

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.033

基于数值模型的螺栓预紧力对板间微动行为影响研究

杜坤鹏¹, 王天立¹, 史建猛¹, 邱建平¹, 齐振超²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 螺栓预紧力是影响搭接件疲劳特性的重要参数, 不同预紧力大小影响结构内部应力分布及疲劳微动特征。建立 2024 铝合金叠层板搭接试件螺栓连接预紧及试件拉伸的数值模型, 分析不同预紧力作用下试件内部受力及叠层间微动特征。结果表明: 螺栓连接可以改变带孔板拉伸孔周应力分布, 可一定程度上减小连接孔引起的应力集中现象。随着预紧力的增大, 叠层之间通过摩擦传递的载荷增大, 孔边应力集中系数会随之减小。接触面上较高的摩擦切应力区域主要出现在连接孔拉伸方向的前后两侧, 但微动幅值最大的位置出现在孔的两侧, 并且随着预紧力的增大而减小。

关键词: 2024 铝合金; 叠层板; 螺栓连接; 预紧力; 数值模拟; 微动磨损; 微动幅值

中图分类号: TH131 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)06-0164-04

Effects of Bolt Preload on Plate Fretting Behavior of 2024 Aluminum Alloy Laminates Based on Numerical Model

DU Kunpeng¹, WANG Tianli¹, SHI Jianmeng¹, QIU Jianping¹, QI Zhenchao²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Bolt preload is an important parameter affecting the fatigue characteristics of lapping parts, and different preloading forces affect the stress distribution and fatigue fretting characteristics. The numerical models of bolt connection pre-tightening and tensile of 2024 aluminum alloy laminated plate lap specimens were established, and the specimens' internal forces and interlaminated fretting characteristics under different preloading forces were analyzed. The results show that the bolt connection can change the stress distribution around the hole and reduce the stress concentration caused by the hole to some extent. With the increase of preload, the load transmitted by friction between layers increases, and the stress concentration coefficient at hole edge decreases. The higher frictional shear stress region on the contact surface mainly appears on both sides of the stretching direction of the connecting hole, but the position with the maximum fretting amplitude appears on both sides of the hole and decreases with the increase of the preloading force.

Keywords: 2024 aluminum alloy; laminated plate; bolted connection; preload force; numerical simulation; fretting wear; fretting amplitude

0 引言

螺栓连接结构作为一种稳定性高、成本低的紧固手段在飞机制造中大量使用。由于连接孔的存在, 连接件在载荷作用下往往容易产生孔边应力集中, 连接部位一般被认为是力学薄弱部位^[1]。保证连接部位的强度对于结构整体安全意义重大。国内外学者针对孔连接的力学性能以及抗疲劳设计开展了大量的研究工作。螺栓连接的预紧力是一个十分重要的参数, 预紧力大小以及拧紧策略都将对结构力学性能产生极大影响^[2]。螺栓

连接预紧力大小的改变会影响裂纹萌生的位置, 对连接件的疲劳寿命产生影响。陈彦达等^[3]对飞机螺栓双剪连接结构进行了有限元分析, 发现施加螺栓预紧力在孔边缘附近产生有益的压应力, 较高的预紧力可显著降低在孔边缘处的应力水平。肖睿恒等^[4]研究了螺栓预紧力对复合材料接头疲劳性能的影响, 发现预紧力增大, 接头疲劳寿命也随之增大。对于叠层连接件, 被连接件接触面上的微动磨损一般被认为是影响结构疲劳寿命的主要因素^[5-6]。武洋洋等^[7]的研究表明, 在规范规定的螺栓预紧力范围内, 由于微动磨损引起

第一作者简介: 杜坤鹏(1983—), 男, 陕西西安人, 正高级工程师, 硕士, 研究方向为飞机装配, 282119190@qq.com。

的疲劳裂纹萌生往往不在孔表面,而是在连接孔外围一定距离的区域并扩展。梁尚清等^[8]指出施加预紧力会使得载荷幅值显著减小,从而可以显著提高螺栓连接的疲劳寿命。对于微动疲劳行为,随着微动位移的增加,微动磨损机制可能发生部分滑移到混合滑移以及完全滑移的转变,并且磨痕面积、磨损体积以及磨损机制都将产生不同变化^[9-10]。因此,研究螺栓连接叠层板间的微动行为以及螺栓预紧力的影响对于连接件的抗疲劳设计具有重要意义。

1 模型描述

1.1 材料及几何模型

分析对象为 2024 铝合金叠层单钉螺栓连接件,螺栓材料为 TC4 钛合金。其中单块铝合金板尺寸为 130 mm × 30 mm × 2 mm,螺栓孔位置在试件纵轴线处,距离一端面 30 mm,孔径大小为 5 mm。螺栓为间隙配合,螺栓直径 4.8 mm。分析过程中,首先对螺栓施加预紧力,然后再对搭接试件施加轴向拉伸力,研究不同预紧力大小下,试件在轴向拉力下的内部受力及接触面上的相对位移特征。

1.2 有限元网格模型

在 ABAQUS 中建立通用静力分析模型,为了减少计算工作量,取拉伸试件纵向对称一半进行建模,选用 C3D8R 单元划分网格如图 1 所示。装配体共包含 73 128 个单元及 96 217 个节点。考虑摩擦的接触分析为高度非线性问题,网格质量不佳极易导致仿真收敛性问题。因此,对连接孔周围以及接触面上的网格划分至关重要,一般网格要求要规则并且较细密,而对远离这些区域的网格划分则可以用较大尺寸。考虑到与被连接件接触的一般是圆形垫圈,因此螺栓两端的六棱柱螺母几何建模直接采用圆柱端面,减小因计算垫圈与六棱柱螺母之间的接触对计算收敛性的影响。

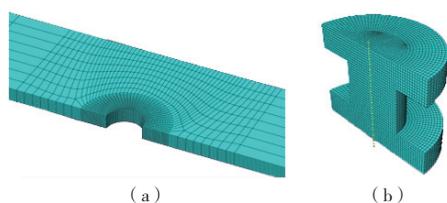


图 1 搭接件对称模型网格特征

1.3 接触及边界条件

本模型中的接触主要为螺栓圆柱面与两块连接板的孔表面、螺栓头(直径按相应标准垫圈建模)与连接板的表面以及两个连接板之间的叠层部分。在这几个位置选用 ABAQUS/Standard 求解器的“面-面”接触类型,滑移方程选用有限滑移控制。关于接触属性,假定接触面上的摩擦因数均为 0.2,通过罚函数定义库伦摩擦切向行为,法向摩擦行为采用硬接触。

仿真全过程约束对称面上 z 向位移为 0,约束左端面 x 及 y 向位移。首先在螺栓中性面上施加螺栓载荷(Bolt Load),第 1 组仿真载荷大小为 500 N;然后保持螺栓的夹紧力,同时在试件的右端面施加拉伸载荷,大小为 120 MPa;此后分别再进行螺栓预紧力为 1 000 N、1 500 N 以及 2 000 N 的试件拉伸分析,并保持螺栓载荷外其他边界条件不变。

2 结果分析

2.1 螺栓预紧试件内应力

通过螺母拧紧力矩可形成螺栓轴向的预紧力并对被连接结构产生夹紧作用。一般拧紧力矩的大小可以被认为和轴向预紧力之间呈线性关系,即

$$T = kFD \quad (1)$$

式中: T 、 k 、 F 和 D 分别表示拧紧力矩、转矩系数、螺栓预紧力以及螺栓公称直径。

由于受拉伸预应力作用,螺栓内部普遍存在较高水平的应力。特别是在螺母下方的 4 个拐角处,由于本模型未做倒角,钉头下方为直角过渡,因此应力集中现象比较明显。分别施加 500 N、1 000 N、1 500 N 以及 2 000 N 的预紧力,螺钉内最大 Mises 应力分别可达 142 MPa、285 MPa、429 MPa 以及 572 MPa,其变化基本与预紧力呈线性关系。此外,由于螺栓连接预紧力主要通过螺杆表层的螺纹进行传递,螺栓的受力较大位置主要出现在钉杆表层,向螺栓钉杆内部逐渐减小,同时在靠近螺母/钉头的两端形成了两个漏斗形的低应力区域。而且,螺母/垫圈的高应力区域也集中在螺纹配合附近区域,向外围应力水平逐渐降低。因此造成叠层之间的夹紧力也非均匀分布,从孔表层沿半径方向逐渐减小。总体而言,带孔板内的应力水平要比螺栓连接件内的应力水平低。

2.2 试件受拉伸载荷应力及变形

图2所示为2000N预紧力连接后试件受拉伸载荷的内应力分布及变形特征。由于受偏心力矩作用,搭接试件存在次弯曲效应^[11]。次弯曲效应使得被连接件一侧翘曲,造成贴合面分离,靠近拉伸侧的钉头下方接触应力增大,螺栓与螺母过渡区域应力集中水平也进一步提高。同时,由于螺栓在两个叠层板之间传递了一部分拉伸载荷,受钉/孔挤压作用,上板连接孔的左侧以及下板连接孔的右侧应力水平也相对较高。并且,最大应力出现在钉/孔挤压靠贴合面的部位。由于连接孔的两侧未进行倒角,相应位置与螺栓钉杆的接触为直角与平面的接触,因此当前仿真计算得到的应力水平会比实际工程中连接件相关位置的应力大小要高。



图2 拉伸载荷下试件内应力分布及变形情况 ($F=2\ 000\ \text{N}$)

图3为叠层板在连接孔附近的拉伸应力分布云图。1000N和2000N螺栓预紧力在孔表层的最大拉应力分别约为712MPa和619MPa,位置在靠近试件贴合表面的净截面孔表层。而在净截面上,对应两种预紧力的孔表层最小应力出现在螺母下方,大小分别为389MPa和306MPa。通过对单个带孔板的拉伸仿真可得到试件表面孔边最大拉伸应力为342MPa。对比发现,叠层试件孔边应力分布受螺栓预紧力和次弯曲效应的影响,相对于开孔板简单拉伸发生了复杂变化。当螺栓预紧力较小时,危险截面上的最大应力成倍增加,即使是最小拉应力也可能会比开孔板的简单拉伸更大。但是,随着螺栓预紧力的增大,孔边应力集中水平一定程度上得到改善。这主要是由于增大预紧力可以增大板间摩擦对载荷的传递作用,从而降低钉传载荷的大小。

根据孔边最大应力与远端拉伸应力的比值可以计算得到应力集中因子。本文有限宽板圆孔的标准应力集中因子为2.85,比无限宽带孔板的理论应力集中系数3更小^[12]。而叠层螺栓连接试件的预紧力较大时,如2000N,在连接孔处的应力集中因子在板的厚度方向最小值可以小于开孔板,但最大值却比带孔板高很多,约为5.16。因

此,对于带孔结构的机械连接件疲劳等力学特性的研究,不仅需要考虑制孔质量的影响,更应该关注连接装配对结构内部受力带来的新变化。

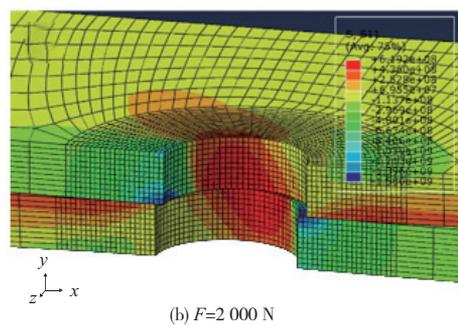
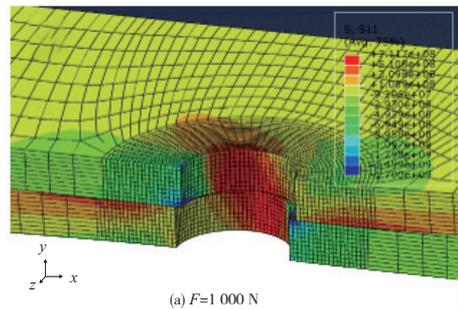
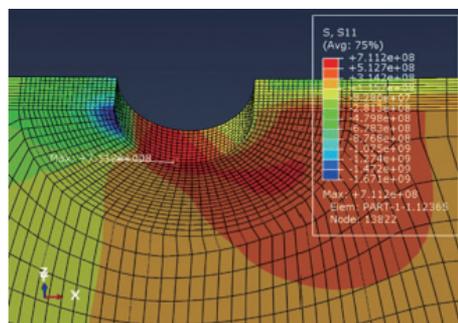
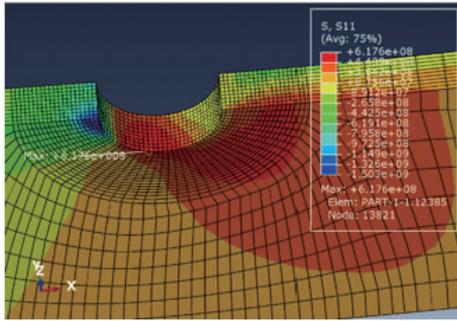


图3 预紧力对拉伸载荷下连接孔周围轴向应力分布的影响

对于叠层结构螺栓连接,叠层间的接触面上由于受到摩擦力作用也应重点关注,如图4所示。可以看出,在接触面上靠拉伸方向孔的一侧存在较大片的高应力区域,这主要是受到摩擦力和次弯曲共同作用的结果。其中,随着螺栓预紧力增大板间摩擦力增大,从而会在贴合面上形成更大范围的较高拉应力区域,如图4(b)所示。虽然此时最大应力仍然在孔表面的净截面位置并且相对于低预紧力时有所降低,但叠层接触面上存在大片的高应力区域。这些区域在疲劳拉伸和板间微动磨损的共同作用下,可能会导致裂纹萌生位置不在孔表面。



(a) $F=1\ 000\ \text{N}$



(b) $F=2\ 000\ \text{N}$

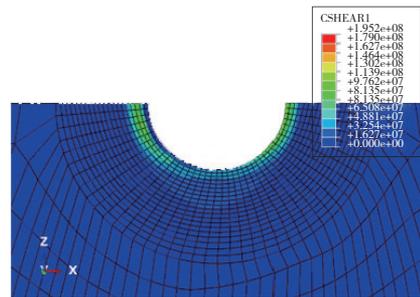
图 4 预紧力对叠层接触面上应力分布的影响

2.3 叠层间微动特征

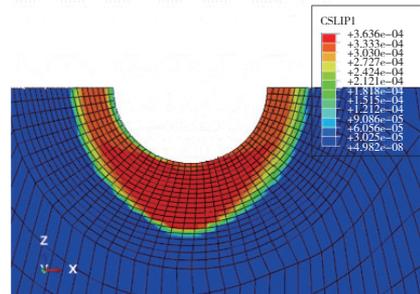
连接件之间的微动磨损是结构疲劳加载过程中主要的裂纹形成机制。图 5 所示为 2 000 N 预紧力作用下叠层上板连接孔附近接触表面的摩擦切应力及拉伸载荷下相对位移的大小。可以看出,较高的摩擦切应力区域出现在连接孔拉伸方向的前后两侧,最大应力约为 195 MPa。虽然在孔的前后两侧叠层接触面上的摩擦切应力较高,但从其综合受力特点可知,孔的后部因钉/孔接触挤压而受压应力,孔的前部螺栓与孔无接触且表面应力较低(低于 100 MPa),因此在疲劳加载过程中接触面上孔的前后两侧产生微动疲劳裂纹的可能性较小。此外,有研究表明,虽然接触面上的切向摩擦力和微动幅值是影响微动磨损的重要因素,但磨损体积不一定总是随着摩擦切应力的增大而增大,而是与微动幅值存在很大的关联。一般来说,微动幅值越大磨损体积和磨损面积都将随之增大,因此越有利于早期疲劳裂纹的形成。从图 5(b)中可以看出,微动幅值比较大的区域主要集中在拉伸方向孔的两侧。在净截面上达到最大值,约 364 μm ,并沿净截面两侧逐渐减小。因此可以推测,孔边应力集中以及接触面微动磨损的共同作用下,孔两侧净截面区域附近有可能存在潜在的疲劳裂纹源。

为了说明预紧力大小对微动幅值的影响,在试件对称面上孔的拉伸侧取约 3.5 mm 长路径,得到不同预紧力下该路径上的微动幅值曲线如图 6 所示。可以看出,距离孔边越远叠层间微动幅值越大,并且由于摩擦的作用微动幅值随孔边距离的增加为非线性关系。同时,预紧力大小也会对叠层间受载时的微动幅值产生明显影响。在孔壁处,500 N 预紧力下叠层微动幅值约为 320 μm 。随着预紧力的增大微动幅值将逐渐减小。对应

2 000 N 时微动幅值减小到了 306 μm 。因此,为了提高连接件的疲劳寿命,可通过选用较大的螺栓预紧力来实现。



(a) 摩擦切应力



(b) 相对位移量

图 5 上板连接孔附近接触面微动特征

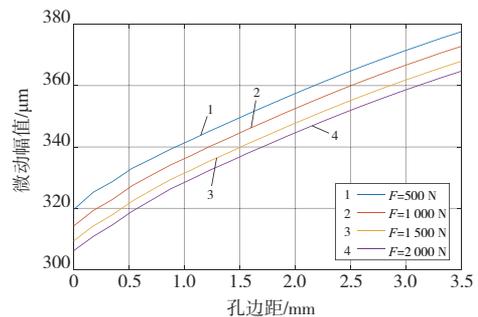


图 6 螺栓预紧力对叠层板间拉伸微动幅值的影响

3 结语

螺栓连接可以改变带孔板拉伸孔周应力分布,可在一定程度上减小连接孔引起的应力集中现象。由于次弯曲效应的存在,叠层板内贴合面上的应力水平显著高于自由表面,因而孔边应力集中程度比开孔板更严重。随着预紧力的增大,叠层之间通过摩擦传递的载荷增大,因此孔边应力集中系数会随之减小。接触面上较高的摩擦切应力区域主要出现在连接孔拉伸方向的前后两侧,但微动幅值最大的位置出现在孔的两侧,并且

(下转第 184 页)

于模糊层次分析的电能计量装置运行状态评估研究。该研究通过指标权重与模糊关系矩阵的计算获得评估值,由此对应得到状态等级。最后选取5个电能计量装置作为测试用例,对评估方法进行应用测试,通过测试过程,证明了评估方法的有效性。

参考文献:

- [1] 陈崇明,吴瀛,姚栋方,等.一种电能计量装置状态在线监测及远程诊断系统设计[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(4):203-208.
- [2] 于海波,王春雨,袁晓蕾,等.基于PCA-SVR的电能计量装置误差评估算法[J].电测与仪表,2020,57(19):140-145.
- [3] 许丹,李游,李贺龙.基于联合分布适配的智能电表运行状态评价[J].北京航空航天大学学报,2022,48(4):674-681.
- [4] 李若茜,肖霞,梅能,等.基于Bayes和Bootstrap方法的智能电表可靠性评估[J].南方电网技术,2022,16(3):76-81.
- [5] 程瑛颖,杜杰,周全,等.基于随机矩阵理论和聚类算法的电能表运行状态评估方法[J].中国电力,2020,53(11):116-125.

- [6] 高书垚,安泰,宋剑.基于熵权-正态云模型的智能电能表状态评估研究[J].电测与仪表,2022,59(1):190-194.
- [7] 蔡慧,乔适苏,袁健,等.基于信息融合的低压智能电能表动态评价模型[J].电力系统自动化,2020,44(11):206-214.
- [8] 朱少斌,许素安,马宗彪,等.基于BSO-BPNN模型的电能计量装置异常诊断方法研究[J].中国测试,2022,48(1):141-146.
- [9] 刘文宇,刘璐,刘馨然,等.基于改进BP神经网络的低压配台区智能电能表误差状态评估模型[J].电测与仪表,2022,59(11):176-181.
- [10] 路韬,黄友朋,党三磊,等.基于改进ELM的计量终端定位算法仿真[J].计算机仿真,2022,39(9):377-383.
- [11] 郭镛琛,吴宇列,张勇猛,等.全角模式半球谐振陀螺阻尼误差补偿方法研究[J].自动化仪表,2021,42(5):6-9,13.
- [12] 石宜金,谭贵生,赵波,等.基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):167-176.

收稿日期:2023-07-06

(上接第167页)

随着预紧力的增大而减小。由于微动幅值是影响早期疲劳裂纹形成的主要因素,因此,增大预紧力可以一定程度上起到延缓裂纹萌生并提高结构疲劳寿命的作用。

参考文献:

- [1] GHORBANI H, CHAKHERLOU T N, TAGHIZADEH H. On the estimation of fatigue life in bolt clamped Al-alloy 2024-T3 plates [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 164: 74-92.
- [2] 刘宁,安鲁陵,王庆有,等.拧紧策略及其对螺栓预紧力影响研究[J].装备制造技术,2022(10):26-29,33.
- [3] 陈彦达,范振民,李军.飞机螺栓双剪连接结构有限元应力分析[J].民用飞机设计与研究,2020(3):17-23.
- [4] 肖睿恒,王耀,刘庆波,等.预紧力对复合材料单搭接接头疲劳性能的影响[J].机械制造与自动化,2022,51(5):65-69.
- [5] 郁大照,陈跃良,高永.螺栓连接单搭接件疲劳特性试验与全寿命估算方法研究[J].中国机械工程,

2013,24(20):2747-2752.

- [6] 魏文杰,何晓聪,张先炼,等. DP780/AA6061 薄板自冲铆接头微动损伤特性[J].机械工程学报,2020,56(6):169-175.
- [7] 武洋洋,王莹.螺栓连接件微动疲劳特性分析[J].力学季刊,2021,42(4):674-684.
- [8] 梁尚清,苏爱民.航空结构螺栓连接预紧力设计研究[J].航空科学技术,2014,25(9):24-27.
- [9] 袁新路,李根,张晓宇,等.位移幅值对铜镁合金微动磨损行为的影响[J].摩擦学学报,2021,41(1):125-136.
- [10] 刘宇,谯建春,李明生,等.位移幅值对ZG230-450铸钢微动磨损行为的影响[J].机械工程材料,2021,45(7):46-50.
- [11] 曾超,薛九天,田威,等.铆接效应耦合的搭接接头受载应力与变形[J].科学技术与工程,2020,20(34):14295-14300.
- [12] 高玉魁.表面强化对A-100钢带孔构件疲劳性能的影响[J].材料热处理学报,2014,35(5):160-164.

收稿日期:2023-04-24