DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.005

轴拉荷载作用下马鞍形连接件—槽钢十字搭接节点受力性能研究

李睿奇[1], 贾家宝[1], 席　宇[1,2,4], 罗　峥[1,3], 薛建阳[1]

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司,陕西 西安 710082;
3. 西安建筑科大工程技术有限公司,陕西 西安 710055; 4. 陕西省建筑工程质量检测中心有限公司,陕西 西安 710082)

摘要: 马鞍形连接件-槽钢十字搭接节点作为装配式吊架系统的重要连接方式,广泛应用于大跨体育场馆、地铁车站等具有特殊功能需求建筑的机电管线安装工程中。本文选取典型工况-轴向受拉荷载,研究装配式承重型吊架的十字搭接节点在单调与低周往复拉力作用下的力学性能,分析了十字搭接节点的轴拉受力机理、破坏模式、承载能力、耗能能力和刚度退化规律;基于建立的精细化数值模型,探讨了马鞍形连接件厚度、孔形对十字搭接节点极限承载力、极限位移的影响规律,结果表明:十字搭接节点的破坏形态主要表现为连接件孔边撕裂、连接件弯折处断裂、高强螺栓与连接件的滑脱、槽钢齿受损及槽钢卷边外翻失效等;圆孔马鞍形连接件可降低马鞍形连接件孔径大小与高强螺栓柱径尺寸差距产生的滑移现象,从而提高了十字搭接节点的初始刚度和塑性变形能力;马鞍形连接件的厚度对节点承载能力和刚度的影响显著,马鞍形连接件刚度过小时将导致连接件先于槽钢过早破坏,6 mm厚度马鞍形连接件与槽钢组成的十字搭接节点可以充分发挥两者的抗拉性能。

关键词: 装配式承重型吊架; 马鞍形连接件; 轴拉试验; 槽钢; 协同工作机制

中图分类号: TU391;TU312　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1006-7930(2026)04-0512-12

Mechanical behavior of lap joints between saddle-shaped connectors and channels under axial tension

LI Ruiqi[1], *JIA Jiabao*[1], *XI Yu*[1,2,4], *LUO Zheng*[1,3], *XUE Jianyang*[1]

(1. School of Civil Engineering, Xi′an Univ. of Arch. & Tech., Xi′an 710055, China;
2. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi′an 710082, China;
3. XAUAT Engineering Technology Co., Ltd., Xi′an 710055, China;
4. Shaanxi Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd., Xi′an 710082, China)

Abstract: The cross lap joint between saddle-shaped connectors and channel steels serves as a crucial connection in prefabricated hanger systems and is widely used in the installation of pipelines in buildings with special functional requirements, such as large-span stadiums and subway stations. This study focuses on a typical loading condition, i.e., axial tensile load, to investigate the mechanical behavior of cross-shaped lap joints in the prefabricated load-bearing hanger system under monotonic and cyclic loads. The axial force transfer mechanism, failure modes, load-bearing capacity, energy dissipation capacity, and stiffness degradation behavior of the joints are systematically analyzed. Based on the established refined numerical model, the effects of saddle-shaped connector thickness and hole shape on the ultimate strength and ultimate displacement of the cross-shaped lap joint were analyzed. The results show that the failure modes of the joint mainly include tearing at the edges of connector holes, fractures at the bent sections of connectors, slippage between the high-strength bolts and connectors, damage to the teeth of channels, and flaring failure of channel edges. Saddle-shaped connectors with round holes can reduce the slippage caused by the size difference between the connector hole diameter and the high-strength bolt shaft diameter, thus improving the initial stiffness and plastic deformation capacity of the cross-shaped lap joint. The thickness of the saddle-shaped connector

收稿日期: 2025-03-03　　**修回日期**: 2026-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(52478558);陕西省建筑科学研究院科研项目(2024-13-499);西安建筑科大工程技术有限公司技术研发项目(XAJD-YF25N016)

第一作者: 李睿奇(1992—),女,博士生,主要从事建筑非结构构件性能评估及提升研究。E-mail:liruiqi@xauat.edu.cn

通信作者: 席　宇(1990—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为建筑加固及性能提升。 E-mail:294876301@qq.com

significantly affects the strength and stiffness of the joint. If the stiffness of the saddle-shaped connector is too low, it will lead to premature failure of connectors before channels. Cross-shaped lap joints composed of 6 mm thick saddle-shaped connectors and channels can fully utilize the tensile performance of both components.

Key words: prefabricated load-bearing hanger system; saddle-shaped connector; axial tensile test; channel; cooperative working mechanism

马鞍形连接件-槽钢十字搭接节点作为工业管道系统的关键组成部分，承担着支撑和固定管道的重要功能，对保障管道系统的稳定运行至关重要，其典型构造如图 1 所示。传统焊接支架节点焊接工艺复杂，焊接质量高度依赖工人技术水平，易出现焊缝不均匀、未焊透或虚焊等问题。节点失效后难以调整或拆卸，在进行支架系统改造时需切割重焊，成本高且可能损伤主体结构。相比之下高强螺栓咬合型连接的装配式节点（图 1b）采用标准化构件，工厂预制，现场拼装，可大幅缩短工期；螺栓连接允许微调，适应节点安装误差，提高施工灵活性。

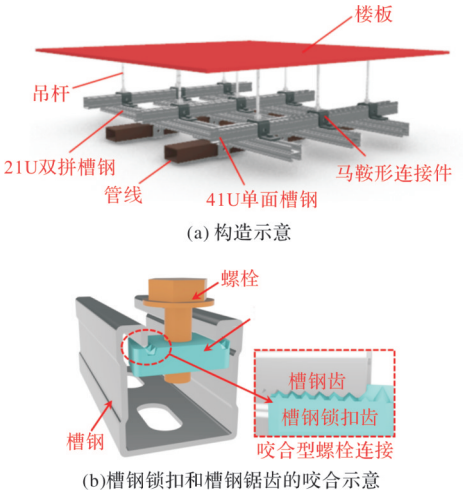


图 1　装配式承重型吊架示意

Fig. 1　Schematic diagram of prefabricated load-bearing hanger system

有关传统梁柱节点及钢框架节点的受力性能研究已十分成熟[1-2]，与以上结构构件相比，非结构构件（尤其支吊架系统）的节点研究相对比较滞后[3-4]。目前相关学者初步研究了支架节点中的高强螺栓咬合型连接的基本力学性能，高强螺栓咬合型连接中槽钢与锁扣咬合齿能够提供额外抗滑移能力，减少螺栓受力集中，提高节点整体刚度，相比焊接节点的脆性破坏，咬合连接允许一定滑移变形，降低突发断裂风险。郭兵等[5-6]研究了吊架用高强螺栓咬合型连接受拉及受剪时的破坏机理与承载力，给出了单个高强螺栓咬合型连接受拉及受剪承载力设计值的计算方法；此外，全球各国的相关规范[7-9]对其受拉承载力计算方法也有详细的规定。然而，已有成果大多针对单个螺栓连接的层面，关于装配式承重型吊架构件及节点层面力学性能的研究尚不充分。张雪芳等[10]开展了不同种类装配式门型支吊架系统的低周往复荷载试验，结果表明：连接节点是装配式承重吊架支吊架系统破坏的薄弱环节。罗干等[11]通过单调拉伸试验，发现螺栓扭矩对于铰链型连接件的承载能力有很大影响，指出在实际工程中应将螺栓预加至额定扭矩，以防止其承载力不足导致的提前破坏。尚庆学等[12]对不同吊杆直径的螺杆式抗震支吊架进行了拟静力试验研究，发现吊杆直径对此类抗震支吊架的抗震能力影响不大。

装配式马鞍形连接件-槽钢十字搭接节点在重力荷载下主要承受轴向拉力或拉弯组合力，承重槽钢卷边、螺栓孔边缘等几何形状不规则区域易产生局部应力集中，导致槽钢卷边、螺栓孔边缘出现明显塑性变形，长期重力荷载作用下还可能引发槽钢锁扣与连接件间的微滑移，降低节点轴向受力的初始刚度和稳定性，高强螺栓预紧力也因重力荷载的长期作用而松弛，削弱节点抗剪能力。在竖向地震作用下，地震作用产生的瞬时峰值荷载可能超过节点静力承载力，导致整体吊架系统的坍塌破坏（图 2），这不仅危害人身安全，还严重干扰了室内功能性设施的正常运行。



图 2　震损失效

Fig. 2　Seismic failure of hanger system

本文通过对装配式马鞍形连接件-槽钢十字搭接节点的轴向受拉力学性能试验，旨在研究马鞍形连接件与吊架槽钢之间的协同工作机制；同时，基于轴拉试验及建立的精细化数值分析模型，分析十字搭接节点的合理设计参数，提出相应的设计建议，分析多参数下的试验结果，得出最优节点构造和设计提高节点的整体抗拉性能，确保带马鞍形连接件的装配式承重型吊架十字搭接节点在实际工程中的安全性和可靠性。

1　构造细节特征

装配式马鞍形连接件-槽钢十字搭接节点由21U型双拼槽钢、41U型单面槽钢、马鞍形连接件与塑翼槽钢锁扣组成,组件细节及其连接方式如图3所示。21U双拼槽钢、41U单面槽钢与传统槽钢相比截面设有加强筋,对原槽钢边缘进行卷边处理,竖直卷边处设有机器冲压成型的咬合齿,能够起到抗剪止滑的作用。

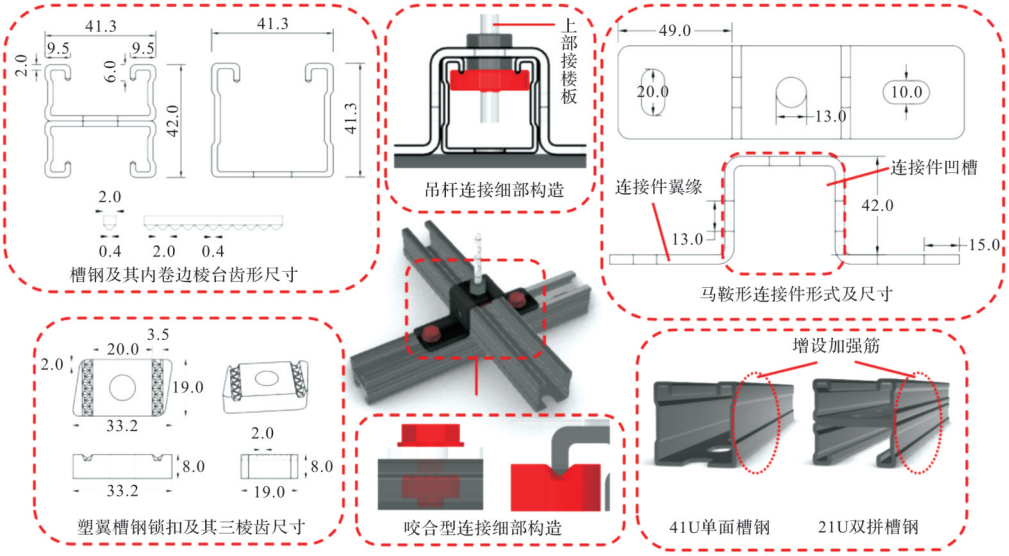


图3　十字搭接节点

Fig. 3　Cross-shaped lap joint

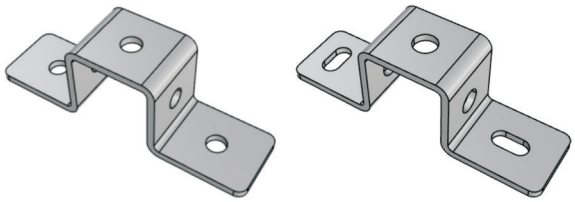
管线在自重和竖向地震作用下产生的轴向力,通过马鞍形连接件传递至装配式支架中主要承重的21U型槽钢上,而当竖向地震作用产生较大的竖向加速度时,41U型单面槽钢有跃起趋势,锁扣牙齿与槽钢齿间产生摩擦和挤压,力由槽钢传递至槽钢锁扣,而后通过扭矩螺栓与槽钢锁扣螺纹间摩擦传递至上端螺栓端头,再由螺栓的剪压传递到马鞍形连接件上,马鞍形连接件再通过翼缘两侧的扭矩螺栓将力传递到所约束的21U型双拼槽钢之上,此时马鞍形连接件作为承力构件的同时也对41U型单面槽钢的位移起限制作用。

2　十字搭接节点抗拉试验

2.1　试件设计

本文共设计了9个装配式承重型吊架十字搭接节点的轴拉力学性能试验,主要分析马鞍形连接件壁厚(2、4、6 mm)、马鞍形连接件的开孔形式(圆孔和长孔,见图4)两个设计参数的影响。

试件材料均为Q235碳素钢,主体结构由横截面为41.3 mm×41.3 mm×2 mm的41U单面槽钢与横截面为41.3 mm×42.0 mm×2mm的21U双拼槽钢搭接而成。根据《装配式支吊架系统应用技术规程》(T/CECS 731—2020)[13],采用M10高强螺栓连接马鞍形连接件与吊架主体结构。参照《装配式支吊架通用技术要求》(GB/T 38053—2019)[14],



(a)圆孔马鞍形连接件　　(b)长孔马鞍形连接件

图4　马鞍形连接件

Fig. 4　Saddle-shaped connector

确定M10高强螺栓的安装扭矩为19 N·m,试验的具体参数详见表1,其中RH(round-hole)和LH(long-hole)分别代表圆孔和长孔,数字代表连接件厚度,M与C分别代表单调(monotonic)与滞回(cyclic)加载。

表1　试件信息

Tab. 1　Specimen information

试件编号	连接件厚度/mm	连接件孔形	加载方式
LH-2-M	2	长孔	单调
LH-2-C			循环
LH-4-M	4		单调
LH-4-C			循环
LH-6-M	6		单调
LH-6-C			循环
RH-2-C	2	圆孔	循环
RH-4-C	4		循环
RH-6-C	6		循环

2.2　材料性能

按照装配式承重型吊架的不同组成部件进行材料性能测试，试验中所有构件均采用Q235B的钢材制作，并加工为板状拉伸式样。材性试件根据节点槽钢部件和马鞍形连接件的壁厚进行分类加载。马鞍形连接件材性试件的名义厚度分别为2 mm、4 mm、6 mm，21U型双拼槽钢名义厚度为2 mm，每种厚度取3个试件，共计15个试件，试验方法参照《金属材料拉伸试验室温试验方法》(GB/T228.1—2021)[15]，材性试验结果见表2。

在CMT微机控制电子万能试验机上对试件进行拉伸材性实验，并采用量程为20 mm的引伸计对试件进行测量，材性试验结果详见表2。

表2　材性试验结果

Tab. 2　Coupon test results

部件	厚度/mm	屈服强度 P_y/MPa	极限强度 P_u/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率/%
槽钢	2.00	240	345	2.16×10^5	46.0
马鞍形连接件	2.00	240	345	2.16×10^5	46.0
	4.00	291	425	2.12×10^5	42.5
	6.00	355	465	2.13×10^5	30.0

2.3　加载方案

采用SDS100电液伺服疲劳试验机上对十字搭接节点进行轴拉试验，待测节点的安装示意分别如图5所示。为了尽可能将轴拉破坏集中在马鞍形连接件上以评估马鞍形连接件的轴拉承载力，在设计时应尽量减小21U型槽钢与41U型槽钢的长度；同时，考虑到万能试验机上、下加载头之间允许的最大位移限制，在试验时，将21U型槽钢与41U型槽钢的设计长度均定为300 mm。加载装置主体由T形底座(增设加劲肋)与槽钢腹板加固板组成，预先在T形底座与槽钢腹板加固板表面打孔，打孔的位置参照21U双拼槽钢腹板的开孔形式，以保证十字搭接节点、T型底座、槽钢腹板加固板三者的有效固定。其中，槽钢腹板加固板起到增强21U双拼槽钢腹板的作用，防止在固定十字搭接节点与T型底座时，螺栓预紧力过大导致槽钢腹板的局部撕裂。

8.8级高强螺杆的设计强度不足可能导致装配式承重型吊架支撑的构件(如管道、风管)坠落，从而引发局部破坏。当夹持高强螺杆沿控制位移方向对节点施加拉拔作用时，节点的抗拉承载力最终传递至与41U型槽钢咬合连接的槽钢锁扣上。螺杆与槽钢锁扣之间依靠螺纹摩擦连接，高强螺杆为主要承力构件。根据《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82—2011)[16]的相关规定，将用于固定马

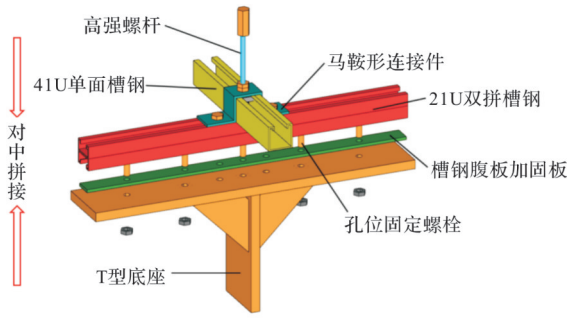


图5　十字搭接节点安装示意图

Fig. 5　Installation of cross-shaped lap joint

鞍形连接件与41U单面槽钢的高强螺栓替换为10.9级高强螺杆以方便施加轴向荷载。

参照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015)[17]及FEMA 461[18]对非结构构件力学性能评估的相关规定，确定单调加载的速率为0.1 mm/s；滞回加载采用变幅位移控制制度，每一级工况重复加载两次，每个工况的位移幅值依次增大，且后一个工况加载幅值为前一个工况的1.4倍，前十级的加载速率为0.05 mm/s，之后为0.2 mm/s，直至试件破坏停止加载，加载示意图与详细加载制度分别见图6及图7。

$$\frac{a_{i+1}}{a_n}=1.4\frac{a_i}{a_n} \tag{1}$$

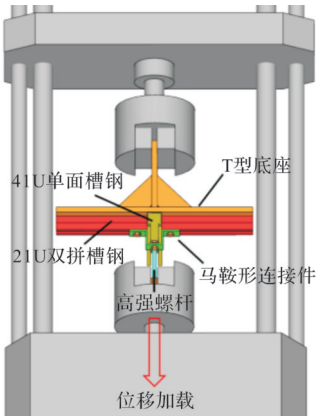


图6　加载示意图

Fig. 6　Loading diagram

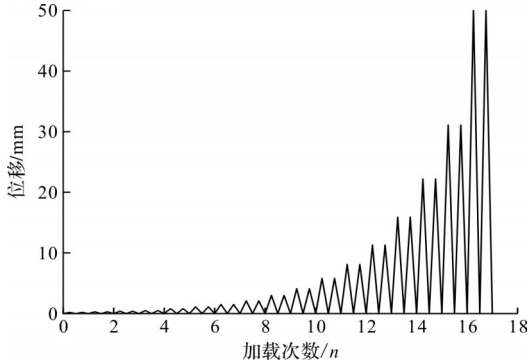


图7　加载制度

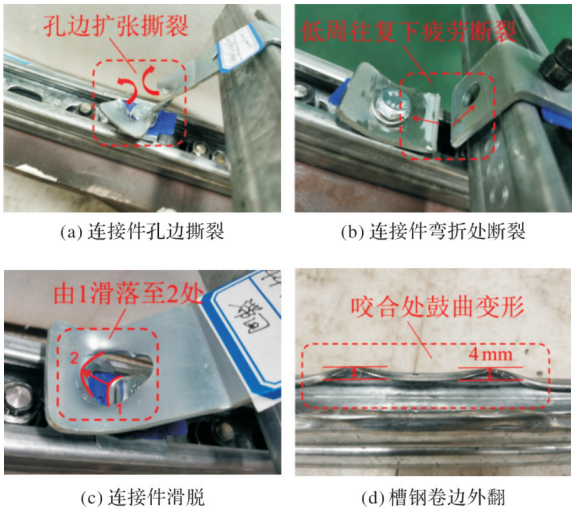
Fig. 7　Loading protocol

3 试验结果分析

3.1 破坏模式

试件主要呈现以下几种破坏形态,主要包括马鞍形连接件断裂、滑脱,以及槽钢卷边外翻失效等(图 8),具体破坏现象描述如下:

(1)马鞍形连接件断裂是指在单调静力荷载作用下翼缘螺栓孔处受力过大而撕裂,见图 8(a)、或在往复荷载作用下翼缘与凹槽衔接处经反复弯折累积疲劳受损而断裂的现象,见图 8(b)。带 2 mm 厚度马鞍形连接件的节点(如 LH-2-M、RH-2-C)破坏形态主要表现为孔边撕裂,这是由于连接件的刚度较低,在不断增大的位移作用下连接件变形明显,两侧水平翼缘随之逐渐上抬,直角弯折处被拉平,但由于连接件螺栓孔的存在引起截面局部大幅削弱,使得翼缘的螺栓孔边处承载能力大幅降低。当马鞍形连接件厚度增大为 4 mm 时,试件的断裂位置出现在连接件翼缘与槽口衔接处,断口整齐平滑,主要由往复荷载作用下的节点累积疲劳损伤导致。



(a) 连接件孔边撕裂 (b) 连接件弯折处断裂

(c) 连接件滑脱 (d) 槽钢卷边外翻

图 8 破坏形态

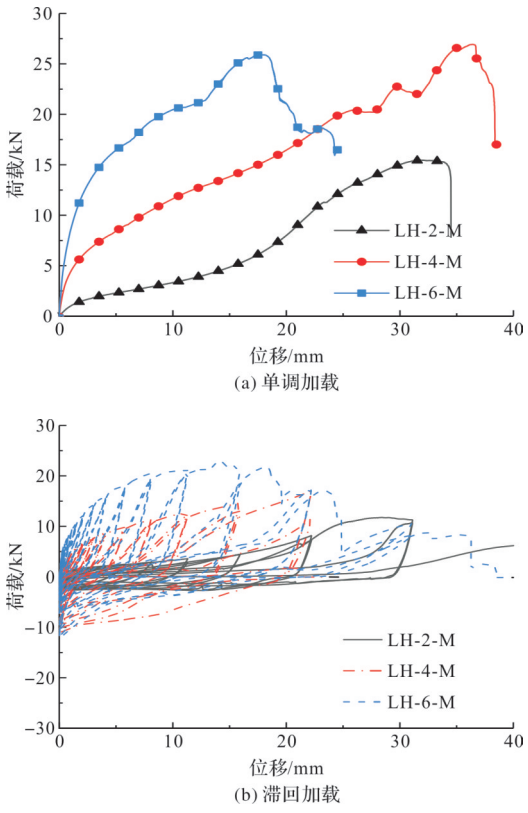
Fig. 8 Failure modes

(2)连接件滑脱是指试件在往复荷载作用下,连接件与槽钢间的咬合连接失效,高强螺栓与连接件的螺栓孔脱离导致承载力丧失的现象。此时,马鞍形连接件螺栓孔在外部荷载作用下被拉伸放大,其与高强螺栓之间存在间隙,由于高强螺栓与塑翼槽钢锁扣作为整体承受槽钢卷边咬合齿挤压约束的原因,马鞍形连接件与高强螺栓的滑移量在加卸载过程中并不一致,当马鞍形连接件的滑移量大于高强螺栓与塑翼槽钢锁扣的整体滑移量时,两者彼此分离失效。

(3)槽钢卷边外翻是指试件在往复荷载作用或单调静力作用下 21U 双拼槽钢的破坏形式,在持续加载状态下,21U 双拼槽钢与塑翼槽钢锁扣的连接区局部出现应力集中导致过大的变形。槽钢内卷边在试验前期较小的控制位移下仍处于弹性阶段,能够通过塑翼槽钢锁扣的三棱齿与槽钢的棱台齿之间摩擦和挤压限制节点拉伸过程中塑翼槽钢锁扣的竖向位移;槽钢卷边变形随加载位移的增大而增大,外翻倾斜严重且齿间接触面积减少,无法有效约束塑翼槽钢锁扣导致其脱出,试件丧失承载能力而整体失效。

3.2 荷载—位移曲线

图 9(a)所示为不同壁厚长孔连接件试件的荷载-位移曲线。对于带 4 mm 与 6 mm 厚度马鞍形连接件的十字搭接节点,试件在单向荷载作用下丧失承载力时的破坏模式主要表现为槽钢卷边达到承载极限而产生过大的外翻变形,因此其极限承载力接近;但因 4 mm 厚度马鞍形连接件的抗弯刚度相对 6 mm 厚度连接件更低,具有更强的变形能力,因此带 4 mm 厚度马鞍形连接件的十字搭接节点极限位移更大;2 mm 厚度连接件由于抗弯刚度过低,在翼缘与螺栓连接处产生撕裂破坏(图 8a),导致十字搭接节点的整体抗拉承载力偏低。



(a) 单调加载

(b) 滞回加载

图 9 不同壁厚长孔连接件试件的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of long-hole connector specimen with different wall thicknesses

带长孔马鞍形连接件的十字搭接节点（LH-2-C、LH-4-C、LH-6-C）的滞回试验数据如图 9b 所示。可以发现，连接件的抗弯刚度越小（连接件厚度越小），越容易发生形变导致马鞍形连接件与高强螺栓之间发生滑移，马鞍形连接件翼缘孔径大小与高强螺栓柱径尺寸差距过大引起的预留空隙也是滑移的重要原因。虽然三种厚度的连接件在翼缘与槽口衔接处均出现应力集中，但不同厚度构件能承受荷载的能力不同，从承载力的角度看，带 6 mm 厚度马鞍形连接件的装配式吊架十字搭接节点的轴向抗拉性能最佳。

对比图 9（b）（长孔连接件试件）和图 10（圆孔连接件试件）的滞回曲线可以发现，连接件的孔形是影响装配式承重型吊架十字搭接节点轴拉性能的关键因素。带圆孔连接件的节点试件在滞回加载时的滑移表现与峰值承载力均优于带长孔马鞍形连接件的节点试件，其中，2 mm 厚度圆孔连接件的性能得到充分的发挥，节点峰值承载力相较长孔连接件构件增幅达 90%；4 mm 厚度圆孔连接件的翼缘与槽口衔接处未出现疲劳破坏，其最终破坏形态与峰值承载力与带 6 mm 厚度圆孔连接件的节点类似。此外，当连接件翼缘形变时会连带塑翼槽钢锁扣与高强螺栓出现一定的倾斜角度（图 11），该角度将影响 21U 双拼槽钢与塑翼槽钢锁扣齿之间的咬合面积，进而影响咬合面受力；由于 6 mm 厚度马鞍形连接件的形变更小，21U 双拼槽钢与塑翼槽钢锁扣咬合面积更大，槽钢咬合齿应力集中更明显，所以 6 mm 厚度马鞍形连接件节点的槽钢咬合齿断裂及槽钢外翻失效提前发生。

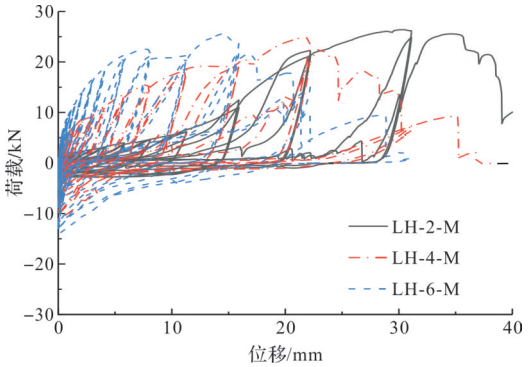


图 10　不同壁厚圆孔连接件试件的滞回曲线

Fig. 10　Hysteretic curves of round-hole connector specimen

总体来说，试件在加载初期均处于弹性阶段，荷载和位移基本呈线性关系，仅由于马鞍形连接件厚度的不同影响了节点的初始刚度，卸载时残余变形很小；随着位移增加，试件由弹性阶段进入弹塑性阶段，连接节点处先后出现滑移，滞回曲线斜率逐渐减小，滞回环趋于耗能较差的“Z”形；加载后期，节点连接处螺栓与连接件之间的滑移量增大，荷载上升趋缓，试件塑性变形持续累积且刚度退化明显；同一加载等级下两次循环的滞回曲线重合度降低，第二次循环加载的峰值荷载和曲线斜率明显低于第一次循环。

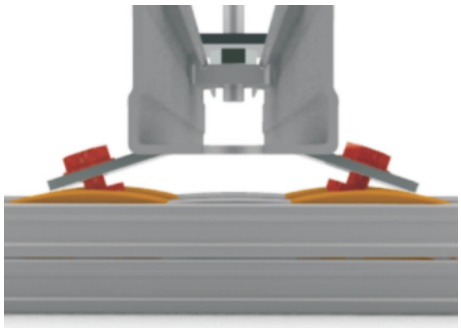


图 11　倾斜错位

Fig. 11　Inclined dislocation

3.3　承载能力

将滞回曲线每级第一次循环的荷载峰值点相连得到骨架曲线，试件骨架曲线包括弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段（图 12），骨架曲线峰值荷载对应的纵、横坐标值定义为极限承载力（P_u）和极限位移（Δ_u），将 0.85 倍峰值荷载对应的纵、横坐值定义为破坏承载力（P_b）和破坏位移（Δ_b），表 3 列出了各试件的典型特征点。

（1）随连接件厚度的增加，节点失效前承受相同荷载时发生的位移越来越小，节点失效时极限荷载越大且竖向位移越小，LH-4-C 的极限承载力比 LH-2-C 提高了 44.6%，LH-6-C 的极限承载力比 LH-4-C 提高了 35.4%。这说明增加连接件厚度能显著提高十字搭接节点在轴拉滞回荷载作用下的极限承载能力。

（2）带圆孔马鞍形连接件节点比相同厚度长孔马鞍形连接件节点的极限承载力分别提高了 124.16%（2 mm 厚度连接件）、45.99%（4 mm 厚度连接件）、11.52%（6 mm 厚度连接件），这说明当相同厚度马鞍形连接件的螺栓孔为圆孔时，可以有效规避大变形时高强螺栓在连接件孔中滑移导致承载力偏低这一问题。此外，随着连接件厚度的增大，节点抗拉承载力对孔形的敏感度降低，节点抗拉性能提升效果减弱。

（3）试件弹性刚度和承载力变化规律基本一致，带圆孔马鞍形连接件的节点弹性刚度均高于长孔马鞍形连接件节点，且马鞍形连接件厚度越大，弹性刚度越大，试件 RH-2-C 的弹性刚度较 LH-2-C

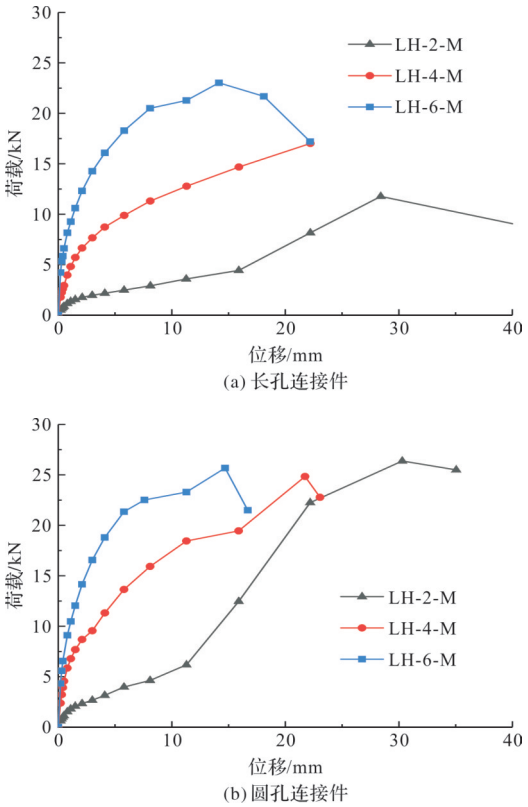


图 12 骨架曲线对比

Fig. 12 Comparison of backbone curves

提高了 30.74%,试件 RH-4-C 的弹性刚度较 LH-4-C 提高 37.51%,,而对于 RH-6-C 和 LH-6-C 的对比组,这一提升仅为 10% 左右,因此,连接件孔形对带 2~4 mm 厚度马鞍形连接件的十字搭接节点弹性刚度影响更为明显。

表 3 承载能力特征值

Tab. 3 Characteristic points

试件	屈服点		极限点		破坏点	
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	P_b/kN	Δ_b/mm
LH-2-C	4.435	15.907	11.767	28.412	10.001	35.893
LH-4-C	9.883	5.812	17.012	22.210	17.012	22.210
LH-6-C	14.264	3.005	23.026	14.153	19.570	19.995
RH-2-C	6.169	11.294	26.378	30.294	22.489	37.051
RH-4-C	11.318	4.100	24.839	21.730	21.177	23.753
RH-6-C	16.563	2.101	25.678	14.693	21.824	16.692

3.4 刚度退化

为了描述损伤积累效应,由试验数据可得刚度退化规律。参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)[17]的相关规定,本文采用割线刚度 K_i 来表示试件刚度的退化,计算公式如下。

$$K_i=\frac{|+F_i|+|-F_i|}{|+X_i|+|-X_i|} \tag{2}$$

式中:$+F_i$ 和 $-F_i$ 分别为第 i 次循环正、反向的峰值荷载;$+X_i$ 和 $-X_i$ 分别为对应的位移值。

刚度变化曲线如图 13 所示,由此可知:

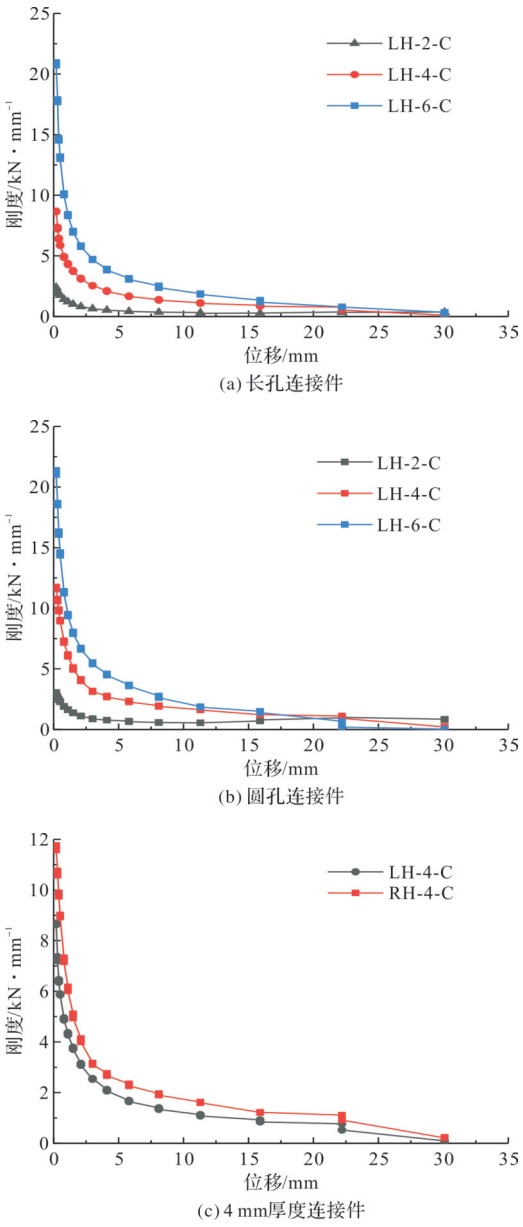


图 13 刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness degradation curves

(1)从整体趋势上看,马鞍形连接件的孔形对十字搭接节点的初始刚度和退化规律影响不大,各试件的刚度退化趋势均十分明显,总体呈现先快后慢趋势,小加载位移时退化速率较快,马鞍形连接件与槽钢卷边进入塑性阶段后期退化速率趋于平缓。

(2)马鞍形连接件的厚度越大,整体节点的刚度退化速率越快;主要原因是厚度较大的马鞍形连接件的直角根部截面惯性矩更大,因此抗弯刚度较大,直角根部屈服承载力更高,难以发生转动与连接件翼缘相接触的槽钢卷边区域在小加载位移时即发生了明显的塑性变形,导致整体十字搭接节点在小位移时即出现了较快的刚度退化速率。

3.5　延性系数

位移延性系数定义为构件的极限位移与屈服位移之比。通常情况下，试件延性系数越高，抵抗塑性变形能力越强，各试件的延性系数见表4。

表 4　延性系数

Tab. 4　Ductility coefficient

试件编号	屈服位移 / mm	极限位移 / mm	延性系数	等效粘滞阻尼系数
LH-2-C	15.907	28.412	2.256	0.15
LH-4-C	5.812	22.210	3.821	0.21
LH-6-C	3.005	14.153	6.654	0.29
RH-2-C	11.294	30.294	3.281	0.18
RH-4-C	4.100	21.730	5.793	0.26
RH-6-C	2.101	14.693	7.945	0.31

带圆孔马鞍形连接件的节点延性系数高于长孔马鞍形连接件试件。这是因为在加载初期，长孔马鞍形连接件与高强螺栓之间存在较大滑移，只有在克服连接件与高强螺栓之间的初始孔隙后，齿间咬合的摩擦挤压作用才能为节点提供承载力。总体而言，节点在失效破坏前的控制位移施加可分为两个阶段：第一阶段为滑移段，第二阶段为承载段。在滑移段，节点承受的荷载较小，滑移过程中可能导致高强螺栓与塑翼槽钢锁扣之间的旋转松动，使塑翼槽钢锁扣与槽钢之间的咬合能力丧失，或导致连接件先于主体结构失效（如脱离或断裂）。最终破坏时，节点承受的实际竖向位移为两阶段位移之和。由于圆孔马鞍形连接件的孔径与高强螺栓直径基本一致，能够有效限制初始滑移，节点的咬合连接在加载初期即开始承载。因此，圆孔马鞍形连接件的节点屈服发生时间较早，马鞍形连接件与槽钢的抗拉性能均能得到充分发挥。

综上，节点应使用圆孔马鞍形连接件加强对节点本身滑移的控制，提高马鞍形连接件的厚度以及使用厚度在2 mm以上的21U型槽钢，尽量保证马鞍形连接件不会因局部应力集中而屈服失效或因滑移导致连接件提前脱落，并使主体21U型槽钢晚于马鞍形连接件失效，可在一定程度上提高承重型吊架十字搭接节点的塑性变形能力。采用2 mm厚度马鞍形连接件的十字搭接节点延性系数大于4 mm、6 mm厚度马鞍形连接件的十字搭接节点。

4　数值分析

4.1　模型建立

按照试验构件的实际尺寸建立装配式承重型吊架十字搭接节点的精细化数值模型，如图14所示。各构件均采用实体建模，经实体分割后按结构性网格划分单元，单元类型为C3D8R[19-20]。钢材规格均采用Q235，弹性与塑性定义参数均取自材性试验，采用Johnson-Cook模型来定义延性金属损伤。如表5所示，林莉、支旭东[21-22]通过研究Q235B、Q355B钢在常温950 ℃的准静态、动态力学性能，获得了Q235B、Q355B钢强度与等效塑性应变。Lee等[23]对比了降温法和直接法在螺栓预紧力模拟中的优缺点，Nassar[24]研究了螺栓预紧力的影响因素并验证了降温法模拟螺栓预紧力的有效性。基于上述成果，分别选用硬接触模型和库伦摩擦模型表示各构件间的法向接触和切向接触关系，镀锌面抗滑移系数取0.3。

表 5　Johnson-Cook损伤参数取值

Tab. 5　Values of Johnson-Cook damage parameters

槽钢钢材类型	屈服强度 /MPa	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	S_r
Q235B	235	43.408	44.608	−0.016	−0.014 5	0.046	0.000 833
Q355B	355	0.811	6.047	−7.09	−0.03	2	0.001 33

注：D_1、D_2、D_3是金属在不同应力三轴度因素下拉伸试验得到的破坏应变；D_4是金属在不同应变率下通过拉伸试验确定的破坏应变；D_5是金属在不同温度下通过拉伸试验确定的破坏应变；S_r是参考应变率。

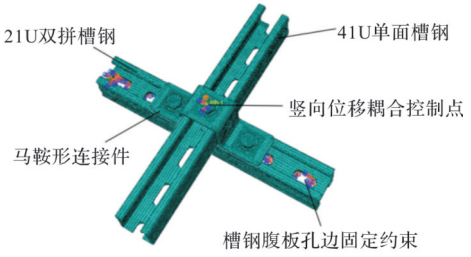


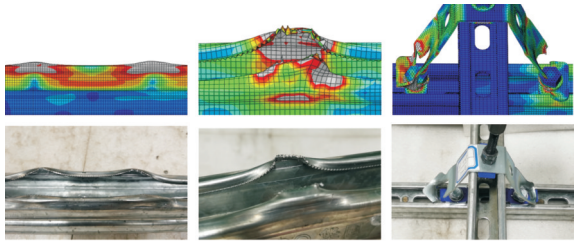
图 14　有限元模型

Fig. 14　Finite element model

位移控制点选在用于固定41U单面槽钢的高强螺栓面中心点上，并与整个螺面耦合约束，用于模拟实际中高强螺杆的作用；马鞍形连接件与41U单面槽钢间通过施加扭矩而咬合连接的过程由温度法等效模拟，在位移分析步作用前，使塑翼槽钢锁扣齿与槽钢齿紧密咬合。21U双拼槽钢底部仅对长槽孔边施加固定约束，约束方式与试验一致。

4.2 模型验证

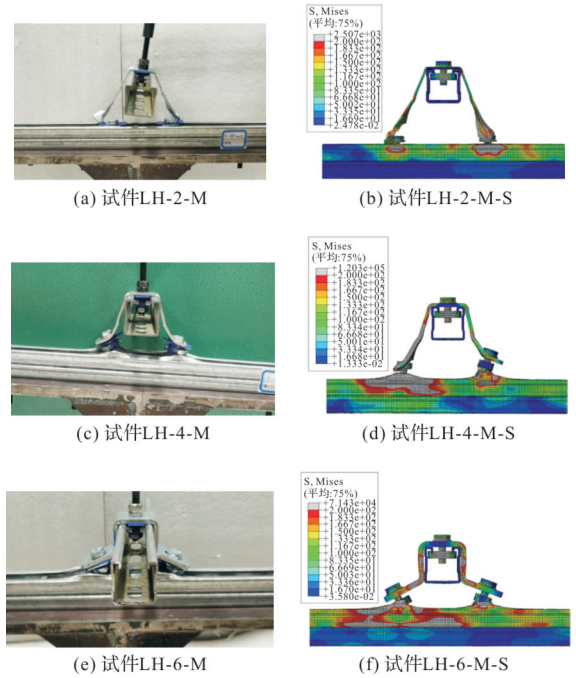
试验和有限元计算得到的细部构造破坏示意、试件破坏模式对比与荷载-位移曲线的对比分别如图 15、图 16 与图 17 所示。当受到竖向荷载作用时，连接件为主要承力构件，荷载通过连接件进一步传递到所连接的 21U 双拼槽钢上，因此连接件的刚度对于节点的整体刚度有较大的影响。有限元模拟所得节点失效破坏形态主要呈现为马鞍形连接件撕裂及 21U 双拼槽钢卷边外翻失效，当槽钢锁扣与卷边间发生相对错动时，齿间摩擦导致齿槽磨损断裂。其中撕裂部位与形式、卷边外翻隆起高度与试验基本一致。由应力云图可知：最大应力点出现在应力集中部位的咬合齿、马鞍形连接件直角根部以及马鞍形连接件水平枝螺栓孔边处。



(a) 槽钢卷边鼓曲变形　(b) 槽钢卷边齿槽磨损断裂　(c) 马鞍形连接件孔边撕裂

图 15　有限元模拟细部构造破坏示意图

Fig. 15　Schematic Diagram of Detailed Structural Failure in Finite Element Simulation



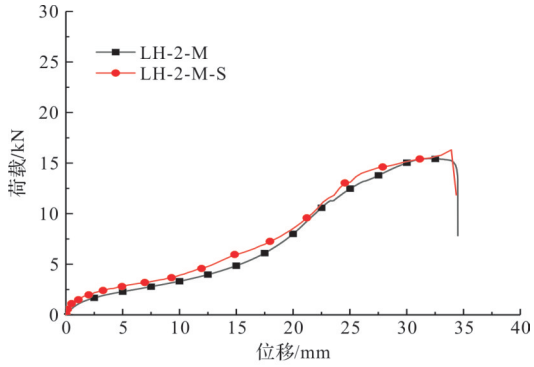
(a) 试件LH-2-M　(b) 试件LH-2-M-S

(c) 试件LH-4-M　(d) 试件LH-4-M-S

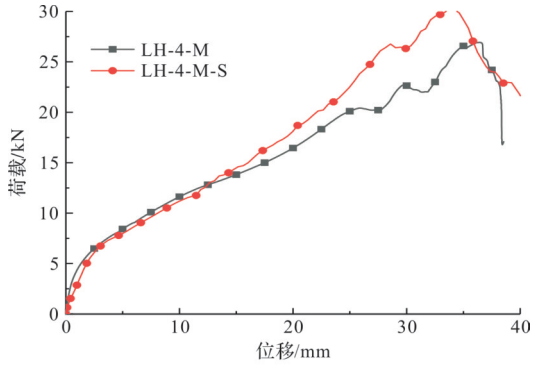
(e) 试件LH-6-M　(f) 试件LH-6-M-S

图 16　应力分布与破坏形态对比(破坏位移处)

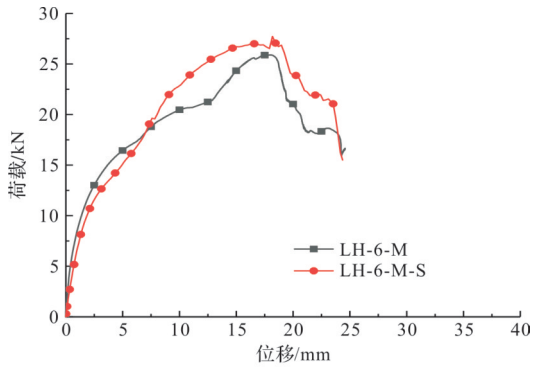
Fig. 16　Stress contour and failure modes (failure displacement)



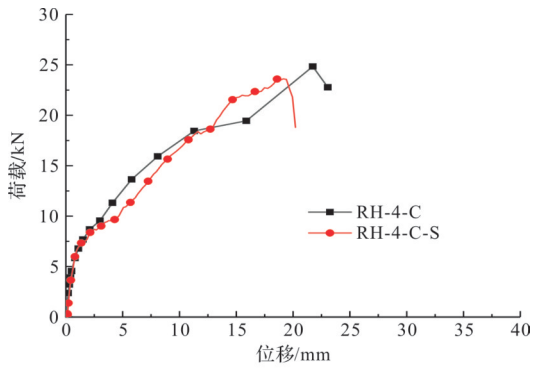
(a) 2 mm厚度长孔连接件试件



(b) 4 mm厚度长孔连接件试件



(c) 6 mm厚度长孔连接件试件



(d) 4 mm厚度圆孔连接件试件

图 17　荷载-位移曲线验证

Fig. 17　Validation of load-displacement curves

由荷载-位移曲线的对比可以发现，此类装配式承重型吊架节点失效均源于马鞍形连接件与 21U 双拼槽钢，由马鞍形连接件孔径与高强螺栓的柱径尺寸不同所导致的滑移是造成结果差异的主要原

因。随着加载位移的逐渐增大，圆孔连接件孔壁与高强螺栓间产生直接挤压，初始刚度较大，而长孔连接件的加载初期位移主要由连接件与高强螺栓之间的滑移承担，承载力增加更为平缓。相比较而言，马鞍形连接件的厚度对节点抗拉性能的影响规律相似，其初始刚度、屈服承载力和峰值承载力与实际结果较为接近。

4.3　槽钢材性的影响

目前装配式承重型吊架所采用的槽钢主要以Q235B与Q355B两种规格为主。基于前期试验的结论，考虑到2 mm厚度马鞍形连接件的刚度较小、破坏严重，且先于21U型槽钢失效，不满足“强节点，弱构件”原则，无法为十字搭接节点提供较高的承载力提升，实际工程安装中不推荐使用，因此不考虑采用2 mm厚马鞍形连接件下槽钢参数对节点抗拉承载力的影响，仅对4 mm和6 mm厚度马鞍形连接件试验组进行参数补充。为了探究在实际工程中能否推迟此类破坏以提高节点的力学性能，对槽钢选用Q355材料进行有限元扩参分析，针对节点的抗拉性能及破坏机理进行分析。对比结果如图18所示。

试件LH-4-M-355的破坏现象为马鞍形连接件的脱出、高强螺栓和塑翼槽钢锁扣间的连接失效，与LH-4-M-235相比，节点的极限承载力提高18.75%，极限位移增大15.53%；LH-6-M-355与LH-6-M-235的破坏现象基本一致，均为槽钢内卷边外翻导致塑翼槽钢锁扣拔出，在极限承载力提升超过60%情况下，所对应的极限位移增大14.67%，表明此时在节点下部悬挂更大重量管线时节点整体位移控制更为优秀。因此，采用Q355槽钢可有效避免槽钢屈服过早导致内卷边失效而丧失咬合能力的情况。由图18和表6可得，采用Q355槽钢的节点承载力优于Q235槽钢，其中采用6 mm厚度马鞍形连接件的节点受Q355材料的提升最大，与4 mm相比，极限承载力提升17.6%，相同荷载下采用6 mm厚度马鞍形连接件的装配式承重吊架的竖向位移明显小于4 mm厚度马鞍形连接件。在实际工程中，建议在采用6 mm厚度马鞍形连接件的基础上，槽钢材料由Q355钢材代替目前最普遍的Q235钢材。

4.4　设计建议

（1）在构造形式不变的前提下，带马鞍形连接件的装配式承重型吊架十字搭接节点推荐选用6 mm厚度马鞍形连接件，节点下可承载质量较大的管线、吊顶等非结构构件，在整体节点产生较大位移时仍能保证一定的承重能力。

（2）考虑到竖向地震的影响，采用圆孔形式马鞍形连接件的装配式承重型吊架十字搭接节点在耗能与刚度退化等方面的表现均优于长孔形式马鞍形连接件的节点，因此在地震多发区的实际吊架

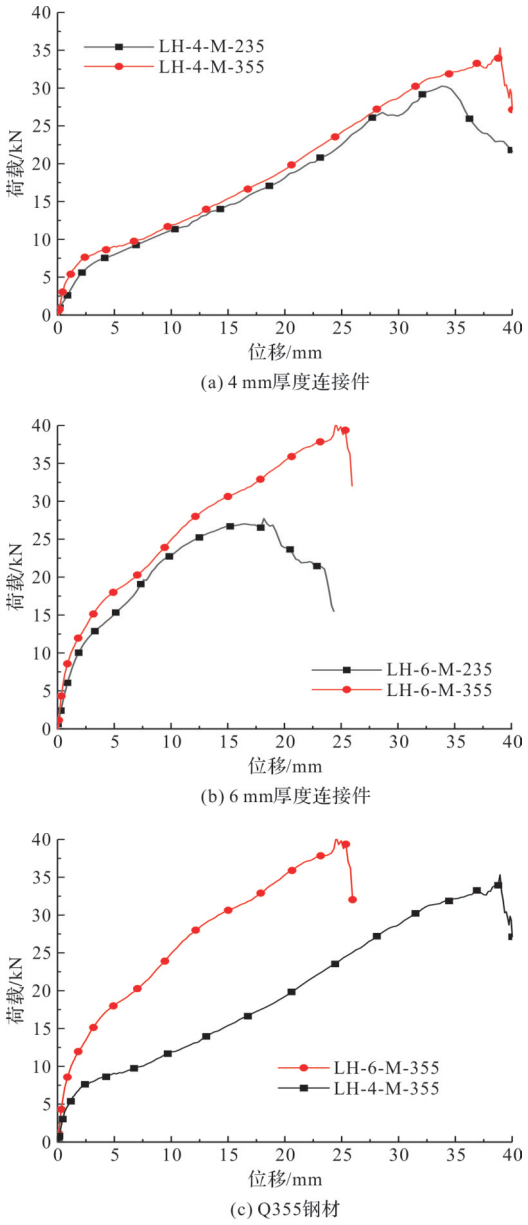


图 18　槽钢材性的影响

Fig. 18　Influence of channel strength

表 6　槽钢材性的影响

Tab. 6　Influence of channel materials

试件编号	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	初始刚度 E_s
LH-4-M-235	9.12	8.84	29.68	35.33	3.73
LH-4-M-355	10.02	10.16	35.01	40.69	6.26
LH-6-M-235	14.13	4.93	25.53	22.56	7.83
LH-6-M-355	19.36	6.68	41.06	25.47	9.23

工程中建议采用圆孔形式的马鞍形连接件。

(3) Q355钢材制成的槽钢得益于良好的抗拉强度、屈服强度等机械性能,对带马鞍形连接件的装配式承重型吊架十字搭接节点的抗拉性能提升作用显著,在承受相同荷载的前提下,位移控制的效果较Q235槽钢更优,可以有效保证结构的整体性与协调性。

5 结论

(1) 较薄连接件(如2、4 mm)在受力时易发生翼缘弯曲变形,导致螺栓倾斜、槽钢齿咬合面积减小,进而引发孔边撕裂、弯折处断裂、螺栓滑脱、槽钢齿失效或卷边外翻等破坏。增大厚度至6 mm可大幅提升节点刚度和承载力,相比2 mm和4 mm连接件,采用6 mm厚度连接件的节点初始刚度分别提高了110.1%和253.7%,峰值承载力分别提升54.5%和35.3%,并在大荷载下更有效控制位移,适用于高自重吊架节点。

(2) 圆孔马鞍形连接件可削弱螺栓孔间滑移现象,提高十字搭接节点的初始刚度和塑性变形能力,采用2、4、6 mm厚度圆孔马鞍形连接件的十字搭接节点的初始刚度较相同厚度的长孔马鞍形连接件节点分别提高30.74%、37.51%,11.21%,极限承载力分别提高了124.16%、45.99%、11.52%;节点延性系数均大于长孔马鞍形连接件节点,可以提升节点抵抗塑性变形的能力。

(3) 采用Q355级槽钢的十字连接节点,其抗拉性能较Q235级槽钢节点具有显著提升。对比分析表明,当马鞍形连接件厚度为4 mm和6 mm时,Q355槽钢节点的屈服位移分别较Q235槽钢节点提高了15.3%和35.1%。有效延缓了槽钢卷边区域的塑性发展,避免了因局部过早屈服而导致的节点承载力下降,从而提高了十字搭接节点的整体变形能力和延性性能。

参考文献 References

[1] 刘秀丽, 王燕, 李美红, 等. 钢结构T型连接节点受力性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 848-853.
LIU Xiuli, WANG Yan, LI Meihong, et al. Experimental study on the T-stub connections in steel structure [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(6): 848-853.

[2] 苏明周, 金峰华, 王喆. 竖向荷载下套管节点装配式交错桁架受力性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 781-787.
SU Mingzhou, JIN Fenghua, WANG Zhe. Study on the mechanical behavior of assembly steel staggered truss structures with sleeve tube joint under vertical load [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(6): 781-787.

[3] 尚庆学, 郑迦译, 李吉超, 等. 各国规范对于楼面峰值加速度规定的对比研究[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 91-96.
SHANG Qingxue, ZHENG Jiayi, LI Jichao, et al. Comparative study of relevant specifications on peak floor acceleration in current codes of different countries [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(S1): 9196.

[4] 宁晓晴, 戴君武. 地震可恢复性与非结构系统性态抗震研究略述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 85-92.
NING Xiaoqing, DAI Junwu. A review of seismic resilience and performance-based seismic study of nonstructural system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 85-92.

[5] 郭兵, 孔祥博, 吕蕴龙, 等. 高强度螺栓咬合型连接的受拉试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 87-94.
GUO Bing, KONG Xiangbo, LÜ Yunlong, et al. Experimental study on tensile behaviour of occlusive high strength bolt connections [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 87-94.

[6] 郭兵, 姜亦鑫, 吕蕴龙, 等. 高强度螺栓咬合型连接的抗剪试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2021, 36(6): 1-7.
GUO Bing, JIANG Yixin, LÜ Yunlong, et al. Experimental study on shear test of high strength bolt occlusive connections [J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2021, 36(6): 1-7.

[7] ENV 1993-1-8: CEN 2005. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

[8] AISC 360-22. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.

[9] RCSC-2014. Specification for structural joints using ASTM A325 or A490 bolts [S]. Chicago: Research Council on Structural Connections, 2004.

[10] 张雪芳, 孙彬, 赵东晖, 等. 建筑机电管线用装配式支吊架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7), 10-21.
ZHANG Xuefang, SUN Bin, ZHAO Donghui, et al.

Experimental investigation on seismic performance of assembly trapeze supports for building electromechanical pipes [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(7), 10-21.

[11] 罗干，丁幼亮，朱浩樑. 抗震支吊架抗震连接构件的破坏试验与数值分析研究[J]. 工程建设与设计，2020(3)：40-44.
LUO Gan, Ding Youliang, ZHU Haoliang. Tensile test and numerica analysis of structure connecting component of anti-seismic hangers[J]. Construction & Design for Project, 2020 (3): 40-44.

[12] 尚庆学，李泽，刘瑞康，等. 管线系统抗震支架力学试验研究[J]. 工程力学，2018，35(1)：120-125，133.
SHANG Qingxue, LI Ze, LIU Ruikang, et al. Experimental study on properties of aseismic braces used in pipe line systems[J]. 2018, 35(1): 120-125,133.

[13] 中国建筑标准设计研究院有限公司，山东建筑大学. 装配式支吊架系统应用技术规程：T/CECS 731—2020[S]. 北京：中国计划出版社，2020.
China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., Shandong Jianzhu University. Technical specification for assembled support and hanger system: T/CECS 731—2020. [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.

[14] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 装配式支吊架通用技术要求：GB/T 38053—2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. General technical specifications of prefabricated supports and hangers: GB/T 38053—2019. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[15] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法：GB/T 228.1—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials: Tensile testing: part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程：JGJ 82—2011[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for high-strength bolt connection of steel structures: JGJ 82—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程：JGJ/T 101—2015[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[18] FEMA 461 Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing [S]. Federal Emergency Management Agency, 2007.

[19] BURSI O S, JASPART J P. Benchmarks for finite element modelling of bolted steel connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 43(1-3): 17-42.

[20] BURSI O S, JASPART J P. Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections [J]. Computers & structures, 1998, 69(3): 361-382.

[21] 林莉，支旭东，范锋，等. Q235B钢Johnson-Cook模型参数的确定[J]. 振动与冲击，2014，33(9)：153-158，172.
LIN Li, ZHI Xudong, FAN Feng, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel[J]. Journal of Vibration and Shock, , 2014,33(9):153-158,172.

[22] 林莉，黄博，肖新科，等. Q355B钢动态材料性能研究[J]. 振动与冲击，2020，39(18)：231-237.
LIN Li, HUANG Bo, XIAO Xinke, et al. Behavior of dynamic material Q355B steel based on the Johnson-Cook model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 231-237.

[23] LEE H, KIM J. Comparison of bolt preload methods in finite element analysis: Direct method vs. Cool down method [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18 (5): 723-730.

[24] NASSAR S. A. Effect of tightening speed on the Torque-Tension relationship in threaded fasteners[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128 (3): 388-395.

（编辑　吴海西）