

大型民用飞机机身对接区双面均衡夹紧装置设计

许雷¹ 胡俊山^{1*} 凡志磊² 葛恩德² 张胜平¹ 田威¹

1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016

2. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海, 200436

摘要:为提高机身对接区装配效率,拟采用一体化的挤胶制孔装配工艺,该工艺需实现对接区的均衡夹紧,保证密封胶的均匀挤出并有效抑制孔加工导致的层间间隙。以某大型民用飞机机身对接区典型工况特征为例,设计了一种双面均衡夹紧装置,通过有限元仿真量化表征区间载荷不均匀度,结合最小单孔夹紧力,对装置均衡压紧模块布局及主体材料进行优化,开展了装置在对接区的均衡载荷测试与一体化挤胶制孔验证。结果表明,均衡压紧模块能够显著提高装置夹紧载荷的均匀性,且随着中间橡胶压紧环硬度的提高,夹紧载荷均匀性进一步改善;装置主体选用刚度更好的Q235材料后,对接区最小单孔夹紧力达到403 N,区间载荷不均匀度为1.4%,密封胶能够充分均匀挤出,且层间未形成明显毛刺和卷入切屑。

关键词:机身对接;航空叠层结构;均衡载荷;产品设计

中图分类号: V262.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.034

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of a Dual-sided Equilibrium Clamping Device for Fuselage Docking Areas of Large Civil Aircrafts

XU Lei¹ HU Junshan^{1*} FAN Zhilei² GE Ende² ZHANG Shengping¹ TIAN Wei¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai, 200436

Abstract: To enhance the assembly efficiency of the fuselage docking areas, an integrated assembly process of sealant extrusion and hole-making was proposed. The process was required to achieve balanced clamping of the docking areas, ensuring the uniform extrusion of the sealant and effectively suppressing the interlaminar gaps caused by hole machining. The typical working condition characteristics of a large civil aircraft fuselage docking areas were taken as an example, and a dual-sided equilibrium clamping device was designed. Using finite element simulation to quantify the unevenness of the interlaminar loads, combined with the minimum single-hole clamping force, the layout of the device's balanced pressing module and the main body materials were optimized. The balanced load tests of the device's docking areas and the integrated sealant squeezing and hole making verification were carried out. Results indicate that the balanced pressing module significantly enhances the uniformity of the clamping loads of the devices. Furthermore, when the hardness of the central rubber pressing ring is increased, the uniformity of the clamping loads is further improved. After selecting Q235 material, which offers better rigidity, for the main body of the devices, the minimum single-hole clamping force in the docking areas reaches 403 N, with an interval load unevenness of 1.4%. The sealant is extruded fully and evenly, and no significant burrs or rolled chips are formed between the layers.

Key words: fuselage docking; aerospace stacked structure; equalizing load; product design

0 引言

机身筒段对接装配是飞机总装的关键环节,对接区连接质量极大地影响整体结构强度与密封

性能^[1-2]。传统机身筒段对接装配过程中采用“制孔—分解去毛刺—涂敷密封胶—铆接装配”工艺流程^[3],经历两次上架对接,影响整体装配效率。若采用一次性涂胶后制孔铆接的工艺流程,则可以避免二次上架导致的装配误差并缩短装配周期,但需在对接区提供可靠夹紧载荷,既要保证密封胶从贴合面均匀挤出,满足飞机结构的气密、水密和防腐要求^[4-5],还需要有效抑制在对接区对相

收稿日期:2024-08-19

基金项目:国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMAC-SFGS-2022-2475);江苏省自然科学基金(BK20231444);中央高校基本科研业务费(NT2024013)

关孔加工过程中产生的间隙,提高层间质量^[6]。

目前,国内外学者针对密封胶均匀挤出影响因素以及通过预压紧力提高航空叠层零件制孔层间质量开展了相关研究。ELISEEV等^[7]研究了大型飞机结构的湿式装配过程,仿真和实验结果表明,在装配过程中需要提供均衡载荷来保证密封胶充分挤出。毕运波等^[8]研究表明,适当的挤出压力和速度可以保证密封剂均匀填充到叠层结构中,避免空气泡沫和空隙的产生。LIANG^[9]建立了叠层结构间隙形成的简化模型,指出在单侧提供预压紧载荷限制其间隙能够有效减小层间毛刺的高度。机身对接区是典型的航空薄壁叠层结构,通过施加单向局部预压紧载荷提高叠层结构装配质量的方法已逐步应用于新型飞机的生产。然而,单向预压紧载荷通常应用于刚度较好的机身结构中,对接区装配时其结构仅由蒙皮、带板和隔框组成,在制孔过程中易产生间隙。此外,对接区沿环向尺寸较大,局部压紧方法效率低且无法实现对接区贴合面密封剂的均匀挤出。

为满足机身对接区一体化挤胶制孔工艺中的均匀挤胶和层间质量要求,本文在对某客机前中机身典型对接区结构进行工艺分析的基础上设计了一种双面均衡夹紧装置;构建夹紧装置有限元模型,预测对接区均衡夹紧效果,优化均衡压紧模块布局及装置材料;开展装置对接区均衡载荷测试与一体化挤胶制孔工艺验证,评估装置的可行性。

1 对接区一体化挤胶制孔装配工艺分析

1.1 对接区装配工况

某型号客机前中机身对接区结构如图1所示,整体为360°的环形薄壁叠层结构。对接区以基准平面划分为上下两部分,其零件结构特征以及长桁接头的分布关于飞机的对称线左右对称。装配过程中,由于机身内部地板的存在,导致开敞性较差,因此对接区需分区后才能夹紧。环形对

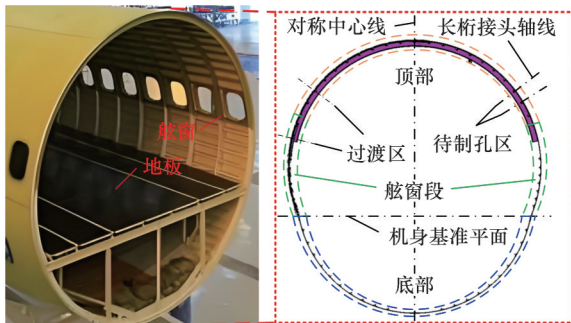


图1 某型号客机机身对接区结构示意图

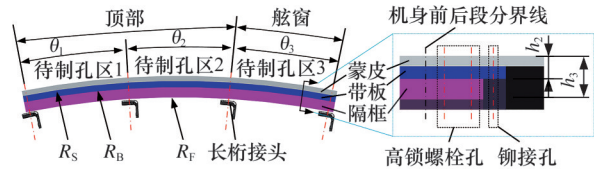
Fig.1 Structural schematic diagram of the docking area of a certain passenger aircraft fuselage

接区依据长桁接头分布特征可以分为顶部、底部和舷窗段,由相邻两个长桁接头轴线划分出待制孔区。同一分段内的待制孔布局与装配工况统一,顶部和底部待制孔区分布均匀且连续,而舷窗段所包含的待制孔数量最多,待制孔区的跨度也最大。本文以顶部与舷窗过渡区为例设计夹紧装置,涵盖对接区的完整工况信息,因此该夹紧装置在其他对接区也适用。

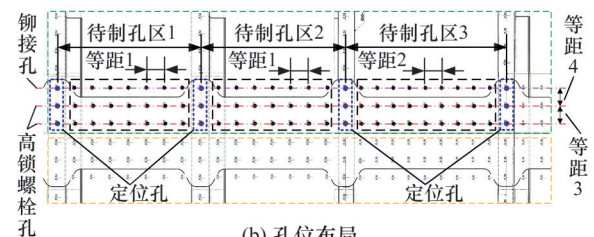
1.2 过渡区结构尺寸及孔位布局

过渡区结构尺寸如图2a所示,共包含2个顶部待制孔区、1个舷窗待制孔区以及4个L形长桁接头。过渡区是由蒙皮、带板和工字形隔框组成的叠层结构。为便于夹紧装置的设计与制造,通过孔轴线之间的夹角描述其相对位置,并沿顶部向舷窗对过渡区的待制孔区进行编号,对应待制孔区范围为预制孔轴线之间的夹角,分别为 $\theta_1=6.64^\circ$, $\theta_2=6.64^\circ$, $\theta_3=6.80^\circ$ 。对接区包括蒙皮和带板的两层叠层与蒙皮、带板和隔框的三层叠层,夹持厚度分别为 $h_2=2.9\text{ mm}$ 、 $h_3=5.4\text{ mm}$,蒙皮、带板和隔框的内圆半径分别为 $R_s=1670.35\text{ mm}$ 、 $R_B=1669.08\text{ mm}$ 、 $R_F=1666.54\text{ mm}$ 。

过渡区孔位布局情况如图2b所示,在对接装配前,对接区一侧与中机身壁板完成装配,形成装配接头,另一侧与前机身壁板在对应定位孔处加工预制孔。沿机身筒段周向,待制孔区1和2的待制孔中心轴线夹角为等距1,0.83°。待制孔区3的待制孔中心轴线夹角为等距2,0.68°。沿轴向两排高锁螺栓孔间距为等距3,25 mm。高锁螺栓孔与铆接孔的间距为等距4,22 mm。对接区零件在长桁接头处都预制定位孔,孔径为4~5 mm。待制孔区1和2均有7排3列共21个待制孔,待制孔区3包含9排3列共27个待制孔。



(a) 结构尺寸



(b) 孔位布局

图2 过渡区工艺特征

Fig.2 Process characteristics of transition zone

1.3 面向一体化挤胶制孔工艺的均衡夹紧标准

原对接区装配工艺流程如图3a所示：①机身前后筒段定位对接后上架固定；②对接区叠层统一加工初级孔；③机身前后筒段下架，清理切屑并去除毛刺；④零件贴合面清洁后涂敷密封胶；⑤机身前后筒段再次上架；⑥安装临时紧固件，夹紧挤胶后静置；⑦加工最终孔后进行连接；⑧逐步拆除临时紧固件，完成装配。该流程中机身经历二次上架，重复定位误差及制初级孔时引起的壁板变形会导致对接区零件第二次对接上架时的孔位存在偏差，原工艺采用分级制孔（即先小孔后大孔）的方式解决上述问题，因而无法实现一次性制成最终孔，影响整体装配效率。此外，由于临时紧固件干涉，不利于连接过程的自动化。

为避免引入重复定位误差，有效缩短装配周期，拟采用一体化挤胶制孔装配工艺流程，如图3b所示：①对接区零件贴合面清洁后涂敷密封胶；②机身前后筒段定位对接后上架固定；③对接区充分夹紧挤胶后静置；④一次性加工最终孔；⑤清理出入口毛刺完成后续连接。为实现对接区的可靠夹紧，所提供压紧载荷需满足：①能够在待制孔区形成与航空穿心夹类似的双侧夹紧区，实现对接区层间密封胶均匀挤出；②待密封胶处于半干状态，有效限制孔加工过程中叠层结构由于弯曲变形产生的间隙，从而避免形成明显层间毛刺以及卷入切屑的问题。传统装配过程中，采用

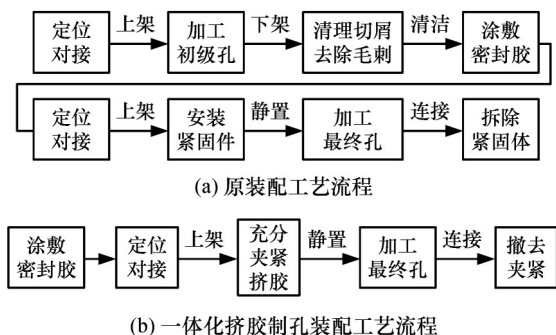


图3 机身对接区装配工艺流程

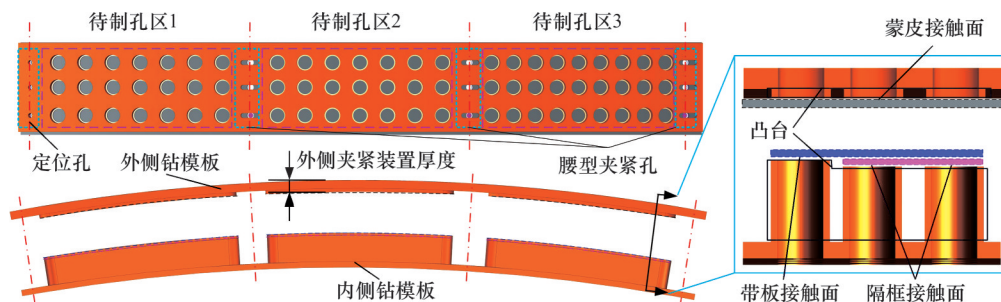


图5 夹紧装置主体结构图

航空穿心夹实现对接区夹紧，保证叠层结构的有效贴合，在每个待制孔区域所提供的压紧载荷不少于400N。

2 对接区双面均衡夹紧装置结构设计

综合对接区工艺分析及一体化挤胶制孔装配的均衡夹紧需求，设计的随形双面均衡夹紧装置见图4。双面均衡夹紧装置分为内外两部分，其表面对应每个待制孔设置导向孔，用以引导制孔工具。两侧夹紧装置在待制孔区分别与对接区零件表面贴合，由螺栓依次穿过外侧夹紧装置、蒙皮、带板、工字形隔框、长桁接头以及内侧夹紧装置的定位孔，对螺栓施加预紧载荷后实现双侧夹紧。

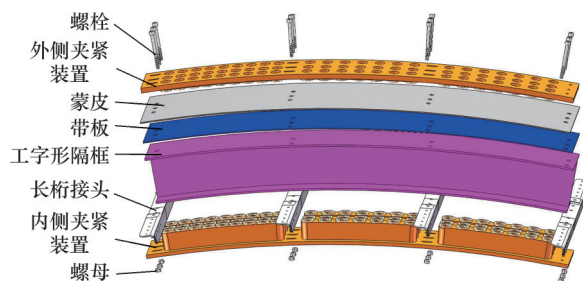


图4 双面均衡夹紧装置装配示意图

Fig.4 Assembly diagram of dual-sided equilibrium clamping device

2.1 装置主体结构

夹紧装置的主体部分如图5所示，由内外两个钻模板和环形凸台组成。钻模板结构能够提高待制孔定位精度及法向垂直度，并限制由于工具振动引起的孔位偏差^[10]。环形凸台用以模拟航空穿心夹对待制孔的双侧夹紧，将钻模表面的螺栓预紧载荷传递至待制孔区。

外侧夹紧装置的凸台与蒙皮的曲率一致，其整体厚度为15 mm，钻模板厚度由钻套高度以及工具尺寸决定^[11]，表面凸台高度设置为2 mm。内侧夹紧装置的凸台需考虑两种叠层类型，因而同时包含带板和隔框两个曲率。内侧夹紧装置承担

支撑和排屑的作用,其凸台高度为 27 mm,高出长桁接头约 2 mm,以实现装置的轻量化并横跨长桁接头。最后,装置表面的定位孔、腰型夹紧孔以定位孔为基准,参照待制孔区的孔位布局通过铣削制成,保证夹紧装置的孔位精度。

2.2 定位与夹紧

装置利用对接区装配前预制的定位孔进行定位。内外夹紧装置沿同一法向铣制圆形定位孔,该定位孔与零件表面定位孔同轴,由螺栓孔实现装置的定位。装置钻模板在其他预制孔处采用腰型夹紧孔设计,补偿预制定位孔沿对接区环向存在的孔位偏差。螺栓组件安装在上述定位、夹紧孔后施加预紧载荷,实现对接区的双侧夹紧。

2.3 均衡压紧模块

装置加载后的夹紧示意图见图 6。对待制孔区两端螺栓施加预紧力 p 后,装置主体在凸台与零件表面贴合后发生弯曲变形,对接区内外两侧夹紧力 F 由两端向中间递减,导致密封胶出现中间厚、两侧薄的不均匀分布情况。装置凸台表面设置由端部和中部压紧环组成的均衡压紧模块,用以实现装置的均衡夹紧,并提供合适的单孔夹紧力,该压紧载荷能够有效限制叠层零件制孔过程中的层间间隙^[12]。压紧环与装置主体过盈装配,外径为 18 mm,内径为 10 mm,避免与长桁接头和钻铆工具发生干涉。

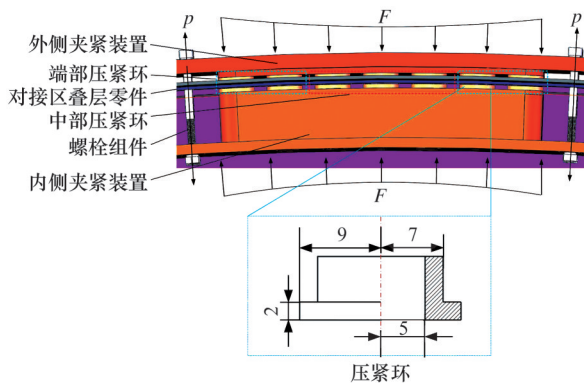


图 6 装置夹紧示意图

Fig.6 Schematic diagram of the clamping of the device

为实现对接区快速均衡压紧,并根据施加的螺栓载荷自适应调节夹紧力,压紧环采用具有非线性和超弹性力学性能的硬质橡胶^[13-14]。装置停止加载后,单个压紧环所提供的夹紧力为

$$F_i = G\delta_i \quad (1)$$

式中: G 为橡胶的刚度模量; δ_i 为第 i 个压紧环受载后的压缩量。

中部压紧环所用橡胶硬度大于两端,装置受载后,中部压紧环变形量小于两端,随着变形量的

增大,压紧环的刚度非线性增大,中部和两端的夹紧力交替上升,最终整体的夹紧力趋于一致,从而实现对接区的均衡压紧。此外,采用橡胶压紧环可以减少装置对零件表面的磨损,并利用其自适应变形补偿装置主体由于加工精度导致的凸台高度误差。

2.4 装置加载标准

按上述流程在对接区零件两侧安装夹紧装置后施加螺栓预紧载荷,密封剂均匀挤出,保持装置夹紧,待密封胶半干后,进行制孔。传统装配工艺中,以对接区环向安装 50% 数量的航空穿心夹为夹紧标准,根据工程经验,该夹紧方法所提供单孔夹紧力不少于 400 N。因此,夹紧装置理论所需提供的总夹紧力至少为 27 600 N,每个螺栓提供预紧载荷为 2300 N,对应拧紧力矩约为 2 N·m。本文所用螺栓为安全等级 12.9 的 M4 高强度螺栓,最小破坏扭矩为 4.9 N·m,其安全裕度超过 2.45,防止螺栓因过度装配失去承载能力。

3 装置均衡加载有限元分析与构型优化

3.1 夹紧装置有限元模型构建

装置在对接区的层间载荷预测有限元模型如图 7 所示,包含简化后的对接区叠层零件和内外两侧的均衡夹紧装置。在夹紧过程中不涉及长桁接头的变形,模型中省去该零件。装置及对接区零件的三维模型在 SolidWorks 中创建并进行装配,通过 Parasolid 文件导入装配模型至 ABAQUS 中进行有限元分析。

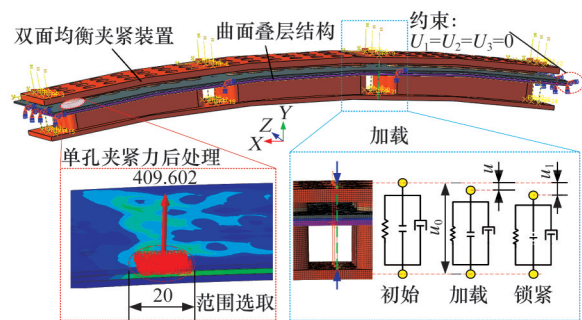


图 7 双面均衡夹紧装置有限元模型

Fig.7 Finite element model of dual-sided equilibrium clamping device

曲面叠层结构由蒙皮、带板和隔框组成,通常采用质量小、工艺性好的 2 系列和 7 系列铝合金^[15-17]。夹紧装置主体选用较高刚度的材料以减小装置的弯曲变形,本文对比 Q235 和 HT250 两种常用钻模板材料装置的均衡夹紧效果。均衡压紧模块选用 52HS、61HS 两种硬度的橡胶,采用 Yeoh 本构模拟其超弹性力学性能^[18],其本质为典

型的S形橡胶应力-应变函数曲线,通过 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 3个由材料决定的系数控制其弹性响应和非线性行为,当系数 $D_1=D_2=D_3=0$ 时,表示材料不可压缩。仿真所用到的材料参数见表1~表3。

表1 曲面叠层结构材料参数

Tab.1 Material parameters of curved laminated structure

	牌号	弹性模量/GPa	泊松比
蒙皮、带板	2系列铝合金	71	0.31
隔框	7系列铝合金	68.9	0.3

表2 夹紧装置材料参数

Tab.2 Material parameters of the clamping device

材料	弹性模量/GPa	泊松比
Q235	210	0.3
HT250	120	0.25

表3 橡胶压紧环材料参数

Tab.3 Material parameters of the rubber compression ring

硬度/HS	52	61
C_{10}	0.380	0.573
C_{20}	0.011	0.024
C_{30}	0.000 004	-0.000 17
$D_1=D_2=D_3=0$		

模型采用8节点,尺寸为1 mm的六面体(C3D8R)网格单元,共有521 064个单元。对模型整体设置通用硬接触,两侧装置共12对螺栓安装通孔,分别与对应参考点耦合约束。采用显式动力求解方法分析对接区层间载荷的均匀性及单孔夹紧载荷。单孔夹紧力的选取范围由压紧环尺寸确定,是以待制孔轴线为圆心、直径约20 mm的圆形区域,其载荷大小与方向由软件计算获得。

3.2 模型约束与加载

夹紧装置有限元模型的约束与加载边界条件如图7所示。对接区一侧与中机身通过螺栓和铆钉连接,限制带板和隔框沿对接区周向和轴向位移,在模型中约束零件侧面3个方向的位移。通过Connector单元施加螺栓载荷,提高计算效率并模拟螺栓动态加载过程。螺栓预紧力以轴向载荷为主,其刚度模量可以由下式获得^[19]:

$$k = EA/l \quad (2)$$

式中: E 为螺栓材料的弹性模量; A 为螺栓公称截面积; l 为螺栓有效长度,模型中指夹紧装置内外表面间距,其值为55 mm。

计算得到安全强度12.9的M4高强度螺栓的刚度模量为2500 N/mm。

螺栓初始长度为 u_0 ,其加载分为两个步骤:

①施加位移载荷 u ,模拟螺栓拧紧过程,层间密封

胶被挤出;②当位移达到 u_1 后锁紧,保持对接区结构两侧的夹紧,为待制孔区提供压紧载荷。其中,初始长度 u_0 为螺栓有效长度55 mm,最终位移 u_1 为1 mm,对应每个螺栓所提供载荷为2500 N。

3.3 均衡载荷有限元结果分析及装置优化

在有限元分析结果中,对接区贴合面的应力分布情况直观地反映出夹紧后密封胶层的受载均匀性,通过优化装置橡胶压紧环硬度布局与装置主体材料的选取来保证其受载均匀性。

装置在没有均衡压紧模块时,对接区层间载荷预测结果如图8a所示。装置受载后发生明显弯曲变形,在中部待制孔区与零件分离,无法为整个待制孔区提供均衡压紧载荷,且出现了较为严重的应力集中。对夹紧装置进行优化,加装统一硬度橡胶压紧环组成的均衡压紧模块,层间载荷预测结果如图8b所示。依靠橡胶压紧环的自适应变形,装置加载后仍能与零件表面保持接触,提高对接区层间载荷均匀性,但由于橡胶套整体刚度相同,中部压紧载荷明显低于两侧。为此,中部压紧环选用硬度更高的橡胶材料,优化后的层间载荷预测结果如图8c所示。夹紧装置两端受螺栓预紧载荷后,两侧的应变量高于中部,对于同一种材质的橡胶,会产生明显的应力差。而当提高中部压紧环的硬度后,其刚度模量也随之增大,因此在同样的应变下,其所提供的应力增大,进而降低了待制孔区中部与两侧的应力差,提高了整体压紧模块的均衡应力调节能力。最后,对比Q235和HT250两种常用钻模材料夹紧装置的均衡夹紧效果,如图8c、图8d所示。两者的夹紧应力都呈现出良好的均匀性,具体的夹紧载荷水平需针对单孔夹紧力进行分析。

为进一步对比两种材料装置均衡夹紧效果,对待制孔区层间载荷不均匀度进行量化表征,公式如下:

$$\delta = \max(Q_i - \bar{Q}) / \bar{Q} \quad (3)$$

式中: δ 为不均匀度,其值越小,代表所受压紧载荷越均匀; $Q_i(i=1,2,3)$ 为单个待制孔区所受总压力; \bar{Q} 为3个待制孔区的平均压力。

后处理模块中得到两种材料装置的单孔夹紧力仿真结果如图9所示。图中,蓝色锥棱台为蒙皮和带板的两层叠层零件区域,红色锥棱台为蒙皮、带板和隔框组成的三层叠层零件区域。HT250的弹性模量低于Q235钢,装置受载后更易发生弯曲形变,接触表面产生横向载荷,待制孔区总压力分别为10 140 N、11 195 N和10 440 N,区间载荷不均匀度为5.7%,所受到的单孔夹紧力

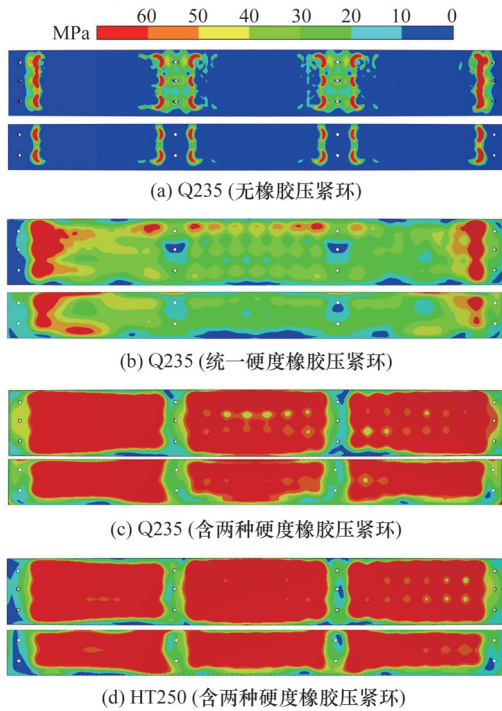


图8 层间均衡应力仿真预测结果

Fig.8 Interlaminar equilibrium stress simulation prediction results

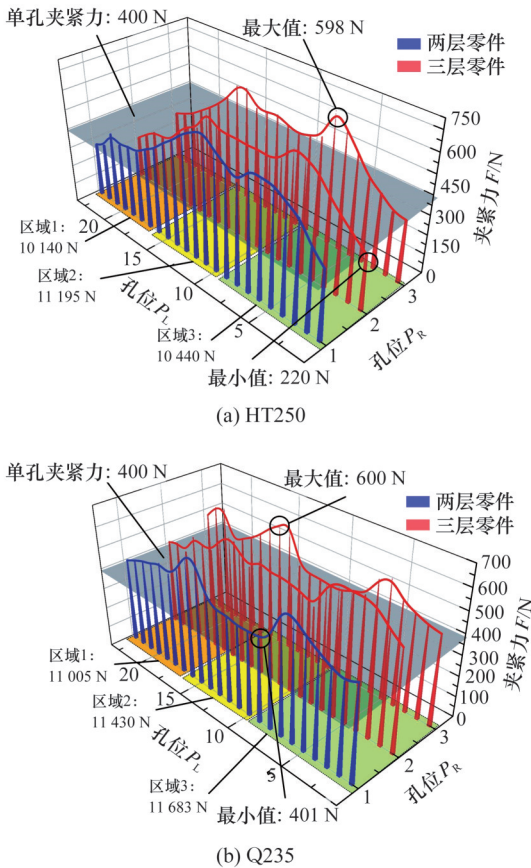


图9 单孔夹紧力仿真结果

Fig.9 Clamping force simulation results of single-hole

向中部待制孔区集中,其待制孔区最小单孔夹紧力仅为220 N,不满足原有夹紧方式单孔夹紧力400 N标准,待制孔区存在产生间隙的风险。改

用Q235材料后,3个待制孔区的总单孔夹紧力分别为11 005 N、11 430 N和11 683 N,区间载荷不均匀度为2.7%,均匀性有效改善。装置提供的单孔夹紧力在401~600 N之间,达到对接区叠层结构不产生间隙的最小夹紧力标准。

综合上述仿真结果分析,安装均衡压紧模块后,装置均衡夹紧性能显著提高,且对接区薄壁零件夹紧过程中无明显变形。优化均衡夹紧模块,中部和端部压紧环分别采用硬度为61HS和52HS的橡胶材料,进一步改善层间载荷均匀性。最后,优化装置主体材料,选用刚度更高的Q235结构钢以提高夹紧载荷均匀度并保证单孔夹紧力不少于400 N。

4 装置均衡载荷测试与工艺验证

4.1 装置均衡载荷测试

为验证装置均衡夹紧设计和有限元预测结果的有效性,采用柔性薄膜压力传感器(M3232L,柔希电子科技有限公司,常州)监测对接区层间受载分布,测试平台如图10所示。传感器由32×32共1024个压电片组成,每个压电片量程为50 kg,测量精度为0.1 kg,每个待制孔区域约占16个压电片。由测试软件将数据采集盒收集到的传感器应变信号转化为压紧载荷,以载荷云图的形式反馈载荷均匀性。

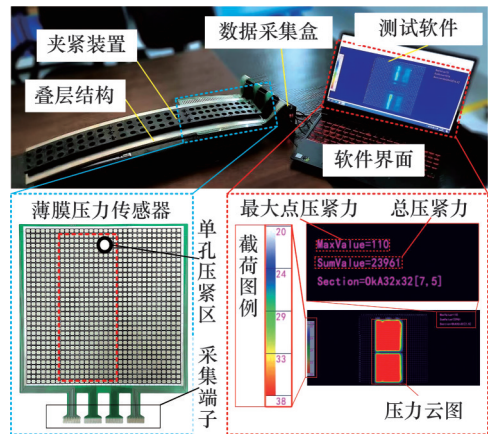


图10 均衡载荷测试平台

Fig.10 Equilibrium pressure testing platform

装置主体选用Q235结构钢,由高精度数控机床加工而成并进行热处理,以提高装置整体结构刚度。测试过程中,压力传感器放置于对接区零件3个待制孔区的贴合面。扭矩控制螺栓预紧载荷的方法因其操作简便、对设备的要求低等特点,能够很好地适用于施工现场,但其精度受摩擦因数、接触条件等因素的影响,误差甚至可以达到±25%,且螺栓在密封胶持续挤出的过程

中会发生松动。因此,本研究中针对挤胶后的对接区工况开展了装置的夹紧试验,对比无胶状态下的层间夹紧载荷以及密封剂的挤出情况,最终确定螺栓预紧策略,即对每个螺栓进行3次复拧,间隔3~5 min,并由定力矩扳手确保每次拧紧力矩不小于2.5 N·m。在该预紧策略下,最小单孔夹紧力超过400 N,且密封剂能够均匀挤出。

4.2 对接区一体化挤胶制孔工艺验证

开展装置对接区一体化挤胶制孔工艺的验证,所搭建平台如图11所示。由搭载制孔末端的工业机器人实现制孔,配备视觉传感器以实现孔位找正。刀具为带有PCD涂层的双刃钻铰刀,以提高铝合金叠层结构的制孔质量^[20]。

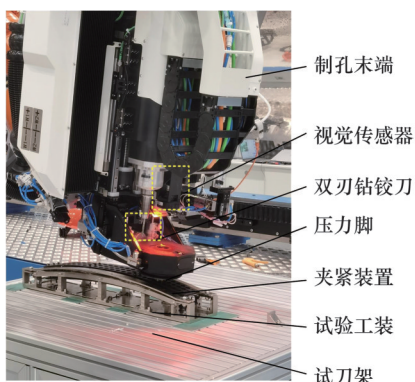


图11 制孔工艺验证平台

Fig.11 Verification platform for drilling process

对接区零件表面涂敷密封剂后上架,安装双面可靠夹紧装置并施加螺栓载荷,挤出密封胶,待密封胶半干后开展制孔。制孔工艺参数参考实际生产加工,主轴转速为4500 r/min,进给速度为300 mm/min,压力脚压力为300 N。

4.3 均衡载荷测试及工艺验证结果

对接区层间载荷测试结果如图12所示。无均衡压紧模块的夹紧装置在两端受载后弯曲变形,装置在待制孔区中间部位隆起,与对接区零件

表面分离,无法提供夹紧力。安装均衡压紧模块后,在相同的螺栓预紧载荷下,橡胶压紧环先于装置发生压缩变形,依赖其超弹性力学性能,橡胶压紧环在持续加载过程中自适应调节压紧载荷,最终实现对接区的均衡夹紧,且试验件未发生明显变形。测试与有限元预测的层间载荷均衡分布结果一致性较好,进一步验证了仿真预测结果的有效性。

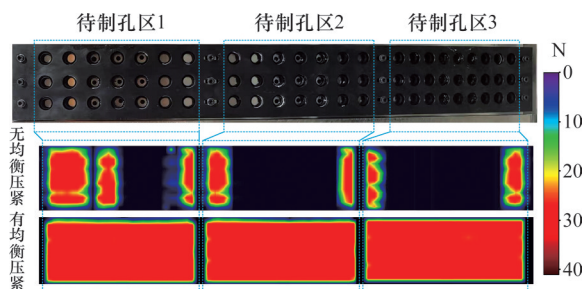


图12 对接区层间载荷测试结果

Fig.12 Test results of docking area interlaminar load

3个待制孔区的单孔夹紧力测试结果如图13所示,图中,两层零件为蒙皮和带板叠层,三层零件为蒙皮、带板及隔框叠层。3个待制孔区所受总压力分别为13 271 N、12 954 N、13 027 N,区域间不均匀度仅为1.4%。每个待制孔区的单孔夹紧力从两端向中部逐渐变小,区域内最小单孔夹紧力分别为581 N、574 N、403 N,均达到对接区制孔时不产生间隙的最小单孔夹紧力。此外,待制孔区1和待制孔区3内最大与最小单孔夹紧力分别相差116 N和161 N,待制孔区3的均匀性低于待制孔区1,这是由于待制孔区的跨度增大后,装置中部受到的弯矩增大,更易发生弯曲变形,因此,较短的装置跨度更有助于夹紧力的均衡分布。本研究涉及跨度最长的舷窗段,具有完整的对接区工况信息,所设计夹紧装置能够适用于其他对接区结构。

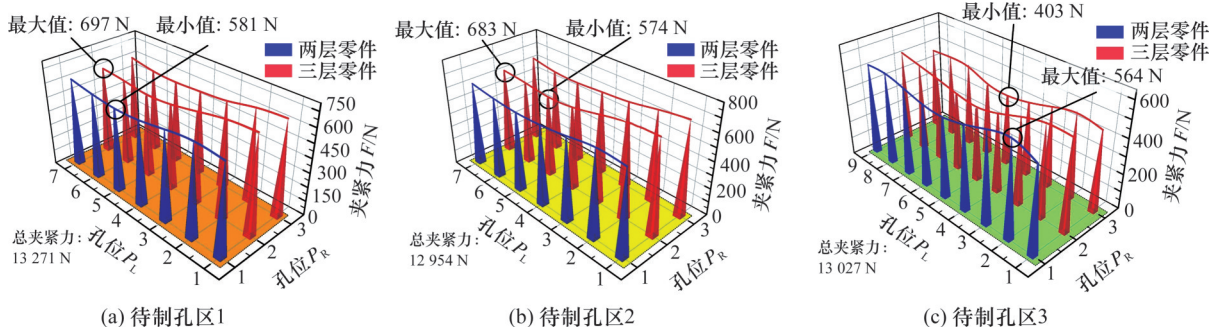


图13 单孔夹紧力试验结果

Fig.13 Test results of clamping force for single-hole

装置对层间密封胶挤出效果如图 14 所示。密封胶沿贴合面一侧均匀挤出,验证了装置的均衡夹紧效果。

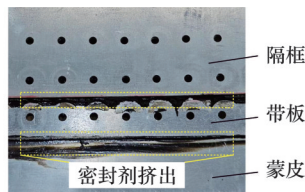


图 14 密封胶挤出效果

Fig.14 Effect of sealant extrusion

由层间均衡载荷测试结果可知,待制孔区 2 所受总夹紧力最小,在该区域易出现挤胶不均匀,层间产生间隙的问题。因此,着重关注该区域层间出入口毛刺及卷入切屑情况,在湿胶状态下拆解试验件,两个贴合面层间质量如图 15 所示。胶层的均匀性较好,制孔过程中以带状切屑为主,层间未卷入切屑且出入口未形成明显毛刺。夹紧装置能给待制孔区提供足够的单孔夹紧力,有效抑制制叠层结构的间隙。

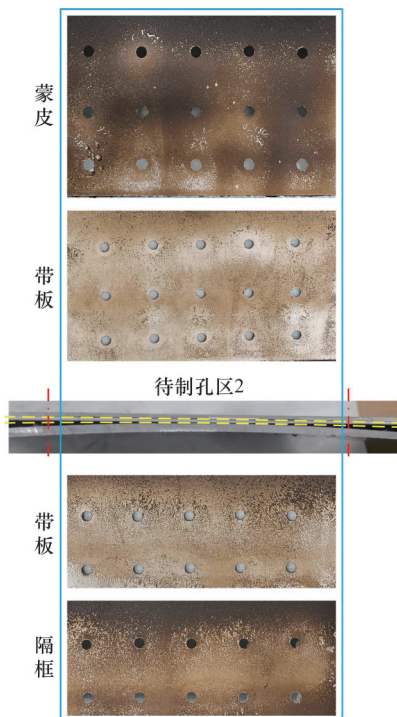


图 15 制孔后层间质量结果

Fig.15 Interlaminar quality analysis after drilling

5 结论

本文针对机身对接区一体化挤胶制孔装配工艺中的均衡夹紧要求,综合考虑叠层零件层间密封胶的均匀挤出及制孔时间隙的有效抑制两个关键问题,以对接区典型结构段为研究对象,设计了由内外两个钻模板和均衡压紧模块组成的双面均

衡夹紧装置。

构建装置的有限元模型,分析预测装置的均衡夹紧效果,优化均衡压紧模块,中部和端部压紧环分别采用硬度为 61HS、52HS 的硬质橡胶,有效改善装置均衡夹紧效果;优化装置材料,选用刚度更高的 Q235 结构钢,进一步改善压紧载荷均匀性并保证最小单孔夹紧力不小于 400 N。

搭建均衡应力测试平台,装置在安装均衡压紧模块后,对接区层间均衡载荷得到显著改善,且最小单孔夹紧力达到 403 N。最后开展了一体化挤胶制孔工艺验证,所设计的夹紧装置能够实现对接区的均匀挤胶,有效抑制在孔加工过程中零件的层间间隙,避免层间形成出入口毛刺及卷入切屑,证明了本文所提出的夹紧装置方案设计合理可行。

参考文献:

- [1] 薛红前. 飞机装配工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2015:27-28.
XUE Hongqian. Aircraft Assembly Technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015:27-28.
- [2] 张全纯,汪裕炳,瞿履和. 先进飞机机械连接技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 2000.
ZHANG Quanchun, WANG Yubing, QU Lühe. Advanced Aircraft Mechanical Joint Technology [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2000.
- [3] 高雪松. 基于某型飞机机身装配的技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2017.
GAO Xuesong. Research of the Fuselage Assembly Technology Based on a Certain Type of Airframe [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017.
- [4] 徐丽娜,李灵子,李子菲,等. 民用飞机机身密封技术浅析[J]. 航空工程进展, 2016, 7(3): 382-386.
XU Lina, LI Lingzi, LI Zifei, et al. Brief Analysis of Commercial Aircraft Fuselage Seal Technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(3):382-386.
- [5] 周广洲. 密封胶在波音民用飞机上的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(4):75-78.
ZHOU Guangzhou. Application of Sealant in Boeing Civil Aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2013(4):75-78.
- [6] 李春奇,殷俊,傅玉灿,等. 航空叠层材料制孔技术研究现状与发展趋势分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(3):24-26.

- LI Chunqi, YIN Jun, FU Yucan, et al. Research Status and Trend Analysis of Hole Making Technology of Aeronautic Stacked Materials [J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(3):24-26.
- [7] ELISEEV A, LUPULEAC S, SHINDER J, et al. Simulation of Two-way Interaction between Sealant and Structural Parts as Applied to Large-scale Aircraft Assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(11): 5753-5782.
- [8] 毕运波, 吴原骅, 朱伟东, 等. 飞机叠层结构预联接工艺优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(11):2040-2046.
- BI Yunbo, WU Yuanhua, ZHU Weidong, et al. Pre-connected Process Optimization of Aircraft Stacks[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, 49(11):2040-2046.
- [9] LIANG Jie. The Formation and Effect of Interlayer Gap in Dry Drilling of Stacked Metal Materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(5):1263-1272.
- [10] HU Junshan, ZHANG Kaifu, CHENG Hui, et al. Development of Flexible Drilling Jig for Wing-fuselage Connection[J]. The Open Mechanical Engineering Journal, 2015, 9:460-466.
- [11] 杨黎明. 机床夹具设计手册[J]. 北京:国防工业出版社, 1996:940.
- YANG Liming. Machine Tool Fixture Design Manual [J]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996:940.
- [12] 杨浩骏, 陈燕, 徐九华, 等. 预压紧力对叠层结构制孔层间间隙的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11):1-8.
- YANG Haojun, CHEN Yan, XU Jiu-hua, et al. The Effect of Clamping Force on the Inter-layer Gap Formed in Stacked Material Drilling [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11):1-8.
- [13] 王逸凡, 徐豫新, 张浩宇, 等. 硅橡胶压缩力学性能及率相关本构模型[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(3):231-238.
- WANG Yifan, XU Yuxin, ZHANG Haoyu, et al. Compressive Mechanical Properties and Constitutive Model of Rubber Material [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(3):231-238.
- [14] 魏志刚, 陈效华, 吴沈荣, 等. 橡胶衬套材料参数确定及有限元仿真[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8):137-143.
- WEI Zhigang, CHEN Xiaohua, WU Shenrong, et al. Material Parameters Determination and Simulation of Rubber Bushing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8):137-143.
- [15] CHENG J C, ZHANG S, LIU Q, et al. Ballistic Impact Experiments and Modeling on Impact Cratering, Deformation and Damage of 2024-T4 Aluminum Alloy [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 224:107312.
- [16] WANG Zhijie, CAO Yan, GORBACHEV S, et al. Research on Conventional and High-speed Machining Cutting Force of 7075-T6 Aluminum Alloy Based on Finite Element Modeling and Simulation [J]. Metals, 2022, 12(8):1395.
- [17] AAMIR M, GIASIN K, TOLOUEI-RAD M, et al. A Review: Drilling Performance and Hole Quality of Aluminium Alloys for Aerospace Applications [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6):12484-12500.
- [18] 陈宝, 张鑫, 代正莉, 等. 硬度对橡胶力学特性与悬架衬套刚度的影响[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(6):222-227.
- CHEN Bao, ZHANG Xin, DAI Zhengli, et al. Effect of Hardness on Rubber Mechanical Properties and Suspension Bushing Stiffness [J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(6):222-227.
- [19] 邢建伟, 许彦昭, 栾宇, 等. 两种典型螺栓连接结构的刚度特性比较研究[J]. 力学与实践, 2016, 38(1):27-32.
- XING Jianwei, XU Yanzhao, LUAN Yu, et al. Comparison of the Stiffness Characteristics of Two Typical Bolted Joints [J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(1):27-32.
- [20] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, SOFIANE ALMABOUACIF B, et al. Influence of Machining Parameters and New Nano-coated Tool on Drilling Performance of CFRP/Aluminium Sandwich [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1480-1488.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 许雷,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为飞行器先进装配技术。E-mail:2373956488@qq.com。胡俊山(通信作者),男,1988年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为飞行器智能装配/修复技术与装备。E-mail:hujunshan@nuaa.edu.cn。

本文引用格式:

许雷,胡俊山,凡志磊,等. 大型民用飞机机身对接区双面均衡夹紧装置设计[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2444-2452.

XU Lei, HU Junshan, FAN Zhilei, et al. Design of a Dual-sided Equilibrium Clamping Device for Fuselage Docking Areas of Large Civil Aircrafts [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2444-2452.