

# 飞机结构件的自动化精密制孔技术

## Automatic Precision Drilling Technology of Aircraft Structural Part

北京航空制造工程研究所

卜 泳 许国康 肖庆东

[摘要] 从分析影响孔质量的因素开始,总结了手工制孔的缺陷,从而引出自动化精密制孔技术的重要。进一步论述了精密制孔的工艺和提高制孔质量的工艺措施,并列举了国外发达国家的一些精密制孔设备。

关键词: 孔质量 疲劳寿命 自动化 精密制孔

[ABSTRACT] By analyzing the factors influencing the holes quality, hand-drilling defect factors are summarised, and the importance of automatic percision drilling is pointed out. Percision drilling process and advance hole quality process are discussed, and some advanced percision drilling equipments from abroad are specialized.

**Keywords: Quality of hole Fatigue life Automatic Precision drilling**

在飞机的全部故障总数中,结构件损伤的故障数量一般占 12%~13%,但是,因为机载成品系统在发生故障后能用新的成品代替,因此飞机结构件的寿命就决定了飞机的总寿命<sup>[1]</sup>。目前飞机结构件采用的主要连接方法仍是机械连接,一架大型飞机上大约有 150~200 万个连接件<sup>[2]</sup>。为了满足现代飞机高寿命的要求,可通过各种技术途径改善各连接点的技术状态(表面质量、配合性质、结构形式等),其中一个很重要的途径是通过自动化设备进行自动精密制孔,提高制孔质量。

### 1 制孔质量的影响因素

#### 1.1 圆度

紧固孔的圆度是指孔的圆柱几何形状的正确程度。只有孔的圆柱几何形状接近理论值,铆钉和螺栓安装后才不至于受到其他附加弯曲应力、挤压应力等的影响而降低其静强度和动强度。

#### 1.2 垂直度

孔轴线方向对紧固孔疲劳性能的影响较大。紧固件孔沿外载荷作用方向倾斜 2°,疲劳寿命会降低 47%;倾斜 5°则疲劳寿命可能降低 95%<sup>[2]</sup>。

#### 1.3 内壁表面质量

加工表面质量对紧固孔疲劳性能的影响在零件尺寸和材料性能一定的情况下,制孔工艺是影响表面质量的重要因素。根据断裂力学原理,表面粗糙度值越大,切口效应就越大,即应力集中系数越大,故疲劳性能越差。孔壁轴向划痕是促使紧固孔疲劳性能降低的主要因素之一。

#### 1.4 残余应力

在切削加工时,由于切削力和切削热的影响,表层的金属会发生形状和组织的变化,从而在表层及其与基体交界处产生相互平衡的弹性应力,即残余应力。已加工表面的残余应力分为残余拉应力与残余压应力,残余拉应力会降低孔的疲劳寿命,而残余压应力有时却能提高紧固孔疲劳寿命<sup>[3]</sup>。

#### 1.5 位置精度

在结构件设计阶段,设计者就已经考虑到了钉载分配。进行制孔时,如果定位不准造成孔位误差,就会改变结构件受力境况下各紧固孔之间的载荷,从而影响结构件的疲劳寿命。

#### 1.6 夹层之间的毛刺与切屑

由于飞机结构上的紧固孔是在各连接零件组装在一起时(即在夹层状态下)制出来的。因此,当夹层件贴合不紧密时,每钻透一层夹层件,都会在夹层件之间产生毛刺,这不会导致应力集中,还会妨碍零件的紧密贴合,进而降低连接零件之间的摩擦力。当刀具每次钻出、钻入时,还会造成断削,由于切屑的运动方向改变,切屑可能填充在板件之间,从而进一步妨碍夹层贴合,当受到交变载荷时,便加快磨损腐蚀<sup>[4]</sup>。

#### 1.7 出口毛刺

在金属的钻削加工中,通常情况下在钻头的入口处和出口处都将产生毛刺。按照切削运动-刀具切削刃毛刺分类体系,分别称为切入进给方向毛刺和切出进给方向毛刺。一般说来,切出进给方向毛刺的尺寸较大,去除作业量大,由于毛刺的存在,在影响零件的尺寸精度及使用性能的同时,会产生应力集中,降低结构件的疲劳强度。

2 传统手工制孔

传统的飞机装配中的制孔主要以风钻钻孔为主。工艺顺序为：划线→钻孔→粗铰(或扩孔)→精铰→分离清理。传统手工制孔通常的缺点在于：

① 易形成缺陷。

制孔过程全部为人为控制，容易造成孔径扩大、孔偏斜、椭圆等缺陷。

② 孔位精度差。

孔位确定主要通过专用定位器和划线完成，孔位精度无法保证。

③ 制孔步骤多。

一个紧固件孔需要经过 3~5 次加工才能完成，高精度孔甚至需要更多次的加工。

④ 需要二次装配。

制孔完成后由于钻孔过程中夹层中间存在毛刺及切削，需将夹层结构分离，逐一清理毛刺和切削，再重新定位，大大增加了工人的劳动量和劳动时间。

⑤ 人为因素影响无法避免。

制孔过程完全依赖于工人技术能力，工人技术熟练程度要求过高。

3 自动化精密制孔

3.1 自动制孔的工艺顺序

自动制孔的工艺顺序如图 1 所示。

3.2 制孔参数的选择

自动化精密制孔要求一次高速钻出优质孔(包括铤窝)，因此对钻头的几何形状、材料及钻孔时的钻速、进给速度等提出了一系列的要求。

3.2.1 自动钻削的要求

效率：完成一个钻孔循环(快速进给—工作进给—快速退回)需时间 1.5s 左右；

孔壁表面粗糙度： $R_a \leq 3.2 \mu m$ ；

孔尺寸偏差： $\phi DH8$ ；窝深 C-0.05；

孔垂直度： $0.5^\circ$ ；

入口端无毛刺，出口端毛刺不大于 0.12mm。

3.2.2 制孔参数的选择

不同材料制孔参数不同，具体参数见表 1。

3.3 提高制孔质量的工艺措施

3.3.1 刀具方面

钻头工作部分的沟槽粗糙度  $R_a$  小于 0.8，可减少排削阻力；钻铤复合刀具中钻头的螺旋角大于普通钻头，

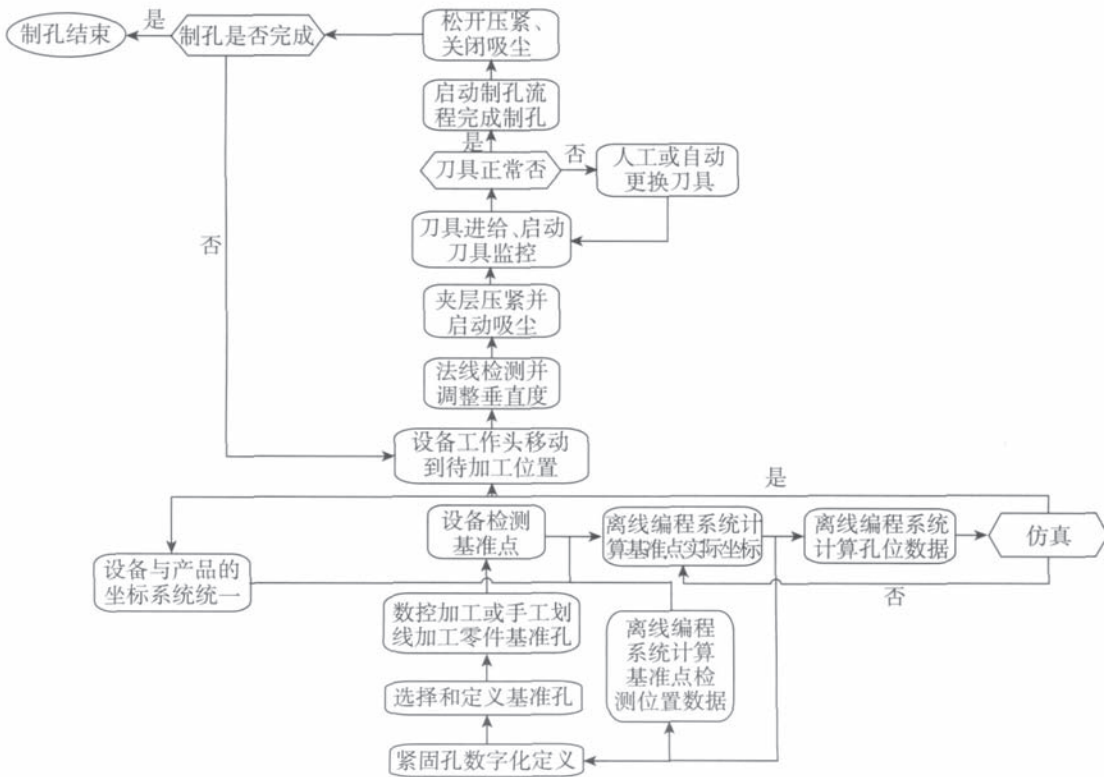


图 1 自动制孔工艺顺序

Fig.1 Sequence of automatic drilling process

表1 不同材料的制孔参数

材 料	进给方式	切削速度 / ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	进给量 / ( $\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$ )
铝合金	连续	45~90	0.1~0.2
钛合金 / 不锈钢	啄式	$\approx 12$	0.1~0.3
复合材料	连续	95~200	0.1~0.2

以  $30^\circ$  为宜, 以保证刃口锋利; 尽量选用优质材料钻头, 如 PCD, 以确保钻头寿命。

### 3.3.2 工艺措施

如果自动制孔设备无孔径检测单元, 需人工定期检查孔径和沉头窝尺寸及出口毛刺, 确保钻头锋利; 对磨损刀具进行刃磨时, 采用自动刃磨机集中刃磨, 确保切削刃对称; 所有铝合金工件表面必须进行阳极化处理, 以改善加工特性; 复合材料出口表面最好贴玻璃布, 减少分层。

### 3.4 自动化精密制孔对设备的要求

① 一次性的钻孔、镗窝、法向检测、照相测量、冷却、压紧、刀具检测;

② 可以完成混合夹层结构的一次性制孔, 常见的航空材料为铝合金、钛合金和复合材料;

③ 设备末端执行器具有快进快退功能;

④ 设备定位精度 0.1mm;

⑤ 设备重复定位精度 0.05mm;

⑥ 钻孔直径精度 H8。

## 4 国外应用的自动化精密制孔设备

### 4.1 自动钻铆机

美国是最早发展自动钻铆技术的国家, 早在 20 世纪 50 年代初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。整个过程通过预先编程, 全部由 CNC 程序控制。自动钻铆工艺是在一台设备上一次性地连续完成夹紧、钻孔、镗窝、注胶、放铆和铣平等工序的工艺。由于机床带有高速、高精度的转削主轴头, 一次进给既能钻出 0.005mm 以内高精度的孔, 又可将埋头窝的深度精确控制在  $\pm 0.01\text{mm}$  以内。由于钻孔时铆接件处在高的夹紧力下, 层间不会产生毛刺和进入切削, 可以减小疲劳载荷下发生磨蚀损伤的程度, 有利于提高接头的疲劳强度。自动钻铆机如图 2 所示。

美国最早的自动钻铆机制造厂商是 GEMCOR (捷姆科公司), 它是向世界各国飞机制造行业提供自动钻铆机的主要厂商之一。该公司生产的系列化产品质量

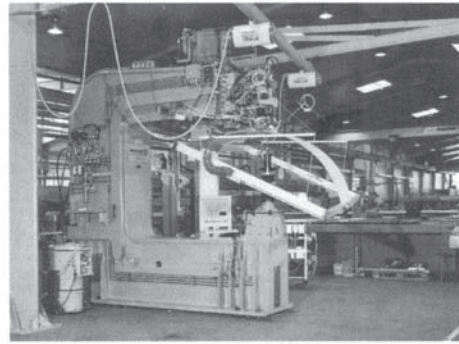


图2 自动钻铆机

Fig.2 Automatic drilling and riveting machine

可靠, 并配套有各种型号的数控托架。迄今为止, 销售的自动钻铆机数量已达 2 000 台以上, 其中 190 台具有定位系统。自动钻铆机大部分为 C 框结构, 多数用于壁板类零件的自动制孔和铆钉铆接成形, 但由于自身的一些限制, 不能进行比较复杂和开敞性差的装配工作<sup>[5]</sup>。

### 4.2 机器人自动制孔系统

机器人制孔(如图 3 所示)的应用已经比较成熟, 如 F-16 复合材料垂尾壁板利用辛那提·米尔康 T3 机器人进行钻孔, C-130 飞机梁腹板用机器人进行自动制孔, 波音 F/A-18E/F 超级大黄蜂后沿襟翼的 ONCE (One-sided cell end effector) 机器人制孔系统等。

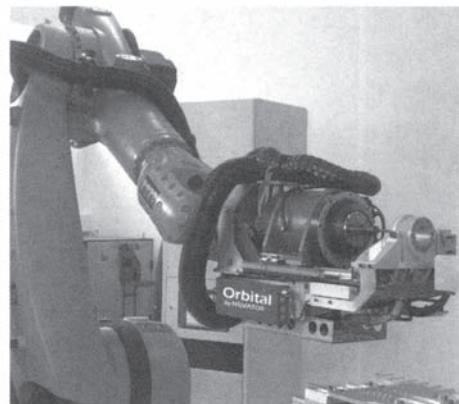


图3 机器人制孔系统

Fig.3 Robot drilling system

机器人制孔的最前沿应用, 包括洛克希德·马丁公司 F-35 飞机碳纤维环氧树脂复合材料机翼上壁板制孔用的大型龙门式钻孔系统(JGADS)。该系统带有便携、灵活、低成本且重量轻的机器人, 它使用激光定位系统、电磁马达和“压脚”(Pressure Foot)进行精密钻孔, 加快了装

配过程,并形成紧配合,产生的表面光滑、间隙小,满足了F-35飞机气动和耐久性的要求。由于具有上述优势,F-16、F-22、F-2和T-50项目都对该系统进行评估并准备用于相应的装配作业。波音787采用的机器人自动制孔系统见图4。

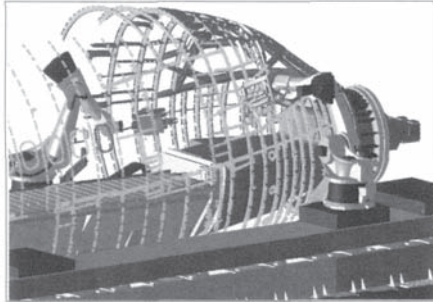


图4 波音787采用的机器人装配系统

Fig.4 Robot assembly system on Boeing 787

机器人自动制孔系统的关键技术包括<sup>[6]</sup>:

- ① 压紧力的设定;
- ② 刀具和工件表面垂直度的调整;
- ③ 位置精度补偿。

#### 4.3 龙门式自动制孔系统

龙门式自动化制孔系统,比如长桁柔性制孔系统对批量生产的大型构件可以实现高效、高质量、低成本的自动柔性制孔。

波音公司B-747、C-17等飞机机舱地板都采用了龙门式自动化制孔系统。过去,装配中所有难以进行点定位的部分,都要用固定夹具定位后手工制孔。而现在采用自动化制孔系统则可进行自动定位和制孔,大大缩短了流程时间,提高了制孔质量,并可节省体力劳动及工具成本。

#### 4.4 柔性导轨自动制孔系统

制造与装配时,达到制孔自动化同时又降低成本是极其重要的。因此,低成本、柔性化且满足高质量制孔要求的便携式自动化制孔系统,与配有大量刀具的复杂结构自动制孔系统相比,极具竞争优势。波音公司开发的Flex Track模块化柔性导轨制孔系统正是属于此类。

### 5 结束语

飞机装配中以机械连接为主,机械连接带来了大量制孔问题,为了满足飞机长寿命要求,就必须解决精密制孔技术难题。国内飞机装配领域与航空技术先进国家有较大的差距,需要大力发展,以满足新一代飞机的研制和生产需求。

### 参 考 文 献

- [1] 张全纯,汪裕炳,瞿履和,等. 先进飞机机械连接技术. 北京:兵器工业出版社,2008.
- [2] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术. 航空制造技术,2007(1):96-99.
- [3] 徐红炉,刘军,章刚,等. 制孔工艺对紧固孔疲劳性能的影响. 飞机设计,2008(3):25-30.
- [4] 谢俊峰. 钻削加工毛刺的形成及解决方法. 轻工机械,2007(1):85-87.
- [5] 楼阿莉. 国外自动钻铆技术的发展现状及应用. 航空制造技术,2005(6):50-52.
- [6] 毕树生,梁杰,战强,等. 机器人技术在航空工业中的应用. 航空制造技术,2009(4):34-39. (责编 淡蓝)

(上接第60页)

轴移动时X向偏差)和DYY(沿Y轴移动时Y向偏差)。

当指定小车移动到XY平面某一位置时,其X向和Y向的误差补偿值DX、DY分别为:

$$DX=DXX+DXY, \quad DY=DXY-DYY。$$

按照这种补偿方案,可以将小车的定位精度控制在0.2mm以内。

#### 3.5 加工过程自动控制技术

系统提供自动控制功能,可以按照测量指令文件或加工指令文件的要求,顺序执行测量或加工过程。控制界面如图7所示,当前执行的指令在程序段显示区高亮显示。自动控制程序执行流程如图8所示。

### 4 结束语

图9为北京航空制造工程研究所自行研发的柔性

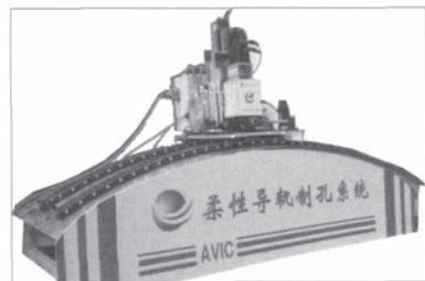


图9 柔性导轨制孔系统

Fig.9 Flexible track drilling system

导轨自动制孔设备。通过长时间的调试和大量工艺试验,目前该设备在定位精度和制孔质量方面已达到实用要求,通过进一步的改进和完善,这种方便实用的自动化制孔设备可广泛应用于我国航空工业的自动化装配中。(责编 岩石)