

层合板多螺钉单剪连接钉载分配的试验研究

李鹏¹,周晚林¹,邵金涛¹,朱苏伟¹,李蓓²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 南京林业大学 经济管理学院,江苏 南京 210037)

摘 要:钉载分配是预测复材多钉连接强度和整体结构失效的关键,采用应变片测量间接获得了三钉单剪连接钉载分配比例,测量了单钉单剪连接的载荷-位移曲线和极限摩擦力,分析了钉载分配的影响因素。研究结果表明:相同条件下,首、尾钉载比例接近相同,约为36%,两者偏差<1%;钉-孔间隙影响最明显,拧紧力矩影响较大,夹紧面积影响较小。

关键词:复合材料;多钉连接;单剪;载荷分配;试验

中图分类号:V214.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0005-04

Experimental Study of Load Distribution in Single-lap, Multi-bolt Composite Joints

LI Peng¹, ZHOU Wanlin¹, SHAO Jintao¹, ZHU Suwei¹, LI Bei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Economic Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The load distribution is mainly used to predict the strength and failure of multi-bolt composite joints. The ratio of nail load distribution of three-nail single-shear connection is obtained indirectly by strain gauge measurement. The load-displacement curves of single-bolt, single-lap joint and critical friction forces are measured for researching on the influencing factors of the pin load distribution on the single-bolt, single-lap composite joints. The results show that under the same condition, the pin load ratio of the first and the last bolt is close to the same, about 36%, and the deviation ratio is < 1%; the effect of bolt-hole clearance on the load distribution is the most obvious, followed by bolt-torque, and the washer size has less influence.

Keywords: composites; multi-bolt joints; single-lap; load distribution; experiment

0 引言

多螺钉单剪连接已广泛应用于飞机的复材结构中。研究表明:由于复材层合板在失效之前呈现明显的线弹性行为,没有明显的塑性区,因此多钉螺栓连接在初始载荷时钉载的分配呈现严重不均匀性。钉载分配是预测多钉连接强度和复材结构整体失效的关键所在。目前,确定复材多钉连接钉载比例的方法主要有:解析模型预测法(如经典刚度法^[1-2]和弹簧质量法^[3-4])、有限元分析方法^[5-8]和试验测定法等^[9-14],其中试验测定法由于试验结果的可靠性强,在实际结构分析中得到广泛应用。

试验测定法一般采用压力传感器^[10-11]测量钉-孔的接触压力,使用带传感器螺栓直接测量钉载,采用表面应变计测量旁路载荷^[9,12-13],其中,带传感器的螺栓^[14]测量结果准确,但特制螺栓价格昂贵且不利于推广。应变计法精确性比带传感器的螺栓测量法稍低,但可以满足工程精度要求。本文采用文献[12]中修正次弯曲及摩擦力影响的测量方法,对多钉单剪连接进行试验测试,结果较为准确。

鉴于复材连接结构在设计时只有挤压失效是被允许的^[2],为避免多钉连接中某一钉出现较高的承载比例而导

致灾难性失效,应尽可能确保多钉连接结构钉载分配的均匀化。为此必须研究影响钉载分配的因素以及程度。影响复合材料多钉连接载荷分配的主要因素有:钉孔直径、钉孔排距、拧紧力矩、钉孔间隙、材料非线性等^[3,13-19]。考虑到航空装配中的空间和减重,应使得螺栓孔间隙和拧紧力矩的影响相对容易实现且效果较为明显^[3],但需要注意的是:飞机装配中要求钉孔间隙不超过钉孔直径的1%^[20-21];对不同直径的螺栓拧紧力矩还有严格的推荐值^[2]。目前,钉载分配影响因素中,钉孔间隙的研究较多^[12-14],但是对拧紧力矩、夹紧面积,特别是较为准确的试验研究较少。在此前提下,本文采用试验测量分析钉孔间隙、拧紧力矩、夹紧面积对多钉单剪连接钉载分配的影响。

1 钉载分配测试试验

1.1 试验件参数

本试验采用 T700/FRD-YG-40S 碳纤维增强环氧树脂基复合材料层压板,其力学性能如表1所示,铺层顺序为[45/-45/0/45/90/-45/0/45/0/-45/90/45/0]s,对称铺层,共26层,单层名义厚度0.14 mm,总厚度3.64 mm。试验测试紧固件采用 TC4 抗剪切型钛合金凸头螺栓,螺栓杆部名义直径为8 mm,螺栓基本力学性能如表1所示。

基金项目:国家自然科学基金项目(11072110)

第一作者简介:李鹏(1990—),男,四川松潘人,助理工程师,硕士研究生,研究方向为飞机复合材料结构。

表 1 材料属性

层合板									钛合金	
E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	E_1/GPa	ν
128	9.6	9.6	4.7	4.7	2.58	0.32	0.32	0.50	101	0.29

单钉单剪螺栓连接试验件尺寸见图 1(a);局部(胶层)尺寸见图 1(b);三钉单剪螺栓连接试验件尺寸见图 1(c)。其中,图 1(c)指示了本文试验使用的螺栓编号,后文分别用 1[#]、2[#]、3[#]表示。孔名义直径 8 mm,板宽度 W 、边缘间距 e 、螺栓孔间距 p 与螺栓直径 D 的比值分别为 $W/D=6$ 、 $e/D=3$ 、 $p/D=4.5$,直径与厚度之比为 $D/t=2.20$ 。试验件尺寸参考 ASTM^[22-24] 标准和文献[12]、文献[14]进行设计。

1.2 试验过程

单钉单剪螺栓连接拉伸试验在 SANS CMT5205/5305 微机控制万能力学拉伸机(最大拉伸载荷 100 kN)上进行,加载速率设置为 1 mm/min。拧紧力矩则通过高精度扭力扳手施加。

载荷分配的测量试验采用文献[12]的测量方法,在天辰 WES-100B 万能力学拉伸试验机上完成(最大拉力 100 kN)。每一种类型的试件均进行 5 组试验。采用 KD7016 静态应变测量仪测量 BFH120-3AA 应变片在给定

载下的应变值,间接测量三钉单剪螺栓连接钉载分配比例。复材层合板力学性能受温度影响,实验室温度控制在 $(22\pm 4)^\circ\text{C}$ ^[25-26]。参数设置见表 2。

对单钉单剪连接进行单向拉伸试验,得到: $D_w=16\text{ mm}$ (垫片外径), $P=15\text{ kN}$ 的极限摩擦力,见表 3。由于试验条件有限,5 N·m 以下数据误差可能较大。

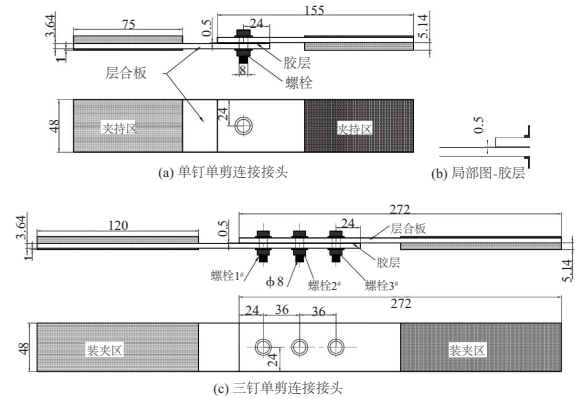


图 1 连接接头图(图中尺寸单位为 mm)

表 2 三钉单剪螺栓连接钉载分配测试参数配置

螺栓编号	配置 1			配置 2		
	间隙/ μm	拧紧力矩/(N·m)	垫片直径/mm	间隙/ μm	拧紧力矩/(N·m)	垫片直径/mm
1 [#]	0	2	16	0	2	16
2 [#]	0	2	16	80	2	16
3 [#]	0	2	16	0	2	16

表 3 试验测量极限摩擦力

$T/(\text{N}\cdot\text{m})$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{\max}/\text{N}$	166	272	396	558	750	910	1 095	1 285	1 480

2 测量结果分析

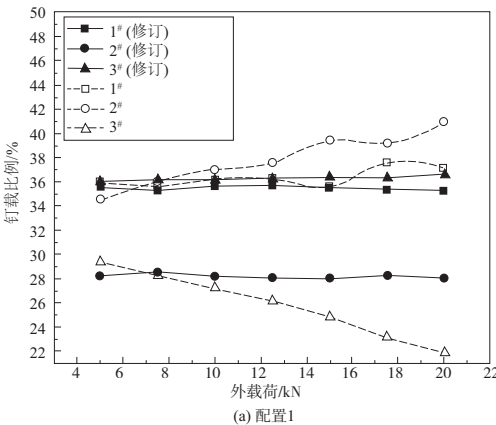
试验测量的复材层合板三钉单剪螺栓连接钉载分配比例结果见图 2。

从图 2 可以看出:钉载分配非常不均匀。其中,未经过次弯曲修正的结果规律不符合理论分析。通过应变修正次弯曲影响后的结果:图 2(a)中 1[#]钉和 3[#]钉钉载比例明显高于 2[#]钉;图 2(b)中 1[#]钉、3[#]钉的钉载比例较高且远高于 2[#]钉;在 5 kN 载荷时,由于拧紧力矩和 2[#]钉-孔间隙,导致 2[#]钉尚未完全与钉孔接触,2[#]钉载比例异常得小。次弯曲修正后的钉载分配结果与文献[3]理论计算以及文献[14]测量得到的规律吻合。

3 载荷分配影响因素

3.1 影响载荷分配因素分析

通过单钉单剪螺栓连接进行拉伸试验,测试不同间隙、拧紧力矩、夹紧面积下的载荷位移曲线。其中:80 μm



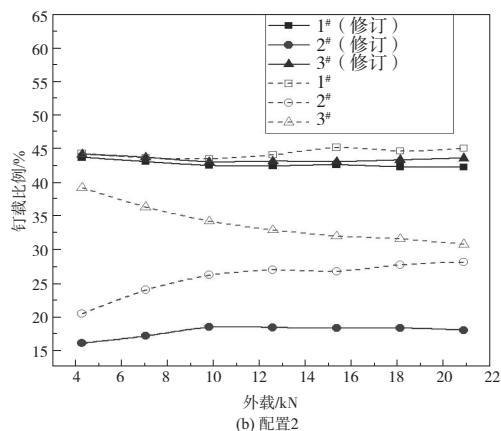


图2 三钉单剪载荷分配测量结果

孔间隙, $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 拧紧力矩, 不同夹紧面积 (垫片外直径: D_w) 条件下得到的载荷-位移曲线如图3所示。

图3中的结果表明: 1) 单剪螺栓连接螺栓承载和3个因素直接相关: 接头等效刚度、极限摩擦力、钉-孔之间的间隙; 2) 增大夹紧面积在保持摩擦力对螺栓承载影响的同时减缓孔周围等效接触刚度的强化。

根据已有的研究: 高拧紧力矩会导致螺栓抗剪切性能下降。过高的拧紧力矩容易产生灾难性失效—螺栓剪切失效, 如图4所示。故本研究选择最大拧紧力矩为 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ [2]。

为研究钉-孔间隙、拧紧力矩、夹紧面积等对三钉单剪连接载荷分配更具体的影响规律, 本研究分别设置不同参数, 进行定载荷拉伸试验测量钉载分配, 见表4。研究

采用单一变量 (例: 间隙研究中, 拧紧力矩为手拧, 约 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 垫片外直径为 16 mm)。

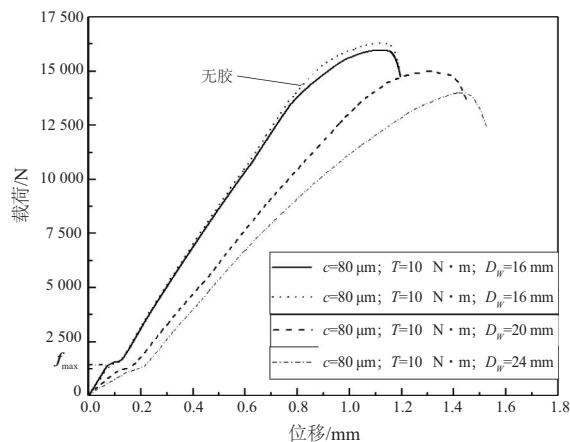


图3 试验得到的载荷位移曲线

图4 单钉单剪连接螺栓剪切失效 ($18 \text{ N} \cdot \text{m}$ 拧紧力矩)

表4 三钉单剪连接接头参数配置

配置	间隙/ μm			拧紧力矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)			垫片直径/ mm		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#
1	0	0	0	手拧	手拧	手拧	16	16	16
2	40	0	40	2	2	2	20	16	20
3	80	0	80	5	2	5	24	16	24
4	120	0	120	8	2	8			
5	160	0	160	10	2	10			

3.2 钉-孔间隙的影响

在 15 kN 外载荷下, 不同孔间隙组合三钉单剪螺栓连接钉载分配测量比例见图5。

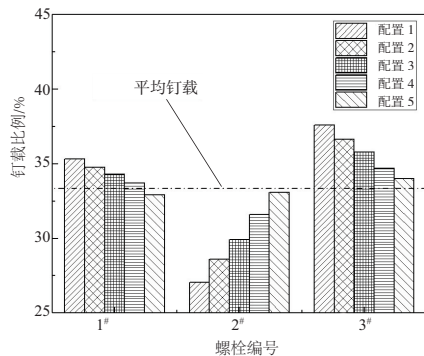


图5 钉孔间隙对三钉单剪螺栓连接钉载分配的影响

图5显示: 钉-孔间隙对钉载分配的影响显著, 其中参数配置5、2#钉首先出现挤压失效, 失效结果见图6。但是该配置的钉孔间隙已经远远超过航空装配要求, 所以在符合航空装配要求钉-孔间隙范围内, 对最终实现载荷均匀化、提高连接件整体承载能力的作用有限。

图6 孔失效位置 ($1^\#$ 、 $3^\#$ 钉-孔间隙 $160 \mu\text{m}$)

3.3 拧紧力矩的影响

在 15 kN 外载荷下,直接测量得到的三钉单剪螺栓连接不同拧紧力矩组合钉载分配测量比例见图 7。通过极限摩擦力修正后的结果见图 8。

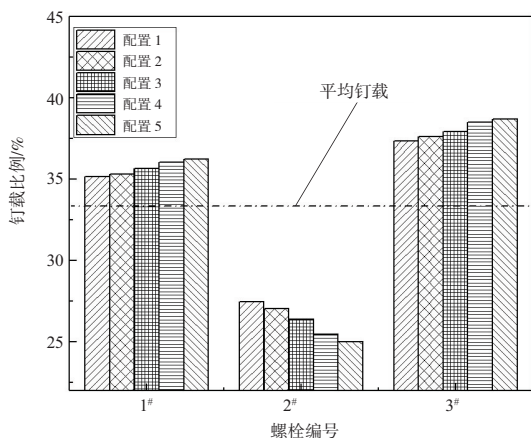


图7 直接测量拧紧力矩对载荷分配的影响

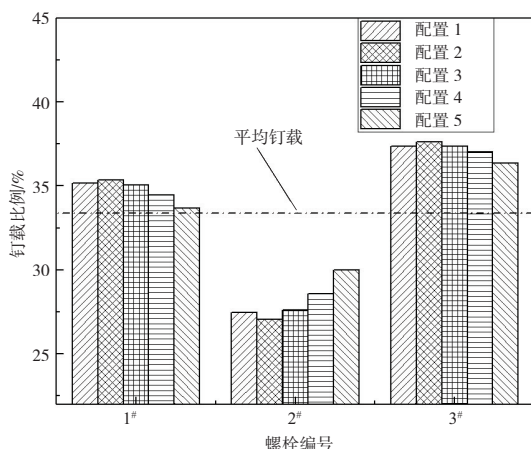


图8 极限摩擦力修正后影响规律

对比图7和图8不难发现:若直接采用测量得到表面应变来计算不同拧紧力矩下的钉载分配是不准确的。本文通过极限摩擦的修正,得到拧紧力矩对多钉单剪连接钉载分配的影响规律:在其他条件不变的前提下,增加某钉的拧紧力矩,可以减小该钉的钉载比例,且拧紧力矩对钉载分配有着较大的影响。

3.4 夹紧面积的影响

在 15 kN 外载荷下,三钉单剪螺栓连接不同夹紧面积组合钉载分配测量比例见图 9。

较高的拧紧力矩导致较高的侧向约束压强,对于接头处的等效刚度有增强作用,通过增大夹紧面积可以减弱拧紧力矩对等效刚度的强化。图9显示:在相同的高拧紧力矩作用下,增大1#、3#钉的夹紧面积,对载荷均匀化的影响虽然不如钉-孔间隙和拧紧力矩作用明显,但是有一定的效果,即增加某钉处夹紧面积可以适当减小该钉的钉载比例。

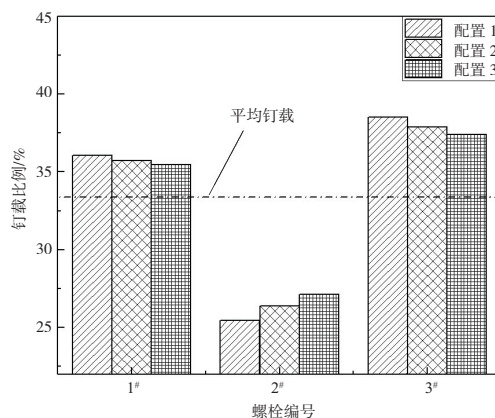


图9 夹紧面积对三钉单剪螺栓连接钉载分配的影响

4 结语

1) 本文在考虑单剪偏心载荷导致的弯曲基础上,利用改进的应变计测量法,对三钉单剪螺栓连接钉载分配进行试验测量。研究发现,该改进的方法测量层合板多钉单剪连接有更好的准确性和实用性,相比于有限元模拟具有较高的可信度,对比其他试验测量的方法,该方法成本较低,操作难度较低且易于工程推广。

2) 通过改进的测量方法,找到了影响三钉单剪螺栓连接钉载分配的因素,其中:初始钉-孔间隙对钉载分配比例影响最大,但是航空装配对孔间隙要求高,所以该因素在飞机装配中对载荷均匀化作用有限。

初始拧紧力矩对钉载分配也有着较为明显的作用。但需要注意的是:高预紧力伴随着强化钉孔等效接触刚度,随着载荷增加,拧紧力矩的作用也越来越不明显;此外,高拧紧力矩会增加螺栓剪切失效的风险,需避免。增加夹紧面积(通过改变垫片外径),对调节钉载分配有一定的作用。

参考文献:

- [1] 赵丽滨,徐吉峰. 先进复合材料连接结构分析方法[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2015.
- [2] 谢鸣九,黎观生,章怡宁. 复合材料连接[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2011.
- [3] 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.
- [4] XIANG J, ZHAO S, LI D, et al. An improved spring method for calculating the load distribution in multi-bolt composite joints[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 117:1-8.
- [5] GRAY P J, MCCARTHY C T. A highly efficient user-defined finite element for load distribution analysis of large-scale bolted composite structures[J]. Composites Science & Technology, 2011, 71(12):1517-1527.
- [6] CHENG X, WANG S, ZHANG J, et al. Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method[J]. Composite Structures, 2017, 160:8-15.

(下转第 39 页)

表 1 不同算法下点云配准结果比较

点云名称	传统 ICP 算法		本文配准算法		点云数量
	配准时间/s	配准误差/m	配准时间/s	配准误差/m	
头皮模型	85	4.38×10^{-3}	46	7.56×10^{-4}	40 000 左右
是否配准	否		是		

```

ICP has converged:0 score: 208.925
0.952755 -0.295923 0.0684685 -46.125
0.271002 0.929985 0.248368 1.09811
-0.137172 -0.218079 0.966243 -15.2987
0 0 0 1

```

图 10 获得的旋转矩阵

4 结语

基于深度相机的神经导航注册算法能够在保证精度的情况下,快速地将图像空间与实际空间进行注册,通过 PCA 坐标转换的方法快速完成粗配准,利用 CPD 精配准完成神经导航面注册。本文通过模型对算法进行验证,已证明该算法有较好的配准精度和配准速度,但还未进行临床实验,临床实验还需考虑诸多问题,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 白晶. IGS 系统注册导航和术前计划问题的研究[D]. 北京:清华大学, 2007.
- [2] KART E, STOLL J, JOAN D, et al. Assessment of registration accuracy during computer-aided oncologic limb-salvage surgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2015, 10(9):1469-1475.
- [3] 张丽霞. 基于 Kinect 的神经外科手术导航中配准技术的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [4] FAN Y, JIANG D, WANG M, et al. A new markerless patient-to-image registration method using a portable 3D scanner[J]. Medical Physics, 2014, 41(10):101-109.
- [5] 苏文魁, 张毓笠, 李冬梅, 等. 手术导航系统及其应用概述[J]. 中国医疗器械杂志, 2010(4):284-288.
- [6] 李建勇, 刘雪梅, 刘雄. 基于 XTION 的机器人室内三维地图实时创建[J]. 机械与电子, 2017(4):71-75.
- [7] 赵夫群, 周明全, 耿国华. 颅骨点云模型的局部特征配准方法[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(8):1120-1127.
- [8] 王育坚, 吴明明, 高倩. 基于保局 PCA 的三维点云配准算法[J]. 光学技术, 2018, 44(5):53-59.
- [9] MYRONENKO A, SONG X. Point set registration: coherent point drift[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(12):2262-2275.

收稿日期:2019-03-25

(上接第 8 页)

- [7] 赵美英. 复合材料机械连接失效分析及强度影响因素研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [8] 张纪奎, 马志阳, 程小全, 等. 复合材料三钉单搭连接有限元模拟与钉载分布[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3):179-183.
- [9] 刘向东, 李亚智, 舒怀, 等. 多钉连接钉载分配特性研究方法[J]. 复合材料材料学报, 2013, 30(1):210-217.
- [10] FEO L, MARRA G, MOSALLAM A S. Stress analysis of multi-bolted joints for FRP pultruded composite structures[J]. Composite Structures, 2012, 94(12):3769-3780.
- [11] 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.
- [12] 李鹏, 周晚林, 李蓓, 等. 考虑间隙和拧紧力矩的复合材料钉载分配均匀化方法[J]. 航空学报, 2019, 40(3):290-301.
- [13] 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.
- [14] MCCARTHY M A. An experimental study of bolt-hole clearance effects in single-lap, multi-bolt composite joints[J]. Journal of Composite Materials, 2005, 39(9):799-825.
- [15] 董大龙, 周翔, 汪海, 等. 分层对复合材料机械连接结构承载能力的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):61-69.
- [16] TAHERI Behrooz F, KASHANI A R S, HEFZABAD R N. Effects of material nonlinearity on load distribution in multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures, 2015, 125:195-201.
- [17] 谢宗燕, 李想, 郭家平, 等. 考虑间隙配合的复合材料钉载分配均匀化方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4):806-813.
- [18] 孙永波, 董艇舰, 刘昕, 等. 复合材料层板沉头连接钉载分配影

响因素研究[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(3):57-61.

- [19] LANGELLA A, CARBONE R, NELE L, et al. An analytical closed-form model to evaluate the peel and shear stresses in middle plane for adhesively bonded composite single-lap joints[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(1):3-17.
- [20] HYER M W, KLANG E C, COOPER D E. The effects of pin elasticity, clearance, and friction on the stresses in a pin-loaded orthotropic plate[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(3):190-206.
- [21] 岳烜德, 安鲁陵, 云一坤, 等. 液体垫片对复合材料单搭接螺栓接头力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):50-60.
- [22] Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates: ASTM D5961 [S]. US: ASTM International, 2013.
- [23] Standard test method for open hole tensile strength of polymer-matrix composite laminates. ASTM D5766/D5766M-11 [S]. US: ASTM International, 2013.
- [24] Standard terminology for composite materials: ASTM D3878-2007 [S]. US: ASTM International, 2007.
- [25] ARMANIOS E A, BUCINELL R B, WILSON D W, et al. Temperature effects on ultimate bearing strength of polymeric composite joints[J]. Journal of Composites Technology & Research, 2002, 24(1):17-23.
- [26] WALKER S. Thermal effects on the pin-bearing behavior of IM7/PETI-5 composite joints[J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(23):2623-2651.

收稿日期:2019-03-14