DOI: 10.7672/sgjs2024210046

装配式铆钉在铝合金抗剪连接中的应用研究

闫亚杰^{1,2},仲志强²,武生文³,郭 昱²,王时贵²,曹少成²

(1. 山西电子科技学院,山西 临汾 041000; 2. 太原理工大学,山西 太原 030024; 3. 山西五建集团有限公司,山西 太原 030013)

[摘要]针对铝合金结构不适宜采用焊接、现有紧固件抗剪连接下节点易发生错动的问题,设计抗剪连接用装配式 铆钉,给出装配式铆钉构造、工作原理及预紧力测定方法。通过开展抗剪试件试验研究和有限元分析,得到装配式 铆钉抗剪连接荷载-位移曲线、传力方式、破坏机理及形态,确定装配式铆钉合理铆固顺序,并验证有限元模型及分 析结果的有效性。根据研究结果,实际应用时推荐抗剪连接同一受力方向板厚之和与装配式铆钉直径的比值为 1.00~1.25。开展装配式铆钉抗剪性能影响因素分析,通过数值拟合得到装配式铆钉承载力计算公式,给出装配式 铆钉抗剪连接选用规格。

[关键词] 装配式;铝合金;铆钉;抗剪性能 [中图分类号] TU395

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0046-12

Applied Research on Assembled Rivets for Shear Connection of Aluminum Alloy

[文献标识码]A

YAN Yajie^{1,2}, ZHONG Zhigiang², WU Shengwen³, GUO Yu², WANG Shigui², CAO Shaocheng²

(1. Shanxi University of Electronic Science and Technology, Linfen, Shanxi 041000, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 3. Shanxi Fifth Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030013, China)

Abstract: Aiming at the problems that welding is not suitable for aluminum alloy structure and the nodes are prone to misalignment under shear connection of existing fasteners, the assembled rivets for shear connection are designed, and the structure, working principle and preload determination method of assembled rivets are given. By carrying out shear specimen test research and finite element analysis, the assembled rivets shear connection load and displacement curves, force transfer mode, damage mechanism and morphology, to determine the reasonable riveting order of the assembled rivets, and to verify the validity of the finite element model and analysis results. According to the research results, in practical application, it is recommended that the ratio of the sum of the plate thickness of the shear connection in the same force direction to the diameter of the assembled rivets is $1.00 \sim 1.25$. The influencing factors of assembled rivets shear performance were analyzed, through numerical fitting to get the assembled rivets bearing capacity calculation formula. The selection specifications of shear connection of assembled rivets are given.

Keywords: assembled; aluminum alloys; rivets; shear performance

0 引言

近年来,铝合金因其具有轻质高强、耐腐蚀、易

加工成型等特性被广泛应用于体育馆、会展中心、 特种实验室、采光顶、人行桥等建筑中。进行铝合 金结构设计及施工时[1-3],构件之间的连接方式多 采用焊接和紧固件连接。相对于钢材而言,铝合金 材质对焊接热影响更敏感,焊接热影响区范围更 大,已有研究表明焊接热影响区铝合金材质屈服强

国家自然科学基金 (51208332); 山西省基础研究计划 (2022030212111761)

作者简介] 闫亚杰,博士,副教授,E-mail:tylaoxi@163.com [收稿日期] 2024-05-27

度降低 25%~50%^[4]。进行焊接计算时需对材质强 度进行折减,进行构件承载力计算时需对截面进行 折减,因此铝合金构件较少采用焊接。GB 50429— 2007《铝合金结构设计规范》^[5]规定紧固件连接可 采用铆钉连接、普通螺栓连接及高强度螺栓连接, 采用螺栓连接时具有扭矩可控、效率高的特点,但 已有研究表明在铝合金网壳结构中,当作用于板式 节点螺栓群的剪力大于其最大静摩擦力的 10%时, 构件相对于节点板发生滑移导致的结构变形增大 不容忽视^[6]。在铝合金板式节点中,杆件相对于节 点板的错动会降低节点在杆端平面外的初始转动 刚度,进而影响结构整体性能^[7]。采用不锈钢螺栓 抗剪连接时,滑移变形约占总变形的 48.7%^[8]。实 际工程应用中,不锈钢螺栓应选取合适的初拧扭 矩,以避免发生相对滑移,影响结构成形^[9]。

铝合金构件之间采用铆钉连接,可消除相对错动。但普通铆钉连接不可拆卸,导致现场安装困难,连接质量不易控制。为此,通过开展不锈钢螺 栓连接与带不锈钢套管铝质铆钉连接铝合金板式 节点抗剪性能研究^[10-13],将螺栓连接的装配性与铆 钉连接的充盈性相结合,提出了铝合金结构抗剪连 接用装配式铆钉^[14]。

1 装配式铆钉构造

装配式铆钉组成部件包括螺管、铆管、套管、螺杆,分别如图 1~4 所示。螺管采用奥氏体 304 型不锈钢加工而成,螺帽为半圆头与六角头的组合体,其中半圆头可对螺帽进行加强并具有装饰性,六角头外接圆直径为 20.8mm,对边距离为 18.0mm,可用于紧固。在六角头内侧锻造出垫片,可避免紧固过程中六角头划伤被连接板件。螺管外径为 9.0mm,设有 M5 标准螺距的内螺纹,与螺杆配套。在螺管与螺帽交汇处采用半径 0.5mm 的倒圆弧过渡,减小应力集中。



铆管由 3003-H12 型铝管加工而成,其内径较螺 管外径大 0.1~0.2mm,高度根据充盈板件开孔与装 配式铆钉的间隙计算确定。铆管在与螺管倒圆弧



图 2 铆管 Fig. 2 A riveted tube



图4 螺杆 Fig.4 A screw

对应位置进行倒角处理。

套管采用 S30408 型不锈钢加工而成,内径较铆 管外径大 0.2~0.4mm,高度与被连接板材总厚度相 同或小 0.1~0.2mm。为减小对铆管横向膨胀时的 约束,确保实现充盈,沿套管纵向设置宽度为 0.2mm的通缝。

螺杆采用奥氏体 304 型不锈钢加工而成,其螺 帽构造与螺管螺帽相同,双侧可紧固且装配后装饰 效果相同。螺杆直径 5.0mm,全长设标准螺距的外 螺纹,螺杆与螺帽交汇处采用半径 0.5mm 倒圆弧 过渡。

2 装配式铆钉组装

装配式铆钉组装时,首先在螺管外依次套接铆 管、套管,然后将上述组合件从被连接板材一侧插 入铆孔,最后将螺杆从被连接板材的另一侧旋拧至



在螺管或螺杆螺帽施加扭矩时,六角头内侧垫 片挤压铆管,使其纵向压缩、横向膨胀,进而迫使套 管横向扩张,直至充盈铆孔内全部间隙。如果需拆 除或更换装配式铆钉时,按上述相反顺序操作即可

3 装配式铆钉预紧力

实现。

装配式铆钉中的螺管、螺杆为定制紧固件,其 预紧力系数与常规螺栓差别较大,为精确得到预紧 力-扭矩关系,加工制作3个材质为S30408型不锈 钢且与螺管及螺杆配套的不锈钢管,如图6所示,图 中试件自左至右编号依次为AT-1,AT-2,AT-3。利 用量程为 3t 的万能试验机在弹性范围内以 0.2mm/ min 的加载速率对不锈钢管施加预紧力 P,实测其 应变 ε,得到预紧力-应变曲线,如图 7 所示。



图 6 制作完成的不锈钢管试件

Fig. 6 Completed stainless steel tube specimens



图 7 不锈钢管试件预紧力-应变曲线 Fig. 7 Preload and strain curves of stainless steel tube specimens

对图 7 所示预紧力-应变曲线进行线性拟合,确 定式(1)中预紧力与应变之间的线性相关参数 *k*₁, *b*₁,如表 1 所示,最终确定 *k*₁,*b*₁ 取值分别为 22.63,13.00。

$$P = k_1 \varepsilon + b_1 \tag{1}$$

表1 不锈钢管试件预紧力-应变关系中

的参数 k_1, b_1 取值

Table 1Values of parameters k_1 and b_1 in the
preload and strain relationship for

stainless steel tube specimens

参数		试件编号		亚坎佶
类型	AT-1	AT-2	AT-3	一十均匪
k_1	23.16	22.00	22.73	22.63
b_1	20. 15	-4.81	23.67	13.00

将不锈钢管安装在螺管上,如图 8 所示,图中试件自左至右编号依次为 ST-1,ST-2,ST-3。利用数显 扭矩扳手对螺管及螺杆六角头匀速施加扭矩,逐级 记录扭矩 T 和应变 *ε*,得到扭矩-应变曲线,如图 9 所示。

对图 9 所示扭矩-应变曲线进行线性拟合,确定 式(2)中的扭矩与应变之间的线性相关参数 k_2, b_2 , 如表 2 所示,最终确定 k_2, b_2 取值分别为 0.06,0.12。

$$T = k_2 \varepsilon + b_2 \tag{2}$$



图 8 安装完成的不锈钢螺栓试件 Fig. 8 Completed stainless steel bolt specimens









Table 2Values of parameters k_2 and b_2 in the
torque and strain relationship for

stainless	steel	bolt	specimens
-----------	-------	------	-----------

参数		试件编号		亚坎仿
类型	ST-1	ST-2	ST-3	- 千均值
k_2	0.06	0.06	0.06	0.06
b_2	0.27	0.15	-0.06	0.12

根据式(1)和式(2)可得不锈钢螺栓预紧力与 其所受扭矩的关系为:

 $T = 0.002\ 7P + 0.083\ 4 \tag{3}$

当装配式铆钉中螺杆直径为 5mm,初拧预紧力 取 6. 27kN 时,对应的初拧扭矩为 17N · m,为实现 铆孔的充盈,所需的预紧力为 8. 49kN,对应的终拧 扭矩为 23N · m。

综上所述,采用装配式铆钉连接铝合金构件, 可实现铆孔充盈,且初拧及终拧扭矩可控。

4 试验研究

4.1 抗剪试件

采用装配式铆钉将连接板与盖板组装形成抗 剪试件,如图 10 所示。该试件设计为单剪,连接方 式与工字形截面构件单侧翼缘和节点板常用连接 方式一致^[15-17]。

抗剪试件中连接板、盖板材质均为 6061-T6 型 铝合金,相关尺寸如图 11 所示,装配式铆钉相关参 数如表 3 所示。抗剪试件共 4 组,其中第 1,3,4 组



rivets fastening

试件套管壁厚分别为 0.6,0.8,1.0mm, 铆钉采用中 心向两侧、先初拧后终拧的铆固顺序; 第 2 组试件套 管壁厚为 0.8mm, 铆钉采用一端向另一端的铆固顺 序, 与第 3 组试件进行对比。





装配式铆钉初拧扭矩取终拧扭矩的75%,按设 定的铆固顺序逐个施拧,再倒序复拧至初拧扭矩, 随后按序施加终拧扭矩,再次复拧直至每个装配式 铆钉达到终拧扭矩。

对于铆固后的抗剪试件,分别测量并记录螺 管、螺杆螺帽与连接板或盖板间隙,用于失效判断 及影响因素分析。另外,在试件板厚方向与装配式 铆钉对应位置画线,用于实测相对位移;沿螺管、螺 杆螺帽外轮廓做标记(见图 12),用于失效判断及影 响因素分析。

4.2 加载方案

利用 100t 电液伺服万能试验机开展抗剪试件 试验研究(见图 13),采用位移控制连续加载,速率 选取 0.007mm/s。加载前,首先进行预加载,卸载清 零后正式加载。加载过程中,设备采集荷载、位移 表 3 抗剪试件所用装配式铆钉参数

Table 3 Parameters of assembled rivets used for shear specimens

			试	牛编号	
	项目	6RD-1,6RD-2,6RD-3	8RD-1,8RD-2,8RD-3	8RD-4,8RD-5,8RD-6	10RD-1,10RD-2,10RD-3
		(第1组)	(第2组)	(第3组)	(第4组)
	材质		奥氏体 3	04 型不锈钢	
相应	内径 d_t /mm	5.0	5.0	5.0	5.0
縣官	外径 D_t /mm	9.0	9.0	9.0	9.0
	长度 h _t /mm	16.0	16.0	16.0	16.0
	材质		3003-H1	2 型铝合金	
始在在	壁厚 t _{al} /mm	1.1	1.0	1.0	0.8
珈眉	外径 $d_{ m al}/ m mm$	11.3	11.1	11.1	10.7
	高度 $h_{\rm al}/{ m mm}$	20.9	19.5	18.5	20.4
	材质		S30408	型不锈钢	
	壁厚 t _{ss} /mm	0.6	0.8	0.8	1.0
套管	外径 $d_{ m ss}/ m mm$	12.9	12.9	12.9	12.9
	高度 $h_{ m ss}/ m mm$	16.0	16.0	16.0	16.0
	缝宽 $c_{ m ss}/ m mm$	0.2	0.2	0.2	0.2
	材质		奥氏体 3	04 型不锈钢	
螺杆	直径 $d_{\rm s}/{ m mm}$	5.0	5.0	5.0	5.0
	长度 h _s /mm	15.0	15.0	15.0	15.0



c 第3组试件(自上至下编号 d 第4组试件(自上至下编号 依次为8RD-4, 8RD-5, 8RD-6) 依次为10RD-1, 10RD-2, 10RD-3)

信息并给出实时荷载-位移曲线。试验人员观察并 记录试验过程中连接板与盖板的相对滑动、弯曲 或分离、破坏部位和形态及装配式铆钉变形、失效 顺序等相关信息。当出现装配式铆钉破坏、盖板 断裂、连接板断裂中的任一情形,试验结束。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 试验结果

试验得到抗剪试件荷载-位移曲线如图 14 所 示。由图 14 可知,抗剪试件荷载-位移曲线无明显 滑移现象,变化趋势可分为摩擦传力阶段、进一步 充盈阶段、承压传力阶段和破坏阶段。在摩擦传力 阶段,抗剪试件荷载-位移曲线呈线性上升趋势,连





接板与盖板之间靠摩擦传力,此时的摩擦系数约为 0.093^[8,10]。在进一步充盈阶段,当抗剪试件位移达 到 1mm 左右时,外加荷载大于连接板与盖板之间的 摩擦力,连接板与盖板之间有相对滑移趋势,此时 铆管发生塑性变形,装配式铆钉逐渐达到完全充盈 状态并与孔壁相互挤压,抗剪试件荷载-位移曲线呈 向下凹的上升状态,表明连接刚度逐渐增大。在承 压传力阶段,当抗剪试件位移达到 5mm 左右时,随 着荷载逐渐增大,装配式铆钉及铆孔局部进入塑性 状态,因抗剪试件为单剪,连接板与盖板发生弯曲, 装配式铆钉由直变弯,此时荷载-位移曲线出现反弯 点,呈现向上凸的上升状态,表明连接刚度逐渐减 小。在破坏阶段,当抗剪试件位移达到13mm 左右 时,随着荷载进一步增大,在剪力与拉力的共同作 用下,装配式铆钉达到极限承载力时,在螺杆根部 第2螺纹附近发生断裂,破坏瞬间螺帽向外弹出,如

图 12 制作完成的抗剪试件 Fig. 12 Completed shear specimens









4.3.2 影响试件抗剪性能的因素

1) 铆固顺序

抗剪试件极限承载力 F_u 和极限位移 Δ_u 如表4





所示。由表4可知,第2组试件极限承载力和极限 位移离散性较大;第3组试件极限承载力平均值较 第2组试件大10.27kN,增加了18.3%,这主要是因 为第2组试件采用一端向另一端的铆固顺序,无法 保证铆孔充盈,导致螺管、螺杆螺帽与连接板或盖 板之间的间隙大于第3组试件。

2)套管壁厚

对于铆固顺序相同的抗剪试件,套管壁厚 0.8mm的试件极限承载力(第3组)较套管壁厚 0.6mm的试件增大10.17%,较套管壁厚1.0mm的 试件增大1.91%,说明抗剪试件极限承载力随着 套管壁厚的增加而增大。套管壁厚达到一定值 后,其对抗剪试件承载力的影响不显著。考虑受 力合理及成本控制,当不锈钢螺杆直径为5.0mm、 螺管外径为9.0mm时,建议选用壁厚0.8mm的 套管。

3) 螺帽与板件间隙

在装配式铆钉终拧扭矩施加到设定值,螺管、 螺杆螺帽与连接板或盖板之间仍有间隙,如表5所 示。第1组6RD-1,6RD-2,6RD-3试件失效装配式 铆钉编号分别为SN,XN,SN;第2组试件失效装配 式铆钉较多,其中8RD-1试件装配式铆钉XN,SN, XW依次失效,8RD-2试件装配式铆钉SN,XN,SW 依次失效,8RD-3试件装配式铆钉XN,XW依次失 效;第3组8RD-4,8RD-5,8RD-6试件失效装配式铆 钉编号均为XN;第4组10RD-1,10RD-2,10RD-3试 件失效装配式铆钉编号分别为SN,XN,XN。结合 装配式铆钉所处部位及其与连接板或盖板之间的 间隙分析可知,因受力差异,通常失效首先出现在 抗剪试件内侧的装配式铆钉,其编号为SN,XN。理 论上编号SN,XN 装配式铆钉失效概率相同,但由于

表 4 抗剪试件极限承载力与极限位移 Table 4 Ultimate bearing capacity and ultimate displacement of shear specimens

						试	件编号					
坝日	6RD-1	6RD-2	6RD-3	8RD-1	8RD-2	8RD-3	8RD-4	8RD-5	8RD-6	10RD-1	10RD-2	10RD-3
极限承载力 F _u /kN	59.85	60.95	59.89	51.84	53. 52	62.90	67.47	66.14	65.46	67.43	62.79	65.12
极限位移 $\Delta_{ m u}$ /mm	11.95	12.61	11.63	8.00	9.36	10.29	12.38	12.13	12.92	12.57	11.78	11.64

表 5 螺管、螺杆螺帽与连接板或盖板之间的最大间隙

Table 5 Maximum clearances between the nut of the screw tube, screw and the connecting plate or cover plate mm

壮丽式御灯护星							试件编号					
衣肌八別打姍丂	6RD-1	6RD-2	6RD-3	8RD-1	8RD-2	8RD-3	8RD-4	8RD-5	8RD-6	10RD-1	10RD-2	10RD-3
SW	2.20	1.10	1.40	1.20	0.15	1.20	0.80	0.00	0.80	1.50	1.00	0.80
SN	1.30	1.00	1.30	1.20	1.20	0.40	0.60	0.80	0.00	0.40	0.70	1.00
XN	2.00	1.10	1.60	0.20	2.00	0.30	0.60	0.80	0.20	0.30	1.00	1.20
XW	1.30	2.10	1.00	0.20	1.00	0.15	1.00	0.00	0.80	0.20	1.20	1.20

螺帽与连接板或盖板之间存在间隙,其中间隙较大 的装配式铆钉更早发生破坏。当螺管、螺杆螺帽与 连接板或盖板之间存在间隙时,说明装配式铆钉未 达到充盈,导致连接板或盖板之间的弯曲变形提前 发生,同时增大抗剪试件沿荷载作用方向的变形 量,降低抗剪连接性能。

5 有限元分析

采用 ABAQUS 软件建立与第 3 组抗剪试件参数相同的有限元模型,将有限元分析结果与试验结果进行对比,验证有限元模型及分析结果的有效性,并开展影响因素分析。

5.1 模型建立

- 5.1.1 实体模型及单元
 - 1)实体模型及其简化

通过拉伸、旋转等方式建立抗剪试件各部件几 何模型,根据网格划分、加载需要等对各部件进行 必要的分割,在装配模块将各部件进行装配,得到 抗剪试件实体模型,如图 16 所示。抗剪试件在实际 加载时变形较大且伴随有偏心,因此在有限元分析 时考虑几何非线性。



图 16 抗剪试件实体模型 Fig. 16 Solid model of the shear specimen

2) 网格划分

为保证有限元分析结果的准确性,区分应力集中与否,对抗剪试件各部件进行网格划分,如图 17 所示,其中螺管、螺杆螺帽处网格边长 < 2mm,螺杆 螺纹处网格边长 < 0.6mm,螺管螺纹处网格边长 < 0.8mm,铆管、套管网格边长 < 1.2mm,连接板开孔 处、倒角位置及盖板开孔处网格边长 < 1.6mm,其余 区域网格边长 < 5mm。



图 17 抗剪试件各部件网格划分

Fig. 17 Mesh delineation of each component of the shear specimen

3) 单元选取

模型中存在接触、应力集中等问题,结合分析运算精度、时长,选用三维六面体 C3D8R 单元模拟。 5.1.2 参数设定

1)材质

连接板、盖板材质为 6061-T6 型铝合金,螺管、 螺杆材质为 A2-70 型不锈钢,铆管材质为 3003-H12 型铝合金,套管材质为 S30408 型不锈钢,钛管材质 为 TA2 型钛合金,泊松比取 0.3,材质破坏准则均选 用第四强度理论。课题组实测了试件材质力学性 能^[10],结果如表 6 所示。

表 6 试件材质力学性能 Table 6 Mechanical properties of specimen material

部件 名称	弹性 模量⁄ MPa	屈服 强度/ MPa	极限 强度/ MPa	伸长率/%	断面收缩率/ %
连接板、盖板	71 542	274.2	310.2	8.1	6.7
螺管、螺杆	193 000	610.2	735.0	32.7	13.6
铆管	68 590	98.4	129.7	28.3	80.2
套管	194 321	324.0	734.4	42.8	40.3
钛管	115 430	761.7	794.7	16.0	15.9

2)边界条件

在有限元模型中,将铆管与螺管间的接触设为 法向接触、切向接触,将套管与铆管间的接触设为 切向接触,将套管与连接板或盖板铆孔间的接触设 为切向接触,将连接板与盖板间的接触设为法向接 触、切向接触,采用通用接触方式,切向接触采用库 仑摩擦接触,摩擦系数取课题组实测值 0.093,法向 接触采用"硬"接触。抗剪试件一侧连接板板端采 用固定约束,另一侧连接板板端耦合于参考点,施 加作用。

3) 预紧力

利用螺管及螺杆实体模型的切割面,通过设定 分析步实现装配式铆钉预紧力的施加。在第1个分 析步中,对每个螺管及螺杆组合体施加50N的预紧 力;在第2个分析步中,将每个螺管及螺杆组合体预 紧力增至设计值8.49kN;在第3个分析步中,将每 个螺管及螺杆组合体固定在当前长度,并向后续分 析步传递。

4) 加载方式

抗剪试件中一侧连接板前、后面所有自由度耦 合于同个参考点,在该点采用位移控制方式进行加 载。约束设定完成后设置分析步,前3个分析步用 于装配式铆钉预紧力的施加,第4个分析步为位移 控制加载。

5.2 模型与分析结果有效性

通过有限元分析可得到荷载-位移曲线及变形、 应力、应变云图等,进而可分析抗剪试件受力特点、 传力方式、塑性发展、破坏机理等,将有限元分析结 果与试验结果进行对比可验证模型的有效性。

1) 应力分布

计算得到抗剪试件各部件应力云图如图 18 所示。由图 18 可知,连接板最大应力发生在铆孔承压 部位,与装配式铆钉所受剪力效应一致;连接板靠 近加持端的铆孔周围进入塑性区域的面积大于另

一侧铆孔,与试验结果中此处出现的塑性变形一致;连接板由于偏心发生弯曲,在靠近加持端铆孔

所在的横截面出现弯曲应力。连接板板端受试验 机夹具作用出现最大压应力,与装配式铆钉受剪性 能无直接关系。盖板应力分布呈现对称性;盖板最 大应力发生在铆孔承压部位,与连接板最大应力位 置对应:盖板由于偏心发生弯曲,在其内侧2个铆孔 所在的横截面出现弯曲应力。螺管最大应力出现 在内螺纹处,应力水平达到材质极限强度,但最大 应力所在区域较小:螺管应力分布呈现出弯曲应 力、局部承压应力、轴向拉应力的组合效果。在与 铆管受剪面夹角约 45°的截面,铆管应力达到材质 抗拉强度且具有一定的分布宽度。套管具有与铆 管相似的应力分布特征,局部区域最大应力接近于 材质抗拉强度:因套管纵向设缝的缘故,开缝处的 应力分布不连续。试件内侧螺杆应力水平高于外 侧螺杆,其螺纹应力状态复杂,最大应力发生在根 部第2螺纹附近,试件失效时该处应力已达到材质 极限强度且贯穿第2螺纹附近的横截面,次大应力 发生在受剪面、螺杆与螺帽交汇处;螺杆上分布有 剪应力、弯曲应力、轴向拉应力等。



2)荷载-位移曲线

将有限元分析得到的试件荷载-位移曲线与试 验结果进行对比,如图 19 所示。由图 19 可知,有限 元分析得到的试件荷载-位移曲线无凹凸拐点,而试 验曲线先向下凹再向上凸,具有拐点;有限元分析 得到的试件极限承载力较试验结果小 12.1%,有限 元分析得到的试件最大刚度较试验结果大 14.1%。 试验时预紧力虽达到铆管发生塑性变形所需的压 力,但由于装配式铆钉各部件与铆孔之间存在摩 擦,实际并未达到充盈连接;有限元分析时装配式 铆钉为完全充盈状态,导致了有限元分析结果与试 验结果存在差别。在试验加载前期,随着荷载的逐 渐增大,装配式铆钉逐渐实现充盈,根据荷载-位移 曲线得到的试件刚度逐渐增大;在试验加载后期, 随着装配式铆钉、连接板及盖板铆孔周围材质进入 塑性的面积增加,根据荷载-位移曲线得到的试件刚 度逐渐减小。进行装配式铆钉实际连接时,可通过 提高各接触面平整度、浸泡或加注润滑剂、增大预 紧力等措施,减小摩擦阻力,提高充盈效果,进而提 高刚度及承载力。



图 19 荷载-位移曲线对比

Fig. 19 Comparison of load and displacement curves

3)失效模式

由有限元分析结果可知,试件破坏首先发生在 内侧装配式铆钉螺杆螺纹根部;随着荷载的继续增 加,率先失效的装配式铆钉外侧螺杆顺次发生螺纹 根部断裂,失效模式与试验结果吻合,如图 15,20 所示。

综上所述,本研究所建有限元模型及分析结果



图 20 试件失效破坏云图(单位:MPa)

Fig. 20 Cloud map of specimen failure damage(unit: MPa)

有效、可信。

5.3 装配式铆钉抗剪连接性能影响因素

利用已有模型,通过改变抗剪试件相关参数, 开展装配式铆钉抗剪连接性能影响因素分析。

1) 螺管、螺杆材质

试验研究及有限元分析结果均表明,装配式铆 钉中螺杆螺纹根部为薄弱环节,直接选取更高强度 的螺杆材质会提高抗剪试件承载力。装配式铆钉 中的螺管与螺杆配套使用,分析时二者选取同种材 质。当螺管和螺杆分别采用奥氏体 304 型不锈钢和 TA2,TA11,TA15 型钛合金时,其他参数不变,得到 抗剪试件极限承载力如表 7 所示。

由表 7 可知,当螺管、螺杆采用的材质抗拉强度 提高 8.1%,21.8%,26.5%时,抗剪试件极限承载力 对应提高 9.3%,15.4%,17.6%,表明提高螺管、螺 杆材质强度的方法有效,但并不经济。

2)套管材质

在抗剪试件中,装配式铆钉套管直接承受剪 力、局部压应力作用。当套管分别采用奥氏体 304 型不锈钢和 TA2, TA11, TA15 型钛合金时,其他参 数不变,得到抗剪试件极限承载力如表 8 所示。

由表 8 可知,当套管材质抗拉强度提高 26.5%时,抗剪试件极限承载力仅提高 6.0%,可见套管材 质对抗剪试件极限承载力的影响不显著。

3) 螺杆直径和螺管有效壁厚

在装配式铆钉中,增大螺杆直径虽为提高承载

Table 7 Effect of the screw tube and screw's material to the ultimate load capacity on the shear specimen

项目	螺管、螺杆材质						
项目	奥氏体 304 型不锈钢	TA2 型钛合金	TA11 型钛合金	TA15 型钛合金			
材质抗拉强度提高率/%	—	8.1	21.8	26.5			
试件极限承载力/kN	58.31	63.75	67.31	68.58			
试件极限承载力提高率/%	—	9.3	15.4	17.6			

55

衣 ð 丢官প 贝 刈 机 男 瓜 什 伮 柩 承 刃 り 前 🕅	表 8	套管材质对抗剪试件极限承载力的影响
-----------------------------------	-----	-------------------

Table 8 Effect of casing material to ultimate bearing capacity on shear specimens

	套管材质						
项目	奥氏体 304 型不锈钢	TA2 型钛合金	TA11 型钛合金	TA15 型钛合金			
材质抗拉强度提高率/%	_	8.1	21.8	26.5			
试件极限承载力/kN	58.31	61.41	61.71	61.78			
试件极限承载力提高率/%	—	5.3	5.8	6.0			

力的途径,但螺杆有效截面面积与螺管有效壁厚具 有关联性,因此开展螺杆直径和螺管有效壁厚双参 数分析,改变抗剪试件螺杆直径并相应调整螺管及 铆孔直径,其他参数不变,分别对4种螺杆直径和5 种螺管有效壁厚抗剪试件进行建模分析,得到极限 承载力如表9所示,表中括号内数据为螺管有效截 面面积与螺杆有效截面面积之比。

由表9可知,相同螺管有效壁厚下,随着螺杆直 径的增大,抗剪试件极限承载力最小提高13.2%, 最大提高53.9%;同一螺杆直径下,随着螺管有效 壁厚的增大,抗剪试件极限承载力最小提高 10.1%,最大提高34.6%。综合铆孔孔壁承压性能、 装配式铆钉抗剪性能及材质用量,当螺管有效壁厚 为螺杆直径的1/5~1/3时,对提高抗剪试件承载力 最有效。

4) 装配式铆钉预紧力

在抗剪试件中,装配式铆钉施加预紧力后,在 铆管受剪时具有约束效应。选取装配式铆钉预紧 力分别为 2.5,3.5,4.5,5.5,6.5,7.5kN,得到抗剪 试件极限承载力分别为 58.29,58.31,58.42, 58.32,58.31,58.38kN,可知改变装配式铆钉预紧 力对单剪试件极限承载力几乎无影响,这主要是因 为偏心受剪时连接板与盖板之间发生分离,套管未 能发挥其约束作用。

5)连接板或盖板厚度

抗剪试件为单剪受力状态,连接板或盖板厚度 与偏心受力致其弯曲关系紧密。通常连接板与盖 板同宽,为保证可靠传力,要求盖板厚度不小于连 接板厚度,分析时取连接板与盖板等厚。分别取 5 种连接板或盖板厚度,其他参数不变,计算得到的 抗剪试件极限承载力如表 10 所示。 表 10 连接板或盖板厚度对抗剪试件极限承载力的影响

 Table 10
 Effect of the connecting plate or cover

plate thickness to ultimate bearing capacity

oecimens

而日	连接板或盖板厚度/mm						
坝日	8	9	10	12	16		
试件极限承载力/kN	58.31	61.49	63.33	69.59	82.49		
试件极限承载力提高率/%	—	5.5	8.6	19.3	41.5		

由表 10 可知,随着连接板或盖板厚度的增大, 抗剪试件偏心弯曲变形减小,预紧力约束效应显 现,极限承载力提高。当采用装配式铆钉紧固时, 可通过提高抗剪试件抗弯刚度、采用无偏心连接、 增大连接板或盖板厚度等措施提高抗剪承载力。 实际应用装配式铆钉抗剪连接时,推荐抗剪连接同 一受力方向板厚之和与装配式铆钉直径的比值为 1.00~1.25。

6 装配式铆钉承载力计算方法

装配式铆钉作为新型抗剪连接用紧固件,需研究其承载力计算方法。为方便实际应用,建议装配式铆钉抗剪承载力设计值取其极限承载力 F_u的70%,且当装配式铆钉达到抗剪承载力设计值时,抗 剪连接变形不大于失效时最大变形的70%。根据 抗剪试件试验及有限元分析得到的荷载-位移曲线, 提取承载力设计值并进行数值拟合,给出装配式铆 钉承载力设计值计算公式及选用规格。

本研究中试验采用的抗剪试件为单剪受力状态,每侧2颗装配式铆钉,在剪力达到承载力设计值 之前,按均匀受剪近似考虑。

装配式铆钉所受剪力应小于其抗剪承载力设 计值与承压承载力设计值中的最小值 N_{min},且不得 大于连接板及盖板中最小净截面所能承受的拉力。

衣? 感什直任他感冒有双望序对机势以什做限承载力的影响	表 9	螺杆直径和螺管有效壁厚对抗剪试件极限承载力的影响
-----------------------------	-----	--------------------------

Table 9 Effect of screw diameter and screw tube effective thickness to ultimate bearing capacity on shear specimens

岬 杠古久/	螺管有效壁厚/mm						
场杆且住/mm ——	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0		
5	52.07(1.56)	58.31(2.24)	61.86(3.00)	64.47(3.84)	69.29(5.76)		
6	58.93(1.25)	66.45(1.78)	71.21(2.36)	73.56(3.00)	79.33(4.44)		
7	70.85(1.04)	78.83(1.47)	83.67(1.94)	86.25(2.45)	89.71(3.59)		
8	80.15(0.89)	88.21(1.25)	91.18(1.64)	92.03(2.06)	94.86(3.00)		

表 13 装配式铆钉抗剪连接选用规格

Table 13 Selection specifications of shear connection of assembled rivets

却故	螺杆直径/	螺管尺	寸/mm	铆管尺	寸/mm	套管尺	寸/mm	盖板厚度/	抗剪承载	力设计值/kN
乃七作	mm	外径	壁厚	外径	壁厚	外径	壁厚	mm	单剪	双剪
M13	7.0	10.0	1.5	11.8	0.9	13.0	0.6	8.0	27.52	55.04
M15	8.0	11.0	1.5	13.4	1.2	15.0	0.8	8.0	31.00	62.00
M17	9.0	13.0	2.0	15.4	1.2	17.0	0.8	10.0	44.85	89.70
M19	11.0	15.0	2.0	17.4	1.2	19.0	0.8	12.0	61.14	122.28
M21	13.0	18.0	2.5	19.8	0.9	21.0	0.6	12.0	70.56	141.12

经数值拟合,装配式铆钉抗剪承载力设计值、承压 承载力设计值计算公式如下:

$$N_{v}^{r} = 0.785n_{v}(D_{v}^{2}f_{v}^{b} + 4d_{al}t_{al}f_{v}^{al} + 4d_{ss}t_{ss}f_{v}^{ss}) \quad (4)$$

$$N_{\rm c}^{\rm r} = \sum t \left(D_{\rm s} f_{\rm c}^{\rm b} + 2t_{\rm a} f_{\rm c}^{\rm al} + 2t_{\rm s} f_{\rm c}^{\rm ss} \right)$$
(5)

式中: N^r_v, N^r_e 分别为单个装配式铆钉抗剪、承压承载 力设计值; n_v 为抗剪连接受剪面个数; t 为抗剪连接 中同一受力方向板厚之和的较小值; f^h_v, f^{al}_v, f^s_v 分别 为螺管、铆管、套管抗剪承载力设计值; f^h_e, f^{al}_e, f^s_e 分 别为螺管、铆管、套管承压承载力设计值。

公式计算得到的装配式铆钉抗剪承载力与对 应的变形分别如表 11,12 所示。由表 11,12 可知, 装配式铆钉抗剪承载力公式计算结果与试验结果 相对误差为-4.52%~2.56%,变形相对误差为 -6.22%~5.58%,式(4)和式(5)可供装配式铆钉抗 剪连接计算使用。

表 11 单个装配式铆钉抗剪承载力 Table 11 Shear capacity of individual assembled rivets

试件 组号	$F_{\rm u}/{ m kN}$	$0.7F_{\rm u}/{ m kN}$	$N_{ m min}^{ m r}/{ m kN}$	公式计算结果与 试验结果相对 误差/%
1	30.12	21.08	21.62	2.56
2	33.18	23.23	22.18	-4.52
3	32.56	22.79	22.51	-1.23

表 12 单个装配式铆钉达到抗剪承载力时的变形

 Table 12
 Deformation of individual assembled

rivets when shear load capacity is reached

试件 组号	F _u 对应的 变形/ mm	0.7F _u 对应的 变形/mm	N ^r min对应的 变形/mm	公式计算结果与 试验结果相对 误差/%
1	12.16	7.71	8.14	5. 58
2	11.19	6.43	6.03	-6.22
3	11.74	7.15	7.02	-1.82

7 装配式铆钉规格选用

通过计算装配式铆钉抗剪承载力设计值、承压 承载力设计值,考虑参数化分析中相关参数的匹配 与影响,兼顾连接板或盖板净截面抗拉承载力,计 算分析后得出5种规格装配式铆钉抗剪承载力设计 值。当抗剪连接的连接板和盖板材质为6061-T6型 铝合金,装配式铆钉中螺管、螺杆选用 S30408 型不锈钢,铆管选用 3003-H12 型铝合金,套管选用 S30408 型不锈钢时,装配式铆钉抗剪连接选用规格 如表 13 所示。

8 结语

1)针对铝合金结构现有连接紧固件,提出了抗 剪连接用装配式铆钉,其具有受力无错动、质量可 控、安装效率高、可装可拆的特点。

2)通过抗剪试件试验研究,得到了装配式铆钉 抗剪连接荷载-位移曲线、传力方式、破坏机理及形态,确定了装配式铆钉合理铆固顺序,验证了有限 元模型及分析结果的有效性。

3)通过装配式铆钉连接抗剪性能影响因素分 析,为提高装配式铆钉抗剪承载力,推荐抗剪连接 同一受力方向板厚之和与装配式铆钉直径的比值 为1.00~1.25,且增大装配式铆钉螺杆直径较提高 螺杆材质更有效。

4)根据装配式铆钉抗剪连接荷载-位移曲线及 有限元分析结果,经数值拟合得出了装配式铆钉承 载力设计值计算公式,并提供了5种规格装配式铆 钉供抗剪连接选用。

参考文献:

 [1] 郭小农,欧阳辉,李政宁,等. 某马鞍形双曲面铝合金板式节 点网壳结构深化设计 [J]. 施工技术(中英文), 2022, 51 (20): 128-132.

GUO X N, OUYANG H, LI Z N, et al. Detailed design of a saddle shaped hyperboloid aluminum alloy reticulated shell with gusset joints[J]. Construction technology, 2022, 51 (20): 128-132.

[2] 欧阳元文,尹建,刘小蔚,等.观音圣坛圆通大厅单层斜交异形双曲铝合金结构设计与施工[J].施工技术,2021,50(10):85-88.

OUYANG Y W, YIN J, LIU X W, et al. Design and construction of single-layer oblique and profiled hyperbolic aluminum alloy structure in Guanyin Altar Yuantong Hall [J]. Construction technology, 2021, 50 (10): 85-88.

 [3] 孙晓阳,杨锋,赵海,等.复杂须弥山形空间弯扭铝合金结构 施工技术 [J].施工技术(中英文), 2022, 51 (2): 33-37,50.

SUN X Y, YANG F, ZHAO H, et al. Construction technology of

complex Xumishan-shaped bending and torsion aluminum alloy structure [J]. Construction technology, 2022, 51 (2): 33-37,50.

- [4] 张其林,季俊,杨联萍,等.《铝合金结构设计规范》的若干重 要概念和研究依据[J].建筑结构学报,2009,30(5):1-12.
 ZHANG Q L, JI J, YANG L P, et al. Some important concepts and research bases of Code for Design of Aluminum Structures
 [J]. Journal of building structures, 2009, 30(5):1-12.
- [5] 同济大学,现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司. 铝合金结构设计规范:GB 50429—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.

Tongji University, Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co., Ltd., SIADR. Code for design of aluminum structures: GB 50429—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.

[6] 刘俊,罗永峰,郭小农,等. 螺栓滑移引起的铝合金板式节点
 网壳变形研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47
 (9):40-47.

LIU J, LUO Y F, GUO X N, et al. Study on the deformation of aluminum alloy plate joint mesh shell caused by bolt slip[J]. Journal of Hunan University(natural sciences), 2020,47(9): 40-47.

- [7] 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.
 GUO X N, XIONG Z, LUO Y F, et al. Initial stiffness of aluminum alloy plate nodes [J]. Journal of Tongji University (natural science),2014,42(8):1161-1166.
- [8] 曹少成,闫亚杰,武启宇,等. 铝合金网壳中不锈钢螺栓连接的抗剪性能研究与应用 [J]. 太原理工大学学报, 2022, 53 (2): 315-322.

CAO S C, YAN Y J, WU Q Y, et al. Research and application of shear performance for stainless steel bolted connections in aluminum alloy mesh shells [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53 (2): 315-322.

[9] 郝贤哲,武启宇,闫亚杰,等. 某单层铝合金网壳结构施工过 程的关键问题研究[J/OL]. 太原理工大学学报, 1-11[2024-04-20].

> HAO X Z, WU Q Y, YAN Y J, et al. Research on key issues in the construction process of a single-story aluminum alloy mesh shell structure [J/OL]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1-11[2024-04-20].

 [10] 曹少成.不锈钢螺栓连接下铝合金网壳结构板式节点的静力 性能研究[D].太原:太原理工大学,2022.
 CAO S C. Study on the static performance of plate joints of aluminum alloy mesh shell structure with stainless steel bolted connections [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

- [11] 闫亚杰,武海全,彭辉,等. 六角-半圆头螺纹连接副: CN202320579272.6[P]. 2023-07-28.
 YAN Y J, WU H Q, PENG H, et al. Hexagonal-semi-circular head threaded connecting vice: CN202320579272.6[P]. 2023-07-28.
- [12] 王时贵. 铝质铆钉单剪连接性能的理论分析与试验研究
 [D]. 太原:太原理工大学, 2023.
 WANG S G. Theoretical analysis and experimental study on the performance of single shear connection for aluminum rivets [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [13] 闫亚杰,靳世宏,武海全,等. 一种带开口套管的铝质铆钉及 其连接方法:CN202111615960.5 [P]. 2023-11-17.
 YAN Y J, JIN S H, WU H Q, et al. An aluminum rivet with open casing and its connection method: CN202111615960.5
 [P]. 2023-11-17.
- [14] 闫亚杰,闫沛喆,郭斌斌,等.充盈式螺纹铆接的抗剪紧固件 及其使用方法: CN202311300417.5[P]. 2024-01-26.
 YAN Y J, YAN P Z, GUO B B, et al. Shear-resistant fasteners with filling-type thread riveting and their use methods: CN202311300417.5[P]. 2024-01-26.
- [15] 张雪峰,崔家春,尹建.南京牛首山文化旅游区佛顶宫大穹顶 大跨空间自由曲面铝合金网壳结构设计[J].建筑结构, 2018,48(14):8-13.
 ZHANG X F, CUI J C, YIN J. Structural design of free-form aluminum alloy mesh shell for large-span space of the large dome of Usnisa Palace in Nanjing Niushoushan Cultural Tourism Zone [J]. Building structure, 2018,48(14):8-13.
- [16] 李志强,刘小蔚,欧阳元文.拉斐尔云廊大跨度铝合金屋盖结构施工模拟分析与方案对比[J].建筑结构,2020,50(S2): 146-149.
 LI Z Q, LIU X W, OUYANG Y W. Construction simulation

analysis and scheme comparison of large-span aluminum alloy roof structure for Raphael Cloud Gallery [J]. Building structure, 2020,50(S2): 146-149.

[17] 张志杰,冯若强,刘峰成.北京大兴国际机场铝合金玻璃采光顶节点试验研究[J].土木工程学报,2020,53(8):38-44,128.

ZHANG Z J, FENG R Q, LIU F C. Experimental study on the joints of aluminum alloy glass light roof at Beijing Daxing International Airport [J]. China civil engineering journal, 2020, 53 (8): 38-44,128.