

复合材料多排钉连接结构钉载分配规律

宋鑫 李伟 李桐 王成波 王博

Load distribution law in multi-bolts connected composite structure

SONG Xin, LI Wei, LI Tong, WANG Chengbo, WANG Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230926.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环境温度和间隙对复合材料-金属混合结构机械连接钉载分配的影响

Effects of temperature and clearance fit on the load distribution of composite-metal hybrid structures

复合材料学报. 2021, 38(12): 4228-4238 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210301.005>

碳纤维/树脂复合材料多钉连接钉载系数测试方法

Testing method of bolt load distribution in carbon fiber/resin composite multi-bolt joints

复合材料学报. 2019, 36(12): 2795-2804 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190514.001>

碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板干涉连接插钉轴向力建模与分析

Research on thrust force of carbon fiber reinforced epoxy resin composite laminates during the interference-fit bolt installation process

复合材料学报. 2019, 36(10): 2294-2301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190104.003>

微动损伤对复合材料螺栓连接预紧力松弛的影响

Effects of fretting damage on preload relaxation in bolted composite joints

复合材料学报. 2019, 36(2): 400-409 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180322.004>

分层对复合材料机械连接结构承载能力的影响

Bearing capacity of composite mechanical joint with hole delamination

复合材料学报. 2018, 35(1): 61-69 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170508.001>

基于分层理论的螺栓连接夹芯复合材料加筋结构振动特性

Vibration characteristics of reinforced sandwich composite structure with bolt connection based on layer-wise theory

复合材料学报. 2019, 36(12): 2815-2821 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190111.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230926.002

复合材料多排钉连接结构钉载分配规律



分享本文

宋鑫¹, 李伟², 李桐^{*1}, 王成波², 王博¹

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 针对复合材料多排钉连接结构实际强度破坏极限和破坏模式与传统工程算法不一致的问题, 本文以光纤螺栓试验手段为基础, 开展了复合材料连接结构钉载分配规律的研究。主要研究了钉载不对称、装配顺序、装配间隙等工艺特征对钉载分配的影响, 同时建立了高精度有限元模型进行对比研究。研究结果表明: 多排钉连接结构钉载不对称时会加剧钉载的不均匀分配; 装配顺序对钉载分配存在影响, 在装配螺栓时最后安装最外侧螺栓, 可以有效降低钉载分布差异; 连接结构存在一致装配间隙时的钉载分配与无间隙情况的载荷分配结果一致。同时, 本文发现通过试验手段测得关键螺栓的钉载占比最大比有限元结果高出 10%, 因此工程算法需要根据装配间隙等制造和工艺特征进行修正。

关键词: 光纤螺栓; 复合材料连接结构; 钉载分配; 有限元; 多排钉

中图分类号: V214.8; TB330.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)04-2148-09

Load distribution law in multi-bolts connected composite structure

SONG Xin¹, LI Wei², LI Tong^{*1}, WANG Chengbo², WANG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: To address the issue of inconsistencies between the actual strength and failure mode of composite multi-row nail connection structures and traditional engineering algorithms, this study investigated nail load distribution patterns in composite connection structures based on fibre optic bolt testing techniques. The study primarily examines the effect of process characteristics such as nail load asymmetry, assembly sequence and assembly clearance on nail load distribution, while also establishing a high-precision finite element model for comparative study. The results indicate that asymmetric nail loading in a multi-row nail connection structure exacerbates uneven nail load distribution. Assembly sequence affects nail load distribution, and installing the outermost bolt last during bolt assembly can effectively reduce differences in nail load distribution. Nail load distribution in structures with uniform assembly clearance is consistent with load distribution in structures with no clearance. Additionally, the study finds that the proportion of critical bolt nail loads measured through testing is over 10% higher than the finite element results, suggesting that engineering algorithms need to be modified based on manufacturing and process characteristics such as assembly clearance.

Keywords: optical fiber bolt; composite connection structure; nail load distribution; finite element; multi-row bolt

飞机结构中存在大量复合材料多排钉连接结构^[1-5], 现行飞机结构设计标准中, 多排钉连接结构承载计算使用传统的工程算法, 作为强度设计

时的参考理论解。但是, 复合材料连接结构钉载分配受到几何参数、制造误差等多种因素的共同影响, 实际破坏强度与工程算法计算结论大多数

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-09-15; 录用日期: 2023-09-19; 网络首发时间: 2023-09-27 10:35:28

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230926.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (12172077; 11825202); 大连市高层次人才创新支持计划 (2019RD04); 大连市科技创新基金 (2020JJ25CY011)

National Natural Science Foundation of China (12172077; 11825202); Dalian High-level Talent Innovation Support Program (2019RD04); Dalian Science and Technology Innovation Fund (2020JJ25CY011)

通信作者: 李桐, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料、工程力学等方面 E-mail: tong@dlut.edu.cn

引用格式: 宋鑫, 李伟, 李桐, 等. 复合材料多排钉连接结构钉载分配规律 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 2148-2156.

SONG Xin, LI Wei, LI Tong, et al. Load distribution law in multi-bolts connected composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 2148-2156(in Chinese).

时候并不一致,在实际应用中只能加大安全系数来提升结构可靠性,进而导致结构超重。完全反映现实制造和装配工艺的有限元模型可以得到相对准确的结果,但是分析成本大、制造与装配工艺无法完全在模型中得以体现,因此无法在飞机设计中得到全面使用。因此,如何通过试验的手段准确测量钉载分配并对传统的工程算法进行修正成为飞机结构多排钉连接方案设计的关键技术。

刘兴科等^[6]、刘向东等^[7]、Lawlor等^[8]均采用将应变片沿板宽均匀粘贴在螺栓之间的区域,通过测量该区域的平均应变来间接算出螺栓载荷的方法。但该方法假设所有载荷都由螺栓承载,忽略摩擦的影响。陈龙等^[9]、张明俊^[10]研究表明直接按应变测量结果计算复合材料连接结构钉载分配,仍然是一种间接的钉载测量手段。Stanley等^[11]、Liu等^[12]、张建宇等^[13]采用在螺栓内部开凹槽,将两个应变片相对于槽内剪切面沿45°粘贴,测量螺栓上的剪切应变来计算螺栓载荷的方法。但该方法对应变片粘贴技术要求高,且对螺栓的安装精度要求较高,安装角必须保证在±5°以内,且破坏了螺栓自身的几何特征,对钉载分配规律具有不可知的影响。上述以电测实验技术为基础的测量手段在面对多排螺栓连接结构时需要大量粘贴应变片,试验成本大、效率低。

谢鸣九^[14]针对多排单列连接结构开展研究,研究表明在常见的基本几何参数下,多于4排钉的连接对于降低最严重钉的承载比例作用很小。郑岩冰^[15]则对多排单列连接结构,研究宽径比、螺栓直径、螺栓间距等几何参数对载荷分配比例的影响趋势,并分析了不同参数对载荷分配比例影响的机制。龚潇^[16]同样针对多排单列连接结构,通过试验与有限元对比,研究表明螺栓拧紧力矩、几何参数对载荷分配的影响较小。

通过上述研究可以看出,开发一种可以方便快捷、准确测量连接结构螺栓载荷的试验方法十分必要。本文提出使用光纤螺栓来测量复合材料连接结构钉载分配的方法。该方法具有不影响原始结构、测量精度高、方便快捷的优点,同时该方法可以实现对螺栓载荷的实时监测。另外目前复合材料螺栓连接结构钉载分配的研究,多是对多排单列连接结构开展几何参数方面的研究,但对多排多列连接结构的钉载分配研究还不足。因此本文针对6排2列复合材料连接结构,利用

光纤螺栓通过试验手段对钉载分配进行研究,验证光纤螺栓技术的有效性和可行性,并基于商业有限元软件(ABAQUS, 2020, 法国)建立了考虑制造特征的有限元模型,探索了钉载不对称、装配间隙等特征对钉载分配的影响,为复合材料连接结构钉载分配研究提供依据。另外多螺栓连接结构不同的螺栓装配顺序会使结构产生不同的预紧内应力,因此本文设计了4种装配顺序,研究装配顺序对连接结构钉载分配的影响。

1 光纤螺栓技术

光纤光栅传感器因具有体积小、抗电磁干扰、测量精度高等独特优势,已经被广泛应用于各种大型结构的监测中^[17-21],大量应用证明了利用光纤光栅制作的各类传感器能够有效地对结构进行实时监测。

光纤传感器的检测原理是固定周期的光栅会反射固定波长的入射光。光栅的Bragg波长由下式决定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为芯模有效折射率; Λ 为光栅周期^[22]。当光纤光栅所处环境的温度、应力、应变或其他物理量发生变化时,光栅的周期或纤芯折射率将发生变化,从而使反射光的波长发生变化,通过测量物理量变化前后反射光波长 $\Delta\lambda_B$ 的变化,就可以获得待测物理量的变化情况。

光纤螺栓技术是通过将光纤光栅传感器埋入螺栓中(避开螺栓中性层)测量螺栓的轴向变形,通过标定系数进而反映螺栓所受的力。复合材料连接结构中光纤螺栓受到双剪作用,发生弯曲变形。因为光纤不在螺栓中性层,所以受弯时会有轴向变形,通过测定由弯曲引起的轴向变形,来反映螺栓所受的剪力。

光纤螺栓由光纤光栅传感器、固定头、引线及接口构成。光纤螺栓剖面结构如图1所示。

光纤螺栓的工作方式如图2所示,将光纤螺栓与解调仪相连,通过解调仪测得光纤光栅传感器内波长的变化,再将解调仪与软件连接,通过软件的参数设置及数据处理即可实时观测到螺栓的受力情况。本文采用光纤螺栓均为自主设计,委托沈阳智航公司加工制造。

由于解调仪监测的是光纤光栅传感器波长的变化,因此要想测得螺栓受力,需要在正式试验

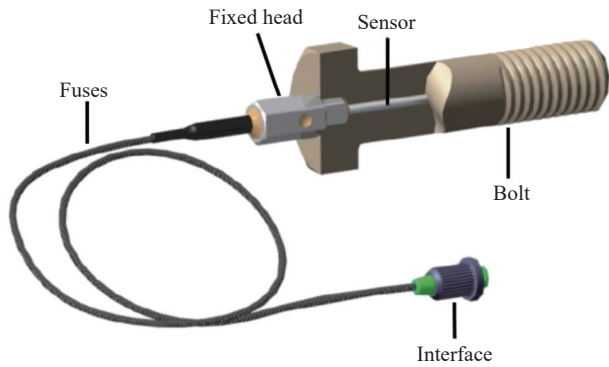


图1 光纤螺栓剖面结构图

Fig. 1 Structure diagram of fiber optic bolt plane

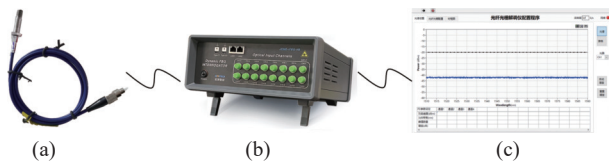


图2 光纤螺栓工作方式: (a) 光纤螺栓实物图; (b) 解调仪; (c) 软件解调界面

Fig. 2 Working mode of optical fiber bolt: (a) Physical diagram of optical fiber bolt; (b) Demodulation instrument; (c) Software demodulation interface

前,对光纤螺栓进行剪力系数标定试验,测得光纤螺栓对特定试验件的剪力系数。

2 试验设计

2.1 试验件

为验证光纤螺栓技术的可行性及研究钉载不对称、装配顺序及装配间隙对钉载分配的影响,特设计了3种6排2列的双搭接复合材料连接结构试验件,标准试验件结构尺寸如图3、表1所示,EC试验件首先用于钉载不对称研究,另外用于与AG试验件进行对比,研究装配间隙对钉载分配的影响,AS试验件用于装配顺序研究。试

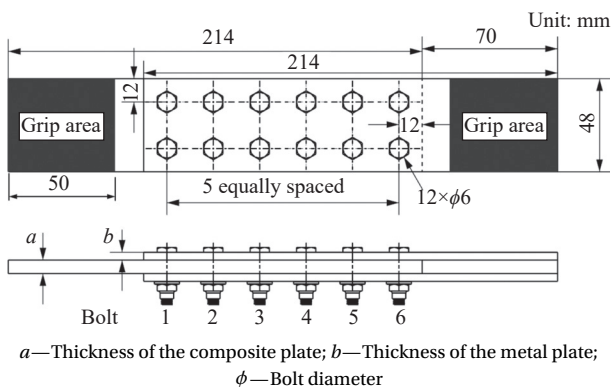


图3 6排2列标准试验件尺寸

Fig. 3 Six rows and two rows of standard test pieces

验件由上下金属板、中间复材板、金属垫片及螺栓构成。复合材料的铺层方式如表2所示。

表1 3种试验件尺寸参数

Table 1 Size parameters of three test pieces

Specimen	Assembly tolerance/mm	b/mm	a/mm	Ply method	Number of pieces
EC	0	4	7	1	5
AG	0.1	4	7	1	5
AS	0	3.5	3	2	1

Notes: EC test pieces are used for nail-loading asymmetry studies, and for comparison with AG test pieces to study the influence of assembly clearance on nail-loading distribution, and AS test pieces are used for assembly sequence studies.

表2 复合材料铺层方式

Table 2 Composite material lay-up mode

Ply method	Thickness/mm	Ply angle
1	7	[45/-45/0/-45/45/90/0/0/90/45/-45/0/-45/45] _{2S}
2	3	[45/-45/0/-45/0/45/0/-45/90/45/90/0] _S

试验件采用T800碳纤维,纤维树脂体系为CCF800H/AC631,纤维体积含量63vol%±3vol%,单层厚度为0.125 mm。金属板为铝合金7075-T7451,螺栓为钛合金TC4。

2.2 剪力系数标定

采用分级加载方式对光纤螺栓进行剪力系数标定,一次标定两个螺栓。标定试验在一个稳定的温度环境(温度变化很小)下进行,忽略温度对光纤螺栓的影响。由于封装工艺的影响,光纤螺栓在不同方向的变形会有不同,因此在剪力系数标定时需要找到光纤螺栓线性较好的方向并标记。光纤螺栓标定试验如图4所示。

DDL50 电子万能试验机(长春机械科学研究院)采用分级加载方式:拉伸开始前采集数据20 s,作为初始值,每5 kN,保载20 s,目标载荷20 kN。

提取波长,计算波长变化量。1#与2#光纤螺栓波长改变结果如图5所示。可知光纤螺栓波长改变量与外载荷变化十分吻合,在保载阶段光纤螺栓波长改变量同样保持水平,说明光纤螺栓具有良好的灵敏度,可以实时反映螺栓受力情况,并且波长变化十分稳定。

在标定试验中不对螺栓施加预紧力,忽略摩擦的影响,控制试验件在上下夹头位置一致,让试验件在加载过程中始终保持竖直。因此考虑认为在加载过程中外载荷始终被两个螺栓均分。在



图4 标定试验示意图

Fig. 4 Calibration test diagram

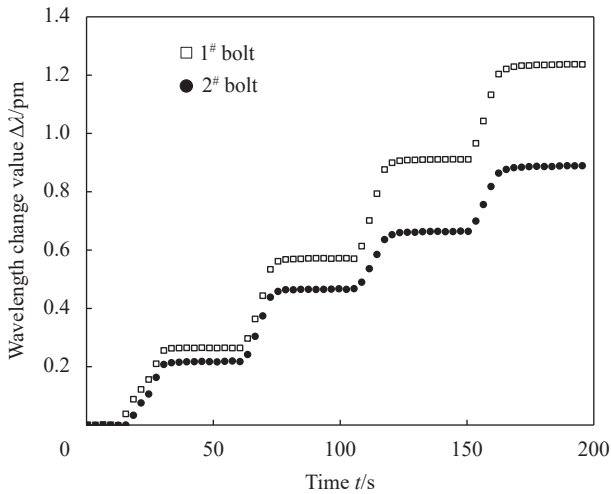


图5 1#、2#螺栓波长变化曲线

Fig. 5 Wavelength change curves of 1#, 2# bolts

此基础上提取波长改变量, 绘制散点图并进行线性拟合, 如图6所示, 可知光纤螺栓拟合结果 R^2 能够达到 0.99 以上, 说明该方向线性好、结果稳定。拟合曲线斜率即螺栓的剪力系数。

进一步观察图6剪力系数标定结果可以发现

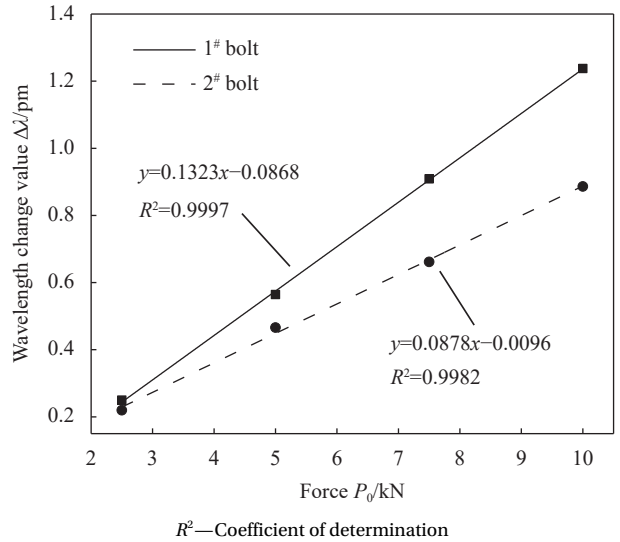


图6 1#、2#光纤螺栓剪力系数标定结果

Fig. 6 Calibration results of 1#, 2# fiber optic bolt shear coefficient

1#、2#螺栓斜率并不一致, 这是由于光纤螺栓封装工艺导致的, 不同光纤螺栓在受载时波长改变量并不一致。因此对试验所需的光纤螺栓都需要进行剪力系数标定试验。

在标定试验中, 光纤螺栓波长改变量与外载荷变化十分吻合, 说明测量结果能够很好地反映螺栓实际受力情况, 以此证明了光纤螺栓的测量精度及可靠性。

2.3 正式试验

在工程实际中 M6 螺栓施加的预紧力为 5~8 N·m^[23], Liu 等^[12]、郑岩冰^[15] 研究表明螺栓预紧力对复合材料连接结构钉载分配的影响可以忽略不计。为避免引进不必要的误差, 因此本文试验忽略预紧力的影响, 在正式试验中不对螺栓施加预紧力。

因为多螺栓连接结构长时间装配会导致一部分装配变形, 为排除非线性因素的干扰, 试验件需要一定的预拉伸, 所以设置加载范围为 10~40 kN。

3 仿真设计

为准确研究钉载不对称及装配间隙对钉载分配的影响, 并进一步与实验结果对照, 本文建立了两种三维有限元模型。依据圣维南原理, 有限元模型忽略了试验件的夹持区域, 结果表明简化是合理的^[24]。

3.1 材料模型

T800 级复合材料的单层力学性能如表 3 所示^[25-26]。为避免材料非线性特性影响研究结论,

表 3 T800 级复合材料单层力学性能^[25-26]

Table 3 Monolayer mechanical properties of T800 grade composites^[25-26]

Parameter	Value	Parameter	Value
E_1 /GPa	157	X_T /MPa	2 630
E_2 /GPa	8.5	X_C /MPa	1 480
μ_{12}	0.35	Y_T /MPa	62
G_{12} /GPa	4.2	Y_C /MPa	213
G_{13} /GPa	4.2	S_{12} /MPa	109
G_{23} /GPa	2.7	S_{23} /MPa	86

Notes: E_1, E_2 —Elasticity modulus in X, Y directions; G_{12}, G_{13}, G_{23} —Shear modulus in X, Y and Z directions; μ_{12} —X-Y planar Poisson's ratio; X_T, X_C —X-direction tensile and compressive strength; Y_T, Y_C —Y-direction tensile and compressive strength; S_{12}, S_{23} —X-Y and Y-Z planar shear strengths.

试验载荷远小于各部件的破坏载荷，以保证试验件一直保持在弹性水平，计算过程中仅考虑螺栓和金属板的弹性行为。螺栓材料为钛合金 TC4，弹性模量和泊松比为 110 GPa 和 0.31；金属板材料为铝合金 7075-T7451，弹性模量和泊松比为 70.3 GPa 和 0.33。

3.2 有限元模型、网格和边界

采用线性减缩实体单元 (C3D8R) 对螺栓和金属板进行建模，对复合材料采用连续壳 (SC8R) 单元。为保证数值预测的准确性和收敛性，在螺栓孔处设计细网格，在远离螺栓孔处采用粗网格，以降低计算成本。对于复合材料层合板，在厚度方向建立 4 层单元。图 7 和图 8 显示了两种典型的双层搭接接头、复合层压板和螺栓的网格示意图。

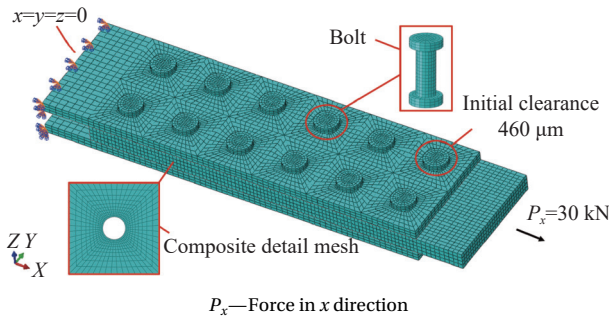


图 7 钉载不对称验证三维有限元模型

Fig. 7 3D finite element model of nail load asymmetry

图 7、图 8 在上下板左端施加完全约束，图 8 为建立对称模型，在对称边界处施加对称约束。为方便后处理与外力的施加，将复合材料右端面与参考点建立方程约束，约束 X 方向位移相等。图 7 在参考点处施加 X 方向 30 kN 的拉伸载荷，图 8 在参考点处施加 X 方向 15 kN 的拉伸载荷。通过输出复合材料板螺栓孔表面单元节点力作为

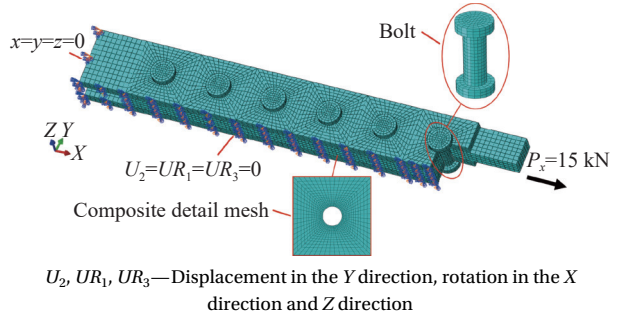


图 8 装配间隙验证三维有限元模型

Fig. 8 3D finite element model of assembly gap verification

螺栓载荷计算钉载分配。

3.3 接触条件

接触相互作用采用基于表面的接触模型，使用线性惩罚方法开展计算仿真。装配间隙的存在会导致复合板发生较大滑移，因此滑移计算采用小滑移公式，离散方法采用面对面离散。在 3 个部件之间定义了 3 种接触相互作用；复合板与铝板、铝板与螺母表面及复合板和铝板孔与螺栓杆接触。主从面设置如图 9 所示，复合板与铝板接触属性为硬接触，摩擦系数为 0.15^[27]；铝板与上下螺帽表面及复合板和铝板孔与螺栓杆接触为硬接触，摩擦系数为 0.1。

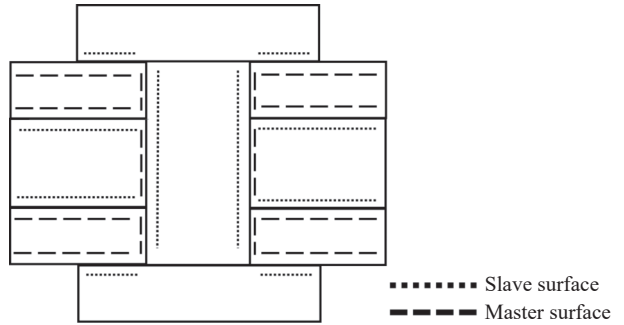


图 9 复合材料连接结构接触属性主从面示意图

Fig. 9 Schematic diagram of master/slave surfaces of contact properties of composite connected structures

4 结果与讨论

4.1 钉载不对称验证试验

采用 EC 试验件研究钉载不对称时对多列螺栓钉载分配的影响，为考察钉载不对称时对多列螺栓钉载分配产生多大的影响，同样研究了钉载对称时多列螺栓钉载分配情况进行结果对比，并建立有限元模型验证试验结果。

EC 试验件钉载不对称验证试验如图 10 所示。通过机械加工将一直径 6 mm 光纤螺栓加工为直

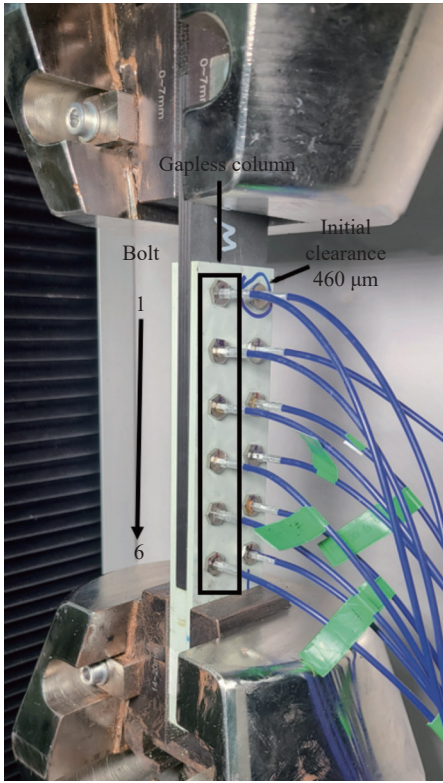


图 10 EC 试验件钉载不对称验证试验工装示意图

Fig. 10 Tooling diagram of EC test piece nail load asymmetrical verification test

径 5.64 mm, 并将其装配在 EC 试验件间隙列 Bolt 1 螺栓孔处, 使 EC 试验件间隙列 Bolt 1 螺栓孔处产生 460 μm 初始装配间隙, 保持其余光纤螺栓与螺栓孔装配公差均为 0 mm。因此对 EC 试验件来说, Bolt 1 螺栓处左右钉孔间隙不一致导致钉载不对称, 外载荷并不会被两列螺栓均分。钉载对称试验则为所有光纤螺栓与螺栓孔装配公差均为 0 mm。

图 11 为 EC 铝板位移云图。可知左右钉孔间隙不一致使铝板位移变得不对称, 主要影响 Bolt 1~Bolt 3 螺栓孔处位移, 对 Bolt 4~Bolt 6 螺栓孔处



U—Deformation displacement (mm)

图 11 EC 有限元模型铝板位移云图

Fig. 11 Displacement cloud of EC finite element model aluminum plate

位移几乎没影响。

表 4 为钉载不对称和钉载对称两种情况对无间隙列螺栓钉载分配影响的试验和有限元结果。表中螺栓载荷为钉载系数, 钉载系数定义为单个螺栓载荷占所有螺栓载荷总和的百分比。观察试验及有限元结果可知整体钉载分布趋势为两头大中间小的凹形趋势。由表 4 试验和有限元结果可知 Bolt 1 (图 3 包含螺栓分布定义) 为关键螺栓。对比观察 Bolt 2~Bolt 6 螺栓的试验结果发现两种情况的钉载占比变化很小, 但 Bolt 1 螺栓钉载占比比较大, 说明钉载不对称时对 Bolt 1 螺栓影响最为显著; 而有限元结果表明两种情况下 Bolt 2~Bolt 6 螺栓的钉载占比变化较大, Bolt 1 螺栓钉载占比变化很小, 说明钉载不对称时对 Bolt 1 螺栓影响并不显著。试验结果表明钉载不对称会导致无间隙列 Bolt 1 螺栓较钉载对称时承载增大 4.7%。有限元结果则为增大 1.3%。因此表明有限元模型并不能显著地反映钉载不对称时对关键螺栓的影响。观察表 4 合力试验结果可发现钉载不对称使无间隙列整体承载力较钉载对称时增大 14.7%。有限元结果增大 12.7%。另外观察钉载对称试验的合力结果可以发现 6 个光纤螺栓所测得合力为

表 4 EC 试验件无间隙列试验与有限元钉载分配结果

Table 4 Nail load distribution results of EC test piece gapless column test and finite element

Gapless column	Test		Finite element	
	Asymmetrical bolt load/%	Symmetrical bolt loads/%	Asymmetrical bolt load/%	Symmetrical bolt loads/%
Bolt 1	37.5	35.8	32.4	32.0
Bolt 2	16.6	16.8	16.3	15.2
Bolt 3	8.8	9.3	9.0	8.0
Bolt 4	4.3	5.3	7.3	7.2
Bolt 5	5.7	5.5	11.3	12.0
Bolt 6	27.1	27.3	23.7	25.6
Resultant force/kN	17.2	14.9	16.9	15.0

Notes: The EC test piece is loaded and unloaded three times, and the experimental data are the average of the three times data. The table provides information on the bolt load, which represents the coefficient for nail load. The coefficient for nail load is defined as the proportion of the load on a singular bolt to the total load on all bolts.

14.9 kN, 这与外载荷 30 kN 被两列螺栓均分十分接近, 也从侧面说明了光纤螺栓和标定试验的准确性。

4.2 装配顺序的影响

设计了 AS 试验件, 考虑 4 种装配顺序, 对比研究装配顺序对钉载分配的影响, 4 种装配顺序如表 5 所示。其中 Case 1 为从受力端依次安装螺栓; Case 2 为从两侧安装到中间螺栓; Case 3 为从中间安装到两侧螺栓; Case 4 为从固定端依次安装螺栓。

表 5 AS 试验件 4 种装配顺序

Table 5 Four assembly sequences for AS test pieces

Case	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
1	Bolt 1	Bolt 2	Bolt 3	Bolt 4	Bolt 5	Bolt 6
2	Bolt 1	Bolt 6	Bolt 2	Bolt 5	Bolt 3	Bolt 4
3	Bolt 3	Bolt 4	Bolt 2	Bolt 5	Bolt 1	Bolt 6
4	Bolt 6	Bolt 5	Bolt 4	Bolt 3	Bolt 2	Bolt 1

图 12 显示了 4 种装配顺序对钉载分配的影响, 其中虚线表示所有 6 个螺栓之间的载荷平均, 螺栓载荷表示为 6 个螺栓承载的百分比。由图可知大部分载荷由 Bolt 1、Bolt 2、Bolt 6 螺栓承担, 实验结果表明 Bolt 1、Bolt 2、Bolt 6 螺栓总承载占比达到 70% 以上, 装配顺序的改变对 Bolt 1、Bolt 2、Bolt 6 螺栓影响最为明显。对于中间 Bolt 3、Bolt 4、Bolt 5 螺栓装配顺序的改变使承载呈现上升趋势, 说明后安装 Bolt 1 螺栓可使中间螺栓分担更多载荷, 进而可以提高连接结构的整体承载能力。

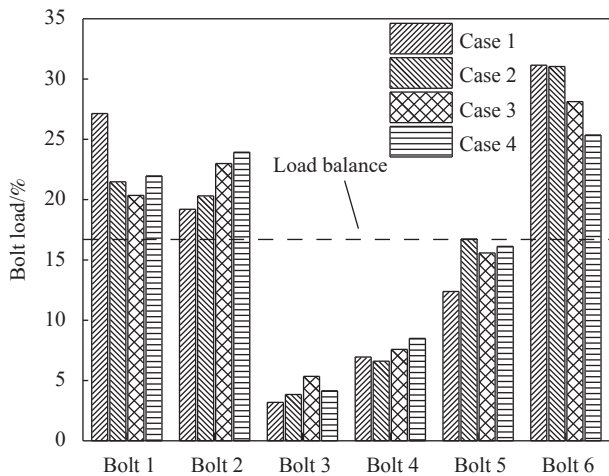


图 12 AS 试验件 4 种装配顺序的钉载分配试验结果

Fig. 12 Results of nail load distribution test of four assembly sequences of AS test pieces

在 Case 3 中, 即由内向外安装螺栓, 可以看到每个螺栓之间的载荷分担更加均匀。与 Case 1

相比对于主要承载的螺栓 (在此试验中是 Bolt 1 和 Bolt 6 螺栓) 载荷下降更加明显。Bolt 1 螺栓相比于 Case 1、Case 2 中分别降低 25%、5.2%。Bolt 6 螺栓作为关键螺栓, 螺栓载荷相比于 Case 1、Case 2 中分别降低 9.7%、9.4%, 进而表明由内向外安装螺栓可以提高整体连接结构承载能力达 9% 以上。

同样从固定端依次安装螺栓 (Case 4) 也会产生更均匀的载荷分布。Bolt 1、Bolt 2、Bolt 6 螺栓相比于 Case 1、Case 2 中螺栓载荷更加接近平均载荷。大部分载荷都由外侧 Bolt 1、Bolt 2、Bolt 5、Bolt 6 这 4 个螺栓承担, 总承载占比达 85% 以上。

4 种装配顺序的螺栓载荷标准差列在表 6 中, 可以发现 Case 3、Case 4 相较于 Case 1、Case 2 标准差明显降低, 说明采用 Case 3、Case 4 的装配顺序可以使螺栓载荷分布更加均匀, 提高连接结构的承载能力。因此在装配螺栓时, 最后安装外侧螺栓 (在此试验中为 Bolt 1 螺栓) 可以有效优化多排钉的载荷分配结果。

表 6 AS 试验件 4 种装配顺序螺栓载荷标准差结果对比
Table 6 Comparison of standard deviation results of bolt loads for four assembly sequences of AS test pieces

Case	Standard deviation/%
1	11.1
2	10.1
3	8.9
4	8.7

4.3 装配间隙的影响

通过设计 AG、EC 试验件对比研究了装配间隙的影响, 为保证实验结果的准确性, 每种试验件设计 5 件, 每件独立重复试验 2 次。为避免装配顺序的影响, 装配顺序统一采用第一种装配顺序 (Case 1)。本文使用了三维有限元模型验证光纤螺栓可以在实验中观察到装配间隙对钉载分配的影响, 同时工程算法采用刚度法^[28] 计算, 以进行对比, 如图 13 所示。实验结果表明不同装配间隙条件下, 总承载趋势仍然为两头大中间小的凹型趋势, Bolt 1、Bolt 6 螺栓承载占比最大, Bolt 2、Bolt 5 螺栓次之, Bolt 3、Bolt 4 螺栓承载占比最小。两个外侧螺栓承载占到总承载力的 60% 左右, 因此 Bolt 1 螺栓为关键螺栓, 承载力占到 38% 左右。试验得到的承载力趋势与有限元结果达到了很好的一致性, 从图中可以观察到 Bolt 2~Bolt 6 螺栓

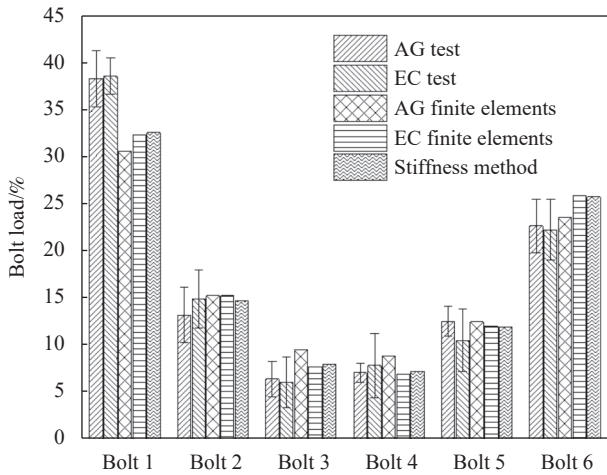


图 13 AG、EC 试验与有限元钉载分配结果

Fig. 13 Nailing distribution results of AG and EC test and finite element

的实验结果与有限元结果很接近, 而关键螺栓 Bolt 1 的试验承载结果比有限元结果偏大, 与实验结果相比有限元结果误差最大达到 10%。EC 有限元结果与刚度法计算的钉载分配保持高度一致。说明由于制造误差的存在, 不同螺栓孔与螺栓的配合精度会存在微弱差异, 而在多排螺栓连接结构中, 研究钉载分配时这种微弱差异会被放大, 实验结果表明螺栓承载误差最大为 $\pm 3\%$, 与刚度法计算结果相差达到 6% 以上。因此需要根据间隙特征修正仿真模型和工程算法。

AG 试验件配合间隙是同时存在, 在铝合金板与复合板摩擦系数较小的情况下, 板间相对位移产生所需要的载荷也是非常小的, 在这种情况下, AG 试验件一列的 6 个螺栓几乎是同时承载的, 从图 13 中可知试验与有限元结果均表明一致间隙的存在并不会显著影响钉载分配。

5 结论

设计了基于光纤光栅传感器的光纤螺栓来测量多排螺栓连接结构中不同螺栓的剪切力。针对典型的复合材料-铝合金连接工况, 研究了钉载不对称、装配顺序、装配间隙对复合材料连接结构钉载分配的影响。取得了以下结论:

(1) 标定试验表明光纤螺栓具有良好的线性和稳定性, 证明光纤螺栓可以准确测量螺栓所受的剪力;

(2) 多螺栓连接结构钉载不对称时会进一步加剧钉载的不均匀分配, 因此在工程实际中应避免钉载不对称情况出现;

(3) 对于多螺栓连接结构装配顺序会影响钉载

分布。在工程实际中最后安装最外侧螺栓, 可以降低钉载分布差异, 提高整体连接结构可靠性;

(4) 对于连接结构存在一致装配间隙时的钉载分配与无间隙的情况基本相同。然而间隙的存在导致仿真和理论结果与实验结果存在偏差, 误差最大达到 10%, 需要根据间隙特征修正仿真模型和工程算法。

参考文献:

- [1] THOPPULS D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—A review[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(3-4): 301-329.
- [2] GIRÃO COELHO A M, MOTTRAM J T. A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers[J]. *Materials & Design*, 2015, 74: 86-107.
- [3] DU A, LIU Y Q, XIN H H, et al. Progressive damage analysis of PFRP double-lap bolted joints using explicit finite element method[J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 860-869.
- [4] LI H S, GU R J, ZHAO X. Global sensitivity analysis of load distribution and displacement in multi-bolt composite joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 116: 200-210.
- [5] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6): 529-547.
- [6] 刘兴科, 李亚智, 刘向东, 等. 金属和复合材料多钉连接钉载分配研究[J]. *航空工程进展*, 2011, 2(2): 193-198.
LIU Xingke, LI Yazhi, LIU Xiangdong, et al. Study on load distribution of multiple-bolted metal to composite joints[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2011, 2(2): 193-198(in Chinese).
- [7] 刘向东, 李亚智, 舒怀, 等. 多钉连接钉载分配特性研究方法[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(1): 210-217.
LIU Xiangdong, LI Yazhi, SHU Huai, et al. Experimental and numerical study on the pin-load distribution of multiple-bolted joints[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(1): 210-217(in Chinese).
- [8] LAWLOR V P, MCCARTHY M A, STANLEY W F. An experimental study of bolt-hole clearance effects in double-lap, multi-bolt composite joints[J]. *Composite Structures*, 2005, 71(2): 176-190.
- [9] 陈龙, 陈普会. 复合材料-钛合金混合结构多钉连接钉载分布及有限元计算[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(5): 679-685.
CHEN Long, CHEN Puhui. Load distribution and finite ele-

- ment analysis of composite-to-titanium hybrid structure with multiple-bolted joints[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(5): 679-685(in Chinese).
- [10] 张明俊. 复合材料多钉连接有限元分析 [C]//第十八届中国科协年会. 北京: 中国科学技术协会, 2016: 114-118.
- ZHANG Mingjun. Research by finite element analysis on multi-fastened composite laminate[C]//The Eighteenth Annual Meeting of China Association for Science and Technology. Beijing: China Association for Science and Technology, 2016: 114-118(in Chinese).
- [11] STANLEY W F, MCCARTHY M A, LAWLOR V P. Measurement of load distribution in multibolt composite joints, in presence of varying clearance[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2002, 31(9): 412-418.
- [12] LIU F R, LU X H, ZHAO L B, et al. An interpretation of the load distributions in highly torqued single-lap composite bolted joints with bolt-hole clearances[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 138: 194-205.
- [13] 张建宇, 刘丰睿, 山美娟, 等. 复合材料多钉连接钉载矢量传感器 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1420-1427.
- ZHANG Jianyu, LIU Fengrui, SHAN Meijuan, et al. Instrumented bolt for load vector of composite multi-bolt joints[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1420-1427(in Chinese).
- [14] 谢鸣九. 复合材料多排机械连接钉载分配研究 [C]//第十五届全国复合材料学术会议. 北京: 国防工业出版社, 2008: 472-475.
- XIE Mingjiu. Analysis research on load distribution for multirow fastened joint in fibrous composites[C]//2008 National Conference on Composite Materials. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 472-475(in Chinese).
- [15] 郑岩冰. 复合材料多钉连接结构钉载分配比例研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- ZHENG Yanbing. Research on the bolt-load distribution of multi-bolt composite joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017(in Chinese).
- [16] 龚潇. 碳纤维复合材料机械连接载荷分配均匀化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- GONG Xiao. Research on the equalization of load distribution of carbon fibre composite bolt joints[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015(in Chinese).
- [17] LI H N, LI D S, SONG G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [18] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 31(4): 297-324.
- [19] OKAGAWA S, BERNUS P, NORAN O. Realtime health monitoring of composite structures using FBG sensors[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2022, 55(19): 157-162.
- [20] MA J X, PEI H F, ZHU H H, et al. A review of previous studies on the applications of fiber optic sensing technologies in geotechnical monitoring[J]. *Rock Mechanics Bulletin*, 2023, 2(1): 100021.
- [21] ROVERI N, CARCATERA A, SESTIERI A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60-61: 14-28.
- [22] 戎小戈, 章献民. 光纤光栅传感器原理及应用 [J]. *武汉科技学院学报*, 2003, 16(3): 42-45.
- RONG Xiaoge, ZHANG Xianmin. Principles and applications of fiber grating sensors[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2003, 16(3): 42-45(in Chinese).
- [23] 谢鸣九. 复合材料连接技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016: 202-203.
- XIE Mingjiu. Joint for composites materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016: 202-203(in Chinese).
- [24] MCCARTHY C T, GRAY P J. An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 287-298.
- [25] ILYAS M, ESPINOSA C, LACHAUD F, et al. Simulation of dynamic delamination and mode I energy dissipation[C]//7th European LS-DYNA Conference. Salzburg: DYNAmore GmbH, 2009: 1-7.
- [26] 许良, 涂宜鸣, 崔浩, 等. T800 碳纤维复合材料低速冲击渐进损伤仿真与试验研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2021, 61(6): 608-614.
- XU Liang, TU Yiming, CUI Hao, et al. Simulation and experimental research on progressive damage of T800 carbon fiber composites under low velocity impact[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2021, 61(6): 608-614(in Chinese).
- [27] ASTM. Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates: ASTM D5961/D5961M—13[S]. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- [28] 中国航空研究院. 复合材料连接手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1994: 75-78.
- Chinese Aeronautical Establishment. Composite connection manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994: 75-78(in Chinese).