

# 整体叶盘制造工艺技术综述

## Blisk Disc Manufacturing Process Technology

西北工业大学 史耀耀 段继豪 张军锋 董 婷



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项, 发表学术论文 30 余篇, 获国家发明专利 3 项, 获国家、省部级奖励 5 项, 入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

随着整体叶盘在航空发动机上的广泛应用, 未来高推重比、涵道比发动机使整体叶盘结构更加复杂, 优异的 SiC 或 C/C 复合材料等在整体叶盘上的应用, 对整体叶盘制造技术提出了更高的挑战, 各国都投入大量的人力、物力对整体叶盘制造技术进行研究, 寻求低成本、低污染、高效率、高质量的复合制造技术, 以满足航空发动机对整体叶盘的需求。

整体叶盘是为了满足高性能航空发动机而设计的新型结构件, 结构模型如图 1 所示, 其将发动机转子叶片和轮盘形成一体, 省去了传统连接中的榫头、榫槽及锁紧装置等, 减少结构重量及零件数量, 避免榫头气流损失, 提高气动效率, 使发动机结构大为简化, 现已在各国军用和民用航空发动机上得到广泛应用, 如 EJ200、F119、F414 等军用发动机, 法国 SNECMA 公司生产的 P.A.T 验证核心机以及美国 P&W 公司生产的基准发动机等民用大流量比发动机。

与整体叶盘诸多优点相对应, 其制造工艺技术面临着非常严峻的挑战。由于其结构复杂, 通道开敞性差,



图1 整体叶盘结构件

加工精度要求高,叶片型面为空间自由曲面,导致对其制造技术要求极高,而且其工作条件多为高温、高压、高转速、气流交变等恶劣环境中,故整体叶盘广泛采用钛合金、高温合金等高性能金属材料 and 钛基、钛铝化合物等先进复合材料,材料的可加工性差,也使整体叶盘的综合制造工艺技术成为世界性难题。

## 整体叶盘制造技术

目前国外整体叶盘制造技术主要有:焊接工艺技术、铣削加工技术、精锻制造技术、电解加工技术等,采用的工艺流程为:精密锻造+数控加工;精密焊接+数控加工;高温合金精铸毛坯+热等静压处理。其制造工艺技术的主要应用如表1所示<sup>[1]</sup>。美、英、俄等发达国家在整体叶盘制造领域处于领先地位,且其具有先进的铣削装备、焊接工艺装备等。

表1 国外整体叶盘制造技术

生产产家	发动机型号	整体叶盘应用	制造技术
欧洲喷气涡轮公司	EJ200军用发动机	第3级风扇、	电子束焊接
		3级低压压气机	线性摩擦焊
英国R·R公司	RB715民用发动机	压气机1、2级钛合金盘	整体铣削
美国GE公司	F414军用发动机	第2~3级风扇叶盘	焊接
		高压压气机第1、2级钛合金盘	整体铣削
		高压压气机第3级高温合金盘	电解加工
美国P·W公司	F119军用发动机	2~3级风扇叶盘、6级高压压气机盘	线性摩擦焊
		3~6级双性能高温合金盘	扩散连接
美国洛克西德·马丁公司	JSF攻击机	宽弦风扇叶盘	线性摩擦焊、整体铣削

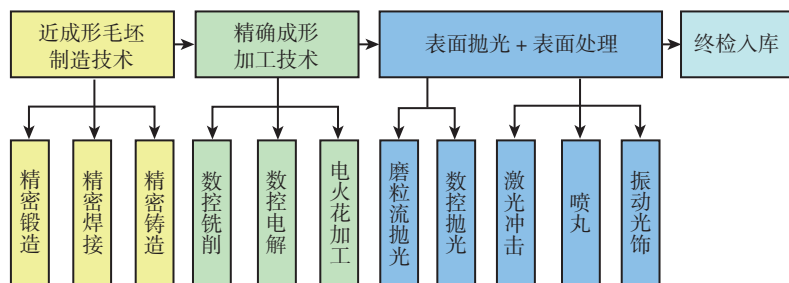


图2 整体叶盘制造工艺流程及关键技术

近年来,国内对航空发动机整体叶盘制造技术的研究达到一定高度,已实现整体叶盘的完整制造,通过对整体叶盘结构及制造工艺需求分析,国内采用复合制造工艺,主要划分为:近成形毛坯制造、精确成形加工、表面抛光、表面处理等过程,每个工艺阶段又划出多种工艺技术,诸多工艺技术经过复合形成各种不同的整体叶盘制造工艺流程<sup>[2]</sup>,同时,其中一些技术国内尚处于研究发展阶段,其工艺流程及关键技术如图2所示。

## 近成形制坯技术

整体叶盘精密制坯技术正在向近成形方向发展,近成形技术已成为材料加工领域的一项重要技术,具有成本低、操作灵活及进入市场周期短等特点,解决整体叶盘制造中的关键制造技术,从而提高生产效率,实现节材、节能目标。在整体叶盘制造中

的近成形制坯技术主要包括:精密锻造技术、精密铸造技术、电子束焊接技术、线性摩擦焊接技术等。

### 1 精密锻造技术

目前,整体叶盘多采用精密锻造工艺作为制坯手段,该技术不仅可以节省贵重金属材料,减少难加工材料的机械加工量,而且提高整体叶盘的疲劳强度和使用寿命。现代精密锻造技术在整体叶盘近成形过程中,对整体叶盘锻件进行精密设计,叶片和轮盘部分留有较小的余量,既要保证足够的变形量,又要保证叶片的成形。等温锻造技术与超塑等温模锻技术的应用为高温合金和钛合金压气机盘的制坯过程提供了保证,获得优异的组织 and 力学性能。

美国GE公司应用等温锻造技术制造出带叶片的压气机整体叶盘转子<sup>[1]</sup>,材料利用率提高4倍。精密锻造零件的尺寸精度可以达到0.1~0.25mm,表面粗糙度达到0.4~1.6 $\mu\text{m}$ 。国内宝山钢铁股份有限公司对钛合金整体叶盘等温锻造技术进行了深入研究,并对锻件图的简化、精化、模具、成形等进行设计,对钛合金整体叶盘进行成形试验,锻压结果显示,锻件各部位未发生折叠及其他缺陷,成形良好<sup>[3]</sup>。

### 2 精密铸造技术

由于精密铸造工艺及铸造数值模拟软件技术的新发展,特别是金属材料定向凝固和热等静压理论的深入研究,在改善铸造合金组织和性能、预测铸造尺寸变形、铸造缺陷、优化铸造工艺方面发挥越来越大的作用,不仅使得铸造合金组织和性能得到大大改善,也解决了叶片表面疲劳裂纹沿垂直于叶片主应力方向的晶粒边界发生的问题,提高了叶片抗疲劳特性、减少表面裂纹。

20世纪70年代,美国广泛开展具有定向叶片和等轴细晶轮毂的整体叶盘铸造工艺研究,成功实现基于Mar2M247、CM681定向合金材料的双

性能整体叶盘铸造技术,即整体叶盘的叶片为定向柱晶,轮盘为等轴晶<sup>[4]</sup>。

我国航空材料研究院对整体叶盘的精密铸造技术进行了深入研究,分析双性能合金材料的选择、整体叶盘组织的形成方法、控制措施和浇注工艺参数以及热处理对整体叶盘力学性能的影响,为铸造工艺设计特殊装置,使叶片凝固过程中获得径向温度梯度,并且通过不同的试验方案,成功铸造出直径 120mm,带有 34 个叶片的涡轮整体叶盘,如图 3 所示<sup>[5]</sup>。

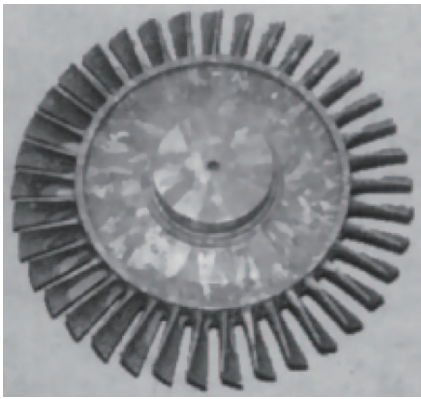


图3 整体叶盘铸造样件

### 3 电子束焊接技术

电子束焊是通过加速和聚焦的电子束,轰击置于真空或非真空中的焊件,利用所产生的热能进行焊接的方法。电子束焊接容易实现金属材料的深熔透焊接,具有焊缝窄、深宽比大、焊缝热影响区小、焊接工艺参数容易精确控制、重复性和稳定性好等优点,且其具有自动焊缝跟踪、速流偏转、多熔池焊接等技术优势,使其广泛应用于航空航天等行业<sup>[6-9]</sup>。

由于电子束焊发展较早,技术相对成熟,最先用于整体叶盘的制造过程中,据相关资料显示 EJ200 第三级风扇叶盘是最早通过电子束焊技术成形的整体叶盘,先将单个叶片用电子束焊接成叶片环,然后用电子束焊接技术将锻造和电解加工成形的轮盘腹板与叶片环焊接成整体叶盘结构。

国内对整体叶盘电子束焊接工艺主要应用于钛合金材料整体叶盘,诸多研究机构对整体叶盘电子束焊接进行大量研究试验。中航工业沈阳黎明航空发动机有限责任公司技术中心对 TC4 整体叶盘电子束焊接工艺中的变形控制方法进行大量研究,提出了综合应用焊接工艺优化、刚性固定、真空热处理和电子束局部加热相结合的变形控制方法,并通过相关试验有效地控制了焊接变形,实现了电子束焊接整体叶盘结构的制造<sup>[10]</sup>。

电子束焊接整体叶盘技术由于其较高的稳定性,在国内整体叶盘制造领域已得到广泛应用,而其局限性在于只适用于钛合金叶盘的焊接工艺,对高温合金整体叶盘焊接存在较大的技术缺陷,尚需要进行更为深入的研究。

### 4 线性摩擦焊接技术

线性摩擦焊是一种固相焊接技术,在焊接压力  $P_f$  作用下,其中一个焊件相对另一个焊件沿直线方向以一定的振幅  $A$  和频率  $f$  作直线往复运动,发生摩擦粘结对并产生摩擦热,摩擦界面温度上升,当摩擦表面达到粘塑性状态时,在压力的作用下焊合区金属发生塑性流动形成飞边,当摩擦焊接区的温度和变形达到一定程度后,焊件对齐并施加顶锻压力  $P_u$ ,焊合区金属通过相互扩散与再结晶使金属焊为一体,完成整个焊接过程,其工艺过程如图 4 所示,主要包括以下 5 个工艺过程:初始摩擦阶段、不稳定摩擦阶段、稳定摩擦阶段、停

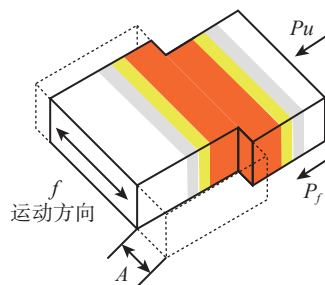


图4 线性摩擦焊原理示意图

振阶段、顶锻维持阶段<sup>[11-13]</sup>。

线性摩擦焊技术在整体叶盘制造中的技术优势在于<sup>[12]</sup>:

(1) 加工效率高,材料损耗小。线性摩擦焊相比于数控铣削,可以节省大量的贵金属,提高金属利用率;焊接过程中完全自动化,人为参与因素很小,焊接控制参数如压力、时间、频率和振幅等参数控制简单,故其可靠性高,且使加工时间大幅降低,效率明显提高。

(2) 焊接质量高,焊接过程中不产生与熔化和凝固冶金有关的一些焊接缺陷和焊接脆化现象,由于加热时间短,热影响区窄,组织无明显粗化。在焊接铝、钛合金材料中,更能体现其优越性。

(3) 线性摩擦焊可以焊接 2 种不同的材料,因此,可根据整体叶盘需要,为进一步减轻重量,提高推重比,选用合适的材料进行焊接加工。同时,线性摩擦焊对单个叶片可以进行修复工作,显著提高整体叶盘应用率,降低其成本。

由于线性摩擦焊独特的工艺特点,在整体叶盘制造技术领域,已逐渐取代电子束焊接,如 EJ200 发动机整体叶盘在 1994 年开始利用线性摩擦焊取代原电子束焊接技术。英国 R·R 公司已采用线性摩擦焊技术制造出宽弦风扇整体叶盘<sup>[11,14]</sup>。

国内中航工业北京航空制造工程研究所与西北工业大学对整体叶盘线性摩擦焊技术进行大量研究,北京航空制造工程研究所对其工艺过程各个阶段进行分析,包括工艺过程中的飞边形貌、接头组织、拉伸性能及力学性能等,从而获得影响焊接件质量的工艺参数,为整体叶盘线性摩擦焊技术提供大量理论依据<sup>[13]</sup>。西北工业大学自主研发整体叶盘线性摩擦焊装备,对线性摩擦焊机施力系统模糊 PID 控制方法进行研究,制定模糊控制算法规则,确定各规则参数,从而建立线性摩擦焊机施力闭环

控制系统,此外,还对夹具系统弹性变形对焊接过程的影响进行分析,通过建立线性摩擦焊接过程的动力学理论模型,研究了固定夹具的弹性振动对线性摩擦焊机振动系统驱动力、机械功率及产热功率的影响,从而为线性摩擦焊装备设计提供可靠依据<sup>[15-16]</sup>。

总之,我国对线性摩擦焊技术的研究尚浅,对其机理研究,产热变热、变形流动、组织转变等技术仍需投入大量研究,在21世纪,线性摩擦焊技术将继续飞速发展,应用于战斗机发动机整体叶盘、空心叶片叶盘等的制造。

### 精确成形加工技术

国内在整体叶盘制造领域的精确成形加工技术主要包括:数控铣削加工技术、数控电解加工技术以及电火花加工技术等。由于其存在不同的技术局限性,各工艺技术向着高效、低耗、低成本方向发展。

#### 1 多轴联动数控铣削技术

五轴联动数控铣削加工由于其具有快速反应性、可靠性高、加工柔性好及生产准备周期短等优点,在整体叶盘制造领域得到广泛的应用。美国GE和P·W公司、英国R·R公司等,多采用五坐标数控铣削加工整体叶盘。

国内西北工业大学于1991年起对整体叶盘制造技术进行研究,突破多项关键技术,开发了“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,经过多年的分析研究,完成了整体叶盘数字化精密制造技术关键工艺,采用侧铣与插铣复合高效铣加工,完成叶盘的粗精加工,进行刀位点计算及加工轨迹优化,直纹面拟合等多项技术创新,此外,其自主研发高效盘铣-插铣复合铣削中心,对提高整体叶盘铣削效率有着重大意义<sup>[2,17-19]</sup>,其主要铣削加工方

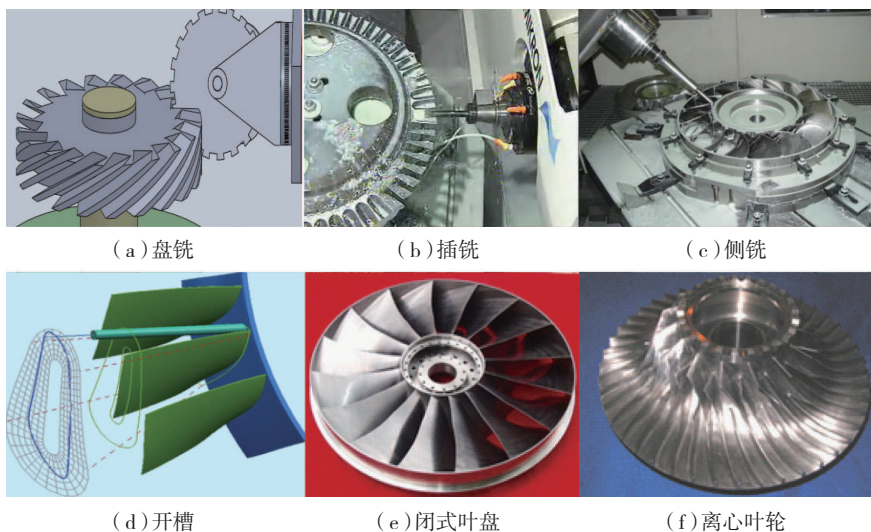


图5 整体叶盘数控铣削方法及样件

法及加工样件如图5所示。

#### 2 电解加工技术

电解加工是基于电化学阳极溶解的原理来去除金属材料的加工方法,其技术的先进性(计算机控制加工过程),能很好地保证加工精度与质量,提高加工稳定性,减少生产准备时间,降低劳动强度,是优质、高效、低成本、快速响应地解决整体叶盘加工难题的技术途径之一<sup>[20]</sup>。

数控电解加工技术综合了计算机数控和电解加工两者技术特点,工具阴极无损耗,无宏观切削力,适宜加工薄叶片、狭窄通道的整体叶盘,且其以数控技术实现型面的创成运动,加工范围广。因此,该工艺技术适合于加工小直径、多叶片、小叶间通道(1.5~3mm宽度)及变截面扭曲叶片的整体叶盘。

美国、英国等发达国家对整体叶盘数控电解加工技术进行深入研究并得到应用,美国GE公司以五轴数控电解加工方法,对先进发动机整体叶盘加工,其粗加工、半精加工、精加工工艺都采用电解加工方法,加工出的叶型厚度公差为0.10mm,型面公差为0.10mm<sup>[21]</sup>。在带冠整体叶盘的

加工中,俄罗斯采用机械仿形电火花与电解加工组合工艺<sup>[22]</sup>,电解加工技术既提高了加工效率,又去除了电火花加工后的表面变质层,提高表面质量。

国内对整体叶盘数控电解加工技术的研究尚浅,南京航空航天大学从80年代中期开始对其进行研究,提出了“直线刃”阴极数控展成电解加工和成形或近成形阴极柔性电解加工方法,以简单的直线刃阴极进行数控展成运动,基于电化学阳极溶解原理而实现整体叶盘叶间槽与叶片型面的成形加工,如图6所示<sup>[23]</sup>。由于数控电解加工需采用多轴数控电解机床,对数控技术水平要求高,电解成形规律掌握较困难,目前正处于研究阶段,其有望解决数控铣削无法实现的整体叶盘加工。

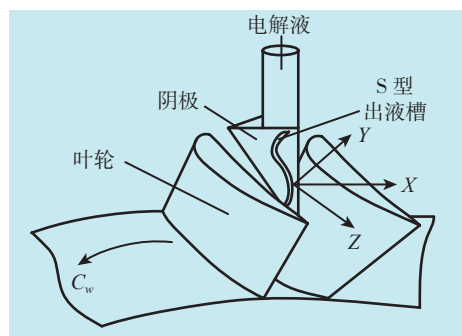


图6 直线刃阴极数控电解加工过程

### 3 电火花加工技术

电火花加工是通过浸在工作液中的两极间脉冲放电时产生的电蚀作用,来达到蚀除导电材料目的的一种特种加工方法。在整体叶盘加工过程中,与数控电解加工以及数控铣削加工技术相比,电火花加工技术存在以下技术优势:

(1) 加工范围广泛,可以对传统难切削材料,如高温合金、硬质合金、钛合金等进行加工。

(2) 对于结构复杂、通道狭窄的整体叶盘件加工存在明显优势,可以完成复杂的进给运动,有效避免电极与工件之间的干涉问题。

(3) 加工中不存在宏观切削力,电极与工件均不会产生宏观变形,同时,不产生毛刺和刀痕沟纹等缺陷。

由于上述诸多优点,电火花加工在带冠整体叶盘加工中得到广泛应用。上海交通大学对涡轮整体叶盘电火花加工技术深入研究,开发出专用 CAD/CAM 软件,可以完成涡轮整体叶盘造型、电极 CAD/CAM、工具点击轨迹搜索等功能,且对涡轮叶盘进行电火花加工获得较高型面精度的整体叶盘<sup>[24]</sup>。

### 表面抛光及表面处理技术

整体叶盘经过近成形及精确成形加工后,其表面质量尚无法满足其技术要求,还需要经过表面抛光及处理工艺,来降低其表面粗糙度,提高型面精度,从而提高叶盘疲劳强度及使用寿命。现阶段,国内对于整体叶盘的表面抛光工艺仍处于手工打磨阶段,人工抛光不仅劳动强度大、效率低,而且抛光表面易烧伤,型面精度和表面完整性难以保证,导致叶盘可靠性降低,同时受到工人技术等级和熟练程度的影响,加工质量不稳定,严重影响着航空发动机的使用性能、安全可靠性以及生产周期。因此,迫切需要对整体叶盘表面自动化抛

光技术进行深入研究,实现其自动化抛光工艺。对整体叶盘表面抛光及处理技术主要包括:磨粒流抛光技术、数控抛光技术、激光冲击处理技术、表面喷丸及光饰技术等。

#### 1 磨粒流抛光技术

磨粒流光整技术是美国在 20 世纪 80 年代发展起来的一项光整新工艺,已广泛应用于航空航天、汽车、电子、模具制造业中的关键零件抛光工艺。磨粒流加工时通过软性磨料介质,一种载有磨料的粘弹体,在压力作用下往复流过零件被加工面而实现光整效果,对于一般工具难以接触的零件内腔,磨粒流光整技术的优越性尤为突出<sup>[25]</sup>。

我国引进磨粒流光整技术,经过几年的研究,北京航空工艺研究所在磨粒流抛光技术方面取得较大进展,并将其应用于发动机离心叶轮和钛合金整体叶盘叶轮的型面抛光,在某型发动机研制中,采用磨粒流工艺进行了前置扩压器叶片型面抛光,均匀去除叶片腐蚀层,改善了零件抗疲劳性能。但是,由于技术起步较晚,工艺缺乏更深入的研究,对于磨粒流光整中的关键技术,还需要在实践中进行不断的摸索和完善<sup>[26-27]</sup>。

#### 2 数控抛光技术

国外在整体叶盘抛光技术方面已经取得了大量的成果,日本较早地将机器人技术应用于整体叶盘抛

光中,成功地研制出了抛光加工机器人并投入应用,并且提出了通过 GC (grinding center) 进行自由曲面抛光的新型工艺,经过技术研究和应用,最终在抛光试验中达到了较高的表面质量,在抛光过程解决了磨削中由于 NC 误差导致的抛光轨迹误差<sup>[28]</sup>。

西北工业大学对整体叶盘结构及其材料特性进行大量分析,借鉴五轴联动数控铣削技术,为拟合整体叶盘叶片自由曲面,提出整体叶盘五轴联动柔性抛光系统,并建立试验平台,通过磨头机构的柔性作用,使其在抛光过程中能够适应叶片型面,对叶片表面波纹及微变形量进行自适应补偿,达到叶盘表面精密抛光<sup>[29]</sup>,其建立抛光工艺实验平台如图 7 所示,并且对整体叶盘进行了初步抛光试验,如图 8 所示,目前还需对整体叶盘自动化抛光技术进行不断的完善和提高。

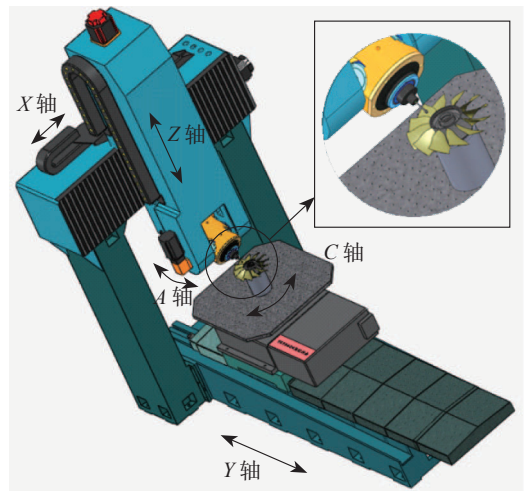


图7 整体叶盘抛光装备

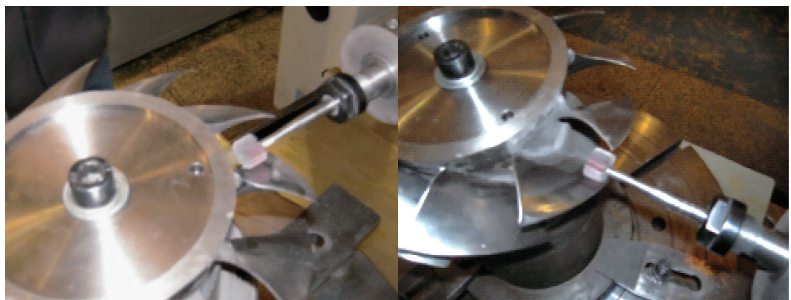


图8 整体叶盘抛光试验

### 3 激光冲击处理

激光冲击处理技术是利用高峰值功率密度的激光产生高压等离子体,等离子体受约束产生冲击波使金属材料表层产生塑性变形,获得表面残余压应力层。激光冲击强化技术于20世纪70年代已开始研究,由于其设备昂贵、效率较低,应用较少,直到20世纪90年代,激光冲击强化在航空发动机上应用,21世纪后,激光冲击强化技术已在航空航天领域得到广泛应用,大幅度提高了部件疲劳性能、抗应力腐蚀性能、抗冲击性能。

中航工业北京航空制造工程研究所研究分析了整体叶盘叶片边缘激光冲击强化的关键难题,采用双光束双面强化技术,对整体叶盘叶片进排气边缘、叶尖、叶根等不同部位进行强化试验,如图9所示<sup>[30-31]</sup>。

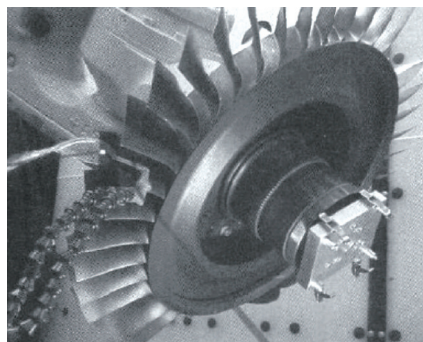


图9 激光冲击强化整体叶盘

整体叶盘不同部位的强化会导致激光入射角度的变化,且两路激光发生平衡问题,因此对激光冲击处理技术增加了运动系统和光路系统的复杂性,目前,我国对整体叶盘叶片强化还存在诸多难题,例如由于叶盘空间结构导致工艺的复杂性,钛合金材料激光冲击强化所需功率密度高,表面型面精度要求高等,仍需要进行大量的强化试验,优化工艺参数,确保叶片固有频率、型面尺寸、叶尖部位轮廓度、粗糙度满足设计要求<sup>[31]</sup>。目前,国内对整体叶盘冲击处理技术还尚无应用实例,但已具有良好研究基础,该技术必将在国内踏上产业化

的道路。

### 4 光饰及喷丸技术

数控电解加工技术进行分析对比,如表2所示<sup>[23]</sup>。

表2 整体叶盘主要加工方法对比

工艺方法		特点	局限性	国内应用情况
精密铸造、锻造		生产效率高,定向结晶技术可满足精度要求,能够得到较好的质量	生产过程比较复杂,技术难度大,废品率较高	逐渐将其应用于整体叶盘制造领域
精密焊接技术	电子束焊接	焊接工艺参数容易精确控制、重复性和稳定性好	适宜钛合金叶盘的焊接工艺,对高温合金叶盘存在较大的技术缺陷	已应用于整体叶盘制造工程中
	线性摩擦焊	效率高,质量好,焊缝区组织极细,焊接接头的静、动载力学性能,应用范围广	设备造价较高,影响接头成型要素较多,其耦合关系较为复杂	技术机理尚不成熟,尚无实现工程应用,仍需投入大量试验
数控铣削		加工柔性好,可加工各种复杂形状的零件,生产准备周期短	加工中刀具磨损造成误差严重,难以掌握其磨损规律,对难切削材料、小通道加工较难,机床精度要求极高,材料去除量大,成本较高	已用于整体叶盘制造过程,对刀具磨损进行补偿,机床多为国外进口
电解加工		可加工各种难切削材料整体叶盘,加工柔性好,且工具阴极无损耗,加工能力强	需采用多轴数控电解机床,对数控技术水平要求高,电解成形规律掌握较困难	应用尚浅,有望解决数控铣削不能加工的难题

叶片表面光饰与喷丸技术都是叶片表面强化的工艺方法,其作用在于消除内部有害加工应力,提高叶片疲劳强度。目前,叶片光饰与喷丸技术已广泛应用于国内航空发动机整体叶盘与叶片制造中,振动光饰与喷丸技术从不同方面提高整体叶盘与叶片的抗疲劳强度,由于振动光饰后叶片表面质量及抗疲劳强度均易遭到破坏,因此,国内普遍采用喷丸工艺对整体叶盘叶片表面进行处理,其稳定性高,更有利于提高整体叶盘叶片抗疲劳强度<sup>[32]</sup>。

### 整体叶盘制造方法对比

在整体叶盘制造工艺过程中,各种近成形技术与精确成形技术相互渗透,形成整体叶盘复合制造工艺,各工艺技术有其优越性和局限性,无法以一种方法替代其他所有工艺方法。而对于国内目前普遍采用的整体叶盘制造技术,如精密铸造及锻造技术、精密焊接技术、数控铣削技术、

### 结束语

随着整体叶盘在航空发动机上的广泛应用,未来高推重比、涵道比发动机使整体叶盘结构更加复杂,优异的SiC或C/C复合材料等在整体叶盘上的应用,对整体叶盘制造技术提出了更高的挑战,各国都投入大量的人力、物力对整体叶盘制造技术进行研究,寻求低成本、低污染、高效率、高质量的复合制造技术,以满足航空发动机对整体叶盘的需求。目前,我国对整体叶盘的制造多采用精密锻造、电解加工、数控铣削的复合制造工艺技术,其制造技术仍需投入大量的研究,提高整体叶盘制造效率,降低其制造成本,提高其表面质量,从而实现对整体叶盘的高效、高质、低耗制造。

本文共有参考文献32篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 小城)