

## 大切深数控电解铣削加工阴极设计及试验研究

徐 波<sup>1,2</sup>, 干为民<sup>1,2</sup>, 何亚峰<sup>1,2</sup>, 王祥志<sup>1,2</sup>, 尹飞鸿<sup>1</sup>

(1. 常州工学院航空与机械工程学院, 常州, 213002;

2. 常州工学院江苏省高校特种加工重点实验室, 常州, 213002)

**摘要:** 难加工材料整体叶轮广泛应用于航空领域, 采用传统切削加工存在刀具磨损快、加工效率低等问题。本文针对某型号复杂整体叶轮, 提出大切深五轴数控电解铣削预加工方法。通过设计锥形螺旋刃阴极, 分析不同旋转角下单、双螺旋刃出口流场分布, 得到旋转角 720° 的单螺旋刃阴极出口压力和流速分布均匀。同时开展大切深数控电解铣削加工试验, 结果表明: 在选取的工艺参数范围内, 加工平衡间隙和进给速度随着加工电压升高而增大; 较低的电解液温度有利于实现小间隙加工, 可显著提高加工精度; 主轴转速达到 1 500 r/min 后对加工速度影响较小。得到大切深数控电解铣削整体叶轮加工叶片, 一次最大切深可达 65 mm, 余量误差控制在 0.5 mm 范围之内, 提高了整体叶轮加工效率。

**关键词:** 数控电解铣削; 螺旋刃阴极; 流场分析; 整体叶轮

中图分类号: TG662

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)01-0093-09

## Cathode Design and Experimental Study of Large Cutting Depth NC Electrochemical Milling

XU Bo<sup>1,2</sup>, GAN Weimin<sup>1,2</sup>, HE Yafeng<sup>1,2</sup>, WANG Xiangzhi<sup>1,2</sup>, YIN Feihong<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China;

2. College and University Key Laboratory for Non-traditional Machining of Jiangsu Province,

Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China)

**Abstract:** The integral impeller made of difficult to machine materials is widely used in the aviation field. The traditional machining has the problems of fast tool wear and low machining efficiency. In this paper, a large cutting depth five axis numerical control electrochemical milling pre-processing method is proposed for a certain type of complex integral impeller. Through the design of the conical spiral blade cathode, the flow field distribution at the outlet of single and double spiral blades with different rotation angles is analyzed, and the distribution of the pressure and flow velocity at the outlet of the single spiral blade cathode with rotation angle of 720° is uniform. At the same time, the experiment of NC electrochemical milling with large cutting depth is carried out. The results show that: Within the range of selected process parameters, the machining balance gap and feed speed increase with the increase of machining voltage; The lower electrolyte temperature is conducive to the realization of small gap machining, which can significantly improve the machining accuracy; The spindle speed reaches 1 500 r/min, which has little impact on the machining speed. The results show that the maximum cutting depth can reach 65 mm, and the margin error can be controlled

**基金项目:** 国家自然科学基金(51705040)资助项目; 江苏省高等学校自然科学基金(19KJA430005)资助项目; 江苏省重点研发计划(BE2018067)资助项目; 江苏省科技厅青年基金(BK20150255)资助项目。

**收稿日期:** 2018-07-28; **修订日期:** 2019-12-16

**通信作者:** 干为民, 男, 教授, E-mail: ganwm@czu.cn。

**引用格式:** 徐波, 干为民, 何亚峰, 等. 大切深数控电解铣削加工阴极设计及试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 93-101. XU Bo, GAN Weimin, HE Yafeng, et al. Cathode design and experimental study of large cutting depth NC electrochemical milling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 93-101.

within 0.5 mm, which improves the machining efficiency of the whole impeller.

**Key words:** NC electrochemical machining; spiral outlet cathode; flow field analysis; integral impeller

镍基高温合金整体叶轮作为航空发动机的核心零部件,其工作中承受交变冲击载荷和高温等复杂工作条件<sup>[1]</sup>,目前整体叶轮的加工方法主要有精密铸造、多轴数控铣削、电解套料加工、电火花加工和数控电解加工等<sup>[2]</sup>,其中精密铸造只适用于可铸合金,其应用技术难度大,成品率较低,对于转速高、负荷较大的整体叶轮难以适用<sup>[3]</sup>;多轴数控铣削加工镍基高温合金叶轮时刀具磨损快,加工成本高,工序多,制作周期长<sup>[4]</sup>;电解套料加工只适用于等截面叶片整体叶轮,不能加工扭曲度大的非等截面叶片整体叶轮<sup>[5]</sup>;多轴联动数控电火花加工在复杂形状难加工材料加工中应用广泛,其加工精度高和稳定性可靠,但受限于电极损耗需多次更换电极,加工成本较高,加工表面再铸层影响零件疲劳强度<sup>[6]</sup>。针对整体叶轮的数控电解加工国内外已有一定研究,南京航空航天大学的徐家文等针对圆柱阴极的数控电解加工进行了建模,并通过试验验证了模型正确性,为国内数控展成电解加工研究奠定了基础<sup>[7]</sup>;南京农业大学的杨勇等基于有限元分析进行了球端阴极数控电解加工工艺研究<sup>[8]</sup>;波兰华沙理工大学的 Kozak 等采用圆柱工具电极对叶片电解加工进行建模,并基于计算机模拟技术验证其正确性<sup>[9]</sup>;南京航空航天大学的赵建社等分别对大型整体叶轮、大扭曲整体叶轮和带冠整体叶轮等整体构件基于三维设计软件、流场和电场分析软件,进行了数控电解加工的阴极设计和工艺试验研究<sup>[10-12]</sup>;朱荻等对难加工材料整体叶盘大扭曲通道的电解加工进行了预加工和精加工等工艺方法研究<sup>[13-14]</sup>;北京航空制造工程研究所的张明岐等对整体叶盘进行了电解旋转套料加工和精密振动电解的工艺试验研究<sup>[15]</sup>;GE 公司开发的五轴数控电解机床,为缩短叶轮制造周期采用数控电解铣削加工技术对胚料进行大切深开粗加工,精加工时再采用传统反拷式电解加工方法,提高了加工效率和精度,其叶片厚度公差和型面公差均为 0.01 mm,无需再抛光<sup>[16]</sup>。本文采用内喷式、螺旋刃旋转式阴极,对镍基高温合金整体叶轮进行大切深五轴数控电解铣削加工试验研究,得到了合理的工艺方案。

## 1 大切深数控电解铣削加工原理

五轴数控电解铣削加工装夹方法如图 1 所示,阴极通过复合刀柄装夹于主轴并与电源负极相连,

工件毛坯装夹于 C 轴转台并与电源正极相连,叶盘中心与 C 轴回转中心一致,工件随 C 轴旋转的同时可随 B 轴摆动。图 2(a)为大切深数控电解铣削加工某一过程,在某一 Z 高度建立水平剖面以研究数控电解加工成型过程,在图 2(b)中建立一坐标系  $O_1X_1Y_1$ ,坐标原点为阴极圆心,  $X_1$  轴方向与阴极进

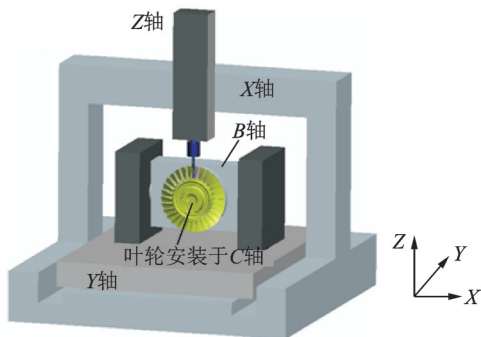
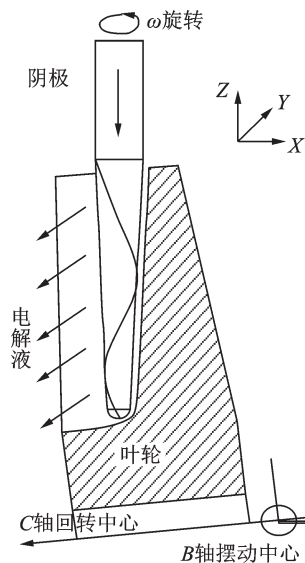
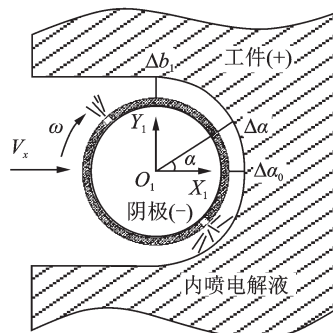


图 1 五轴数控电解加工机床主体结构

Fig.1 Five-axis NC electrochemical machining machine



(a) NC electrochemical milling with large cutting depth



(b) Coordinate system  $O_1X_1Y_1$

图 2 整体叶轮的大切深五轴数控电解加工模型

Fig.2 Five-axis NC ECM model for large cutting depth of integral impeller

给方向相同,图中 $\Delta\alpha_0$ 为平衡端面间隙, $\Delta\alpha_0$ 决定于加工电压、旋转阴极进给速度、阴极的直径大小及出液口形状、加工间隙中电解液流速和电导率等参数;图中 $\Delta b_1$ 为最终加工间隙,阴极直径值与双边 $\Delta b_1$ 之和为数控电解铣削所得槽宽大小,在阴极直径一定时, $\Delta b_1$ 对加工结果有直接影响。数控电解铣削加工在其他加工条件(阴极形状及转速、电解液参数和电源参数)一定时,研究阴极进给速度与进给方向上工件溶解速度之间的关系尤为重要,若阴极进给速度较金属去除速度快,则阴极将与工件短路从而影响加工的正常进行;若阴极进给速度低于金属理论去除速度,则加工间隙过大,此时加工效率低且成型精度较差;当两者相等时,加工效率和成型精度达到此组工艺条件下最佳值,此阴极进给速度称为最快平衡进给速度,由电化学加工平衡间隙理论可知,进给方向的平衡间隙 $\Delta\alpha_0$ ( $\alpha$ 为 $0^\circ$ 时)的基本方程为<sup>[17-18]</sup>

$$\Delta\alpha_0 = \eta\omega\kappa \frac{(U - \delta E)}{V_x} \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为加工中电流效率, $\omega$ 为体积电化学当量( $\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{min}$ ); $\kappa$ 为电解液电导率( $\text{S/m}$ ); $U$ 为阴阳极间电压; $\delta E$ 为阴极和阳极极化电位值总和; $V_x$ 为电解速度( $\text{mm/min}$ )。电压、电解液流速和温度等参数在加工中是变化的,则端面平衡进给速度 $V_x$ 与按理论公式求得值不一致。假设某段时间内电导率 $\kappa$ 、电解液温度、气泡率保持不变,可将式(1)优化微分为铣削加工数值模型

$$d\Delta\alpha = \left[ \frac{\eta\omega(U - \delta E)}{V_x^2} - \cos\alpha \right] R \sin\alpha d\alpha \quad (2)$$

式中: $R$ 为阴极半径, $\alpha$ 为阴极任意圆角。由式(2)可知阴极半径、加工电压和进给速度等参数对加工所得槽宽具有决定性作用。

## 2 大切深数控电解铣削加工流场分析及阴极设计

本文主要研究整体叶盘预加工,其叶片顶部薄、根部厚,如图3所示, $d_1$ 为叶根圆处叶间通道宽度, $d_2$ 为叶顶圆处叶间通道宽度,通道宽度值由 $d_2$ 逐渐减小至 $d_1$ ,因此阴极需设计为上大下小的锥形刃结构。加工时阴极随五轴数控电解加工机床运行叶片加工轨迹,一次走刀以最大限度去除余量,为下道工序减少加工量。阴极分为装夹用圆柱体和锥体加工刃,锥体刃的锥度值决定于叶片几何形状和电解加工参数,阴极设计则采用计算与试验修正相结合的方法。

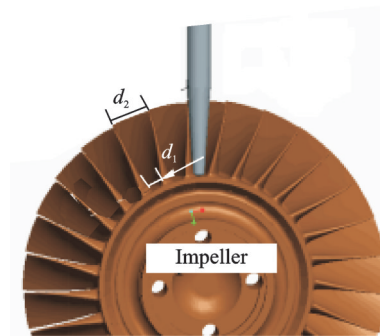


图3 整体叶轮的大切深数控电解铣削加工模型

Fig.3 Machining model of large cutting depth NC electrolytic milling for integral impeller

### 2.1 双螺旋出口锥形阴极设计

根据图3所示整体叶盘几何特性,设计一双螺旋出口锥形刃阴极,其结构如图4所示,阴极锥体高度 $L$ 取65 mm,上部圆柱体直径 $D$ 为10 mm,底部球半径 $R$ 为2.5 mm,螺旋形出口在图4(a)中 $a$ 点到 $b$ 点沿锥体法面旋转,其旋转角度为 $\theta$ ,出口宽度为0.5 mm,锥体刃侧面展开如图4(b)所示,研究发现 $\theta$ 变化时出液口流场分布亦随之改变,为求得出口压力均匀的流场,现分析螺旋角度 $\theta$ 分别为 $180^\circ, 270^\circ, 360^\circ, 450^\circ, 540^\circ, 630^\circ$ 和 $720^\circ$ 时出口的压力情况。图5为阴极网格划分模型,其中出口网格大小设值为0.15 mm。

流场分析时设置基于压力的求解器,速度为绝对速度,添加重力工作条件( $g$ 取 $9.8 \text{ m/s}^2$ ),物理模

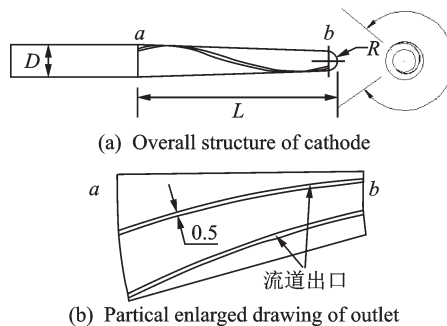


图4 双螺旋出口阴极设计图

Fig.4 Design of double helix outlet cathode

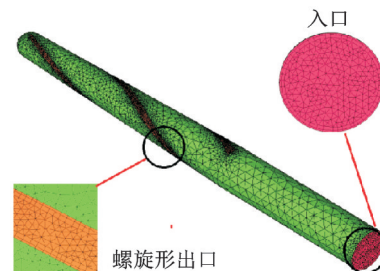


图5 阴极网格模型

Fig.5 Cathode grid model



型为 Standard-Epsilon 湍流模型,入口类型为 velocity inlet,入口速度设为 10 m/s,得到如图 6 所示不

同旋转角度  $\theta$  双螺旋出口阴极的整体压力图及出口压力局部放大图。

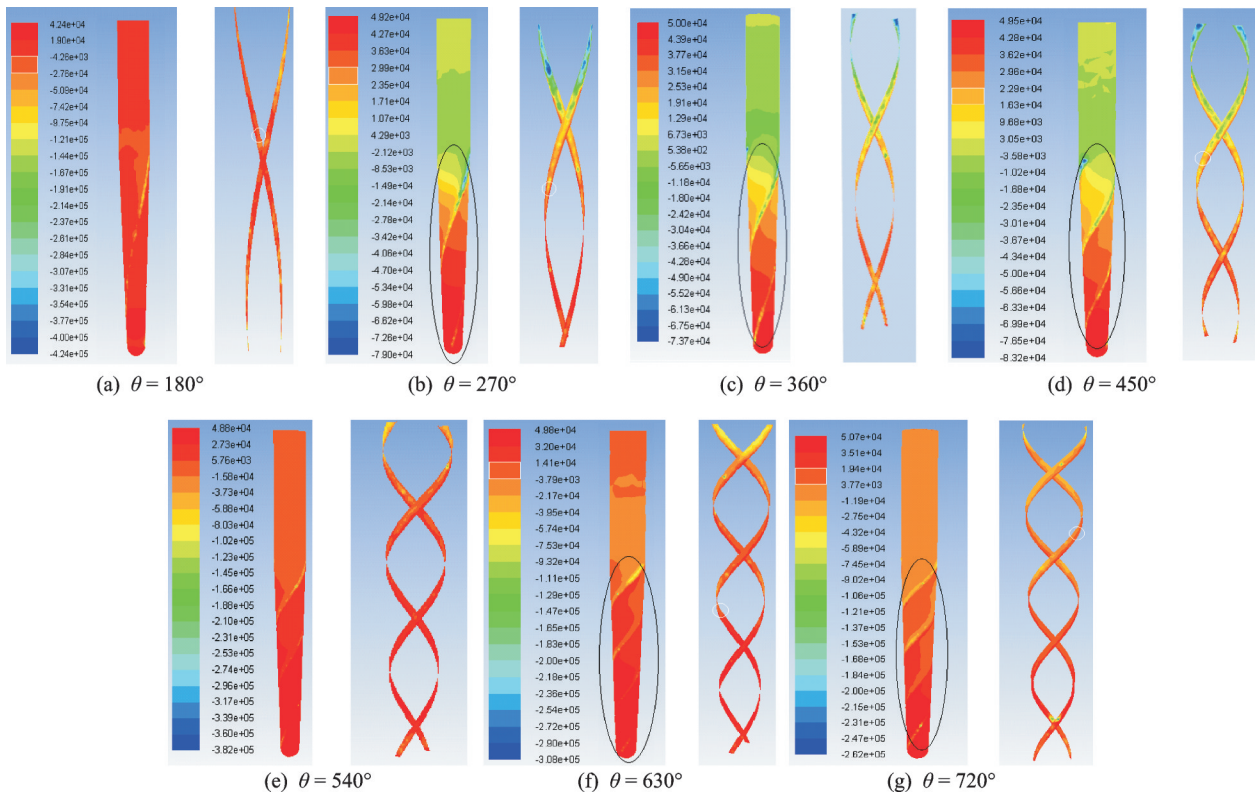


图6 不同旋转角度双螺旋刃阴极出口压力云图

Fig.6 Pressure cloud chart of double helix outlet cathode with different rotation angles

从阴极出液口压力云图可见,180°,540°,630°和720°螺旋角的阴极出口压力较均匀,但180°,540°,630°螺旋出口均存在“负压区”,且出口上端负压值较大,540°阴极上端负压区较小,平均压力区间为(2.73e+04,4.83e+04) Pa,只有720°螺旋出口压力均为正值,其分布区间为(3.77e+03,1.94e+04) Pa。由此可见只有720°螺旋出口流场较好,但由于出口总面积较进口面积大,出口压力值偏小。图7为出口流速矢量图,由图7可见,由于螺旋角偏大,在重力作用下出口流速矢量明显向下倾斜,从而加工间隙中垂直于阴极表面法向流速分

量较少,若将此阴极应用于试验加工中,需采用较高进口流速,同时降低阴极进给速度防止短路。由式(2)可知进给速度较慢时,同等去除量时加工时间会增多,侧面加工间隙将增大,造成过切现象。

## 2.2 单螺旋出口锥形阴极设计

以上分析发现,阴极出液口流量不足将导致加工效率和加工精度低下,为增加出液口压力和流速,现将螺旋形双缝出液口阴极改为单缝形,以减少出口面积、提高阴极转速来改善加工间隙中流场分布。同时研究发现,整体叶轮五轴数控电解铣削加工的切深一直处于变化当中,运用自动编程软件虚拟加工测得切深在61.125~65.0 mm之间,因此需在阴极球头刃部分设有通液孔。根据以上设计方案建立模型,流场分析结果如图8所示。

由图8可见阴极出液口数量减少后压力整体增大,压力值从5.0e+04 Pa增至8.0e+04 Pa,另外压力分布随着螺旋角的增大也变化较大,不同螺旋角阴极的出口压力都具有从下往上逐渐增大的趋势,其上端“负压区”面积随螺旋角的增大而减少,具有720°螺旋角的阴极上端已经基本没有负压且压力分布相对均匀,符合设计要求。

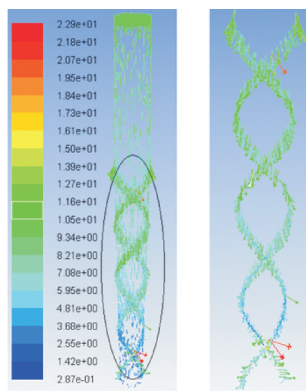


图7  $\theta=720^\circ$ 时出口流速矢量图

Fig.7 Velocity vector diagram of outlet with  $\theta=720^\circ$

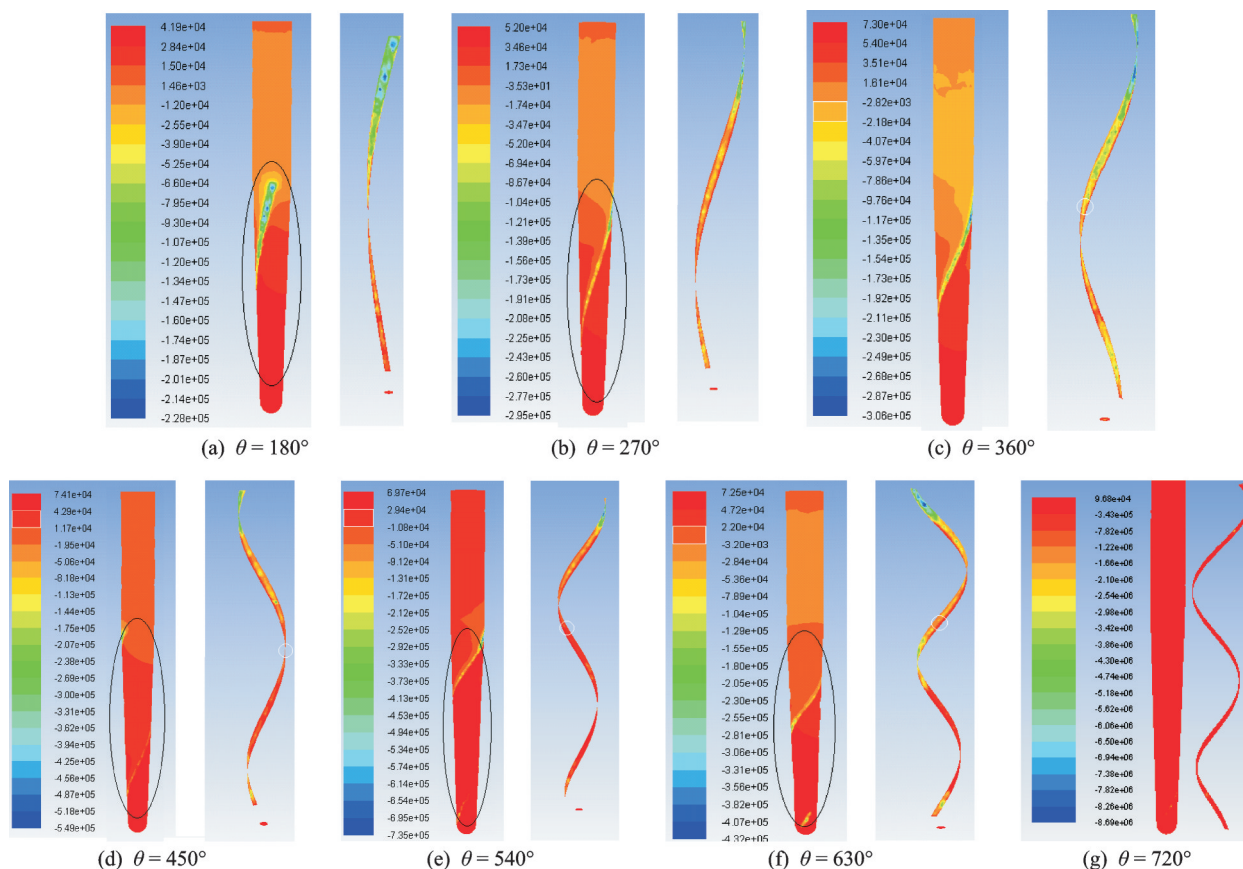
图 8 不同旋转角  $\theta$  单螺旋刃阴极出口压力云图

Fig.8 Nephogram of different outlet pressure of single helical edge cathode with different rotation angles

从图 9 旋转角为  $720^\circ$  的单螺旋出口阴极流速矢量图可知,出口流速明显增大,集中于  $15.7 \text{ m/s}$  至  $18.3 \text{ m/s}$  范围内,压差小,且流速方向基本垂直于加工刀侧壁,能明显减少加工间隙中缺液现象。综合以上分析可知旋转角为  $720^\circ$  的单螺旋刃阴极最佳,实物如图 10 所示,其内部通液孔采用电解钻孔制得,螺旋形出液口采用多轴电火花线切割制得。

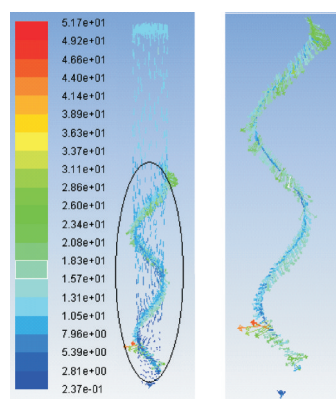
图 9  $\theta=720^\circ$  单缝螺旋刃阴极出口速度图Fig.9 Velocity diagram of single slit helical edge cathode outlet with  $\theta=720^\circ$ 

图 10 单缝螺旋刃阴极实物图

Fig.10 Physical drawing of single helical edge cathode

### 3 大切深数控电解铣削加工试验

#### 3.1 不同数量出液口阴极大切深数控电解铣削试验对比

为验证以上流场分析,分别对单螺旋角  $\theta$  为  $720^\circ$  和双螺旋角  $\theta$  为  $720^\circ$  阴极进行试验研究,试验时电压取  $22 \text{ V}$ ,  $15\%$  硝酸钠电解液,电解液入口压力  $1 \text{ MPa}$ ,阴极转速为  $1500 \text{ r/min}$ ,电解液温度为  $30^\circ \text{C}$ 。

单螺旋  $720^\circ$  旋转角阴极试验中整个流域电解液充足,在以上试验条件下阴极最快进给速度为  $0.9 \text{ mm/min}$ ,加工所得槽如图 11(a)所示,槽的形状轮廓清晰,杂散腐蚀小,表面质量较好,无点蚀等现象。为测得各处加工间隙大小,在叶轮的旋转中心建立坐标系,槽的中心线与坐标  $Y$  轴相重合,采用三坐标测量仪测得同一  $Z$  高度时槽轮廓点坐标数据,基于 CAD 软件采用多次样条线拟合槽轮廓形状,同时将阴极外形轮廓图导入 CAD 软件(阴极的坐标系原点与槽的点云坐标系相同),两者通过坐标系重合进行装配,可直接观察和测量各处加工间隙大小,为显示方便将两者水平分开放置,如图 11(b)所示,测量时拾取轮廓点  $X$  坐标值,与同一  $Y$  高度测得阴极半径值  $r$  作差值,即为此处加工间隙



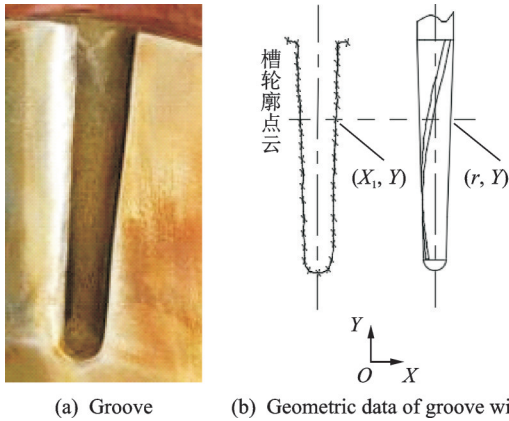


图 11 单螺旋阴极加工( $\theta=720^\circ$ )所得槽及槽宽几何数据  
Fig.11 Groove obtained by single helix cathode machining ( $\theta=720^\circ$ ) and geometrical data of groove width

值 $\Delta$ 。通过多次测量发现此种阴极的加工间隙值在 0.465~0.502 mm 之间,最大误差为 0.037 mm,满足设计要求(一次铣削深度为 65 mm 时,间隙误差初设为 0.15 mm)。

双螺旋 720°阴极加工时电解液分布不均,电解液集中于阴极中部,阴极加工段顶部和根部电解液较少,实际加工中阴极最快进给速度为 0.6 mm/min,且易发生短路现象,加工所得槽宽不均等,结果如图 12(a)所示,槽的顶部有明显短路放电烧蚀,中部由于电解液流量过大,发生过切现象。对图 12(b)中所示的槽点云数据测量发现,双边加工间隙不对称,左侧加工间隙值小,右侧加工间隙值大。阴极中间部分电解液较集中且更新快,工件去除量大,对应槽的宽度值大,测量发现加工间隙范围为 0.504~0.712 mm,误差为 0.208 mm。由此可见,此阴极加工间隙误差和几何轮廓误差较大,不符合设计要求。

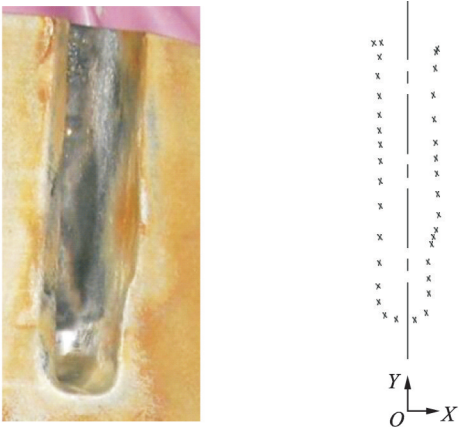


图 12 双螺旋角锥体阴极电解加工( $\theta=720^\circ$ )结果及槽宽轮廓点云  
Fig.12 Groove obtained by double helix cathode machining ( $\theta=720^\circ$ ) and contour point cloud of groove width

3.2 大切深数控电解铣削加工试验分析

现利用旋转角 720°单螺旋阴极做一正交试验,以研究各参数对加工槽宽和阴极最快平衡进给速度的影响大小,各研究参数和因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验表  
Table 1 Orthogonal test table

因素 水平	电解液温度 $T/^\circ\text{C}$	电压/ V	电解液压力/ MPa	主轴转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )
1	25	18	0.5	1 000
2	30	22	1.0	1 500
3	35	26	1.5	2 000
4	40	30	2.0	2 500

选用 L16(4<sup>5</sup>)正交表,每次试验结果测量顶部槽宽,记录并计算加工间隙值,最终加工间隙的极差如表 2 所示。

表 2 正交试验结果中最终加工间隙的极差计算  
Table 2 Range calculation of final machining clearance in orthogonal test results

因素 水平	电解液温度 $T/^\circ\text{C}$	电压/ V	电解液压力/ MPa	主轴转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )
1	0.338	0.268	0.465	0.428
2	0.395	0.468	0.433	0.378
3	0.435	0.570	0.455	0.403
4	0.578	0.640	0.493	0.338
极差	0.240	0.372	0.060	0.090

由表 2 可知对加工结果影响从大到小依次为电压、电解液温度、主轴转速和电解液压力,由此可见电压是影响加工间隙的最主要因素,且加工间隙与电压成正比关系。为研究不同电压对加工结果的影响关系,根据正交试验结果,取电解液压力 1 MPa,电解液温度 30 ℃,主轴转速 1 500 r/min 进行试验,结果如图 13 所示,图中可见随着电压升高,最终加工间隙和最快平衡进给速度都有所增加,即在其他加工条件不变时加工间隙随着电压的增加而增大。

电解液温度对间隙和最快平衡进给速度的影响关系如图 14 所示,随着加工温度的升高,加工间隙随之增大,即温度越高电化学反应越剧烈。但加工间隙的增大,加工精度随之降低;随着温度的升高最快平衡加工速度增大,但增至 0.7 mm/min 后速度保持不变,而加工间隙却在增加,说明超过 35 ℃后,杂散腐蚀现象严重,能耗增加,效率降低,同样进给速度下温度高时能耗增加,因此电解液温度不宜过高,在精度要求较高时,如采用小间隙加工工艺时宜选择较低的电解液温度值。

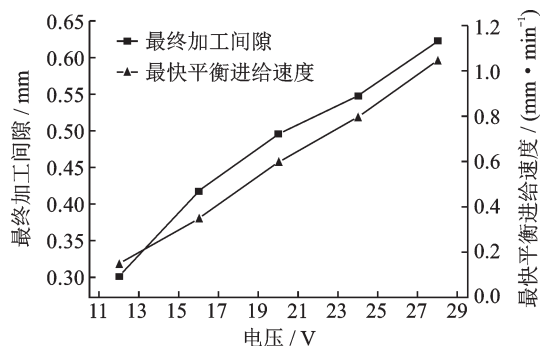


图 13 不同电压下加工间隙和进给速度的变化曲线

Fig.13 Change curves of machining clearance and feeding speed under different voltages

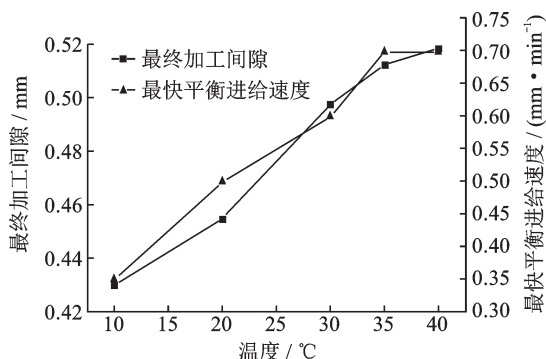


图 14 电解液温度对间隙和最快平衡进给速度的影响

Fig.14 Effects of electrolyte temperature on clearance and fastest feeding rate

由主轴转速对加工间隙和最快平衡进给速度的影响可以看出(图 15),低转速时加工间隙值小,容易出现缺液现象,加工速度较慢且易发生短路,加工精度低,当转速超过 1 500 r/min 后,最快平衡进给速度不再随着转速增加而变化,即阴极转速超过 1 500 r/min 后间隙内电解液充沛,流场满足加工要求,而阴极进给速度达到稳定值后,转速增加阴极两侧电解液流速增加,两侧去除率随之增加,导致最终加工间隙也随之增加。

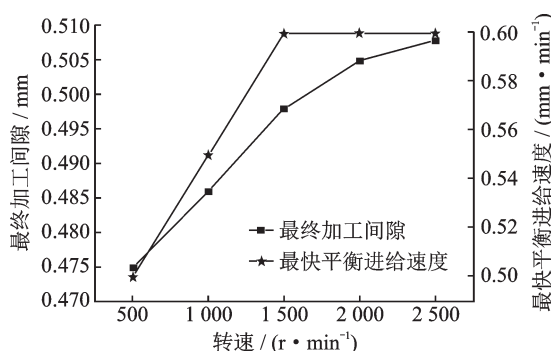


图 15 主轴转速与加工间隙和最快平衡进给速度的关系曲线

Fig.15 Change curves of machining clearance and fastest feeding speed under different spindle speeds

## 4 整体叶轮的大切深五轴数控电解铣削加工

加工前将工件毛坯安装于机床上,建立工件坐标系,同时将工件三维模型导入自动编程软件建立相同坐标系,以叶片型面为驱动产生数控轨迹,加工仿真如图 16 所示。选择符合相应机床的后处理文件,生成五轴数控电解加工 G 代码。根据正交试验结果,选取加工参数电压 24 V,主轴转速 1 500 r/min,电解液压力 1 MPa。

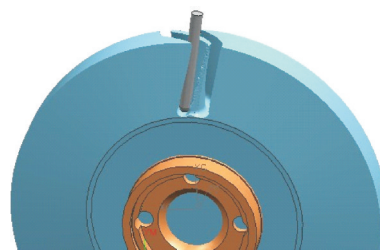


图 16 大切深五轴数控电解铣削开粗加工仿真

Fig.16 Simulation of 5-axis NC electrochemical milling with large cutting depth

将上述所得 G 代码输入五轴数控电解加工机床,第 1 个叶片加工时为大切深全刃铣削,阴极行走叶片开粗轨迹(从叶盘一侧全刃切入,绕着叶片行走一圈回到起点),阴极切入工件时流场为开放式的,为弥补内喷不足,需同时增设外喷,进给速度为 0.5 mm/min;随着阴极不断切入,外喷逐渐失去作用,加工电流从 0 陡增至 135 A 左右;阴极完全切入后,加工电流随着切深变化而变化,其范围为 129~153 A,阴极进给速度缓增至 1 mm/min;阴极切出时去除量逐渐较少,但由于流场稳定性降低,需增设外喷和降低进给速度,此叶片加工时长为 65 min。由于加工前一叶片时已将下一叶片一侧的大部分余量去除,下一叶片单边通道余量变少,此时可将进给速度提高至 1.5 mm/min。第二个叶片起单个叶片加工时长约为 53 min。图 17 为多个叶片的加工结果,为防止杂散腐蚀在加工下一叶片时需将前一叶片绝缘处理,防止二次加工影响精度。



图 17 多个叶片的开粗加工结果

Fig.17 The roughing results of machined blades

将图17中部分叶片通过三坐标测量仪打点反求,求得叶片型面点云数据,运用基于Pro/E软件二次开余量求解程序,与图3中整体叶轮三维数据进行对比,求得剩余余量如图18所示,其所有余量均在电解粗加工允许的误差0.5 mm范围之内,满足工艺要求。整体叶轮的大切深数控电解加工误差来源是多方面的,如阴极出口流速和压力难达到一致性、开放式流场无法对电解液温度精准控制、多轴数控电解加工程序需进一步优化、工装夹具的制造和装配误差等。



图18 加工余量的检测

Fig.18 Detection of machining allowance

## 5 结 论

本文以难加工材料整体叶轮为对象,提出大切深数控电解铣削加工方法,通过理论和试验研究得出以下结论:

(1)建立了大切深数控电解加工模型,分析得到了加工间隙与阴极直径、电压和进给速度有关。

(2)开展了螺旋刃阴极不同出液口数量和不同旋转角的流场数值计算,结果表明:单螺旋刃720°旋转角阴极出口流速和压力分布均匀,并通过试验验证,此阴极加工的槽形状规则、加工间隙误差小,满足设计要求。

(3)开展了电解液温度、加工电压、主轴转速和电解液压力四因素四水平正交试验,结果表明:加工电压对加工间隙和加工精度影响最大,在一定范围内阴极进给速度和加工间隙随着电压的升高而增大;主轴转速在达到1 500 r/min后对进给速度影响较小;较低的电解液温度有利于实现小间隙加工,提高加工精度。

(4)采用优化后阴极结构和工艺参数,成功连续加工多个叶片,一次最大切深可达65 mm,余量误差在允许范围0.5 mm之内,且阴极无损伤,可重复利用。

## 参考文献:

[1] 徐家文,云乃彰,严德荣.数控电解加工整体叶片的研

究、应用和发展[J].航空制造技术,2003(6): 31-34.

XU Jiawen, YUN Naizhang, YAN Derong. Research, application and development of NC electrolytic machining integrated blade disk[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2003(6): 31-34.

[2] 干为民,徐波,褚辉生,等.五轴数控电解开槽加工整体涡轮盘的工艺试验研究[J].制造技术与机床,2017(2): 37-42.

GAN Weimin, XU Bo, ZHU Huisheng, et al. Technological experimental study on five-axis NC electrolytic slotting for integral turbine disk[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2017(2): 37-42.

[3] 赵建社,王福元,徐家文,等.整体叶轮自由曲面叶片精密电解加工工艺研究[J].航空学报,2013,34(12): 2841-2848.

ZHAO Jianshe, WANG Fuyuan, XU Jiawen, et al. Research on precision electrolytic machining technology for freeform surface blade of integral impeller[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(12): 2841-2848.

[4] 傅秀清,康敏,杨勇,等.球形阴极数控电解加工的流场仿真及试验研究[J].中国机械工程,2013,24(8): 1038-1042.

FU Xiuqing, KANG Min, YANG Yong, et al. Flow field simulation and experimental study of spherical cathode NC electrochemical machining[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(8): 1038-1042.

[5] LI H Y, KLOCKE F, ZEIS M, et al. Experimental study on the ECM and PECM of pressed and casted  $\gamma$ -TiAl alloys for aero engine applications[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 768-771.

[6] KLOCKE F, ZEIS M, KLINK A, et al. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium-and nickel-based alloys for aero engine components[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 368-372.

[7] XU Jiawen, YUN Naizhang, TANG Yangxin, et al. The modelling of NC-electrochemical contour evolution machining using a rotary tool-cathode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(2): 272-277.

[8] YANG Y, KANG M, FU X Q. Research on the process of NC-ECM with ball-end cathode based on FEM[J]. Key Engineering Materials, 2010, 458: 93-98.

[9] KOZAK J, BUDZYNSKI A F, DOMANOWSKI P. Computer simulation electrochemical shaping (ECM-CNC) using a universal tool electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76(1/2/3): 161-164.

[10] ZHAO Jianshe, WANG Feng, LIU Zhuang, et al. Flow field design and process stability in electrochemical machining of diamond holes[J]. Chinese Journal of



- Aeronautics, 2016, 29(6): 1830-1839.
- [11] 王福元. 整体叶轮叶片型面数控电解精加工的若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.  
WANG Fuyuan. Several key technologies for NC electrochemical finishing of integral impeller blade profile [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [12] 吴建民. 大直径整体叶轮数控电解加工技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.  
WU Jianmin. Research on NC electrochemical machining technology for large diameter integral impeller [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [13] 朱荻. 国外电解加工的研究进展[J]. 电加工与模具, 2000(1): 11-16.  
ZHU Di. Research progress of ECM abroad[J]. ECM and Mould, 2000(1): 11-16.
- [14] 徐庆, 朱荻, 徐正扬. 整体叶盘通道电解加工流场的均匀性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 7-12.  
XU Qing, ZHU Di, XU Zhengyang. Uniformity of flow field in electrochemical machining of integral blade disc passage[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 7-12.
- [15] 张明岐, 张志金, 黄明涛. 航空发动机压气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. Electrolytic machining technology for aeroengine compressor integrated blade disk [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 86-92.
- [16] 姜云龙. 整体叶盘多轴联动数控精密电解加工技术满足未来需求[J]. 国防制造技术, 2013(2): 15-16.  
JIANG Yunlong. Multi-axis CNC precision electrochemical machining technology of integral blade disc meets the future demand [J]. National Defense Manufacturing Technology, 2013(2): 15-16.
- [17] 干为民, 吴小锋, 陈志伟, 等. 螺旋线刃型电解阴极流场的数值模拟与结构优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 738-743.  
GAN Weimin, WU Xiaofeng, CHEN Zhiwei, et al. Numerical simulation and structural optimization of the flow field of spiral edge electrolytic cathode [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(5): 738-743.
- [18] 刘嘉, 方忠东, 邓守成, 等. 整体叶盘电解加工阴极修正方法与试验[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 744-749.  
LIU Jia, FANG Zhongdong, DENG Shoucheng, et al. Cathode correction methods and experiments for electrochemical machining of integral blisks [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(5): 744-749.

(编辑:孙静)