

# 飞机装配自动制孔刀具 技术研究

## Research on Automatic Drilling Tool for Aircraft Assembly

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 唐臣升  
空军驻沈阳地区军事代表局 王巍



唐臣升

研究员级高级工程师,中航工业集团一级技术专家,主要从事金属切削刀具以及金属切削加工技术、数控加工技术的研究工作。中国机械协会生产切削分会委员,中国刀具协会会员。独立或主持完成中国航空工业、省级、市级科研项目 20 多项。曾多次荣获中航工业集团、辽宁省、沈阳市科技成果和科技论文一、二、三等奖 20 余项;获得国家发明专利 4 项,其中 1 项专利荣获中国国际发明博览会金奖,已获申请发明专利 12 项,5 项授权实用新型专利;获得国家软件著作权 4 项;发表 SCI 论文 1 篇,发表核心期刊论文 5 篇;被 CPCI(原 ISTP)收录会议论文 1 篇。

碳纤维复合材料与金属材料构成的性能差异的叠层构件在飞机机翼和尾舵中应用广泛,叠层构件装配过程中需要大量的铆接或螺接孔。在这些航空产品装配制孔中,最佳的工艺是在碳纤维复合材料和金属材料叠层构件上同时加工出所需要的铆接或螺接孔,这是确保叠层材料构件产品连接强度、刚度和安全性的主要手段。然而由于碳纤维复合材料层间结构特点和 2 种材料性能的巨大差异,制孔质量难以保证并且刀具磨损剧烈。特别是随着飞机自动制孔技术的发展,其关键技术之一就是要求在装配过程中采用一道工序同时高效加工碳纤维复合材料和钛合金以及铝合金等完全不同性质的材料。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.043

进入 20 世纪 90 年代后,飞机制造行业对飞机装配技术提出了高质量、高速度、低成本的生产要求,飞机装配自动制孔技术便由此产生。自动制孔设备类别主要表现为 CNC 机床和机器人等。由于采用数控设备或机器人移动而被加工构件不动的方式,因而灵活性较好,且对被加工构件的适应性较好,同时能够极大地提高制孔效率和精度,因此,在国

外已得到广泛研究和应用。如美国 EOA 公司与波音公司也联合生产研制了一种机器人多功能制孔系统,该系统可以完成对钛合金、铝合金、复合材料及其叠层等飞机蒙皮的钻孔、铤孔和铰孔工作。

### 飞机装配自动制孔的特点与要求

#### 1 飞机装配自动制孔的优点

飞机装配自动制孔技术以其自动化程度高、适应性强和集成度好的独特优势,结合激光跟踪辅助测量系统、移动平台导轨和终端执行器等设备,共同构建航空材料的高效、高精度柔性制孔系统,成为飞机装配连接孔加工的最佳工业解决方案,具有重大的工程应用价值。该项技术能够极大提高飞机的制造与装配效率,改善机体疲劳与安全性能,且将工人从恶劣、危险的劳动环境中解放,是当今飞机装配制造业的发展趋势。作为数字化装配的重要环节和最终阶段,飞机装配连接孔的制备对装配质量与飞机整体性能有关键影响。

## 2 飞机装配自动制孔的工艺特点

令人满意的钻削碳纤维复合材料(CFRP)及其与金属的叠层结构孔是一项挑战。

切削 CFRP 及其与金属的叠层构件时,正确地应用专用的切削刀具是获得理想孔和减少粉尘污染的关键所在。金属材料的制孔质量标准不完全适用于复合材料制孔,无任何切屑和传统的表面粗糙度通常不是衡量复合材料制孔质量的标杆。孔的质量一般是基于复合材料底层分离的程度(分层)和孔中任何残余的纤维剥离(破裂)。一些不能直接检测到的缺陷,对刀具是否发挥相应的切削效应是一大挑战;有些孔质量的下降甚至发生在刀具的磨损征兆发生之前。

由于 CFRP 纤维的硬度高,切削过程中刀具磨损快,当粘合在较软而粘性大的树脂中时,就可能出现纤维剥离、弹性错配以及层间破裂的趋势。这样很容易损坏孔入口、出口和孔壁,使其不符合质量要求。另外,当加工叠有钛或铝一类的金属时,刀具必须具有合适的穿透能力。

将新型 CFRP 材料引入到生产中需要新的方法,并且在建立工件材料属性时,基于刀具供应商推荐的应用最佳的刀具和切削参数的测试一

直是主要的参考依据。它们并非均质材料,并且可加工性的难度要超过金属。CFRP 需要根据表面、结构、纤维、树脂和厚度(孔深)进行区分。具有叠层时,金属构件的种类以及厚度是重要因素。

所加工孔的数量往往被看作计算刀具成本因素。在大批量、单一品种 CFRP 材料制孔时,需要选择经过优化且一般更为昂贵的刀具才能更有效率。

## 3 飞机装配自动制孔对工艺装备及刀具的需求

### 3.1 高效率精密飞机自动制孔技术对工艺装备的需求

在为钻削 CFRP 复合材料或叠板材料进行工艺规划时,需要考虑许多因素。在大量不同的部件材料中理想地钻削加工高质量的孔也绝非易事。这不仅需要刀具设计与制造技术进行完善与优化,而且为了满足不同的部件材料制孔的切削加工参数,高效率精密自动制孔设备需要具有准确到位的进给与转速变化功能。但这一功能的实现是非常困难的,其主要原因有 2 个方面。一方面是自动制孔设备进给与转速变化的迅速性与准确性,因为结构件的数学模型与实际零件之间存在一定的误差,而且结构件在受力时还要发生一定的弹性变形,因此,有必要在自动制孔设备上增加切削力与扭矩传感器来帮助实现进给与转速变化的准确性;另一方面,尽管在自动制孔设备上增加切削力与扭矩传感器,由于机床变参数过程的反应速度慢,因此,也很难满足自动制孔设备进给与转速变化的准确性。

总之,高效率精密制孔技术要求工艺装备不仅在软硬件上要达到很高的水平,而且对工艺装备及加工刀具都有很高的要求。

### 3.2 飞机装配自动制孔的刀具技术

(1) 飞机自动制孔技术对刀具的需求。

在不断发展的复合材料领域,加工面临着新的挑战。从根本上而言,这些材料并非难以加工。目前的挑战在于更为高效、安全地加工出更高质量要求的孔尤其是加工带有金属叠板材料的复合材料。这就要求我们开发出更为优异的刀具解决方案来应对不断提升的需求。

同时,由于在复合材料不同工艺装备的加工领域,孔的加工居于主导地位,因而钻头正在经历一次切削刀具技术的全面变革。

(2) 飞机装配自动制孔刀具的特点。

复合材料及其叠层结构装配自动制孔刀具的特点是需要刀具具有专用性。

基于复合材料本身特性的制造缺陷,钻削 CFRP 复合材料会涉及分层和劈裂等问题。此外,当不得不使用相同的刀具在各种航空结构件中的 CFRP/金属叠板上制孔时,就需要专用于具体应用的解决方案,这一点非常重要。如此一来,刀具也就必须应对完全不同的工况、材料可加工性能、切屑形成以及排屑。

CFRP 和 CFRP/金属叠板构件上需要加工的部位通常少于传统金属零件,但由于其材料的加工特性,凸显关键技术的品质要求更为苛刻。CFRP 复合材料的加工涉及到纤维的割断,这时为了获得净切削,在刀具和加工方法上就需要有所改变。导热性差,并且没有切屑形成,这样一来,切削复合材料期间所产生的热就成问题,因为在高温下,复合材料的树脂存在很大风险。因此,与金属相比,这些材料在切削工艺中更能表现出难加工性,属性变化很大,具有不可预测性,另一方面 CFRP 复合材料作为零件材料的比重与日剧增,需要不断改善才能保证切削工艺富有竞争力。

(3) 飞机装配自动制孔刀具的新方案。

硬质合金刀具可通过其钻尖设计和钻柄进行增强,同时在保证刀具后角和排屑能力最大化的前提下,确保最佳的切削效应。

目前,主要的刀具解决方案基于金刚石涂层硬质合金钻和烧结金刚石钻头概念。聚晶金刚石(PCD)是最硬的刀具材料,耐磨性最好。同时,它也是非常适合于加工 CFRP 及其叠板材料的刀具材料。在质量水平和一致性更趋严格并且对生产效率要求更高的现状下,采用硬质合金作为钻头基体材料而 PCD 为切削刃的钻头可作为复合材料孔加工的理想刀具。

为了获得更长的刀具寿命、更精确的孔公差和更短加工时间,可用不同钻尖形式的新一代的 PCD 涂层刀具提升此类产品的强度和精度。类金刚石涂层是硬质合金钻头的备选,具有高通用性、低成本以及可重磨的优点。

## 飞机装配自动制孔的工艺难点

### 1 单一材料的切削加工性能

#### 1.1 复合材料的切削加工性能

碳纤维复合材料是一种采用铺层方式的材料,以碳纤维作为增强体,以环氧树脂作基体,一层一层铺陈而成。在钻削加工时,由于层与层之间结合剂的强度与纤维本身的强度的不同、纤维方向与切削刃角度不同而表现出的不同性能,导致制孔后形成了各种各样的缺陷。

当使用标准麻花钻钻削加工时,一般情况下入口不产生缺陷,而出口易产生分层、毛边和撕裂 3 种缺陷,其中毛边最为常见。标准麻花钻钻尖处为负前角,切削负荷最大,故钻尖处磨损比其他位置快得多。在很大程度上碳纤维复合材料表面加工质量取决于钻尖的锋利程度,只有钻尖足够锋利,才能切断每根碳纤维丝,一旦钻尖磨损严重,钻

尖不能对碳纤维丝形成剪切,而靠挤压作用将其断裂,这样就会产生撕裂现象,严重时还会在孔的出口处产生分层现象。标准麻花钻有很长的横刃,在钻削加工中,有 50% 以上的钻削轴向力产生在横刃处,横刃越长,则钻削产生的轴向力就越大。在钻削碳纤维复合材料时,钻削轴向力的大小是衡量刀具加工性能的一项重要指标。钻削产生的轴向力越大,则越容易在零件的孔壁产生分层现象。分层与否取决于钻削轴向力与层间结合力的大小关系。即使在孔的出、入口处表面是完好无损的,但是如果通过探伤发现内部有分层,孔的加工质量也是不合格的。横刃如果太长还会直接影响到定心的准确性,导致椭圆形孔的出现或孔径偏大,这样就产生了圆度误差和尺寸误差。

#### 1.2 钛合金材料的切削加工性能

钛合金的硬度大于 HB350 时切削加工特别困难,小于 HB300 时则容易出现粘刀现象,也难于切削。但钛合金的硬度只是难于切削加工的一个方面,关键在于钛合金本身化学、物理、力学性能间的综合对其切削加工性的影响。钛合金具有如下切削特点。

(1) 变形系数小。这是钛合金切削加工的显著特点,变形系数小于或接近于 1,切屑在前刀面上滑动摩擦的路程大大增大,加速刀具磨损。

(2) 切削温度高。由于钛合金的导热系数很小(只相当于 45# 钢的 1/5~1/7),切屑与前刀面的接触长度极短,切削时产生的热不易传出,集中在切削区和切削刃附近的较小范围内,切削温度很高。在相同的切削条件下,切削温度可比切削 45# 钢时高出 1 倍以上。

(3) 单位面积上的切削力大。主切削力比切钢时约小 20%,由于切屑与前刀面的接触长度极短,单位接触面积上的切削力大大增加,容易

造成崩刃。同时,由于钛合金的弹性模量小,加工时在径向力作用下容易产生弯曲变形,引起振动,加大刀具磨损并影响零件的精度。因此,要求工艺系统应具有较好的刚性。

(4) 冷硬现象严重。由于钛的化学活性大,在高的切削温度下,很容易吸收空气中的氧和氮形成硬而脆的外皮;同时切削过程中的塑性变形也会造成表面硬化。冷硬现象不仅会降低零件的疲劳强度,而且将加剧刀具磨损,是切削钛合金时的一个极重要的特点。

(5) 刀具易磨损。由于钛合金对刀具材料的化学亲和性强,在切削温度高和单位面积上切削力大的条件下,刀具很容易产生粘结磨损。

## 2 复合叠层结构特征及其自动制孔的切削加工性能

碳纤维复合材料与金属材料构成的性能差异的叠层构件在飞机机翼和尾舵中应用广泛,叠层构件装配过程中需要大量的铆接或螺接孔。在这些航空产品装配制孔中,最佳的工艺是在碳纤维复合材料和金属材料叠层构件上同时加工出所需要的铆接或螺接孔,这是确保叠层材料构件产品连接强度、刚度和安全性的主要手段。然而由于碳纤维复合材料层间结构特点和 2 种材料性能的巨大差异,制孔质量难以保证并且刀具磨损剧烈。特别是随着飞机自动制孔技术的发展,其关键技术之一就是要求在装配过程中采用一道工序同时高效加工碳纤维复合材料和钛合金以及铝合金等完全不同性质的材料。

## 自动制孔刀具结构设计

自动制孔因具有较高的加工效率与精度,因而,已越来越广泛应用在飞机装配制孔的加工过程中。

要实现高精度、高效率的飞机装配制孔的加工,对自动制孔刀具的

要求比较高。首先,自动制孔刀具必须为钻铤一体的复合刀具。图1是一种整体硬质合金钻铤一体的复合制孔刀具结构图。图2为一种PCD钻铤复合刀具结构图。其次,刀具必须具有很高的精度与结构强度。最后,刀具必须具有很好的切削性能。



图1 整体硬质合金钻铤复合刀具结构图



图2 PCD钻铤复合刀具结构图

针对上述高精度、效率的飞机装配制孔的加工要求,飞机装配自动制孔刀具的设计原则主要体现在以下几方面。

#### (1) 自动制孔刀具的设计。

多种材料叠层结构加工刀具设计原则一般是以切削加工性能差的材料为加工对象来设计刀具的结构参数,同时,兼顾复合叠层结构中其他材料的切削加工特点适当地调整刀具的结构参数。

对于复合材料与钛合金叠层结构自动制孔刀具的材料选择以加工复合材料的刀具材料为主,同时兼顾钛合金材料加工的刀具材料;对于复合材料与铝合金叠层结构加工刀具的材料选择以加工复合材料的刀具材料为主,同时兼顾铝合金材料加工的刀具材料;对于钛合金与铝合金叠层结构加工刀具的材料选择以加工钛合金材料的刀具材料为主,同时兼顾铝合金材料加工的刀具材料;对于复合材料与钛合金及铝合金复合叠层结构加工刀具的材料选择以加工复合材料的刀具材料为主,同时兼顾钛合金和铝合金材料加工的刀具材料。

#### (2) 自动制孔刀具的制造。

· 硬质合金自动制孔刀具的刃

磨。

为了保证自动制孔刀具钻尖的强度,工作部分钻芯厚度较大,因而增加了钻孔的轴向力。因此,在钻尖必须做修薄横刃,这样可以提高钻尖的切削性能,从而也达到了减小钻孔的轴向切削力的目的。修薄横刃有多种形式,其中,具有螺旋面的修薄横刃(亦称螺旋面钻尖)是一种性能优于普通钻尖的新刃型,具有钻削过程自动定心、钻削力小等特点。为探索不同结构螺旋面刃型对减少硬质合金钻头加工碳纤维复合材料孔毛刺的可行性,同时也为后续的“碳纤维复合材料/铝合金”一体化制孔探索一条新路子。

· 硬质合金刀具切削刃表面涂层处理。

为了提高刀具的表面硬度、降低刀具加工过程切屑及被加工表面与刀具切削刃表面的摩擦力,一般对高速钢、整体硬质合金刀具的表面进行PVD、CVD以及金刚石涂层处理。

· 金刚石自动制孔刀具的刃磨。

金刚石自动制孔刀具主要采用传统的焊接和烧结技术的PCD刀具,烧结PCD刀具就是在硬质合金钻体中集成了PCD切削刃。烧结技术使得开发更多的金刚石钻尖刃形角度成为可能,采用传统的焊接PCD工艺就无法实现这一点。这样,无论在刚性差还是刚性好的工况下,都可以提供不同的优化钻尖设计来稳定加工出大量高品质的孔。

PCD刀具主要采用专用的设备对其切削刃进行刃磨,而且对高应力的集中区域经过精密研磨可以使钻头更能保持锋利性,并确保更长的刀具寿命。同时也能确保刀具在低钻削力下切削CFRP纤维,这样在复材层或金属层的孔出端,可保证最小化劈裂、分层和毛刺等缺陷风险。

(3) 自动制孔刀具的修磨技术要求。

为了提高刀具的总使用寿命以

及降低刀具的成本,一般需要对自动制孔刀具进行多次修磨,修磨的次数主要取决于刀具的材料及其结构、被加工材料组成及其结构。

自动制孔刀具修磨的关键是如何保证原有刀具的主要几何参数及其切削性能。一般来说,最好的修磨原则是“谁制造谁修磨”,这是因为各刀具厂家加工刀具的工艺方法及其工装工具不尽相同,因此,其他刀具制造厂家很难确定原制造厂家的工艺方法及其工装工具。如果不是原刀具制造厂家实施刀具修磨,那么,必须对钻尖以及螺旋槽的结构尺寸做精确的测量及其测量数据分析,最后,确定最佳的砂轮的结构参数以及修磨方法(包含最佳的数控修磨程序),最终实现保持原刀具切削性能的最佳修磨技术。

## 应用实例及验证

在碳纤维复合材料/钛合金/铝合金叠层结构的自动制孔的加工过程中,孔 $\phi 5\text{mm}$ 、铤孔的锥角为 $100^\circ$ ,应用了具有自主知识产权的整体硬质合金钻铤复合刀具(ZL201320338726.7)在自动制孔设备上完成了该项自动制孔的加工。实践证明,该项技术的研究成果完全满足飞机装配自动制孔需要。其加工性能以及质量和效率不低于国外同类产品,成本且远低于国外,因此,完全可以替代国外进口的同类产品,可以极大降低飞机装配自动制孔的刀具成本。

## 结束语

该项飞机装配自动制孔刀具技术研究成果不仅解决了飞机装配自动制孔质量差、效率低的问题,而且所研究的飞机装配自动制孔刀具及其切削加工参数,对高精度、高效率的飞机装配自动制孔的加工,具有一定的指导意义。

(责编 亿霖)