

# 自动钻铆技术在波音 737 尾段项目中的应用

## Application of Automatic Drilling/Riveting Technology in Boeing 737 Tail Project

沈阳飞机工业(集团)有限公司 费 军

**[摘要]** 通过自动钻铆技术在波音 737 尾段中的应用,介绍了自动钻铆技术的特点及工艺。

**关键词:** 飞机装配 自动钻铆 流程及工艺

**[ABSTRACT]** The characteristics and process of the automatic drilling/riveting technology are introduced through the description of the application of the automatic drilling/riveting technology in Boeing 737 tail project.

**Keywords:** Aircraft assembly Automatic drilling/riveting Flow and process

在飞机装配中,自动钻铆技术主要应用于安装工作量大、表面质量要求严、种类单一的紧固件和具有较好的开敞性的装配件。同传统的手工铆接相比,采用自动钻铆不但可以提高工作效率,还可以减少质量波动,改善铆接结构的抗疲劳性能。

在新一代波音 737 尾段中,可以应用自动钻铆机进行紧固件安装的组件主要有上下壁板、上下甲板、辅助动力舱门(APU)等 5 个组件。上下壁板是典型的长桁、加强肋及镜面蒙皮铆接结构,适合在自动钻铆机上钻铆装配;上下甲板由平面腹板和加强件构成,结构相对简单,更适合自动钻铆。沈飞公司在新一代波音 737 尾段装配过程中首次全面应用自动钻铆技术,在生产实践中发挥了很大作用,同时,对于提高民机制造水平也具有重要意义。

### 1 自动钻铆设备

自动钻铆机是集电气、液压、气动、自动控制为一体的,应用于航空、航天紧固件安装的专用设备。它不仅可以实现组件(或部件)的自动定位,还可以一次完成钻孔、镗窝、涂胶、送钉和紧固件安装,或独立完成上述操作的一种或几种操作的组合,是现代飞机装配中常用的设备。自动钻铆机可以对各种材料钻孔和镗窝,如铝合金、不锈钢、钛合金、凯夫拉和碳纤维复合材料等,可以完成普通铆钉、干涉配合铆钉、抽钉、高锁螺栓、环槽钉的安装。

#### 1.1 自动钻铆机各个系统及其功能

自动钻铆机由动力系统、控制系统、定位夹紧系统、钻削系统、注胶系统、紧固件选择及送料系统、紧固件安装系统等组成。

动力系统主要由液压泵站、动力电源和气压设施组成,它为设备提供动力。

控制系统通常由电气控制柜和控制台 2 部分组成,主要部件是可编程控制器(PLC),由可编程控制器控制电路闭合、电机开关、电磁阀开关等动作。

定位夹紧系统的功能是确保工件与自动钻铆机工作头的相对位置,在操作过程中零件不发生窜动。

定位功能靠托架系统或手工调整实现,夹紧功能则由自动钻铆机上下压力脚衬套来实现。

钻削系统由钻轴马达、钻轴、钻头连接器和钻头组成,用于钻制紧固件孔。

紧固件安装有密封要求时,注胶系统可以在紧固件钉头下面位置的工件上涂敷一层密封胶。

紧固件选择及送料系统由料斗、料斗支撑选择架和铆钉送进器 3 部分组成,根据夹层厚度选择不同长度的紧固件,然后将紧固件输送到上铆头。

紧固件安装系统对于铆钉和双件紧固件所使用的安装系统是不同的。铆钉安装系统由上铆头和下铆头组成,上铆头完成送钉和支撑作用,下铆头提供压铆力;双件紧固件安装系统由上铆头和下动力头组成,上铆头完成送钉和支撑作用,下动力头提供旋转动力或挤压动力。

#### 1.2 工件调整与定位方式

(1)激光点、摄像定位:目前手动托架或半自动托架工件定位大都依靠激光点或摄像头和监视器来实现。由于激光点亮度较高,长时间工作使操作人员产生视觉疲劳,因此,通常利用摄像头和监视器以及工件本身的紧固件位置标识进行工件定位。

(2)传感器探测定位器是自动托架进行定位的手段之一,在手工定位和半自动定位过程中,在设备的监测台上增加指示灯,利用传感器探测定位器得到的信号辅助指示工件水平位置,可以使工件定位快速准确。

(3)数字定位技术是全自动托架定位方法,它利用数字产品定义,通过 PLC 数据处理把工件自动移动到正确位置,波音 737 尾段是数字化定义产品,为数字定位技术提供了很好的应用空间。

### 1.3 BA96自动钻铆机的技术参数及附件

#### 1.3.1 BA96自动钻铆机的技术参数

以 BA96 自动钻铆机为例,其技术参数见表 1。

表 1 BA96 自动钻铆机技术参数

压铆力/ kN	工作电压/ V	开启高度/ mm	喉高/ mm	夹紧力/ kN
500~9 000	380±15	400	1 794	50~1 500
钻轴进给量/ mm·min <sup>-1</sup>	钻轴转速/ r·min <sup>-1</sup>	夹层厚度/ mm	喉深/ mm	压缩空气/ MPa
0~2 400	100~6 000	0~25	2 438	0.6~0.8

#### 1.3.2 附件

自动钻铆机的附件有切削主轴、铰孔主轴(适用于孔径公差 0.025mm 以下)、背面去毛刺主轴、注胶器、冷作硬化工具、测孔探头、上铆头、抽钉安装工具、直式铆钉用下铆头、偏心式铆钉用下铆头、直式螺母安装工具、偏心式螺母安装工具、直式抗剪紧固件安装工具、偏心式抗剪紧固件安装工具、销钉或螺栓插入工具、背面铤窝工具等,上述附件应根据工件结构特点和要求选用。

## 2 自动钻铆的工序流程及工艺参数的确定

### 2.1 自动钻铆的工序流程

自动钻铆机工序流程包括工件移动到工作位置、自动钻铆机开始工作、夹紧工件、钻孔和铤窝(钻头润滑)、涂胶、送钉、铆接(或安装)、松开等工序,其中影响紧固件安装质量的主要参数是:钻轴转速、钻轴进给量、夹紧力、压铆力、钻头润滑压力。

被加工对象必须是具有一定刚性的结构,当其刚性差时,可以采用工装或将被加工对象固定到托架上以改善结构刚性。在自动钻铆前零件间预定位方式有 3 种:用辅助定位工具(如定位销)、工艺铆钉和专用定位紧固件。第一种方式节省拆卸时间,但容易与设备发生干涉;第二种方式定位牢固、可靠,但拆卸工作量大;第三种方式不妨碍自动钻铆机工作,但成本较高。零件预定位时定位点之间的距离一般不超过 400mm,这样可以保证在自动钻铆过程中零件不发生窜动。

### 2.2 自动钻铆机加工工艺参数设计

影响自动钻铆机加工质量的关键是各种加工工艺参数的设定。在铆接工序,影响不同直径的铆钉镢头大小、镢头高度等的主要因素是压铆力,压铆力与镢头成形的关系基本呈线性关系,所以在这里主要讨论影响制孔和铤窝的工艺参数。

影响自动钻铆机制孔质量的因素相对较多,包括钻轴转速、钻轴进给量、夹紧力、钻头润滑压力等,同时各个因素的变化范围又相对较大,本课题用正交试验方法来确定工艺参数。

#### 2.2.1 试验方法和过程

设备的机械精度符合设备鉴定规范要求时,钻轴转速、钻轴进给量、夹紧力、钻头润滑压力等因素对制孔的直径、铤窝深度、铤窝重复精度、孔径大小、孔圆度、孔垂直度的影响很小,而对孔壁划伤、铤窝表面粗糙度和孔边缘毛刺高度影响较大,因此,把设备的工作指标仅确定为孔壁划伤长度或深度的最大值、铤窝表面粗糙度和毛刺高度。指标和相应的影响因素及水平见表 2 和表 3。

表 2 自动钻铆时孔和铤窝质量指标

要 求	孔壁划伤长度/ mm	铤窝表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	毛刺高度/ mm
合格要求	≤0.2	3.2	≤0.127
较高要求	越小越好	越小越好	越小越好

表 3 试验因素及水平

水平	因 素			
	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	进给量/ (mm·min <sup>-1</sup> )	夹紧力/ N	润滑系统压力/ 10 <sup>5</sup> Pa
1	1 000	350	100	2
2	4 000	1 000	300	4
3	7 000	1 600	500	6

根据上述表格,我们需要解决的问题是多个指标的,既要保证孔壁和铤窝表面粗糙度符合要求,又要保证孔边毛刺达到标准。影响因素有 4 个,每个因素分为 3 个水平,针对此种情况,选用正交表格,选用的正交表格应满足列数要等于或大于因素的个数,试验次数应取最少的要求。因此,选用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交表建立试验方案。

这样就确定了每次试验都是由不同因素和不同水

平随机搭配的试验方案。例如:试验号 A1B3C1D3, 转速(A)为 1 000r/min, 进给量(B)为 1 600mm/min, 夹紧力(C)为 100N 和润滑油压力(D)为  $6 \times 10^5 \text{Pa}$ 。在试验过

程中可以不按照排定的顺序, 而按照排定的组合进行。根据上述试验所得到的结果见表 4。

### 2.2.2 试验结果分析

表 4 试验结果分析表

试验号	因 素				结 果		
	转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) A	进给量/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) B	夹紧力/ N C	润滑系统压力/ $10^5 \text{Pa}$ D	孔壁划伤长度/ mm	镗窝粗糙度 $R_a$ / $\mu\text{m}$	毛刺高度/ mm
1	1 (1 000)	1 (350)	3 (500)	2 (4)	0.1	0.8	0.015
2	2 (4 000)	1 (350)	1 (100)	1 (2)	0	0.8	0.100
3	3 (7 000)	1 (350)	2 (300)	3 (6)	0	1.6	0.060
4	1 (1 000)	2 (1 000)	2 (300)	1 (2)	0.1	6.4	0.250
5	2 (4 000)	2 (1 000)	3 (500)	3 (6)	0	0.8	0.250
6	3 (7 000)	2 (1 000)	1 (100)	2 (4)	0	3.2	0.010
7	1 (1 000)	3 (1 600)	1 (100)	3 (6)	0.1	6.4	0.250
8	2 (4 000)	3 (1 600)	2 (300)	2 (4)	0.1	0.8	0.185
9	3 (7 000)	3 (1 600)	3 (500)	1 (2)	0.1	1.6	0.145
孔壁 划伤长度/ mm	I	0.3	0.1	0.1	0.2	$T_{\text{划伤长度}} = 0.5$	
	II	0.1	0.1	0.2	0.2		
	III	0.1	0.3	0.2	0.1		
	极差 R	0.2	0.2	0.1	0.1		
表面 粗糙度 $R_a$ / $\mu\text{m}$	I	13.6	3.2	10.4	8.8	$T_{\text{表面粗糙度}} = 22.4$	
	II	2.4	10.4	8.8	4.8		
	III	6.4	8.8	3.2	8.8		
	极差 R	11.2	7.2	7.2	4.0		
毛刺高度/ mm	I	0.515	0.175	0.360	0.495	$T_{\text{毛刺高度}} = 1.265$	
	II	0.535	0.510	0.495	0.210		
	III	0.215	0.580	0.410	0.560		
	极差 R	0.320	0.405	0.135	0.350		

注: I、II、III 分别表示对应各个因素 1、2、3 水平的指标和; 极差  $R = \max\{I, II, III\} - \min\{I, II, III\}$ ;  $T$  为指标值之和。

试件为 200mm×381mm, 厚 1.2~8.0mm 的方形件, 材料为 2024 包铝; 刀具材料为高速钢; 钻柳机型号 BA96。

根据上述试验结果和计算分析可以看出, 孔壁划伤的影响因素主次关系为: 转速、进给量、夹紧力和润滑油压力; 其中一个好的加工条件为 A2B1C1D3。表面粗糙度影响因素主次关系为: 转速、进给量、夹紧力和润滑油压力; 其中一个好的加工条件为 A2B1C3D3。毛刺高度的影响因素主次关系为: 进给量、润滑油压力、转速和夹紧力; 其中一个好的加工条件为 A3B1C1D3。综合评定, 影响整个制孔质量的因素主次关系为进给量、转速、夹紧力和润滑油压力, 得到的加

工工艺参数为 A2B1C1D3 或 A3B1C3D3。

工艺参数初步确定后, 为了确认和得到更好的参数, 需对下一步的发展趋势进行预测和验证, 试验中各个因素与目标的趋势图见图 1、2、3。

趋势图是各个因素动态的影响, 根据目前得到的趋势图可以得出这样的结论: 因素 A 应在 A2 附近取位级; 因素 B 应在 B1 附近取位级; 因素 C 应在 C3 附近取位级; 因素 D 应在 D2 附近取位级。根据得到的结果制定新的位级表, 见表 5, 再进行试验。

### 2.2.3 试验结论

反复重复上述 2.2.1 节步骤, 最终得到的最佳工艺参数为:

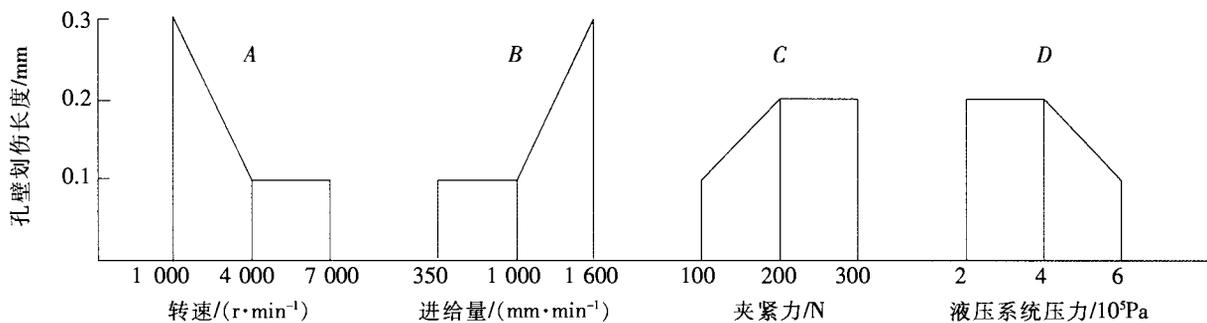


图 1 孔壁划伤趋势图

Fig.1 Trends of scratch on the hole walls

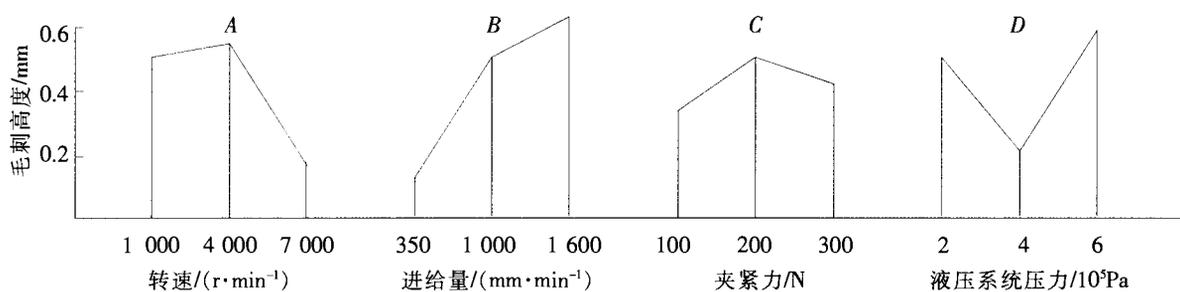


图 2 孔边缘毛刺高度趋势图

Fig.2 Trends of burr height on the hole edges

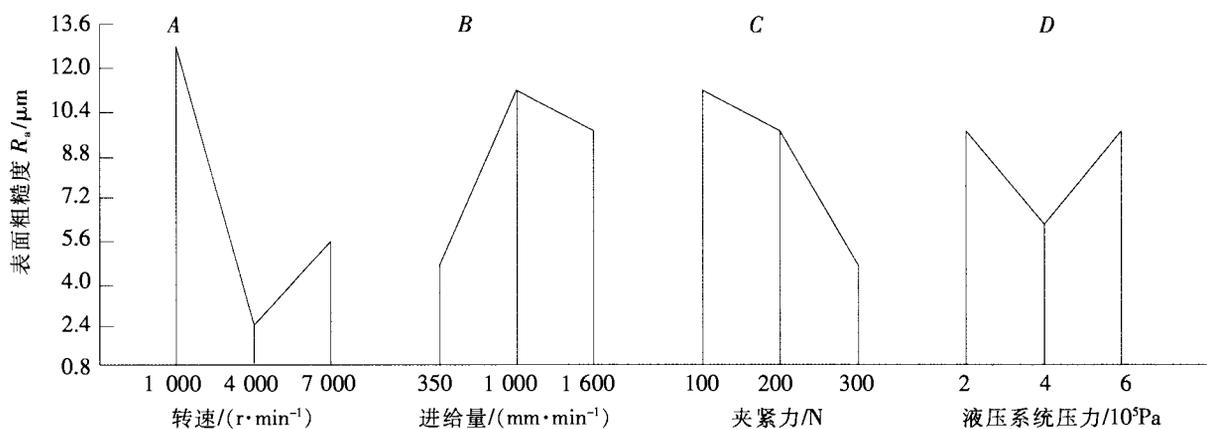


图 3 铰窝表面粗糙度趋势图

Fig.3 Trends of surface roughness of countersinks

表 5 试验因素及水平

水平	因素			
	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	进给量/ (mm·min <sup>-1</sup> )	夹紧力/ N	润滑压力/ 10 <sup>5</sup> Pa
1	4 500	300	220	3.5
2	5 000	320	250	4.5
3	5 500	340	280	5

(1)转速 5 000r/min;

(2)进给量 320mm/min;

(3)夹紧力 300N;

(4)润滑油压力  $5 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

#### 2.2.4 几点说明

(1)在此次试验过程中,试验结论与传统的结果存在偏差,如表面粗糙度与转速、进给量、润滑压力的关

原因是试验使用的刀具参数产生的影响。在制孔过程中,刀具本身的顶角、横刃直接影响制孔毛刺高度,前角、后角影响铤窝表面粗糙度。

(2)在应用自动钻铆机过程中,刀具的转速也是一个重要的因素。本试验使用的刀具适用于钻轴转速 10 000~100 000r/min 之间,在低转速下表现出的加工性能不好。

### 2.3 影响工艺参数的因素及控制

自动钻铆机的工作动力是压缩空气和电力。压缩空气压力的变化直接影响工艺参数的变化;电压的波动、设备元件工作状况都直接或间接影响自动钻铆机工艺参数的变化,因此,必须有相应的方法对工艺参数进行控制。主要采取以下措施:

(1)为设备增加稳压电源,减少电压的波动;净化、检测、监控压缩空气的压力和清洁度,为设备增加压缩空气净化装置。

(2)建立维护制度。检测、维护压缩空气管路、液压管路、电气管路,使设备处于完好状态。

(3)允许微量调整加工工艺参数,使加工出的产品符合工艺规范要求。在每次开机进行组件压铆之前,必须安装试片,校正加工工艺参数。

## 3 质量控制

由于自动钻铆机连续完成钻孔、铤窝、涂胶、送钉、铆接操作,对于操作过程中的产品质量要素无法直接测量和进行质量判定,因此,自动钻铆的产品质量控制不同于普通紧固件安装,主要通过控制加工参数和设备的完好性、功能来达到控制产品实物的目的。

在实际生产过程中,自动钻铆对紧固件、紧固件孔质量以及刀具等要素的要求相对较高。自动钻铆机安装紧固件之前,需首先完成钻孔、送钉、紧固件安装等过程,其中送钉成功率与紧固件孔的尺寸大小、孔与工件的垂直度有关,并直接影响机械运行故障率。在实际生产中,应控制孔径在公差上限、垂直度在  $0.5^\circ$  以内,以此来提高送钉成功率,保证机械的稳定运行。紧固件直径、长度也影响送钉成功率和安装质量,因此在安装紧固件时,须事先进行筛选,以保证紧固件的一致性。自动钻铆机使用的刀具也是影响紧固件制孔质量的重要因素,在不考虑转速、进给速度的情况下,不同参数的刀具直接影响制孔的精度和表面粗糙度、毛刺高度、铤窝表面粗糙度。

### 3.1 设备的鉴定和维护

处于良好状态的设备是保证产品质量的前提条件,因此用于自动钻铆的设备必须进行周期性鉴定,保证设备的完好性。在周期鉴定的前提下,对设备的维护也是一个重要环节。自动钻铆机的日常维护应至少包含下列内容:压缩空气、液压、电器等仪表,电器管路、液压管路、压缩空气管路以及压缩空气本身的质量。对于设备的机械精度,可以根据鉴定情况抽查个别项目。在进行自动钻铆之前,需对工件的材料厚度、钻头规格、上铆头规格、下铆头规格、铆钉种类规格、料斗规格进行例行检查。工作过程中应按工艺要求设定、检查和记录夹紧力、压铆力、钻轴转速、进给量、钻头润滑压力等加工参数。

### 3.2 试片验证工艺过程

保证产品过程控制有一个关键要求,即在每次开机或更换钻头、上下铆头之前,利用相同材料和厚度的试片验证设备的状况和工艺过程。通过试片检查工艺规范要求的各种质量要素,如孔径、孔壁粗糙度、孔圆度、孔垂直度、铤窝深度、铤窝深度重复精度、铤窝表面粗糙度、毛刺高度、埋头铆头钉头齐平度、铆钉镢头高度、铆钉镢头直径、铆钉镢头裂纹等。试片应保证数据的可靠性,要求分别应有 5 个或 5 个以上的钻孔铤窝和铆接实样。由于试片检验等同于产品的工序检验,而且对于制孔、铤窝等检验的主要依据是试片的验收数据,也是产品的最终检验,因此试片检验不能降低验收标准。

### 3.3 产品检验

自动钻铆后的产品应复查紧固件安装质量,如检查埋头铆头钉头齐平度、镢头高度、镢头直径、镢头变形、裂纹等缺陷,同时应检查夹层间隙、露窝程度及铆钉露杆等缺陷。

## 4 结束语

自动钻铆技术是现代航空制造技术之一,自动钻铆机的应用对提高波音 737 尾段产品质量和生产速率都起了重要作用。

波音 737 飞机是数字化定义的产品,这种特点为自动钻铆机向深度、广度拓展提供了良好的条件。

### 参 考 文 献

- 1 Advanced Quality System Tools. BOEING Published, 1991

(责编 依然)