

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.004

GH4169 涡轮盘榫槽电解拉削仿真及其试验研究

赖建华, 王石莉, 刘嘉, 朱荻

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 榫槽是航空发动机涡轮盘上的重要结构, 电解拉削是实现该结构高效、低成本制造的潜在解决方案。为了掌握电解拉削加工参数对轮廓精度和表面质量的影响规律, 建立了电解拉削多场耦合模型, 阐明了工具阴极长度对加工间隙产物分布的影响规律, 获得了优选的工具阴极长度参数。开展了平面电解拉削加工试验, 探究了进给速度和加工间隙对工件表面质量和型面进出口去除量差的影响规律, 确定了较优的加工参数。试验结果表明, 采用优化的加工参数可以获得较好的表面质量并有效控制了型面进出口去除量差。最后, 采用优化的参数开展了典型涡轮盘榫槽结构单元件的电解拉削加工试验, 试件具有较好的表面质量和轮廓重复精度。

关键词: 涡轮盘榫槽; 电解拉削; 多场耦合仿真; 参数优化; 试验

中图分类号: TG66

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)01-0044-11

Simulation and Experimental Study on Electrochemical Broaching of GH4169 Turbine Disk Slot

LAI Jianhua, WANG Shili, LIU Jia, ZHU Di

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The turbine disk slot is an important structure on the turbine disk of aircraft engines, and electrochemical broaching is a potential solution to achieve efficient and low-cost manufacturing of this structure. In order to study the influence of electrochemical broaching machining parameters on contour accuracy and surface quality, a multi field coupling model for electrochemical broaching is established. The influence of tool cathode length on the distribution of machining gap products is elucidated, and the preferable length parameter is obtained. Experiments on planar electrochemical broaching are conducted to explore the influence of feed speed and machining clearance on the surface quality and profile difference in import and export removal amount of the workpiece, and optimal machining parameters are determined. The experimental results indicate that using optimized processing parameters can achieve good surface quality and effectively control the difference in import and export removal amount of the profile. Finally, electrochemical broaching experiments are conducted on a single component of a typical turbine disk slot structure using optimized parameters, and the specimens exhibit good surface quality and contour repeatability accuracy.

Key words: turbine disk slot; electrochemical broaching; multi field coupling simulation; parameter optimization; experiments

在航空发动机中, 榫槽是涡轮盘与叶片连接的重要结构, 其不仅需要长期承受高温高压, 还要承

受高离心力等交变载荷的综合作用^[1], 其制造质量将直接影响航空发动机的性能和寿命。一直以来,

基金项目: 江苏省前沿引领项目(BK2022010)。

收稿日期: 2023-11-20; 修订日期: 2024-01-05

通信作者: 朱荻, 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 赖建华, 王石莉, 刘嘉, 等. GH4169 涡轮盘榫槽电解拉削仿真及其试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 44-54. LAI Jianhua, WANG Shili, LIU Jia, et al. Simulation and experimental study on electrochemical broaching of GH4169 turbine disk slot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 44-54.

航空发动机涡轮盘榫槽的制造方法主要依赖机械拉削^[2]。近年来,随着新型航空发动机性能的不不断提高,涡轮盘越来越多地采用高温合金、粉末冶金高温合金等难切削耐高温材料,机械拉削中的刀具损耗大幅增加,加工成本急剧攀升,同时榫槽的加工精度及表面质量需求却越来越严苛^[3],常规机械拉削已无法满足新型航空发动机涡轮盘榫槽的加工需求。为了解决涡轮盘榫槽的制造难题,国内外很多学者和研究人员尝试了电火花线切割^[4-6]、成形刀具铣削^[7-8]、成形砂轮磨削^[9]等方法。然而,电火花线切割加工榫槽表面不可避免地存在重铸层和微裂纹等表面缺陷;成形工具铣削或者磨削的工具损耗依然较大^[10]。上述方法仍然无法满足涡轮盘榫槽高效、低成本的加工需求,因此迫切地需要寻找榫槽高效、低成本的加工技术。

电解拉削是一种利用截面轮廓渐扩的工具阴极,采用类似于机械拉削的进给模式,通过电化学阳极溶解原理去除材料的一种加工方法。该方式具有阴极无损耗、加工表面质量好、无重铸层和残余应力、加工效率高等优点^[11]。西安工业大学采用 18 V 的电压、16 mm/min 的进给速率成功电解拉削出高长径比深螺旋管^[12]。为了提升电解拉削加工精度,南京航空航天大学采用小阴极升角、小间隙、高进给速度的加工方式,以 120 mm/min 的进给速度,在不锈钢材料上电解拉削出圆度误差优于 0.02 mm、表面粗糙度优于 Ra0.4 μm 的圆孔结构^[13];并用阵列微槽工具,以 120 mm/min 的进给速度,电解拉削出平均宽度为 563 μm 、平均深度为 545 μm 的微细群槽结构^[14]。随着电解拉削的效率和精度的不断提升,已逐步成为涡轮盘榫槽高效、

低成本制造的潜在解决方案。

因此,为了探究电解拉削加工技术制造涡轮盘榫槽的可行性,建立了电解拉削多场耦合模型,分析了工具阴极长度对加工间隙产物分布的影响,通过平面电解拉削加工试验,探讨了加工参数对表面质量和截面轮廓的影响,对加工参数进行优化。最终采用优化参数,开展了镍基高温合金 GH4169 典型榫槽结构单元件电解拉削加工试验。

1 电解拉削加工原理

1.1 试验系统

电解拉削采用类似于机械拉削的进给模式,通过一种截面轮廓渐扩的工具阴极高速通过工件表面,阴极截面轮廓由小至大逐步通过工件加工表面,实现工件加工。由于加工过程中材料是通过电化学反应阳极溶解原理去除,加工中工具和工件之间存在加工间隙,因此工件最终的成形轮廓由工具阴极轮廓的变化量和加工间隙共同影响,其成形规律和机械拉削有很大差异。

图 1 是电解拉削的试验系统示意图。工具阴极为截面渐扩结构,依据特定的升角 α 从小端开始缓慢变化直至大端,升角示意图如图 2 所示。阴极前为前导流端,后为后导流端,前导流端使进液口由大变,形成渐缩式流道,增大电解液流入加工间隙时的流速,同时防止流道突变产生涡流或死水区;后导流端形成背压以及防止流场突变。加工过程中,电解液通过压力泵注入进液口,工件与阴极间充满电解液,工件与阴极分别与电源正负极连接,通过电流记录仪记录整个加工过程的电流值,阴极杆带动阴极进给,完成加工。

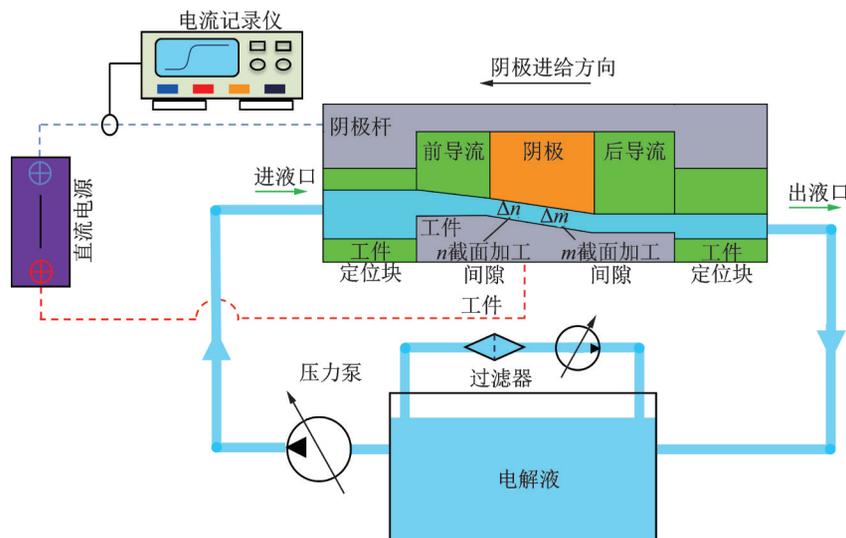


图 1 电解拉削试验系统示意图

Fig.1 Electrochemical broaching experiment system

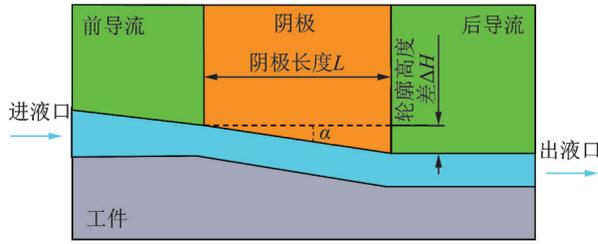


图2 阴极升角示意图

Fig.2 Cathode rise angle

1.2 电解拉削加工有限元仿真分析

在电解拉削加工中,工具阴极的结构是影响加工过程最为重要的因素。为了研究具有升角的阴极加工面长度对加工过程的影响,设小端 H_1 比大端 H_2 小0.2 mm,阴极总长为 L_1 ,小间隙能提升加工表面质量及加工精度,同时考虑到流场稳定性,初始加工间隙 Δ_0 定为0.2 mm,工件总长 L_2 为30 mm,其参数示意图如图3所示。

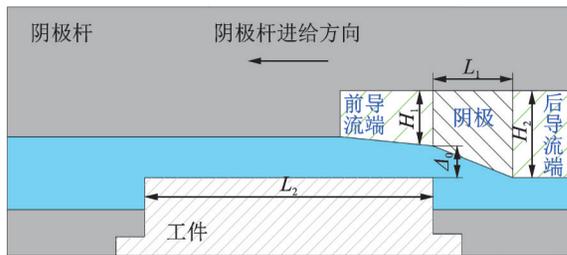


图3 加工初始参数示意图

Fig.3 Initial processing parameters

在电解加工过程中,阴极以恒定速度 v 进给,阴极与工件之间施加加工电压 U 。电场的分布服从拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

当阴极与工件接通后,工件表面电流密度可以通过欧姆定律得到

$$i = kE \quad (2)$$

式中: k 为电解液电导率; E 为电场强度。

工件在电解加工下,逐渐溶解,其法向溶解速度 v_n 可通过法拉第定律得到

$$v_n = \eta w i \quad (3)$$

式中: η 为电流效率; w 为体积电化当量; i 为电流密度。

阴极完全进入后,加工进入稳定状态,当加工电压与进给速度相互匹配时,阴极与工件的加工间隙均匀。阴极表面析出氢气以及加工过程中产生的热量都会进入加工间隙的电解液中,这会影响到电解液电导率 k ,电解液电导率 k 与电解液温度 T 以

及气泡率 β 的表达式如下

$$k = k_0(1 - \beta)^n [1 + \gamma(T - T_0)] \quad (4)$$

式中:气泡率 β 指单位时间内流过某一截面的两相流总体积中气相介质所占的比例; γ 为电导率温度系数,取值为0.025; n 为气泡率 β 对电导率 k 的影响指数,取值为1.5^[15]。

在阴极表面生成的气泡量 N_{H_2} 可根据法拉第定律计算获得

$$N_{H_2} = \frac{i_c}{2F} \quad (5)$$

式中: i_c 为阴极表面的电流密度; F 为法拉第常数。

由于电解加工过程中化学反应所产生的热量远小于焦耳热,因此将加工区产生的热量近似等同于焦耳热,如此电解液热量的传递与分布如下

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = \alpha_p T \left(\frac{dp}{dt} + u \cdot \nabla p \right) + \tau \cdot \nabla u + Q \quad (6)$$

式中: ρ 为溶液密度; C_p 为溶液比热容; u 为溶液流速; q 为热传导通量; q_r 为热辐射通量; α_p 为热膨胀系数; τ 为黏性应力。

为了得出合适的阴极长度,开展了不同长度下的多场耦合仿真。根据表1所示的仿真参数建立出图4所示的二维多场耦合仿真模型。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
工件长度 L_2 /mm	30
加工间隙 Δ /mm	0.2
电参数 U /V	12
电解液	硝酸钠,20%(重量百分数)
气体密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.08
气泡直径 d /mm	0.01
电解液温度 T_0 /K	303.15
进液口压力 P_1 /MPa	1.2
出液口压力 P_2 /MPa	0.2
阴极长度 L_1 /mm	5,10,20,30

对电解拉削不同参数下的气泡率 β 及温升进行分析。采用Comsol软件进行多场耦合计算,温升仿真结果如图5所示,气泡率仿真结果如图6所示。

从图5中可以看出,当阴极长为30 mm时,温度由入口的303.15 K上升到328.15 K,电解液温度上升25 K;而随着阴极长度的减小,温升逐渐下降,当阴极长为5 mm时,温升为2.35 K,基本对加工无影响。

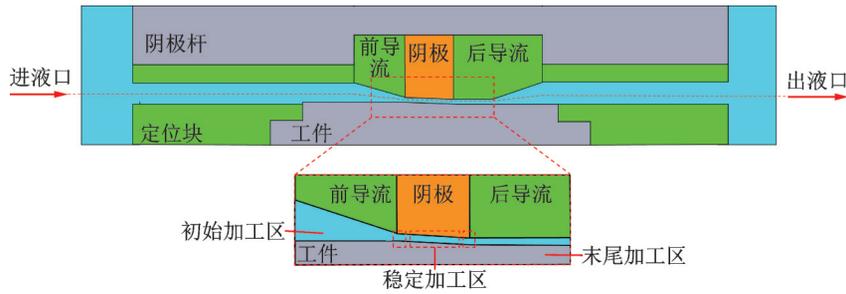


图 4 二维多场耦合仿真模型

Fig.4 Two-dimensional multi field coupling simulation model

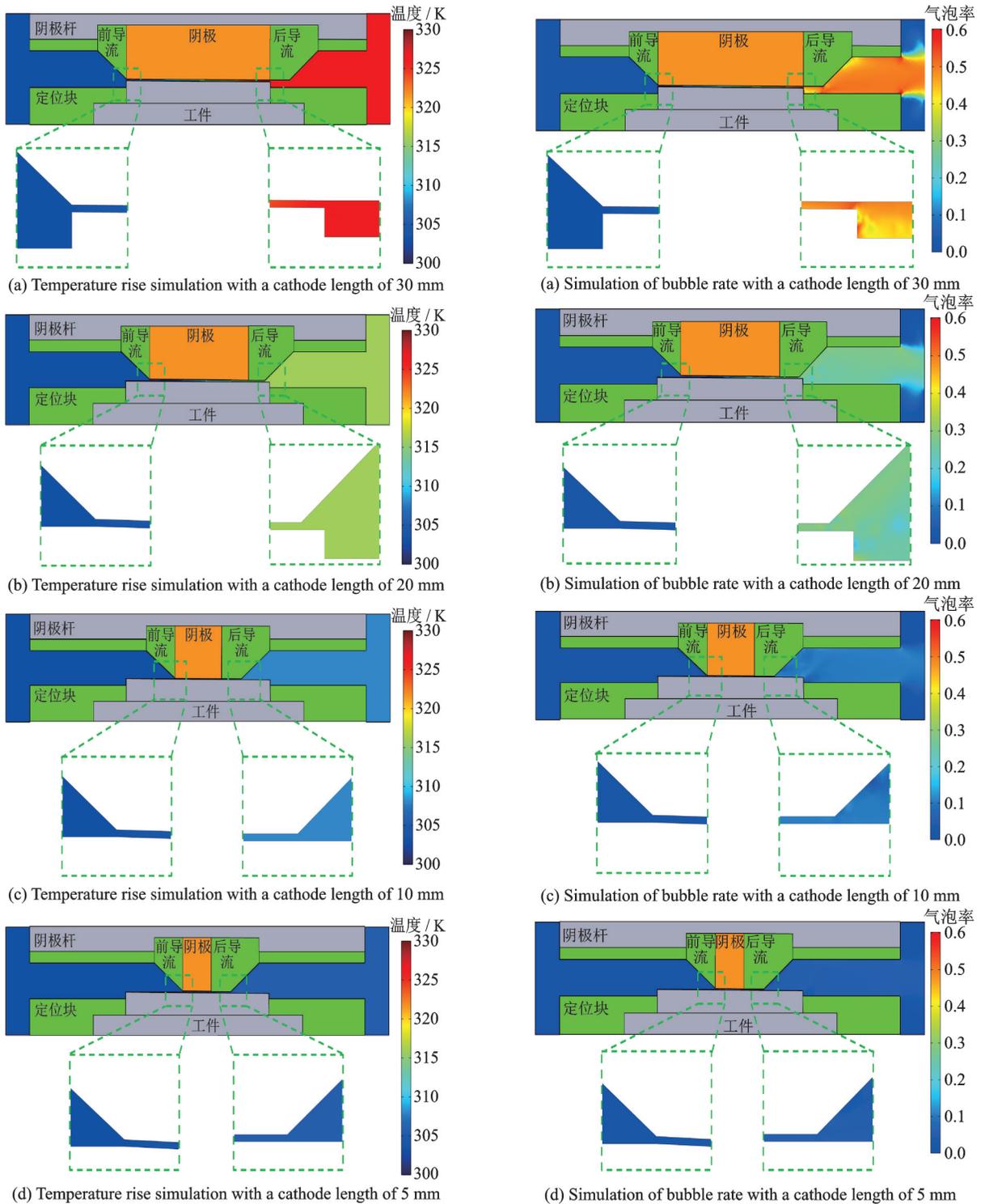


图 5 温升仿真结果

图 6 气泡率仿真结果

Fig.5 Temperature rise simulation results

Fig.6 Bubble rate simulation results

如图6所示,阴极长为30 mm时,阴极与工件加工间隙出口气泡率达到52.8%,即在单位时间内流过出口截面的两相流总体积中气相介质所占的比例达到了一半,这对加工过程会造成极大影响,且极易发生短路现象;当阴极长度降为5 mm时,气泡率也下降到4.8%,对加工过程产生的影响较小。

多场耦合仿真是在加工间隙均匀的情况下仿真得到的,但在电压相同、进给速度不同下,加工间隙的分布呈现多种情况,因此建立电解拉削瞬态仿真模型,如图7所示。由多场耦合仿真得知,在间隙均匀的情况下,阴极长为5 mm时加工产物对加工过程影响较小,因此根据表2所示的仿真参数进行不同速度下的电解拉削瞬态仿真。

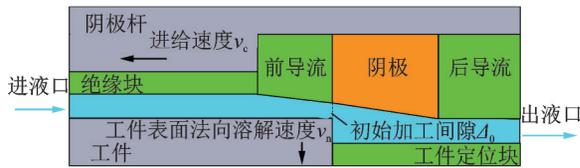


图7 电解拉削瞬态仿真模型

Fig.7 Transient simulation model for electrochemical broaching

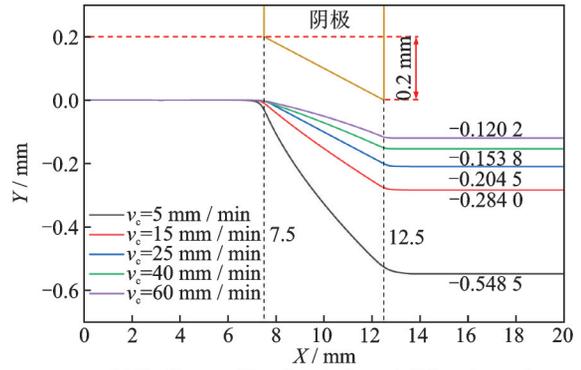
表2 瞬态仿真参数

参数	数值
初始加工间隙 Δ_0 /mm	0.2
电参数 U /V	12
电解液电导率 k /($S \cdot m^{-1}$)	12
工件材料	GH4169
阴极长度 L_1 /mm	5
进给速度 v_c /($mm \cdot min^{-1}$)	5、15、25、40、60

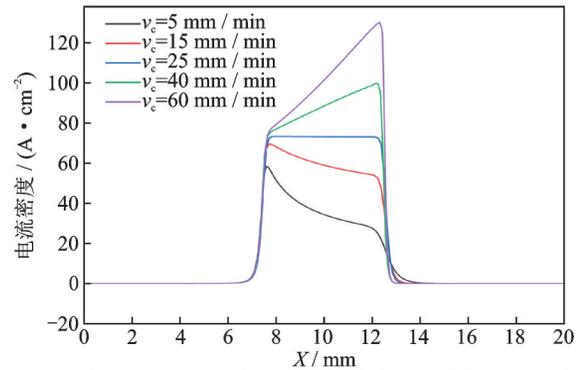
图8为不同速度下的瞬态仿真结果,可以看到在速度为5 mm/min时,去除量较大,加工间隙呈现扩张趋势,表面电流密度弯曲下降;当速度为25 mm/min时,加工间隙较为均匀,表面电流密度基本不变;当速度继续提升,去除量减少,加工间隙为收敛状态,表面电流密度随加工间隙缩小而增大,当速度为60 mm/min时,出口间隙由初始的0.2 mm变为0.120 2 mm。

当加工间隙扩张、电压不变时,气泡率和温升必然下降,因此主要考虑当加工间隙收敛,电解拉削产物是否对加工过程产生较大影响。

对阴极长5 mm、初始间隙0.2 mm、出口间隙0.120 2 mm的加工状态进行多场耦合仿真,结果如图9所示。可以看到,当阴极长度为5 mm时,提升进给速度至60 mm/min,加工间隙收敛至0.120 2 mm,出口气泡率为10.56%,温升为5.2 K,对加工过程影响较小。



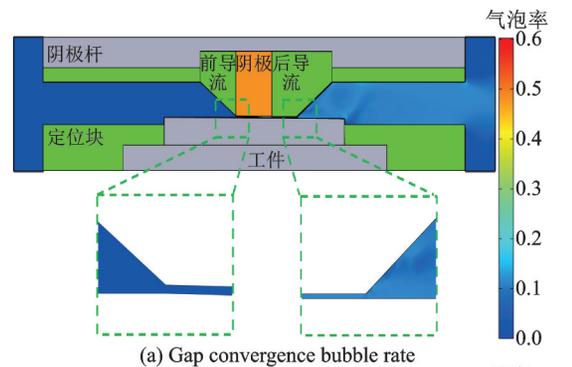
(a) Surface profile of workpiece at different speeds



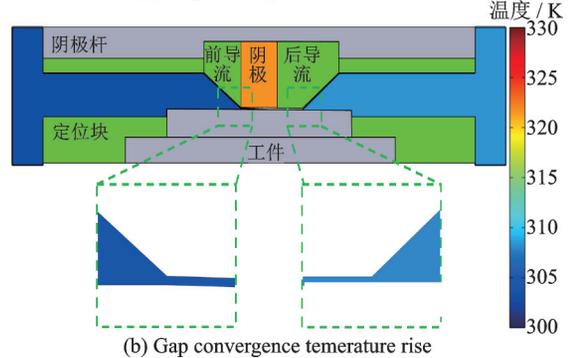
(b) Surface current density of workpiece at different speeds

图8 电解拉削瞬态仿真结果

Fig.8 Transient simulation results of electrochemical broaching



(a) Gap convergence bubble rate



(b) Gap convergence temperature rise

图9 间隙收敛下产物分布

Fig.9 Product distribution under gap convergence

上述仿真是在阴极大小端高度差 ΔH 为0.2 mm下进行的仿真,升角由阴极大小端高度差和阴极长度共同决定,此时升角 α 为0.04 rad,当进给速度为25 mm/min时,加工间隙接近均匀型,为了

选出合适的阴极结构参数,用此加工参数,对不同的阴极升角进行瞬态仿真,仿真参数如表 3 所示。

表 3 不同升角瞬态仿真参数表

Table 3 Transient simulation parameters for different lift angles

参数	数值
初始加工间隙 Δ_0 /mm	0.2
阴极大小端轮廓高度差 ΔH /mm	0.1、0.2、0.3、0.4
阴极升角 α /rad	0.02、0.04、0.06、0.08
电参数 U /V	12
电解液电导率 k /($S \cdot m^{-1}$)	12
工件材料	GH4169
阴极长度 L_1 /mm	5
进给速度 v_c /($mm \cdot min^{-1}$)	25

图 10 为不同升角瞬态仿真结果,在同电压、同进给速度的情况下,大升角会减小出口间隙,同时增加去除量;小升角则会扩大出口间隙,减小去除量。

从上述仿真结果可知,阴极长度在 5 mm 较好,气泡率及温升较小,对试验加工影响较小,当进给速度提升一倍以上,加工间隙收敛后,产物对加工过程影响仍然较小,考虑到阴极加工及夹具设计等因素,阴极长度 L_1 定为 6 mm。

大升角代表着去除量多,在相同电压、进给速度的情况下相比于小升角出口间隙缩小,使得加工区出口电解液气泡率和温升都上升,涡轮盘榫槽电解拉削目的之一为去除毛胚表面的重铸层,重铸层厚度一般为 20~40 μm ,去除量需求不高;小升角在同等电压及进给速度的情况下,加工间隙呈扩张状态,小间隙是电解加工高精度的基础要求,但过小的加工间隙会导致产物难以排出,影响加工过

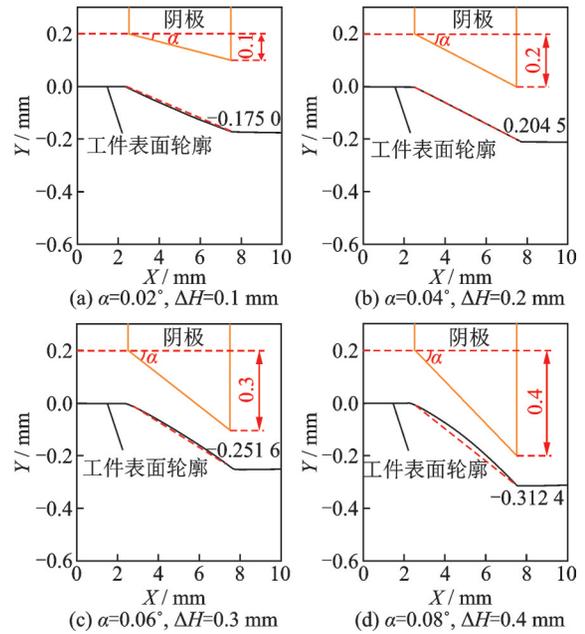


图 10 不同升角瞬态仿真结果

Fig.10 Transient simulation results for different lift angles. 因此综合考虑后,阴极大小端高度差定为 0.2 mm,当阴极长为 6 mm 时,升角为 0.033 rad,初始加工间隙定为 0.2 mm。

2 平面精密电解拉削试验设备

为了解电解拉削的加工特性,分析不同参数下加工表面质量、轮廓精度和电解拉削后工件表面截面轮廓,设计了平面电解拉削夹具,如图 11 所示。阴极杆结构如图 12 所示,为了不造成流道突变,阴极前装有前导流端,该导流端具有小升角,使流道逐渐缩小,提升电解液流速,后导流端形成背压,防止流场突变,阴极材料为钨铜合金。工件如图 13 所示,材料为 GH4169,电解液浓度、电解液的进出

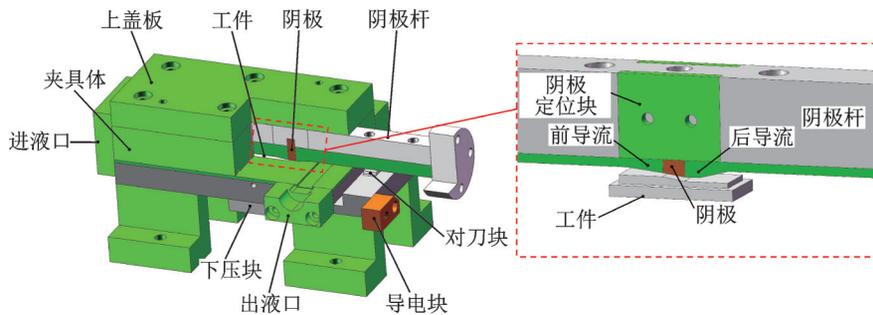


图 11 平面夹具整体三维图

Fig.11 Overall 3D diagram of planar fixture

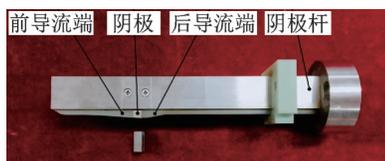


图 12 平面电解拉削阴极杆结构组成

Fig.12 Composition of cathode rod structure in planar electrochemical broaching

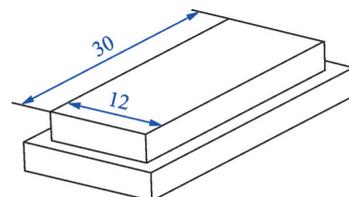


图 13 平面工件参数示意图

Fig.13 Plane workpiece parameters

口压力、电解液温度等参数与仿真参数一致,如表1所示,加工电压为直流。

3 平面试验分析及棒槽电解拉削

3.1 同电压不同速度试验结果分析

在电解拉削加工过程中,由于工具阴极存在一定的轮廓渐扩升角,在相同加工参数采用不同进给速度加工时,受材料溶解速度快慢影响,会呈现以下3种加工间隙的状态,分别是加工间隙扩张型、加工间隙均匀型、加工间隙收敛型,如图14所示。

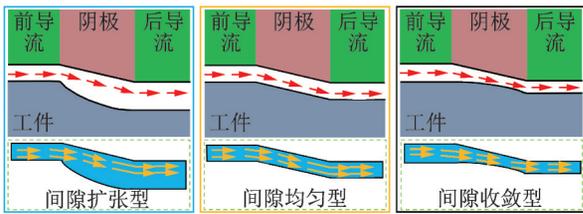


图14 工件与阴极间的加工间隙变化

Fig.14 Change in machining gap between workpiece and cathode

由于工具进给速度越快,材料被溶解的时间越短,加工间隙越小,因此如果设间隙均匀型速度为参考进给速度,当阴极进给速度大于参考速度时,加工间隙便会趋向于收敛;反之小于参考速度时,加工间隙便会趋向于扩张。电解拉削加工间隙分布情况将直接影响电解液流场和间隙内的产物分布情况,从而影响加工表面质量和成形精度,因此采用加工电压12 V,进给速度分别选取20、25、30、40、50、60、70、80、90、100、110和120 mm/min开展提速加工试验,加工后工件如图15所示。



图15 相同电压、不同速度电解拉削出的工件图

Fig.15 Workpieces produced by electrochemical broaching at the same voltage and different speeds

试验完成后,对加工后的工件进行测量,沿进给方向,分别测量5、15和25 mm处的表面轮廓,其中工件5 mm截面为阴极的进口,25 mm截面为阴极出口,测量示意图如图16所示。各工件对应参数如表4所示,测量结果如图17所示。

随着电源接通,阴极进给,工件起始位置开始

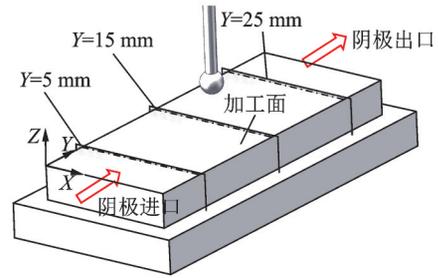


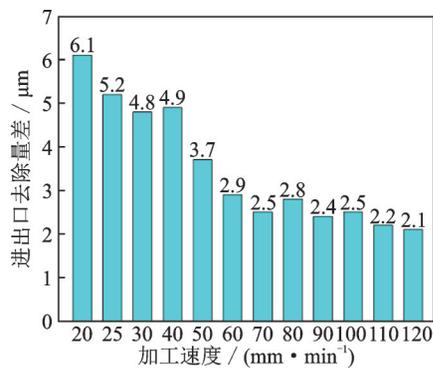
图16 平面检测示意图

Fig.16 Schematic diagram of planar inspection

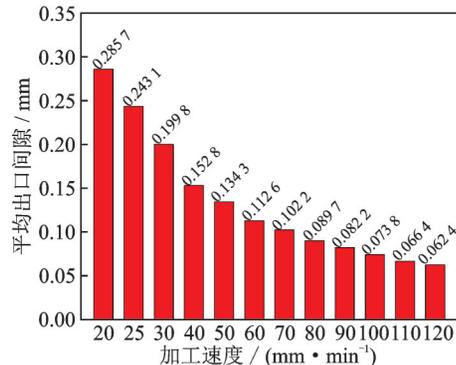
表4 各工件对应参数

Table 4 Corresponding parameters for each workpiece

序号	电压/V	进给速度/ (mm·min ⁻¹)	平均电流密度/ (A·cm ⁻²)
1	12	20	62.08
2	12	25	67.22
3	12	30	70.83
4	12	40	75.28
5	12	50	77.78
6	12	60	79.72
7	12	70	80.83
8	12	80	82.78
9	12	90	84.44
10	12	100	86.11
11	12	110	87.64
12	12	120	88.89



(a) Differences in import and export removal at different speeds



(b) Average outlet clearances at different speeds

图17 不同速度工件检测结果显示图

Fig.17 Schematic diagram of workpiece detection results at different speeds

加工,而随着阴极完全离开一直到整个加工结束,起始处还会存在杂散电流进行杂散腐蚀,所以工件起始位置去除量会大于截止处,造成工件表面进出口去除量差的形成。由于阴极小端 H_1 比大端 H_2 小 0.2 mm,且初始加工间隙 Δ_0 为 0.2 mm,所以不同处的出口间隙就是该处去除量。电解拉削后表面进出口去除量差会随着速度的提升而减小,当速度为 20 mm/min 时,去除量差为 6.1 μm ,随着速度提升至 60 mm/min,平面进出口去除量差有明显改善,达到了 2.9 μm ,之后随着速度的提升,进出口去除量差改善较小,当速度提升至 120 mm/min 时,去除量差为 2.1 μm 。

为研究工件在经过电解拉削加工后表面横截面轮廓,取上述 1、3、6、9 号工件进行横截面轮廓测量,这 4 个工件刚好包含了 3 种加工间隙。图 18 是 4 个工件横截面轮廓测量结果图。

从图 18 可知,工件经过电解拉削后,工件表面会因为后端杂散腐蚀造成表面去除量差,且表面横截面轮廓不是成一定角度的斜线;工件 9 截面轮廓进出口去除量差比工件 1 小,但其截面轮廓波动更大,最高点与最低点相差 8.6 μm ,其他 3 个工件最高点与最低点高度差在 6~7 μm ,这也是为何工件

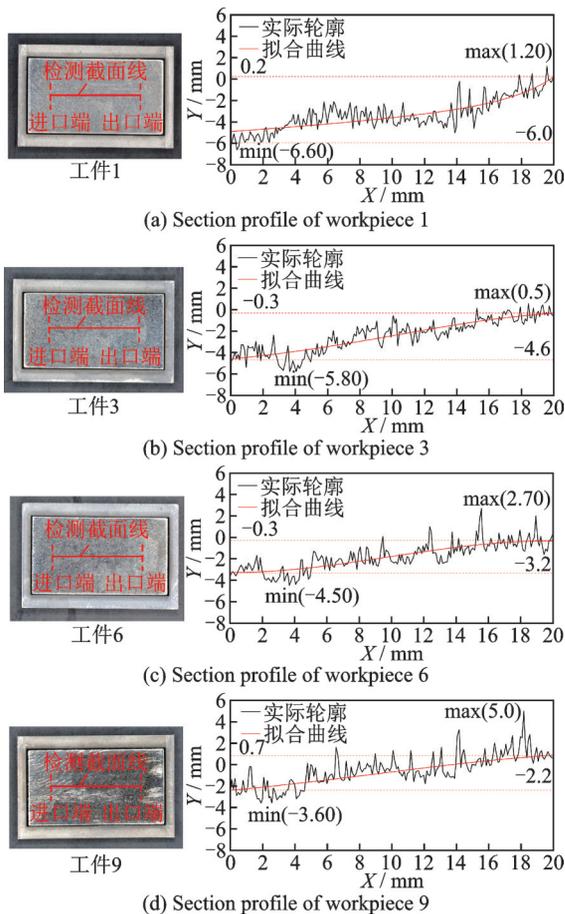


图 18 4 个工件横截面轮廓测量结果图

Fig.18 Measurement results of cross-sectional profiles of four workpieces

9 进出口去除量差较小但粗糙度却是最高的原因。

图 19 为工件 3、7、9、12 精密电解拉削后表面形貌图。图 20 为不同进给速度对应的加工表面粗糙度 R_a ,随着速度的不断提升,去除量不断减少,加工间隙越来越小,电流密度越来越大。

由图 17~20 可看出,当进给速度从 20 mm/

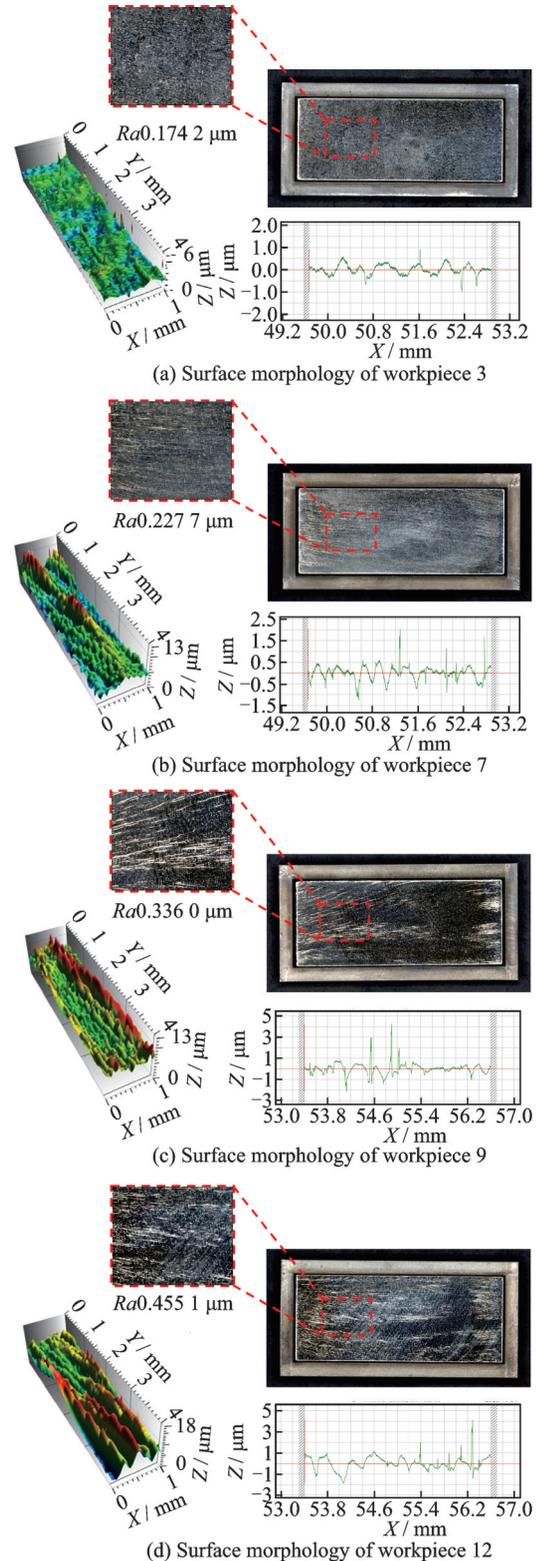


图 19 不同速度下工件表面形貌图

Fig.19 Surface morphology of workpieces at different speeds

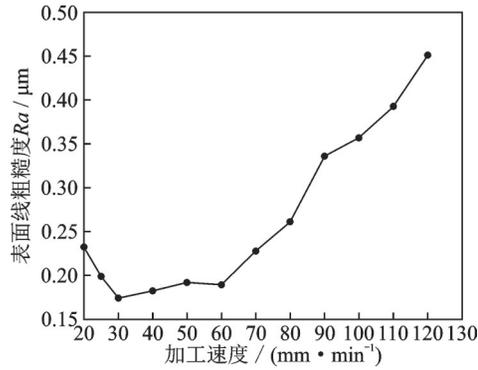


图20 不同进给速度下的表面粗糙度

Fig.20 Surface roughness at different feed rates

min 逐渐提升至 30 mm/min 时,随着进给速度的提升,加工间隙逐渐缩小,表面质量明显提升。然而,当进给速度提升至 70 mm/min 时,加工表面开始出现流痕,表面质量开始变差,此时平均出口间隙为 0.102 2 mm。

从检测结果可知道,在速度为 70 mm/min 时,工件表面开始出现流痕,此时加工间隙为收敛型,初始加工间隙 Δ_0 为 0.2 mm,出口加工间隙 Δ 为 0.102 2 mm,流痕是随着加工间隙的逐渐收敛才出现。由多场耦合仿真可知,当电压不变、速度提升时,加工间隙收敛,同时电流密度上升,产物及气泡增多,此时加工区电解液产物、气泡分布难以均匀,部分区域产物及气泡集中,成股流出加工区,如此加工区电导率 k 值差异较大,工件表面开始出现流痕。对工件 7 进行多场耦合仿真,仿真参数与上述耦合参数一致,只是出口加工间隙变为 0.102 2 mm,结果如图 21 所示。

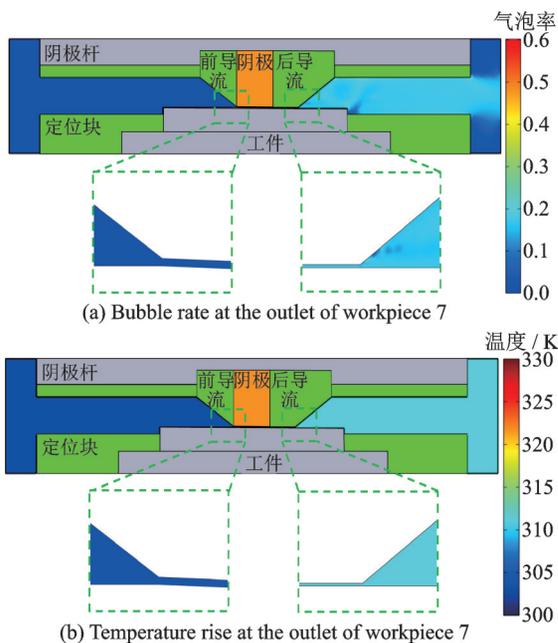


图21 表面流痕产生时出口气泡及温升

Fig.21 Bubbles and temperature rise at the outlet when surface flow marks are generated

当进给速度为 70 mm/min 时,工件加工表面开始出现流痕,通过多场耦合得知此时出口气泡率为 17.2%,温升为 17.2 K。

之后随着速度的提升,平均出口间隙进一步减小,加工电流密度增高使生成的加工产物量也不断增加。随着间隙的减小和产物量的增加,导致加工流痕越来越严重,在进给速度为 120 mm/min 时,流痕最严重,粗糙度 Ra 为 0.455 4 μm 。因此,在电解拉削加工中,必须综合考虑加工电压、进给速度、工具阴极升角和长度等参数,才能获得较好的表面质量和较小的表面进出口去除量差。基于上述研究,最终选择加工电压 12 V、进给速度 60 mm/min 为最优参数组合开展典型榫槽结构的电解拉削试验。

3.2 榫槽电解拉削试验

根据上述研究,开展典型涡轮盘榫槽结构单元件的电解拉削加工试验,设计了如图 22 所示的榫槽电解拉削夹具。

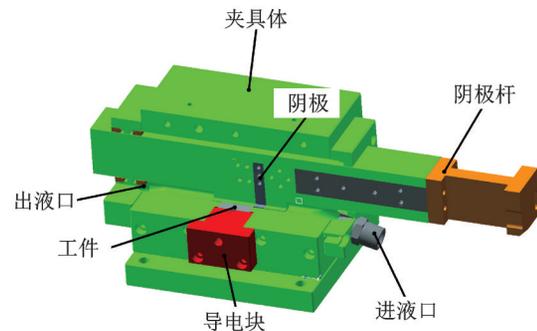


图22 榫槽精密电解拉削工装夹具模型图

Fig.22 Model of precision electrochemical broaching fixture for slot

榫槽拉削阴极杆如图 23 所示,前导流截面由小到大,后导流截面不变,阴极与平面拉削阴极一样,小端 H_1 比大端 H_2 小 0.2 mm,阴极总长 L_1 为 6 mm,初始加工间隙 Δ_0 定为 0.2 mm,工件总长 L_2 为 30 mm。

工件毛坯先通过线切割进行初加工,再通过电解拉削精加工,综合考虑加工表面进出口去除量差、表面质量等因素决定采用电压为 12 V、进给速度为 60 mm/min,对材料为 GH4169 的燕尾形榫槽进行电解拉削加工,相同参数加工 4 个燕尾形榫槽。整个加工过程无短路现象发生,加工出的榫槽结构如图 24 所示。

采用三坐标测量机对加工出来的燕尾形榫槽轮廓测量,沿进给方向 5、15 和 25 mm 进行数据采集,将加工出的榫槽轮廓数据点导入 UG 中曲线拟合后进行偏差度量,检测结果如图 25 所示。

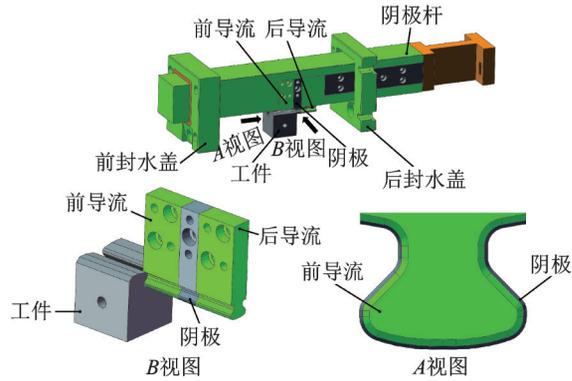


图 23 榫槽拉削阴极杆结构组成

Fig. 23 Composition of cathode rod structure for slot broaching

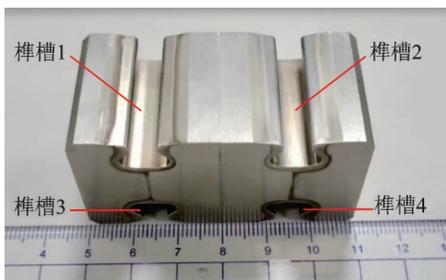


图 24 电解拉削加工出的榫槽结构

Fig. 24 Slot structure produced by electrochemical broaching

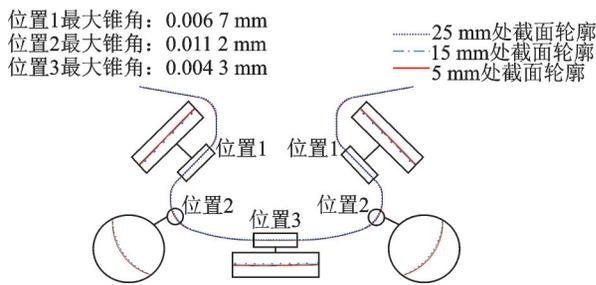


图 25 榫槽沿进给方向轮廓检测

Fig. 25 Profile detection of slot along the feed direction

4个同参数下加工出的榫槽结构锥角表现基本相同,在圆弧过渡处由于电流密度、产物分布不均等,前后锥角较大,位置2处于电流发散,表面电流密度不均匀,该处锥角最大,为0.011 2 mm;其余直线部分电流均匀,锥角为0.006 7和0.004 3 mm。4个同参数加工出的榫槽轮廓偏差在8 μm以内。

采用粗糙度仪对局部加工表面进行测量,结果如图 26 所示,线粗糙度为 Ra0.179 7 μm。

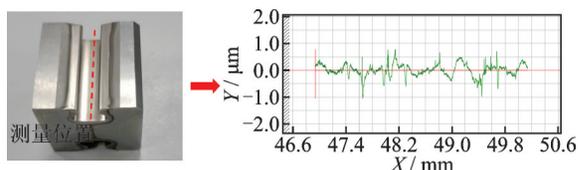


图 26 加工表面局部线粗糙度

Fig. 26 Local line roughness of machined surface

4 结 论

本文针对榫槽电解拉削技术开展研究,获得的结论如下:

(1)阴极长度与加工过程紧密相关,过长的阴极气泡率、温升较高,阴极长度在 5 mm 附近表现较好;

(2)在电解拉削加工中,提升加工速度可显著改善型面进出口去除量差,当速度提升至 60 mm/min 后,型面进出口去除量差可控制在 3 μm 以内;

(3)提速电解拉削试验中,当速度提升至 70 mm/min、出口间隙约 0.1 mm 时,工件表面开始出现流痕,且随着速度进一步提升、出口间隙进一步减小,表面流痕逐渐加重,表面质量显著下降;

(4)采用优化的参数 12 V-60 mm/min,电解拉削加工出的典型榫槽试件,粗糙度优于 0.2 μm,轮廓重复精度优于 8 μm,初步验证了榫槽电解拉削的可行性。

参考文献:

- [1] 黄文周,张俊杰,张乘齐. 枫树形榫联接结构参数选取及其与应力的关系[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(1): 22-25.
HUANG Wenzhou, ZHANG Junjie, ZHANG Chengqi. Parameter selection of fir tree tenon joint structure and its relationship with stress[J]. Gas Turbine Testing and Research, 2013, 26(1): 22-25.
- [2] 刘健. 拉削加工在航空发动机制造的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2013(16): 134.
LIU Jian. Research on the application in aero-engine manufacturing[J]. China New Technologies and Products, 2013(16): 134.
- [3] 于建华,张渝. 粉末冶金涡轮盘精密加工技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2018(15): 28-36.
YU Jianhua, ZHANG Yu. Research status of precision machining technology for powder metallurgy turbine discs[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018(15): 28-36.
- [4] 蒲一民. 涡轮盘榫槽线切割加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2016(2): 37-40, 70.
PU Yimin. Research on WEDM process of turbine groove[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(2): 37-40, 70.
- [5] ASPINWALL D K, SOO S L, BERRISFORD A E, et al. Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and inconel 718 using minimum damage generator technology[J]. CIRP Annals, 2008, 57(1): 187-190.
- [6] KLOCKE F, WELLING D, DIECKMANN J, et al.

- Developments in wire-EDM for the manufacturing of fir tree slots in turbine discs made of inconel 718[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 504/505/506: 1177-1182.
- [7] 孟漪. 高效精密枞树型轮槽铣刀设计制备准则及其试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
MENG Yi. Design and preparation criteria and experimental study of high efficiency and precision fir tree type wheel groove milling cutters[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [8] KLOCKE F, SEIMANN M, BINDER M, et al. Milling of fir-tree slots in allvac 718 plus[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77: 409-412.
- [9] 秦彬, 王子铭, 于建华, 等. FGH96 涡轮盘榫槽成形磨削加工技术研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(19): 74-79.
QIN Bin, WANG Ziming, YU Jianhua, et al. Research on the forming and grinding technology of FGH96 turbine disk tenon and groove[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2022, 65(19): 74-79.
- [10] 丁文锋, 李本凯, 傅玉灿, 等. 涡轮盘榫槽加工技术现状与展望[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(23): 2785-2798.
DING Wenfeng, LI Benkai, FU Yucan, et al. Current status and prospects of machining technology for turbine disk tenon grooves[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(23): 2785-2798.
- [11] 陈玉宏. 精密电解拉削基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
CHEN Yuhong. Basic research on precision electrolytic broaching[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [12] TANG L, FAN Z J, ZHAO G G, et al. High aspect ratio deep spiral tube electrochemical machining technology[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 407-411.
- [13] 陈玉宏, 刘嘉, 朱荻. 小间隙高速精密电解拉削扩孔方法研究[J]. *机械制造与自动化*, 2021(2): 5-8.
CHEN Yuhong, LIU Jia, ZHU Di. Research on small gap high speed precision electrolytic broaching and expanding method[J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2021(2): 5-8.
- [14] LIU J, WU H, GAO F. Study on the control method of sidewall taper in electrolytic broaching of micro multi-grooves[J]. *Micromachines*, 2022, 13(12): 2062.
- [15] 徐家文, 云乃彰, 王建业, 等. 电化学加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
XU Jiawen, YUN Naizhang, WANG Jianye, et al. *Electrochemical machining technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

(编辑: 胥橙庭)