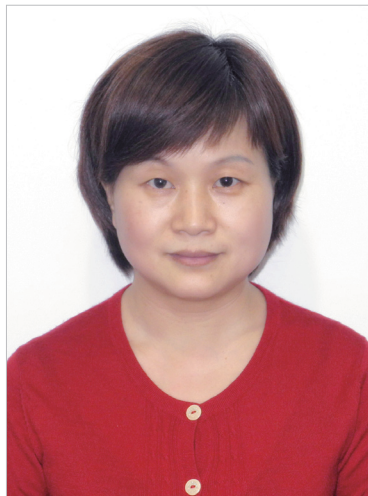


航空发动机整体叶盘制造技术 国内外发展概述

Development Overview of Aeroengine Integral Blisk and Its Manufacturing Technology at Home and Abroad

中航工业北京航空制造工程研究所 张海艳 张连锋



张海艳

工程师, 现任北京航空制造工程研究所科技发展部主管, 主要从事航空科研项目管理工作。

整体叶盘是把发动机转子的叶片和轮盘设计成一个整体, 采用整体加工或焊接(叶片和轮盘材料可以不

整体叶盘(环)已经作为新型航空发动机的重大改进部件, 不仅应用于在研型号, 而且还将在未来高推重比发动机上广泛应用。整体叶盘的制造将更依赖于数控机床的发展、依赖于线性摩擦焊技术及装备的发展以及电解加工技术的发展, 真正实现优质、高效、低成本制造。

同)方法制造而成, 无需加工榫头和榫槽。这种整体结构的优点是: 叶盘的轮缘径向高度、厚度和叶片原榫头部位尺寸均可大大减小, 减重效果明显; 发动机转子部件的结构大为简化; 消除了分体结构榫齿根部缝隙中气体的逸流损失; 避免了叶片和轮盘装配不当造成的微动磨损、裂纹以及锁片损坏带来的故障, 从而有利于提高发动机工作效率, 可靠性得以进一步提升。

自 20 世纪 80 年代中期, 西方发达国家在新型航空发动机设计中采用整体叶盘结构作为最新的结构和气动布局形式, 它代表了第四代、第五代高推重比航空发动机技术的发展方向, 已成为高推重比发动机的必选结构。

整体叶盘结构主要用于风扇及高压压气机部分。制造整体叶盘用的材料, 主要有钛合金和镍基合金。钛合金材料主要用于风扇及高压压

气机的前几级盘,而高压压气机后几级盘则多采用镍基高温合金。

数控铣削(HSC)、线性摩擦焊(LFW)和电解加工(ECM)是整体叶盘制造的三大技术。

国外整体叶盘制造技术发展现状

国外许多新一代发动机中整体叶盘已得到广泛应用^[1](见表1)。

表1 20世纪80年代后西方军用和民用飞机采用整体叶盘状况

发动机型号	军、民用	采用整体叶盘的级
EJ200	军	1~3级风扇,高压压气机
F414-GE-40	军	2~3级风扇,1~3级高压压气机
F110-GE-129R	军	1~3级风扇
F100-PW-229A	军	2~3级风扇
F119-PW-100	军	所有风扇及高压压气机
GESFAR 试验风扇	军	1级风扇
BR715	民	2级增压压气机
P.A.T 验证核心机	民	8,9级高压压气机

国外著名的航空发动机制造公司(MTU)预测:在21世纪,随着新材料、新结构的应用水平提高,未来各种航空发动机的风扇、压气机及涡轮将全面采用整体叶盘结构。

1 数控铣削(HSC)整体叶盘

整体叶盘数控加工工艺主要有两种,五坐标数控加工实体坯料成形工艺和叶片先焊接到盘上再进行数控机械加工去除焊缝的多余材料工艺。

美国GE和普惠公司、英国罗·罗公司等均采用五坐标数控加工技术开展了整体叶盘研制^[2],充分利用数控加工具有的快速反应和可靠性高的特点,保证了整体叶盘型面精度。但采用该方法从整体叶盘毛坯到叶盘零件的制造过程中,材料切除率超过90%,材料利用率较低,且综合技术难度非常大。

Delcam和600 Centre公司开发了新型整体叶盘生产方法^[3],使型面和孔加工一次完成。叶型加工采用通常的五坐标机械加工方法。在

一台配有主轴转速为24000r/min的Fanuc Robodrill T2liE机床上,配有PowerMILL CAM系统,并有Nikken130装置提供第4和第5个坐标移动。

Teleflex Aerospace采用铣切加电加工组合方案,先用电化学加工叶片,再用铣切方法加工轮毂。为了提高效率,他们利用CAM软件,产生粗加工和精加工联合路径,从而取消

了手工抛光,大大节约成本提高了效率。在加工过程中,他们还采用专利技术避免加工干涉。

2 线性摩擦焊(LFW)整体叶盘

线性摩擦焊属于固相焊接方法,焊缝是致密的锻造组织,接头性能优异,工艺适应性强,可焊接材料面广,其最大的优势可实现特殊结构(如空心叶片整体叶盘结构)、异种材料的焊接;焊接过程无电弧、射线辐射等污染,是一种高效、节能、环保的绿色焊接技术。

采用线性摩擦焊加工整体叶盘与用其他加工方法相比具有突出的经济效益,受到了西方发达国家的青睐。对于线性摩擦焊技术,西方各个大的发动机公司早在20世纪80年代就开始线性摩擦焊制造技术及整体叶盘结构制造相关的试验研究工作。

线性摩擦焊技术最早出现于英国1969年专利,20世纪80年代英国剑桥焊接研究所研制的线性摩擦焊机,可焊接方形、圆形、多边形等不

规则截面的金属和塑料构件。罗·罗和MTU等公司推动和发展了这种新设备和新技术,2000年开始用于EJ200和F119等发动机部分整体叶盘的制造。

自1988年开始实施的美国综合高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)到2005年已基本完成,历经18年,耗资约60亿美元,研究内容涉及线性摩擦焊工艺装备、接头性能和基础研究,完成了整体叶盘的综合验证、带整体叶盘转子的两级前掠风扇的修理研究等,其成果已应用到许多军民用发动机的新型号研制和现有型号的改进改型上。

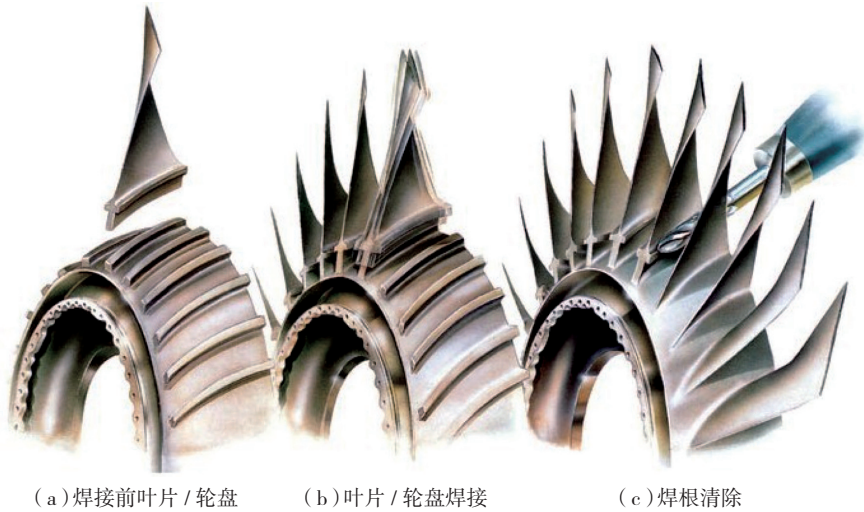
MTU等公司还利用线性摩擦焊技术进行了17-4PH、Ti-6Al-4V、 γ -TiAl模拟叶片和轮盘的焊接。

欧盟耗资近400万欧元,于2006年完成了双性能钛合金线性摩擦焊整体叶盘研制的DUTIFRISK计划,利用线性摩擦焊加工出异种钛合金的双组织、双性能整体叶盘,使得轮盘和叶片都能选用最佳使用状态的材料,从而保证最佳性能。

国外线性摩擦焊接技术已相当成熟,用于制造整体叶盘的配套技术也日趋完善,叶盘焊接后组合精加工余量很小,如图1所示。先将叶片夹紧在专用夹具上,并使叶片和轮盘的位置对齐,然后将叶片沿特定方向高速振动,在叶片和轮盘叶根接触面产生一个很窄的摩擦加热区,当加热区的温度达到要求的温度时即停止振动,在叶片与轮盘施加顶锻力使其焊接在一起,最后通过数控清根设备将焊后的飞边和装夹凸台去除,并将焊接接头部位加工成适合的叶型^[4]。

罗·罗公司和MTU公司已用线性摩擦焊技术成功制造了宽弦空心风扇叶片整体叶盘,将为JSF的发动机提供LFW焊接的整体叶盘(图2所示)。

可以看出,西方发达国家在线性摩擦焊工艺技术的研究及专用设备



(a)焊接前叶片 / 轮盘 (b)叶片 / 轮盘焊接 (c)焊根清除

图1 整体叶盘线性摩擦焊主要工艺过程

的研制方面都已经达到工程化应用水平,而且已在先进发动机型号研制中得到成功应用。

3 电解加工 (ECM) 整体叶盘

精密振动电解加工应用于高温合金整体盘的精密高效加工,与数控铣削方法相比有着效率高(工时可减少 50% 以上)、加工高强度 / 高硬度材料时电极(刀具)无损耗、加工薄型结构无残余应力和变形的优势。

电解加工优质、高效的技术特点在批量研制中十分突出。美、德、荷、日等国家十分重视电解加工在整体结构中的作用,不间断地进行系统研究(见表 2)。

美国 GE 早在 20 世纪 80 年代末就采用数控电解加工了 T700 的钢制整体叶盘、F22 的 GE37/YF120 发动机的钛制整体叶盘及 F414 发动机的高温合金整体叶盘。与数控铣削

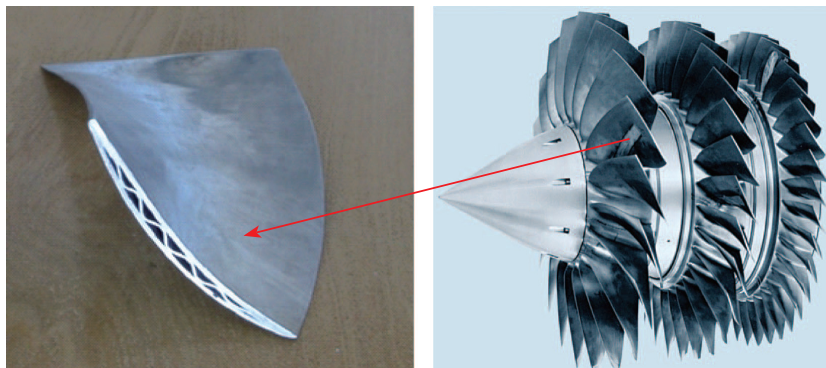


图2 宽弦空心风扇叶片整体叶盘外观图

表2 国外整体结构电解加工相关技术

国别	主要技术	技术水平
美国	五轴数控电解加工技术 高速大余量去除电接触加工技术	大型整体叶盘的加工 叶型需要后续抛光
德国	同时具备高速铣削、电解加工和线性摩擦焊技术	EJ200 发动机各级整体叶盘加工
荷兰	高精度电解加工生产线微细电解加工	F136 发动机整体叶盘低成本高效研制生产一体化计划
日本	大型电解加工设备	成套大型设备

加工方法相比,电解加工的加工时间减少了 50%~85%。在整体叶盘叶栅高效去除加工技术上,GE 公司采用了效率更高的多轴数控电接触加工方式,采用成形或近成形阴极进行多坐标数控送进运动实现加工,加工出的叶片叶型仍留有一定余量,该技术已在中国申报了专利。

美国 Teleflex · Aerospace 公司是支持商务与军用飞机的公司。该公司实现了密集叶栅整体叶盘等结构的五坐标数控电解加工,并具备了成熟的表面抛光等相关技术。其生产线专门为 GE、罗·罗和普惠等大公司电解加工航空整体叶盘等复杂结构件。

荷兰 Philips Aerospace 公司宣布将采用电解加工直径达 1.1m 的整体叶盘,该盘将用于联合攻击机(JSF)项目的 F136 发动机中。据报道,JSF 项目把制造成本放在首位,从研制阶段到批量生产阶段,电解加工成为其首选。

德国 MTU 公司 2000 年后首次成功应用精密振动电解加工技术加工 EJ200 高温合金整体叶盘(图 3),叶盘直径为 $\phi 650\text{mm}$,电解加工后叶型达到了最终精度,不需要进行后续修整。MTU 研制出了世界上第一台专用于加工整体叶盘的精密振动电解加工设备,在该设备上,集成了具备世界领先水平的振动进给匹配技术、短路保护技术以及精密过滤技术。

电解加工精度一旦可以满足整体叶盘加工要求后,结合其无可比拟的高效率,将会在难加工材料整体结构制造中占据重要的地位。美国航空宇航制造公司(GKN)预测:未来 5~6 年内电解加工整体叶盘的市场将增长 400%。

国内整体叶盘制造技术发展现状

1 数控铣削 (HSC) 整体叶盘



图3 MTU多轴精密振动电解加工设备及EJ200压气机高温合金整体叶盘

在国内,北京航空制造工程研究所、西北工业大学、中国燃气涡轮院、中航工业430厂都开展了数控铣削(HSC)整体叶盘研究工作,取得了相应的研究成果。

西北工业大学提出了一种整体叶盘复合制造工艺方案及五坐标数控加工关键技术,包括叶盘通道分析与加工区域划分,最佳刀轴方向的确定与光顺处理,通道的高效粗加工技术,型面的精确加工技术,加工变形处理和叶片与刀具减振技术等^[5]。

中国燃气涡轮院针对五坐标加工中心加工整体叶盘叶片表面质量差的问题,提出了一套利用UG软件自身功能光顺曲线和曲面的方法,使造型曲面的光顺度得到大幅度提高,从整体叶盘数控加工工艺源头上保证了加工质量。

西北工业大学、中航工业430厂等单位在数控加工整体叶盘相关软件和加工关键技术方面也开展了大量的研究工作。西工大开发出了“叶轮类零件多坐标NC编程专用软件系统”,该系统集测量数据预处理、曲面建模、曲面消隐、刀位计算、刀位验证及后置处理于一体,已在20多种叶轮叶盘的研制和生产中得到应用^[6]。

北京航空制造工程研究所利用通用软件、通用设备对小扭转角叶片整体叶盘的盘体、叶片、根部过渡区的数控加工工艺、设计和数控程序进行了研究。

2 线性摩擦焊(LFW)整体叶盘

国内只有北京航空制造工程研

究所和西北工业大学对线性摩擦焊技术开展了研究工作。北京航空制造工程研究所自90年代末期着手开展线性摩擦焊技术及装备探索性研究,针对航空常用钛合金材料(TC4、TC17、TC11等)、高温合金、低碳钢、不锈钢等材料开展了同质、异质材料线性摩擦焊工艺研究,进行了线性摩擦焊微观连接机理研究,对线性摩擦焊接头进行了组织及性能测试分析,同时开展了线性摩擦焊过程的数值模拟等方面的研究,在线性摩擦焊工艺技术及设备研制方面,都积累了丰富的经验。为整体叶盘结构线性摩擦焊制造技术研究奠定了很好的硬件条件。

西工大在小吨位的设备上(机械式)对线性摩擦焊接头的性能和组织进行了分析,并采用热力耦合有限元方法,建立了线性摩擦焊过程三维有限元计算模型,分析了摩擦焊过程中的不同产热机制及转化规律。

3 电解加工(ECM)整体叶盘

北京航空制造工程研究所在大型电解加工设备和脉冲电解加工新技术方面有深入研究,脉冲电解加工技术已从初步探索逐渐走向工程应用,已实现压气机超薄弯扭叶片的从方料一次成形到叶身尺寸,达到了近无余量加工的水平。另外,在整体叶盘振动电解加工技术方面也开展了探索性研究。

南京航空航天大学采用数控展成电解加工方法,实现了各种难切削金属材料的复杂构件、薄壁件的加

工,加工柔性好、工具阴极无损耗,但这种方法还仅限于可展直纹曲面的加工。另外,南航在精密电解加工技术领域也开展了长期深入系统的研究工作,研制了多台精密电解加工专用设备,开展了精密电解加工工具阴极设计、电场流场仿真与控制、高频及窄脉冲电解加工和加工过程检测与控制等研究工作。在国内首次实现了叶片电解精加工,不再需要后续人工精修,保证了产品质量并降低了劳动成本。

结束语

航空发动机部件正朝着整体化、轻量化方向发展。美国国防部的IHPTET计划指出,到2020年,战斗机上发动机的涡轮都将采用整体叶盘结构,由此可见,整体叶盘(环)已经作为新型航空发动机的重大改进部件,不仅应用于在研型号,而且还将在未来高推重比发动机上广泛应用。

整体叶盘的制造将更依赖于数控机床的发展、依赖于线性摩擦焊技术及装备的发展以及电解加工技术的发展,真正实现优质、高效、低成本制造。

参考文献

- [1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术. 航空制造技术, 2006(4): 94-100.
- [2] Lo C C. Efficient cutter path planning for five axis surfacemachining with half flat end cutter. Computer Aided Design, 1999, 31(9): 557-566.
- [3] Brett Hopkins, Delcam Modern Machine Shop, 1/9/2007, Follow Your Blisk Novel blisk manufacturing method.
- [4] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11): 56-58.
- [5] 任学军, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究, 航空学报, 2004(2): 205-208.
- [6] 刘雄伟, 张定华. 数控加工理论与编程技术. 北京: 机械工业出版社, 2000.

(责编 亿霖)