

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.005

预紧力对复合材料螺栓接头拉伸力学性能的影响

岳烜德, 谢颖, 刘蕾, 李鼎, 王浩, 武艳君, 黄茹雪

(成都飞机工业有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘要:建立复合材料单螺栓单搭接接头实验模型,对预紧力及装配应力对其拉伸力学性能的影响规律进行研究。实验研究中设置 11 组不同大小的预紧力,得到预紧力大小对接头拉伸刚度和峰值载荷的影响规律。使用 3D-DIC 全场应变测量系统得到接头表面应变场,分析反映装配应力水平对接头力学性能的影响规律。结果表明:对于直径 6.35 mm 的螺栓,随着螺栓预紧力的增加,复合材料螺栓接头的拉伸刚度与峰值载荷先增加后减小,预紧力为 12 kN 左右时接头获得最佳力学性能,此时峰值载荷为 16.66 kN,拉伸刚度为 19.12 kN/mm。

关键词:复合材料;螺栓;接头;力学性能;实验

中图分类号:TB33 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0022-05

Influence of Preload Force on Tensile Mechanical Properties of Composite Bolted Joints

YUE Xuande, XIE Ying, LIU Lei, LI Ding, WANG Hao, WU Yanjun, HUANG Ruxue

(AVIC Chengdu Aircraft Industry Group Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: A model of composite single-bolt single-lap joint was established to study the influence of preload and assembly stress on its tensile mechanical properties. Eleven sets of different sizes of preload levels were set up in the experimental study, and the behaviour of preload size on the tensile stiffness and peak load of the composite joints were obtained. The strain fields on the joint surface were obtained using a 3D-DIC full-field strain measurement system, and the influence of the damage factor reflecting the assembly stress level on the mechanical properties of the joint was analyzed. The results show that the tensile stiffness and peak load of the composite bolt joint increases first and then decreases with the increase of the preload force for 6.35 mm diameter bolts. The best mechanical properties are obtained at a preload of around 12 kN, when the peak load is 16.66 kN and the tensile stiffness 19.12 kN/mm.

Keywords: composite; bolts; joints; mechanical properties; experiment

0 引言

复合材料凭借其优异的力学性能,在飞机结构中得到了广泛应用^[1-2]。复合材料的比强度和比模量较高,耐疲劳性与破损安全性较好,可以满足机体结构轻质高强的要求^[3]。随着复合材料结构设计、成型工艺和装配技术的不断发展,复合材料构件的使用部位正在由次承力部件向主承力部件扩展^[4]。复合材料构件的大量使用可以显著降低机体质量,在保证结构性能的基础上大大降低油耗并增加航程。因而复合材料的使用比例已成为衡量一型飞机先进与否的重要标志之一。

复合材料结构整体性较高,这就可以大大减少装配工作量,提升装配效率^[5-6]。复合材料结构装配时常使用的连接方式包括胶接、铆接、螺栓连接和混合连接等。其中,胶接适用于受力较小

的装配结构中,例如复合材料地板结构以及客舱行李箱结构的装配。螺栓连接主要用于受力较大的装配结构中,与气动外形有关的结构多使用沉头螺栓,例如机翼蒙皮壁板和机身筒段结构,气动外形要求不高的部位常使用六角头螺栓连接,例如中央翼盒中梁与肋的装配及翼身结合部位接头的连接。螺栓连接结构承载能力强,连接质量易于检查,因而大量应用于复合材料装配结构中^[7]。

研究表明,在复合材料螺栓连接结构中,预紧力过大或过小时均有可能削弱结构的力学性能。预紧力过小时,螺栓无法对被连接件提供足够的侧向支撑,这会使拉伸时被连接件间的静摩擦力过小,从而过早产生滑移与损伤;预紧力过大时,可能在拧紧的过程中就产生层内及层间损伤,这些损伤会成为裂纹源,使得结构在服役时过早产生结构失效,削弱装配体力学性能。因此,研究预

第一作者简介:岳烜德(1993—),男,山西忻州人,工程师,博士,研究方向为飞机装配,zhangdvv@163.com。

紧力及装配应力对复合材料结构拉伸力学性能的影响,并基于性能要求确定一个合理的预紧力取值范围,对连接质量的控制及拧紧工艺参数的确定有一定指导作用。

综上所述,本文建立复合材料单螺栓单搭接接头,研究预紧力及装配应力对其拉伸力学性能的影响规律。

1 实验材料及方法

本节所设计的实验和仿真使用的复合材料单螺栓单搭接接头,根据 ASTM D5961 标准设计了接头的外形尺寸。根据螺栓拧紧的 5 个阶段,即自锁阶段、螺栓弹性变形段、螺栓塑性变形段、复合材料损伤萌生段和复合材料损伤扩展段。选择各阶段共 11 个预紧力进行分析,研究接头的拉伸力学性能。实验过程中使用 3D-DIC 全场应变测量系统,获得复合材料表面的应变场。

1.1 拉伸试样设计

实验中使用的复合材料单搭接接头如图 1 所示。试样所用尺寸根据 ASTM D5961^[8] 标准设计。其中,试样采用的宽径比 $w/d=6.3$,端径比 $e/d=3.15$,厚径比 $t/d=0.59$,在这种情况下可以保证复合材料在拉伸过程中产生挤压失效。碳纤维环氧树脂复合材料层压板使用 977-2 预浸料铺叠,在热压罐中固化成型。层压板共铺叠为 20 层,总厚度为 3.76 mm,铺层角度为 $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$ 。螺栓直径为 6.35 mm,螺栓孔直径约为 6.40 mm,螺栓与孔之间单边间隙为 25 μm ,符合飞机复合材料结构螺栓连接要求。

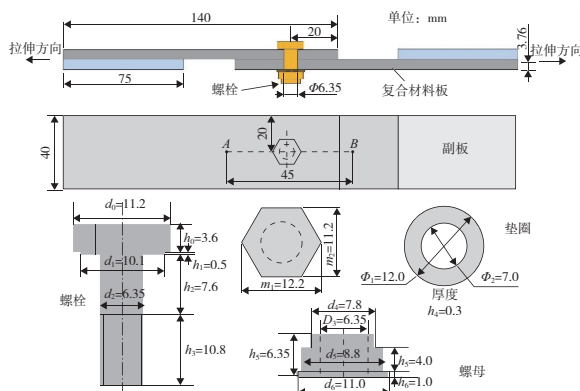


图 1 实验试样尺寸

为保证试样制造的准确度,复合材料层压板使用数控机床进行加工,金刚石涂层硬质合金刀

具用于制孔,以减小复合材料可能出现的分层或毛刺。制孔时将复合材料板置于夹具上进行,下层的复合材料板可以对上层板起到支撑作用,减少上层板出口处的分层与毛刺。此外,需要在下层板底部垫木块,以减少下层板出口端的分层情况。制孔时钻头转速为 3 000 r/min,进给速度为 15 mm/min。制孔实验表明,在该参数下,制孔时排屑顺畅,钻头轴向力变化较为平稳,所制出的孔质量较高,尺寸偏差小。

本文研究不同大小预紧力对复合材料接头力学性能的影响规律,实验组设计如表 1 所示。现行的装配大纲中规定,直径 6.35 mm 的螺栓额定预紧力为 6.21 kN。实验中共设置了 5 个预紧力分组,分别对应预紧力不足、螺栓弹性段、螺栓塑性段、复合材料损伤起始段和复合材料损伤扩展段,每个阶段设置 1—3 个预紧力水平。按照标准工况设置每组实验的拧紧工艺参数,即润滑油润滑,转速 30 r/min,拧紧螺母、在螺母端安装小垫圈以及不使用密封胶。

表 1 实验组设计

实验工况	预紧力/kN
预紧力不足	0, 2, 4
螺栓弹性段	6, 8, 10
螺栓塑性段	12, 14
复合材料损伤起始	16, 18
复合材料损伤扩展	20

1.2 实验操作步骤

拉伸实验在 SANS 万能实验机上进行。实验机最大拉伸载荷为 100 kN,拉力和位移的相对误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。准静态拉伸速度 2 mm/min,测试温度为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$,湿度为 $(55 \pm 5)\%$ 。拉伸载荷由实验机的内置传感器测量。实验中测量图 1 中 A 点和 B 点之间的位移,以此确定接头的位移。当接头峰值载荷下降超过 20% 时停止实验。每组实验重复 3 次。

如图 2 所示,三维数字图像相关 (3-dimensional digital image correlation, 3D-DIC) 系统组成部分包括 2 个 CCD 相机 (1 200 万像素, 25 mm 焦距)、1 个标定板、1 个三脚架、LED 光源和图像处理软件。实验前需要在接头表面制造散斑。首先,用酒精清洁复合层压板表面,去除油渍和污垢。将白色哑光漆均匀地喷涂在试样表面。

等白色底漆风干后,使用制斑工具制作散斑。根据接头尺寸及其与相机的距离,使用直径为 0.33 mm 的黑色散斑,并将其密度控制在 50% 左右。散斑制作完成后,将单搭接头放置在拉伸实验机的夹具上,并保证接头周围区域的开敞性。2 台 CCD 相机分别布置在接头两侧,它们用于测量复合层压板表面的应变场。测量时首先调整 CCD 相机的光圈和曝光时间,以确保相机获得的图像具有适当的亮度,避免图像曝光不足或曝光过度。其次,调整 CCD 相机的镜头焦距,以保证获得图像的清晰度。然后调整 CCD 相机的空间位姿,使 2 台 CCD 相机的光轴在接合面上的同一点相交。2 台 CCD 相机之间的夹角约为 45°,仪器测量区域约占接头表面的 3/4。

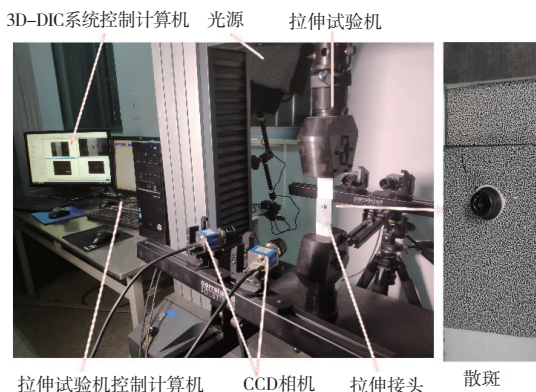


图 2 拉伸实验机和 3D-DIC 应变测量系统

接着使用标定板来标定 CCD 相机和 3D-DIC 系统。标定板是具有均匀散斑和校准特征点的标准件。在标定过程中,标定目标需要在拉伸接头位置自由旋转、倾斜和平移,并实时由 CCD 相机采集图像。图像分析软件确定了 3D-DIC 系统的内部参数和外部参数,同时校正了镜头的光学畸变。根据校准目标上的一系列已知参数,图像分析软件获得了由 CCD 相机定义的三维坐标系。该坐标系被用作对试样表面位移场和应变场进行三维测量时的参考。

在拉伸实验开始前拍摄一组照片,作为拉伸载荷为 0 时的参考图像。随后,实验机和 3D-DIC 系统同时启动,CCD 相机每 3 s 自动采集一次图像。拉伸实验结束后,停止 CCD 相机采样。在图像处理软件中选择计算区域和设置相关参数,计算该区域的位移场和应变场。

2 结果与讨论

本节主要对拉伸实验所得的结果进行分析与

讨论,分析载荷-位移曲线得到各接头的拉伸刚度与峰值载荷,并分析造成力学性能差异的原因。

通过对接头载荷-位移曲线的分析可知,拉伸过程大致可分为 5 个阶段,无滑移段、滑移段、完全接触段、损伤段和最终失效段。在无滑移段,接头依靠两板之间的静摩擦来承受外部载荷,此时接头的抗拉刚度较大。当外载荷超过两板所能提供的最大静摩擦力时,接头发生相对滑移,拉伸曲线进入滑移段。在这个阶段,位移显著增加而拉伸载荷增加较少。滑移段的长度取决于螺栓杆和孔之间的间隙大小。当螺栓杆与孔发生接触时,拉伸曲线进入完全接触段。此时接头的承载能力主要取决于螺栓杆与孔的接触面积,接头承载能力随着接触面积的增加而增加。由于螺栓杆与孔之间存在间隙,螺栓在受拉时会发生倾斜,与复合层压板形成严重挤压区,复合材料层压板的损伤也主要发生在这几个区域。随着螺栓杆和孔的挤压作用不断增强,复合层压板开始产生损伤,曲线进入损伤段。该阶段接头的抗拉刚度降低,但没有完全失去承载能力。当损伤累积到一定程度时,接头完全失去承载能力,载荷发生显著的降低,此时接头进入最终失效段。

此处的拉伸刚度主要指接触段的拉伸刚度,即螺栓杆与孔壁发生接触时的刚度,其数值通过式(1)进行计算:

$$K_0 = \frac{\Delta F}{\Delta u} = \frac{0.50 \cdot F_{\max} - 0.10 \cdot F_{\max}}{u(0.50 \cdot F_{\max}) - u(0.10 \cdot F_{\max})} \quad (1)$$

式中: $F_{\max}$ 表示峰值载荷; u 表示位移。

实验和仿真得到的载荷-位移曲线如图 3—图 7 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。分析接头的载荷-位移曲线可以看出,随着预紧力的增加,复合材料螺栓接头的拉伸刚度和峰值载荷先增加后减小,如图 8 所示。当预紧力在 12 kN 附近时,达到最佳力学性能,此时接头的峰值载荷为 16.66 kN,拉伸刚度为 19.12 kN/mm。预紧力达到 12 kN 附近时,螺栓在拧紧过程中就达到了塑性变形阶段,因此可以推断,拧紧时适当提高预紧力数值,即使螺纹中产生了少量的塑性变形,也可以提高复合材料螺栓接头的力学性能。以预紧力 12 kN 为中心,小于或大于这一预紧力均会导致接头力学性能的降低,其中预紧力为 0 kN(预紧力不足)时其峰值载荷和拉伸刚度分别降低 10.20% 和 28.45%,预紧力为 20 kN(复合材料在螺栓拧紧阶段即产生损伤)时其峰值载荷和拉伸刚度分别降低 4.98% 和 29.03%。

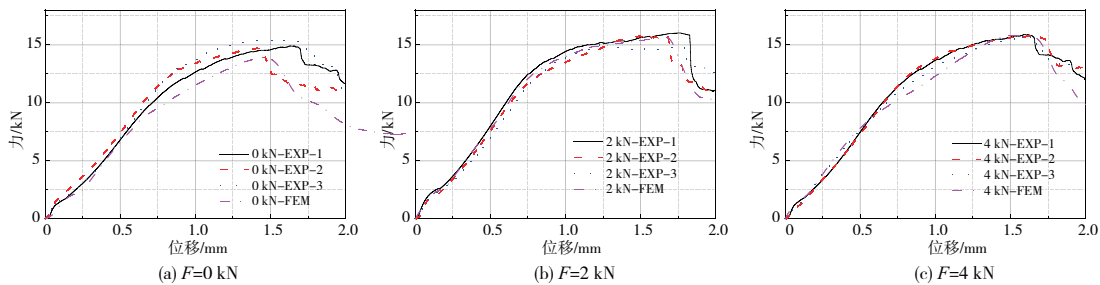


图3 预紧力不足时的载荷-位移曲线

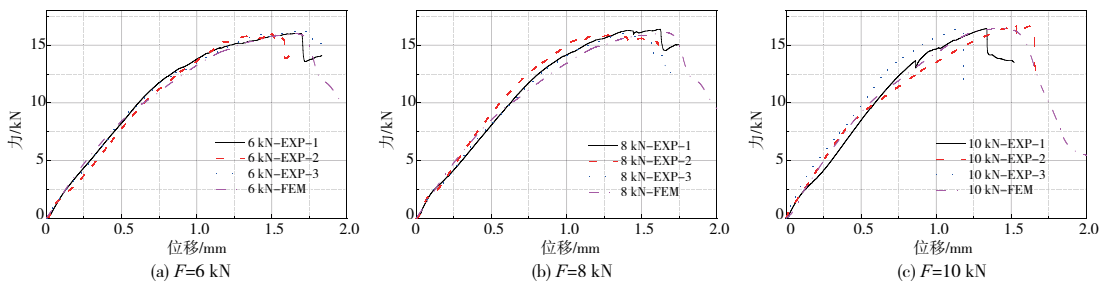


图4 螺栓弹性变形阶段的载荷-位移曲线

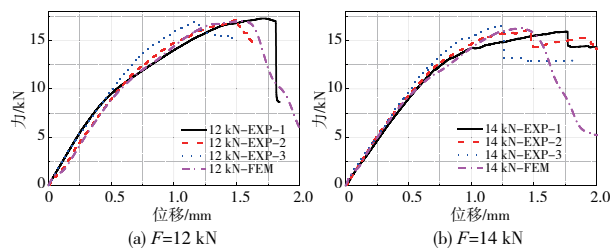


图5 螺栓塑性变形阶段的载荷-位移曲线

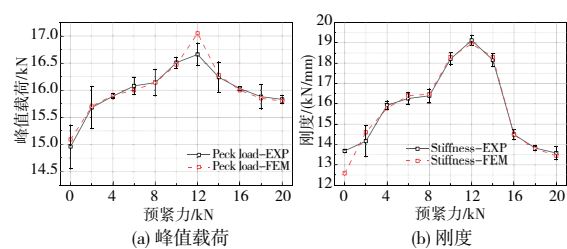


图8 不同预紧力下接头的峰值载荷与拉伸刚度

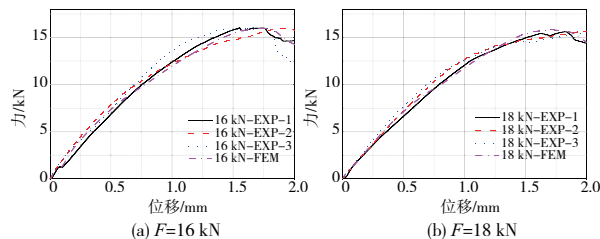
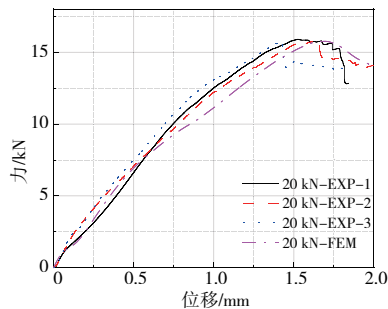


图6 复合材料损伤萌生阶段的载荷-位移曲线

图7 复合材料损伤扩展阶段的
载荷-位移曲线 ($F=20$ kN)

预紧力过小时,无法为复合材料层压板提供足够的侧向支撑,导致两板之间可提供的静摩擦力过小,因而非滑移段的刚度会显著变小,且两板之间会过早产生相对滑移。进入挤压阶段后,接头的承载能力主要取决于螺栓杆与孔壁之间的接触面积,预紧力较小则螺栓所能提供的侧向约束较小,相同的拉力下可能产生更大的位移,导致二者之间接触面积减小,因而拉伸刚度也显著减小。此外,预紧力过小会导致螺栓杆与孔之间局部挤压作用增强,在压力较大的区域可能过早产生复合材料基体破碎或螺栓杆的塑性变形,从而减小接头的峰值载荷。在一定程度内增加预紧力可以提高接头的侧向支撑,从而提高接头的拉伸刚度和峰值载荷。

图9所示为载荷14.5 kN左右时复合材料层压板表面的应变场。分析应变分布规律可知,预紧力大小对复合材料表面应变场影响较大,随着预紧力的增加,靠近螺栓孔附近的区域应变值也

明显减小。拉伸过程中,由于试样发生了较为明显的次弯曲作用,因此在靠近螺栓孔的 y 方向产生较大的压缩应变,靠近螺栓孔的 x 方向产生较大的拉伸应变。拉伸时螺栓头和螺母对复合材料

板产生较强的挤压作用,因此孔周应变集中最为严重,是损伤产生和扩展的主要区域。研究中发现螺栓预紧力是影响应变场的主要因素之一。

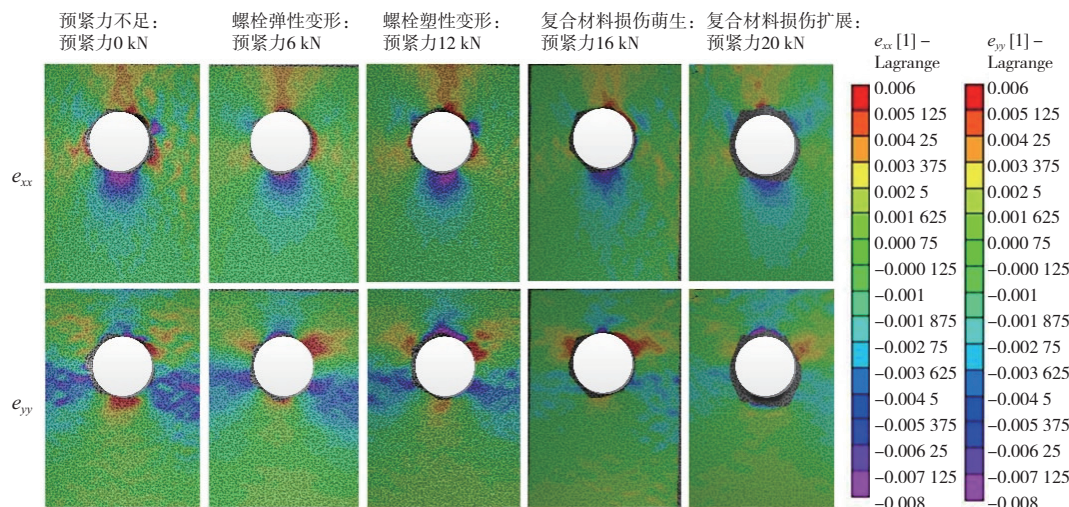


图9 外载荷 14.5 kN 时复合材料孔周应变场分布

3 结语

1) 对于直径 6.35 mm 的螺栓而言,随着螺栓预紧力的增加,复合材料螺栓接头的拉伸刚度与峰值载荷先增加后减小。预紧力为 12 kN 左右时接头获得最佳力学性能,此时峰值载荷为 16.66 kN,拉伸刚度为 19.12 kN/mm。

2) 预紧力大小对复合材料表面应变场影响较大,随着预紧力的增加,相同拉伸载荷下螺栓孔附近应变值显著减小。

参考文献:

- [1] AAMIR M, TOLOUEI-RAD M, GIASIN K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5/6): 2289-2308.
- [2] ARISTA R, FALGARONE H. Flexible best fit assembly of large aircraft components. airbus A350 XWB case study [M]//Product Lifecycle Management and the

Industry of the Future. Cham: Springer International Publishing, 2017: 152-161.

- [3] MARSH G. Airbus A350 XWB update [J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(6): 20-24.
- [4] 杨浩然, 安鲁陵, 黎雪婷. 飞机结构中柔性件装配偏差分析与控制研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 30-37.
- [5] 王华. 飞机先进复合材料结构装配协调技术研究现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 26-33.
- [6] 高航, 曾祥钱, 刘学术, 等. 大型复合材料构件连接装配二次损伤及抑制策略 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(22): 28-35.
- [7] 谢鸣九. 复合材料连接技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [8] BABU K N, NARESH H, SRINIVASA GUPTA G. Design and analysis of bolted joint for rocket motor casing [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5165-5174.

收稿日期: 2023-03-20