



# F-35 战斗机复合材料蒙皮的切削加工技术

Cutting Technology for F-35 Composites Skin

中国航空工业研究发展中心 陈亚莉



陈亚莉

中国航空工业发展研究中心研究员,长期从事航空材料的情报研究工作,曾获先进国防科技情报工作者等称号。

在美国国防部 2009 年初宣布决定 F-22 于 2010 年停产后,其后继机 F-35 大步走向台前,这种选择是不难理解的。原因之一是 F-35 的成本只有 8300 万美元,而 F-22 为 1.43

亿美元。而且 F-35 是由主承包商洛马公司与主合作伙伴诺格公司及 BAE 系统合作开发的,目前已进入系统开发及验证阶段,将生产、试验 19 架飞机。复合材料一直是其制造工作的重点。首架 F-35 已在 2006 年首飞,全部系统开发与验证(SDD)飞机或正在生产或在飞行线上试验,首批 14 架飞机已开始装配。

亿。而且 F-35 是主承包商洛·马公司与多国合作伙伴共担风险,从而可保证到 2036 年提交 3000 多架。除此之外,与 F-22 战斗机不同,F-35 除空中作战外,还可进行对地攻击,应用范围更广,可代替 F-16、A-10、AV8B 以及 F-18,还可以与 F-22 及 F-18E/F 搭配使用。另外从制造角度看 F-35 的 3 种机型有 20% 以上的机体结构是共同的,从而可以降低研制成本。

F-35 是由主承包商洛·马公司

与主合作伙伴诺格公司及 BAE 系统公司合作开发的,目前已进入系统开发及验证阶段,将生产、试验 19 架飞机。首架 F-35 已在 2006 年首飞,全部系统开发与验证(SDD)飞机或正在生产或在飞行线上试验,首批 14 架飞机已开始装配。其中,复合材料一直是其制造工作的重点。

## F-35 的制造难点

F-35 的制造难点是要符合预算,即对飞机的每一个零部件必须精



正确钻孔是F-35装配的首要条件

心计算以保证成本的优化,特别是碳纤维复合材料构件的制造,因为这种材料的结构占飞机重量的35%,飞机大部分外表面均由此种材料制成。而F-35的机身、机翼、尾翼分别由不同国家的供应商制造,最后在洛·马公司总装,因此F-35制造的最大难点是飞机复合材料蒙皮厚度的控制。F-35各阶段的生产因供应商、零部件复杂程度以及其要求各不相同。如ATK公司生产许多机翼蒙皮桁条时用的是自动纤维铺放工艺,而洛·马在制造前机身段蒙皮时用的是手工铺层。随着F-35进入生产,其他国家的一些供应商也逐步参与到复合材料蒙皮的制造中来,如意大利的阿莱尼亚公司、挪威的kongsberg防御系统公司、丹麦的ThermaA/S公司、土耳其的TAI公司,以便在复合材料制造上,充分利用全球化的优势。在这种情况下,洛·马公司的重点则放在复合材料蒙皮厚度的控制上。

复合材料蒙皮厚度的一致性对于F-35的重量、性能以及成本有着重要的影响。控制F-35复合材料蒙皮厚度的方法有2种:一是根据精细的计算对复合材料的铺层数进行加减;另一种方法是对零件进行切削加工。洛·马公司及其合作伙伴

采用了切削加工和模塑后增加铺层2种方法来确保蒙皮厚度达标。在洛·马公司,前机身蒙皮是在Invar35钢模具上用手工铺层并在热压罐中进行固化的。固化成层合板的铺层随后用切削加工法去除余量从而控制蒙皮的厚度。在ATK公司,机翼蒙皮是用纤维铺放法进行铺层并固化的,然后用洛·马公司的制造技术及生产工程人员开发的一种方法精确测量蒙皮的厚度。必要时,增加铺层,然后对整个结构进行第二次固化,该法称作固化层合板补偿法(CLC)。这样做的目的是控制厚度,是为成本达标采用的一种策略。

## 大型切削中心

在洛·马公司沃斯堡工厂的中心,就有一个体现这种策略的关键部门,这就是F-35的切削及钻孔中心。它是由德国DST公司建造的,负责F-35前机身蒙皮、机翼蒙皮以及其他复合材料工件的切削及钻削。复合材料蒙皮的修边及切削加工量很大。一些以往采用手工加工的工作,现在大多采用DST自动化系统进行加工。

前机身蒙皮的切削加工大约需持续8h,主要是每块蒙皮需要经过几次调整。机床在结构的两端工作,一端切削内模线以控制厚度,另一端对工件进行钻孔及边缘部分的修整。机翼蒙皮由洛·马进行切削时,花费的时间比机身蒙皮少,因为不用切削内模线来控制厚度。机翼零件用固化层合板补偿法来满足厚度参数。

在DST切削中心进行的大部分工作,采用的刀具是由AMAMCO工具公司提供的涂覆金刚石的碳化物刀具。AMAMCO公司为中心设计了DST仿形铣刀具。

卡尔蔡斯IMI公司的测量系统是世界上最大的高精度测量系统,主要用于蒙皮尺寸、边缘以及孔的精度检验。复合材料构件经切削加工后,

用该测量系统进行检测。从2008年6月开工以来,F-35的机翼蒙皮采用了MMZ-B Plus龙门式坐标测量机的5m×16m×2.5m测量包线,也用于风洞模型1:1的组件以及其他飞机机体零件的测量。

洛·马公司也用自己开发的无损检测激光超声检验系统来检验复合材料结构的孔洞及其他内部缺陷。将该系统400MHz的激光器对准复合材料结构时,从该激光器发出的信号返回到一传感器来显示蒙皮中的孔洞、裂纹、分层等缺陷。激光超声系统的运转速度为0.56m<sup>2</sup>/min,比传统的喷水超声系统快10倍,因此是F-35制造工艺不可缺少的一部分。

## 钻孔

复合材料蒙皮一经模塑、修边及检验,即可用螺栓穿过蒙皮连接到机体的预定位置上。F-35的研制人员对钻孔的管理和优化做了大量工作。对钻头的几何形状、工具效率、工具寿命、钻孔时间、每一钻孔的成本等参数的评估是F-35系统开发和验证过程的一部分。

洛·马公司制造工程高级经理称,F-35全机的切削加工图纸不足60张,而F-16有9000张。图纸的减少主要归功于对F-22及F-35实施的标准化。这种标准化涉及通用



自动钻孔系统

钻孔的尺寸、紧固件的减少以及复合材料与金属结构的装配方法。复合材料钻孔工艺的发展也是原因之一。

在 F-35 上评估了 3 种类型的钻孔,即手工钻孔、电动钻孔以及自动化(数控)钻孔。洛·马公司采用的大部分是自动化钻孔。在大多数情况下, F-35 的钻孔法为垛式钻孔,即将复合材料蒙皮放在支承结构上,穿



AMAMCO公司用于F-35复合材料  
零部件加工的碳化钨钻头

过蒙皮和支承结构进行钻孔。用单一的钻头进行钻孔、铰孔以及进一步埋头铆接而成。F-35 钻孔中引人注目的是前机身,机身每一边用自动化龙门式钻头钻出 750 个孔。

蒙皮的支承结构对蒙皮提供支撑,有助于防止分层。这种方法的缺点是钻孔的时间长。蒙皮和支承结构如果单独钻孔,装配过程可加快。不过精度要求两者垛起来钻孔。特别是当零部件在洛·马公司以外制造而在洛·马公司装配时,这一问题尤其具有挑战性。随着紧固件与孔间隙的减小,很有可能在配合上出现两者的干涉。

机翼蒙皮是与支承结构堆迭起来,用辛辛那提公司的龙门式系统进行钻孔的。随后 F-35 的团队用

Virtek Vision 国际公司生产的激光投影系统将紧固件号码投影到蒙皮表面上,而无需查找复杂的图纸即可进行紧固件的安放。当不能自动化钻孔时,可用样板进行人工钻孔。采用投影系统可以大大减少工时和工作量。

### 刀具更换 门槛值的跟踪

将蒙皮与支承结构堆迭起来进行钻孔的决策一经敲定,洛·马公司的重点就放在钻孔质量以及刀具寿命测定参数的开发上。主要用以评估刀具磨损寿命以及随后降低钻削速度,以达到降低新的、速度更快的刀具成本的目的。洛·马公司用的大部分钻头采用的马达为气动和液压式。刀具的尖锐角决定钻削速度的大小。随着刀具变钝,切削时间加长。进给系统可测定钻孔时间的长短。当达到门槛值时,指示灯立即指示工人更换刀具。洛·马公司正在寻求合适的直径公差以及特殊的工艺过程控制,从而消灭不合格孔的出现。F-35 钻孔质量 Cpk (过程能力指数)的目标是达到 1.3,而目前为 1.0,正在改进中。

所有的修边、切削系统以及钻孔工艺正在进行效率、成本、质量等因素的评估以便确定整个 F-35 复合



AMAMCO新型金刚石涂层刀具

材料生产的最佳工艺。洛·马公司已在沃斯堡建立一个钻削/切削卓越中心继续对刀具及工艺进行开发。随着 F-35 寿命的加长,洛·马公司及其供应商还有几十年对复合材料的优化和管理时间。

### 刀具的几何形状 及参数验证

洛·马公司首次在大西洋工业切削中心评估 F-35 仿形铣及钻孔刀具时用的是带有金刚石嵌片的多晶金刚石铣刀(PCD),这种刀具具有直出的屑槽,使复合材料结构中产生许多分层,从而返工导致刀具成本增加。刀具缺乏所需的耐用性,一块 9.5mm 厚度的机翼蒙皮一般需用 24 把仿形铣刀。

洛·马公司向国家防御制造及切削中心(NCDM)寻求优化制造方法。洛·马公司最终采用了 NCDM 的成员 AMAMCO 工具公司提供的涂覆金刚石涂层的仿形铣刀,并在大西洋工业切削中心对工具进行了验证。试验结果令人满意,整块蒙皮切削所需刀具由 24 把降到了 2 把,一把刀具切削复合材料的长度由 2.7m 增加到 17.4m。该刀具成功的关键是采用了 2 个反向出屑槽设计,出屑槽将复合材料层夹在一起而不是在同一方向拉开,这可产生纯剪切的效果。

AMAMCO 公司开发了刀具的几何形状并进行了制造。金刚石涂覆层厚 12 $\mu$ m,由金刚石工具涂层 LLC 公司提供。AMAMCO 公司提供的金刚石工具也用于 F-35 的钻削,其有效寿命达 1200 个孔,而多晶金刚石钻头的寿命为 275 孔,且后者的钻孔深度只是前者的 1/3。虽然洛·马公司报道金刚石涂覆刀具的运行速度为 8500r/min,而多晶金刚石的为 500r/min,但总的来说,前者的转动较慢,但进给较快。洛·马正在评估一系列 AMAMCO 公司的刀具,包括直径 3.2~10.1mm。 (责编 岩石)