文章编号：0253-374X(2025)12-1806-09

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24260

铝合金斜交螺栓连接的抗剪承载性能

朱　亮[1]，唐子琳[2]，洪　祎[1]，郭小农[2]

（1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司，上海 200092；2. 同济大学 土木工程学院，上海 200092）

摘要：完成了5个铝合金板斜交螺栓连接抗剪承载力试验，证实了螺栓内力分配存在不均匀现象；通过参数化数值分析，研究了斜交角度、螺栓间距、材料特性等参数对螺栓内力分配的影响规律。研究结果表明，最危险位置螺栓分担的剪力可达平均剪力的180%。在试验结果和数值分析结果的基础上，拟合得到了铝合金斜交螺栓连接的螺栓最大内力分配系数计算式。

关键词：铝合金结构；受剪螺栓连接；斜交连接

中图分类号：TU395　　**文献标志码**：A

Shear Capacity of Aluminum Alloy Connection with Diagonally Arranged Bolts

ZHU Liang[1], *TANG Zilin*[2], *HONG Yi*[1], *GUO Xiaonong*[2]

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Five shear bearing capacity tests on aluminum alloy connections with diagonally arranged bolts were conducted, confirming the uneven distribution of internal forces among bolts. The influence of parameters such as diagonal angle, bolt spacing, and material properties on the internal force distribution of bolts was studied through parameterized numerical analysis. The research results indicate that the shear force shared by the most unfavorable bolts can reach 180% of the average shear force. Based on the experimental results and numerical analysis, the formula for calculating the maximum internal force distribution coefficient of bolts was obtained through fitting.

Keywords: aluminum alloy structures; shearing bolt connections; diagonally arranged bolts

铝合金空间结构造型美观、受力合理、耐腐性强，具有较高的综合经济效益[1]。自1996年我国第一个大跨度铝合金单层网壳结构——天津市平津战役纪念馆[2]建成以来，国内学者对铝合金空间结构承载性能的研究逐渐深入，越来越多大跨度建筑采用铝合金网壳结构，如南京牛首山佛顶宫、上海天文馆倒转穹顶、上海G60科创云廊屋顶等。在铝合金单层网壳结构中，杆件通常为H型铝型材，节点多采用板式节点，即用上、下两块夹板将汇交于节点处的杆件通过不锈钢螺栓或者铆钉连接起来，以紧固件受剪来传递杆端力。

随着人民生活水平的提高和精神世界的丰富，建筑物外形不再拘泥于传统形式，而是追求艺术与实用兼备。将螺栓斜向布置可以实现杆件布置方向的调整，满足特殊的造型需求[3]。此外，相较于同等螺栓数量下的正交连接，斜交螺栓连接的净截面破坏路径更长，故其净截面极限承载力可能也会有所增强，具有一定的工程实用价值。

目前关于钢结构的螺栓连接性能已有较为成熟的研究成果。我国《铝合金结构设计规范》(GB50429—2007)[4]中铝合金结构紧固件连接计算公式采用了和《钢结构设计标准》(GB 50017—2003)[5]中钢结构紧固件连接公式相同的形式。但铝合金的本构关系与钢材存在差异，故铝合金板件螺栓连接的力学性能也有所不同[6]，国内已有部分学者进行了相关研究。针对由普通钢制螺栓作为紧固件的连接，张贵祥等[7]对铝合金构件螺栓连接的孔壁承压性能、螺栓抗剪性能以及长构件螺栓连接受力不均匀的特性进行了深入研究，提出了铝合金构件螺栓连接的相关计算公式和构造要求。研究表明，铝合金板螺栓连接时荷载分配不均匀情况比钢板螺栓连接时更加明显，建议在钢结构规范中的连

收稿日期：2024-08-13

第一作者：朱　亮，正高级工程师，主要研究方向为复杂公共建筑结构设计. E-mail：12ZL@tjad.cn

通信作者：郭小农，副教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为铝合金结构.
E-mail：guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

接长度折减系数公式前乘以0.9。2007年，石永久等[8]研究了螺栓连接的铝合金构件同时受到拉力和剪力时的性能特性。次年，石永久团队[9]又对铝合金结构螺栓连接的抗剪性能进行了参数分析，提出了新的连接长度折减系数的计算公式。王元清等[10]对20个螺栓连接节点试件进行了加载试验，分析了螺栓直径和螺栓端距对节点孔壁承压承载力的影响。随着铝合金结构应用的增多，不锈钢螺栓凭借其耐腐蚀性强等优点逐渐代替了普通螺栓，成为铝合金结构中最常见的紧固件，众多学者也将研究对象转移至以不锈钢螺栓为紧固件的铝合金连接。郭小农等[11]通过试验和数值计算对螺栓孔壁承压性能进行研究，结果表明，我国规范[4]给出的孔壁承压强度取值过小，并提出了铝合金结构受剪螺栓连接孔壁承压强度标准值的建议计算公式。曹少成等[12]通过铝合金构件不锈钢螺栓连接抗剪试验测得铝-铝面的抗滑移系数。

综上所述，目前针对铝合金结构螺栓连接的研究已较为丰富，但并没有关于斜交螺栓连接性能的研究以及相关设计方法的提出。本文基于铝合金板斜交螺栓连接抗剪试验和有限元分析，对斜交连接构造下螺栓剪力分配规律以及抗剪性能进行研究，发现螺栓内力分配存在一定的不均匀性，通过大量参数分析拟合了螺栓最大的内力分配系数。

1　试验方案

1.1　斜交螺栓连接试件设计

本试验共设计了5个铝合金板双剪斜交螺栓连接试件以研究斜交螺栓连接的受力分配性能，试件设计如图1所示，每个试件包含两块夹板和一块芯板。由于目前还没有针对斜交连接方式的相关研究，本文定义双剪斜交连接构造中部分关键几何特征，包括斜交角α、螺栓直径d、螺栓孔径d_0、端距e_1、边距e_2、顺内力方向中心距p_1、垂直内力方向中心距p_2和p_2^*（其中p_2是螺栓间距离，p_2^*是最内侧螺栓距连接中心线距离）、芯板厚度t_1、夹板厚度t_2、螺栓排数m（顺内力方向螺栓个数）、螺栓列数n（垂直内力方向螺栓个数）、板宽b。考虑实际应用中的构造需求，斜交角度α一般在45°至90°之间。按图2对试件净截面拉断破坏路径分类，并按螺栓对于芯板的相对位置，从上至下，从左至右，以“排号列号”对螺栓编号，如“11”螺栓表示第一排第一列处的螺栓。

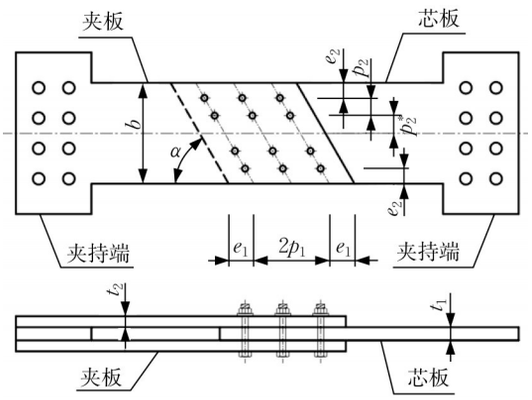


图1　试件加工图

Fig. 1　Construction of specimens

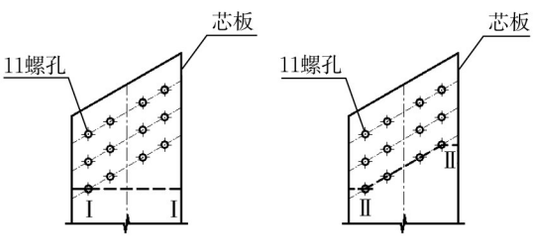


图2　净截面拉断路径分类

Fig. 2　Classification of failure routes

6061-T6铝合金和A2-70不锈钢螺栓是当前实际工程结构中应用最多的铝合金种类和螺栓种类。为考虑材料本身对螺栓受力分配规律的影响，试验试件选择了6061-T6和5083-H112两种实际中常见的铝合金材料，其中5系铝合金相较于6系铝合金有更好的延性和更高的极限强度。此外，由于A2-70不锈钢螺栓强度较大，较难发生螺栓剪坏的破坏模式，为了在试验中得到多种破坏模式以增大试验结果的可信度和适用范围，试验采用两种不同材性的螺栓，分别为4.8级钢螺栓和A2-70不锈钢螺栓，其中4.8级钢螺栓强度较小，作为紧固件时更易发生螺栓受剪破坏。不同螺栓连接的试件孔径d_0均比螺栓直径大0.2 mm。试件端部采用M20螺栓与试验装置连接，孔径23 mm，端部截面加大以保证试件在斜交连接处发生破坏。各试件尺寸及依据《铝合金结构设计规范》（GB 50429—2007）[4]计算得到的预期破坏模式和承载力标准值N_{GBk}列于表1，N_{GBk}计算公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} N_{\mathrm{v,k}}^{\mathrm{b}} = 2n\dfrac{\pi d^2}{4} f_{\mathrm{v,k}}^{\mathrm{b}} \\ N_{\mathrm{c,k}}^{\mathrm{b}} = nd\sum t f_{\mathrm{c,k}}^{\mathrm{b}} \\ N_{\mathrm{l,k}} = L\sum t f_{\mathrm{k}} \\ N_{\mathrm{GBk}} = \min\left\{N_{\mathrm{v,k}}^{\mathrm{b}}, N_{\mathrm{c,k}}^{\mathrm{b}}, N_{\mathrm{l,k}}\right\} \end{cases} \tag{1}$$

表1 试件设计

Tab. 1 Detailed information of specimens

编号	α/(°)	试件尺寸/mm								螺栓排数 m	螺栓列数 n	铝板牌号	螺栓型号	破坏模式	N_{GBk}/kN
		e_1	p_1	e_2	p_2	p_2*	t_1	t_2	b						
LJ-1	45	15	40	10	50	30	12	8	180	3	4	5083-H112	A2-70 M8	Ⅰ—Ⅰ截面拉断	222.65
LJ-2	45	22	50	12	40	20	8	8	144	3	4	5083-H112	A2-70 M10	Ⅰ—Ⅰ截面拉断	115.60
LJ-3	60	20	40	15	40	20	12	8	150	3	4	6061-T6	A2-70 M8	Ⅱ—Ⅱ截面拉断	404.36
LJ-4	60	25	50	20	40	30	12	8	180	2	4	6061-T6	A2-70 M10	Ⅱ—Ⅱ截面拉断	481.09
LJ-5	45	40	50	20	50	20	8	8	280	2	6	6061-T6	4.8级 M8	螺栓剪断	218.81

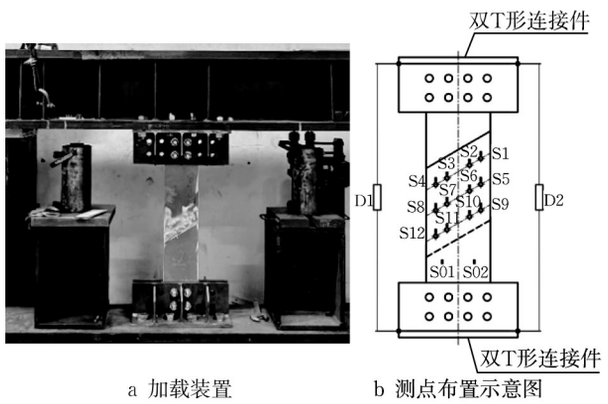
式中:n为螺栓总数;d为螺栓杆直径;Σt为在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值;L为净截面破坏路径长度;$f^{b}_{v,k}$、$f^{b}_{c,k}$分别为螺栓的抗剪强度标准值和承压强度标准值;f_k为铝合金板强度标准值;$N^{b}_{v,k}$、$N^{b}_{c,k}$、$N_{l,k}$分别为连接的螺栓抗剪承载力标准值、螺栓承压承载力标准值和净截面破坏强度标准值。

1.2 加载方案

试验采用液压千斤顶加载,试验装置如图3a所示。使用双T形连接件和螺栓将试件两端分别固定在反力梁和加载梁上。其中反力梁固定,加载梁两端嵌于滑轨,由电动葫芦吊于空中,仅可发生平面内的位移。液压千斤顶置于反力梁和加载梁之间,千斤顶顶升加载梁实现位移加载,直至试件破坏。

1.3 测点布置

在每个螺栓旁(单面)布置应变片(S1~S12),在夹板中部布置应变片(S01~S02),以测量在加载过程中关键位置的应变。同时布置两组相对位移计(D1和D2)测量位移加载量,测点分布如图3b所示。



a 加载装置 b 测点布置示意图

图3 试验方案

Fig. 3 Design of the test

1.4 材性试验

在正式试验之前,针对两种板材从试件相同批次的材料上各取样制作了3个标准拉伸试件[13],共6个。试验测得的材料力学性能参数列于表2,其中E为弹性模量;$f_{0.2}$为屈服强度;f_u为极限强度;δ为延伸率。两种材料的应力-应变曲线如图4所示。相较于6061-T6,5083-H122材料具有更好的延性。此外对相同批次的3个4.8级M8钢螺栓进行了剪切试验,得到4.8级M8钢螺栓的双剪抗剪承载力平均实测值为24.8 kN。

表2 铝合金拉伸试验结果

Tab. 2 Test result of material performance

材料	E/MPa	$f_{0.2}$/MPa	f_u/MPa	δ/%
5083-H112	64 711	183.00	385.13	29.91
6061-T6	61 704	240.46	350.59	15.16

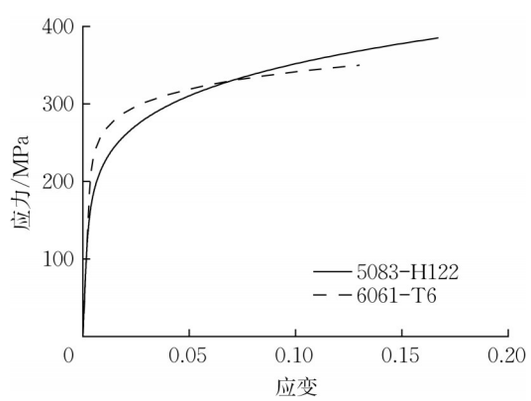


图4 铝合金材料应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain curves of aluminum alloy

2 试验结果

各组试件的破坏模式和实测极限承载力N_u与依据《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)[4]计算得到的承载力标准值N_{GBk}、依据材性试验结果计算得到的预估承载力N_{est}、依据材性试验结果计算得到的相同螺栓数目相同破坏模式下正交连接的承载力$N_{n,est}$进行对比,见表2。其中N_{est}计算公式按式(2)计算。

$$N_{est}=\begin{cases}L\sum t f_{u,est} & \text{净截面破坏}\\ nF_{v,est} & \text{螺栓剪切破坏}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$f_{u,est}$为实测得到的铝合金材料极限强度；$F_{v,est}$为实测得到的螺栓双剪抗剪承载力。

各试件的破坏情况如表3和图5所示，模式基本与预期相同。LJ-1和LJ-2均为“31”螺孔至板件侧边处先发生断裂，然后沿Ⅰ—Ⅰ路径开裂，且实测极限承载力远小于预估承载力。LJ-4是先沿Ⅱ—Ⅱ路径开裂，部分螺栓退出承载，剩余螺栓受力增大，达到剪切强度发生螺栓剪坏。

表3　试件破坏情况

Tab.3　Test result of specimens

编号	破坏模式	N_u / kN	N_{GBk} / kN	N_{est} / kN	$N_{n,est}$ / kN	承载力比 / %		
						$\frac{N_u}{N_{GBk}}-1$	$\frac{N_u}{N_{est}}-1$	$\frac{N_u}{N_{n,est}}-1$
LJ-1	Ⅰ—Ⅰ截面拉断	526.52	222.65	793.98	674.75	136	−34	−22
LJ-2	Ⅰ—Ⅰ截面拉断	221.95	115.60	412.24	314.27	92	−46	−29
LJ-3	Ⅱ—Ⅱ截面拉断	484.10	404.36	486.39	446.26	20	−10	8
LJ-4	先Ⅱ—Ⅱ截面开裂后螺栓剪断	563.00	481.09	587.60	530.90	17	−13	6
LJ-5	螺栓剪断	279.91	218.81	297.60	297.60	28	−6	−6

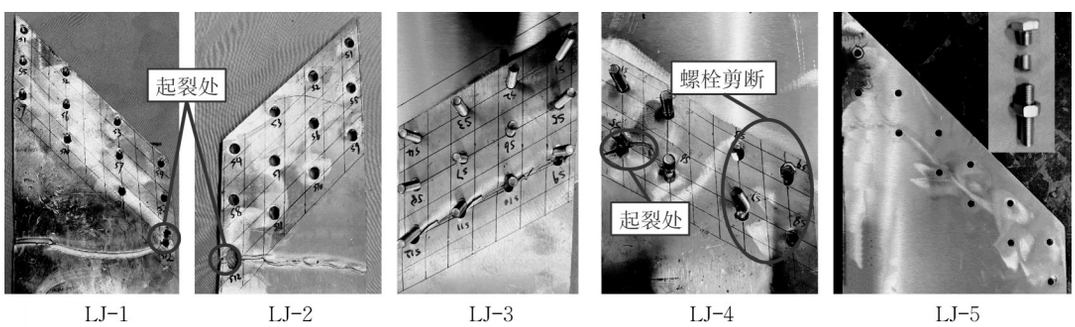


图5　各试件破坏模式

Fig. 5　Failure modes of specimens

实测得到的极限承载力均比《铝合金结构设计规范》[4]中的承载力标准值高17%以上，说明规范规定的设计方法具有一定的安全储备。其中5083-H112铝合金由于具有较长的强化段，其实测极限承载力远高于承载力标准值，最大能高出136%。但实测极限承载力均小于以材性试验结果计算得到的预估承载力，分析原因之一是材料性能存在一定的离散性。而实测极限承载力与同等螺栓数量下正交连接的预估承载力之间没有明显的规律，故不能直接简单地比较正交与斜交连接的承载性能，需要对斜交螺栓连接的承载力计算方法进行进一步的研究。

以位移计D1和D2测得的位移平均值为横轴，承载力为纵轴，绘出各试件的荷载-位移曲线，如图6所示。由图6可以看出，斜交螺栓连接的受力性能明显分为4个阶段：螺栓嵌固阶段、螺栓滑移阶段、孔壁承压阶段和失效阶段，与郭小农等[14]提出的螺栓连接节点刚度“四折线”理论简化模型一致。对于使用5083-H122板材的试件LJ-1、LJ-2，其荷载-位移曲线表现出更好的延性特征，而使用6061-T6板

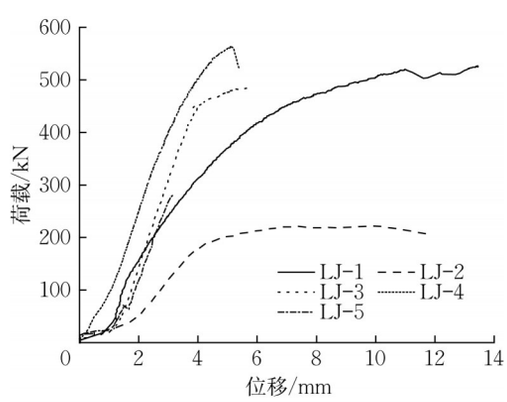


图6　各试件荷载-位移曲线

Fig. 6　Load-displacement curves of specimens

材的试件以及发生螺栓剪断的试件延性较差。

图7a展示了试件LJ-1夹板上S01～S04应变片的数据，4条曲线基本重合，表明试件处于均匀受拉状态，其余试件测得的夹板各应变曲线变化规律也都一致，此处不再重复展示。图7b展示了LJ-1试件螺栓旁的板件应变变化规律（部分应变片损坏，数据缺失），可以发现各螺栓的受力并不平均，极限状态时S12即“31”螺孔处的应变最大，能达到其余螺孔

平均应变的1.31倍。极限状态下,试件LJ-2、LJ-3、LJ-4和LJ-5在“31”螺孔处的应变分别为平均应变的1.47、1.56、1.43、2.24倍。但考虑到螺孔边应力梯度较大,应变片位置微小的偏差可能对结果产生较大影响,还需进一步分析螺栓内力分配情况。

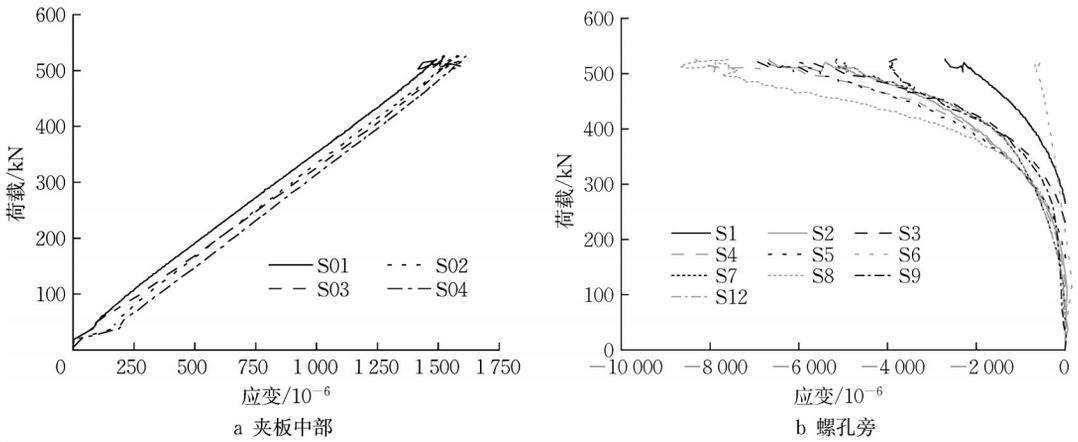


图7 LJ-1荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of LJ-1

3 斜交螺栓连接数值模型

3.1 模型建立

利用ABAQUS建立试件有限元模型,模型几何尺寸与试验试件尺寸一致,如图8所示。试件中部斜交布置的螺栓与螺孔中心对齐,施加1 kN预紧力。端部与加载装置连接的螺栓简化为圆柱,螺杆与孔壁贴合,设置绑定约束,螺栓顶面及底面分别耦合至该表面螺栓群中心。其余接触对设置摩擦系数为0.2的面面接触。加载方式采用位移加载:两个夹板一端RP点完全固定,对芯板端RP点施加位移,如图9所示。加密螺孔周围网格密度,采用C3D8R单元进行求解。

铝合金材料本构关系采用Ramberg-Osgood模型,研究表明,该模型可以准确描述国产结构用铝合金的本构关系[15]。螺栓的本构关系采用双折线模型,依据规范GB/T 3098.6—2010[16]中的规定确定,4.8级不锈钢螺栓的抗拉强度f_u^b为400 MPa、屈服强度f_y^b为320 MPa,A2-70不锈钢螺栓的抗拉强度f_u^b为700 MPa、屈服强度f_y^b为450 MPa。

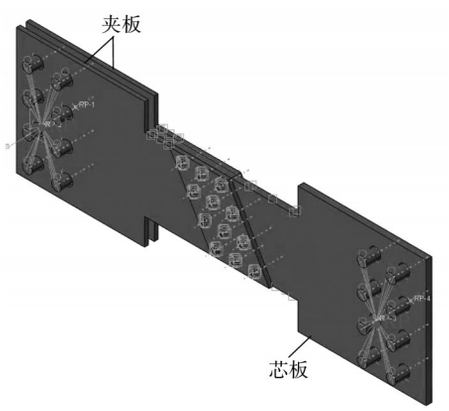


图8 斜交螺栓连接数值模型

Fig. 8 Finite element model of connection with diagonally arranged bolts

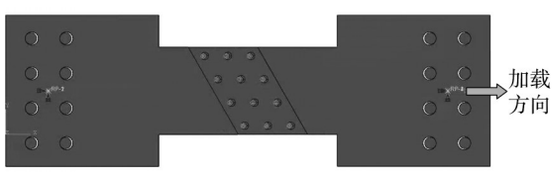


图9 数值模型边界条件设置

Fig. 9 Boundary of finite element model

3.2 模型验证

各组试件数值模型的荷载-位移曲线(去除滑移段)、极限承载力与试验结果的对比如图10和表4所示。数值模型的破坏模式与试验结果基本一致,极限承载力的误差不超过10%,由此可见本文所建立的有限元模型及参数设置是合理且可信的。

4 铝合金斜交螺栓连接参数分析

4.1 斜交螺栓连接简化模型

为对铝合金构件斜交螺栓连接进行进一步数值分析,对3.1节中建立的数值模型进行简化,忽略试件端部与加载装置连接处的构造,仅关注斜交连接处的受力情况,如图11所示。边界条件设置为两个

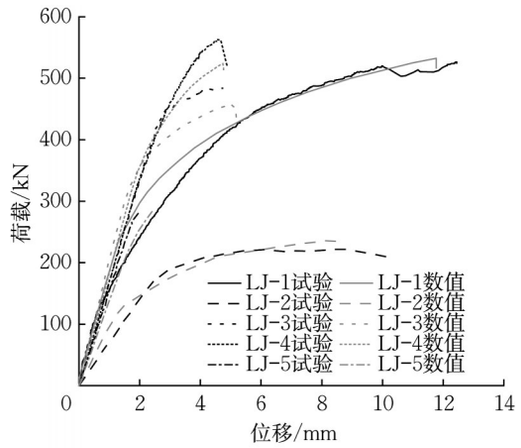


图10　数值模型与试验结果荷载-位移曲线对比

Fig. 10　Comparisons of load-displacement curves

表4　数值模型与试验结果极限承载力对比

Tab. 4　Comparisons of ultimate bearing capacity between the numerical model and the experimental results

编号	N_u / kN		$(\frac{N_u(数值)}{N_u(试验)}-1)/\%$
	数值结果	试验结果	
LJ-1	532.35	526.52	1
LJ-2	236.20	221.95	6
LJ-3	456.36	484.10	−6
LJ-4	523.76	563.00	−7
LJ-5	283.61	279.91	1

夹板端部完全固定,芯板端部中点与该面运动耦合,并被设为RP点,在RP点进行位移加载。其余设置均与3.1节中建立的数值模型相同。

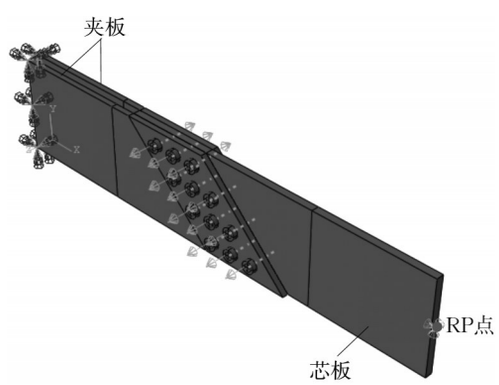


图11　铝合金构件斜交连接简化模型

Fig. 11　Simplified model of connection with diagonally arranged bolts

4.2　斜交螺栓连接螺栓内力分配规律

定义斜交螺栓连接中第i排j列螺栓的内力分配系数k_{ij}为

$$k_{ij}=nV_{ij}/V_{总} \tag{3}$$

式中:V_{ij}为第i排j列螺栓剪切面上的剪力;$V_{总}$为该剪切面上所有螺栓的剪力之和。

图12为一布置3排4列共12个螺栓的斜交连接数值模型的螺栓内力分配系数随位移的变化曲线,可以看出在加载初期螺栓受力分配十分不均匀。随着加载位移增大,螺栓受力分配情况趋于稳定,但仍存在一定的不平均现象。分析大量不同螺栓布置方式的数值模型,得到螺栓内力分配的一般规律:在同一列螺栓中,两端螺栓受力较大而中部螺栓受力较小;且两端的螺栓中,位于芯板内侧螺栓的受力较大,而靠近芯板边缘的螺栓受力较小。在同一排螺栓中,两端螺栓受力大于中部螺栓,且钝角处螺栓的受力大于锐角处螺栓的受力。螺栓内力分配示意如图13所示,其中F是螺栓群承受的总剪力,N_{ij}表示第i排j列的螺栓内力。

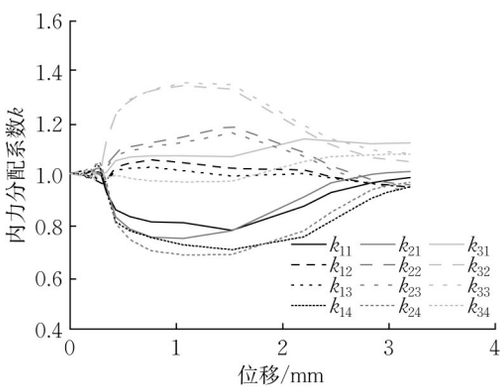


图12　螺栓内力分配系数变化曲线

Fig. 12　Curve of internal force distribution coefficient

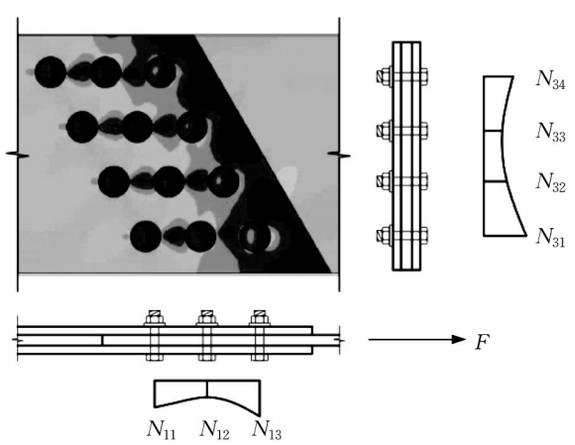


图13　螺栓内力分配示意图

Fig. 13　Schematic diagram of bolt internal force distribution

4.3　斜交螺栓连接螺栓内力分配参数分析

由表3可知,对于不同几何尺寸、不同材料的斜交螺栓连接,试验测得的连接承载力与预估值的比

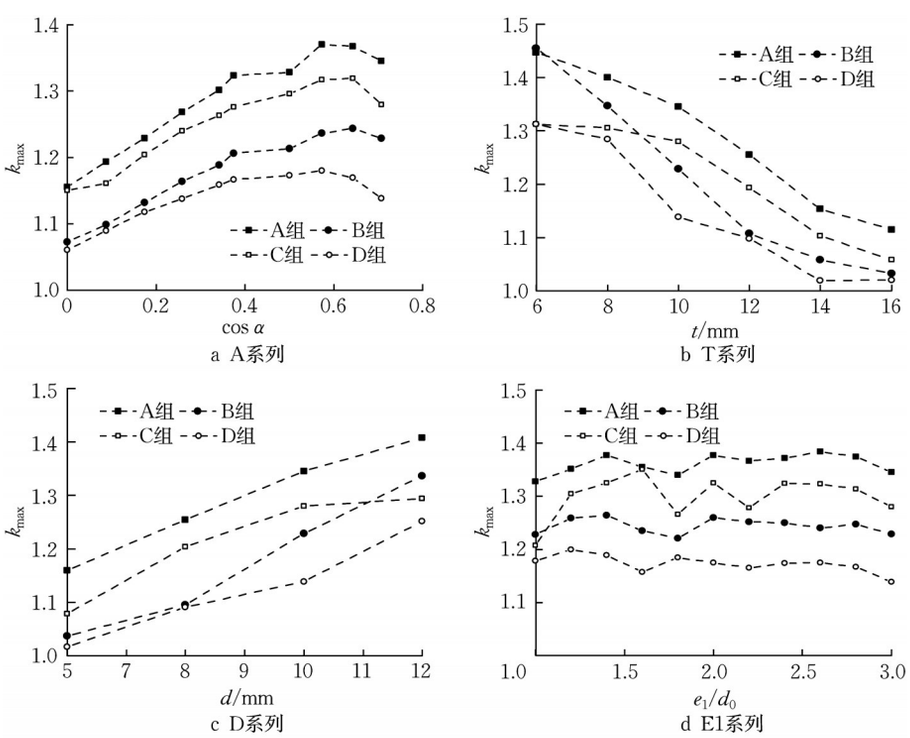
值也不相同,说明各连接下螺栓的内力不均匀分配程度有所不同。为研究连接的几何参数和材料属性对螺栓内力分配规律的影响,采用4.1节中的建模方法建立了3排4列共12个螺栓的斜交连接模型并进行分析计算。参数化分析各模型几何尺寸列于表5,取p_2*为0.5倍p_2,d_0=d+0.2 mm,每个系列模型包含铝板、螺栓材质各不相同的4组模型。A组:5083-H122铝合金板,A2-70不锈钢螺栓;B组:5083-H122铝合金板,4.8级钢螺栓;C组:6061-T6铝合金板,A2-70不锈钢螺栓;D组:6061-T6铝合金板,4.8级钢螺栓。

表5 螺栓内力分配参数分析模型几何尺寸

Tab. 5 Geometric dimensions of analytical model for bolt internal force distribution parameters

模型系列	α/(°)	t_1/mm	d/mm	e_1/d_0	e_2/d_0	p_1/d_0	p_2/d_0
A	45,50,55,60,65,70,75,80,85,90	10	10	3.0	2.0	3.0	3.0
T	45	6,8,10,12,14,16	10				
D	45	10	6,8,10,12				
E1	45	10	10	1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.2,2.4,2.6,2.8,3.0	2.0	3.0	3.0
E2				3.0	1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0	3.0	3.0
P1				3.0	2.0	2.0,2.2,2.4,2.6,2.8,3.0	3.0
P2				3.0	2.0	3.0	2.0,2.2,2.4,2.6,2.8,3.0

图14展示了各系列模型在极限状态时最大的内力分配系数k_{max}的变化规律,结果表明,螺栓最大内力分配系数即螺栓内力分配不均匀程度随板厚t、边距e_2、垂直内力方向中心距p_2近似线性减小,随斜交角度余弦值cos α、螺栓直径d近似线性增大,端距e_1和顺内力方向中心距p_1对螺栓内力分配情况影响较小。其中P2系列模型中,p_2/d_0=2.0时,k_{max}能达到1.79。故建议进行斜交节点的设计时,在满足规范要求和建筑要求的情况下应尽量增加螺栓边距和垂直内力方向中心距,选择较小直径螺栓,以使螺栓受力更加均匀。



a A系列 b T系列 c D系列 d E1系列

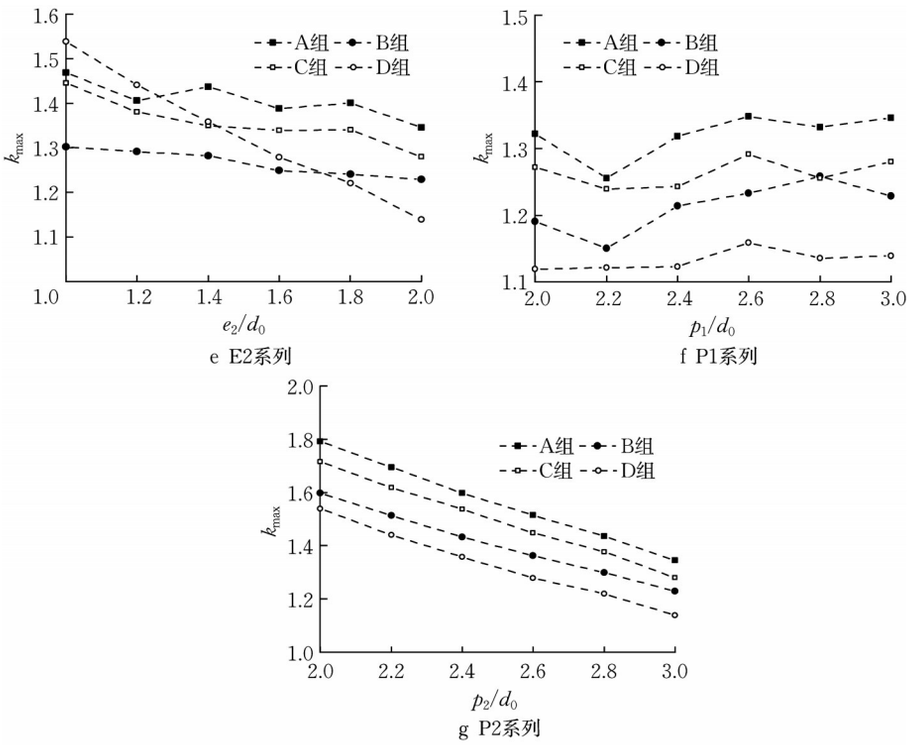


图14　各系列模型最大内力分配系数变化规律

Fig. 14　Influence of maximum internal force distribution coefficient on each series of models

基于上述参数分析结果拟合得到斜交螺栓连接最大螺栓内力分配系数k_{max}的计算公式为

$$k_{max}=\beta_1+\beta_2\cos\alpha+\beta_3\frac{t}{d}+\beta_4\frac{e_2}{d_0}+\beta_5\frac{b}{d_0} \quad (4)$$

式中：b为螺栓群的连接宽度，本文的数值模型中$b=3p_2$；$\beta_1\sim\beta_5$根据铝合金板和螺栓的材料类别按表6取值。

$k_{max,c}$为由式(4)计算得到的最大螺栓内力分配系数，$k_{max,m}$为数值模型的计算结果。$k_{max,c}$对于各系列数值模型，拟合优度R^2均达到0.95以上，$k_{max,c}$对$k_{max,m}$的相对误差分布如图15所示。由图15可知，所有误差均小于7%，证明拟合计算式的准确性较高。值得注意的是，该公式仅适用于本文所考虑的材料、尺寸范围，超出这一范围的连接性能还需进一步的验证。

表6　最大螺栓内力分配系数计算公式系数取值

Tab. 6　Coefficient value for calculating the maximum bolt internal force distribution coefficient

模型	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
A组	3.062	0.215	−0.345	−0.111	−0.144
B组	2.584	0.219	−0.411	−0.047	−0.109
C组	3.134	0.112	−0.295	−0.159	−0.148
D组	3.046	0.120	−0.302	−0.330	−0.110

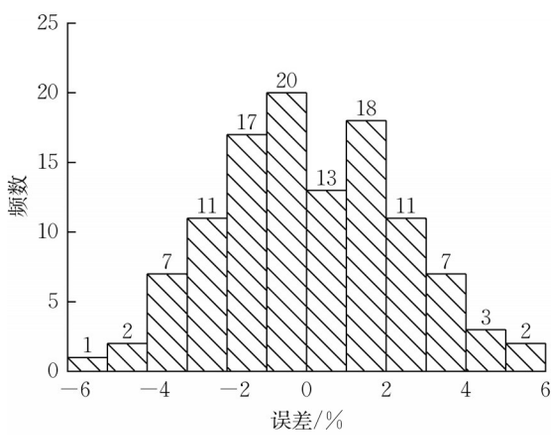


图15　拟合计算式的误差分布

Fig. 15　Error distribution of fitting calculation formula

5　结论

本文基于试验和数值模拟研究了工程实际中常见材料的铝合金斜交螺栓双剪连接的螺栓受力分配特性。主要结论如下：

(1)铝合金斜交螺栓连接中螺栓内力分布存在不均匀性。对于同一排或同一列螺栓，两端螺栓受力均大于中部螺栓，且距芯板端部边缘最远的螺栓受力最大，最大可达平均剪力的180%。

(2)内力分配不均匀程度随板厚t、边距e_2、垂直内力方向中心距p_2增大而减小,随斜交角度余弦值$\cos\alpha$、螺栓直径d增大而增大。

(3)基于上述受力特性和数值模拟结果,本文拟合得到最大内力分配系数计算式,该式在本文所讨论的材料范围、尺寸范围内具有较好的精度,对于今后实际工程中斜交螺栓连接设计具有指导意义。

作者贡献声明:

朱 亮:研究内容的整体规划,论文撰写。

唐子琳:试验研究,数值研究。

洪 祎:数值研究,论文审阅修改。

郭小农:论文审阅修改,技术和经费支持。

参考文献:

[1] 沈祖炎. 网架与网壳[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.
SHEN Zuyan. Grid structures and reticulated shells [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.

[2] 刘锡良. 国内外空间结构节点综述[R]. 天津: 天津大学, 2000.
LIU Xiliang. Overview of spatial structure nodes at home and abroad [R]. Tianjin: Tianjin University, 2000.

[3] 朱亮,宗绍晗,郭小农. 三沙广场铝合金遮阳顶棚结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 1137.
ZHU Liang, ZONG Shaohan, GUO Xiaonong. Structural design and analysis of the aluminum alloy sun canopy in sansha square[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 1137.

[4] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范: GB 50429—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of aluminium structures: GB 50429—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[6] 张贵祥, 石永久, 王元清. 铝合金结构的连接及其设计方法的分析[R]. 北京:清华大学, 2005.
ZHANG Guixiang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis of connection and design methods of aluminum alloy structures [R]. Beijing:Tsinghua Unversity , 2005.

[7] 张贵祥, 石永久, 王元清. 铝合金构件普通螺栓抗剪连接设计方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006,23(4): 19.
ZHANG Guixiang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis and design method of bearing strength of bolted connection in aluminum alloy[J]. Journal of Hebei University of Engineering, 2006,23(4): 19.

[8] 石永久, 张贵祥, 王元清. 铝合金构件普通螺栓连接同时抗拉和抗剪承载性能分析[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2007,20(4): 299.
SHI Yongjiu, ZHANG Guixiang, WANG Yuanqing. Load carrying properties of bolted connection in aluminum alloy which carried both tensile and shear force[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering), 2007,20(4): 299.

[9] 石永久, 张贵祥, 王元清. 铝合金结构螺栓连接的抗剪计算方法[J]. 建筑钢结构进展, 2008,10(1): 1.
SHI Yongjiu, ZHANG Guixiang, WANG Yuanqing. Shear resistance of bolted connection in aluminum structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008,10(1): 1.

[10] 王元清, 袁焕鑫, 石永久, 等. 铝合金板件螺栓连接承压强度试验与计算方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 203.
WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, *et al*. Experiments and computational method on bearing capacity of bolted joint for aluminum alloy sheets[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2011, 43(5): 203.

[11] 郭小农, 邱丽秋, 徐晗, 等. 铝合金受剪螺栓连接孔壁承压强度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 36.
GUO Xiaonong, QIU Liqiu , XU Han, *et al*. Bearing strength at bolt holes of aluminum alloy[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 36.

[12] 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.
CAO Shaocheng, YAN Yajie, WU Qiyu, *et al*. Research and application of shear resistance of stainless steel research and application of shear resistance of stainless steel[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(2): 315.

[13] 国家市场监督管理总局. 金属材料拉伸试验 第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[14] 郭小农, 熊哲, 罗永峰, 等. 铝合金板式节点弯曲刚度理论分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 144.
GUO Xiaonong, XlONG Zhe, LUO Yongfeng, *et al*. Theoretical study on bending stiffness of aluminum alloy gusset joint[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 144.

[15] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007,28(6): 110.
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, *et al*. Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy[J]. Journal of Building Structures, 2007,28(6): 110.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱: GB/T3098.6—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Mechanical properties of fasteners-bolts, screws and studs: GB/T3098.6—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.