

磁场对双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面微观形貌的影响

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.02.008

隋浩男 林荣联
马新周 胡纯蓉
廖翠姣

湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007

摘要:为揭示电解加工表面成形规律,建立电-磁-热-流多场耦合微观材料模型,从电流密度分布、粗糙度、微观形貌等几个方面,动态跟踪阳极微观表面成形过程,揭示 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在不同磁场条件下,电解加工微观表面的动态演变规律及影响机制,并通过实验验证仿真结果。仿真结果表明:电解加工微观表面成形是一个表面膜生成与溶解的复杂竞争过程,在加工过程中,微观表面反复经历粗化与抛光阶段。无磁场作用时,表面粗糙度为 $0.121\ \mu\text{m}$,多重分形谱的谱面积为 0.0030;有磁场作用时,表面粗糙度为 $0.118\ \mu\text{m}$,谱面积为 0.0023。实验结果证实:无磁场时,表面粗糙度为 $1.16\ \mu\text{m}$,多重分形谱的谱宽为 0.87,谱面积为 1.468;有磁场时,表面粗糙度为 $0.93\ \mu\text{m}$,谱宽为 0.84,谱面积为 1.388。仿真结果与实验结果吻合,磁场降低了加工表面粗糙度,使表面微观形貌变简单、均匀,同时提高了加工稳定性。

关键词:磁场; Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金; 电解加工; 微观形貌; 动态演变

中图分类号: TG662

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2023)02-0059-10

引文格式:隋浩男,林荣联,马新周,等. 磁场对双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面微观形貌的影响 [J]. 包装学报, 2023, 15(2): 59-68, 77.

1 研究背景

电解加工过程涉及电场、流场、温度场、磁场等多种物理场的耦合作用,同时伴随腐蚀产物、气泡生成。电流密度和加工间隙的时空变化,使电解加工表面成形的过程变得复杂。当被加工材料为具有复

杂溶解行为的合金材料时,实际加工过程异常复杂,其中涉及的复杂溶解机理及加工表面的动态成形理论还需要深入研究。计算机技术的快速发展,为复杂工况下的电解加工仿真研究提供了便利。通过软件对所设计的加工参数、工具及工件进行模拟,实现机理过程的可视化,提升电解加工实验的可行性^[1-6]。

收稿日期: 2023-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22072040);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4271);湖南省教育厅科学研究基金资助项目(21C0406)

作者简介:隋浩男(1998-),男,山东青岛人,湖南工业大学硕士生,主要研究方向为电化学溶解行为,
E-mail: 250961046@qq.com

通信作者:廖翠姣(1977-),女,湖南娄底人,湖南工业大学副教授,博士,硕士生导师,主要从事精密电解加工机理及质量控制研究, E-mail: 10231@hut.edu.cn

K. B. Deshpande^[7] 利用 COMSOL 多物理场中的移动网格技术, 动态跟踪镁合金 AE44-mild steel 相和 AE44-AA6063 相的腐蚀过程, 分析了镁合金两相的比例与分布对合金腐蚀行为的影响规律。Sun W. 等^[8] 利用任意拉格朗日-欧拉模型, 研究 AE44 和低碳钢的缝隙腐蚀瞬态分布、动态浓度分布和几何变形, 并使用 Nernst-Planck 方程计算溶液中 Mg^{2+} 和 OH^- 离子的扩散、电迁移和电化学反应。结果表明, 该模型能准确预测 Mg^{2+} 和 OH^- 离子的浓度分布。Wang K. 等^[9] 同样采用任意拉格朗日-欧拉模型, 动态跟踪碳钢在 CO_2 - H_2O 环境下的腐蚀界面, 利用多物理场耦合技术, 建立 CO_2 的溶解和水化反应、水的解离反应、各物种传质、界面反应动力学, 以及腐蚀产物的沉积模型。研究结果表明, 采用平滑移动边界法得到的数值结果与实验结果完全吻合。K. B. Deshpande^[10] 利用极化实验, 分别获得 AE44-低碳钢和 AE44-AA6063 组成合金的极化曲线, 并将电极表面的边界条件定义成极化曲线, 利用拉普拉斯方程、法拉第定律计算电极界面腐蚀速度和腐蚀率。结果表明该模型能够预测合金电偶腐蚀速率, 且数值结果与实验结果吻合较好。

为揭示 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工过程的表面成形规律, 本文建立由 γ -TiAl 相和 α_2 -Ti₃Al 相交替代排列组成的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观材料模型, 以及电场、磁场、流场和温度场等多场耦合模型。通过微观形貌追踪和分形方法, 量化分析磁场对合金电解加工表面成形过程的影响, 并通过实验验证仿真结果的准确性。

2 理论基础

2.1 电场

电解液中的离子运输受电场、流场影响, 通过耦合磁场、电场 (AC/DC 模块) 和稀物质传递 (多物质传递模块) 建立模型, 由 Nernst-Planck 和 Poisson 方程 (式 (1)~(3))^[11-12] 控制。

$$N_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{e,i} F c_i \nabla \varphi + c_i v, \quad (1)$$

$$\nabla N_i = 0, \quad (2)$$

式 (1)~(2) 中: N_i 为离子 i 的通量;

D_i 为离子 i 的扩散系数;

c_i 为离子 i 的浓度;

z_i 为离子 i 所带电荷数;

$u_{e,i}$ 为离子 i 的电迁移率;

F 为法拉第常数;

φ 为电势;

v 为电解液流速。

描述离子浓度改变电场分布的泊松方程 (高斯定律) 用式 (3) 表示。

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla^2 \varphi = \rho_v, \quad (3)$$

式中: ε_0 为真空介电常数;

ε_r 为相对介电常数;

ρ_v 为电荷密度, 取决于离子浓度^[13],

$$\rho_v = F(c_+ + c_-), \quad (4)$$

式中 c_+ 、 c_- 分别为溶液中的正、负离子浓度。

2.2 磁场

磁场耦合电场时, 外加磁场对溶液中带电粒子产生 3 种力, 分别是带电粒子穿过磁通线引起的洛伦兹力, 顺磁离子受到的磁场梯度力, 扩散层中阳离子浓度梯度引起的浓度梯度力。在弱磁场 ($B < 1$ T) 条件下, 磁场梯度力的数量级仅为 10 N/m³, 与洛伦兹力相差两个数量级, 因此忽略浓度梯度力和磁场梯度力的影响^[14-16], 仅考虑洛伦兹力。在 x 、 y 方向上的洛伦兹力贡献项分别用式 (5)~(6) 计算。

$$F_{L,x} = B_z \times J_y - B_y \times J_z, \quad (5)$$

$$F_{L,y} = B_z \times J_x - B_x \times J_z, \quad (6)$$

式 (5)~(6) 中: B_x 、 B_y 、 B_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的磁通密度;

J_x 、 J_y 、 J_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的电流密度。

2.3 流场

在流体中通常采用雷诺数 Re (式 (7)) 确定流场类型。本研究中电解质流速高达 49 m/s, 雷诺数达 1.3×10^6 , 流场类型为湍流。

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta}, \quad (7)$$

式中: ρ 为电解液密度;

L 为仿真模型流场长度;

η 为运动黏度。

兼顾仿真计算精度及成本, 此处选 RANS $k-\varepsilon$ 湍流模型, 该模型适用于大雷诺数的流场, $k-\varepsilon$ 方程由式 (8)~(10) 组成。

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v \nabla k = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v \nabla \varepsilon = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (10)$$

式(8)~(10)中: μ_T 为湍流黏度;

C_μ 为湍流常数, 取值为 0.09;

k 为湍动能;

ε 为湍动能的耗散率;

μ 为流体动力黏度;

P_k 为湍动能生成项;

σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, 此处 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 。

2.4 传热

电解加工过程中产生的热量一般由电极、电极/电解质界面双电层的反应热和电解液的焦耳热 3 部分组成。电极电阻很小, 因此忽略电极产生的焦耳热。电解液对流和传导的传热平衡方程由公式(11)~(12)组成。

$$d_z \rho c_p v \nabla T + \nabla q = d_z Q + d_z Q_b + d_z Q_{vd}, \quad (11)$$

$$q = -d_z \lambda \nabla T, \quad (12)$$

式(11)~(12)中: d_z 为 z 方向的厚度;

C_p 为恒压热容;

q 为热通量;

Q 为电解液的焦耳热;

Q_b 为双电层的反应热;

Q_{vb} 为黏性耗散能;

λ 为热导率;

T 为电解液温度。

在流场的入口处设置温度边界条件

$$T = T_0, \quad (13)$$

式中 T_0 为初始温度, $T_0=293.15$ K。

在出口处设置流出边界条件, 指定对流为此边界热量的传递方式, 即此边界处的热通量为 0, 满足式(14)。

$$q_{\text{cond}} = -\lambda \nabla T = 0, \quad (14)$$

式中 q_{cond} 为边界热量, 边界热量的方向与流场出口边界垂直。

2.5 任意拉格朗日-欧拉方法

拉格朗日方法以物质坐标为基础, 结构形状的变化和有限元网格节点的变化完全一致(节点即为物质点), 能精准描述结构边界的运动, 但在处理大变形问题时, 会出现严重的网格畸变现象。

欧拉方法则以空间坐标为基础, 划分的网格和分析的物质结构是相互独立的, 网格在整个分析过程中始终保持最初的空间位置不变, 因此在整个数值模拟过程中计算精度不变, 捕捉边界变形量十分困难。

任意拉格朗日-欧拉方法^[8-9]是一种移动网格技术, 将拉格朗日方法和欧拉方法结合, 充分利用各自优势, 既能有效跟踪物质结构边界的运动, 同时网格又不会出现严重变形, 有利于分析大的结构变形问题。网格位移通过式(15)~(16)求解。

$$\frac{\partial^2}{\partial X^2} \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial X^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = 0, \quad (16)$$

式中: X 、 Y 为拉格朗日坐标; x 、 y 为欧拉坐标。

根据法拉第定律, 电极表面法向方向上的溶解速度 V_n 用式(17)计算:

$$V_n = \sum \frac{R_{\text{dep},i} M_i}{\rho_i}, \quad (17)$$

式中: ρ_i 为腐蚀物质的密度;

M_i 为摩尔质量;

$R_{\text{dep},i}$ 为反应源项, 由式(18)计算。

$$R_{\text{dep},i} = -\frac{v_{\text{dep},i} i_{\text{loc},m}}{n_m F}, \quad (18)$$

式中: n_m 为参与电极反应的电子数量;

$v_{\text{dep},i}$ 为化学计量系数;

$i_{\text{loc},m}$ 为局部电流密度, 在模型中使用插值函数式(19)表示。

$$i_{\text{loc},m} = f(\text{TiAl}) \cdot \text{micro}(x, y) + f(\text{Ti}_3\text{Al}) \cdot (1 - \text{micro}(x, y)), \quad (19)$$

式中: $f(\text{TiAl})$ 和 $f(\text{Ti}_3\text{Al})$ 为双相合金阳极极化曲线导入软件中生成的插值函数, 极化曲线由电化学工作站测得;

$\text{micro}(x, y)$ 为双相 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在微观材料模型中的位置函数。

3 多场耦合仿真模型的构建

3.1 微观材料模型及边界条件

Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金由具有不同电化学溶解特性的 γ -TiAl 相和 α_2 -Ti₃Al 相组成。对合金电解加工表面成形过程进行仿真研究时, 为更真实地反映合金溶

解过程中表面微观形貌的演变规律, 本研究团队成员马新周等^[17]使用 CAD 软件, 建立双相合金微观材料模型, 将双相合金中各相识别成如图 1 所示的位置函数 $\text{micro}(x, y)$ 。图中蓝色代表 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$, 用数字 0 表示; 红色代表 $\gamma\text{-TiAl}$, 用数字 1 表示。模型中的 $\gamma\text{-TiAl}$ 相和 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 相片层厚度均遵循高斯分布, 具体厚度随机生成, 呈交替排列。 $\gamma\text{-TiAl}$ 相片层厚度均值为 0.65 m, $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 相片层厚度均值为 0.55 m; $\gamma\text{-TiAl}$ 相的体积含量为 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 相的 3.7 倍^[17]。合金的电化学特性(交换电流密度、平衡电位)和物理特性(物质密度、摩尔质量)与位置函数进行强耦合。电解加工仿真的边界条件如表 1 所示。

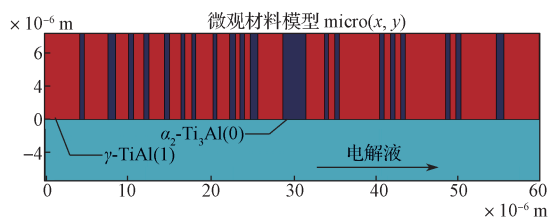


图 1 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观片层组织分布图

Fig. 1 Microstructure distribution of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy micro lamellae

表 1 电解加工仿真边界条件

Table 1 Simulation boundary conditions for electrolytic machining

边界条件	数值
工作电压 /V	16
压力 /Pa	5×10^5
初始间隙 /m	2×10^{-4}
电解液初始电导率 /(S·m ⁻¹)	28.33
磁感应强度 /T	0.1

3.2 合金溶解速度参数

Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的 $\gamma\text{-TiAl}$ 相和 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 相的溶解参数分别通过单相 $\gamma\text{-TiAl}$ 合金 (Ti-50Al-2Cr-2Nb) 以及单相 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 合金 (Ti-30Al-2Cr-2Nb) 的阳极极化曲线确定。极化曲线的测量在法国 Bio-Logic SP-150/20A 型工作站上完成。其中, 三电极系统由工作电极、参比电极 Ag/AgCl 和 4 cm² 的 Pt 电极组成。工作电极的制备流程: 打磨线切割 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金 (5.2 mm × 5.2 mm × 10 mm) 样品四周的氧化层; 测量正方形端面面积用于修正电流密度; 用环氧树脂密封样品; 用不同粒度的金刚石磨盘和碳化硅 (SiC) 砂纸, 从粗到细依次打磨端面至 4000 目。电解液是质量分数为 20 % 的 NaNO₃ 溶液。

测量极化曲线前, 先记录开路电位 2 h, 再在 10⁻² ~ 10⁵ Hz 频率范围内测量电化学阻抗谱。阳极极化曲线的电位扫描范围为 0~16 V, 扫描速率为 20 mV/s。Ti-50Al-2Cr-2Nb 和 Ti-30Al-2Cr-2Nb 合金有无磁场条件下的阳极极化曲线如图 2 所示。

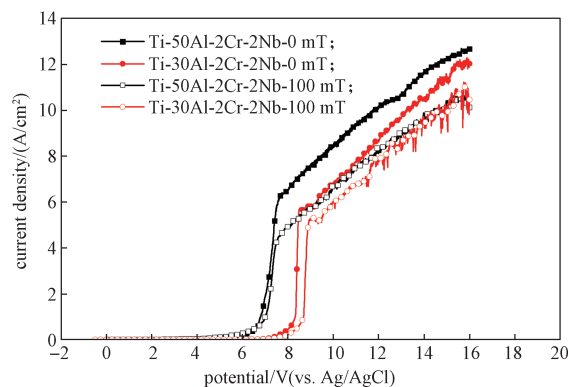


图 2 Ti-50Al-2Cr-2Nb 和 Ti-30Al-2Cr-2Nb 合金有无磁场条件下的阳极极化曲线

Fig. 2 Anodic polarization curves of Ti-50Al-2Cr-2Nb and Ti-30Al-2Cr-2Nb alloy without and with magnetic field

4 结果与分析

4.1 电解加工仿真结果

无磁场、有磁场时, 双相合金电解加工仿真微观形貌演变与电流密度分布分别如图 3 和图 4 所示; 有无磁场时双向合金的电流密度分布均匀性如图 5 所示; 有无磁场时双相合金仿真表面粗糙度 (R_a) 如图 6 所示。本研究假设双相合金未加工时, 具有不同相的工件表面均理想化为直线。

由图 3 可知, 未加工时, 不同相的电流密度分布明显不同, $\gamma\text{-TiAl}$ 相的电流密度高, 且两相界面处电流密度相差明显, 形成电偶腐蚀。电流密度分布受片层厚度影响, 片层越薄, 电流密度越大。加工开始后, $\gamma\text{-TiAl}$ 相由于电流密度高, 优先发生溶解, $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 相则由于电流密度较低, 溶解速度相对于 $\gamma\text{-TiAl}$ 相较慢, 向外形成突出界面, 使得阳极表面形貌迅速变复杂。

由图 4 可知, 在同一时间, 加平行磁场的电流密度小于不加磁场的。通过计算电流密度分布均匀性(图 5)可知, 随着加工时间的延长, 电流密度分布越来越均匀, 且加磁场的电流密度分布均匀性更好, 主要原因是洛伦兹力能改变电流密度分布^[18-19]。

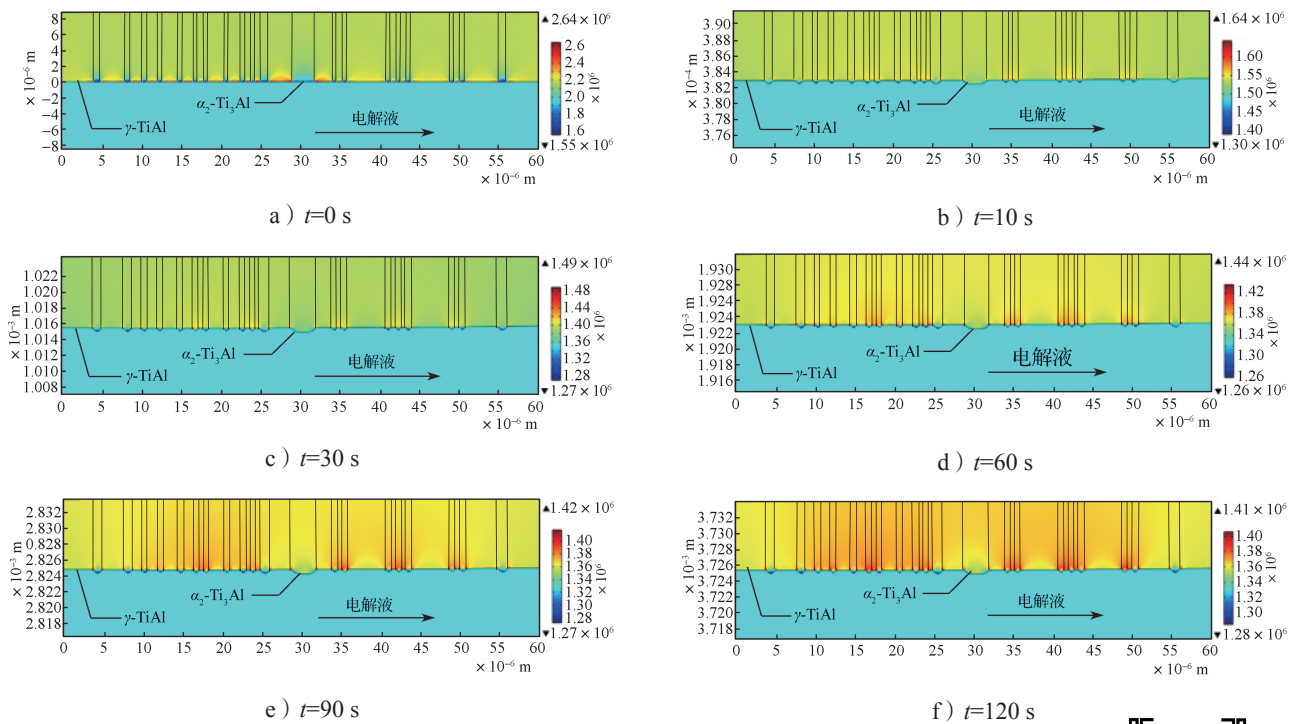


图3 无磁场时双相合金电解加工过程仿真微观形貌演变与电流密度分布

Fig. 3 Microstructure evolution and current density distribution in electrochemical machining simulation of two-phase alloys without magnetic field



彩图

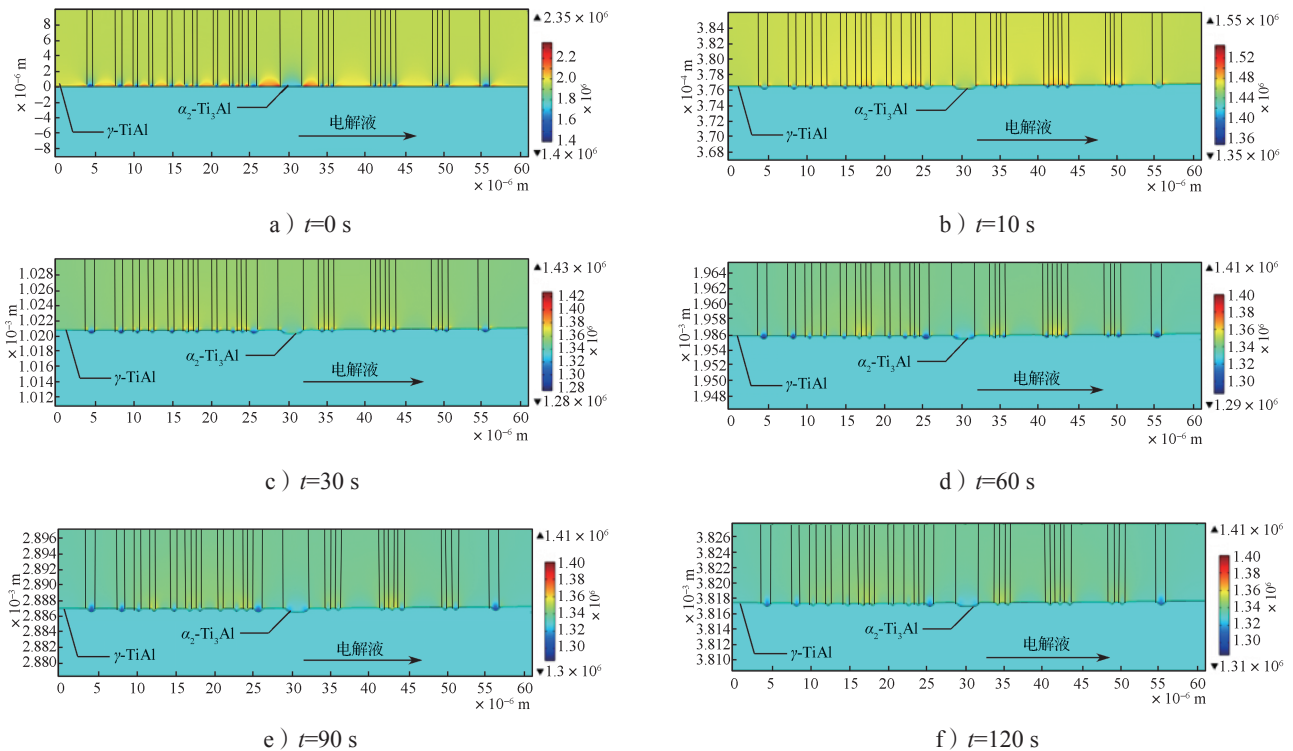


图4 有磁场时双相合金电解加工过程仿真微观形貌演变与电流密度分布

Fig. 4 Microstructure evolution and current density distribution in electrochemical machining simulation of two-phase alloys with magnetic field

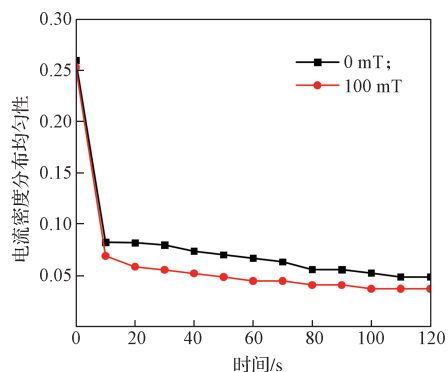


图5 有无磁场时双相合金电解加工仿真电流密度分布均匀性

Fig. 5 Uniformity of current density distribution in simulation processing of two-phase alloys without and with magnetic field

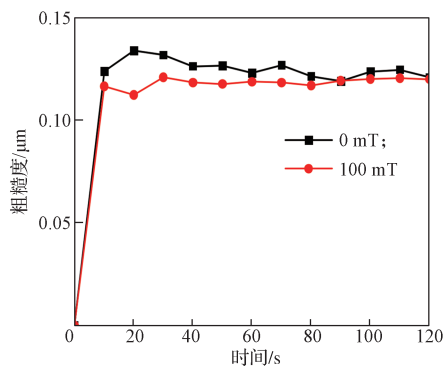


图6 有无磁场时双相合金电解加工仿真表面粗糙度

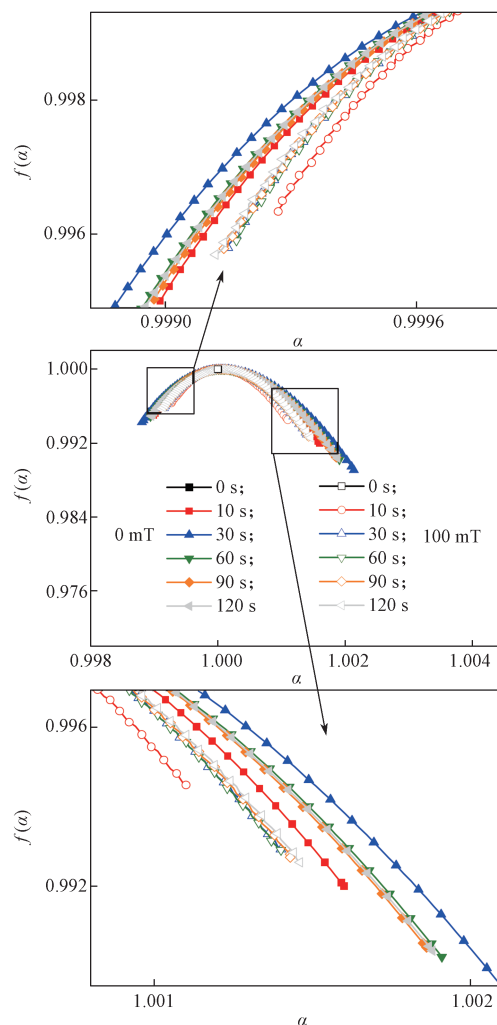
Fig. 6 Surface roughness in simulation processing of two-phase alloys without and with magnetic field

从图6可知,有无磁场的表面粗糙度均先增大后稍有降低,并在一定范围内波动,即加工过程中表面先经历粗化后经历微抛光。无磁场的表面粗糙度在相对较大的范围内波动,平均粗糙度为 $0.121\text{ }\mu\text{m}$;有磁场的表面粗糙度在较小的范围内波动,平均粗糙度为 $0.118\text{ }\mu\text{m}$ 。由此说明,磁场降低了Ti-48Al-2Cr-2Nb合金电解加工的表面粗糙度,且表面粗糙度波动更平稳。

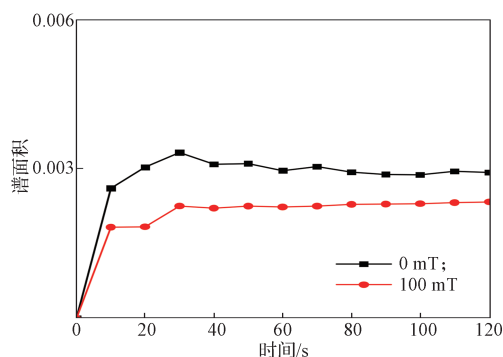
从仿真结果可知,电解加工表面的成形是一个表面膜生成与溶解的复杂竞争过程^[20-21]。样品从光滑表面开始加工,首先经历快速粗化、抛光,然后在小幅度范围反复经历粗化、抛光过程。磁场不但降低了同一时间下合金的电流密度和表面粗糙度,还改善了合金的电流密度分布均匀性,使合金表面粗糙度的波动比无磁场的更加稳定。

为了揭示电解加工表面微观形貌的动态演变过程,采用Matlab工具箱中的多重分形谱分析电解加工仿真微观形貌的统计特征^[22-24],结果如图7a所示。为了量化磁场对电解加工表面质量的影响,本研究计算了仿真表面微观形貌多重分形谱的谱面积,如图7b所示。由于假设未加工时仿真工件电极表面为理想化的光滑表面,所以在二维仿真模型中工件表面为直线,在多重分形谱上表现为一个特殊的点,即分形维数为1。

由图7a可知,有无磁场时双相合金电解加工表面微观形貌的多重分形谱均为单峰左倾形状,并随加工时间发生变化。加工初期($t=30\text{ s}$),由于 γ -TiAl相和 α_2 -Ti₃Al相具有不同的电化学溶解速度^[1],多重分形谱的谱宽 $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha=\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$)变宽,证明微观形貌变复杂、不均匀。随着加工时间的延长($t=60\text{ s}$),多重分形谱向中间聚拢,说明加工30~60 s的区间内



a) 多重分形谱



b) 谱面积

图 7 双相合金电解加工仿真微观形貌多重分形谱及谱面积

Fig. 7 Multifractal spectrum of simulation microstructure and spectral area in electrochemical machining of two-phase alloys

微观形貌逐渐变简单、均匀。加工时间达到 90~120 s 时, 多重分形谱几乎重合受加工时间的影响不明显。相比之下, 有磁场作用的电解加工表面微观形貌多重分形谱对称性更好、谱宽更窄, 与表面粗糙度一样, 多重分形谱的谱形变化幅度很小, 且在很短的时间内达到稳定。说明磁场提高了电解加工表面质量的稳定性, 改善了电解加工表面形貌的复杂程度和均匀性^[25-26]。

由图 7b 可知, 从加工开始到稳定, 无磁场作用的多重分形谱谱面积先迅速增加后缓慢增加, 30 s 时达到最大值, 30 s 后逐渐降低并在一定范围内波动,

这再次反映出表面微观形貌在加工过程中先变复杂后变简单。相比之下, 有磁场作用的多重分形谱谱面积降低, 且在 30 s 后基本不变, 这也再次说明磁场改善了电解加工表面质量的稳定性。

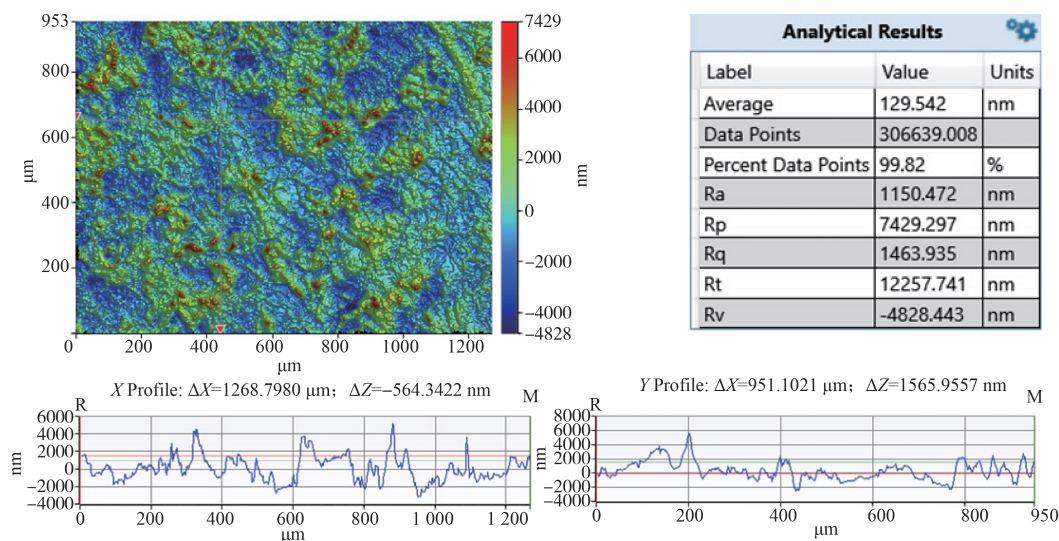
4.2 电解加工实验结果

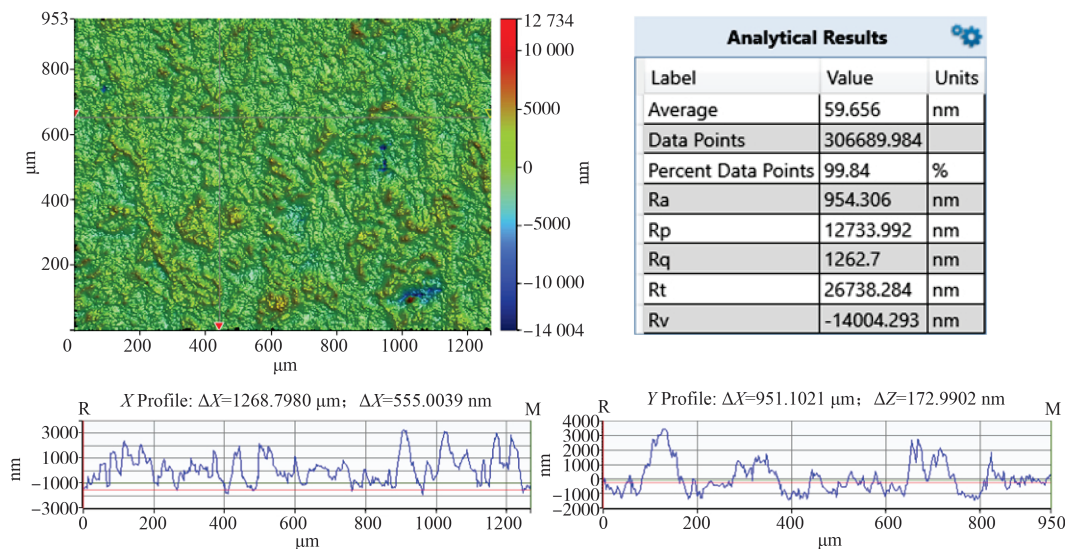
通过电解加工实验来验证仿真结果的准确性。

电解加工实验的加工参数如下: 加工电压为 16 V, 占空比为 40%, 电解液压力为 0.5 MPa, 进给速度为 1 mm/min, 添加平行于电极表面 100 mT 恒定磁场。加工后样品经超声波清洗、酒精清洗后烘干。在每个样品加工表面中间区域选取 3 个相邻位置, 用 Wyko NT 9100 光学轮廓仪测量表面粗糙度。用 Zeiss Axio LSM700 激光共聚焦显微镜观察电解加工表面二维、三维形貌, 测量 5 个相邻点, 且构成“+”形, 并用 Matlab 工具箱计算二维形貌图的多重分形谱^[27]。

图 8 为光学轮廓仪测量的样品加工表面三维轮廓图。从图中可知, 有磁场作用的三维形貌更均匀。

图 9 为有无磁场条件下 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面粗糙度。由图可知, 无磁场的平均粗糙度为 1.16 μm , 有磁场的平均粗糙度为 0.93 μm , 表明磁场既改善电解加工表面的均匀性, 也降低了表面粗糙度。由图 9 中的误差棒大小可知, 无磁场的表面粗糙度稳定性比有磁场的差。由实验结果说明, 添加平行于电极表面的磁场改善了电解加工表面微观形貌的均匀性, 降低了合金加工表面粗糙度, 提高了电解加工的稳定性。

a) $B=0$ mT



b) $B=100$ mT

图 8 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面三维轮廓图

Fig. 8 Three-dimensional surface profile of the electrochemical machined of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy

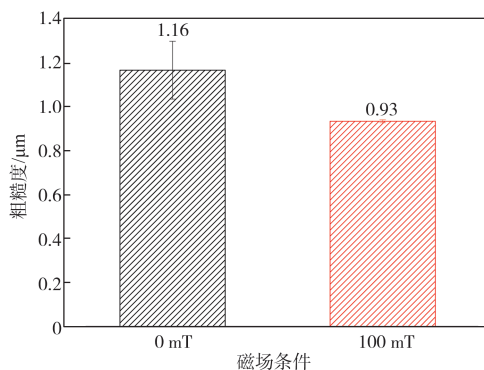
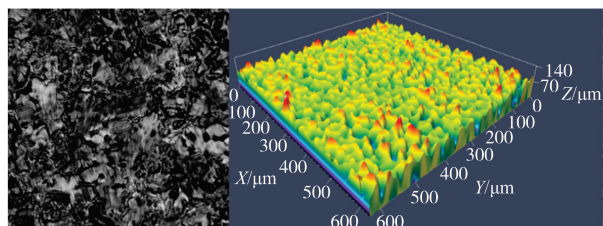


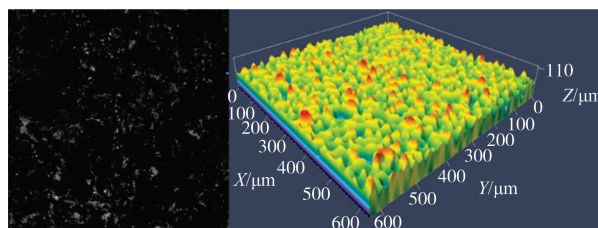
图 9 有无磁场 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面粗糙度

Fig. 9 Roughness of the electrochemical machined surface of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy without and with magnetic field

图 10 为电解加工表面中心点的激光共聚焦显微镜二维和三维形貌图。由图可知，有磁场作用的表面粗糙度比无磁场的低，且表面形貌均匀性相比无磁场的好。



a) $B=0$ mT



b) $B=100$ mT

图 10 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面激光共聚焦二维、三维形貌图

Fig. 10 2D and 3D morphology of the electrochemical machined surface of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by laser confocal

电解加工表面形貌的多重分形谱如图 11a 所示。由图 11a 可知，有磁场作用的多重分形谱左右对称性较好，而无磁场作用的多重分形谱明显呈左倾的钩状形。无磁场的多重分形谱谱宽平均值为 0.87，有磁场的多重分形谱谱宽平均值为 0.84。由此说明，有磁场作用的加工表面形貌相比无磁场的要更均匀、简单。

同样，为了量化复杂程度，计算电解加工表面形貌的多重分形谱谱面积，如图 11b 所示。由图 11b 可知，有磁场的多重分形谱谱面积为 1.388，无磁场的多重分形谱谱面积为 1.468。这再次证明施加平行于电极表面磁场后，电解加工的稳定性优于无磁场的。

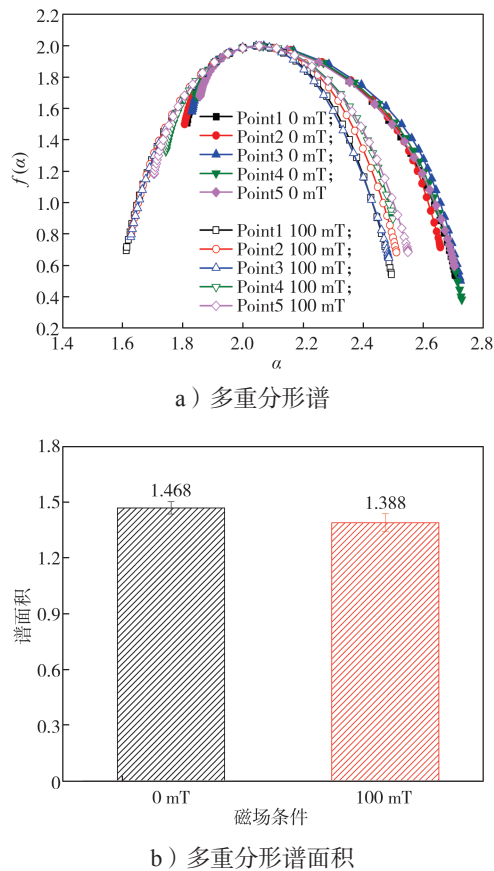


图 11 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面形貌多重分形谱

Fig. 11 Multifractal spectrum of surface topography in electrochemical machining of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy

5 结论

采用仿真和实验两种方法分析了磁场对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金电解加工表面质量的影响, 可得以下主要结论:

1) 从仿真结果可知, 在电解加工过程中, 双相合金电解加工微观表面反复经历粗化、抛光过程, 最终粗糙度在一定范围内波动, 说明电解加工微观表面的成形是一个表面膜生成与溶解的复杂竞争过程。无磁场作用的表面粗糙度为 $0.121 \mu\text{m}$, 有磁场的为 $0.118 \mu\text{m}$; 无磁场作用的谱面积为 0.0030 , 有磁场的为 0.0023 。磁场降低了电解加工表面粗糙度, 改善了电流密度分布的均匀性, 使表面微观形貌更简单、均匀, 提高了加工的稳定性。

2) 从电解加工实验可知, 无磁场作用的表面粗糙度为 $1.16 \mu\text{m}$, 有磁场的为 $0.93 \mu\text{m}$; 无磁场作用的多重分形谱谱宽和谱面积分别为 0.87 和 1.468 , 有

磁场的分别为 0.84 和 1.388 。

3) 实验与仿真结果表明, 外加磁场对电解加工过程的影响是一致的, 能够改善加工表面的微观形貌, 提高加工的稳定性。因此, 磁场可以成功应用于 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的实际电解加工过程。

参考文献:

- [1] WANG Y D, XU Z Y, ZHANG A, et al. Surface Morphology and Electrochemical Behaviour of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy in Low-Concentration Salt Solution[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(2): 283-296.
- [2] ZHOU X C, CAO C Y, WANG H X, et al. Study on the Multi-Field Coupling Model of Electrolyte Temperature Distribution in Electrochemical Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(5): 1655-1662.
- [3] 张聚臣, 李世成, 刘洋, 等. 基于 Realizable $k-\epsilon$ 模型的叶盘通道电解加工多场耦合分析[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525670.
ZHANG Jucheng, LI Shicheng, LIU Yang, et al. Multi-Physical Field Analysis of Tunnel ECM Employed Realizable $k-\epsilon$ Model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525670.
- [4] HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, PAUL R, KOWALICK M, et al. Characterization of an Electrochemical Machining Process for Precise Internal Geometries by Multiphysics Simulation[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 175-180.
- [5] FROTSCHER O, SCHAARSCHMIDT I, LAUWERS D, et al. Investigation of Lorentz Force-Induced Flow of NaNO_3 -Electrolyte for Magnetic Field-Assisted Electrochemical Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(1/2): 937-947.
- [6] LUO S Z, ELOUARZAKI K, XU Z J. Electrochemistry in Magnetic Fields[J]. Angewandte Chemie, 2022, 61(27): e202203564.
- [7] DESHPANDE K B. Numerical Modeling of Micro-Galvanic Corrosion[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(4): 1737-1745.
- [8] SUN W, LIU G C, WANG L D, et al. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Model for Studying the Influences of Corrosion Product Deposition on Bimetallic Corrosion[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2013, 17(3): 829-840.

- [9] WANG K, LI C P, LI Y H, et al. Multi-Physics Coupling Analysis on the Time-Dependent Localized Corrosion Behavior of Carbon Steel in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ Environment[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 167(1): 013505.
- [10] DESHPANDE K B. Validated Numerical Modelling of Galvanic Corrosion for Couples: Magnesium Alloy (AE44)-Mild Steel and AE44-Aluminium Alloy (AA6063) in Brine Solution[J]. Corrosion Science, 2010, 52(10): 3514–3522.
- [11] CERVERA J, ALCARAZ A, SCHIEDT B, et al. Asymmetric Selectivity of Synthetic Conical Nanopores Probed by Reversal Potential Measurements[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(33): 12265–12273.
- [12] CERVERA J, SCHIEDT B, RAMÍREZ P. A Poisson/Nernst-Planck Model for Ionic Transport Through Synthetic Conical Nanopores[J]. Europhysics Letters (EPL), 2005, 71(1): 35–41.
- [13] BAZANT M Z, CHU K T, BAYLY B J. Current-Voltage Relations for Electrochemical Thin Films[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2005, 65(5): 1463–1484.
- [14] UDAGAWA C, UENO M, HISAKI T, et al. Magnetic Field Effects on Electroless Deposition of Lead Metal Lorentz Force Effects[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2018, 91(2): 165–172.
- [15] MONZON L M A, COEY J M D. Magnetic Fields in Electrochemistry: The Lorentz Force. A Mini-Review[J]. Electrochemistry Communications, 2014, 42: 38–41.
- [16] GATARD V, DESEURE J, CHATENET M. Use of Magnetic Fields in Electrochemistry: A Selected Review[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2020, 23: 96–105.
- [17] 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.
MA Xinzhou, LUO Zhijian, HU Chunrong, et al. The Microstructure Evolution of Two-Phase Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy During Electrochemical Machining[J]. Packaging Journal, 2020, 12(4): 45–56.
- [18] FAHIDY T Z. Hydrodynamic Models in Magneto-electrolysis[J]. Electrochimica Acta, 1973, 18(8): 607–614.
- [19] WEIER T, HÜLLER J, GERBETH G, et al. Lorentz Force Influence on Momentum and Mass Transfer in Natural Convection Copper Electrolysis[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(1): 293–298.
- [20] ROSENKRANZ C, LOHRENGEL M M, SCHULTZE J W. The Surface Structure During Pulsed ECM of Iron in NaNO_3 [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(10): 2009–2016.
- [21] LOHRENGEL M M, ROSENKRANZ C. Microelectrochemical Surface and Product Investigations During Electrochemical Machining (ECM) in NaNO_3 [J]. Corrosion Science, 2005, 47(3): 785–794.
- [22] WANG J J, LIU L L, CUI Z H, et al. Multi-Fractal Characteristics of Pore Structure for Coal During the Refined Upgrading Degassing Temperatures[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(7): 2931–2942.
- [23] 吕建国, 戴结林, 宋学萍, 等. MoO_3 纳米纤维 TEM 图像的多重分形谱 [J]. 功能材料, 2008, 39(6): 1056–1058.
LÜ Jianguo, DAI Jielin, SONG Xueping, et al. Multi-Fractal Spectra of TEM Images of MoO_3 Nanofibres[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(6): 1056–1058.
- [24] 孙 霞, 吴自勤. 规则表面形貌的分形和多重分形描述 [J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2126–2131.
SUN Xia, WU Ziqin. Fractal and Multifractal Description of Surface Topography[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11): 2126–2131.
- [25] MONZON L M A, NAIR V, REILLY B, et al. Magnetically-Induced Flow During Electropolishing[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(13): E679–E684.
- [26] KOŁODZIEJCZYK K, MIĘKOŚ E, ZIELIŃSKI M, et al. Influence of Constant Magnetic Field on Electrodeposition of Metals, Alloys, Conductive Polymers, and Organic Reactions[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22(6): 1629–1647.
- [27] LIAO C J, LIU Q, MA X Z, et al. Relationship Between Surface Heterogeneity and Electrochemical Interface Behavior of the TiAl Alloy Electrode[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(1): 473–484.

(责任编辑: 邓光辉)
(下转第 77 页)