

双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面 微观形貌演变研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.04.007

马新周¹ 罗志坚¹
胡纯蓉² 李文元¹
廖翠姣¹

1. 湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南工业大学
计算机学院
湖南 株洲 412007

摘要: 针对各向异性合金材料电解加工过程中, 加工表面形貌难以控制的问题, 利用位置函数建立双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观材料模型, 进而建立电解加工仿真微观物理模型, 分析加工表面微观形貌随宏观工艺参数演变的规律。研究表明: 电解液流速在 14.7~23.4 m/s、进给速度在 1.7~2.3 mm/min 范围内, 随着电解液流速和进给速度的增加, 加工表面粗糙度 R_y 越低; 当加工电压为 21 V、进给速度为 2.3 mm/min、电解液流速为 23.4 m/s 时, 加工表面最光洁, R_y 值达最小, 为 0.677 μm 。从微观形貌演变仿真可以看出, 获得最光洁加工表面经历了先粗化后抛光的过程。

关键词: 双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金; 位置函数; 微观材料模型; 微观形貌演变

中图分类号: TG662 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2020)04-0045-12

引文格式: 马新周, 罗志坚, 胡纯蓉, 等. 双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面微观形貌演变研究 [J]. 包装学报, 2020, 12(4): 45-56.

1 研究背景

Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金具有高比强度、高比模量和耐高温等优异性能, 已经成功应用于航空发动机低压涡轮叶片^[1], 其传统的机械加工方法存在刀具磨损厉害、加工效率低、表面完整性较差的缺陷。近年来, TiAl 合金的电解加工 (electrochemical machining, ECM) 引起了研究者的关注, 并取得了一定的研究成果^[2-3]。但是其加工精度与表面质量还不能满足航空发动机叶片高精度、高质量的要求, 因而改进此方法需要大量的相关试验和机理研究, 如微观形貌演

变机制, 以及由此引起的宏观表面质量的变化, 工艺参数的优化等。

仿真研究已成为研究宏观、微观电解加工机理与工艺优化的一种重要手段^[4-6]。目前, 研究者主要采用宏观电解加工仿真方法, 优化设计复杂工具电极结构、流场等以提高电解加工精度和表面质量^[7]。Chen Y. L. 等^[8]建立了电解加工的多物理场耦合模型, 采用弱耦合迭代法, 动态跟踪和分析了电解加工过程中加工间隙的演变规律。A. Ernst 等^[9]在阳极溶解行为的理论基础之上, 通过添加逆计算循环来优化设计 Inconel 718 合金喷气发动机叶片电解加工工具电极的

收稿日期: 2020-03-08

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4067, 2020JJ4271)

作者简介: 马新周 (1989-), 男, 河南开封人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电解加工仿真,
E-mail: 1467753076@qq.com

通信作者: 廖翠姣 (1977-), 女, 湖南新化人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事精密电解加工机理及工艺优化方面的教学与研究, E-mail: xiaocuijiao@163.com

形状,实验验证了模拟刀具形状的有效性,特别是流面和前缘的成形效果较好,但尾缘区域还不能满足成形要求。F. Klocke 等^[10]建立了航空发动机叶片电化学加工过程的多学科仿真模型,且考虑了电解液流动中气体和温度的变化,实现了航空发动机叶片制造过程的宏观电解加工仿真。Zhu D. 等^[11]在 ANSYS 软件中采用电解液从前缘向后缘流动的动态横向流动模式优化了流场,改善了扩压器电解加工电解液流速不均匀的问题。周小超等^[12]引入 Euler-Euler 双流体模型建立了电解加工多物理场模型,分析了电流密度与气泡分布情况,研究表明减小加工电压、增加出口压力能够使电流密度更加均匀。

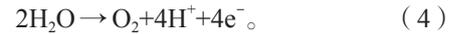
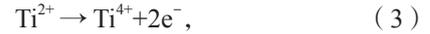
然而,电解加工过程微观机理的仿真研究还比较少。J. Kozak 等^[13]根据各向异性材料不同相的电压降和电化学当量之间的差异,建立了各向异性电解加工加工材料的仿真模型,分析了加工参数对表面粗糙度演化规律的影响,为各向异性材料电解加工的微观机理研究提供了新的思路。F. Klocke 等^[14]用半导体特性来描述双相 42CrMo4 合金电解加工过程生成钝化膜的结构特性,较好地跟踪了双相合金材料电解加工加工表面微观形貌的演化过程。Liu W. D. 等^[15]建立了电解加工表面抛光的多物理场耦合模型,设置了以位置相关的平衡电压作为边界条件,研究了材料的微观结构对电解加工中表面抛光的影响,结果表明所施加的电势对过饱和膜的形成和表面的抛光有重要影响。

由于受不同相的溶解速度差异的影响,多相合金的电解加工表面质量和加工精度难以保证。因此,采用数值仿真方法从微观尺度分析不同相的溶解特性,研究合金的微观形貌演变机制,通过调控工艺参数控制不同相的溶解速度,实现均匀溶解是改善合金电解加工表面质量的有效手段。本文通过建立双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工的微观材料模型,采用 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件仿真分析,揭示双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的电解加工表面微观形貌动态演化规律。

2 理论基础

2.1 工件阳极材料溶解理论

在 NaNO_3 溶液中,工件阳极材料表面的活性原子失去电子生成阳离子而发生电化学腐蚀反应,其反应式为



溶解腐蚀速度遵守法拉第定律^[16],其方程式为

$$V = j \frac{M}{\rho n F} i_{\text{loc}}, \quad (5)$$

式中: j 为电流效率;

M 为金属摩尔质量;

i_{loc} 为电极反应的局部电流密度;

ρ 为合金的密度;

n 为参与溶解反应的电子数;

F 为法拉第常数。

2.2 电场

电解液域上的电场用一个势模型^[17](拉普拉斯公式)表示,其方程为

$$\mathbf{i}_1 = -k_1 \nabla \varphi_1, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_1 = 0. \quad (7)$$

式(6)~(7)中: \mathbf{i}_1 为电解液电流密度矢量;

k_1 为电解液电导率;

∇ 为向量微分算子;

φ_1 为电解液电势。

电极侧壁边界默认为绝缘,则有

$$\mathbf{h} \cdot \mathbf{i}_s = 0, \quad (8)$$

式中: \mathbf{h} 是电极侧壁的单位法向量;

\mathbf{i}_s 为电极上的电流密度。

2.3 电极极化动力学

工件电极电化学溶解动力学过程由巴特勒-沃尔默方程控制(式(9))^[18]。基于此方程,建立工件阳极微观溶解演变仿真模型,并与后续建立的微观材料模型进行强耦合。

$$i_{\text{loc}} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right), \quad (9)$$

式中: i_0 为交换电流密度;

α_a 、 α_c 分别为阳极和阴极的传递系数;

R 为气体常数;

T 为绝对温度;

η 为过电压。

电极/电解液界面的过电压是影响阳极局部电流密度分布的重要参数,其表达式为

$$\eta = \varphi_s - \varphi_1 - E_{\text{eq}}, \quad (10)$$

式中: φ_s 为工件阳极电极电势;

E_{eq} 为平衡电压。

2.4 流场

Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观形貌演变仿真的几何模型是在微观尺度下建立的, 该模型湍流发展不充分。因此, 选择代数 $y+$ 湍流模型, 该模型即体现出湍流的流体特性, 又极大简化了计算量, 且对网格要求较低。其遵守 Navier-Stokes 方程, 同时忽略了气泡的影响^[19]。

$$\nabla v = 0, \quad (11)$$

$$\rho_1 \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \Delta v, \quad (12)$$

式(11)~(12)中: v 为流速;

ρ_1 为电解液密度

p 为流体压力;

μ 为流体动力黏度;

Δ 为拉普拉斯算子。

2.5 温度场

电解加工过程中产生的热量包括电极表面产生的反应热(q_{di})和电解液中产生的焦耳热(q), 其热力学平衡方程式为^[20]

$$d_z \rho_1 C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (d_z k_t \nabla T) = q_{di} + q, \quad (13)$$

式中: d_z 为边界层厚度;

C_p 为常压比热容;

k_t 为导热率。

此处忽略热焓的变化, 反应热表达式^[21]为

$$q_{di} = \eta i_z, \quad (14)$$

式中: i_z 为电极表面的电流密度。

电解液中产生的焦耳热为

$$q = k_1 (\nabla U_1)^2, \quad (15)$$

式中: k_1 为电解液电导率;

U_1 为电解液电压。

电解液的电导率受温度的影响, 其方程式为

$$k_1 = k_0 [1 + \xi (T - T_{ref})], \quad (16)$$

式中: k_0 为电解液的初始电导率;

ξ 为温度影响系数;

T_{ref} 为电解液的初始温度。

3 模型与仿真

3.1 微观材料模型

本文研究双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工

微观形貌的演化规律, 考虑该合金为 γ -TiAl 相和 α_2 -Ti₃Al 相的双相合金材料, 并以片层形式交替排列。通过查阅文献[22]可知, 铸态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金中 γ -TiAl 的体积含量为 α_2 -Ti₃Al 的 3.7 倍。本文采用 CAD 软件建立双相合金分布图, 如图 1 所示。

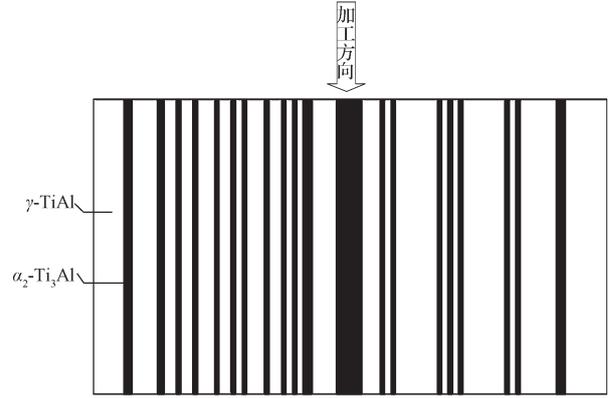


图 1 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观片层组织的分布模型

Fig. 1 The arrangement model of microstructure for Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys

由图 1 可知, γ -TiAl 相和 α_2 -Ti₃Al 相两相合金的片层厚度均满足高斯分布, 其中 γ -TiAl 片层厚度均值为 $0.65 \mu\text{m}$, α_2 -Ti₃Al 片层厚度均值为 $0.55 \mu\text{m}$ 。对 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 片层排布进行随机处理, 同时忽略同相材料的片层界面的影响。

将建立上述的材料模型(图 1)导入 COMSOL Multiphysics 软件, 并将图中的相识别成位置函数 $\text{micro}(x, y)$ 。在 $\text{micro}(x, y)$ 函数中, γ -TiAl 相区域用 1 表示, α_2 -Ti₃Al 相区域用 0 表示, 如图 2 所示。将位置函数与巴特勒-沃尔默方程建立强耦合关系, 其关系表达式为:

$$i_0 = i_{0\alpha_2} (1 - \text{micro}(x, y)) + i_{0\gamma} \text{micro}(x, y), \quad (17)$$

$$E_{eq} = E_{eq\alpha_2} (1 - \text{micro}(x, y)) + E_{eq\gamma} \text{micro}(x, y), \quad (18)$$

$$\rho = \rho_{\alpha_2} (1 - \text{micro}(x, y)) + \rho_{\gamma} \text{micro}(x, y), \quad (19)$$

$$M = M_{\alpha_2} (1 - \text{micro}(x, y)) + M_{\gamma} \text{micro}(x, y). \quad (20)$$

式(17)~(20)中: $i_{0\alpha_2}$ 、 $i_{0\gamma}$ 分别为 α_2 -Ti₃Al 相、 γ -TiAl 相的交换电流密度;

$E_{eq\alpha_2}$ 、 $E_{eq\gamma}$ 分别为 α_2 -Ti₃Al 相、 γ -TiAl 相的平衡电压;

ρ_{α_2} 、 ρ_{γ} 分别为 α_2 -Ti₃Al 相、 γ -TiAl 相的密度;

M_{α_2} 、 M_{γ} 分别为 α_2 -Ti₃Al 相、 γ -TiAl 相的摩尔质量。

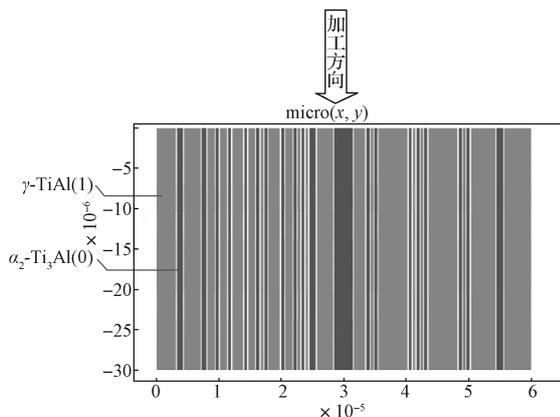


图2 Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织位置函数图
Fig. 2 The position function of the microstructure for Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys

3.2 电解加工仿真模型

为消除微观模型在电解液进出口处电场尖端效应的影响,在微观区域的两侧加入 50 μm 的过渡段,模型横向尺寸为 180 μm (如图3所示),电解液进口流速选择充分发展的流动。微观区域材料为 γ-TiAl 和 α₂-Ti₃Al 两相交替排列,且 γ-TiAl 和 α₂-Ti₃Al 相通过公式(17)(18)被赋予相应的电化学特性,此处忽略微量元素 Cr 和 Nb 的影响。

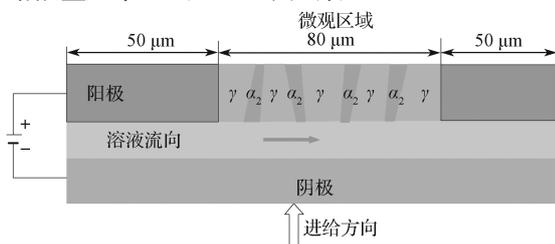


图3 电解加工微观仿真模型
Fig. 3 The micro simulation model of the electrochemical machining

3.3 仿真边界条件

电解加工仿真边界条件所需的电化学参量,采用 SP-150B 电化学工作站三电极系统测量确定。3种工件电极(单相 γ-TiAl、单相 α₂-Ti₃Al 和双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金)用不同粗细的砂纸和抛光粉从粗到细依次打磨、抛光,表面用 Hirox KH-7700 数字显微镜在 2 100 倍下观察确定无划痕;参比电极为 Ag/AgCl 电极(饱和 KCl 溶液),其标准电极电压为 0.199 V (相对于 NHE);对电极为大片铂电极(面积约 4 cm²)。电解液是质量分数为 20% 的 NaNO₃ 溶液。对 3 种工件电极分别依次记录开路电压(持续 2 h)和阻抗谱。阻抗谱扰动电压为 10 mV,频率范围为 0.01 Hz~100 kHz。数据分析软件为 ZsimDemo 3.3。

图4为3种合金的开路电压曲线图。从图可以看出,稳定后的开路电压从高到低依次为: α₂-Ti₃Al、铸态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 和 γ-TiAl。这说明在电解液溶液中随着 α₂-Ti₃Al 含量的减少,自腐蚀能力逐渐增强。根据公式(10)可以得出,在外加相同电压的情况下,3种合金的过电压随着 α₂-Ti₃Al 含量的增大而减少,即阳极界面发生反应的动力越来越小,也说明 γ-TiAl 单相合金更容易发生溶解,而 α₂-Ti₃Al 更难发生溶解。

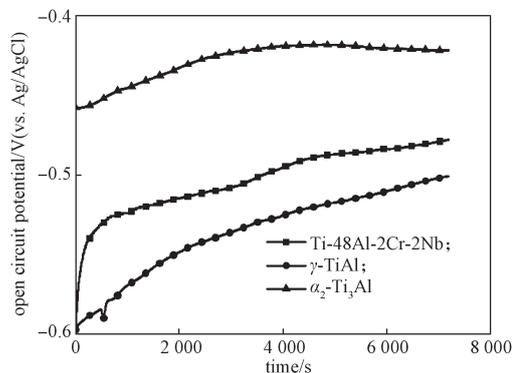
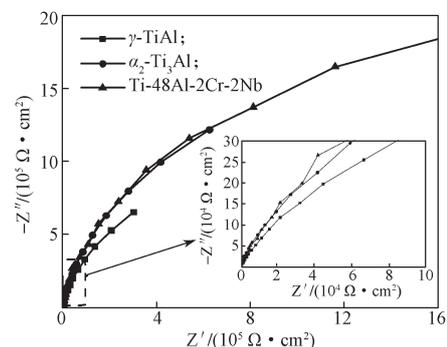
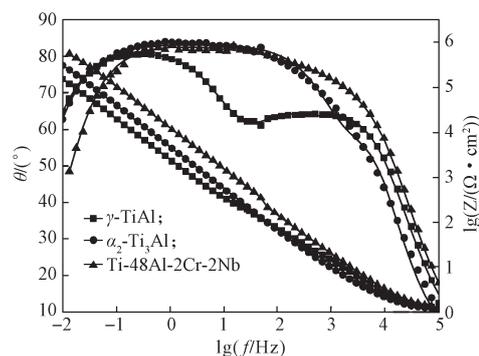


图4 3种合金的开路电压
Fig. 4 Open circuit potential of three types of alloys
3种合金电极的阻抗谱如图5所示。



a) Nyquist 图



b) Bode 图

图5 三种合金的阻抗谱

Fig. 5 Impedance spectroscopy of the three types of alloys

由图 5a 的 Nyquist 阻抗谱图可知, 3 种电极均由容抗弧组成, α_2 -Ti₃Al 和 Ti-48Al-2Cr-2Nb 电极的容抗曲率半径明显大于 γ -TiAl 合金的容抗弧, 且双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电极的总阻抗明显比单相 α_2 -Ti₃Al 合金电极的大。说明单相 α_2 -Ti₃Al 合金和双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金比单相 γ -TiAl 合金具有更强的抗腐蚀性能; 而双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金由于含有微量 Cr 和 Nb, 影响其低频溶解特性^[23-24], 使其总阻抗值最大。

由图 5b 的 Bode 阻抗谱图可知, 单相 γ -TiAl 合金具有明显的两个相位角峰, 即该阻抗弧由两个独立的容抗弧组成, 包含两个时间常数; 单相 α_2 -Ti₃Al 合金和双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的相位角则跨度比较宽, 表面上只有一个相位角峰, 但实际上是由两个特征频率相近的容抗弧组成, 因此, 也包含两个时间常数。阻抗模值从大到小依次为双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金、单相 α_2 -Ti₃Al 合金和单相 γ -TiAl 合金。

为了获得量化的溶解动力学参量, 采用 Zsim-Demo 3.3 软件对测试的 3 种合金电极的阻抗谱进行拟合。依据上述分析的阻抗特征与拟合精度, 合金拟合等效电路如图 6 所示, 拟合得到的相关参数如表 1 所示。图中 R_s 为电解液电阻、 Q_{dl} 为电极溶液界面的双电层电容、 R_{ct} 为电荷转移电阻、 Q_{ad} 为吸附电容、 R_{ad} 为吸附电阻、 W 为扩散电阻。

根据拟合参数 R_{ct} , 并结合公式 (21) 即可得到交换电流密度 i_0 。

$$R_{ct} = \frac{RT}{i_0 n F} \quad (21)$$

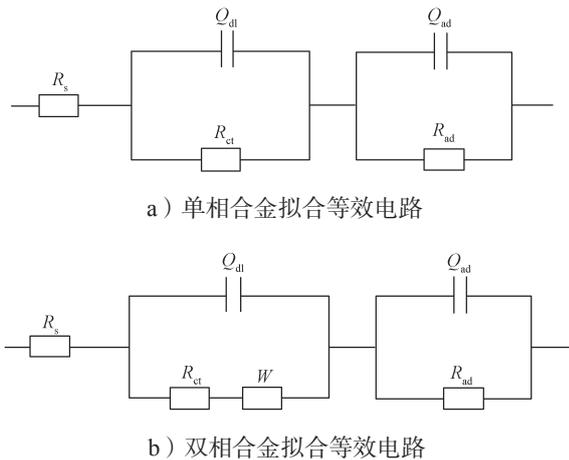


图 6 等效电路图

Fig. 6 The equivalent circuit diagram

表 1 电化学参数

Table 1 The Electrochemical parameters

| 合金 | 开路电压 /V | E_{eq} /V | R_{ct} /($\Omega \cdot \text{cm}^2$) | i_0 /(A/cm^2) |
|--------------------------------|---------|-------------|--|-----------------------------------|
| γ -TiAl | -0.487 | -0.288 | 4.965×10^5 | 1.46×10^{-8} |
| α_2 -Ti ₃ Al | -0.421 | -0.222 | 8.218×10^5 | 8.90×10^{-9} |
| Ti-48Al-2Cr-2Nb | -0.473 | -0.274 | 8.480×10^5 | 8.65×10^{-9} |

电极和电解液的主要物理特性参数如表 2^[25-26] 所示。

表 2 电极和电解液的物理特性参数

Table 2 Physical characteristics of electrodes and electrolyte

| 材料 | 参数 | 取值 |
|-----|---|---------------------|
| 阳极 | 导热系数 /($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) | 21.8 |
| | 密度 / (kg/m^3) | 4 000 |
| | 恒压热容 /($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) | 0.632 4 |
| | 电导率 / (S/m) | 1.5×10^6 |
| 阴极 | 摩尔质量 / (kg/mol) | 0.037 5 |
| | 导热系数 /($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) | 400 |
| | 密度 /(kg/m^3) | 8 900 |
| | 恒压热容 /($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) | 385 |
| 电解液 | 电导率 / (S/m) | 5.755×10^7 |
| | 比热率 | 1 |
| | 密度 /(kg/m^3) | 1 330 |
| | 恒压热容 /($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) | 4 200 |
| | 电导率 /(S/m) | 13.3 |
| | 流体黏度 / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) | 0.001 |

3.4 加载边界条件

在 COMSOL Multiphysics 软件平台建立多物理场耦合仿真模型^[27-28]。通过调用其中的电化学模块、变形几何模块、流场模块和流体传热模块, 并依据上述理论基础建立多物理场耦合模型。其中, 涉及到的主要边界条件如表 3 所示。

表 3 加载的边界条件

Table 3 Load boundary conditions

| 边界条件 | 取值 |
|--|------------------------|
| 工作电压 U/V | 21, 23, 25, 27 |
| 初始加工间隙 s_0/mm | 0.2 |
| 阴极进给速度 $V_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1.7, 1.9, 2.1, 2.3 |
| 电解液入口速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 14.7, 17.5, 21.3, 23.4 |

3.5 网格划分

网格的粗细直接影响仿真结果的精确度和求解的自由度数, 根据微观物理模型, 在工件阳极/电解液界面处进行边界网格加密。由于 α_2 -Ti₃Al 薄片层厚度约为 $0.55 \mu\text{m}$, 为了精确计算阳极表面微观形

貌的演变, 阳极反应界面的最大网格设为 $0.1 \mu\text{m}$, 如图 7 所示。求解器为大规模并行稀疏直接求解器 (MUMPS), 瞬态模拟的时间步长采用向后差分法公式约束的自由时间步。

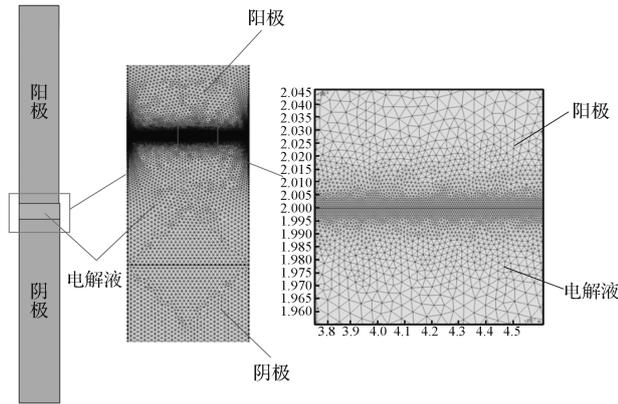


图 7 网格划分
Fig. 7 Meshing

4 结果与分析

4.1 正交试验参数的设计及仿真试验结果

电解加工的各物理场之间的作用关系极其复杂, 加工过程中影响加工表面质量的参数众多, 将所有的参数组合进行模拟, 将花费大量的时间。因此, 采用正交表 $L_{16}(4^5)$ 的设计来安排仿真模拟试验, 通过对电解加工过程中阳极微观形貌演变规律进行分析, 以求得最优的加工试验参数。正交表中, 影响双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金表面粗糙度 R_y 的 3 个因素, 加工电压、阴极进给速度、电解液流速, 以及各因素的 4 个水平的排序, 用随机抽取的方式确定, 具体排序如表 4 所示。按照 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观电解加工仿真模拟试验, 提取稳定状态下阳极界面的粗糙度值 R_y , 记录于正交表的最后一列, 如表 5 所示。

表 4 因素与水平排序表

Table 4 Factor and level ranking table

| 水平 | 因素 | | |
|----|----------------|---|---|
| | 加工电压 /V (A) | 进给速度 / $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ (B) | 电解液流速 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ (C) |
| 1 | 21 | 1.7 | 14.7 |
| 2 | 25 | 2.3 | 23.4 |
| 3 | 27 | 2.1 | 21.3 |
| 4 | 23 | 1.9 | 17.5 |

表 5 双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工正交方案及仿真结果

Table 5 Orthogonal scheme and simulation results of electrochemical machining of two-phase Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy

| 试验序号 | 因素 | | | 粗糙度 $R_y/\mu\text{m}$ |
|------|-------|--------|---------|-----------------------|
| | A | B | C | |
| 1 | 1(21) | 1(1.7) | 1(14.7) | 0.846 |
| 2 | 1(21) | 2(2.3) | 2(23.4) | 0.677 |
| 3 | 1(21) | 3(2.1) | 3(21.3) | 0.709 |
| 4 | 1(21) | 4(1.9) | 4(17.5) | 0.772 |
| 5 | 2(25) | 1(1.7) | 2(23.4) | 0.846 |
| 6 | 2(25) | 2(2.3) | 1(14.7) | 0.790 |
| 7 | 2(25) | 3(2.1) | 4(17.5) | 0.751 |
| 8 | 2(25) | 4(1.9) | 3(21.3) | 0.757 |
| 9 | 3(27) | 1(1.7) | 3(21.3) | 0.862 |
| 10 | 3(27) | 2(2.3) | 4(17.5) | 0.827 |
| 11 | 3(27) | 3(2.1) | 1(14.7) | 0.882 |
| 12 | 3(27) | 4(1.9) | 2(23.4) | 0.787 |
| 13 | 4(23) | 1(1.7) | 4(17.5) | 0.829 |
| 14 | 4(23) | 2(2.3) | 3(21.3) | 0.688 |
| 15 | 4(23) | 3(2.1) | 2(23.4) | 0.698 |
| 16 | 4(23) | 4(1.9) | 1(14.7) | 0.802 |

4.2 正交试验结果分析

4.2.1 加工电压对 R_y 的影响分析

图 8 描述了加工电压对 R_y 主要演变特征的影响。由图 8a 和图 8b 可知: 当电压为 21 V 和 23 V 时, 在不同的进给速度和电解液流速下, 表面粗糙度 R_y 随加工时间的延长有些逐渐增加, 有些则先增加后逐渐减小, R_y 逐渐减小则说明在此条件下, 加工过程中存在抛光作用, 因此, 在这两种电压下, 通过调节进给速度和电解液流速, 可以得到较光洁的加工表面。例如, 当加工电压为 21 V, 进给速度为 2.3 mm/min 时, 电解液流速为 23.4 m/s 时, R_y 的稳定值最小, 为 $0.677 \mu\text{m}$ (模拟试验 2)。此外, 当加工电压为 21 V, 进给速度为 1.9 mm/min, 电解液流速为 17.5 m/s 时 (模拟试验 4), R_y 在极短时间内增加到约为 $0.772 \mu\text{m}$, 然后几乎稳定不变, 这说明在该加工条件下, 加工系统最容易达到动态平衡。由图 8c 和图 8d 可知: 当加工电压分别为 25 V 和 27 V 时, 随着加工时间的延长 R_y 均逐渐增加, 不存在抛光过程, 这说明在本文的参数范围内难以获得较光洁的加工表面。例如, 当加工电压为 27 V, 进给速度为 2.1 mm/min, 电解液流速为 14.7 m/s 时, R_y 的稳定值最大, 为 $0.882 \mu\text{m}$ (模拟试验 11)。

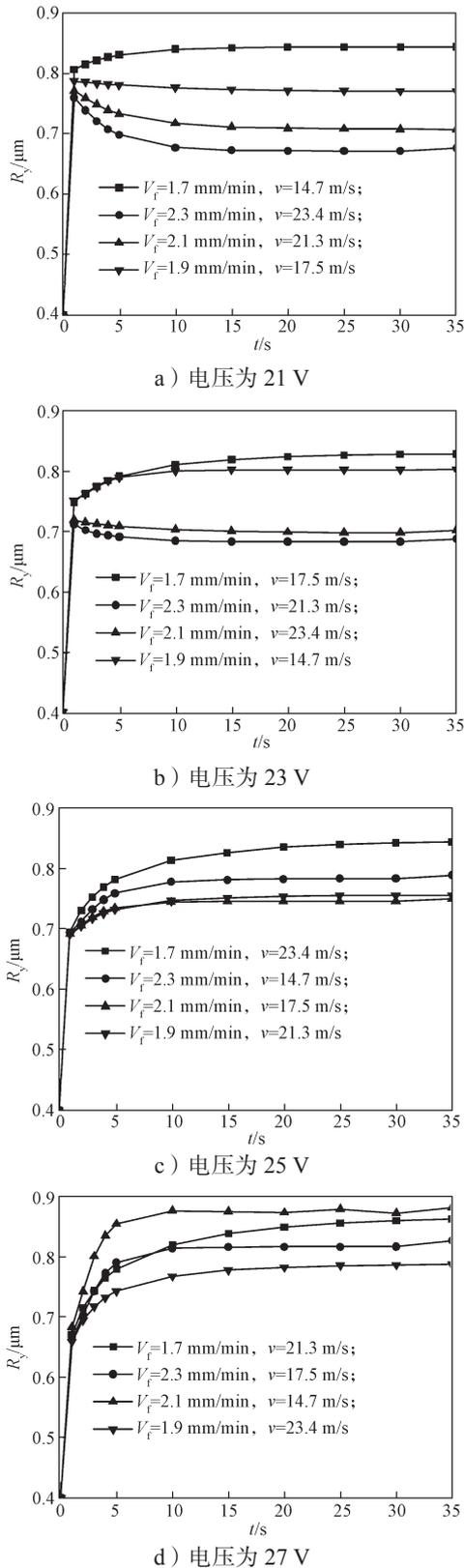
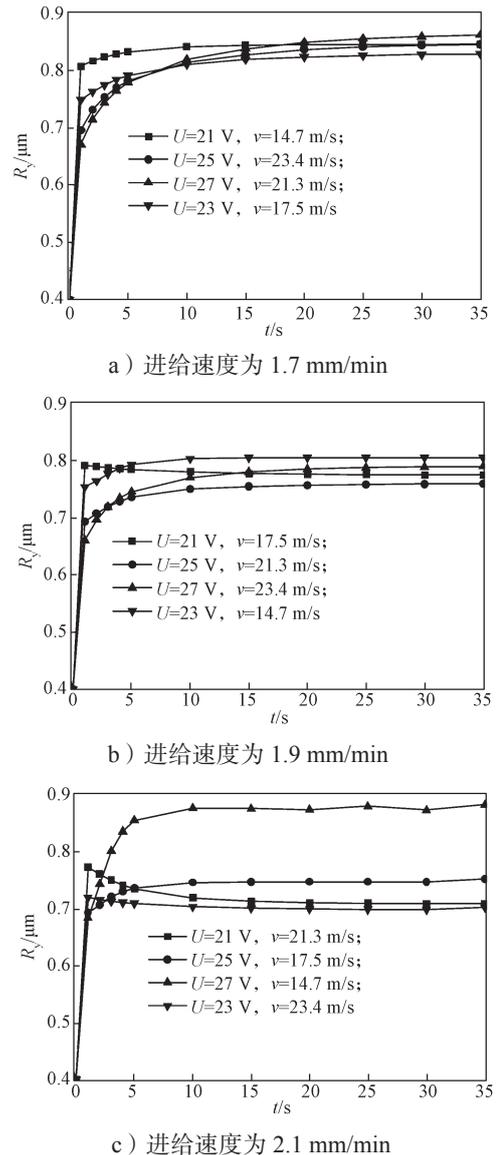
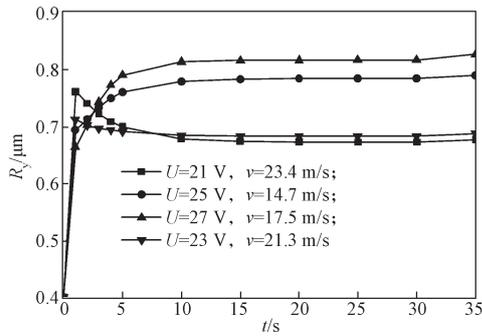
图 8 电压对 R_y 主要演变特征的影响Fig. 8 Influence of electrolyte voltage on major evolution characteristics of R_y 4.2.2 进给速度对 R_y 的影响分析

图 9 描述了进给速度对 R_y 主要演变特征的影响。由图 9a 和图 9b 可知：当进给速度较低，不超过 1.9 mm/min 时，在不同的加工电压和电解液流速下，表面粗糙度 R_y 几乎随加工时间的延长稳步增大，因此，低进给速度难以获得较光滑的加工表面。其中当进给速度为 1.9 mm/min，加工电压为 25 V，电解液流速为 21.3 m/s 时，获得的 R_y 值最小，为 0.757 μm （模拟试验 8），比所有试验获得的最小 R_y （模拟试验 2，0.677 μm ）大很多。由图 9c 和图 9d 可知：当进给速度为 2.1 mm/min 和 2.3 mm/min 时，在不同的加工电压和电解液流速下，表面粗糙度 R_y 随加工时间的延长有些逐渐增加，有些则先增加后逐渐减小，因此，提高进给速度有利于获得光洁的加工表面。

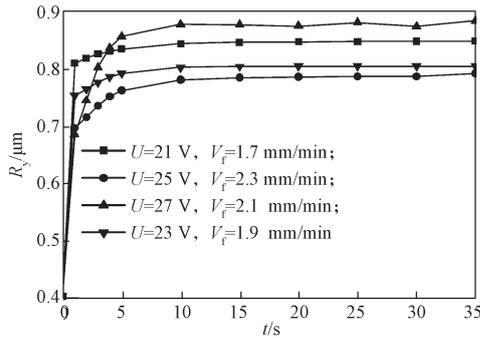




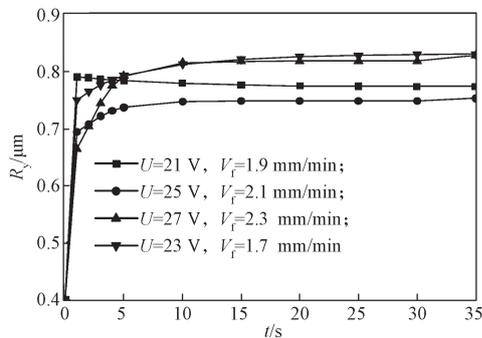
d) 进给速度为 2.3 mm/min

图9 进给速度对 R_y 的主要演变特征的影响Fig. 9 Influence of electrolyte feed rate on major evolution characteristics of R_y 4.2.3 电解液流速对 R_y 的影响分析

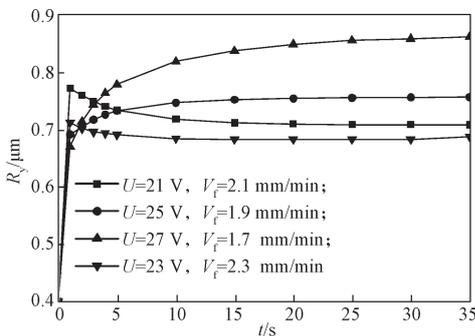
图10描述了电解液流速对表面粗糙度 R_y 主要演变特征的影响。



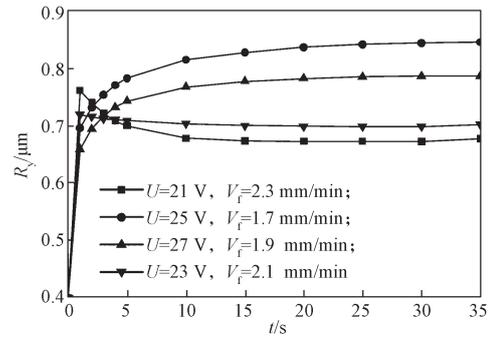
a) 电解液流速为 14.7 m/s



b) 电解液流速为 17.5 m/s



c) 电解液流速为 21.3 m/s



d) 电解液流速为 23.4 m/s

图10 电解液流速对 R_y 的主要演变特征的影响Fig. 10 Influence of electrolyte flow rate on major evolution characteristics of R_y

由图10a和图10b可知：当电解液流速较低，不超过17.5 m/s时，在不同的加工电压和进给速度下，随加工时间的延长表面粗糙度 R_y 几乎稳步增大，因此低电解液流速也难以获得较光滑的加工表面。其中当电解液流速为17.5 m/s，加工电压为25 V，进给速度为2.1 mm/min时，获得的最小 R_y 为0.751 μm （模拟试验7），同样比所有试验获得的最小 R_y （模拟试验2，0.677 μm ）大很多。由图10c和图10d可知：当电解液流速为21.3 m/s和23.4 m/s时，在不同的加工电压和进给速度下，表面粗糙度 R_y 随加工时间的延长，有些逐渐增大有些也经历先增大后逐渐减小的变化过程，因此，提高电解液流速同样有利于获得光洁的加工表面。

4.2.4 3个因素对 R_y 的综合影响分析

对表5中正交试验所得的表面粗糙度 R_y 的值经极差分析，结果如表6所示。由表可知，3个因素的对 R_y 影响程度，从大到小依次为 $d_B > d_A > d_C$ ，即进给速度对表面粗糙度 R_y 的影响较明显，加工电压次之，电解液流速的影响最小。

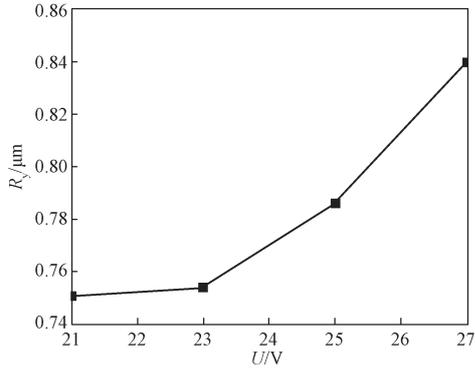
表6 表面粗糙度极差分析结果

Table 6 Surface roughness range analysis table

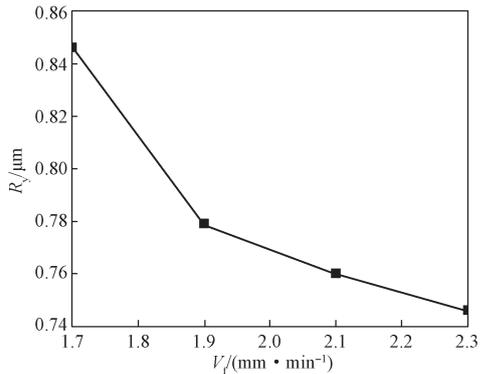
| 均值或极差 | 因素 | | |
|--------|-------|-------|-------|
| | A | B | C |
| 均值1 | 0.751 | 0.846 | 0.830 |
| 均值2 | 0.786 | 0.746 | 0.752 |
| 均值3 | 0.840 | 0.760 | 0.754 |
| 均值4 | 0.754 | 0.779 | 0.795 |
| 极差 d | 0.089 | 0.100 | 0.078 |

图11描述了各因素对加工稳定后的表面粗糙度的影响。由图可知， R_y 随着电压的增加先缓慢增加

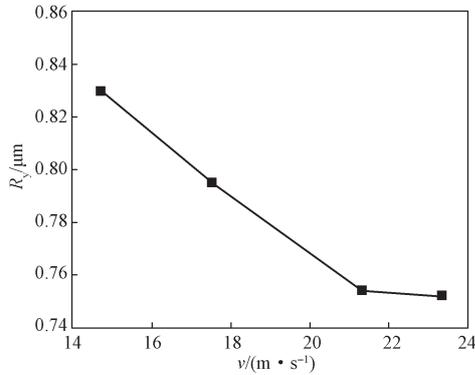
后快速增加, 随着进给速度的增加先迅速降低后缓慢减小, 随着电解液流速的增加先快速降低后缓慢降低。3 个因素综合起来可知, 最佳加工工艺组合为: 电压 21 V、进给速度 2.3 mm/min、电解液流速 23.4 m/s, 即模拟试验 2 的加工工艺。



a) 电压的影响



b) 进给速度的影响



c) 电解液流速的影响

图 11 各因素对加工表面粗糙度 R_y 的影响Fig. 11 The influence of various factors on the surface roughness R_y

为更精确分析各因素对 R_y 的显著影响程度, 对实验数据进行方差分析, 结果如表 7 所示。由表可知, 3 个因素均为 R_y 的显著影响因素, 显著程度大小顺序与极差分析结果相同。

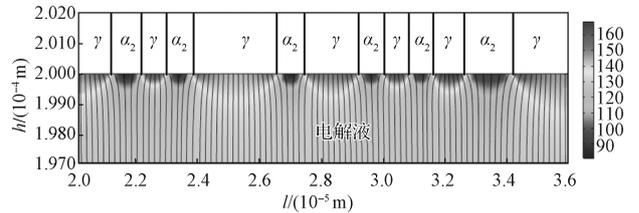
表 7 表面粗糙度方差分析结果

Table 7 Surface roughness analysis of variance table

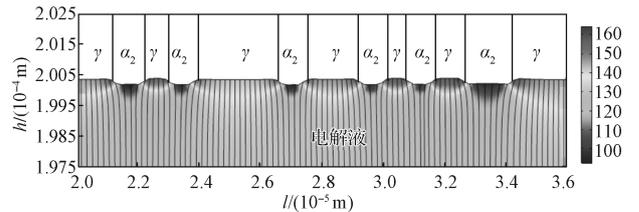
| 因素 | 偏差平方和 S | 自由度 f | F 比 | 临界值 |
|-------|---------|-------|--------|----------------------|
| 加工电压 | 0.020 | 3 | 13.333 | $F_{0.05}(3,6)=4.76$ |
| 进给速度 | 0.024 | 3 | 16.000 | $F_{0.05}(3,6)=4.76$ |
| 电解液流速 | 0.017 | 3 | 11.333 | $F_{0.05}(3,6)=4.76$ |
| 误差 | 0.001 5 | 6 | | |

4.3 电解加工微观形貌演变过程分析

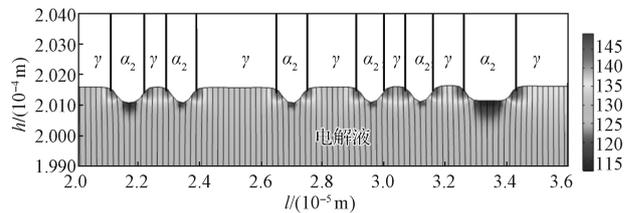
在最佳工艺参数条件下, 合金电解加工微观形貌演化过程中的电流密度分布如图 12 所示。从图 12a 可以看出, 电解加工开始前, γ -TiAl 相区域的电流密度明显大于 α_2 -Ti₃Al 相区域, 电流密度线在 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 两相相邻区域处发生畸变, 向 γ -TiAl 相聚拢, 在 α_2 -Ti₃Al 相发散, 高的电流密度使 γ -TiAl 相优先溶解。随着电解加工的进行, 加工表面的不平整度变大。同时引起 γ -TiAl 相区和 α_2 -Ti₃Al 相区域电流密度的差异减小, 直到达到平衡状态。在电解加工过程中 (图 12b-12h), 两相邻界处的电流密度始终大于 γ -TiAl 相和 α_2 -Ti₃Al 相区域, 这说明两相材料边界层处腐蚀得比较快, 导致突出的 α_2 -Ti₃Al 相两侧总是呈现圆形或锥形的弧度。随着加工时间的延长, 两相的高度差越来越明显, 最后变得平缓, 由此也说明 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面首先经历一个快速粗化后逐渐平稳的过程。



a) 加工开始前



b) 加工 0.01 s



c) 加工 0.05 s

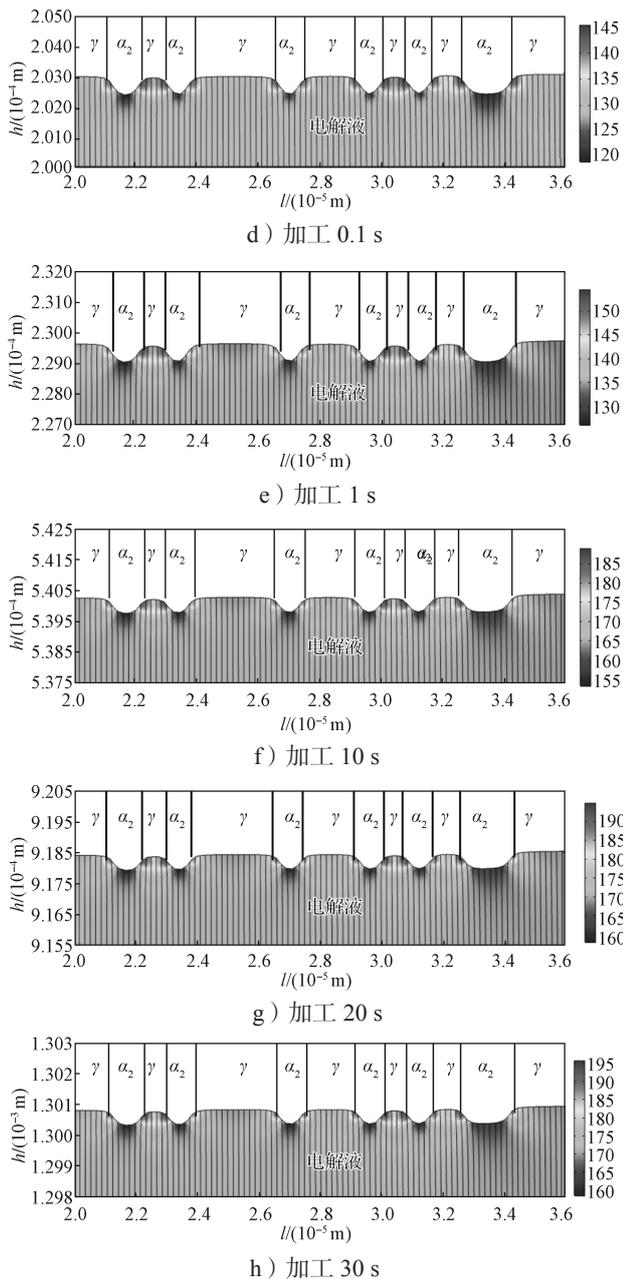


图 12 电解加工过程微观形貌演化与电流密度分布图

Fig. 12 The distribution of current densities and the evolution of micro-morphologies during electrochemical machining

5 结语

本文通过电化学试验得出 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 的电化学特性, 通过位置函数建立各向异性双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的材料模型, 在 COMSOL Multiphysics 软件中建立了合金的微观电解加工模型, 实现了双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金材料在电解加工环境下微观

形貌的演变。

采用正交试验方法分析了电解加工过程中加工电压、进给速度和电解液流速对加工表面粗糙度 R_a 的影响, 结果表明, 增加进给速度与电解液流速有利于降低表面粗糙度, 在低加工电压下可获得较光洁的加工表面, 最佳的工艺参数组合为: 加工电压 21V、电解液流速 23.4 m/s 和进给速度 2.3 mm/min。

从微观形貌演变过程可以看出, 较光洁的加工表面经历了先粗化后抛光的过程。

参考文献:

- [1] 韩建超. TiB₂ 及 Ni 对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金凝固组织与性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
HAN Jianchao. Influence of TiB₂ and Ni on Solidification Microstructure and Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] HE H D, QU N S, ZENG Y B, et al. Machining Accuracy in Pulsed Wire Electrochemical Machining of γ -TiAl Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5/6/7/8): 2353–2359.
- [3] RUSZAJA, GAWLIK J, SKOCZYPIEC S. Electrochemical Machining-Special Equipment and Applications in Aircraft Industry[J]. Management and Production Engineering Review, 2016, 7(2): 34–41.
- [4] VOLGIN V M, LYUBIMOV V V, DAVYDOV A D. Modeling and Numerical Simulation of Electrochemical Micromachining[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 140: 252–260.
- [5] PURCAR M, BORTELS L, VAN DEN BOSSCHE B, et al. 3D Electrochemical Machining Computer Simulations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 472–478.
- [6] GOMEZ-GALLEGOS A, MILL F, MOUNT A R, et al. 3D Multiphysics Model for the Simulation of Electrochemical Machining of Stainless Steel (SS316) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5/6/7/8): 2959–2972.
- [7] XU Z Y, WANG Y D. Electrochemical Machining of Complex Components of Aero-Engines: Developments, Trends, and Technological Advances[EB/OL]. [2020–04–23]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936119303462?via%3Dihub>.
- [8] CHEN Y L, ZHOU X C, CHEN P X, et al. Electroche-

- mical Machining Gap Prediction with Multi-Physics Coupling Model Based on Two-Phase Turbulence Flow[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 1057-1063.
- [9] ERNST A, HEIB T, HALL T, et al. Simulation of the Tool Shape Design for the Electrochemical Machining of Jet Engine Vanes[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 762-767.
- [10] KLOCKE F, ZEIS M, KLINK A. Interdisciplinary Modelling of the Electrochemical Machining Process for Engine Blades[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 217-220.
- [11] ZHU D, GU Z Z, XUE T Y, et al. Simulation and Experimental Investigation on a Dynamic Lateral Flow Mode in Trepanning Electrochemical Machining[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1624-1630.
- [12] 周小超, 陈远龙, 侯亭波, 等. 基于气液两相流模型的电解加工多场耦合仿真[J]. 中国机械工程, 2019, 30(10): 1135-1141.
ZHOU Xiaochao, CHEN Yuanlong, HOU Tingbo, et al. Multi-Physics Coupling Simulation of ECM Based on Gas-Liquid Two-Phase Flow Model[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(10): 1135-1141.
- [13] KOZAK J, ZYBURA-SKRABALAK M. Some Problems of Surface Roughness in Electrochemical Machining (ECM)[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 101-106.
- [14] KLOCKE F, HARST S, ZEIS M, et al. Modeling and Simulation of the Microstructure Evolution of 42CrMo4 Steel During Electrochemical Machining[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 505-510.
- [15] LIU W D, AO S S, LUO Z. Multi-Physics Simulation of the Surface Polishing Effect During Electrochemical Machining[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14: 7773-7789.
- [16] 王建业, 徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 5-9.
WANG Jianye, XU Jiawen. Principles and Applications of Electrolytic Machining[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 5-9.
- [17] 王福元, 徐家文, 赵建社, 等. 电场和流场数值模拟的电解加工阴极设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 106-109.
WANG Fuyuan, XU Jiawen, ZHAO Jianshe, et al. Cathode Design in Electrochemical Machining Based on Numerical Simulation of Electrical Field and Flow Field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 106-109.
- [18] 马洪运, 贾志军, 吴旭冉, 等. 电化学基础(IV): 电极过程动力学[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 267-271.
MA Hongyun, JIA Zhijun, WU Xuran, et al. Fundamentals of Electrochemistry (IV): Electrode Kinetics[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 267-271.
- [19] 任安禄. 不可压缩黏性流场计算方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 5-12.
REN Anlu. Numerical Methods in Incompressible Viscous Flow[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 5-12.
- [20] 陈远龙, 周小超, 陈培譞, 等. 基于湍流 SST 模型电解加工温度场数值仿真研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 215-221.
CHEN Yuanlong, ZHOU Xiaochao, CHEN Peiyun, et al. Numerical Simulation Study on Temperature Field of ECM Based on the Turbulent SST Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 215-221.
- [21] DECONINCK D, HOOGSTEEEN W, DECONINCK J. A Temperature Dependent Multi-Ion Model for Time Accurate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part III: Experimental Validation[J]. Electrochimica Acta, 2013, 103: 161-173.
- [22] HAN J C, DONG J, ZHANG S Z, et al. Microstructure Evolution and Tensile Properties of Conventional Cast TiAl-Based Alloy with Trace Ni Addition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 715: 41-48.
- [23] BOJINOV M, BETOVA I, FABRICIUS G, et al. The Stability of the Passive State of Iron-Chromium Alloys in Sulphuric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 1999, 41(8): 1557-1584.
- [24] YU S Y, SCULLY J R, VITUS C M. Influence of Niobium and Zirconium Alloying Additions on the Anodic Dissolution Behavior of Activated Titanium in HCl Solutions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(2): B68.
- [25] 顾大维. Ti-48Al-2Cr-2Nb 电化学溶解特性及叶片电解加工试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
GU Dawei. Experimental Investigation on Electrochemical Dissolution Behaviors and Electrochemical Machining of Ti-48Al-2Cr-2Nb[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [26] APPEL F, PAUL J D H, OEHRING M. Gamma Titanium Aluminide Alloys[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011: 26.
- [27] HAN J C, DONG J, ZHANG S Z, et al. Microstructure Evolution and Tensile Properties of Conventional Cast

TiAl-Based Alloy with Trace Ni Addition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 715: 41–48.

[28] KLOCKE F, ZEIS M, HARST S, et al. Modeling and Simulation of the Electrochemical Machining (ECM) Material Removal Process for the Manufacture of Aero

Engine Components[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 265–270.

(责任编辑: 邓光辉)

The Microstructure Evolution of Two-Phase Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy During Electrochemical Machining

MA Xinzhou¹, LUO Zhijian¹, HU Chunrong², LI Wenyuan¹, LIAO Cuijiao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: During electrochemical machining process, it is difficult to control the shape of the machined surface of anisotropic alloy materials. Therefore, the position function was used to establish the micro-material model for two-phase Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy, and then the electrochemical machining simulation micro-physical model was set up. The influences of the macro-process parameters on the evolution behavior of surface micro-morphology were investigated. The results showed that when the electrolyte flow rate and feed rate were in the range of 14.7~23.4 m/s and 1.7~2.3 mm/min respectively, the roughness R_y of the machined surface decreased with the increase in the flow rate and feed rate. The smoothest surface ($R_y=0.677 \mu\text{m}$) was obtained under the condition of the voltage being 21 V, the feed rate 2.3 mm/min and the electrolyte flow rate 23.4 m/s. The simulation of micro-morphology evolution showed that the most polished surface had undergone a process of roughening and polishing.

Keywords: two-phase Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy; position function; microscopic material model; micro-morphological evolution