

液体垫片对复材-铝单搭接接头拉伸性能的影响

叶鑫, 安鲁陵, 岳烜德, 王楚凡

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 由于复合材料受本身性质以及成型工艺方法复杂性的限制,其构件的制造精度偏低,与铝合金构件装配时配合面间会产生装配间隙,而液体垫片可以很好地起到补偿效果。以复合材料-铝合金单搭接接头为研究对象,利用3D-DIC技术测量接头拉伸的实验过程,通过有限元分析与实验对比来研究强迫装配与液体垫片补偿对复合材料-铝合金单搭接接头拉伸刚度与峰值载荷的影响。研究表明:强迫装配时,接头拉伸载荷与刚度随着间隙的增大均减小;液体垫片补偿后,随着垫片厚度的增加,接头峰值载荷增大,拉伸刚度减小,但是与强迫装配时比较都增大。

关键词: 飞机装配;液体垫片;复合材料;3D-DIC;有限元分析

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)01-0021-04

Effect of Liquid Shim on Mechanical Properties of Composite-Aluminum Single Lap Joint

YE Xin, AN Luling, YUE Xuande, WANG Chufan

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Due to the limitation of the properties of composite materials and the complexity of forming process, the manufacturing accuracy of its components is low. The assembly gap between the composite and the aluminum components will occur when they are assembled, and the liquid shim is able to play an effective role in compensation. With the composite-aluminum single lap joint as the research object, the tensile test process of the joint was measured by 3D-DIC technology. The effects of forced assembly and liquid shim compensation on the tensile stiffness and peak load of the composite-aluminum alloy single lap joint were studied by comparing the finite element method with the experiment. The conclusions are as follows: the tensile load and stiffness of joints decrease with the increase of clearance in forced assembly, and the peak load of joints increases while the tensile stiffness decreases with the increase of the thickness of gaskets after compensation of liquid shim, but both increase in comparison with forced assembly.

Keywords: aircraft assembly; liquid shim; composite; 3D-DIC; finite element

0 引言

复合材料因其具有比强度、比刚度高,耐腐蚀好等特性,在飞机结构中发挥着独特的作用^[1]。而铝合金材料作为当前主要的航空工程材料,在飞机制造中仍占有较高的比例。因此复合材料与铝合金之间的连接情况越来越多,尤其在对形状和位置精确度要求较高的飞机装配中,复合材料与铝合金的装配质量就变得越来越重要。

复合材料与铝合金构件连接装配时,因为制造以及装配的偏差,两者配合面间会产生装配间隙。一般采用液体垫片补偿的方法。然而工程上现行的复合材料装配间隙补偿工艺主要依据操作者的观察和经验,缺乏理论指导和科学依据,如波音和空客公司都曾对已生产飞机进行检查,其中部分质量不合格问题是由垫片设计不合理造成的^[2]。

目前研究液体垫片对复合材料接头拉伸性能的影响已有不少成果, DHÔTE J X 等^[2]人通过采用三维数字图像技术测量使用液体垫片后结构表面的应变和二次弯曲。结果表明,液体垫片层的引入增大了弯曲变形,改变了层内应变集中分布区域,造成了接头拉伸刚度与峰值载荷的下降,且下降的幅度与垫片厚度成正比。LIU L 等^[3]人研究了当液体垫片厚度在 0.5 mm~1.0 mm 范围内时,对复合材料-钛合金结构承载能力的影响较小,加液体垫片后连接件的承载能力比不加垫片时高。崔雁民^[4]通过有限元仿真分析了复合材料-钛合金液体垫片补偿后的力学性能,得出液体垫片能够很好地缓解孔边应力集中的现象、降低厚度方向上应力的结论。CHENG L 等^[5]研究了非均匀间隙螺栓连接的填隙效应,得出液体垫片具有较强的粘聚力,提高了接头的刚度。岳烜德等^[6]研究了复合材料单搭接螺栓接头在液体垫片补偿后的拉伸力学性能,研究得出:接头的拉伸刚度与峰值载荷随着液体垫片厚度的增

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975280);国家商用飞机制造工程技术研究中心项目(COMAC-SFGS-2018-3008);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20180510)

第一作者简介: 叶鑫(1995—),男,浙江绍兴人,硕士,研究方向为飞机装配技术。

加均有所降低。

本文以复合材料-铝合金单搭接接头为研究对象,在0~2.0 mm 大间隙下,系统研究强迫装配和液体垫片对接头力学性能的影响规律。使用3D-DIC全场应变测量系统监测构件表面的三维应变场和变形,同时利用仿真软件建立三维有限元模型,并与试验对比,研究液体垫片补偿对复合材料-铝合金接头拉伸刚度、峰值载荷、表面应变分布的影响规律,进而提高复合材料-铝合金装配连接的质量和性能。

1 实验研究

1.1 问题描述

在飞机装配结构中,复合材料与铝合金装配结构广泛存在,例如在复合材料翼盒^[7]装配结构中,复合材料固化成型的壁板与铝合金翼肋之间就存在装配关系,并且以单搭接的形式连接,如图1所示。

针对在单搭接接头中引入装配间隙的问题,采用钢垫片制造均匀装配间隙,并使装配间隙沿试件横向贯通,如图2所示。

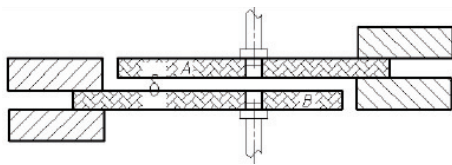


图1 单搭接示意图

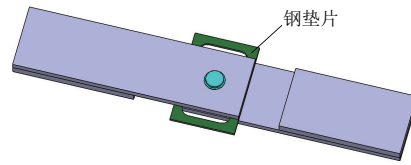


图2 钢垫片制造间隙示意图

1.2 试样制作

实验使用的复合材料为CYCOM 977-2-35-24K/IMS-194,单层名义厚度为0.188 mm,铺层顺序为[45/90/-45/0/90/0/-45/90/45/-45]_s,共铺叠20层,厚度为3.76 mm,孔的直径为6.35 mm。其力学参数参考文献[6],如表1所示。铝合金试样采用的材料是7050-T7,弹性模量为72 GPa,泊松比为0.33,厚度为4 mm。试样尺寸根据ASTM D5961^[9]标准确定,基本尺寸如图3所示,紧固件采用HST10抗剪型钛合金高锁螺栓,材料为Ti6Al4V,弹性模量为110 GPa,泊松比为0.29,连接时保证施加在试样上的压力保持在8000 N左右。

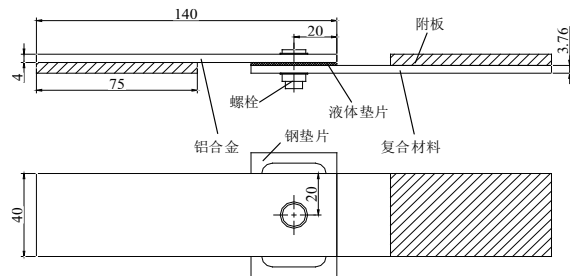


图3 铝合金-复合材料接头尺寸

表1 材料性能参数

材料参数	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}
数值	156	8.35	8.35	4.20	4.20	2.52	0.33	0.33	0.55

表2 强迫装配下复合材料-铝合金单搭接接头峰值载荷和拉伸刚度实验值

间隙/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
峰值载荷/kN	17.5	15.6	15.5	15.4	15.3	15.1	15.0	14.9	14.7	14.5	14.4
拉伸刚度/(kN/mm)	20.7	13.0	12.7	11.7	11.3	10.9	10.1	9.80	9.58	8.70	8.27

实验使用液体垫片牌号为Henkel Loctite Hysol EA9394,其基本性质如图4所示^[9]。制作垫片层时,首先在复合材料构件上加入具有一定厚度的钢垫片,然后将配置好的液体垫片涂抹在复合材料构件表面,使用隔离剂将其铝合金构件隔开,最后用C型夹加压、固定两块构件,去除流出的多余液体垫片,在室温条件下固化80 h。等液体垫片固化完成后,再进行制孔连接等操作。

1.3 实验操作

拉伸实验使用的是SANS CMT520/5305万能实验机,最大拉力为100 kN。实验采用某公司的3D-DIC系统对构件的表面应变和面外变形进行了全场三维测量,如图5所示。该系统以数字图像相关技术为基础,实现了非接触

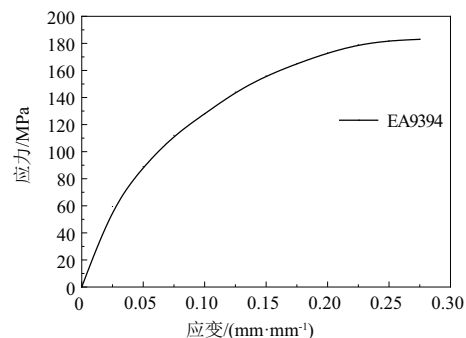


图4 EA9394的应力-应变关系

式三维测量。测量需要两个CCD工业相机和光源。实验前需要对复合材料板和铝合金板喷上白色底漆,再在白色

底漆上喷洒黑色小斑点制作成散斑,如图 6 所示。

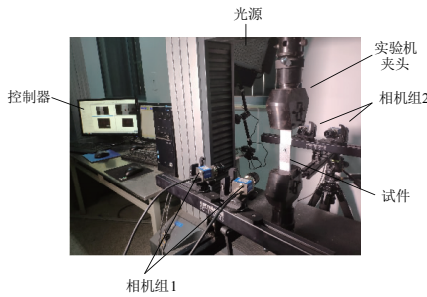


图 5 拉伸实验示意图

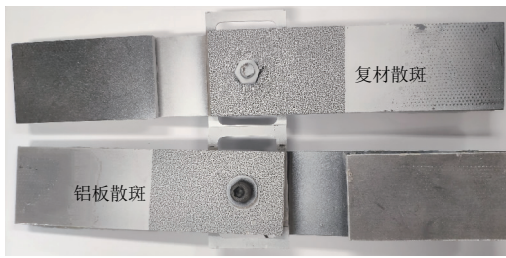


图 6 表面散斑

实验采用两组相机分别对复合材料板和铝合金板进行全场应变测量。在测试过程中,实验加载速度为 2 mm/min,以一定的频率拍摄记录散斑图像,当载荷从峰值下降 20%或发生明显复合材料损伤时停止加载。通过将后续图像与第一张参考图像进行比较,进而得到全场的位移和应变信息。

2 有限元模型

2.1 网格设置、边界与接触属性

利用 ABAQUS 中有限元软件,建立了复合材料-铝合金单搭接接头的有限元模型。为了减少接触面,缩短计算时间,将螺栓、螺母和垫圈组合成一个整体来简化模型。螺栓与板接触区域是应力集中区,为了较精确地得到这一区域的应力-应变,在接触部位进行局部网格细化。各构件网格均使用六面体线性减缩积分单元 C3D8R,它可避免剪切闭锁问题,且对计算精度影响不大。网格划分设置情况如图 7 所示。

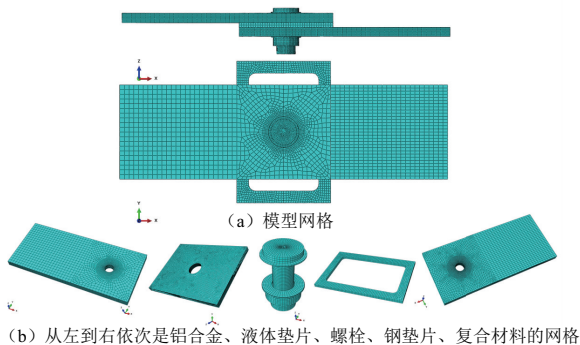


图 7 网格划分设置

2.2 边界条件设置

有限元模型边界条件如图 8 所示,试件左端面限制实体单元的 3 个自由度来模拟实验室被夹头夹紧固定的情况。而夹头拉伸的模拟则采用加载位移的方法来实现。为了便于收敛,在螺栓头与螺母端面以及试件自由端面使用轻弹簧来约束限制 U_x, U_y, U_z 三个方向。螺栓载荷通过 Load 功能模块中的 Bolt Loa 施加,施加的预紧力为 8 000 N。

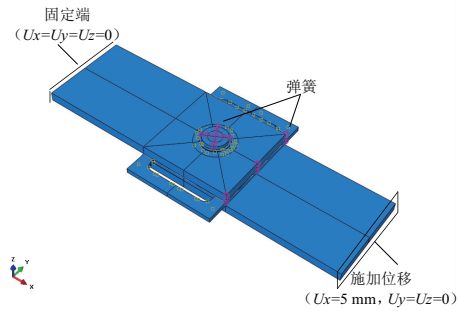


图 8 边界条件设置

3 结果分析与讨论

3.1 载荷-位移曲线

1) 强迫装配分析

图 9 所示是实验与有限元分析得到的强迫装配下复合材料-铝合金单搭接接头载荷-位移曲线,各间隙下接头峰值载荷和拉伸刚度实验数据如表 2,其中拉伸刚度根据文献[10]中提到的公式计算得到,公式如下:

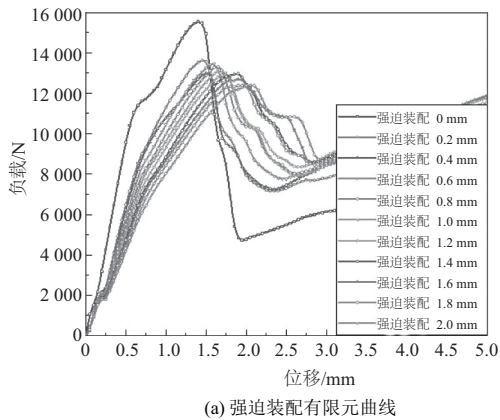
$$K_0 = \frac{\Delta F}{\Delta u} = \frac{0.50 \cdot F_{\max} - 0.10 \cdot F_{\max}}{u(0.50 \cdot F_{\max}) - u(0.10 \cdot F_{\max})}$$

其中: F_{\max} 表示极限载荷; u 表示载荷对应的位移。

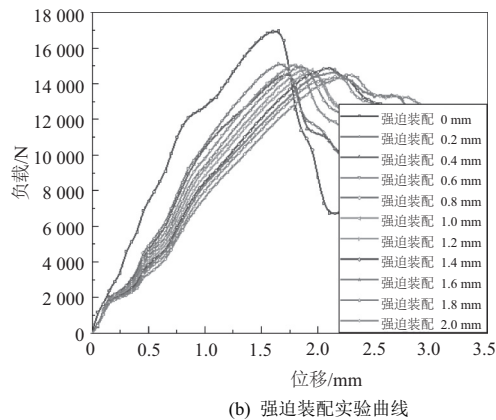
从图 9 和表 2 中可以看出,随着间隙的不断增大,峰值载荷和拉伸刚度不断减小。仿真结果与实验结果相比较有一点误差。产生误差的原因是有限元建模时对局部结构进行简化,影响了计算精度。从间隙 0 到间隙 2.0 mm,其中峰值载荷从 17.5 kN 降为 14.4 kN,降幅为 17.7%;拉伸刚度从 20.7 kN/mm 降为 8.27 kN/mm,降幅为 60.0%。这是因为拉伸过程中,接头的承载能力取决于螺栓杆与孔壁接触面积的大小,接触面积越大,拉伸刚度和峰值载荷就越大。螺栓安装过程中,存在较大装配间隙的接头,复合材料板和铝合金板的弯曲变形较大,因而拉伸过程中螺栓杆与孔壁接触面积显著减小,接触区域应力集中程度较高,导致拉伸刚度和峰值载荷的降低(因本刊黑白印刷,如有疑问可咨询作者)。

2) 液体垫片补偿分析

图 10 所示是实验分析得到的液体垫片补偿下复合材料-铝合金单搭接接头载荷-位移曲线。图 11 是强迫装配与液体垫片补偿下复合材料-铝合金单搭接接头的峰值载荷和拉伸刚度。相比于强迫装配情况,液体垫片补偿后接头极限载荷和拉伸刚度均表现出增大的趋势。



(a) 强迫装配有限元曲线



(b) 强迫装配实验曲线

图9 强迫装配下载荷-位移曲线

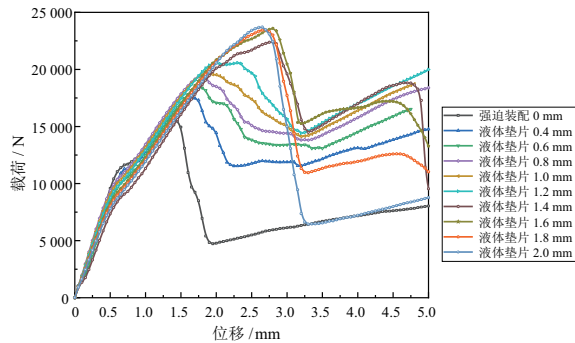
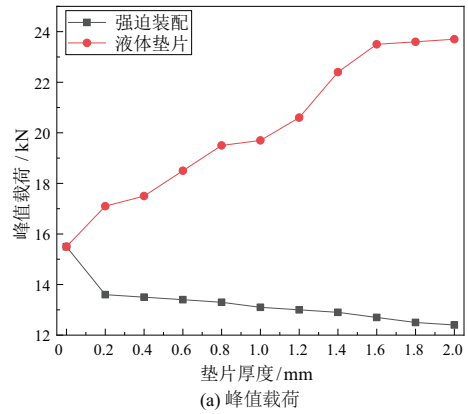


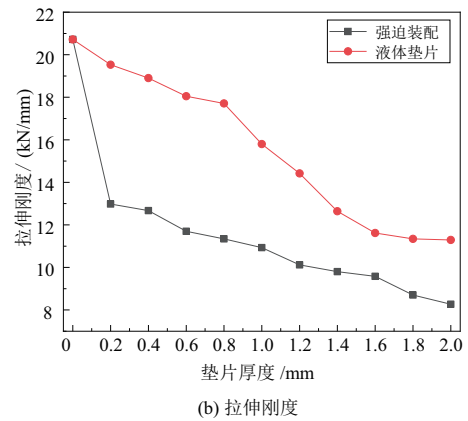
图10 液体垫片补偿下载荷-位移曲线

从图10曲线中可以得出,随着垫片厚度的增加,接头的峰值载荷呈增加趋势,峰值载荷所对应的位移不断增大,而从图11可以看出拉伸刚度随着垫片厚度的增加呈减小的趋势。

含有液体垫片的接头进行螺栓连接时,垫片可以显著减小复合材料板与铝合金板的弯曲变形,降低孔边装配应力,从而使得拉伸过程中螺栓杆与孔壁的接触面积基本保持不变。从分析结果中可以看出,液体垫片也具有一定的承载能力,对峰值载荷的提升有一定的作用。尽管垫片厚度的增加会导致载荷偏心程度的不断增加,但由于铝合金具有较好的弹塑性,发生较大弯曲变形的情况下仍能与螺栓杆保持较大的接触面积,因此峰值载荷会不断提高。但拉伸过程中铝合金板变形的加剧导致峰值载荷所对应的位移不断增大,最终导致接头刚度的降低。



(a) 峰值载荷



(b) 拉伸刚度

图11 填隙补偿下复合材料-铝合金单搭接接头峰值载荷和拉伸刚度

3.2 复合材料表面与液体垫片变形分析

图12所示是液体垫片补偿下拉伸载荷在15kN时复合材料表面应变趋势,间隙间隔为0.4mm。由图可以发现,随着液体垫片厚度的不断增大,孔边应变集中区范围增大,应变峰值也增大。这是因为接头刚度降低引起相同载荷下所对应的位移增大,导致复合材料变形增大,孔边应变集中区域变大。

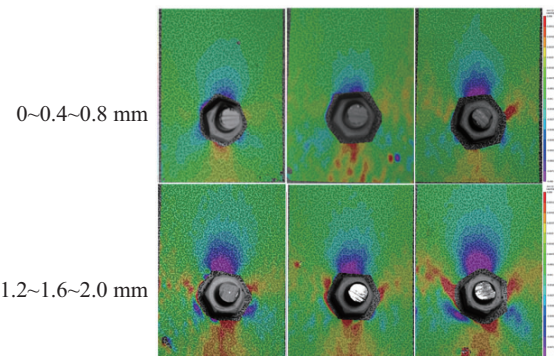


图12 液体垫片补偿下复合材料表面应变

图13所示是液体垫片厚度为2.0mm时损伤情况,液体垫片沿着拉伸方向变形最为严重,甚至出现裂纹,与复合材料表面应变趋势相对应。

(下转第28页)

4 结语

文中建立了基于 SPH 法的单颗 CBN 磨粒微切削硬质合金 YG8 的仿真模型,并通过其 SPH 粒子的掉落定量表征磨粒的磨损量,还对模型进行了试验验证,得出如下结论:

1) CBN 磨粒微切削硬质合金 YG8 时,磨粒在切削刃处的大应变导致其磨损,磨损形式主要为微破碎;随着累积材料去除体积的增大,磨粒的相对磨损量随之增大,且磨损速率先快后慢。

2) 在相同的累积材料去除体积下,随着切削宽度和切削深度增加,由于切削力和切削行程相继起主导作用,磨粒的相对磨损量呈现先增大后减小的变化趋势。

参考文献:

- [1] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 赵清亮, 赵玲玲, 王宇, 等. 电镀金刚石砂轮高效精密修整及熔融石英磨削试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 174-181.

- [3] 冯克明, 师超钰, 朱建辉, 等. 单层磨料砂轮修整及修整阈值控制试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 225-232.
- [4] DUAN N, YU Y Q, WANG W S, et al. SPH and FE coupled 3D simulation of monocrystal SiC scratching by single diamond grit [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 64: 279-293.
- [5] XI Y, BERMINGHAM M, WANG G, et al. SPH/FE modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of Ti₆Al₄V alloy [J]. Computational Materials Science, 2014, 84: 188-197.
- [6] 孙伟, 赵恒华, 杨世彬. 基于 LS-DYNA 的单颗磨粒超高速磨削成屑动态研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 57-60.
- [7] DAI J B, SU H H, HU H, et al. The influence of grain geometry and wear conditions on the material removal mechanism in silicon carbide grinding with single grain [J]. Ceramics International, 2017, 43(15): 11973-11980.

收稿日期:2019-12-03

(上接第 24 页)



图 13 液体垫片损伤情况

4 结语

1) 强迫装配时,随着间隙的不断增大,螺栓杆与孔壁接触面积不断减小,复合材料-铝合金单搭接接头的峰值载荷和拉伸刚度呈现减小趋势,从间隙 0 到间隙 2.0 mm,峰值载荷和拉伸刚度降幅分别为 17.7% 和 60.1%。

2) 液体垫片补偿时,垫片可以显著减小复合材料板与铝合金板的弯曲变形,使得拉伸过程中螺栓杆与孔壁的接触面积基本保持不变。且液体垫片也具有一定的承载能力,对峰值载荷的提升有一定的作用。但拉伸过程中铝合金板变形的加剧导致峰值载荷所对应的位移不断增大,最终导致接头刚度的降低。

3) 随着液体垫片厚度的增加,复合材料-铝合金接头峰值载荷提升,刚度开始减小,使得复合材料和液体垫片发生较大的变形。

参考文献:

- [1] 卡萨波格罗(荷). 飞机复合材料结构设计与分析[M]. 颜万亿,译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.

- [2] DHÔTE J X, COMER A J, STANLEY W F, et al. Investigation into compressive properties of liquid shim for aerospace bolted joints[J]. Composite Structures, 2014, 109: 224-230.
- [3] LIU L, ZHANG J, CHEN K, et al. Experimental and numerical analysis of the mechanical behavior of composite-to-titanium bolted joints with liquid shim[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 167-172.
- [4] HÜHNE C, ZERBST A K, KUHLMANN G, et al. Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models[J]. Composite Structures, 2010, 92(2): 189-200.
- [5] 崔雁民. 复合材料钛合金叠层结构间隙加垫补偿的拉伸性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [6] CHENG L, WANG Q, KE Y L. Experimental and numerical analyses of the shimming effect on bolted joints with nonuniform gaps [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(11): 3964-3975.
- [7] 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.
- [8] 刘怡冰, 安鲁陵, 蒋麒麟, 等. 复合材料翼盒装配工装研究与设计[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(3): 14-18.
- [9] COMMITTEE D. Test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S]. ASTM International.
- [10] LIU L. The influence of the substrate's stiffness on the liquid shim effect in composite-to-titanium hybrid bolted joints [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(3): 470-479.

收稿日期:2019-10-11