

沉头螺栓镗窝误差对复合材料连接结构承载性能影响分析



邹鹏¹, 刘盈利²

1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

2. 西安长峰机电研究所, 陕西 西安 710065

摘要: 沉头螺栓作为现代飞机复合材料结构中的一种重要连接形式, 其镗窝精度与装配质量直接影响结构服役性能。沉头螺栓因其能够保证连接结构表面齐平度, 被广泛应用于飞机复合材料连接结构中。由于工艺和结构限制, 镗窝角度误差和深度误差通常是不可避免的, 并且对连接结构力学特性和承载能力造成影响。针对以上问题, 本文开展了沉头螺栓镗窝几何误差对复合材料连接接头承载机理与强度影响研究。在角度误差、偏转方向误差以及深度误差定义分析的基础上, 开展了不同误差下的加载试验并进行了显微分析。通过对加载曲线和界面形貌的分析, 揭示了不同误差下的结构损伤机理和接头失效载荷, 探究了镗窝几何误差对复合材料沉头螺栓单搭接接头力学行为的影响, 为沉头螺栓在复合材料连接结构中的高效工程应用提供理论依据。

关键词: 沉头螺栓; 角度误差; 偏转方向误差; 深度误差; 损伤机理; 失效载荷

中图分类号: V262/TB332

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.06.005

由于飞机复合材料零部件制造、装配与维护需求不同, 造成不同的结构件之间存在大量装配连接形式。其中以传统的螺栓连接为代表的机械连接结构由于形式简单、承载能力强等优点而成为复合材料结构的重要连接形式^[1-7], 而被广泛应用。此外, 对于飞机机翼蒙皮等薄壁结构, 由于其外形精度与表面质量有严格要求, 使得沉头螺栓被广泛应用。完好的结构表面质量不仅可以很好地满足飞机气动外形要求, 还能够减少雷达截面积(RCS)以提高隐身能力^[8-9]。

对于复合材料沉头螺栓连接结构, 在其加工过程中由于制造工艺与能力的限制, 无法完全保证加工精度与孔壁质量, 从而影响后续装配质量。其中镗窝角度误差会对螺栓沉头和镗窝间接触面的面积和摩擦力产生影响, 造成复合材料干涉连接后镗窝孔周应力分布和连接界面干涉量不均匀, 影响连接结构强度。对于该种连接形式, 于书宇^[10]基于三维Hashin失效准则和材料退化模型, 建立了复合材料疲劳加载过程中的损伤累积演化模型, 并通过静强度和疲劳试验, 研究不同孔口圆角和镗窝深度对连接结构强度的

影响规律。研究结果表明, 当镗窝深度较小, 螺栓不能完全沉入连接孔时, 会导致螺栓应力集中加剧, 加速螺栓破坏进程; 当镗窝深度较大, 会使螺栓与连接孔轴线间的偏移角度增加, 加剧螺栓沉头部分的挤压变形, 削弱结构疲劳强度; 而过大的孔口圆角会增大螺栓与连接孔轴线间的偏移角度, 加速疲劳损伤进程, 降低结构整体连接强度; 而较小的孔口圆角则会使螺栓产生局部损伤, 同样不利于提高整体承载性能。雷金山^[11]建立了二维轴对称有限元模型, 分析了铝合金结构沉头螺栓干涉连接的应力场分布和不同干涉量、沉头角度、镗窝深度对凸瘤大小的影响。研究表明, 当干涉量在1.5%~2%时结构应力集中较小, 残余应力分布最均匀, 镗窝深度的增加会引起凸瘤高度的增加, 降低连接强度。Nezhad等^[12]通过试验研究了存在配合间隙的复合材料沉头螺栓连接损伤过程, 研究结果表明, 极限载荷失效时主要是层内损伤, 其位于沉头边缘且在沉头下方连接孔沿厚度方向扩展。王建等^[13]对连接孔的倾斜角度、倾斜方向以及螺栓扭矩对接头承载性能的影响进行单钉单剪试验, 研

收稿日期: 2023-11-09; 退修日期: 2024-02-21; 录用日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(52005458, 52035011); 航空科学基金(2018ZE23011)

引用格式: Zou Peng, Liu Yingli. Influence of countersunk bolt geometry error on the bearing performance of composite joint structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(06): 37-43. 邹鹏, 刘盈利. 沉头螺栓镗窝误差对复合材料连接结构承载性能影响分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(06): 37-43.

究表明当连接孔倾斜角度从 0° 增加到 4° 时,接头极限承载强度下降9%~12%,而连接孔倾斜方向对极限承载强度影响甚微,增加螺栓扭矩可以提高极限承载强度。刘学术^[14]、徐茂青^[15]等利用有限元仿真的方法,基于层间失效准则分析了连接孔垂直度误差对连接区层间应力的影响规律,研究表明,垂直度误差影响螺栓与连接件之间的接触关系,造成连接区应力分布不均匀,层间切应力随着垂直度误差的增加而增大,是造成分层失效的主要原因。姜颖^[16]利用改进Hashin失效准则和刚度折减方案,结合多钉单剪拉伸试验,分析了垂直度误差对结构承载性能的影响规律,研究表明,当拉伸端螺栓倾斜方向与加载方向夹角为锐角时,钉载分配不均匀化程度较高,造成结构承载能力降低,当螺栓倾斜方向与拉伸方向夹角为钝角时,比无垂直度误差时承载能力强。以上研究为复合材料沉头螺栓结构的应用提供了有效的理论依据,但是对于铆窝误差分类及其影响尚缺乏系统性的认识,导致实际应用过程中缺乏全面的铆窝误差影响依据。

基于以上研究现状,本文针对复合材料沉头螺栓干涉连接结构装配过程中的铆窝误差对承载性能影响开展了研究。首先对铆窝几何误差进行定义,然后开展了不同类型误差影响下的试验分析,获得了铆窝角度误差、角度偏转方向误差以及角度与深度误差共同作用对结构损伤失效和接头强度的影响,为结构工程应用提供理论依据。

1 铆窝误差定义

1.1 铆窝角度误差定义

铆窝角度误差定义为:在理论铆窝轴线 A_1A_2 与实际制孔铆窝轴线 B_1B_2 形成的平面中二者之间的夹角,用符号 β 表示,如图1所示。基于目前国内航空领域对连接孔垂直度误差的参考标准为 2° ^[13-17],本文选择研究的铆窝角度偏差参数范围,即有效研究边界,定为 $0^\circ\sim 3^\circ$ 。

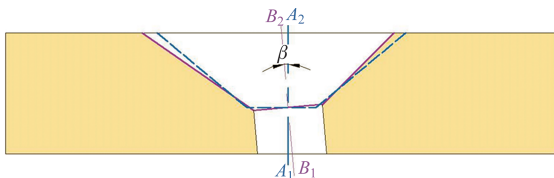


图1 铆窝角度误差示意图

Fig.1 Schematic diagram of dimple angle error

1.2 铆窝角度偏转方向误差定义

铆窝角度偏转方向误差定义为:以铆窝底面的中心点为坐标轴的原点,以与试件上表面平行的面作为 XY 平面建立坐标轴,铆窝孔的轴线 A_1A_2 在 XY 平面的投影 B_1B_2 ,与 Y 轴(加

载方向)所形成的夹角,用符号 α 表示,如图2所示。在拉伸过程中,外载荷施加方向为 Y 方向,本文针对铆窝角度偏转方向选择参数为 0° 、 90° 、 180° 三种有效研究边界情况。

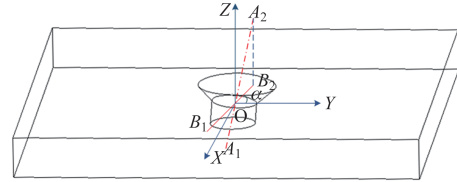


图2 铆窝角度偏转方向误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of dimple angle deviation direction error

1.3 铆窝深度误差定义

铆窝深度误差定义为:标准铆窝底面 B_1B_2 与实际制孔铆窝底面 A_1A_2 所形成的高度差,用符号 Δh 表示,如图3所示。铆窝深度偏差存在两种情况:铆窝过深用 Δh 表示,过浅用 $-\Delta h$ 表示。根据学者之前的研究,本文不再对铆窝深度偏差这一单一因素对连接结构强度的影响进行研究,而是选择研究角度和深度(铆窝过深的情况)偏差共同作用时对连接结构强度的影响规律。本文研究铆窝深度偏差参数的范围为 $0\sim 0.3\text{mm}$ 。

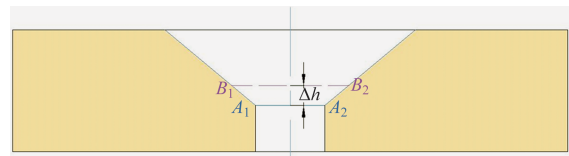


图3 铆窝深度误差示意图

Fig.3 Schematic diagram of dimple depth error

2 试验研究

2.1 试验准备

试验所采用复合材料为单向预浸料USN20000和非饱和聚酯树脂7901固化而成,单层厚度 0.15mm ,共计24层,总厚度 3.6mm ,铺层顺序为 $[45/0/-45/90]_{3s}$,材料属性参数见表1。连接件采用钛合金沉头高锁螺栓与自锁螺母,螺栓材料为Ti-6AL-4V,弹性模量 $E=110\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,螺母材料为铝合金。沉头螺栓的公称直径为 6.35mm ,考虑制造误差的影响,经过实际测量沉头螺栓光杆的实际直径为 6.32mm ,对于同一批次生产的螺栓,制造工艺稳定性较高,实际螺栓尺寸均相同。

试验件为单螺栓单搭接结构如图4所示,单板长度为 135mm ,宽为 36mm ,夹持区域长度为 75mm ,孔轴线距离层合板宽边和长边均为 18mm 。试验件采用高压水切割工艺

表 1 CFRP 材料参数
Table 1 Property of CFRP

材料属性	数值
弹性模量 E_1 /MPa	148000
弹性模量 E_2 /MPa	9320
弹性模量 E_3 /MPa	9320
剪切模量 G_{12} /MPa	5200
剪切模量 G_{13} /MPa	5200
剪切模量 G_{23} /MPa	3300
泊松比 ν_{12}	0.285
泊松比 ν_{13}	0.285
泊松比 ν_{23}	0.5
纤维拉伸强度 X_t /MPa	1205
纤维压缩强度 X_c /MPa	739
面内基体拉伸强度 Y_t /MPa	50.1
面内基体压缩强度 Y_c /MPa	183
面外基体拉伸强度 Z_t /MPa	50.1
面外基体压缩强度 Z_c /MPa	183

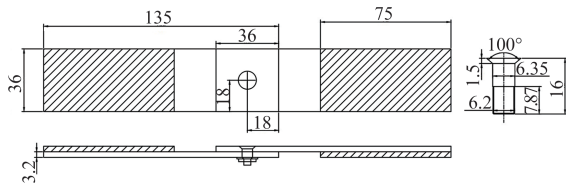


图 4 复合材料沉头螺栓单搭接连接结构(单位:mm)
Fig.4 Composite countersunk bolt single lap joint structure (Unit:mm)

控制精度。为保证试验过程中夹持力作用在同一水平面上,在试件的两端黏结材料属性与尺寸相同的复合材料板。

试验件采用螺栓干涉连接,利用液压装置将螺栓压入连接孔中。在复合材料干涉连接结构中,一般选择干涉量范围为 1%~2%^[18]。根据相关研究结论,本试验选取的相对干涉量为 1.2%,拧紧力矩为 4N·m。试验主要分析铤窝角度误差、角度偏转方向误差以及角度与深度误差共同作用对复合材料沉头螺栓单搭接干涉连接结构的连接强度影响规律。针对角度偏差和角度偏转方向先采用控制单一变量法进行试验方案设计,变量参数的选择见表 2 和表 3。

表 2 铤窝角度误差试验参数
Table 2 Test parameters for dimple angle error

固定参数	角度误差/(°)				
	B-0	J-1	J-2	J-3	J-4
铤窝深度 1.5mm, 角度偏转方向 0°	0	0.5	1	2	3

2.2 试验过程

在室温下对复合材料沉头螺栓单搭接干涉连接结构进行强度试验,试验采用电子万能试验机,最高拉伸载荷

表 3 铤窝角度偏转方向误差试验参数
Table 3 Test parameters for dimple angle deviation direction error

固定参数	角度偏转方向误差/(°)		
	F-1	F-2	F-3
铤窝深度 1.5mm, 角度误差 1°	0	90	180

100kN,如图 5 所示。拉伸速度为 2mm/min^[19],记录位移载荷曲线,保存试验数据。为避免因试验机夹头未对试验件夹紧而产生试件滑动,在试验正式加载前,先预加载到 500N 再卸载,试验数据按照 ASTM D5961 标准处理。

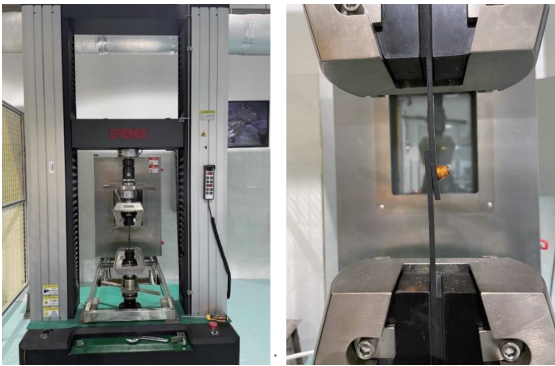


图 5 试验设备与过程
Fig.5 Test equipment and process

3 试验结果分析

3.1 铤窝角度误差对接头强度的影响

单搭接接头不同铤窝角度误差在偏转方向为 0°下的典型载荷-位移曲线如图 6 所示。在曲线第 1 阶段,曲线的趋势和斜率基本保持一致,呈线性增长,此阶段主要是复合材料板之间的摩擦力传递载荷,夹具与试件建立密切接触,将试验件上力夹紧。第 2 阶段,不同角度误差的曲线开始分离,不同铤窝角度误差曲线斜率改变的位置基本处于同一范围,初始阶段不同铤窝角度误差下接头刚度均大于无几何误差条件下,待稳定后接头刚度基本一致。第 3 阶段,连接接头承受的拉伸载荷达到最大值,其中 0.5°和 1°角度误差下接头极限载荷小于无几何误差的情况,2°和 3°角度误差下接头极限载荷大于无几何误差情况,但是总体误差均在 5%以内,该误差尚未排除试验件、试验机、试验流程等本身误差因素的影响,因而可以认为在 0°~3°范围内,其对结构失效强度的影响较小,这也从侧面印证了目前国内航空领域对连接孔垂直度误差的参考标准为 2°的可靠性。但是可以看到,一旦有铤窝角度误差后,其失效位移明显小于无

误差的情形,这为对失效位移有要求的工况提供了数据支持。第4阶段,连接接头最终失效,载荷随位移的增大而减小或处于载荷停滞阶段。

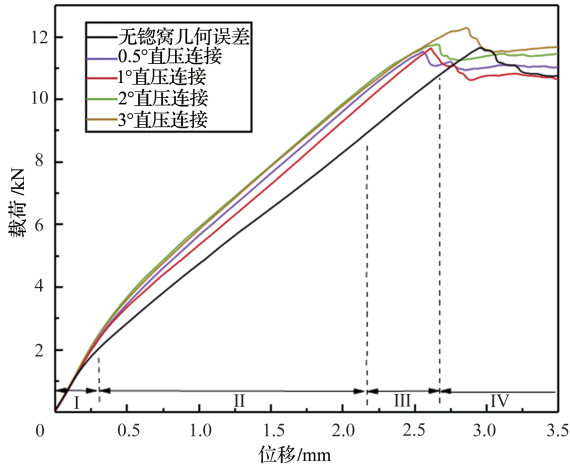


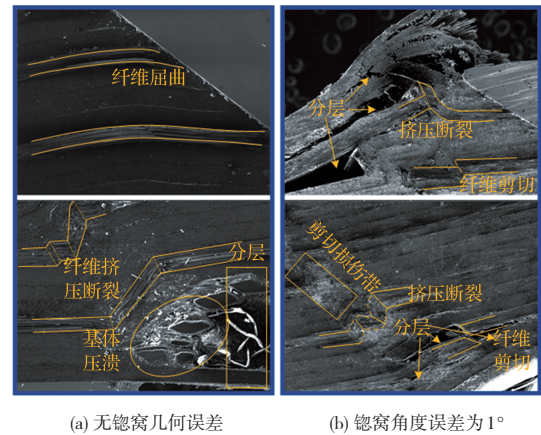
图6 不同镗窝角度误差下接头载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of joints under different dimple angle errors

选取无镗窝几何误差与镗窝角度误差为 1° ,在相同拉伸位移 5mm 时,对试件进行处理,通过扫描电镜对连接界面损伤情况进行观测,如图7所示。在沉头螺栓沉头部位与镗窝孔壁连接界面,当无几何误差时,连接界面仅发生了纤维弯曲损伤;当存在角度误差时,复材出现了严重的挤压损伤,包括分层损伤、纤维剪切损伤以及纤维断裂损伤。对下层板主挤压面进行分析,当无镗窝几何误差时,复材损伤情况更为严重,纤维断裂损伤和分层损伤情况较存在角度误差时损伤程度更大,还出现了基体压溃现象,有角度误差的情况下复材出现了剪切损伤带。因此上层板镗窝处的复材损伤随角度误差的增大损伤程度更严重,对下层板主挤压面复材损伤随角度误差的增大损伤程度更小。

3.2 镗窝角度偏转方向误差对接头强度的影响

镗窝角度偏转方向误差也是影响接头强度的一个重要因素。为了更接近于工程实际,选择相同的镗窝角度误差为 1° ,干涉压钉方式为竖直压钉,对其偏转方向误差影响开展研究。选择偏转方向分别为 0° 、 90° 和 180° 三种情况进行静拉伸试验,试验得到的典型载荷-位移曲线如图8所示。在曲线初始阶段,接头载荷随位移的增大而线性增大,4种情况曲线斜率保持一致,随载荷的持续增大,曲线开始出现分离,曲线斜率逐渐减小,载荷随位移的增大而增大,当达到极限承载位置时,载荷随位移的增大而减小。由图8可得,随镗窝角度误差偏转方向的增大,连接接头的极限载荷整体变化较小(偏转方向为 180°



(a) 无镗窝几何误差 (b) 镗窝角度误差为 1°

图7 不同镗窝角度误差损伤对比

Fig.7 Comparison between damage caused by different dimple angle errors

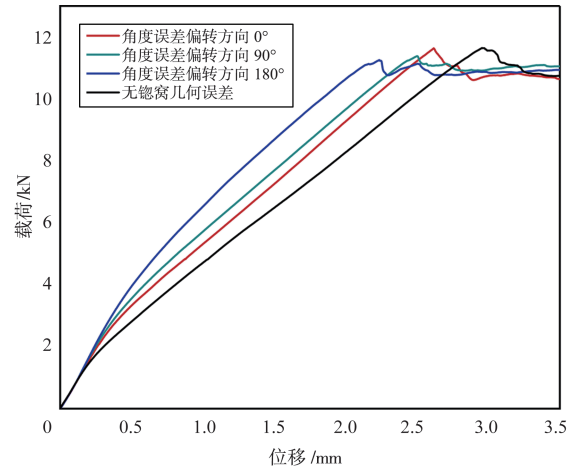


图8 不同角度误差偏转方向下接头载荷-位移曲线

Fig.8 Displacement-load curves of joint under different angular errors and deflection directions

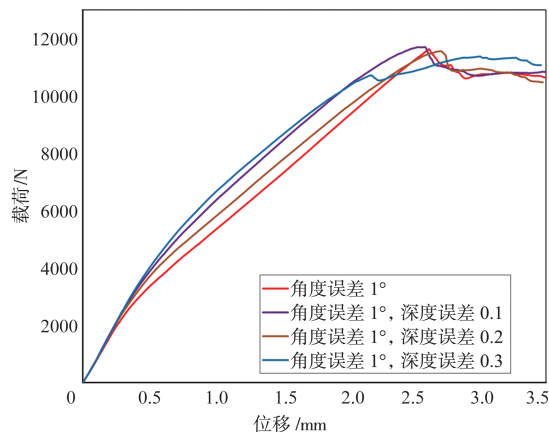
与偏转方向 0° 相比极限载荷下降了 382.63N ,下降量小于3%),但是对于不同偏转方向试验件达到极限载荷的位移大幅减小,当角度误差偏转方向为 180° 时与无几何误差情况下达到极限载荷的位移减小了 0.457mm ,降低量大于15%。此外,连接接头刚度随镗窝几何误差偏转方向的增大而增大。

3.3 镗窝角度与深度误差共同作用对接头强度的影响

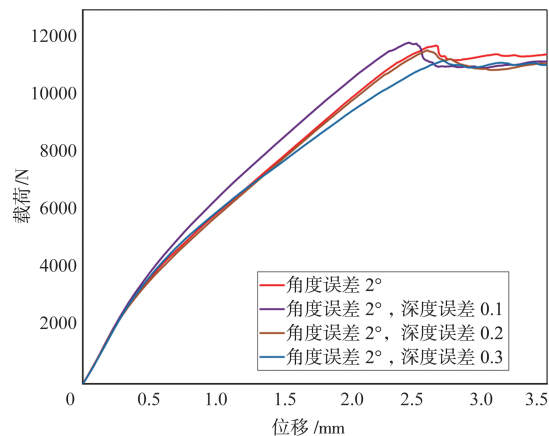
目前对镗窝深度误差对接头强度的影响已开展大量研究,普遍认为镗窝深度误差的增大会导致接头拉伸强度减小。但是角度误差和深度误差共同作用对接头强度的影响规律尚缺乏明确的结论。因此本节重点针对镗窝角度和深度误差共同作用下复合材料干涉连接接头性能开展研究。试验得到典型镗窝角度和深度误差共同作用下载荷-位移

曲线如图9所示。

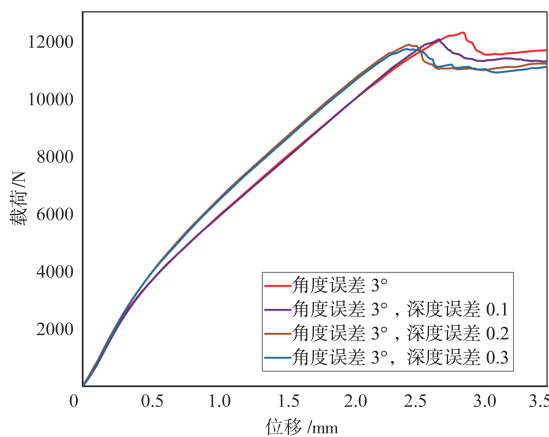
从整体趋势来看, 镗窝深度误差的增大导致接头拉伸极限载荷减小。镗窝深度误差的增大, 引起沉头螺栓上表面低于复合材料上层板上表面, 螺栓与孔壁的接触面积减



(a) 角度误差 1°



(b) 角度误差 2°



(c) 角度误差 3°

图9 镗窝角度和深度共同作用下接头载荷-位移曲线
Fig.9 Displacement-load curves under the combined effect of dimple angle and depth

小, 导致接头极限拉伸载荷减小。深度和角度误差共同作用时位移载荷曲线斜率均大于只有角度误差作用的情况下, 即接头刚度随深度误差的加入而增大。

对无镗窝几何误差、只有角度误差(1°)、同时具有角度误差(1°)和深度误差(0.2mm)三种情况进行5mm定位拉伸, 试验后结构钉头表面形貌如图10所示。无镗窝几何误差情况下, 复合材料层合板上表面的损伤范围大约为8mm, 钉头偏移距离大约为0.2mm; 只有角度误差的情况下, 上表面的损伤范围大约为10mm, 钉头偏移距离大约为1mm; 镗窝角度误差和深度误差共同作用时, 上边表面的损伤范围最大达到了14mm, 钉头偏移距离大约为2mm。镗窝深度误差导致钉头下陷, 拉伸试验后钉头与上表面偏移距离增大, 损伤范围越来越大。

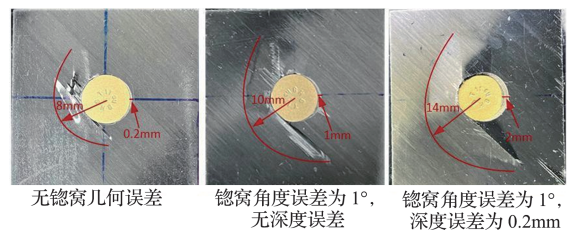


图10 定位移5mm拉伸试验后接头表面形貌

Fig.10 Surface morphology of the joint after 5mm positioning and stretching test

4 结论

本文针对镗窝几何误差对复合材料沉头螺栓干涉连接结构损伤机理与拉伸强度影响规律开展研究, 通过开展不同类型镗窝误差影响下的拉伸试验, 揭示复合材料沉头螺栓干涉连接接头失效机理, 定义镗窝误差含义并确定有效研究边界, 分别定义了镗窝角度误差、镗窝角度偏转方向误差以及镗窝深度误差的含义, 并定义了工程上有意义的有效研究边界。开展了复合材料沉头螺栓单搭接干涉连接结构拉伸试验, 获得不同镗窝角度误差、镗窝角度偏转方向误差以及镗窝角度与深度误差共同作用下的结构承载数据。

通过研究, 得出以下结论:

(1) 评估不同镗窝角度误差下连接接头的损伤机理与失效强度差异。不同镗窝角度误差相较于无几何误差情况, 失效载荷总体差异均在5%以内, 但是一旦有镗窝角度误差后, 其失效位移明显小于无误差的情形。

(2) 评估不同镗窝角度偏转方向误差对接头强度的影响。随镗窝角度误差偏转方向的增大, 连接接头的极限载荷整体变化较小, 但是达到极限载荷的位移大幅减小, 当角

度误差偏转方向为 180° 时与无几何误差情况下达到极限载荷的位移减小了 0.457mm ,降低量大于 15% 。

(3)评估镦窝角度与深度误差共同作用对连接接头强度的影响。从整体趋势来看,镦窝深度误差的增大导致接头拉伸极限载荷减小。深度和角度误差共同作用时位移载荷曲线斜率均大于只有角度误差作用的情况下,即接头刚度随深度误差的加入而增大。

AST

参考文献

- [1] 邹鹏, 屈凡. 复合材料衬套螺栓干涉连接安装过程损伤机制[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2449-2459.
Zou Peng, Qu Fan. Damage mechanism of composite sleeve-type bolt interference fit structure during the installation process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 2449-2459. (in Chinese)
- [2] 杜晨, 贺高. 复合材料与金属毛化连接试验及仿真分析[J]. 航空科学技术, 2016, 27(12): 53-58.
Du Chen, He Gao. Experiments and FEM simulation on composite and metal comeld joint [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(12): 53-58. (in Chinese)
- [3] 樊俊铃, 马国庆, 焦婷, 等. 温度和湿度对碳纤维增强复合材料老化影响研究综述[J]. 航空科学技, 2023, 34(9): 1-13.
Fan Junling, Ma Guoqing, Jiao Ting, et al. Review on the effects of temperature and moisture on the aging of carbon fiber reinforced polymers[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (9): 1-13. (in Chinese)
- [4] Zou Peng, Chen Xiangming, Chen Hao, et al. Damage propagation and strength prediction of a single-lap interference-fit laminate structure[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2020, 15(4): 558-570.
- [5] 邹鹏, 倪迎鸽, 毕雪, 等. 胶螺混合连接在复合材料结构中的研究进展[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1):1-12.
Zou Peng, Ni Yingge, Bi Xue, et al. Research on bonded-bolted hybrid joint in composite structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1):1-12. (in Chinese)
- [6] 袁修开, 赵超帆, 郑振轩, 等. 典型螺栓连接件的随机振动多模型灵敏度分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(1):119-125.
Yuan Xiukai, Zhao Chaofan, Zheng Zhenxuan, et al. Sensitivity analysis of multiply random vibration models for typical bolt connection[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(1): 119-125. (in Chinese)
- [7] 李鹏, 薛应举. 连接板厚度对沉头铆钉连接强度的影响分析[J]. 航空科学技术, 2019, 30(8): 35-40.
Li Peng, Xue Yingju. Analysis of the influence of connecting plate thickness on joint strength of countersunk rivet[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(8): 35-40. (in Chinese)
- [8] 韩传东, 梅守保. 变体飞机技术应用前景与装备谱系研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3):10-15.
Han Chuandong, Mei Shoubao. Research on application prospect and equipment ancestry of morphing aircraft technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 10-15. (in Chinese)
- [9] 徐顶国, 魏子豪, 骆盛, 等. 低RCS目标雷达散射特性增强方法研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(5): 39-43.
Xu Dingguo, Wei Zihao, Luo Sheng, et al. Study on the method to enhance the scattering characteristics of the low RCS targets[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32 (5): 39-43. (in Chinese)
- [10] 于书宇. 沉头孔结构对复合材料构件强度性能影响规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Yu Shuyu. Research on influence of countersink structure on composite joints strength[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [11] 雷金山. 沉头螺栓干涉配合的工艺参数优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Lei Jinshan. Optimization of process parameters for interference installation of countersunk bolt[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [12] Nezhad H Y, Egan M, Merwick F, et al. Bearing damage characteristics of fibre-reinforced countersunk composite bolted joints subjected to quasi-static shear loading[J]. Composite Structures, 2017, 166: 184-192.
- [13] 王建. 连接孔垂直度误差对复合材料连接性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Wang Jian. The effect of connecting hole perpendicularity error on the performance of composite bolted joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 刘学术, 杨宇星, 鲍永杰, 等. 垂直度误差影响复合材料层合板层间应力分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 138-147.
Liu Xueshu, Yang Yuxing, Bao Yongjie, et al. Effect of hole

- perpendicularity error on inter-laminar stress of CFRP[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. 2018, 37(1): 138-147.(in Chinese)
- [15] 徐茂青. 连接孔垂直度误差对复合材料双钉单剪连接性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Xu Maoqing. Effects of hole-perpendicularity error on the mechanical behavior of composite single-lap double-bolt joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [16] 姜颖. 复合材料多钉连接接头拉伸性能影响因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Jiang Ying. Study on influence factors of tensile performance for composite multi-bolt joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.(in Chinese)
- [17] HB/Z 189—1991 碳纤维复合材料构件制孔工艺[S]. 中国航空制造技术研究院, 1991.
- HB/Z 189—1991 Drilling process for carbon fiber composite components[S]. AVIC Manufacturing Technology Institute, 1991. (in Chinese)
- [18] Passipoularidis V A, Philippidis T P, Brondsted P. Fatigue life prediction in composites using progressive damage modelling under block and spectrum loading[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(2): 132-144.
- [19] Yang Yuan, Zou Peng, Dai Xilin, et al. Parametric sensitivity research of interference-fit bolted single-lap laminates joint based on an improved analytical stiffness model[J]. Journal of Composite Materials. 2021,55(30): 4513-4526.

Influence of Countersunk Bolt Geometry Error on the Bearing Performance of Composite joint Structure

Zou Peng¹, Liu Yingli²

1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

2. Xi'an Changfeng Research Institute of Mechanism and Electricity, Xi'an 710072, China

Abstract: As an important joint form in modern aircraft composite structures, countersunk bolts have a direct impact on the service performance of the structure due to their dimple accuracy and assembly quality. Countersunk bolts are widely used in aircraft composite joint structures due to their ability to ensure surface flatness of the joint structure. Due to process and structural limitations, dimple angle and depth errors are usually unavoidable and have an impact on the mechanical properties and load-bearing capacity of the jointing structures. In response to the above issues, this paper conducted a study on the impact of geometric errors in countersunk bolt dimpling on the load-bearing mechanism and strength of composite joints. Based on the definition of angle error, deflection direction error and depth error, loading experiments were conducted under different errors and microscopic analysis was conducted. By analyzing the loading curves and interface morphology, the structural damage mechanism and joint failure load under different errors were revealed, and the influence of dimple geometry error on the mechanical behavior of composite countersunk bolt single lap joint was explored, which provided theoretical basis for the efficient engineering application of countersunk bolts in composite joint structures.

Key Words: countersunk bolt; dimple angle error; dimple deflection direction error; dimple depth error; damage mechanism; failure load

Received: 2023-11-09; Revised: 2024-02-21; Accepted: 2024-04-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52005458, 52035011); Aeronautical Science Foundation of China (2018ZE23011)