

# 三元流叶轮的电弧铣削与机械 铣削组合加工\*

何国健, 顾琳, 董海洪, 朱颖谋, 赵万生

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**[摘要]** 首先介绍了一种实现电弧与铣削组合的加工方法及装备。其次,为验证电弧加工在航空部件生产方面的能力及其对后续精加工工艺的友好性,利用自研的高速电弧放电与机械铣削组合加工专用机床,以具有复杂曲面特征的三元流叶轮样件为例进行五轴电弧铣削与机械铣削组合加工试验研究。结果表明,合理安排电弧加工工序,可以在实现材料高效去除的同时,取得较优的表面质量,电弧铣削中最大材料去除率达  $14500\text{mm}^3/\text{min}$ ,小能量电弧加工完成后的样件表面粗糙度  $R_a$  为  $12.5\mu\text{m}$ ,硬度为  $69.4\text{HRB}$ ,较基体硬度未有明显变化,可以很好地适应切削加工要求。后续机械铣削加工过程中,刀具磨损小、加工状态稳定,最终获得粗糙度  $R_a 1.2\mu\text{m}$  的加工表面,且由于切削余量小,有效抑制了加工变形,样件加工结果达到设计要求,充分展现了该组合加工工艺应用于具有复杂形貌特征的航空发动机零部件制造方面的可行性。

**关键词:** 电弧铣削; 组合加工; 五轴加工; 三元流叶轮; 复杂曲面

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.039



何国健

博士研究生,主要研究方向为电弧  
高效加工工艺及装备。

随着我国航空航天工业的飞速发展,以高温合金、钛合金及复合材料为代表的先进材料得到了越来越多的应用<sup>[1]</sup>。然而,这些材料在具有比强度高、耐烧蚀、抗磨损及可在较高温度下保持高强度等高性能优点的同时,也给切削加工带来了新的挑战,存在加工效率低、刀具磨损严重、加工成本高等问题<sup>[2-3]</sup>。为解决这些问题,国内外的研究人员从刀具材料、设计、工艺优化等方面开展了大量的研究,并且取得了一定的成果。

电弧是一种利用电弧等离子体去除材料的新型加工方法,因其具有极高的加工温度,可以对所有合金材料、金属基复合材料及金属间化合物进行加工<sup>[4]</sup>。同时由于加工过程中

工具与工件不接触从而无宏观切削力,不会造成因外力导致的工件变形,加工的适应范围非常广泛,已在航天领域得到了成功应用,并逐渐受到科研人员和市场的关注,成为当前的热点之一。

美国的GE公司开展了电弧铣削的研究并将其命名为蓝弧(blue arc),该技术已成功用于燃气轮机叶盘等零部件加工<sup>[5]</sup>,并且在Leap航空发动机产品的加工中也得到了应用。郭成波等<sup>[6]</sup>研究了Ti6Al4V材料的放电高效铣削加工性能,实验发现在电流635A、脉宽2ms、脉间0.1ms、冲液压力1.5MPa、电极转速800r/min的加工参数下,可以取得 $15658\text{mm}^3/\text{min}$ 的材料去除率。Wang等<sup>[7]</sup>进行了镍基高温合金

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51575351)。

Inconel718 的电火花电弧复合铣加工试验,结果表明在电流 700A、脉宽 4ms、脉间 4ms、冲液压力 0.32MPa、电极转速 3000r/min 的加工参数下,最大材料去除率可达到 15062mm<sup>3</sup>/min。上海交通大学提出了基于流体动力断弧机制的高速电弧放电加工,利用多孔内冲液实现加工过程的有效断弧,防止烧伤工件表面,使得断弧不单纯依赖于电极的高速旋转,从而可以实现复杂流道等难加工特征的沉入式加工和扫掠式加工。此外,除了实现镍基高温合金、钛合金的高效加工,陈吉朋等<sup>[8-10]</sup>还利用高速电弧加工技术对体积分数为 20% 及 50% 的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行了加工,材料去除率可分别达到 8200mm<sup>3</sup>/min 及 6000mm<sup>3</sup>/min (500A),效率远高于机械加工,而成本仅为后者的几分之一。

上述研究充分展现了电弧加工难切削加工材料的高效性。但目前电弧加工相关的研究还主要集中在加工机理的分析及典型材料的高效去除,加工的特征大都为单道槽或简单型腔等,而航空发动机典型零部件特征件的研究报道较少。与此同时,电弧加工虽然可以取得高水平的加工效率,但通常加工表面质量较差,需要采用切削加工等精加工工艺来

提升尺寸精度及表面质量。本文为进一步验证电弧加工技术在航空部件生产方面的能力及对后续精加工工艺的友好性,利用自研的高速电弧放电与机械铣削组合加工专用机床进行具有复杂曲面特征的三元流叶轮样件五轴电弧铣削与机械铣削组合加工验证。首先介绍了电弧铣削与机械铣削组合加工的方法,包括该方法的原理及自行研制的五轴组合加工专用机床。其次,根据三元流叶轮样件的几何特征并结合该组合加工方法的工艺特点,划分加工工序并确定加工参数。最后,实施组合加工试验,并对材料去除率、表面粗糙度、硬度等试验结果进行分析。

## 电弧铣削与机械铣削组合加工方法

### 1 组合加工方法原理

电弧铣削加工可以实现难加工材料的高效去除,但加工尺寸精度及表面质量较差,难以满足工业生产中产品的设计要求。而与电弧加工相比,机械铣削加工面对难加工材料时,虽然加工效率及成本相对处于劣势地位,却能够取得较高的加工精度。两种加工方法各有所长,但也都有各自的局限性。为充分发挥各自

的优势,将两种加工方式组合,形成一种组合加工方法,可以用于实现难加工材料的高效、精密加工。图 1 为该组合加工方法的原理示意图,该方法包括利用电弧铣削实现的高效加工阶段及利用机械铣削实现的精密加工阶段。

电弧铣削高效加工阶段:之前的研究表明,电弧等离子体在阴极和阳极两端的能量分配系数存在差异,通常阳极端的能量分配系数高于阴极端,因此加工极性对于电弧加工性能有着十分重要的影响<sup>[11-13]</sup>。具体来说,在电极负极性的加工条件下,材料去除率更高但表面质量较差;保持其余参数不变,电极正极性加工材料去除率有一定程度的降低但表面质量明显提升。因此,基于电弧加工的极性效应,在这一阶段首先实施负极性电弧加工,用于更加快速地去工件材料,然后更换极性,进一步实施正极性电弧加工,用于降低负极性加工表面的粗糙度,获得对后续机械加工工艺友好的表面质量。此外,可根据加工对象的材料、余量、加工要求等实际情况,改变放电参数,实施不同能量的正、负极性电弧加工工序。

机械铣削精密加工阶段:虽然

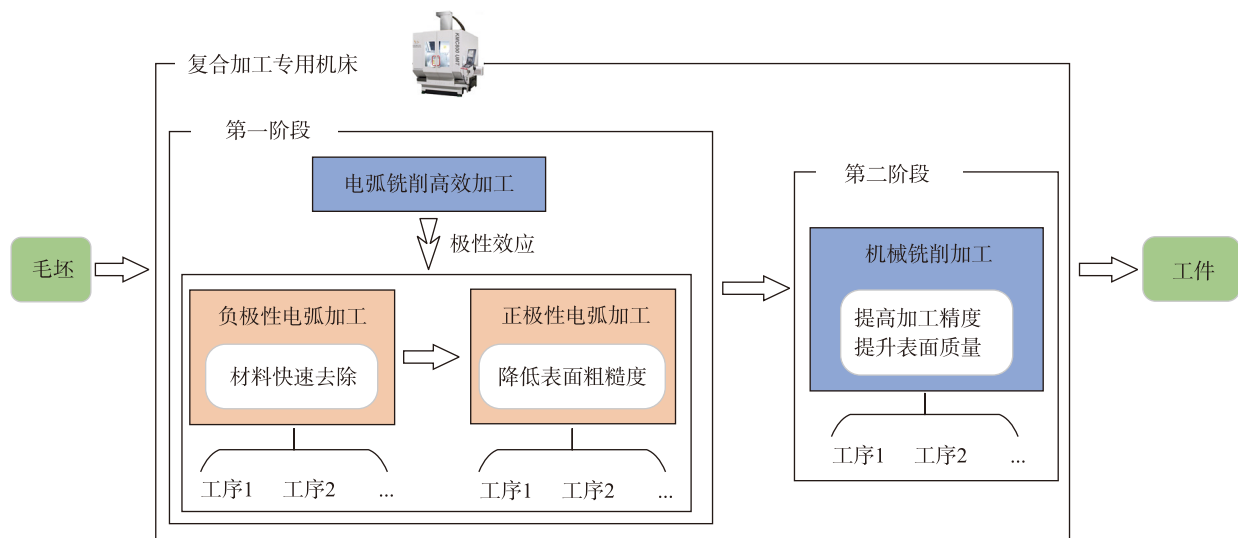


图1 电弧-铣削组合加工方法原理图  
Fig.1 Schematic diagram of the combined machining

在电弧高效加工阶段实施了正极性电弧加工,在一定程度上改善了工件表面质量,但仍然难以满足产品的设计要求。电弧加工中无法避免的电极损耗现象也会造成所加工的工件余量不均匀,尺寸不达标。因此,采用机械铣削的方式来进一步提升加工尺寸精度及表面质量,以满足设计要求。同样,可对比完成电弧加工后的叶轮样件与设计要求的叶轮样件尺寸及表面质量,并结合机械铣削加工工艺,细化机械铣削加工工序。

由于两种加工方式分别属于放电加工和机械加工,材料加工去除的机理完全不同,因此对加工设备的要求存在明显差别,如电弧加工需要机床具有强力内冲液和大功率放电电源供给功能,机床的数控系统也应具有放电状态检测及短路回退等用于实现稳定的放电加工的功能,而为满足机械铣削加工的要求则需要一台数控铣床。若该组合加工方法的两个阶段分别在两台设备上完成,则需要二次装夹、重新对刀,大量增加加工准备时间。因此,为了缩短加工准备时间、提高加工效率,需要研制一台专用机床用于实现上述组合加工过程。

## 2 电弧-铣削组合加工专用机床

本工艺采用自研的高速电弧放电与机械铣削组合加工专用机床实现,该专用机床及两种加工方式采用的刀柄装置如图2所示。该机床是在传统数控机床上进行电弧加工功能扩展而实现的,具备X、Y、Z及A、C五轴联动功能,是集电弧铣削加工、沉入式电弧加工以及机械铣削加工于一体的组合加工机床。用于电弧铣削加工的电极通过电弧铣削加工刀柄装置可安装在机床主轴上,而用于机械铣削加工的铣刀则通过机械铣削刀柄进行安装。电弧铣削加工刀柄装置具有旋转、上电及提供强力内冲液的功能,且和机械铣削加工刀柄均为通用接口,可

通过机床的自动换刀装置实现两者的快速切换。

图3所示为该机床的系统原理图,该机床主要包括机床本体、控制系统、大功率脉冲电源、工作液供给模块、极间放电状态检测模块,以及电弧加工和机械铣削刀柄模块。机床控制系统在传统数控铣削系统的基础上,集成了短路回退、冲液参数及放电参数调节等用于电弧加工的功能。机床所配置的大功率脉冲电源提供电弧放电加工的能量,其可实现峰值电流0~1000A、脉宽及脉间0~10ms的调节。实施电弧加工时,电极和工件分别连接在脉冲电源两端,加工过程中的极间电流、电压信息通过放电状态检测模块被采集,并被进一步处理用于伺服控制,进而实现稳定的放电加工。工作液供给模块提供了分别用于电弧加工和机械铣削加工的内冲液和侧冲两种冲液模式。其中内冲液模式最高冲液压力达5MPa,为电弧加工中流体动力断弧机制的实现提供强力冲液。同时,为避免加工蚀除屑再次流入加工间隙及进入机床主轴等精密部件中,对放电状态及机床使用寿命造成影响,

工作液供给模块还配备多重过滤装置,用于充分过滤掉回流工作液中的加工蚀除屑。

## 加工工序及加工参数

### 1 三元流叶轮样件特征

三元流叶轮是一种具有复杂曲面的通道类零件,被广泛应用于航空航天、水利水电、化工、冶金、能动等领域<sup>[14]</sup>。例如,一台航空发动机中含有多级叶轮,同时三元流叶轮也是液体火箭发动机的关键零件之一。民用工业中,三元流叶轮在水轮机、汽轮机、膨胀机、泵、风机、压缩机等设备中也都有所应用。

本文加工的三元流叶轮毛坯及样件模型分别如图4(a)和(b)所示,该样件最大直径为256mm,轮毂面上均匀分布8片叶片,叶片最薄处为0.74mm,最厚处为2.4mm,具有厚度薄、扭曲大的特征,流道曲面最窄处为19.5mm,样件表面粗糙度 $R_a$ 要求为 $1.6\mu\text{m}$ 。三元流叶轮通常采用高温合金材料,但由于本文中的加工试验目的在于验证电弧加工技术,在具有复杂曲面特征零部件生产方面的能力及对后续精加工工艺的友好

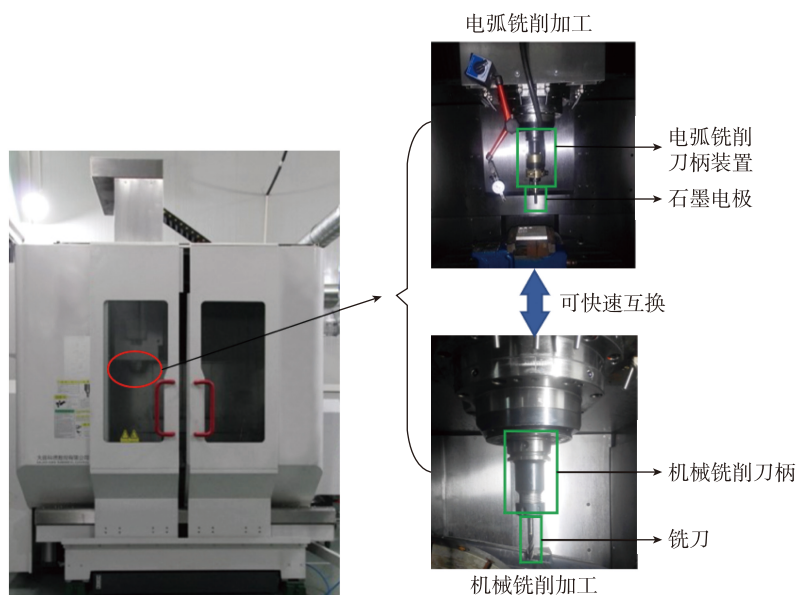


图2 组合加工专用机床及刀柄装置

Fig.2 Special machine tool and tool holder devices for combined machining

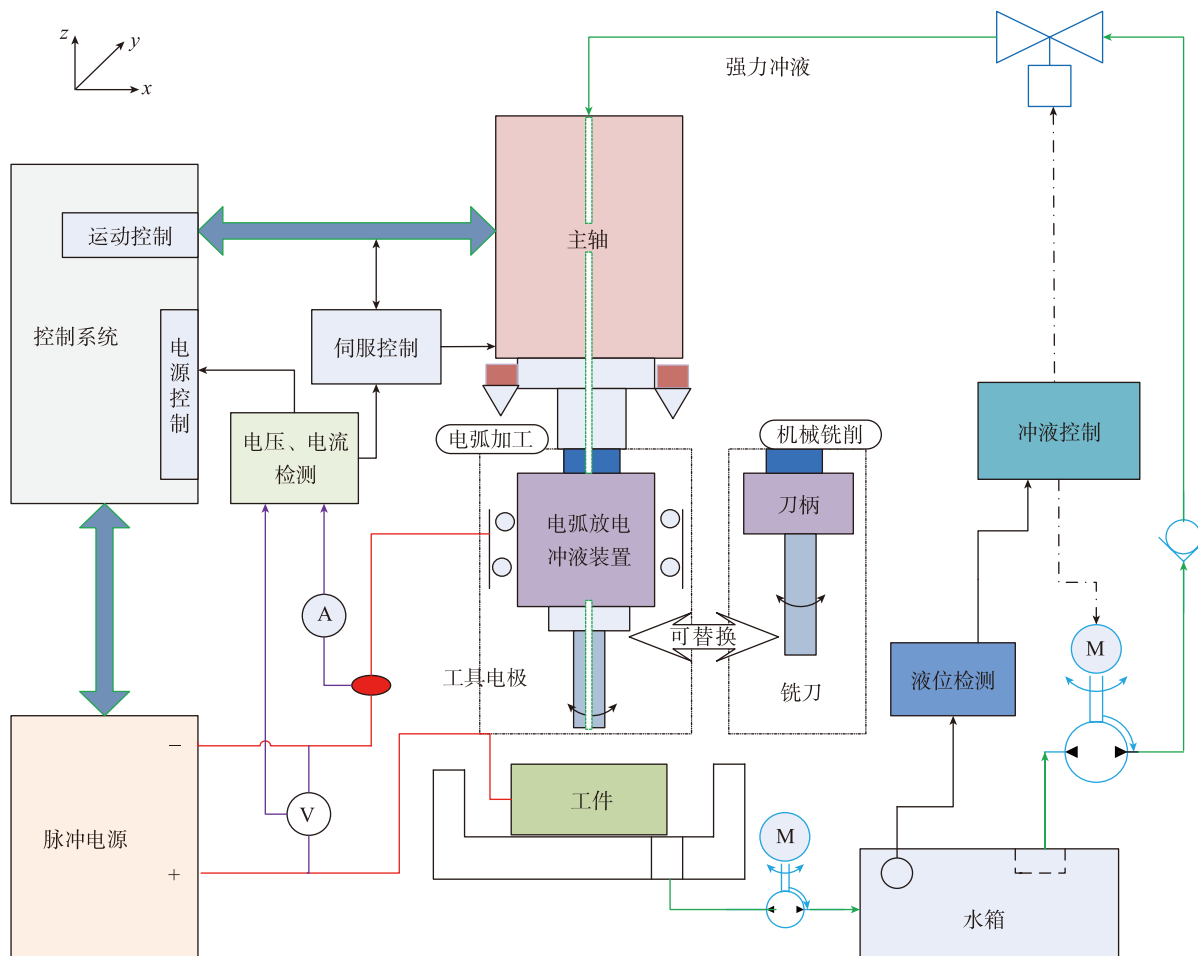
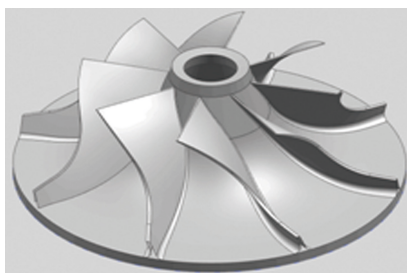


图3 组合加工专用机床系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of machine tool system for combined machining



(a) 叶轮毛坯模型



(b) 叶轮样件模型

图4 三元流叶轮毛坯及样件模型

Fig.4 3D model of blank and flow impeller workpiece

性,而电弧加工高温合金材料的高效性已经在前期的研究中得到充分证实<sup>[7,15]</sup>,同时已经报道的研究表明不锈钢和高温合金的电弧加工效率相近<sup>[7,11,15]</sup>,因此考虑到成本控制的因素,本文中的三元流叶轮样件采用不锈钢材料。

## 2 加工工序划分及参数选择

### 2.1 电弧铣削加工工序

根据前文中介绍的组合加工原理,受极性效应影响,电弧铣削加工阶段,为了工件材料的高效率去除,需要首先进行负极性电弧加工;为了降低负极性电弧加工表面的粗糙

度、获得对后续机械加工工艺友好的表面质量,需要继续实施正极性电弧加工。进一步地,根据前期积累的电弧加工经验,峰值电流在100~300A范围内的正极性电弧加工往往能够取得相对较好的表面质量。此外,前期积累的电弧加工经验还表明,电弧加工工序完成后,需要为后续的切削加工保留足够的加工余量,通常在2mm左右。因此,结合三元流叶轮样件特征及加工要求,将加工过程分成流道大能量电弧加工、流道中等能量电弧加工、叶片中等能量电弧加工、流道小能量电弧加工、叶片小能量电弧加工5个加工工序,其中大能量工序采用负极性加工,中等能量和小能量工序采用正极性加工。各工序采用的主要加工参数如表1所示,

大、中、小能量对应的主要参数见表2。工具电极采用带多内冲液孔的棒状石墨电极。为提高加工尺寸精度及减少放电空走刀时间,在加工过程中使用定时对刀策略对电极轴向损耗长度进行补偿。叶轮样件的电弧铣削加工现场如图5所示。

## 2.2 机械铣削加工工序

对比完成电弧加工后的叶轮样件与设计要求的叶轮样件尺寸及表面质量,将机械铣削加工过程分为两道工序,详细加工参数如表3所示,采用直径12mm的硬质合金球头铣刀。

## 试验结果及分析

为验证电弧加工对后续加工工艺的友好性及检验最终加工结果是否达标,从表面粗糙度、硬度两个方面对试验结果进行分析。此外,还对各工序的材料去除率进行计算,验证该组合加工方法用于具有复杂曲面特征零部件制造任务时的高效特点。

### 1 表面粗糙度

为直观对比中等能量电弧加工、小能量电弧加工、机械铣削加工后的工件表面,本三元流叶轮样件只针对部分流道和叶片进行电弧小能量和机械铣削加工,最终的样件如图6所示。中等能量电弧加工工序完成后,叶轮样件单个流道形貌如图7所示。可以看出:叶轮样件加工表面整体上较为光整,未出现电弧驻留放电点,体现了该专用机床良好的断弧性能和伺服控制性能;然而,由于加工过程中电极发生损耗及轨迹重叠率、切深等加工参数选取的原因,叶片及流道表面仍可以观察到较为明显的突起。实施小能量电弧加工工序,得到如图8所示的单个流道形貌。对比中等能量及小能量电弧加工后的单个流道形貌,发现小能量电弧加工工序对上一工序的加工表面修整效果十分显著。这是因为电弧

表1 电弧铣削详细加工参数

Table 1 Detailed parameters of EAM milling

加工工序	加工余量/mm	切深/mm	电极直径/mm
流道大能量电弧加工	4	4	16
流道中等能量电弧加工	3	—	16
叶片中等能量电弧加工	3	3	16
流道小能量电弧加工	2.5	—	10
叶片小能量电弧加工	2.5	1	10

注:电极转速 1200r/min,冲液压力 1.2MPa。

表2 电源参数

Table 2 Parameters of pulse generator

放电能量	峰值电流/A	脉宽/ms	脉宽/ms	电极极性
大能量	500	8	3	-
中等能量	500	8	4	+
小能量	200	4	4	+

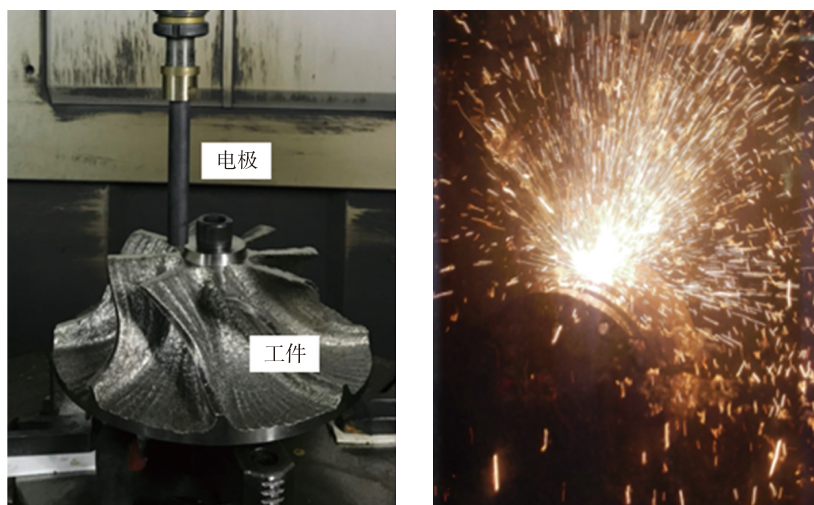


图5 样件电弧加工

Fig.5 EAM of the workpiece

表3 机械铣削加工参数

Table 3 Parameters of CNC milling

加工工序	加工余量/mm	切深/mm	步距/mm	主轴转速/(r·min <sup>-1</sup> )	进给速度/(mm·min <sup>-1</sup> )
机械铣削加工 1	0.6	0.5	0.2	2000	400
机械铣削加工 2	0	0.2	0.2	3000	600

加工本质上是一个热蚀除过程,单个脉冲放电能量的大小将决定传递到工件表面热量的多少,进而决定放电蚀坑的大小。单个脉冲能量越大,蚀坑越大,而加工表面是一个个蚀坑累积形成的,因此加工表面粗糙度也会越高,反之,粗糙度越低。同时,小能量加工工序中采用直径 10mm 的电

极,相比于中等能量加工工序中直径 16mm 的电极,变相增加了加工轨迹的重叠率,使得加工表面更为平整。在使用机械铣削方式对电弧加工表面进行后续加工过程中,刀具磨损小、加工状态稳定、未出现异常加工情况,机械铣削后的单个流道形貌如图 9 所示。

由于叶轮样件表面为复杂曲面,使用粗糙度仪测量表面粗糙度难度较大。为便于分析对比各工序加工完成后的表面粗糙度,使用与中等能量电弧加工工序、小能量电弧加工工序及机械铣削精加工工序中相同的加工参数分别加工出长度 50mm 的单道槽,并对其进行粗糙度测量。各单道槽及粗糙度测量结果分别如图 10 所示,可以看出小能量电弧加工的表面粗糙度  $R_a$  为  $12.5\mu\text{m}$ ,相对中等能量电弧加工的表面粗糙度  $R_a 24.3\mu\text{m}$  有显著的降低。同时,对比两种能量电弧加工表面的显微图像,小能量电弧加工表面的蚀坑在尺寸上明显小于中等能量电弧加工的表面,这与上文中的分析结果相同。机械铣削精加工的表面粗糙度为  $R_a 1.2\mu\text{m}$ ,达到样件设计要求。

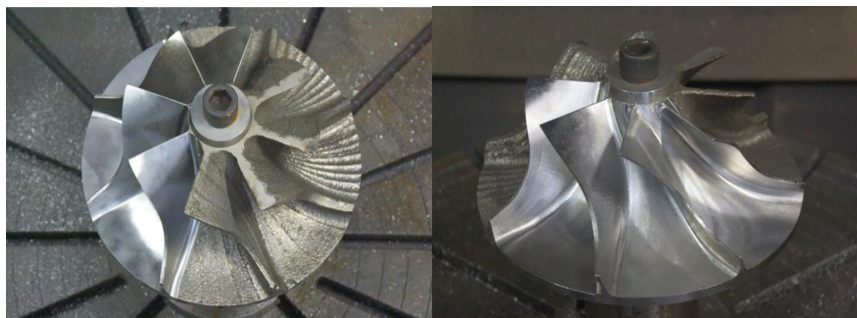


图6 机械铣削加工-电弧粗加工对比样件  
Fig.6 Comparison of CNC milling finishing-EAM roughing samples



图7 中等能量电弧加工的流道  
Fig.7 Channel machined in mid-energy



图8 小能量电弧加工的流道  
Fig.8 Channel machined in small-energy

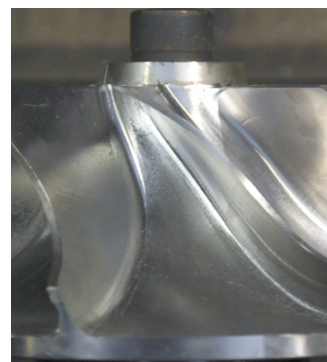


图9 机械铣削加工后的流道  
Fig.9 CNC machined channel

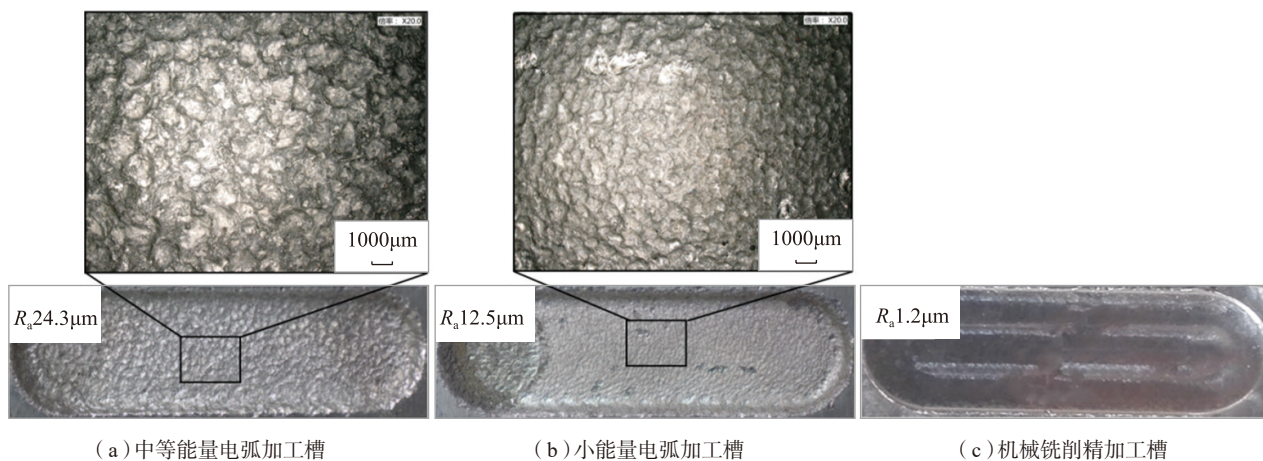


图10 单道槽及粗糙度测量结果

Fig.10 Single slots and roughness measurement results

## 2 加工表面硬度

与表面粗糙度测量相同,若使用台式硬度计直接对叶轮样件表面进行硬度测量,难以获得准确的测量数值。因此,还是对各单道槽进行硬度测量,测量结果如图 11 所示。可以看出,中等能量电弧加工后的表面硬度为 75.6HRB,较基体硬度 71.2HRB 而言有所增加,而小能量电弧加工和机械铣削精加工后的表面硬度与基体大致相同。这是因为中等能量电弧加工中,较多工件材料被电弧等离子体加热蚀除,又在强力内冲液的作用下急速冷却重新凝固在工件表面,加工结束后,这种类似于淬火的过程使得工件表面硬度增加。而小能量电弧加工过程中蚀除材料较少,且蚀除的材料大都被工作液带走,工件表面重新凝固的材料较少,因此硬度和基体比较没有明显变化。另外,根据以往的电弧加工经验,工件加工表

面热影响层厚度在 100 $\mu\text{m}$  以内,因此电弧加工后的表面对后续切削加工而言,具有较好的可加工性。

## 3 材料去除率

在叶轮样件组合加工过程中,对各工序的工件材料去除率进行计算,得到如表 4 所示的结果,可以看出大、中、小能量的电弧加工工序中最大材料去除率分别为 14500 $\text{mm}^3/\text{min}$ 、5000 $\text{mm}^3/\text{min}$  和 3200 $\text{mm}^3/\text{min}$ ,都保持在较高水平,且由于电弧加工使用较为经济的石墨作为电极材料,相比于高性能铣削刀具,加工成本有显著降低。

后续使用工业扫描仪对最终样件的尺寸、形位精度进行检测,检测结果符合设计要求,且由于机械铣削加工过程中切削余量小,有效抑制了加工变形,样件达标,该组合加工方法用于具有复杂曲面特征零部件制造任务的可行性得到证实。

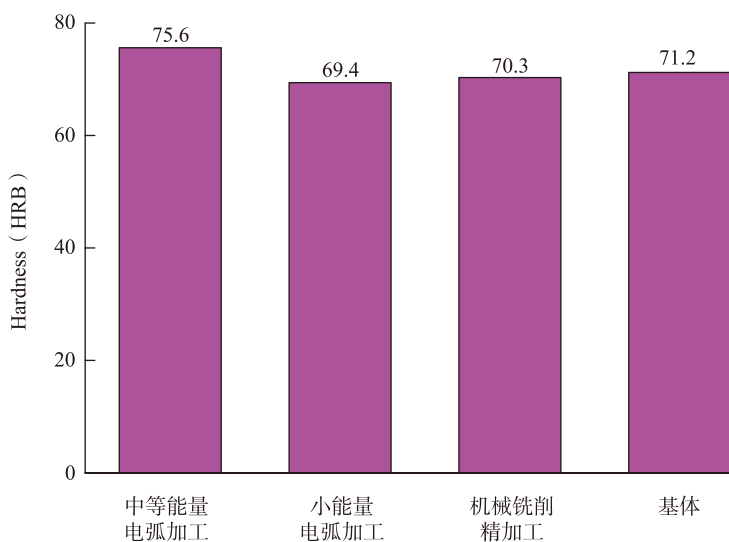


图11 各工序加工表面硬度

Fig.11 Surface hardness of each process

表4 各工序中的最大材料去除率

Table 4 Maximum material removal rate in each machining step  $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

流道大能量 电弧加工	流道、叶片 中等能量电弧加工	流道、叶片 小能量电弧加工	机械铣削 半精加工	机械铣削 精加工
14500	5000	3200	2400	1440

## 结论

为进一步验证电弧加工应用于航空零部件生产制造任务的能力及对后续精加工工艺的友好性,本文实施了三元流叶轮样件的五轴电弧铣削与机械铣削组合加工验证试验。该叶轮样件的叶片厚度薄、扭曲大,属于典型的复杂曲面特征。加工试验结果表明:

(1) 合理安排电弧加工工序,可以在实现材料高效去除的同时,取得较优的表面质量。小能量电弧加工表面粗糙度  $R_a$  为 12.5 $\mu\text{m}$ ,加工表面硬度为 69.4HRB,较基体硬度未有明显变化,且热影响层厚度在 100 $\mu\text{m}$  以内,从理论上证实了电弧加工可以很好地适应后续切削加工要求。

(2) 大、中、小能量的电弧加工工序中最大材料去除率分别为 14500 $\text{mm}^3/\text{min}$ 、5000 $\text{mm}^3/\text{min}$ 、3200 $\text{mm}^3/\text{min}$ ,都保持在较高水平,与传统机械加工相比,具有很好的加工效率和成本优势。

(3) 机械铣削加工过程中,刀具磨损小、加工状态稳定,进一步验证了电弧加工工艺的友好性。

(4) 三元流叶轮样件加工结果达到设计要求,取得良好结果,充分体现了电弧铣削与机械铣削新型组合加工工艺用于具有复杂曲面特征零部件制造任务的可行性。

## 参考文献

[1] 李郁,田卫军,雷玲,等.航空典型难加工材料切削加工技术研究进展[J].装备制造技术,2018(4):12-17.

LI Yu, TIAN Weijun, LEI Ling, et al. Research progress of processing technique of difficult-to-machine aviation material[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(4): 12-17.

[2] MACHADO A R. Machining of titanium and its alloys-a review[J]. Journal of Metals, 1990, 37(4): 27-35.

[3] 傅玉灿.难加工材料高效加工技术[M].西安:西北工业大学出版社,2016.

FU Yucan. High efficiency machining technology for difficult materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016.

[4] 顾琳. 电弧放电加工——航空难切削材料的高效加工技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 36-41.

GU Lin. Electrical arc machining—high efficient machining technology for difficult-to-cut aeronautical materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(3): 36-41.

[5] TRIMMER A L, HAYASHI S, LAMPHERE M. Advancement in high speed electro-erosion processes for machining tough metals[C]//ISEM-16. Shanghai, 2010: 193-196.

[6] 郭成波. 钛合金电火花高效铣削电极运动轨迹控制及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

GUO Chengbo. Research on electrode path control and process of edm high efficiency milling for titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[7] WANG F, LIU Y H, JI R J, et al. Machining performance of inconel 718 using high current density electrical discharge

milling[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2013, 28(10): 1147-1152.

[8] 陈吉朋, 顾琳, 徐辉, 等. SiC<sub>p</sub>/Al 高速电弧放电加工研究[J]. 电加工与模具, 2015(2): 17-20.

CHEN Jipeng, GU Lin, XU Hui, et al. Research on the machining performance of SiC<sub>p</sub>/Al utilizing the blasting erosion arc machining method[J]. Electromachining & Mould, 2015(2): 17-20.

[9] CHEN J, GU L, ZHU Y, et al. High efficiency blasting erosion arc machining of 50 vol.% SiC/Al matrix composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017: 095440541769055.

[10] GU L, CHEN J, XU H, et al. Blasting erosion arc machining of 20 vol.% SiC/Al metal matrix composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9-12): 2775-2784.

[11] ZHAO W, XU H, GU L, et al. Influence of polarity on the performance of blasting erosion arc machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 213-

216.

[12] ZHU Y, CHEN J, XU H, et al. Research on the surface quality of the blasting erosion arc machined stainless steel[J]. Procedia CIRP, 2016, 42:252-256.

[13] ZHANG R, ZHANG Y, LIU Y, et al. Energy distribution and material removal of electric arc machining (EAM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 242: 110-116.

[14] 卢列. 三元流叶轮的数字化制造技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

LU Lie. The digital manufacturing technology of three-dimensional flow impeller[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[15] XU H, GU L, CHEN J, et al. Machining characteristics of nickel-based alloy with positive polarity blasting erosion arc machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 937-94.

通讯作者: 顾琳, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为难切削材料的高效加工技术及装备, E-mail: lgu@sjtu.edu.cn.

## Combined Machining of Three-Dimensional Flow Impeller by EAM Milling and CNC Milling

HE Guojian, GU Lin, DONG Haihong, ZHU Yingmou, ZHAO Wansheng

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**[ABSTRACT]** A processing method and equipment for achieving arc and milling combined machining was firstly introduced. Then, in order to further verify the feasibility of electrical arc machining (EAM) in the production of aerospace components and its friendliness to subsequent finishing processes, a combined machining of three-dimensional flow impeller sample with complex contour features by EAM Milling and CNC milling was conducted by utilizing a self-developed special machine tool. The results show that the reasonable arrangement of the EAM process can achieve satisfying surface quality while obtaining efficient material removal. The maximum material removal rate (MRR) in EAM was 14500mm<sup>3</sup>/min. The surface roughness after small energy EAM was  $R_a$ 12.5 $\mu$ m, and the hardness of the machined surface was 69.4HRB, which had no obvious change compared with the hardness of the substrate. Thus, the surface after the small energy EAM can be well adapted to the cutting requirements, which effectively confirms the friendliness of the EAM process. In the subsequent CNC milling process, the tool wear was small and the state during machining was stable. The surface roughness finally obtained was  $R_a$ 1.2 $\mu$ m, and due to small cutting allowance, the machining deformation is effectively suppressed. Processing results of the sample flow channel met the design requirements, which fully demonstrates the feasibility of applying the combined processing method to the manufacturing of engine components with complex contour features.

**Keywords:** EAM milling; Combined machining; Five-axis machining; Three-dimensional flow impeller; Complex contour  
(责编 海山)