

整体叶轮的数控电解加工及其在航天制造中的应用前景

徐家文 朱永伟 胡平旺 云乃彰 严德荣

(南京航空航天大学,南京 210016)

文 摘 综述了整体叶轮的主要加工方法及其比较,就数控展成电解加工的重要技术特点(可以综合发挥数控技术和电解加工两者的技术优点)进行了论述,展示了数控电解在加工整体叶轮、解决以数控铣、精密铸造难加工或不能加工的技术难题方面所显示的优越性。该项工艺技术对于新型航天发动机的研制具有重要意义和广阔的应用前景。

关键词 整体叶轮,数控,电解加工,航天制造

Numerically Controlled Electrochemical Machining of the Integrated Impellers and Its Application in Future Aerospace Manufacturing

Xu Jiawen Zhu Yongwei Hu Pingwang Yun Naizhang Yan Derong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Main methods to machine the integrated impellers, and comparison among those methods are summarized. Important merits and application of numerically controlled electrochemical machining (NC-ECM) of the integrated impellers are discussed, which synthesized advantages of both the NC technique and the ECM technology. The NC-ECM is attractive in manufacturing of modern aerospace engines, such as the integrated impellers, especially in solve those difficult machining problems that could not be solved by numerically controlled milling or precision-coin methods.

Key words Integrated impeller, Numerically controlled, Electrochemical machining, Aerospace manufacturing

1 概述

整体叶轮将叶片和轮盘构成一个整体,而不是通常叶片与轮盘的机械连接,使零件数、构件体积和质量均有减少,同时还可以消除传统叶片、轮盘连接之间的气流逸流损失,避免叶片、轮盘机械连接之间的微动磨损、微观裂纹以及机械连接件的意外损坏等,从而使发动机工作效率、推重比、工作寿命和安全可靠性大大提高。在新型火箭发动机中,采用带冠整体叶轮还可以大大减小传统叶轮部件结构中叶尖与叶轮外环之间的逸流损失,叶轮效率由传统结

构的50%提高到70%。由于上述突出优点,整体叶轮、带冠整体叶轮在先进、高推重比航空发动机及新型大推力火箭发动机中得到越来越多的应用^[1~8]。如美国国防部于1988年开展的高性能叶轮发动机技术(IHPTET)计划中提出:到2020年,战斗机上发动机的叶轮都将采用整体叶轮结构^[1~3],俄罗斯在新型、大推力火箭发动机上更特别重视采用带冠整体叶轮结构^[3,7,8]。由于整体叶轮的复杂几何结构及材料难切削,使得其加工又成为世界级的技术难题。各国专家们已经研究了近20年以求满意解决,

收稿日期:2002-11-17

徐家文,1941年出生,博士生导师,主要从事特种加工新技术的教学科研工作

努力寻求优质、高效、低成本的加工方法,其中整体叶轮的数控电解加工技术显示了诱人的前景。本文就整体叶轮数控电解加工的技术特点及应用价值进行综合论述。

2 整体叶轮的主要加工方法

整体叶轮上叶片数量多(从十几片到百余片),造型复杂,多为变截面扭曲叶片;有的叶片之间通道狭窄,还有的叶盘外周带冠(如带冠整体叶轮及整体叶环),使得叶片型面加工的可达性很差。整体叶轮作为航空、航天发动机的动力部件,多采用高强度材料,如高温耐热合金、钛合金、NiAl、TiAl 等合金,其机械切削性能很差。因此整体叶轮上的众多叶片很难加工,成为整体叶轮加工中的关键。

五坐标数控铣削、精密铸造在整体叶轮加工中

已经得到较多的应用并继续发挥其作用。此外电子束焊接、“锻接法”、线性摩擦焊接,也是制造大型整体叶轮(整体叶盘)的高新技术,正在进行研究,仅在部分试验机中得到应用。电解加工方法在等截面叶片整体叶轮的加工中已得到成功应用^[3,9,10];而特种加工(如电解加工、电火花加工与数控技术相结合^[9~14]),如数控展成电解加工、精密数控电火花加工,为解决数控铣、精密铸造所难加工或不能加工的难题提供了新的技术途径。整体叶轮的各种加工方法都各有其特点;不能设想用一种方法替代所有别的方法而实现各种整体叶轮的加工,因每种方法都有其适用范围。整体叶轮的主要加工方法、技术特点及应用情况见表1。

表1 整体叶轮的加工方法及其比较

Tab.1 The methods to machine integrated impellers and the comparison between them

加工方法	特点	局限性	当前应用情况
精密铸造	生产效率高、精度可满足要求,采取某些特殊措施,如定向结晶,能得到更好的质量	生产过程复杂,技术难度大,废品率高,只适用于可铸合金	仅少数发达国家掌握该项技术,我国也开始应用于制造整体叶轮
数控铣削	加工柔性好,可加工各种复杂形状,生产准备周期短,在可切削材料的加工中应用满意	由于刀具磨损造成加工误差,虽可采取编程补偿,但难以掌握磨损规律;对难切削材料、小通道叶轮加工受刀具刚性限制则很难加工;对薄壁件加工容易产生变形	发达国家多采用五坐标数控铣削加工整体叶轮,我国也开始应用。但高精度机床、数控系统、五轴联动编程、刀具等关键问题还有待进一步研究
电解套料	生产率高,表面质量好,阴极无损耗,可加工任何难切削材料;加工中无机械切削力,可加工薄壁件,无变形	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轮	英、美、俄罗斯等国家都有很好的应用,我国已熟练掌握全套工艺,已经达到国际先进水平
机械靠模仿型 电解/电解磨削	可加工变截面扭曲叶片整体叶轮,其余特点同电解加工	一种叶轮加工对应一种仿型夹具,故设计、制造、调整的工作量大,并且对工人的技术水平要求高,无加工柔性,生产准备工作量大	我国已成功应用于加工变截面扭曲叶片整体叶轮,加工速度快,加工精度可满足生产要求;“靠模”硬件急需改变为“数控”软件
数控展成电解 /电解磨削	可加工各种难切削金属材料的复杂构件、薄壁件;加工柔性好且工具阴极无损耗,综合发挥数控技术及电解加工两者的技术优点,增强了可加工能力	需要多轴数控电解加工机床及相应控制系统,数控技术水平要求高,需要掌握数控展成电解加工的成形规律	刚开始应用。可望解决以数控铣削、精密铸造难加工或不能加工的难题
数控电火花 成形加工	基本特点同数控电解加工,而且加工精度及加工稳定性更高,但加工速度很慢,机床还需要进口	由于电极损耗影响成形精度,故需经常更换电极或采取其他措施,使得加工成本提高、加工速度很慢	英、美、俄等国家用于加工带冠整体叶轮,我国也开始掌握这项技术。该技术与柔性电解结合,可望大大提高加工效率

3 整体叶轮的数控电解加工方法

对于数控铣削、精密铸造方法难加工或者不能加工(如带冠整体叶轮)的难题,特种加工方法则显示其突出的优越性。其中,电解加工与数控技术相结合^[1~3,9~15]的数控电解加工,作为数控铣削、精密铸造的必要补充,可以发挥其独特的作用。

3.1 数控电解加工整体叶轮的技术特点及应用价值

整体叶轮的数控电解加工,综合了计算机数控与电解加工两者的技术特点。既具有电解加工的优点:工具阴极无损耗,无宏观切削力,适宜加工各种难切削材料和长、薄叶片及狭窄通道的整体叶轮;加工效率高,表面质量好;同时,它又具有数控铣削加工的优点:以计算机数控实现型面创成运动,投产周期短,适用加工范围广,可用于加工各类复杂结构、小批量、多品种,甚至于单件试制的生产中;这些优点又为一般电解加工所不及。因此,它特别能解决以数控铣、精密铸造难加工或不能加工的难题:如加工小直径、多叶片(几十片、百余片)、小叶间通道(1.5 mm~3 mm)、难切削材料制成的变截面扭曲叶片整体叶轮,还能加工以数控铣无法加工的带冠整体叶轮,对这两类叶轮的加工特别显示了该新型加工技术的工艺特点。研究及应用表明^[1~3,9,15],采用数控电解加工整体叶轮,比五坐标数控铣具有下列优点:(1)工时可减少50%以上;(2)可以加工任何高强、高硬难切削金属材料;(3)不会产生残余应力和变形。该项技术不仅增强了可加工能力,同时还由于其技术的先进性,即具有数控技术的优点,加工过程由计算机控制,消除了人为因素的干扰,能更好地保证加工精度和加工质量,提高加工的稳定性;还可极大地减少生产准备时间,降低劳动强度,提高产品制造的快速响应能力,加快新品研制速度。该项技术是优质、高效、低成本、快速响应地解决整体叶轮加工难题的一条新途径。

3.2 国外数控电解加工技术

美国、英国、俄罗斯都高度重视数控电解加工技术的研究,并已在新型发动机的制造中得到应用,以下就其有代表性的、具有国际先进水平的研究成果作一简介。

宇航材料工艺 2003年 第1期

3.2.1 美国 GE 公司的五轴数控电解加工

美国 GE 公司在电解加工先进航空发动机的大直径整体叶轮(整体叶盘)时,采用了以成型或近成型阴极进行多坐标数控送进运动的加工方式。据文献[1,2]介绍,GE公司于20世纪70年代末,采用五坐标数控铣床加工 T700 航空发动机的整体叶盘;而在1985年,与 Lehr Precision Inc 公司合作发展了电解加工方法,用以加工 T700 航空发动机的钢制整体叶盘,随后这种方法又用于加工为装备“先进战术战斗机”ATF(F22)所研制的 GE37/YF120 发动机的钛制整体叶盘,以后还电解加工了 F414 发动机的整体叶盘。整体叶盘的粗加工(圆盘坯料开出叶间槽)、半精加工和精加工均采用电解加工,加工后不必再进行手工抛光,加工出的叶型厚度公差 ± 0.10 mm,型面公差 ± 0.10 mm。

3.2.2 英国 R. R 公司的数控电解加工

英国 R. R 公司采用数控电解方法加工难切削材料制成的复杂形状的薄壁整体机匣。在数控电解加工机床上,采用若干种成型阴极,分步加工机匣上呈空间分布的型孔、型腔、突台、成形沟槽等,取得显著的技术经济效益,比机械切削提高工效 5~10 倍,表面质量好,无残余应力及变形。整体机匣数控电解加工同叶片电解加工一起,构成了 R. R 公司的十大工艺技术秘密之一^[5],该项技术对于加工整体叶轮也很有参考价值。

3.2.3 美国、俄罗斯仿型电加工带冠整体叶轮

带冠整体叶轮是新型大推力火箭发动机上重大改进的结构件。美国已经采用精密数控电火花、俄罗斯则采用机械仿型电火花与电解加工的组合加工带冠的整体叶轮^[3,7,8],电解加工既可以提高加工速度,又可以去除电火花加工后的表面变质层,提高表面质量。俄罗斯在新型火箭发动机带冠整体叶轮的研制中电火花—电解加工的组合发挥了重要作用。

3.3 国内数控电解加工整体叶轮的研究及应用情况

国内以南京航空航天大学为代表,从20世纪80年代中期就开始研究数控展成电解加工技术,至今已经取得了某些在电解加工领域处于国际领先水平的研究成果^[15]。

3.3.1 “直线刃”阴极数控展成电解加工

“直线刃”阴极数控展成电解加工(图1),类似于数控铣,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轮叶间槽(图2)以及叶片型面的加工(图3)。已经为改型航空发动机加工了整体导风轮并装机使用[图4(a)],主要型面精度达到0.2 mm;还试验加工了小型叶轮样件[图4(b)],主要型面精度达到0.15 mm;加工表面粗糙度 $1.6 \mu\text{m}$ 。后续精加工采用手工抛光或数控电解磨削(图3)。目前,“直线刃”阴极数控展成电解加工还只限于加工可展直纹曲面,对于非可展直纹面的加工,正在研究中。

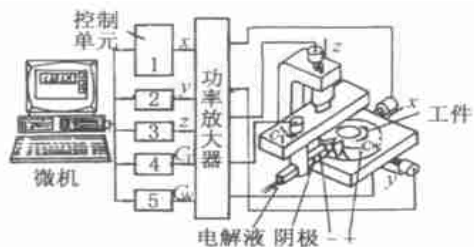


图1 数控展成电解加工系统
Fig.1 NC-electrochemical contour evolution machining system

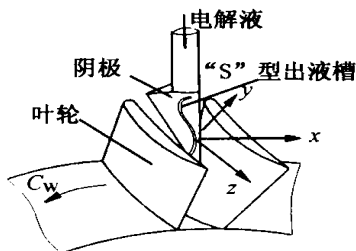


图2 双直线刃阴极加工叶轮叶间槽
Fig.2 Illustration of machining impeller balde using a tool-cathode with two line-edges

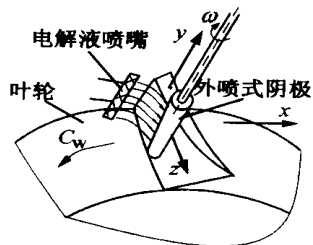
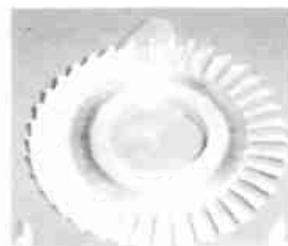


图3 电解磨精加工叶片型面
Fig.3 Electrochemical grinding blade surface of impeller



(a) 190 mm



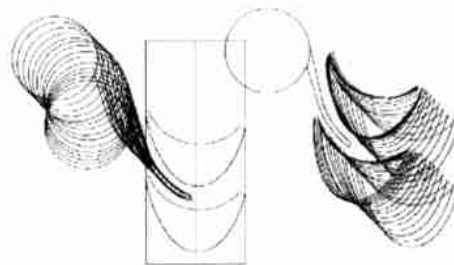
(b) 120 mm

图4 电解加工的叶轮

Fig.4 Impeller machined by NC-electrochemical contour evolution machining

3.3.2 成形或近成形阴极柔性电解加工

成形或近成形阴极柔性电解加工,是南京航空航天大学正在研究的加工非可展直纹面的一种新方法,采用成形或近成形阴极相对零件作数控仿型运动(图5),可以解决诸如带冠整体叶轮(图6)的加工难题,正在与工厂合作进行预加工带冠整体叶轮叶间槽的工艺试验研究[图5(b)],为后续精密数控电火花加工减少工时约20%~30%;进一步改进,采取精密加工措施,可以使余量减少且分布更均匀,预计可减少工时50%,型面加工精度也可以更高。由于带冠整体叶轮使工作效率和可靠性都大大提高,已经成为新型大推力火箭发动机的重要改进设计部件,而柔性电解与数控电火花组合加工也将成为精密、高效、低成本加工带冠叶轮这类整体构件的优选工艺方法,在航天制造中具有重要应用前景。



(a) 计算机模拟



(b) 加工实貌

图5 成形或近成形阴极柔性电解加工情况

Fig.5 ECM process with a near shaped tool-cathode



图6 带冠整体叶轮

Fig.6 An integrated turbine impeller with a hoop

4 结束语

数控电解加工整体叶轮,综合发挥了电解加工和计算机数控技术的优点,克服了其间各自的不足,是优质、高效、低成本、快速响应地解决整体叶轮加工难题的一条重要途径,其技术经济效果显著。

(1) 增强了可加工能力,可以解决以数控铣、精密铸造难加工或不能加工的难题。工具阴极无损耗,加工过程无宏观切削力,加工可达性好,可以加工各种难切削材料制成的、薄叶片、窄通道的整体叶轮和带冠整体叶轮,加工效率高,表面质量好;具有计算机数控功能,适用加工范围广,快速响应能力强。

(2) 技术的先进性保证了加工精度和加工稳定性。加工过程由计算机控制,消除人为因素的干扰,能更好地保证加工精度、表面质量和加工过程稳定可靠。

对整体叶轮的加工我们必须立足于国内技术基础,创新研究完全有自主知识产权的整体叶轮数控电解加工技术、机床及控制系统、编程方法,这对于我国先进航空航天发动机的研制,提高国防实力具有至关重要的意义;同时,也可推广应用于高速列车内燃机上复杂整体叶轮的加工。

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, 44
- 2 李志广. 国外第四代歼击机发动机的特点和我们应该如何发展的几点意见. 航空发动机,1996;(3): 1~8
- 3 徐家文. 整体叶轮的特种加工方法. 航空精密制造技术,1992;(4): 19~21
- 4 刘家富. 整体叶盘结构及制造工艺. 航空科学与技术,1998;(6): 21~23
- 5 范伟. 涡轴八航空发动机的先进制造技术简介. 航空维修,1990;(9): 19~22
- 6 石文. 德国 MTU 公司研究的整体叶盘结构. 国际航空,1997;(10): 57~58
- 7 王刚,赵万生. 涡轮制造技术的现状和发展. 航空工程与维修,2000;(4): 41~43
- 8 王刚,赵万生等. 带叶冠扭曲叶片整体涡轮盘在发动机中的应用前景. 航空精密制造技术,1999;35(6): 36~38
- 9 王建业,徐家文. 电解加工原理及应用. 国防工业出版社,2000:193~205,245
- 10 徐家文,王建业,田继安,杨占尧. 电解加工在航空制造中的应用与发展. 航空制造技术,2002;(4): 27~30
- 11 Rajurkar K P, Zhu D et al. New development of electro-chemical machining. Annals of CIRP, 1999;48(2): 48~56
- 12 Masuzawa T, Takawashi T. Recent trends in EDM/ ECM technologies in Japan. In: Proceedings of the ISEM - 12, 1998: 1~15
- 13 刘正坝. 我国特种加工技术的回顾与展望. 电加工, 1999;(5): 6~11
- 14 赵万生等. 国外特种加工技术的最新进展. 电加工, 1999;(5): 12~19
- 15 朱永伟,徐家文,胡平旺. 数控展成电解加工整体叶轮的研究与应用. 航空学报, 2001;22(4): 376~378

(编辑 李洪泉)