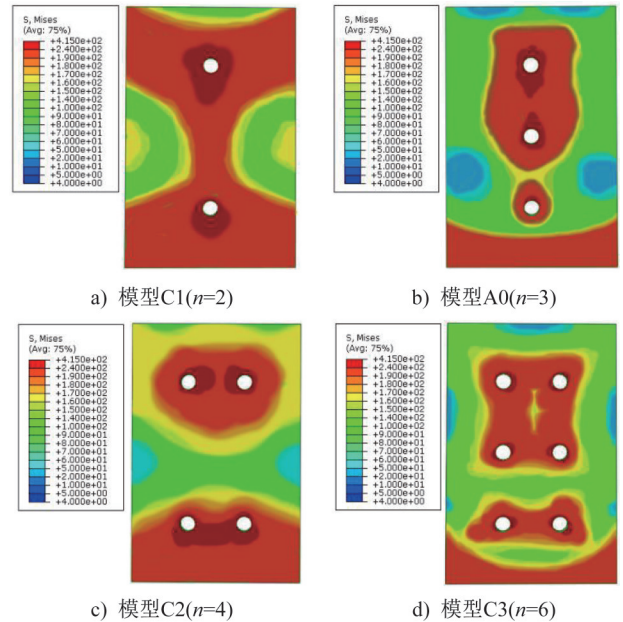


图13 中心区不同螺栓数量的加强环侧板应力云图(单位:MPa)

Fig. 13 Stress contour of side plate of stiffening ring with different bolt numbers in central region (unit: MPa)

各模型荷载-位移曲线如图14所示,曲线的主要参数见表6。结果表明,单排两螺栓的模型C1(中距55 mm)极限承载力最低,且位移增幅最大,表明其延性虽优但承载性能不足;双排四螺栓的模型C2和六螺栓的模型C3较三螺栓的模型A0承载力仅提升不足3%,位移却减少5%~9%,说明增加螺栓数量虽能略微提升节点整体性,但对承载力的改善效果有限,远低于加强环板增厚或增设底部加劲板的强化效果。综上,中心区螺栓数量对节点承载力无显著增益,过量设置反而会降低施工效率,建议采用基础模型A0的三螺栓配置,平衡节点性能与安装需求。

6.2 翼缘区螺栓群的优化

文献[7]指出,模块化单元顶底板受力不均,下翼缘螺栓群因约束不足易发生变形。为研究翼缘螺栓布置对节点性能的影响,基于JD3(A0)模型设计三种方案(图16):模型C4上翼缘两排(间距60 mm)、下翼缘三排(间

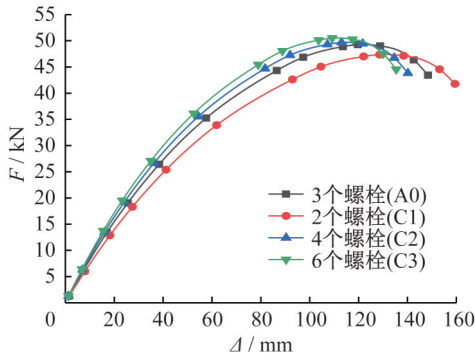


图 14 中心区不同螺栓数量的节点荷载-位移曲线
Fig. 14 Load-displacement curves of joints with different bolt numbers in central region

表 6 中心区不同螺栓数量节点的荷载-位移曲线主要参数

Table 6 Main parameters of load-displacement curve of joints with different bolt numbers in central region

模型编号	中心区螺栓数量/个	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	位移增幅/%
C1	2	47.36	128.57	-3.85	7.43
A0	3	49.25	119.68	0	0
C2	4	49.68	113.02	0.87	-5.56
C3	6	50.51	109.18	2.55	-8.77

距 30 mm);模型 A0 上下翼缘均为三排(间距 30 mm);模

表 7 翼缘区不同螺栓数量节点的荷载-位移曲线主要参数

Table 7 Main parameters of load-displacement curves of joints with different bolt numbers in flange region

模型编号	上翼缘螺栓数量/个	下翼缘螺栓数量/个	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	位移增幅/%
C4	4	6	48.60	122.71	-1.32	2.53
A0	6	6	49.25	119.68	0	0
C5	6	8	52.57	110.85	6.73	-7.38

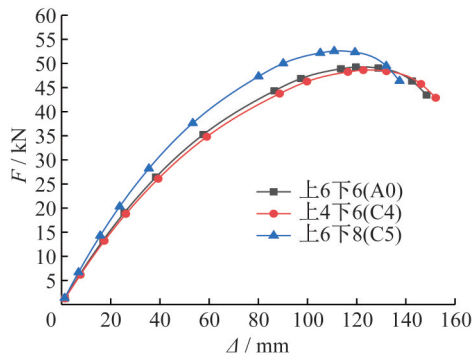


图 16 不同翼缘区螺栓数量的节点荷载-位移曲线
Fig. 16 Load-displacement curves of joints with different bolt numbers in flange region

型 C5 上翼缘三排(间距 30 mm)、下翼缘四排(间距 20 mm)。通过调整上下翼缘螺栓数量与间距,对比分析其对节点承载力及约束效果的影响规律,实现螺栓群配置的优化。

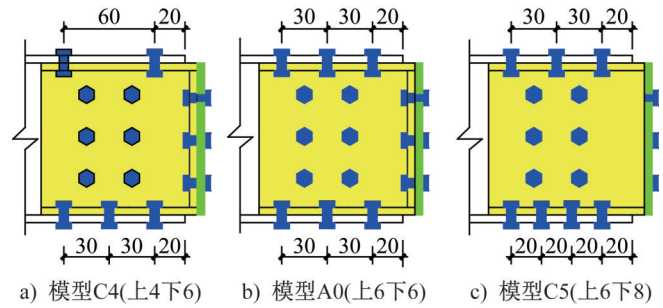


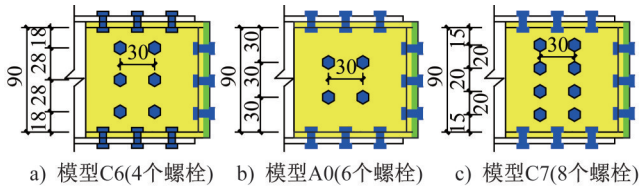
图 15 翼缘区螺栓群的位置和数量(单位:mm)
Fig. 15 Location and number of bolt groups in flange region(unit:mm)

以上三种不同螺栓数量模型的荷载-位移曲线如图 16 所示,曲线的主要参数见表 7。结果表明,模型 C4 与 A0 的曲线全程高度重合,力学性能无明显差异;而模型 C5 曲线显示其承载力提升 6.73%,中心位移减少 7.38%,表明增加下翼缘螺栓数量可显著优化节点性能,但螺栓过量布置会增加安装复杂度。综合分析可知,上翼缘螺栓对承载力的贡献较低,可适当减少其数量,建议采用模型 C4 配置,即上翼缘适当减少螺栓数量、下翼缘保证足够约束,在保证承载力与位移控制的前提下,兼顾施工效率。

6.3 腹板区螺栓群的优化

史典鹏^[11]通过有限元分析,研究了节点抗剪件与腹板之间螺栓的布置规律,通过调整腹板区螺栓的位置和数量,建立了三种节点模型:两排螺栓间距 $d=30$ mm(模型 C6)、三排螺栓间距 $d=28$ mm(模型 A0)、四排螺栓间距 $d=20$ mm(模型 C7),以上三种情况的螺栓位置和数量如图 17 所示。

以上三种不同螺栓数量的模型荷载-位移曲线如图 18 所示,曲线的主要参数见表 8。结果表明,节点极限承载力随腹板螺栓数量增加呈上升趋势,但增幅有限,如模型 C7 螺栓增至 8 个时,承载力仅提升 3.57%;模型 C6(四螺栓)承载力较模型 A0(三螺栓)下降 5.67%,表明螺栓



a) 模型C6(4个螺栓) b) 模型A0(6个螺栓) c) 模型C7(8个螺栓)

图 17 腹板区螺栓群位置和数量

Fig. 17 Bolt group location and number in web region

数量过少会显著削弱节点性能,而螺栓数量对节点中心位移的影响较小(平均波动 $<3\%$)。综合分析,腹板螺栓数量需避免过少(如模型C6),但过量增设(如模型C7)对性能提升有限,且会增加安装难度,建议采用A0模型的配置方式,使腹板区螺栓群与下翼缘螺栓群排布逻辑保持一致,保证足够约束,兼顾承载力稳定性与施工效率,避免冗余配置。

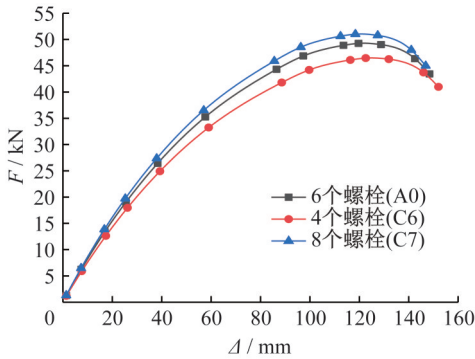


图 18 腹板区不同螺栓数量的节点荷载-位移曲线

Fig. 18 Load-displacement curves of joint with different bolt numbers in web region

7 参数化对比分析

为明确各参数对节点性能的影响优先级,本文对模块

表 8 腹板区不同螺栓数量节点的荷载-位移曲线主要参数

Table 8 Main parameters of load-displacement curve with different bolt numbers in web region

模型编号	腹板区域螺栓数量/个	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	位移增幅/%
C6	4	46.46	122.60	-5.67	2.44
A0	6	49.25	119.68	0	0
C7	8	51.01	118.42	3.57	-1.05

化单元底板厚度、中心区加强环板厚、底部加劲板及各区域螺栓数量等关键参数开展进一步对比分析,选取各参数代表性模型的荷载-位移曲线,结合不锈钢模型JD4(全钢结构)与基础模型JD3(A0)的荷载-位移曲线进行系统分析,如图19所示,对比各因素对节点承载力与中心位移的敏感性,为工程设计中关键参数的优先级设置提供理论支撑。荷载-位移曲线的主要参数如表9所示。

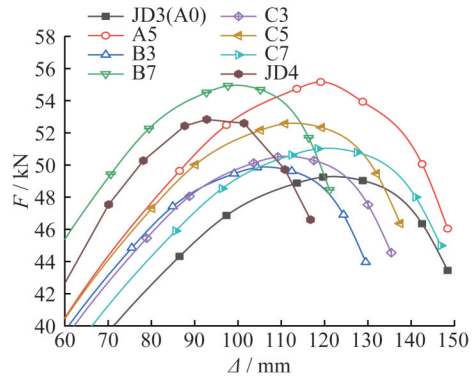


图 19 不同参数的节点荷载-位移曲线

Fig. 19 Load-displacement curves of joints with different parameters

表 9 不同参数节点的荷载-位移曲线主要参数

Table 9 Main parameters of load-displacement curve of joints with different parameters

模型编号	优化方法	极限承载力 F/kN	中心位移 Δ/mm	承载力增幅/%	增幅排序	位移增幅/%	降幅排序
JD3(A0)	无	49.25	119.68	—	—	—	—
A5	模块化单元底板厚度	55.16	119.11	12.00	1	-0.48	—
B3	中心区加强环板厚	49.84	104.43	1.20	7	-12.74	3
B7	加强环底部加劲板	54.93	97.69	11.53	2	-18.37	2
C3	中心区螺栓	50.51	109.18	2.55	6	-8.77	4
C5	翼缘区螺栓	52.57	110.85	6.73	4	-7.38	5
C7	腹板区螺栓	51.01	118.42	3.57	5	-1.05	—
JD4	刚性单元	52.83	92.79	7.27	3	-22.47	1

由表9可知,以5%影响幅度为阈值对关键参数进行排序,结果显示,对承载力影响的参数敏感性排序为:

底板厚度>底部加劲板>翼缘区螺栓数量;对节点中心位移影响的敏感参数依次为:增设底部加劲板、中心区

环板厚度及螺栓数量,其中底部加劲板的优化效果最优。荷载-位移曲线对比表明,增设底部加劲板的模型B7荷载-位移曲线完全包络模型JD4刚性单元曲线,其初始刚度显著提升,验证了底部加劲板对节点刚度的强化作用。综上,底部加劲板是同时提升节点承载力与刚度的核心因素,底板厚度调整对承载力调控至关重要;翼缘区、中心区螺栓数量对节点整体性的影响次之,设计时需在施工效率与节点性能间做好平衡。建议工程设计中优先优化底部加劲板与底板厚度,实现节点性能的高效提升。

8 结论

本文基于ABAQUS有限元软件对新型模块化节点(含中心区加强环)开展多参数优化研究,重点分析模块化单元底板厚度、中心区加强环板厚、底部加劲板设置及各区域螺栓配置对节点性能的影响,主要结论如下:

(1) 承载力提升关键措施:研究表明,模块化单元底板厚度与加强环底部加劲板设置是影响节点承载力和刚度的最显著参数。建议模块化单元底板厚度取为顶板厚度的2倍,以实现应力均衡和材料高效利用;加强环底部加劲板宜依据主体顶板板厚选择相对刚度,以达到承载力与经济性的最优平衡。

(2) 螺栓配置优化方案:螺栓布局应遵循“关键区域强化、非关键区域适度”的理念。建议中心区布置3个螺栓,上翼缘可适当减少螺栓数量,下翼缘及腹板区需保证足够约束。应避免螺栓的冗余布置,其在提升节点整体性能方面贡献有限。

(3) 参数敏感性存在明显优先级:对承载力影响的参数敏感性排序为:底板厚度>底部加劲板>翼缘区螺栓数量;对刚度影响的敏感性排序为:底部加劲板>中心区环板厚度>螺栓配置。该排序可为工程中的优化设计提供明确的优先级指引。

(4) 参数交互影响规律:研究表明,当采用“优先增加底板厚度,再匹配加劲板”的协同策略时,节点性能提升幅度远超单一参数优化效果,体现了多参数协同研究的必要性与重要性。

本研究结论基于参数化数值模拟获得,虽经试验验证模型可靠性,但最优方案的实际性能仍需通过后续足尺试验进一步验证。今后研究可围绕节点在复杂受力状态(如地震、疲劳荷载)下的性能以及更大范围的参数协同效应展开,以形成完备的设计建议体系。

参考文献:

[1] 钱基宏,赵鹏飞,郝成新,等.大跨度铝合金穹顶网壳结构的研究[J].建筑科学,2000,16(5):7-12.DOI:10.13614/j.cnki.

11-1962/tu.2000.05.002.

QIAN Jihong, ZHAO Pengfei, HAO Chengxin, et al. Development study on large span aluminum alloy dome structure[J]. Building Science, 2000, 16(5): 7-12. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2000.05.002.(in Chinese)

[2] 郭小农,熊哲,罗永峰,等.铝合金板式节点初始刚度[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(8):1161-1166.DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2014.08.003.

GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng, et al. Initial bending stiffness of aluminum alloy gusset joint[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(8): 1161-1166. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.08.003.(in Chinese)

[3] 郭小农,熊哲,罗永峰,等.铝合金板式节点承载力设计方法及构造要求[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):47-53.DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2015.01.007.

GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng, et al. The design method and detailed requirements of bearing capacity of aluminum alloy gusset joint[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 47-53. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.01.007.(in Chinese)

[4] 郭小农,朱劭骏,王丽,等.铝合金板式节点平面内抗弯刚度研究[J].建筑结构,2018,48(14):34-39.DOI:10.19701/j.jzjg.2018.14.007.

GUO Xiaonong, ZHU Shaojun, WANG Li, et al. Study on in-plane bending stiffness of aluminum alloy gusset joint[J]. Building Structure, 2018, 48(14): 34-39. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.14.007.(in Chinese)

[5] 尹建,柳晓晨,欧阳元文.铝合金板式节点角铝加固设计与分析[J].建筑结构,2018,48(14):40-43,39.DOI:10.19701/j.jzjg.2018.14.008.

YIN Jian, LIU Xiaochen, OUYANG Yuanwen. Angle aluminum reinforcing design and analysis of aluminum alloy gusset joints[J]. Building Structure, 2018, 48(14): 40-43, 39. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.14.008.(in Chinese)

[6] 周贇文,赵才其.新型模块化单层铝合金网壳节点的试验研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(11):72-81.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.009.

ZHOU Yunwen, ZHAO Caiqi. Experimental study on a novel modular joint in single-layer aluminum alloy reticulated shell[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(11): 72-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.009.(in Chinese)

[7] 周贇文,赵才其.新型模块化单层铝合金网壳节点的弹塑性分析[J].建筑结构,2022,52(6):44-48.DOI:10.19701/j.jzjg.20200162.

ZHOU Yunwen, ZHAO Caiqi. Elastic-plastic analysis of new modular single-layer aluminum alloy reticulated shell joints[J]. Building Structure, 2022, 52(6): 44-48. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200162.(in Chinese)