

高温合金整体叶盘精密振动电解加工方法的应用分析

Application Analysis of Precise Vibrating Electrochemical Machining in High-Temperature Alloy Disk

北京航空制造工程研究所 张明岐 傅军英



张明岐

北京航空制造工程研究所研究员。毕业于清华大学,长期从事电化学加工、电液束加工技术研究,研究成果多次荣获国家科技进步奖。

不断提高推重比、延长使用寿命以及降低能耗一直是现代航空发动机发展的主导方向,这使得在先进航空发动机设计中,出现了大量新材料、新结构。在材料上,更多地采用先进复合材料、钛合金和镍基高温合金;在结构上,更多地采用整体结

构。结合北京航空制造工程研究所成熟的大容量高频窄脉冲电解加工技术,进行精密振动电解加工装备研究,再通过合理解决电解加工中的定位、修整和检测等关键技术,确立我国电解加工整体叶盘的工艺模式。通过高效电解套料加工技术与精密振动电解加工技术,加工后叶型达到设计精度,即不需要手工修磨便可完成高温合金整体叶盘的加工,加工效率比机械加工提高数倍,成本可降低几个数量级,将会极大的促进航空发动机高温合金整体叶盘的发展与应用。

构。

第4代航空发动机已经开始广泛采用整体结构,用以提高发动机的使用性能与寿命。整体叶盘是先进航空发动机设计中一种典型的整体结构部件,它将叶片和叶盘做成一体,省去常规叶盘连接的榫头、榫槽和锁紧装置,避免了榫头气流损失、减少了结构重量和零件数量,大幅提高了发动机的工作效率、推重比和可靠性。风扇、高压压气机转子甚至低压涡轮转子等更多的采用整体结构已经成为先进航空发动机的发展趋势,如美国的F414发动机,共采用了

5级整体叶盘,使零件减少了484件,推重比与原型机F404相比,由7.5提高到9.1^[1]。欧洲发动机公司联合研制的EJ200发动机,由于风扇、压气机和涡轮采用整体叶盘结构,减重比例达到了30%~50%。随着航空制造技术的不断发展,近年来整体叶盘结构在国外新研制的航空发动机上已得到广泛应用,不仅是在军用发动机,在民用大涵道比发动机中也开始出现。

整体叶盘制造技术

对应于难加工材料与复杂结构,

新的制造技术往往滞后,所以优质、高效、低成本与具有快速响应能力的加工方法是各国不断追求的目标,也是实现设计目标的保障。整体叶盘叶型复杂、精度要求高、叶型薄、受力后变形大,其制造技术成为许多发达国家研究的重点,近年来开始快速发展。整体叶盘制造方法根据其结构和材料所采取的技术也有所不同,从连接与切削的方法上划分主要有以下几种:

1 先进连接与铸造技术

(1) 电子束焊接。如在EJ200制造中,先将单个叶片用电子束焊接成叶片环,再用电子束焊接技术将轮盘腹板与叶片环焊接成整体叶盘结构。

(2) 锻接与扩散连接。普惠公司采用锻接法制造整体涡轮转子,方法是采用局部加热将单晶精铸叶片直接连接到锻造涡轮盘的轮缘上;压气机钛合金整体叶盘采用热等静压法将钛合金粉末与精锻叶片复合成形,而高温合金整体叶盘则采用热等静压法将粉末高温合金盘和精铸叶片扩散连接。

(3) 线性摩擦焊接(LFW)。这是近年来迅速发展起来的先进制造方法,在整体叶盘制造和修理领域占有越来越重要的地位。LFW技术可将不同材料制造的叶片与轮盘焊接在一起。已在EJ200发动机低压压气机的整体叶盘制造中成功应用。

(4) 精密整体叶盘铸造技术。生产过程复杂,技术难度大,废品率高,只适用于可铸合金,仅少数工业发达国家掌握该项技术,且只用于部分低压涡轮盘制造中。

2 切削方法

(1) 数控加工与高速铣削。优点是柔性好,响应快,可以加工各种复杂形状的零件,生产准备周期短;缺点是由于刀具磨损造成加工误差且难以掌握磨损规律,难切削材料、小通道叶盘加工受刀具刚性限制很

难加工,薄壁件加工易产生变形。我国在高精度机床、数控系统、五轴联动编程和刀具等关键问题上还没有完全解决好,目前主要依赖进口,价格昂贵。目前钛合金和铝合金等机加工性能好的材料的整体叶盘,可以采用数控铣削加工,然后进行最终光饰处理,而高温合金整体叶盘的数控铣削只少量用于样机研制中的单件试制。

(2) 数控电火花成形加工。加工精度和加工稳定性较高,但加工速度慢,表面有再铸层,且由于电极损耗影响成型精度,需经常更换电极或采取其他措施,导致加工速度更慢、加工成本更高。所以,一般仅应用于带冠整体叶盘及小型翼型叶轮等极难加工结构的试验性加工。

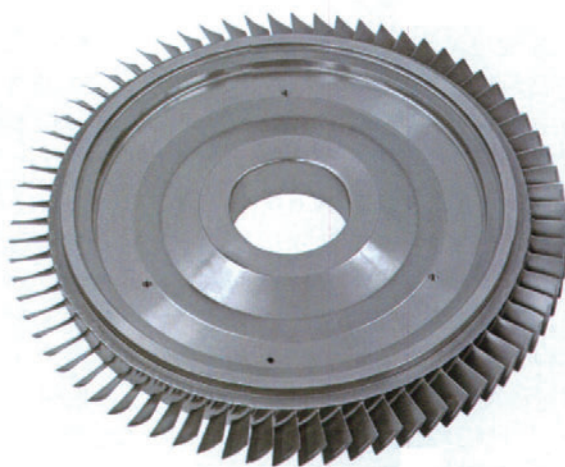
(3) 电解加工技术。整体叶盘电解加工与数控铣削方法相比有着效率高、电极(刀具)无损耗、加工薄型结构无残余应力和变形,在批量生产中电解加工优质、高效优势更加突出。国内4代机在高推重比发动机设计中,已开始将难加工的镍基高温合金材料应用于压气机整体叶盘,而高效精密电解加工是实现高温合金整体叶盘加工的重要途径。

综上所述,多种制造技术均在航空发动机整体叶盘的加工中有所应用,数控铣削、摩擦焊和电解加工方法是整体叶盘的加工中必不可少的3个主要支持技术^[2]。

整体叶盘电解加工 国内外概况

1 国外概况

航空发动机制造业中,发达国家为减轻发动机自重、提高推重比和热



电解加工的整体叶盘

效率,已普遍采用高温合金整体叶盘结构,由此也广泛开展了整体叶盘电解加工的研究和应用。

美国GE公司早在20世纪80年代开始便与LehrPrecision公司合作采用电解方法先后加工了T700的钢制整体叶盘、F22的GE37/YF120发动机钛制整体叶盘及F414发动机整体叶盘^[3]。电解加工分粗加工和精加工2道工序,采用成形或近成形阴极多坐标数控进给加工方式,已在中国申报专利,与五坐标数控铣削加工方法相比,该方法加工时间减少了50%~85%,但由于当时的技术水平限制,叶盘叶型加工精度仅为 $\pm 0.1\text{mm}$,尚不能达到最终精度。美国Teleflex Aerospace公司采用ECM技术实现了大型叶片间距密集的整体叶盘五坐标数控电解加工,其生产线专门为GE、R·R和普惠等大公司电解加工大型风扇整体叶盘等复杂结构件。荷兰Philips Aerospace公司计划采用电解加工直径达1.1m的整体叶盘,用于联合攻击机(JSF)的F136发动机中,这是目前军机中最大的整体盘。

德国Leistritz公司为R·R、MTU及AVIO等大型航空发动机公司电解加工整体叶盘,其加工设备无论数量还是种类都居世界前列。

整体叶盘五轴数控专用电解加工设备,额定电流达到了20000A,具备了加工更大型的整体叶盘的条件。值得一提的是,德国MTU公司采用DORNER公司提供的五坐标数控振动电解加工设备,将高频窄脉冲振动电解加工技术成功地应用于EJ200的镍基合金整体盘($\phi 650\text{mm}$)的加工,高频窄脉冲电解加工设备实现了纳秒级快速短路保护技术、微米级精密过滤技术以及先进的环保处理系统,居于世界领先水平^[4]。

2 国内外差距分析

北京航空制造工程研究所(625所)在20世纪80年代就研制出了国内第一代振动电解加工设备,达到了微米级的加工精度,但受限于当时的电气元器件水平,未能达到工程化所需的可靠性要求。近年来,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了实质性的进展。在最新的研究成果中,大容量脉冲电解加工电源突破了以往斩波器件的局限达到8000A,与先进国家缩小了差距;在叶型加工方面,应用脉冲电解加工了某型号压气机超薄弯扭叶片,并从方料一次成型到叶身尺寸,达到了近无余量的水平。

国内航天企业普遍采用电解套料方法加工航天发动机整体叶轮,有生产效率高、表面质量好、阴极无损耗,无切削力,可加工薄形叶片,加工后无变形等优点。此项工艺已经十分成熟,达到了稳定批产的水平。缺点是只能加工等截面叶片整体叶轮,不能加工变截面扭曲叶片整体叶盘。

如前所述,对于镍基高温合金整体叶盘的电解加工,发达国家已经起步,逐步具备批量生产的实力,以GE、R·R和MTU等为代表的航空制造技术公司已经占据了主导地位。国内虽然有了一定相关的技术积累,但在一些关键技术环节落后极为明

显。主要表现为:

(1) 技术储备不足。电解加工工艺成形于20世纪50年代,它一开始便以加工效率高、适于批量重复加工的特点,成为制造学科中一个重要的技术分支。在六七十年代,随着如高速铣削等新制造技术的发展,电解加工的应用领域有所缩小,电解加工存在的加工精度较低以及环境保护一系列问题成为制约其发展的瓶颈。近年来,由于脉冲电解技术以及环保技术的突破性进展,加上航空航天工业大量难加工材料、复杂结构的零件以及微细结构的出现,该技术在国外重新得到了重视。但在国内,脉冲电解加工技术刚刚起步,而且技术分支较多,未形成统一的技术标准,阻碍了该技术的进步及推广。国内仅有北京航空制造工程研究所、南京航空航天大学、合肥工业大学和华南理工大学等单位延续着对电解加工技术的系统研究工作。对于整体结构的加工技术,也仅保持在实验室水平上,没有对此进行过系统的工艺设计。

(2) 技术方向不明确。国外整体叶盘电解加工技术路线是在粗加工开槽(套料)后,采用整体电极振动进给加工,实现了叶型、叶根、进排气边缘一次成型,既发挥了电解高效复制加工的优势,又达到了很高的尺寸精度和表面质量要求。国内在探索方向上不尽一致,在探索其可行性的同时,没有顾及到技术的实际应用;追求高精度加工时,对实际加工效率考虑不足;在提高加工效率的需求面前,又因为技术方案的局限,办法不多。

(3) 加工精度较低。电解加工的精度取决于加工间隙的大小,加工间隙越小越有利于加工精度的提高。传统直流电解加工,在小间隙下,常因局部电解液更新较慢造成阳极钝化,高温沸腾产生空穴导致短路,从而使加工无法持续进行。因此,直流

电解加工只能在较大加工间隙下进行,加工精度较低,电解加工后需要进行后续手工修磨加工,叶片型面的重复精度无法保证,只能作为粗加工工序。这种技术在高精度整体叶盘加工中应用差距过大。

精密振动电解加工整体叶盘技术分析

国内航空发动机技术的迅速发展,以及大量复杂结构、新材料的出现,对制造技术提出了更高的挑战。国内已先期采用数控铣削技术针对多种复杂整体结构包括整体叶盘进行了专项研究。但在采用数控铣削加工镍基高温合金材料的整体叶盘时还存在着很多问题:

(1) 镍基合金的强度很高,因此,数控加工中切削力受限于主轴的刚性,不能吃刀过大;

(2) 镍基合金的高强度迫使铣削线速度下降;

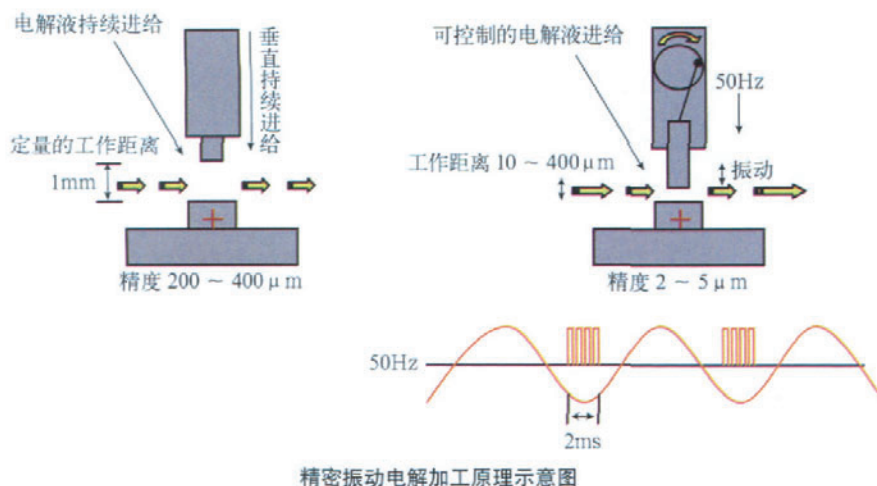
(3) 刀具磨损造成加工误差且难以掌握磨损规律;

(4) 小通道叶盘加工受刀具刚性限制更难加工;

(5) 薄壁件加工易产生变形;

(6) 效率低、成本高,在批量生产中矛盾更加突出。

压气机整体叶盘的薄型叶片若采用数控铣削,一是切削力过大会引起叶型的变形,降低转速减少吃刀量,效率会降低数倍;二是刀具的磨损惊人,费用昂贵。而上述数控铣削加工中出现的难题正是电解加工的优势所在。电解加工采用电极复制加工,与合金硬度呈无关性,对于复杂型面可一次成型,加工效率很高。国外的研究与实践表明,电解加工是高温镍基合金整体结构实现低成本、高效率加工的有效方法,MTU公司称之为唯一合理的加工方法。可以说在高推重比发动机的高温合金材料压气机整体叶盘制造中,采用高效精密电解加工是一个不可或缺的重



精密振动电解加工原理示意图

要途径。

目前,国内传统电解加工技术存在的主要问题是精度较低,不能满足整体叶盘精度要求。而基于高频窄脉冲电流的精密振动电解加工,是实现高温合金整体叶盘加工可行性最大而且有国外成功范例的有效方法。

脉冲电解加工技术会在间隙区内的流场产生与脉冲电流同步的脉动压力波,可改善流场特性,减少电解液中的空穴现象,有助于提高电解加工间隙流场分布的均匀化。同时由于改善了间隙中的散热条件,使得电解加工所允许的最大电流密度增大,大大提高了阳极溶解的集中蚀除能力,提高了整平比,降低了散蚀效应。脉冲效应显著改善了间隙中加工状况的理化特性,使电解加工在小间隙条件的加工稳定性大幅提高,不但较大幅度地提高了电解加工的精度,也极大地改善了表面加工质量。国内北京航空制造工程研究所研制成功了8000A大容量脉冲电源,具有了加工大型构件的实用性,也为下一步实现高温合金整体叶盘精密振动电解加工提供了电源技术保障。

综合分析整体叶盘结构、叶型特点及加工精度要求,镍基高温合金材料整体叶盘电解加工可行技术路线

概述如下:

(1) 高效预加工。首先要通过高效电解套料加工技术进行预加工,实现叶片坯体对变截面叶型的最小包容,目的是为精密加工尽量预留均匀的较小余量。设计带有侧向进给量的套料电极,利用旋转直线复合联动进给,加工出位置均布的呈扭叶片坯体。

(2) 精密振动电解加工。精密振动电解加工技术的关键在于机械振动与脉冲电源的精确匹配。进给主轴头始终处于小幅振动状态,每个振动循环中,电极振动至最低位置时,电源开通,保证工作区在极小间隙下进行高频窄脉冲加工;电极远离工件时,关断信号发生,脉冲电源快速封锁输出,加工停止。整体叶盘叶型加工时,盆背方向必须采用整体电极(非近成型电极或棒状电极),才能保证加工效率并达到高精度要求。根据叶栅间隔,叶型扭角等条件设计计算电极进入方向及进给路径,实现叶盘叶型、根部以及进排气边的一次成型加工,并最终达到尺寸精度要求。

结束语

以整体叶盘为代表的整体结构加工是高性能发动机必备的综合技术,它在一定程度上代表着发动机

制造工业的水平。目前,较为成熟的数控铣削已经用于多种复杂结构的加工。但是,高温合金整体叶盘的特殊性在于材料的机械加工性能很差,加工变形与刀具的严重消耗导致其在加工效率和加工成本上大受影响。现代制造技术既要考虑发动机研制阶段的单件制造,更要考虑批量生产中的效率与技术经济性的需要。因此,高温合金整体叶盘的精密振动电解加工,已成为各主要航空发动机公司极力研究与应用的先进技术。

高效精密振动电解加工技术是解决我国高性能发动机中高温合金整体叶盘的高效率加工难题的重要方法。结合北京航空制造工程研究所成熟的大容量高频窄脉冲电解加工技术,进行精密振动电解加工装备研究,再通过合理解决电解加工中的定位、修整和检测等关键技术,确立我国电解加工整体叶盘的工艺模式。通过高效电解套料加工技术与精密振动电解加工技术,加工后叶型达到设计精度,即不需要手工修磨便可完成高温合金整体叶盘的加工,加工效率比机械加工提高数倍,成本可降低几个数量级,将会极大的促进航空发动机高温合金整体叶盘的发展与应用。

参考文献

- [1] 陈光. 整体叶盘在国外航空发动机中的应用. 航空发动机, 1999(1):1-6.
- [2] 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.
- [3] Bußmann, Dr. Jürgen Kraus, Dr. Erwin Bayer. An integrated cost-effective approach to blisk manufacturing. Martin MTU Aero Engines, Munich, Germany. ISABE 2005:2-9.
- [4] Prof. Frank Gielen, Prof. Johan Deconinck, Dr. Leslie Bortels. Advanced electrochemical process research. Europhysics News, 2004, 35(6):12-17.

(责编 玉龙)