

# 飞机装配制孔技术发展浅析

王 良, 郭春英

(中航沈飞民用飞机有限责任公司科技与信息化部, 沈阳 110000)

**[摘要]** 现代飞机结构设计中复合材料及钛合金的使用日益广泛, 对制孔质量及制孔效率的要求更高, 相应的装配制孔技术随之发展, 针对飞机装配过程制孔技术的发展及应用, 重点介绍了半自动制孔和自动制孔技术的工艺特点、所使用的主要工具设备及其适用范围。

**关键词:** 半自动制孔; 自动制孔; 螺旋铣孔; 机器人制孔; 飞机装配

## Drilling Technology Development Analysis in Aircraft Assembly

WANG Liang, GUO Chunying

(Technology and Information Department, AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd., Shenyang 110000, China)

**[ABSTRACT]** With the extensive use of composite and titanium material in present-day aircraft structure and higher requirement of drilling efficiency and drilling quality, the drilling technology improves correspondingly. For development and application of drilling technology, this article describes the process characteristics, the main tools and the application scope.

**Keywords:** Semiautomatic drilling; Automatic drilling; Orbital drilling; Robotic drilling; Aircraft assembly

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.088

在飞机装配过程中, 制孔工作量大, 且制孔质量对飞机结构的完整性以及制孔效率对装配周期都有很大的影响。为了降低飞机结构重量、提高结构强度, 在新机型中大量采用复合材料, 这些复合材料的大量使用, 导致复杂材料叠层(如复合材料和金属叠层)的应用日趋广泛, 使得飞机在装配过程中的制孔操作面临更大的挑战。在新机型的研制周期逐步缩短的情况下, 在满足交付进度、降低制造成本、提高产品质量方面, 制孔质量和效率已成为飞机装配中的一个焦点问题。近年来, 在制孔方面有很多新的工艺和工具设备在飞机装配中使用, 尤其是半自动和自动制孔工艺及工具设备, 本文主要介绍了半自动和自动制孔工具设备在飞机装配制孔过程中的应用。

### 1 制孔主要面临的挑战

目前飞机装配制孔面临两个主要的挑战: 一方面是随着复材及钛合金的广泛使用, 装配制孔时的材料叠层种类越来越多, 且复杂材料叠层结构大量使用, 如铝-钛叠层、复合材料叠层及复合材料与金属叠层等。图 1 为在复杂材料叠层中制孔时的主要缺陷<sup>[1]</sup>。尤其是在钻制复合材料或复合材料与金属材料组成的复杂叠层时, 传统的手工制孔难以保证制孔质量; 另一方面为了

满足飞机的研制及交付周期的要求, 针对制孔困难的复材及钛等材料, 对制孔效率也提出了更高的要求。

### 2 制孔方式

按制孔时刀具的进给方式和确定孔位的方式, 可分

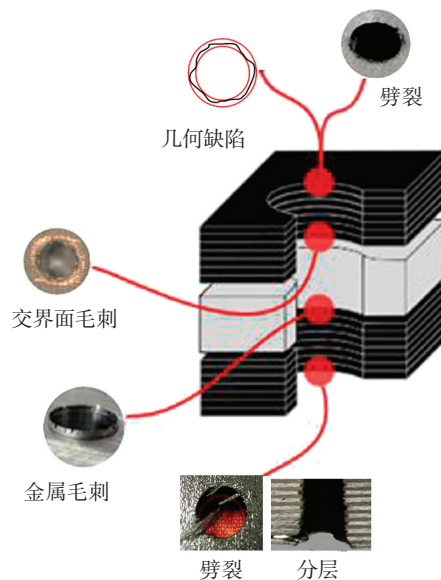


图1 复杂材料叠层中的制孔缺陷  
Fig.1 Drilling defect of complex stackup

为手工制孔、半自动制孔和自动制孔。手工制孔时刀具手工进给,由操作者提供轴向力,孔位通过手工确定。半自动制孔时刀具自动进给,由切削系统提供轴向力,孔位通过手工确定。自动制孔时刀具自动进给,由切削系统提供轴向力,孔位由切削系统自动确定。

按制孔时刀具的旋转方式可分为常规制孔和螺旋铣孔。在常规制孔中刀具做轴向进给运动和围绕刀具自身轴线的旋转运动。在螺旋铣孔时刀具除了做进给运动和围绕刀具自身轴线的旋转运动外,同时还围绕偏离刀具自身轴线的另一个轴线(一般为孔的轴线)做旋转运动。由于刀具运动的复杂性,螺旋铣孔不能通过手工制孔来实现,必须通过半自动制孔和自动制孔来实现。

螺旋铣孔是近年来在飞机制孔中采用的新工艺,主要特点是:刀具的直径比孔径小;刀具的切削刃与孔壁是断续接触的;切削时形成的切屑小,轴向力小。由于上述特点,使得在切削时切屑易于通过真空吸尘的方式排除,从而防止了热量的积累,消除了在加工金属时过热或在加工复材时基体熔化的风险;且由于切屑小可及时排除的原因,消除了切屑对孔壁的损伤;切削时的轴向力小,使得在切削金属时很少产生毛刺,在切削复合材料时很少产生分层<sup>[2-4]</sup>。根据螺旋铣孔的特点并通过试验表明,螺旋铣孔适用于加工钛、因科镍合金(Inconel)及不锈钢金属材料和碳纤维复合材料以及由这些材料组成的复杂材料叠层结构。在国内针对钛合金螺旋铣孔的相关研究中,其孔径一般可达到IT6~IT8的精度等级<sup>[5]</sup>。

### 3 半自动制孔

半自动制孔一般通过自动进给钻来实现,螺旋铣孔可通过便携式螺旋铣孔工具来实现。

#### 3.1 自动进给钻

自动进给钻一般通过膨胀夹头或转位套筒固定在钻模板上(图2)。膨胀夹头的优点是夹紧方便、迅速,只要将自动进给钻的前端插入钻模板,接通风源,夹头会立即膨胀,将自动进给钻固定,缺点是每次夹头膨胀时,其轴线可能会有所偏差,所以这种固定方式一般用于配钻紧固件孔。当构件上钻制的孔需要与另一个构件上已钻制的孔互换时,不能使用膨胀夹头,而应采用转位套筒的方式来固定。

自动进给钻根据制孔时刀具的进给方式可分为常规自动进给钻、啄钻式自动进给钻和微啄式自动进给钻。刀具的进给方式和制孔特点如图3所示<sup>[6]</sup>。

常规自动进给钻制孔时刀具一直沿其轴线向前进给,直到制孔完成。

啄钻式自动进给钻在制孔时刀具有快速退刀动作,退刀至参考高度,以便产生更小的切屑并强行排去切屑并冷却。由于增加了退刀动作,使得制孔周期变长,降低了制孔效率,且由于退刀的幅度大,制孔时的振动也较大,在实际使用中,有时连接钻模板的螺栓会发生疲劳断裂,而损伤工件。

微啄式自动进给钻在主轴进给的同时对主轴施加了周期性的低频轴向运动,从而产生轴向波动。啄钻式自动进给钻,波动振幅较小,一般不超过0.5mm,故称为微啄。微啄目的是产生较小切屑,从而易于排屑和散热。对金属与复合材料的混合叠层制孔,微啄可减少切屑对复材的磨蚀,并可减少金属零件切出侧的毛刺高度(图4)。由于微啄式自动进给钻的振幅比啄钻式自动进给钻小很多,所以微啄式自动进给钻的制孔周期短,效率

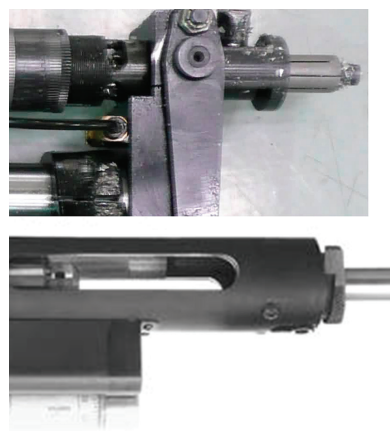
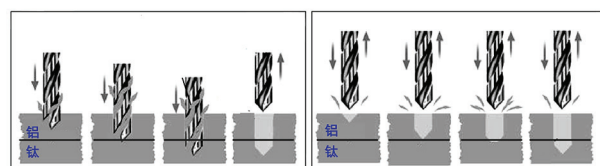
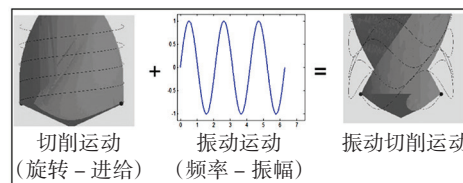


图2 膨胀夹头(上)与转位套筒(下)  
Fig.2 Concentric collet(upr) and twist lock(lwr)



第2层较硬材料大且长的切屑会切削第1层软的材料  
啄钻产生较小的切屑且在每次啄动过程中被排除,从而制出更精确的孔

(a) 常规制孔 (b) 啄钻制孔



通过微啄产生较小的切屑,使切屑易于排除,从而减少对孔壁的划伤,制出更高质量的孔

(c) 微啄制孔

图3 自动进给钻刀具的进给方式

Fig.3 Cutter feed mode of automatic drill unit

高,所产生振动也小,在实际使用中感觉不到振动。

鉴于啄钻式自动进给和微啄式自动进给钻的特点,其特别适合于异种材料组成的混合叠层的制孔。

提供自动进给钻的公司及型号较多,主要品牌有 Quackenbush、Recoules、Desoutter、Lubbering、Atlas Copco 等,图 5 为各品牌的典型产品。Quackenbush 产品进入市

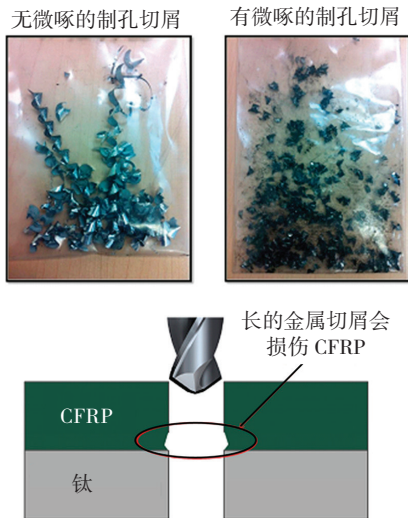


图4 微啄式自动进给钻特点  
Fig.4 Micro-peck drilling characteristic



图5 典型的自动进给钻  
Fig.5 Typical automatic drill unit

场较早,产品系列全,很多客户的工艺设计以其为标准,Desoutter 和 Lubbering 的产品采用模块化设计,工具重量轻,都可选配微啄功能。

### 3.2 便携式螺旋铣孔工具

目前提供便携式螺旋铣孔工具的只有 Novator 公司,提供的是 PM 系列的便携式螺旋铣孔工具,图 6 为 PM60 型号的便携式螺旋铣孔工具,该系列的工具都可在一定范围内调整主轴转速、螺旋转数、偏心距等参数。

便携式螺旋铣孔工具通过夹持前端固定在钻模板上。夹持前端中配有读取 RFID 芯片的天线,可在钻模板的衬套孔处安装无源 RFID 标签,螺旋铣孔工具通过读取钻模板的 RFID 标签来自动调用相应的制孔参数,从而确保在每个孔位处钻制正确的孔(图 7)。

## 4 自动制孔

自动制孔在飞机装配中应用越来越多,制孔设备的种类也较多,如自动钻铆机、工业机器人制孔、爬行机器人制孔等,除可制孔外,很多设备可以安装或插入紧固件。本文重点介绍近年来逐渐规范应用的机器人制孔。

### 4.1 自动钻铆机

自动钻铆机的优点是技术成熟、工作稳定、效率高,特别适用于机翼/机身壁板、机身半壳体等结构的制孔及紧固件安装,自动钻铆已成为飞机数字化装配最成熟



图6 PM60便携式螺旋铣孔工具(上)及夹持前端(下)  
Fig.6 Orbital portable drilling machine(upper) and nose piece(lower)

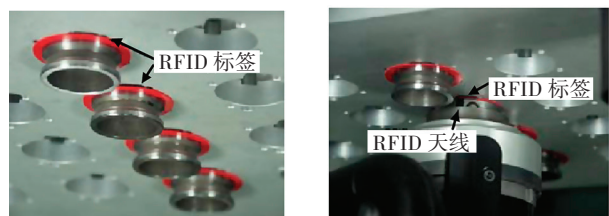


图7 带有RFID标签的钻模板  
Fig.7 RFID drill jig plate

及应用最广泛的领域,其缺点是设备成本高,一般适用于开敞的壁板及半壳类构件制孔及紧固件安装。

#### 4.2 机器人制孔

机器人工作单元在飞机装配的某些应用中已被证明非常有效,且该技术正在持续改进。以 KUKA 的通用机器人移动自动化制孔系统为例来说明典型的机器人制孔,该系统已在一些飞机制造商中得到了成功地应用。

KUKA 移动机器人平台将所有机器人制孔所需的必要设备集成在一个独立结构上,如图 8 所示(宽 2000mm × 长 3000mm × 高 3500mm)。自动制孔移动平台由基架、脚轮以及气垫组成。该平台配备定位器,作为该系统与产品工装在工作站内的定位基准。KUKA KR 210 QUANTEC 系列机器人直接安装在移动平台上并配备末端执行器。所有必需的支持设备,比如真空系统、微量润滑系统、同步视觉设备、试样存放架、末端执行器存储架、控制面板以及人机接口面板都将安装在移动平台上。为了增强实用性,该系统为所有子系统都配备了快换连接。

在进行指定站位内的产品制孔时,移动机器人平台(MRP)通过电动手推车推到指定制孔站位,打开气垫微调移动机器人平台并将其定位在预埋地面上的杯锥定位器后,机器人实施制孔作业。完成后,移动机器人平台将电动手推车牵引通过脚轮实现转向继续完成下一站位产品的制孔作业。

整个制孔单元包括:移动平台系统、KUKA 机器人、制孔多功能末端执行器、自动换刀装置、试刀架、末端执行器快速更换器和存储机架、润滑系统、真空系统、机器人和末端执行器电气柜、操作人员控制台、安全装置(激

光扫描仪)。

其中制孔多功能末端执行器为 Alema 分度制孔多功能末端执行器系统,这种末端执行器的主要优点是能在不释放压紧力的情况下完成所有操作。当末端执行器在工件上压紧时,通过管筒旋转到所需位置,以实现末端执行器的所有功能。每个末端执行器管筒配备 6 个标准模块。每个标准模块的管筒内,可插入不同标准模块类型,包括制孔、涂胶、送钉、质量检验和视觉模块等。末端执行器管筒的底部装有法向定位补偿系统和滑移补偿(图 9)。

快速换刀装置包括带刀柄附件的转盘,换刀时间不到 1min。由于集成了 Balluf 公司的成品,转盘最多可容纳 30 把刀柄,该方案的优势是不需要对操作者和安全有额外的要求(图 10)。

末端执行器快换耦合装置为 ATI 快换耦合装置,当使用不同的末端执行器时,如制孔和铣切的末端执行器,末端执行器可以自动更换,无需人工干预,一般情况下,自动快速更换通常不到 1min 就可完成。

整个系统可实现加工精度:法向垂直度偏差  $\leq \pm 0.2^\circ$ ; 孔精度 H9; 镗窝角度公差  $\leq \pm 0.5^\circ$ ; 镗窝深度偏差  $-0.03 \sim 0\text{mm}$ ; 经过激光跟踪仪预先标定,位置精度误差  $\leq \pm 0.3\text{mm}$

#### 4.3 柔性导轨自动制孔设备及爬行机器人制孔设备

这是两种便携式的机器人制孔设备,很多时候用于机身部位对接时的纵向及环向制孔(图 11)。

柔性导轨自动制孔设备主要应用于机翼和机身装配的自动制孔,其都有大量的平缓曲面,将导轨制孔系统直接固定在飞机表面进行制孔,可以取代传统的五轴制孔

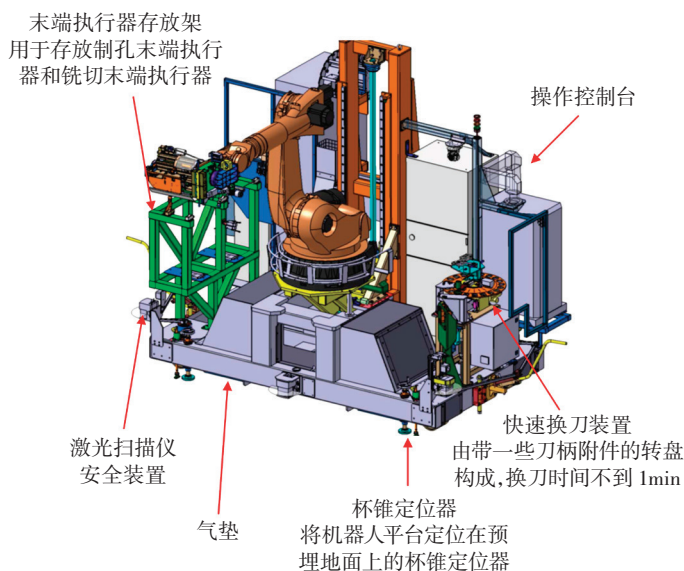


图8 典型的KUKA移动机器人平台  
Fig.8 Typical mobile platform

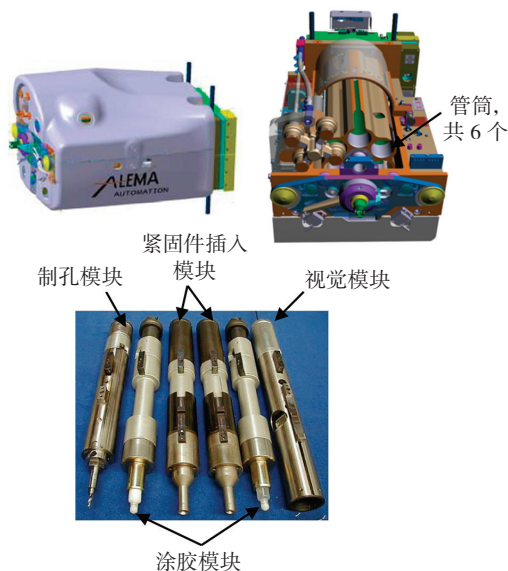


图9 末端执行器(上)及标准模块(下)  
Fig.9 End effector(upr) and standard module(lwr)

设备,具有成本低、重量轻、自动化程度高、使用方便等特点<sup>[6]</sup>。柔性导轨自动制孔设备主要由带有真空吸盘柔性导轨、带有主轴箱的移动小车组成。工作时由柔性导轨安装器进行安装,通过真空吸盘将导轨固定在机身或机翼表面。移动小车可以沿导轨进行X向和垂直于导轨的Y向运动。通过X、Y向移动,可以确定制孔位置,为了保证钻孔垂直度,主轴箱配有A摆(绕X轴旋转)以及压紧和测量装置等<sup>[7-9]</sup>。制孔执行器可在垂直工件表面的方向上进给,实现制孔加工。通过与照相测量及法向检测单元配合,国内的一些研究表明在包括铝



图10 旋转式自动换刀装置  
Fig.10 Rotary auto tool changer

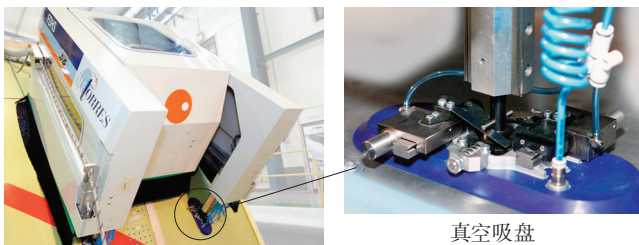


图11 柔性导轨自动制孔设备(上)及MTorres爬行机器人制孔设备(下)

Fig.11 Flexible track automatic drilling machine(upper) and MTorres crawler robot drilling machine(lower)

合金、复合材料等的单一或叠层结构材料制孔中,制孔直径可达4~10mm,孔位精度为0.5mm,孔径精度为H9。

MTorres的FDH爬行机器人制孔设备是一个五轴平台,其上装有执行制孔和镗窝操作的末端执行器,FDH通过一组真空吸盘在机身上“行走”。一旦“行走”到位通过真空吸盘锁定。通过视觉和激光系统来确保FDH按预期的路径“行走”。视觉定位系统由照相机、激光传感器和MTorres研发的控制软件组成视觉定位系统,可以保证FDH在飞机零件上的位置。为了位置的精细调整,系统还配置离线编程系统,它能自动获取零件的基准,然后可以自动定位工作区域,定位精度可以达到 $\pm 0.2\text{mm}$ 。在10mm厚的铝板叠层材料的制孔时,FDH制孔效率达到6~8个/min,垂直度公差达到 $\pm 0.5^\circ$ ,镗窝精度达到0.15mm<sup>[9]</sup>。

## 5 结论

半自动制孔和自动制孔可保证制孔质量的一致性,尤其是机器人制孔,操作中的每个过程步骤都可高度受控,且与自动钻铆相比,使用范围更广,除制孔外,插入紧固件、铆接、在线检测等功能也在逐步推广使用。虽然自动制孔的优点很明显,但由于其系统的复杂性,发生故障的风险也更高,尤其当其用于制造流程中的关键点时,其的故障可导致整个生产的停顿。在设计工艺过程中必须考虑该问题。最好的方法是进行冗余备份,但考虑到价格的高昂也难于实现。对于便携式的半自动制孔工具,备件的成本低,工作准备时间短,工艺流程规划的难度低。在实际生产中应综合考虑各种因素来布置半自动制孔和自动制孔的工艺过程。

## 参 考 文 献

- [1] JALLAGEAS J, K' NEVEZ JY, CHÉRIF M, et al. Modeling and optimization of vibration assisted drilling on positive feed drilling unit[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5-8): 1205-1216.
  - [2] WHINNEM E. Development and deployment of orbital drilling at boeing[M]. Chicago: Boeing, 2006.
  - [3] JALLAGEAS J, CHERIF M, K'NEVEZ J Y. New vibration system for advanced drilling composite-metallic stacks[J]. SAE Technical Paper Series, 2014, 7(1): 23-32.
  - [4] CARLOS C A E, LUIS G T. Design of a robotic orbital driller for assembling aircraft structures[J]. Metatronics, 2014, 24: 533-545.
  - [5] 张云志,刘华东,邹方.螺旋轨迹制孔技术在航空制造中的应用[J].航空制造技术,2013,56(22):34-39.
- ZHANG Yunzhi, LIU Huadong, ZOU Fang. Application of spiral trajectory drilling technology on aviation manufacturing[J]. Aeronautical

(下转第102页)