

大直径高干涉螺栓安装应用研究

Study on Application of Large Diameter and High-Interference Bolt Installation

中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 王建旗
西北工业大学机电学院 曹增强

[摘要] 针对某型机研制中大直径、高干涉螺栓在厚夹层结构中的安装问题,对不同安装方法进行了分析研究,提出采用应力波安装新方法。采用应力波对直径8mm、10mm、12mm的干涉螺栓进行了安装,分析了安装质量。研究结果表明采用应力波安装方法可以满足高干涉螺栓的安装技术要求。

关键词: 螺栓 干涉配合 应力波

[ABSTRACT] Aiming at the problems that large diameter and high-interference bolt install in thick sandwich structure on research and development of a certain type aircraft, different installation methods are analyzed and researched, and a new installation method with stress-waves is proposed. Stress-waves are used to install interference bolt that diameter is 8 mm, 10 mm and 12 mm, the installation quality is also analyzed. The research results show that the stress-wave installation method can meet the installation technology requirements of high-interference bolt.

Keywords: Bolt Interference fit Stress wave

现代飞机结构装配中广泛应用干涉配合(过盈)连接。干涉配合连接能减轻结构重量并显著增进结构寿命和密封性,已成为先进飞机制造中最有效的强化工艺方法之一^[1]。除干涉配合铆接外,国内外先进飞机制造中大量采用干涉配合紧固件,如普通螺栓和高锁螺栓的干涉配合连接。干涉配合紧固件的安装有热装和冷装。采用热装工艺时,先将结构件用火焰加热胀大,再将紧固件装入。因条件限制,加热达不到要求无法进行热装配时,可进行冷装。冷装是将紧固件通过干冰、液氧或液氮进行冷却,使其收缩后进行装配。对于飞机制造,目前主要采用冷装,一般采用液体氮作为冷缩剂,其最低温度可达 -195.8°C 。但对于干涉量较大的紧固件安装,纯粹靠冷缩并不能顺利安装,因而在飞机生产中常采用强迫安装方法,即采用液压压入或者铆枪锤击打入的方式安装干涉配合紧固件。强迫安装方法存在如下缺点^[2]:紧固件容易屈服并且膨胀,安装比较困难;对于具有较大干涉量的紧固件,采用打入的方法容易造成孔

壁裂纹损伤;液压装置需要有较大的操作空间,而很多结构往往无法满足结构开敞性的要求。因此,我国目前飞机制造中一般采用冷缩安装或者铆枪打入的方法安装干涉配合紧固件,但冷缩安装或铆枪打入安装大夹层时,存在较大困难。本文采用电磁铆接设备进行应力安装,并对安装质量进行了检验及分析。

1 安装方法选择

在我国某型机研制中采用大量钛合金高锁螺栓,直径从6mm到14mm,夹层材料有2024和7050铝合金,厚度最高达50多毫米。按照设计要求,其绝对干涉量为0.04~0.12mm,相对干涉量最高达1.2%。

在飞机制造中,由于热装工艺会对飞机结构产生不利影响,一般只能选用冷装工艺或锤击打入的方法。

如果采用冷缩安装,紧固件的冷缩量按以下公式计算^[3]:

$$\delta = K \cdot 10^{-6} d (t - t_0), \quad (1)$$

式中, δ 为冷缩量; K 为材料的线膨胀系数; d 为铆钉的直径; t 为冷却温度,采用液氮冷却的温度为 -195.8°C ; t_0 为环境温度。

以直径10mm高锁螺栓为例,钛合金的线膨胀系数为8.8,环境温度按 25°C ,其冷缩量为:

$$\delta = 8.8 \times 10^{-6} \times 10 \times (-195.8 - 25) = -0.0195\text{mm}. \quad (2)$$

采用冷缩安装方法的冷缩量远小于最小绝对干涉量0.04mm,因而冷缩安装不适合该型机高锁螺栓的安装。对于锤击打入的强迫安装,一般能够安装的干涉量较小。为验证强迫安装方法能否完成该型机高锁螺栓的安装,进行了安装试验。

参照设计提出的干涉量要求,紧固件孔径加工尺寸见表1,高锁螺栓为国产YSA系列。采用风动铆枪安装,安装结果如表2。安装结果表明,对于夹层材料为2024和7050铝合金结构,强迫安装方法难以顺利安装。对于2024铝合金,安装完紧固件后孔壁有部分材料被挤出。对于夹层为7050的结构,一般不会出现材料明显被挤出的情况,但会出现由于紧固件直径及夹层厚度过大而无法安装到位的情况。试验发现,不论多大的干涉

表1 孔径尺寸 mm

高锁螺栓基本直径	孔径 (最小 最大)
8	7.87 7.925
10	9.87 9.925
12	11.87 11.925

表2 风动铆枪安装结果

夹层材料	夹层厚度 /mm	孔径 / mm	杆径 / mm	干涉量 /%	紧固件安装结果
7050	35	7.927	7.982	0.69	打不进
7050	30	7.927	7.980	0.67	打进一半
7050	30	7.927	7.995	0.86	打不进
7050	50	7.927	7.977	0.63	打不进
2024	30	7.9255	7.995	0.88	大部分被打进
2024	30	7.9255	7.980	0.69	长时间打入
2024	28	7.9255	8.01	1.1	打不进
2024	28	9.913	9.995	0.83	打进一半
2024	35	9.918	9.995	0.78	长时间打入
2024	50	9.915	9.981	0.67	打进一半

量都会出现这种情况。主要原因有 3 个方面：一是紧固件材料和夹层材料的硬度相差太大；二是国产紧固件螺纹段和光杆段过渡圆角不圆滑；三是国产螺栓表面润滑质量不高。图 1 为用风动铆枪安装到位的高锁螺栓，夹层材料被挤出。图 2 为用风动铆枪无法安装到位的高锁螺栓。



图1 采用风动铆枪在2024夹层结构中安装到位的高锁螺栓
Fig.1 Hi-lock bolt driven by air gun in 2024 aluminium alloy



图2 采用风动铆枪在7050夹层结构中无法安装到位的高锁螺栓
Fig.2 Hi-lock bolt that can not be driven to stack by air gun

2 应力波安装工艺

应力波安装是一种新的安装方法，在安装过程中应力波在紧固件中传播时反射和折射使得紧固件的自由端产生弹性拉伸波，从而使紧固件杆部径向瞬时收缩“变细”，从而能减小安装阻力，因而能比较容易地实现大干涉量紧固件的安装^[4]。为解决目前冷缩安装以及强迫安装难以安装大干涉量紧固件的问题，采用应力波安装方法进行了安装试验。

应力波安装设备为 EMR-450 电磁铆接设备，如图 3 所示。采用应力波安装时，根据不同夹层材料、夹层厚度及紧固件直径可以选择不同充电电压。不同工艺条件所需电压通过试验获得。安装试验表明，对夹层材料为 7050 的结构，采用应力波安装方法，按照设计要求的干涉量，不同直径的高锁螺栓均能顺利安装，但对于夹层材料为 2024 的结构当干涉量较小时采用应力波安装方法可以顺利安装，但相对干涉量在超过 0.7% 时很



图3 EMR-450电磁铆接设备
Fig.3 EMR-450 electromagnetic riveter

难顺利安装,部分夹层材料被挤出。主要原因是紧固件和夹层材料强度相差较大。

3 安装质量分析

3.1 材料微观组织对比

为分析应力波安装方法的安装质量,从材料微观组织、安装后表面质量等方面对不同安装方法进行了对比。图4和图5分别为采用风动铆枪安装和应力波安装紧固件后材料金相组织。

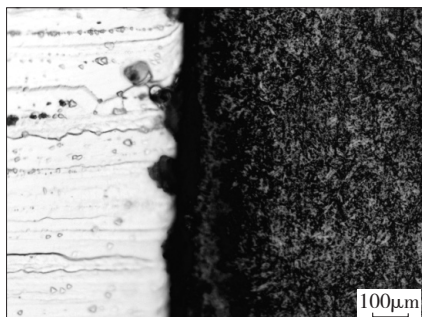


图4 采用风动铆枪安装紧固件后孔壁及紧固件金相组织
Fig.4 Stack and fastener metallurgical structure of driving fastener by air gun

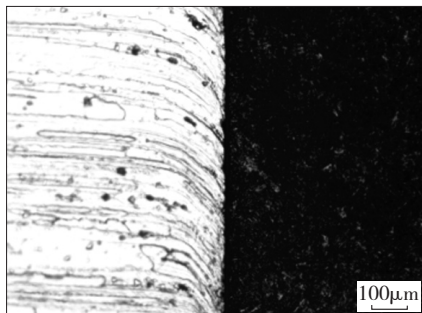


图5 采用应力波安装后孔壁及紧固件金相组织
Fig.5 Stack and fastener metallurgical structure of driving fastener by stress wave

图中白色区域表示为夹层材料,黑色区域为紧固件材料。在风动铆枪安装紧固件时,紧固件和连接板的结合面上的材料组织结构均发生严重变形,两种材料相互镶嵌,连接板有向下的位移;应力波安装紧固件时,紧固件和连接板的结合面上材料组织没有相互镶嵌,材料晶粒细化,有利于提高接头疲劳寿命和结构密封性。

3.2 安装后结构表面质量对比

选用夹层材料为2024铝合金,螺栓直径8mm的钛合金高锁螺栓,多次反复安装试验,发现风动铆枪安装紧固件时是多次反复击打螺栓头部,如何保证每次铆枪均打击到螺栓头上是保证安装质量的关键。由于风动铆枪击打力较大,击打频率高,安装过程中风动铆枪震动比较明显,因此很难保证每次安装时风动铆枪头与螺栓头的对正,在安装时很容易将铆枪头击打到结构表面。这种情况在安装沉头螺栓时尤为突出,即使操作者具备足够的力量和经验也很难保证风动铆枪安装时不伤及结构表面。

应力波安装主要通过电磁铆枪来实现,整个安装过程是一个瞬间动作,只需设定好安装电压,在安装前将电磁铆枪头与钉头对正,然后按下开关即可完成安装过程,不会因为震动而使钉头与枪头位置发生相对移动,为了进一步保证钉头与枪头位置不发生相对移动,实验时专门设计了铆枪安装模,这样无论是安装平头螺栓还是沉头螺栓都不会出现损伤结构表面的情况。

通过实验对比发现,应力波安装比风动铆枪安装所能达到的干涉量大。实际生产中有些情况下风动铆枪已经无法安装,而应力波安装通过调整安装电压均可实现顺利安装。

4 疲劳对比试验

为进一步分析应力波安装紧固件的安装质量,对普通安装和应力波安装的接头疲劳性能进行了疲劳对比试验。载荷波形与频率按正弦波恒幅加载,最大频率不应使试样的温度超过65℃,载荷比取0.1。

疲劳试验采用PLG-50微机控制高频疲劳试验机。试验机夹具能为试验提供良好的对中,本试验采用销钉传载夹具。试样失效以至不能继续保持载荷时,则认为试样已经破坏。

试验结果见表3。普通安装和应力波安装的平均

表3 疲劳试验数据表

高锁螺栓直径/mm	破坏载荷/kN	高载/kN	低载/kN	平均载荷/kN	试片单层厚度/mm	破坏形式	循环次数	安装方法
8 沉头	61	12.2	1.22	6.71	3.1	板断	152750	普通安装
		12.2	1.22	6.71	3.1	板断	86987	普通安装
		12.2	1.22	6.71	3.1	板断	147055	普通安装
8 沉头	61	12.2	1.22	6.71	3.1	板断	303356	应力波安装
		12.2	1.22	6.71	3.1	板断	267220	应力波安装
		12.2	1.22	6.71	3.1	板断	264306	应力波安装

(下转第93页)

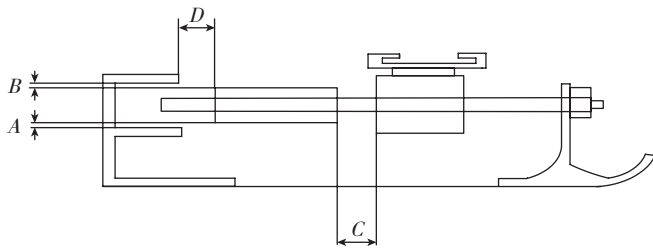


图4 后固定座的调整余量示意图

Fig.4 Diagram of back fixed seat margin for adjustment

余量 B 应不小于 7mm, 垂直向下的调整校靶余量 A 应不小于 7mm。在进行飞机航炮最终冷校靶之前(热校靶前), 后固定座沿水平和垂直方向调整余量不小于 4mm, 前支点沿水平和垂直方向调整余量不小于 5.5mm。(以上数据仅为参考)。

5 仿真对热校靶靶试的意义

通过仿真模拟热校靶射击单元的散布规律, 计算出 10 发炮弹平均弹着点偏差量, 在坐标系对应象限假设存在一个实际冷校点。通过仿真模型了解航炮调整及其实弹散布面机理, 运用数学解析法找出了一个可以满足要求的实际冷校点, 即适合地面热校靶时瞄准点在第三象限。

通过多架飞机航炮地面热校靶验证了航炮仿真理论方法的正确性, 在地面热校靶时将瞄准点在第三象限顺利地完靶试, 既满足了航炮热校靶靶试精度, 提高了航炮地面实弹校靶合格率, 又减少了弹药的消耗、延长了航炮的使用寿命, 最终达到了提高生产效率、降低成本和缩短靶试周期的目的。

参考文献

- [1] 许国晖, 杨宇航, 等. 基于虚拟样机技术的火炮维修仿真系统研究. 计算机仿真, 2002(3): 33-35.
- [2] 赵经成. 航空虚拟装备仿真平台的设计与研发 // 第三次全军院校实验室建设与发展学术研讨会论文集. 北京: 国防工业出版社, 2004: 121-124.
- [3] 毕红哲, 庄达民. 航空人机工程计算机仿真. 电子工业, 2010(2): 25-27.
- [4] 刘进成, 冯金富, 齐晓林. F III-301 航炮发射控制原理研究. 中国测试技术, 2002(2): 20-22.
- [5] 姚英学, 蔡颖. 计算机辅助设计与制造. 北京: 高等教育出版社, 2002: 12-15.
- [6] 刘应忠. 航空自动武器导论. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002: 68.
- [7] 允来锋. 自行火炮发射动力学研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [8] 徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真. 计算机仿真, 2009(9): 3-4.

(责编 夏宛)

(上接第 86 页)

7 实样保存

为便于飞机上导管零件的互换, 标准实样需要妥善保管, 作为每批生产时的依据和验收标准, 以便给飞机提供备件。有的导管还要保存弯管的夹具和检验夹具, 需要庞大的仓库或贮存间。而数控弯管制造技术则不需要保留导管实样。

8 结论

数字化导管加工在前期设计中耗费的时间较长, 而对飞机设计制造全过程而言, 取消了装配鉴定实样的过程, 大幅缩短了生产周期, 加快飞机研制进度, 更保证了产品质量。

常规导管加工比较适合单机专机专配生产, 在精度要求不高的情况下适合装机。

尽管数控弯管机只有在导管弯曲参数标准化的前提下, 才能得到充分利用, 但却能更好地节约资源, 减少模具制造量和降低生产成本, 加快飞机制造步伐, 这对现代飞机及其发动机不断改型和更新, 以及多机种同时生产的实际情况确实带来了极大的好处, 可以更多地应用此技术。

(责编 夏宛)

(上接第 38 页)

寿命分别为 128931 和 278294, 应力提高疲劳寿命 115%。因此, 疲劳试验说明应力波安装方法可以明显提高接头疲劳寿命。

5 结论

工艺试验表明, 目前生产中采用冷缩安装和强迫安装难以完成大直径、高干涉螺栓的安装。提出的应力波安装方法可以安装大直径、高干涉螺栓。安装结果表明应力波安装方法不仅可以解决大直径、高干涉螺栓安装难题, 并且安装质量好, 能较大幅度提高接头疲劳寿命。

参考文献

- [1] Duprat D, Campassens D, Balzano M, Boudet R. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes. Int. J. Fatigue 1996(18): 515-521.
- [2] 高彬, 曹增强. 干涉配合紧固件的安装. 航空制造技术, 2003(11): 25-26.
- [3] 徐进永. 对大过盈量连接用液氮冷装. 机械工艺师, 1995(1): 54-55.
- [4] Cao Zengqiang, Qin Qinghua. A study on driving interference-fit fastener using stress wave. Materials Science Forum, 532-533.

(责编 可岚)