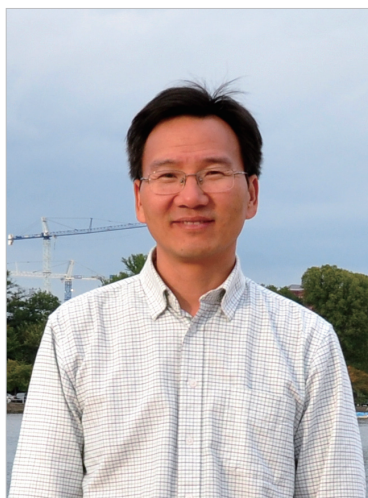


# 大型客机铝锂合金壁板自动 钻铆技术

## Automatic Drilling and Riveting Technology of Al-Li Alloy Panel of Large Aircraft

南京航空航天大学机电学院 陈文亮 姜丽萍 王珉  
中国商飞上海飞机制造有限公司 蒋红宇 王宇波 余路



陈文亮

南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师,主要研究方向为飞机装配技术、CAD/CAE/CAM 和智能制造技术。

铆接工艺具有操作过程简单、连接质量稳定可靠、易于实现质量控制、能够适应不同材料之间的连接等优点,在民用客机的装配中得到了广泛使用,铆接约占全机总连接量的80%,是民用客机装配的主要连接方式。自动钻铆是民用飞机装配连接

第三代铝锂合金具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度、疲劳性能好等诸多优异特性,是近年来航空航天材料中发展最为迅速的一种先进轻量化结构材料,C919即在机身结构中选用了铝锂合金材料。采用自动钻铆取代手工制孔铆接可提高工艺稳定性,同时优化自动钻铆工艺参数,提高连接质量,对确保铝锂合金连接件疲劳寿命达到设计要求将起到至关重要的作用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.04.047

的发展趋势,采用自动化铆接可有效提高飞机装配质量,满足机体长寿命连接的设计要求。

第三代铝锂合金具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度、疲劳性能好等诸多优异特性,是近年来航空航天材料中发展最为迅速的一种先进轻量化结构材料。C919在机身结构中选用了铝锂合金材料,用来取代常规铝合金,可降低结构重量10%~15%,提高结构刚度15%~20%。尽管第三代铝锂合金具有重要的优势,但是与传统铝合金(如2024)相比,其缺口敏感性仍然较高。由于铆

接作为铝合金材料主要的连接方法在大客装配连接中采用,而铝锂合金在制孔铆接后仍然存在较大的缺口效应,对孔壁质量及铆接间隙的敏感程度高,需要采用稳定的干涉铆接方法来保证连接质量。因此,采用自动钻铆取代手工制孔铆接可提高工艺稳定性,同时优化自动钻铆工艺参数,提高连接质量,对确保铝锂合金连接件疲劳寿命达到设计要求将起到至关重要的作用。本文在介绍目前飞机壁板自动钻铆系统的基础上,结合MPAC自动钻铆系统开展了铝锂合金壁板自动钻铆工艺的研究。

## 飞机壁板自动钻铆系统

飞机装配技术面临着自动化、数字化和柔性化的发展趋势,面对日益激烈的竞争,在研制飞机自动化装配系统时需要综合考虑装配效率、系统柔性、设备成本等因素。

作为最早实现的领域,飞机壁板自动钻铆成为飞机自动化装配最成熟、应用最广泛的领域。随着自动化程度的提高,超级壁板拼接甚至机身筒段装配也开始应用自动钻铆系统<sup>[1-2]</sup>。

美国是最早发展自动钻铆技术的国家,早在 20 世纪 50 年代就已在飞机铆接装配生产线上应用了自动钻铆机,经过 50 多年的发展,现在世界各航空工业发达国家都已广泛采用这项技术。由于自动钻铆机带有高速、高精度的钻削主轴头,一次进给既能钻出高精度的孔,又可将埋头窝的深度进行精确控制,铆接时可准确控制压铆力和压铆行程,因而可大大提高铆接的质量和效率。

当前飞机壁板自动钻铆系统主要有两种形式:基于全自动托架的自动钻铆系统和龙门式自动钻铆系统。基于全自动托架的自动钻铆系统,包括 C 框和 D 框两种形式,一般由基于全自动托架的五坐标定位系统和自动钻铆机组成。典型的五坐标全自动托架由 X、Y、两个 Z 轴和一个 A 轴组合实现 X、Y、Z、A (绕 X 轴旋转)、B (绕 Y 轴旋转)五坐标定位功能。基于全自动托架的自动钻铆系统包括美国捷姆科公司的 G2000、G86,德国宝捷公司的 IPAC 等。

龙门式自动钻铆系统,包括龙门式五坐标定位系统、末端执行器和柔性工装。根据工件摆放位置(也决定末端执行器的位置)可以分为卧式和立式两种。龙门式五坐标定位系统可实现 X、Y、Z、A (绕 X 轴旋转)、B (绕 Y 轴旋转)五坐标定位。龙门式壁板自动钻铆系统包括美国 EI 公司的 E6000、德国宝捷公司的 MPAC

等。图 1 是用于 C919 中机身装配线上机身壁板自动钻铆的 MPAC 自动钻铆系统。

近年来国内各主机厂与研究所和高校合作开展了飞机壁板自动钻铆系统的研究,中航工业成飞、西飞、沈飞、西北工业大学、南京航空航天大学等都开展了自动钻铆系统的研制。成飞和西飞在引进国外自动钻铆机的基础上,自行开发了五坐标全自动托架系统。南京航空航天大学针对飞机壁板特点,研制了基于 Pogo 柱托架的龙门式自动钻铆系统,如图 2 所示,该系统的龙门系统可实现 X、Y、Z、A 4 坐标定位,B 角由 Pogo 柱托架来实现<sup>[3]</sup>。

## 铝锂合金自动钻铆工艺试验

铆接过程的工艺参数对铆接质

量有十分重要的影响<sup>[4]</sup>。铝锂合金与常规铝合金相比,其材料性能有显著的改善,对铝合金铆钉在干涉铆接过程中干涉量的形成有很大的不同。由于在自动钻铆过程中制孔和铆接是在一个工作循环中完成的,采用制孔工艺试验确定特定刀具的制孔孔径大小和孔径一致性是合理确定自动钻铆工艺参数的前提。

本文通过试验方法确定所涉及壁板最典型紧固件的制孔孔径。试验设备采用中机身装配生产线的 MPAC 自动钻铆设备。试验刀具为编号 1048810 的定制钻头(用于 NAS1097AD6、MS20470AD6 牌号铆钉的制孔),钻头直径为 4.88mm,测量工具采用孔径量规。试验材料:根据中机身壁板涉及的铝锂合金材料 2060T8E30,选取了典型厚度为

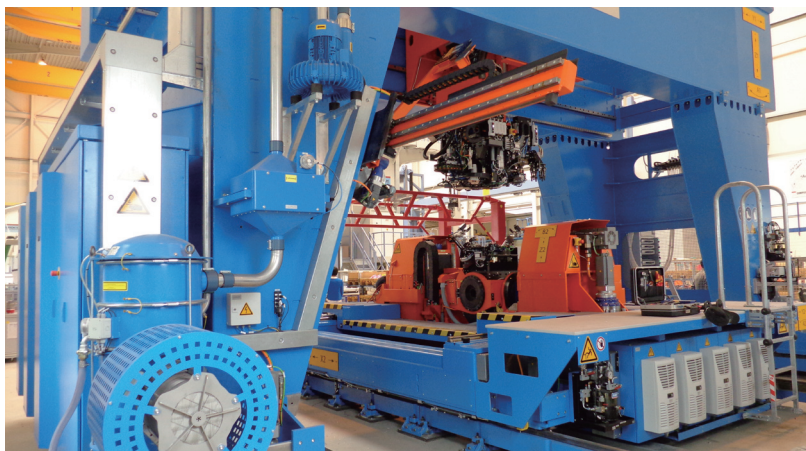


图1 德国宝捷公司的MPAC自动钻铆系统

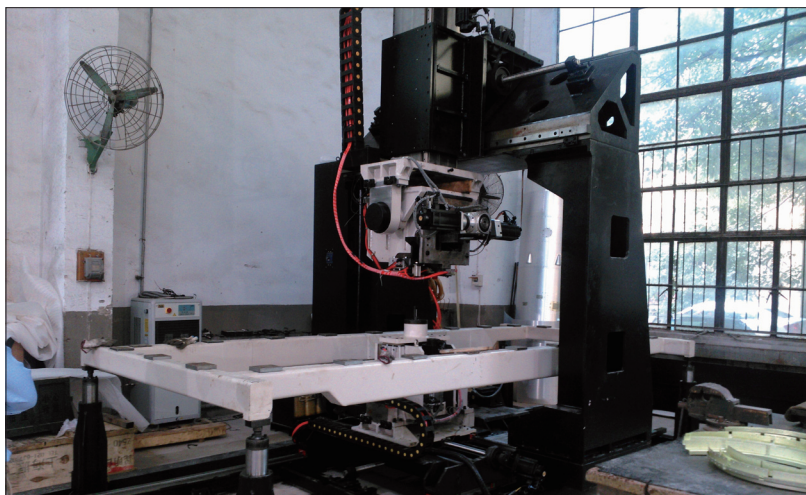


图2 南京航空航天大学研制的龙门式自动钻铆系统

2mm、4mm、6mm、6.4mm 的材料,切割成长宽为 300×200mm 尺寸的试验件 9 批。

制孔孔径均值为 4.887mm,波动范围仅 0.027mm (4.879~4.906mm)。由于试验是在 2~6.4mm 各种典型厚度试验材料组合情况下获得的,可以确定制孔孔径一致性和稳定性情况极好,且至少在试验范围厚度内,孔径与厚度无关。

(2) 在钻头寿命范围内,制孔孔径一致性和稳定性情况依然很好,并且即使钻头使用寿命达到 1.5 倍寿命,依然有相当的一致性和稳定性。

在制孔工艺试验的基础上,针对 C919 的铆钉和壁板蒙皮材料,开展干涉铆接工艺试验。铆钉和壁板蒙皮材料属性如表 1 所示,制孔孔径按照前面试验平均值 4.887mm 计算。

按照要求的压铆力加工完成试件之后,测量记录各钉的镢头高度、镢头直径尺寸及其他异常外观情况。将试件切割后,完整取出各个铆钉。沿着铆钉分别在近钉头、中间和钉尾测得 3 处的钉杆膨胀值,计算相应干涉量  $D_t$ 、 $D_m$ 、 $D_d$ 。平均干涉量为 3 处的平均值  $D = (D_t + D_m + D_d) / 3$ ,如图 3 所示。预测值采用文献 [5] 提出的预测方法。图 4 为铝锂合金干涉铆接压铆力对干涉量的影响,图 5 为铝锂合金干涉铆接压铆力对镢头尺寸的影响。

## 铝锂合金干涉铆接工艺性分析

通过对上述试验结果的分析,可以得出以下结论。

(1) 文献 [5] 中提出的干涉量工艺控制方法同样符合铝锂合金干涉铆接的工程要求,通过不同钉长、不同板厚、不同压铆力的试验结果,得出,铆钉钉杆绝对膨胀量误差在 0.02mm、0.4% 以内,而除了 AD6-6 钉 4mm 和 4.2mm 板 2 组试验外,绝对膨胀量误差基本在 0.005mm、0.2%

表1 典型材料属性

属性 / 单位	铆钉 (材料 2117-T4)	壁板蒙皮(材料 2060T8E30)
屈服强度 $\sigma_s$ / MPa	311.3	441
强度极限 $\sigma_b$ / MPa	442.9	514
弹性模量 $E$ / GPa	71	73
泊松比 $\mu$	0.33	0.33
强度系数 $K$ / MPa	600	—
变形系数 $\lambda$	0.982	—
强度指数 $n$	0.3	—
夹层厚度 $B$ / mm	—	4.2
孔径 $D_1$ / mm	—	4.885

以内。试验结果验证了该方法有相当的准确性。

(2) AD6-6 钉 4mm 和 4.2mm 板 2 组试验之所以偏差稍大,主要是由

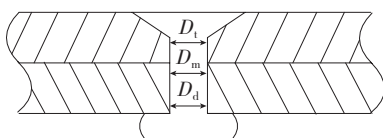
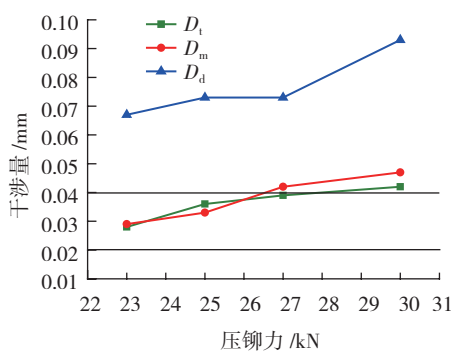
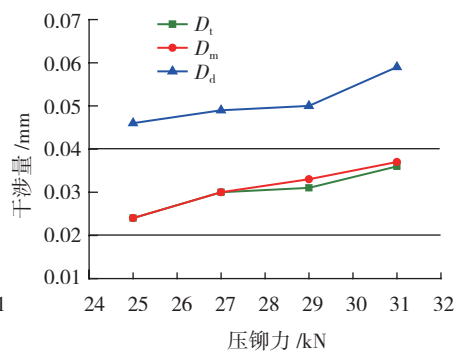


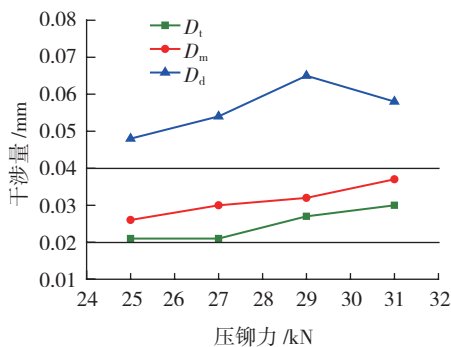
图3 铆钉干涉量测量



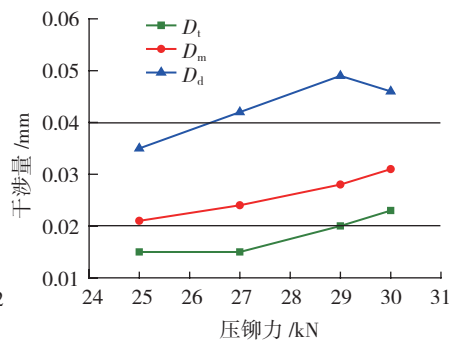
(a) 板厚 4.2mm, AD6-6 钉



(b) 板厚 4.4mm, AD6-7 钉



(c) 板厚 5.2mm, AD6-7 钉



(d) 板厚 6.4mm, AD6-8 钉

图4 铝锂合金干涉铆接压铆力对干涉量影响

于夹层厚度较小,试验数据受镢头的影响较大,离镢头稍远的钉杆中部位置干涉量与计算干涉量比较吻合。

(3) 由于相对干涉量精度受试验材料性能、测量精度等因素的影响波动很大,绝对干涉量误差在 0.02mm (0.4%) 以内,但相对干涉量的误差就能到 50% 以上,因此在实际工程应用中,尽管确定合理干涉量可采用相对干涉量进行计算分析,实际检测测量时应该规定绝对干涉量数值。因此,目前大客工艺规范 CPS 采用绝对干涉量描述是合理的。

(4) 铝锂合金干涉铆接沿轴向分布明显不均匀,镢头处明显偏大,这与 2024 铝合金明显不同,这与铝锂合金材料屈服强度高有关。由于不均匀程度较大,在装配工艺验证方面要格外关注可能带来的缺陷。

(5) 虽然镢头侧干涉量很容易

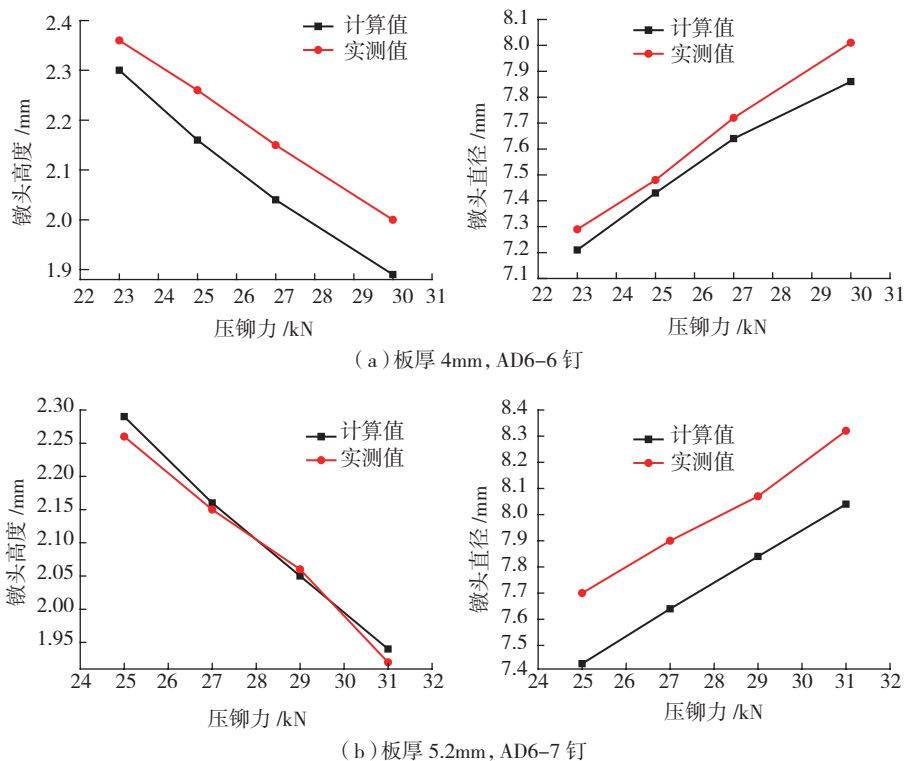


图5 铝锂合金干涉铆接压铆力对铆头尺寸影响

满足,但钉头侧干涉量受压铆力影响较大,可以很明显的看出干涉量差值具体变化趋势,如图4所示。从图中可知,只有当压铆力接近30kN时钉头侧干涉量才有明显增加,也就是说只有板发生屈服后,干涉量沿轴向才比较均匀。

(6) ADET0078 中规定,铆接后在钉头处及中间层干涉量为0.02~0.14mm,铆头处干涉量应为0.04~0.15mm,这也是CPS2160中干涉量规定的来源。从图4可知,为确保钉头处能够达到0.02mm以上的干涉量,比较可靠的压铆力应达到29~31kN,即使对于4mm左右夹层厚度也应该达到25kN以上。

(7) 文献[5]中给出的铆头尺寸预测方法结果精度很好,铆头高度的误差绝大多数在±5%以内,绝对误差值在0.1mm以内,根据体积不变定律算出的铆头直径预测结果精度同样很好,误差绝大多数在±5%以内,绝对误差值在0.3mm左右,完全满足工程精度的要求,如图5所示。

### 铝锂合金夹层厚度对干涉铆接工艺影响分析

通过分析本次工艺试验结果,可以观测到夹层厚度对干涉量有比较明显的影响,以30kN压铆力试验为例,不同夹层厚度下干涉量见图6。

(1) 由于铝锂合金的干涉量沿轴向分布不均匀性较大,当夹层厚度较大时,钉头和钉杆中部干涉量会有减少,说明从铆头到钉头干涉量逐步减少的趋势明显。铆头干涉量明显增加,但总体上趋于平稳,并不一定随夹层厚度增加而增加。

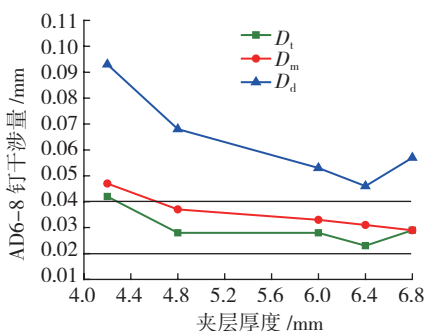


图6 不同板厚在30kN压铆力下的干涉量分布

(2) 对于飞机壁板铆接,连接量最大的是5mm以下的蒙皮和长桁,以4mm左右的夹层厚度为主,此时钉头处能达到的干涉量相对较大,需要考虑铆头和钉杆直径的尺寸效应,避免铆头侧干涉量过大。对于夹层厚度较大的连接位置,由于钉头侧干涉量逐步降低,此时应格外关注钉头侧干涉量是否满足要求。

### 结束语

本文开展了大型客机铝锂合金壁板自动钻铆技术的研究,特别是针对铝锂合金缺口敏感性较大的问题,重点开展了铝锂合金壁板干涉铆接工艺的研究:(1) 钉杆的干涉量、铆头尺寸可以采用解析公式准确地进行预测,绝对干涉量的误差在0.4%以内,铆头尺寸的误差在5%以内,可以满足工程要求;(2) 铝锂合金干涉铆接沿轴向分布不均匀性较传统铝合金2024大,对于夹层厚度较大的情况尤其要关注顶头侧的干涉量;(3) 由于铝锂合金具有屈服强度高的特点,要想获得合理的干涉量需要更大的压铆力,而这往往和铆头尺寸的要求有一定矛盾,需要在确定工艺规范时慎重考虑。

### 参考文献

- [1] 良辰. 飞机自动化装配技术及设备应用调查报告. 航空制造技术, 2011(19):54-55.
- [2] 邓峰. MPAC自动钻铆机. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
- [3] 王珉, 陈文亮, 郝鹏飞, 等. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术. 航空制造技术, 2013(1/2): 80-83.
- [4] Cheraghi S H. Effect of variations in the riveting process on the quality of riveted joint. The International Advanced manufacturing Technology, 2008,39:1144-1155.
- [5] Jiang L P, Chen W L, Wang M, et al. Approach to interference riveting process control of aircraft automatic drilling and riveting. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 31(6): 609-614.

(责编 小城)