

引文格式: 徐正扬, 王京涛, 刘嘉, 等. 航空发动机叶片脉动分步精密电解加工方法研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 42-48, 64.
 XU Zhengyang, WANG Jingtao, LIU Jia, et al. Study on stepwise pulsant precision electrochemical machining method for aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 42-48, 64.

航空发动机叶片脉动分步精密电解加工方法研究*

徐正扬, 王京涛, 刘嘉, 朱栋, 魏浩迪

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 电解加工在欧美航空发动机叶片或整体叶盘等核心部件的高效、精密制造中起到了重要作用。传统叶片电解加工模式中, 叶盆工具电极和叶背工具电极相向运动, 同时加工出叶型和进排气边轮廓, 此时叶型精度易保证而进排气边精度低。提出了叶片脉动分步精密电解加工方法, 旨在在进一步提高叶身型面精度的同时提升进排气边轮廓精度。叶片电解加工分为两个不同的阶段, 首先通过脉动态变参数模式进行叶身型面精密电解加工, 其次利用微量脉冲电解模式进行进排气边的切向电解加工。阐述了脉动态变参数加工方法和进排气边微量脉冲切向加工方法在成型机理和工艺试验等方面的研究, 并针对传统径向流场中存在被动分流的问题, 提出了主动分流式径向流场。试验结果表明, 提出的精密电解加工方法表现出很好的工艺效果, 叶盆型面和叶背型面的轮廓度加工误差分别为 $-0.013\sim 0.025$ mm 和 $-0.003\sim 0.030$ mm, 进气边轮廓度加工误差为 $-0.034\sim 0.041$ mm, 排气边轮廓度加工误差为 $-0.038\sim 0.034$ mm, 叶盆型面和叶背型面的表面粗糙度分别为 $R_a 0.333$ μm 和 $R_a 0.287$ μm 。提出的方法为实现航空发动机叶片的高精度制造提供了新的解决途径, 并可用于其他复杂型面类部件的电解加工。

关键词: 电解加工 (ECM); 分步式加工; 脉动态; 微量脉冲; 叶片; 整体叶盘; 航空发动机

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.17.042



徐正扬

教授, 博士生导师, 长期从事特种加工技术的研究与教学工作, 入选中组部“万人计划”领军人才。

航空发动机是飞机的“心脏”, 被誉为现代工业“皇冠上的明珠”^[1-2]。发动机中存在大量叶片、整体叶盘、扩压器等复杂结构, 其型面扭曲、叶身超薄、进排气边缘曲率变化剧烈, 且材料多为镍基高温合金、钛合金等难切削材料, 加之其制造精度和表面质量要求极高, 这些特点给制造带来巨大挑战。使用传统切削方法加工此类零部件时常常存在问题, 如加工应力、微裂纹和刀具磨损等^[3-5]。此外, 整体叶盘叶栅通道窄、开敞性差等因素也制约了传统切削方法的效率和经济性。电解加工是基于电化

学溶解原理, 借助于成型的工具电极, 将工件按照一定的形状和尺寸加工成形的一种非常规加工方法^[6], 具有许多独特的优点, 例如可加工性与工件材料力学性能无关、无工具损耗、无重铸层、少无加工力、生产效率高、可批量生产等。由于这些特点, 电解加工在航空强国受到普遍重视。如德国 MTU、英国罗·罗公司和美国 Teleflex · Aerospace 公司都将电解加工作为叶片、整体叶盘、机匣等关键部件的首选制造技术^[7]。

随着航空发动机的持续发展和不断改型升级, 航空发动机叶片、整

* 基金项目: 国家科技重大研发专项 (2017-VII-0004-0097); 国家自然科学基金创新研究群体 (51921003)。

体叶盘等关键零部件的精度要求日益提高,给电解加工技术带来了挑战。制约宏观电解加工精度提升主要有两点原因:(1)加工间隙中各类产物沿电解液流程积累,影响了间隙内电场、流场和电化场的分布;(2)无法准确地描述间隙内电导率的变化规律,不能准确计算和预测极间间隙分布,制约了工具形状的精确设计。近年来,许多学者在这两方面开展了研究工作,例如,采用工具电极辅以周期性振动的电解加工模式,使加工间隙交替扩大和缩小,以强化加工间隙内各类产物的输运,改善电解液的流动状态和电导率分布。Schaarschmidt等^[8]建立了振动进给电解加工的多物理场模型,预测了工件最终加工的形状轮廓。Liu^[9]和Fang^[10]等在电解加工中引入工具电极振动强化了电解质更新及电解产物的输运。此外,高频脉冲电源替代直流电源强化了电解产物的更新,改善了电学溶解定域性。Volgin等^[11]分析了脉冲开启和脉冲关闭时间对超短脉冲电解加工的影响,建立了双电层充电时间的近似解析模型。Lyubimov等^[12]研究表明,使用脉冲电流可以减少加工间隙,提高加工精度。在叶片或整体叶盘电解加工技术上,国内外开展了大量的研究,如Demirtas^[13]和Paczkowski^[14]等提出了一种高曲率自由曲面电解加工阴极轮廓的数学模型,求解工具阴极设计轮廓。国内有南京航空航天大学、中国航空制造技术研究院、沈阳黎明航空发动机集团有限责任公司等长期进行系统的研究。南京航空航天大学朱荻等^[15]开展了整体叶盘、叶片和机匣的脉动态电解加工,有效提升了整体叶盘的电解加工精度和加工稳定性,取得了实质性的突破。Wang等^[16]开展了钛铝叶片的电解加工研究,解决了钛铝叶片电解加工表面的缺陷,表面质量得到明显改善。张晓博^[17]、Lei^[18]等开展了叶型弯扭、通道狭小的整体

叶盘薄壁叶片的旋转偏移套料电解加工,余量差显著减小。Wang等^[19]提出了工具阴极和工件协同旋转进给方法,提升了整体叶盘叶栅通道电解预加工的余量均匀性。此外,中国航空制造技术研究院针对航空发动机整流器开展了精密振动电解加工研究,优化了工艺参数,加工出的叶型轮廓度误差可达 $-0.023\sim-0.025$ mm,表面粗糙度达到 $R_a 0.55\ \mu\text{m}$ ^[20]。沈阳黎明航空发动机集团有限责任公司开展了精密电解套料阴极设计与优化研究,解决了套料电解加工中流场不均等问题^[21]。

目前,在整体叶盘或叶片精密电解加工中,叶盆工具电极和叶背工具电极分别沿着最优进给方向相向进给,同时加工出叶身型面以及进排气边。此时叶身型面法线方向与工具电极进给方向夹角通常小于 45° ,为端面加工,叶型精度可得到较好保证,然而进排气边的法线方向与工具电极进给方向夹角接近 90° ,为侧向加工,轮廓精度很难精确控制。为了进一步提升复杂叶片型面电解加工精度,同时保证和提升进排气边特殊区域的加工精度,本文提出了脉动分步精密电解加工方法。在叶片电解加工过程中,先采用脉动态变参数模式进行叶身型面精密电解加工,然后采用微量脉冲切向电解加工模式进行进排气边加工,有效实现了叶片全轮廓高精度电解加工。

1 脉动分步精密电解加工方法

为了提高叶片全轮廓加工精度,提出了脉动分步精密电解加工方法,原理如图1所示。在叶片电解加工过程中,先采用脉动态变参数模式进行叶身型面精密电解加工,并在进排气边保留一定加工余量,随后采用微量脉冲切向电解加工模式进行进排气边加工。在叶身型面脉动态变参数加工过程中,叶盆工具电极和叶背工具电极分别面向叶片毛坯沿最优

进给方向做匀速进给运动+周期性往复振动运动,在振动周期内,当加工间隙达到最小值附近时进行通电加工,其余时刻断电,使间隙内的溶液获得彻底更新。在进排气边切向电解加工过程中,首先将叶片不同截面轮廓投影到同一平面上,在截面轮廓中绘制若干内切圆,然后将所有内切圆圆心从进气边到排气边依次连接构成中弧线,在中弧线与进气边、排气边交点处向轮廓外侧做中弧线切线,取该切线方向作为中弧线矢量方向。定义进排气边工具电极最优进给方向为最大中弧线矢量方向 v_{upper} 和最小中弧线矢量方向 v_{lower} 的角平分线。进气边工具电极和排气边工具电极分别沿最优进给方向进给,通过微量脉冲电解加工模式完成叶片进排气边加工。

2 叶身型面脉动态变参数电解加工模式

脉动分步精密电解加工方法中,首先利用脉动态变参数电解加工模式进行叶身型面加工,其原理如图2所示。脉动态,是指在匀速进给的工具电极上叠加一个频率数为 $10\ \text{Hz}$ 的微幅振动,当工具电极与阳极工件之间的加工间隙达到最小值附近时施加微量脉冲电流,进行电解加工,其余时刻断电使得间隙内的溶液获得彻底更新。其优势在于阳极溶解始终发生在间隙最小值附近,可获得更高的加工精度。其次,在极短暂的加工周期内加工产物积累少,加工产物在脉动周期的间歇期间足以“重新清零”,提高了加工状态的一致性,并使得微小间隙得以实现。所谓变参数,是指在提升精度的同时,为了兼顾加工效率和稳定性,将工艺过程分为预成型阶段和小间隙精密成型阶段两个不同阶段。在预成型阶段,采用超长脉冲电流匹配大振幅来均匀叶片毛坯的余量分布,并确保加工的

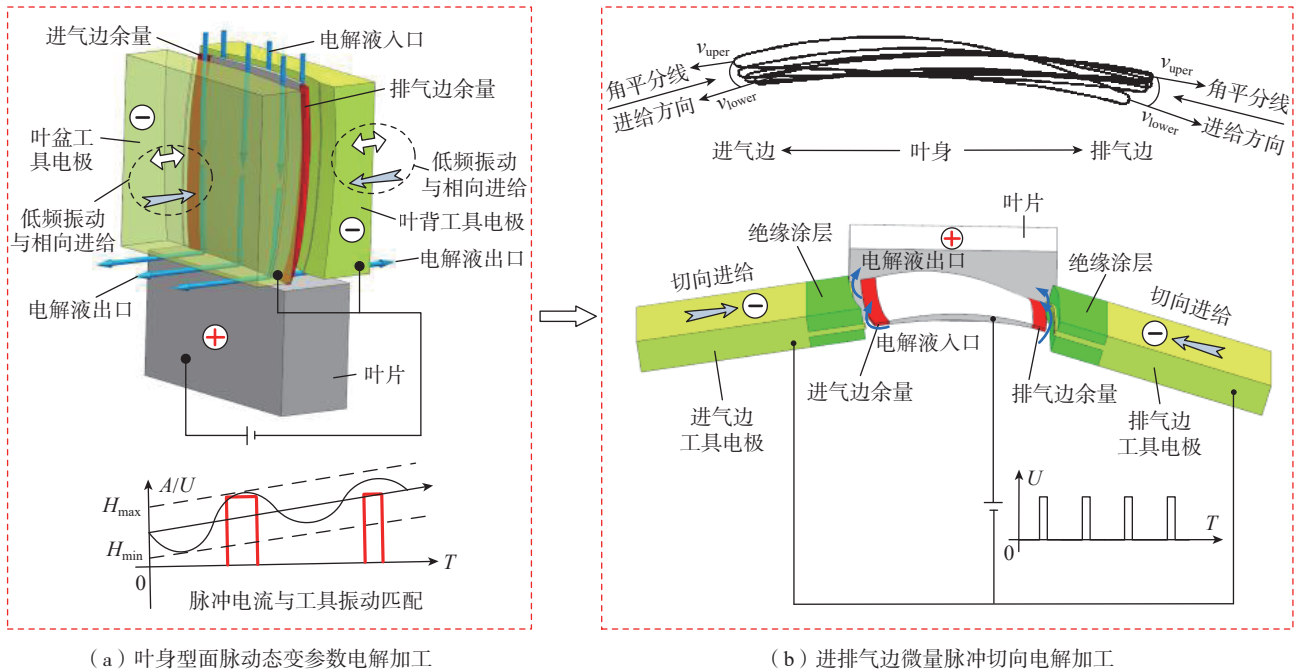


图1 脉动分步精密电解加工方法
Fig.1 Pulsant stepwise precision electrochemical machining

高效率。在小间隙精密成型阶段，则采用超短脉冲电流匹配微振幅，实现叶身型面的小间隙精密电解加工，得到更为精确的叶身型面。

在叶身型面脉动态变参数电解加工过程中，电解液流场状态会随着叶盆工具电极和叶背工具电极的振动进给而产生变化。为了解决传统径向流动模式下电解液存在被动分流的弊端，提出了一种主动分流式径向流场模式。主动分流，是指电解液从叶尖被主动分成两股液流，使流入叶盆和叶背的电解液流量得以主动控制，如图3所示。根据叶尖轮廓中弧线设计了分流装置，分流装置呈楔形状，其前端厚度和最终叶片的厚度一致。此外，根据叶盆截面线和叶背截面线设计电解液导流装置，引导电解液有序流入加工区域，导流装置可以与工具电极同步振动进给。该流场模式的最大优势为在叶片最终成型阶段电解液与叶尖之间的碰撞被有效消除，有效解决了叶片尖端被动分离电解液和流量分布不均匀的问题，提高了加工稳定性。

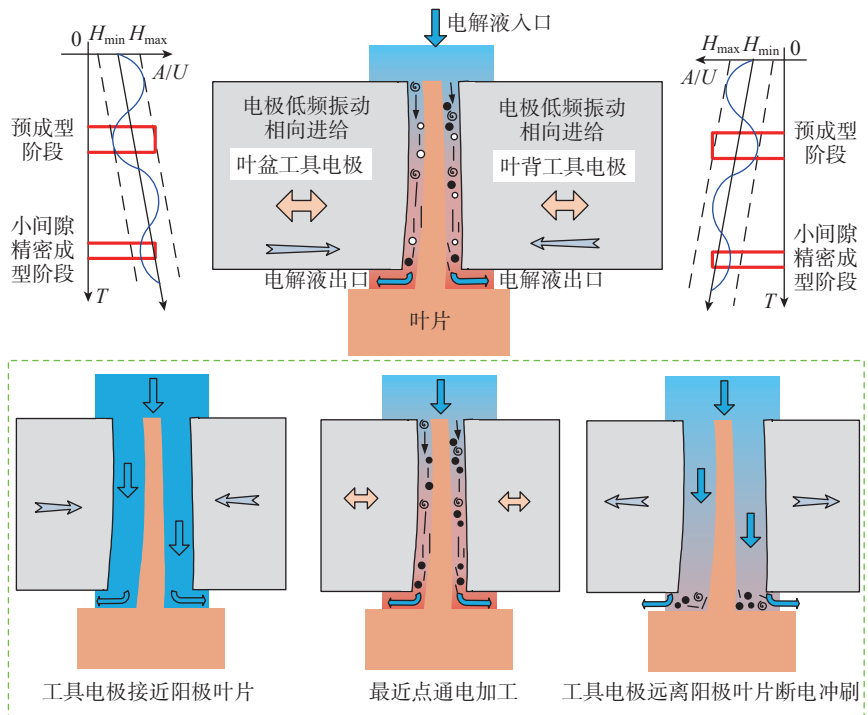


图2 叶身型面脉动态变参数电解加工
Fig.2 Pulsant dynamic variable parameter electrochemical machining of blade profile

针对电解液主动分流式径向流动模式开展了流场仿真研究。电解液入口和出液口背压分别为 0.95 MPa 和 0.15 MPa。图 4 (a) 为加工

区的压力云图，可以看出，压力损失沿电解液入口到出口的流动方向逐渐增加。整个流场模式没有负压，这有利于促进电解液的有序流动，提高

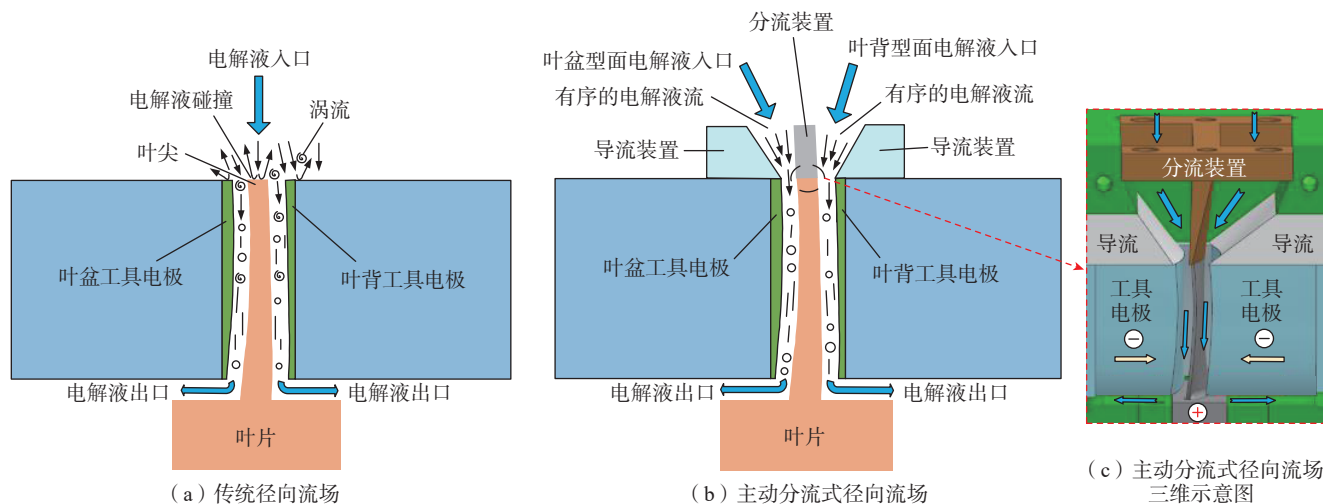


图3 传统径向流场与主动分流式径向流场对比

Fig.3 Comparison of traditional radial flow field and active diversion radial flow field

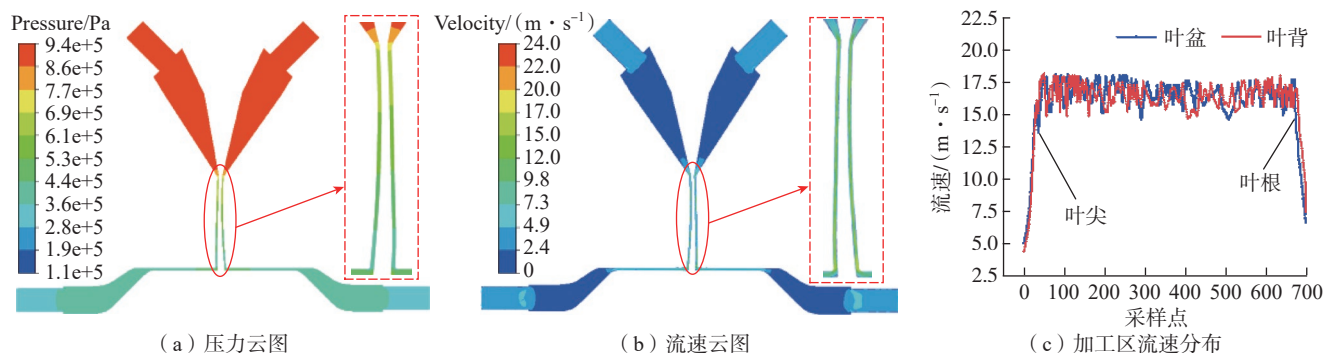


图4 主动分流式径向流场仿真结果

Fig.4 Simulation results of active diversion radial flow field

叶身型面加工的稳定性。研究已表明,加工区流道无负压时,电解加工更稳定^[22]。图4(b)为加工区的速度云图,加工区域相对于非加工区域具有较高的流速,以满足叶身型面高加工精度的要求。叶盆和叶背加工区域的速度分布如图4(c)所示,可以看出,电解液流入叶盆和叶背的速度大于15.5 m/s。根据Wang等^[23]的研究,电解加工中电解液的流速范围一般为10~60 m/s。因此,该模型下电解液的流速足以快速冲走加工区域中的电解产物、气泡和焦耳热,满足叶片电解加工对电解液流速的需求。

以航空发动机镍基高温合金(GH4169)叶片为对象,采用电解液主动分流式径向流动模式进行叶身型面脉动态变参数电解加工工艺试

验。叶身型面脉动态变参数电解加工采用两步变参数电解加工策略,分别为预成型阶段和小间隙精密成型阶段,如图5所示。在第1步预成型阶段中,采用占空比5/12、振动幅度0.4 mm和进给速度0.12 mm/min的大参数进行脉动态电解加工,实现叶身毛坯的大余量去除和叶身型面预成型,保证加工的稳定性和高效率;在第2

步小间隙精密成型阶段中,采用占空比1/12、振动幅度0.2 mm和进给速度0.05 mm/min的小参数进行脉动态电解加工,实现叶身型面的高精度成型。这两个加工步骤是连续进行的,即在第1步结束后只需自动调整部分参数,即可开始第2步加工。详细试验参数如表1所示。

图6为使用脉动态两步变参数

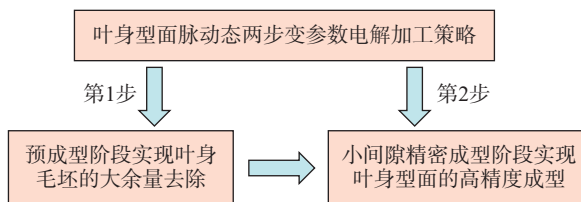


图5 叶身型面两步变参数脉动态电解加工策略示意图

Fig.5 Schematic diagram of two-step pulsant dynamic variable parameter electrochemical machining of blade profile

表 1 脉动分步精密电解加工参数

Table 1 Pulsant stepwise precision electrochemical machining parameters

试验参数	预成型阶段	小间隙精密成型阶段
电解液	20% NaNO ₃	20% NaNO ₃
电解液温度/°C	30±0.3	30±0.3
电解液压力/MPa	0.95	0.95
加工电压/V	20	20
工具阴极振动频率/Hz	10	10
占空比/%	5/12	1/12
工具阴极振动幅度/mm	0.4	0.2
进给速度/(mm·min ⁻¹)	0.12	0.05

电解加工制造的叶片样品。可以看出,叶片表面非常光滑,没有流痕和短路烧伤等加工缺陷。为了更准确地表征叶身型面的表面质量和加工精度,从叶根到叶尖依次在叶盆型面和叶背型面上选取了5条测量线(测量线1、测量线2、测量线3、测量线4和测量线5),该测量线与叶片底座的高度位置尺寸分别为32 mm、38 mm、44 mm、50 mm、56 mm。经表面粗糙度仪检测获得了叶身型面测量线处的表面粗糙度,可以看出叶盆

型面的表面粗糙度为 R_a 0.333~0.362 μm ,叶背型面的表面粗糙度为 R_a 0.287~0.358 μm 。此外,采用等距采样的测量方法,从排气边到进气边方向,依次对叶盆型面和叶背型面测量线处的轮廓偏差进行测量,型面采样距离为30 mm,经三坐标测量机检测获得了叶身型面的误差分布。可以看出,叶盆型面的轮廓度误差为-0.013~0.025 mm,叶背型面的轮廓度误差为-0.003~0.030 mm,其具体的误差分布如图7所示。综上所述

述,采用脉动态两步变参数电解加工模式制造的叶片具有较高的表面质量和叶型轮廓精度。

3 叶片进排气边微量脉冲切向电解加工方法

叶身型面加工完毕后,进排气边留有一定的余量,此时采用微量脉冲切向电解加工方法进行进排气边的加工。该方法是工具电极沿切向进给,以间歇式微量电流模式进行周期断续的电化学溶解,如图8所示。它利用脉间的断电间歇去极化、散热,使间隙内的电化学特性、流场、电场分布恢复起始状态。在加工过程中,进气边工具电极和排气边工具电极分别沿中弧线端部的角平均线向进气边/排气边进给,电解液流动方式采用从进排气边一侧流入,翻过进排气边流至另一侧的侧流式流场方式。加工过程中脉宽通电加工时间尽量短暂,避免造成产物的显著积累;脉间断电时间适当延长,使得间隙内的电解产物在脉冲间歇期间能够及时排出。该方法最大的优势有3点:一是可实现小间隙加工,提高工件加工精度;二是进排气边在其加工过程

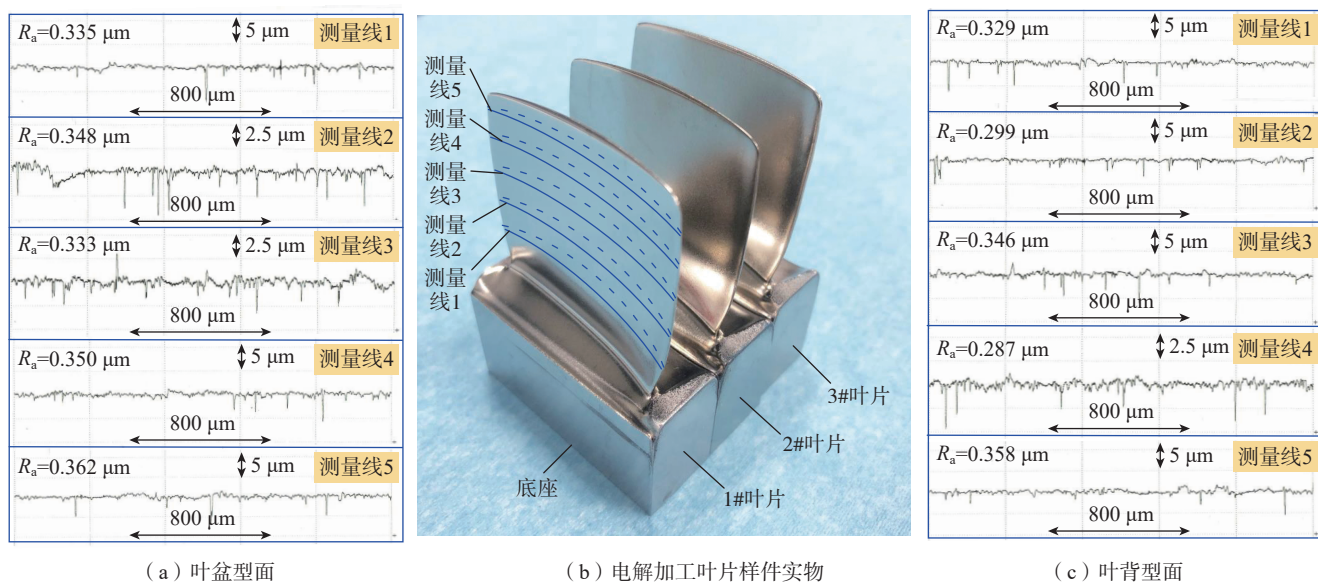


图 6 电解加工叶片实物和表面粗糙度结果

Fig.6 Electrochemical machining blades sample and surface roughness results

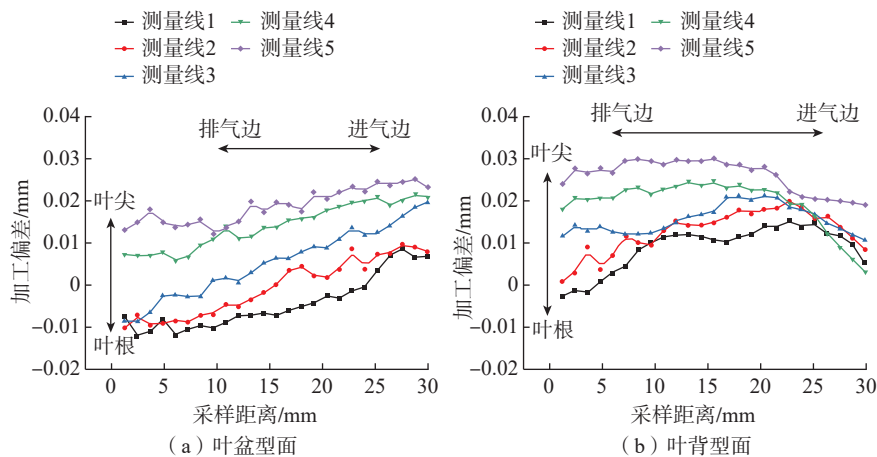


图7 电解加工叶片的轮廓精度

Fig.7 Contour accuracy of electrochemical machined blade

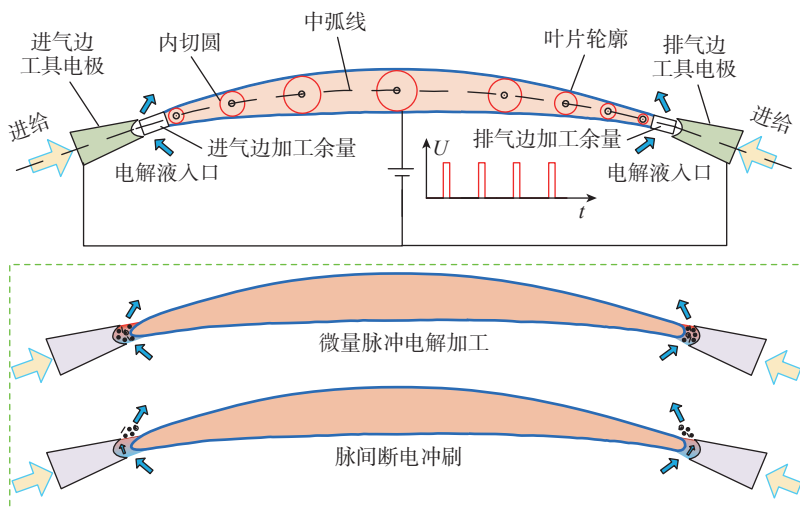


图8 进排气边微量脉冲切向电解加工

Fig.8 Sketch of tangential feeding electrochemical machining with micro energy pulse

中始终处于法向溶解状态,且进排气边附近不存在开口电场和开口流场;三是由于电解液流程极短,可大大降低产物、气泡以及温度变化对加工过程的影响,提升加工的稳定性 and 加工精度。

以航空发动机镍基高温合金(GH4169)叶片为对象,开展了叶片进排气边微量脉冲切向电解加工试验研究,试验参数如表2所示。

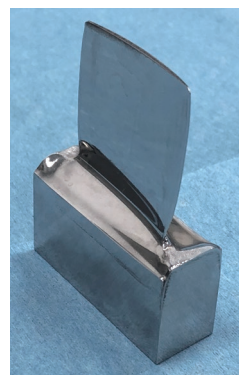
整个进排气边微量脉冲切向电解加工过程稳定,无火花放电以及短路等不良现象。加工完成后获得了理想的进排气边轮廓,如图9所

示。采用等距采样的测量方法,从叶盆侧翻过进排气边到叶背侧方向,依次对进气边和排气边测量线2处的加工圆弧进行测量,圆弧采样距离为0.2 mm,经三坐标测量机检测获得了叶片进排气边的误差分布。可以看出,进气边轮廓度误差为 $-0.034\sim 0.041$ mm,排气边轮廓度误差为 $-0.038\sim 0.034$ mm。同时,在测量线2位置切割叶片后,使用数字显微镜观察进排气边轮廓的横截面,可以看出叶片进排气边圆弧平滑,未出现尖锐、平钝或者偏头等形状突变现象。

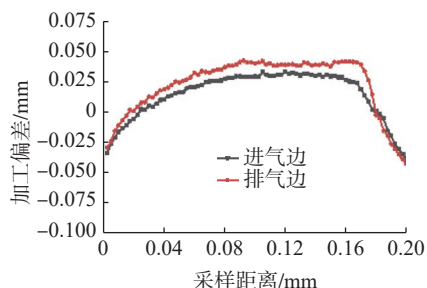
表2 微量脉冲切向电解加工参数

Table 2 Tangential feeding electrochemical machining parameters with micro energy pulse

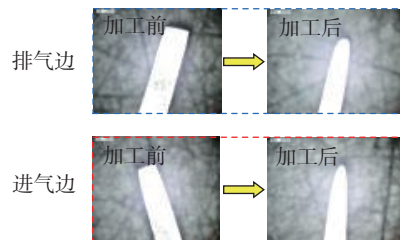
试验参数	数值
电解液	20% NaNO ₃
电解液温度/°C	30±0.3
电解液压力/MPa	0.3
加工电压/V	20
加工频率/Hz	5000
占空比/%	20
进给速度/(mm·min ⁻¹)	0.25
初始加工间隙/mm	0.3



(a) 完整叶片



(b) 进排气边加工精度



(c) 进排气边截面轮廓

图9 带有进排气边结构的完整叶片

Fig.9 Machining results of the complete blade with leading and trailing edges

4 结论

(1) 本文提出了叶片脉动分步精密电解加工方法,可用于航空发动机复杂型面叶片/整体叶盘的精密电解加工,有效提升了叶型全轮廓的加工精度。

(2) 针对叶身型面加工提出了脉动态变参数电解加工策略,进一步提升了叶片表面的轮廓精度和表面质量。结果表明,叶盆型面和叶背型面的表面粗糙度分别为 $R_a 0.333 \mu\text{m}$ 和 $R_a 0.287 \mu\text{m}$, 轮廓度加工误差分别为 $-0.013 \sim -0.025 \text{ mm}$ 和 $-0.003 \sim -0.030 \text{ mm}$ 。

(3) 针对进排气边加工提出了一种微量脉冲切向电解加工方法,进一步提升了叶片进排气边加工精度。结果表明,进气边轮廓度误差为 $-0.034 \sim -0.041 \text{ mm}$, 排气边轮廓度误差为 $-0.038 \sim -0.034 \text{ mm}$ 。

(4) 提出了一种电解液主动分流式径向流动模式,有效消除了传统径向流动模式中被动分流与流量分布不均的问题,进一步提升了叶身型面脉动态变参数电解加工的稳定性。

参考文献

[1] 刘大响,陈光. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 北京:航空工业出版社,2003.

LIU Daxiang, CHEN Guang. Aeroengine the heart of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.

[2] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术, 2006, 49(4): 94-100.

HUANG Chunfeng. Modern aeroengine integral blisk and its manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(4): 94-100.

[3] 张明岐,张志金,黄明涛. 航空发动机机压机整体叶盘电解加工技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 86-92.

ZHANG Mingqi, ZHANG Zhijin, HUANG Mingtao. Electrochemical machining technology of aeroengine compressor blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 86-92.

[4] WANG J T, XU Z Y, WANG J, et al. Anodic dissolution characteristics of Inconel 718 in $\text{C}_6\text{H}_5\text{K}_3\text{O}_7$ and NaNO_3 solutions by pulse electrochemical machining[J]. Corrosion Science, 2021, 183: 109335.

[5] HOOD R, ASPINWALL D K, SOO S L, et al. Workpiece surface integrity when slot milling γ -TiAl intermetallic alloy[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 53-56.

[6] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 703-726.

[7] PAWAR A, KAMBLE D, GHORPADE R R. Overview on electro-chemical machining of super alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 696-700.

[8] SCHAARSCHMIDT I, ZINECKER M, HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, et al. Multiscale multiphysics simulation of a pulsed electrochemical machining process with oscillating cathode for microstructuring of impact extrusion punches[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 257-262.

[9] LIU Y, LIU J, ZHU D, et al. Design and optimization of electrolyte flow fields in electrochemical machining of cross-channel array with tool vibration[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 461-472.

[10] FANG X L, ZOU X H, CHEN M, et al. Study on wire electrochemical machining assisted with large-amplitude vibrations of ribbed wire electrodes[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 205-208.

[11] VOLGIN V M, LYUBIMOV V V, KABANOVA T B, et al. Theoretical analysis of micro/nano electrochemical machining with ultrashort voltage pulses[J]. Electrochimica Acta, 2021, 369: 137666.

[12] LYUBIMOV V, KRASILNIKOV V, VOLGIN V. Investigation of electrochemical machining using nanosecond voltage pulse packets[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Shanghai, 2021.

[13] DEMIRTAS H, YILMAZ O, KANBER B. A simplified mathematical model development for the design of free-form cathode surface in electrochemical machining[J]. Machining Science and Technology, 2017, 21(1): 157-173.

[14] PACZKOWSKI T, ZDROJEWSKI J. Monitoring and control of the electrochemical

machining process under the conditions of a vibrating tool electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 204-214.

[15] 朱荻,刘嘉,王登勇,等. 脉动态电解加工[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 8-21.

ZHU Di, LIU Jia, WANG Dengyong, et al. Pulse dynamic electrochemical machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 8-21.

[16] WANG Y D, XU Z Y, MENG D M, et al. Study on surface roughness of large size TiAl intermetallic blade in electrochemical machining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 1-10.

[17] 张晓博,朱栋. 长窄型薄壁叶片的套料电解加工[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 797-803, 810.

ZHANG Xiaobo, ZHU Dong. Electrochemical trepanning for long thin-walled blades[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 797-803, 810.

[18] LEI G P, ZHU D, ZHU D. Feeding strategy optimization for a blisk with twisted blades in electrochemical trepanning[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 591-599.

[19] WANG J, XU Z Y, WANG J T, et al. Electrochemical machining of blisk channels with rotations of the cathode and the workpiece[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 208: 106655.

[20] 黄明涛,傅军英,刘萌,等. 航空发动机整流器精密振动电解加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 32-38, 59.

HUANG Mingtao, FU Junying, LIU Meng, et al. Research on aero-engine rectifier with precision electrochemical machining process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 32-38, 59.

[21] 于冰. 精密电解套料阴极设计与优化[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 48-51.

YU Bing. Design and optimization of precision ECM cathode[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 48-51.

[22] XU Z Y, WANG Y D. Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 28-53.

[23] WANG Y D, XU Z Y, LIU J, et al. Study on flow field of electrochemical machining for large size blade[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 190: 106018.

(下转第64页)

Research on Array Polishing Path Adjustment for Aero-Engine Blade

ZHANG Yun¹, CHEN Zhitong², ZHU Zhengqing²

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] High efficiency automatic polishing of aero-engine blade is an important means to replace manual polishing and ensure the quality of finish machined profile. In this paper, blade measurement analysis and polishing experiment for leading/trailing edge are carried out on the array machining machine tool. Therefore, the array polishing path adjustment algorithm with the objective function of minimum polishing removal difference and the constraint condition of surface roughness is established, and the coordinate transformation function of NC system is used to realize the automatic adjustment of G-code. On the premise of ensuring the polishing accuracy and surface roughness, the purpose of high-efficiency multi-spindle synchronous polishing is achieved. Four typical blades are used for array polishing verification, their linear profile is no more than 0.032 mm and the surface roughness is $R_a < 0.4 \mu\text{m}$. The average polishing time of a single blade is 2.75 min.

Keywords: Aero-engine blade; Array machine tool; Synchronous polishing; Path adjustment; Polishing process

(责编 阳光)

(上接第 48 页)

Study on Stepwise Pulsant Precision Electrochemical Machining Method for Aero-Engine Blade

XU Zhengyang, WANG Jingtao, LIU Jia, ZHU Dong, WEI Haodi

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Electrochemical machining (ECM) has played an important role in the efficient and precise manufacturing of core components such as aero-engine blades or blisks in Europe and the United States. Using the traditional ECM, the cathode tools for machining blade concave and convex surfaces move towards each other, and the profile of the blade and the contour of the leading and trailing edges are processed at the same time. At this time, the accuracy of blade profile is easy to ensure, while the accuracy of leading and trailing edges is low. In this paper, a stepwise pulsant precision ECM method for blade is proposed, which aims to further improve the profile accuracy of blade and the contour accuracy of leading and trailing edges. The method is divided into two different stages. Firstly, the blade surface is machined precisely by pulsant dynamic variable parameter ECM mode, and then the leading and trailing edges are machined by micro pulse ECM mode. The research of the above two stages in machining mechanism and processing experiment are described in detail. Aiming at the problem of passive diversion in the traditional radial flow field, an active diversion axial flow field is proposed. The experimental results indicate that this method shows favorable process effects. The machining error of the concave surface and convex surface is $-0.013-0.025 \text{ mm}$ and $-0.003-0.030 \text{ mm}$, respectively. The machining error of leading edge is $-0.034-0.041 \text{ mm}$, the machining error of trailing edge is $-0.038-0.034 \text{ mm}$, and the surface roughness of the concave profile and the convex profile are respectively $R_a 0.333 \mu\text{m}$ and $R_a 0.287 \mu\text{m}$. The proposed method provides a new solution for the realization of high-precision manufacturing of aero-engine blades, and can be used for machining of other complex-shaped components.

Keywords: Electrochemical machining (ECM); Step by step processing; Pulsant dynamic; Micro energy pulse;

Blade; Blisk; Aero-engine

(责编 阳光)