

激光电化学复合加工的温度场与电场模拟研究

印洁¹ 张朝阳¹ 曾永彬² 李中洋¹ 秦昌亮¹

¹ 江苏大学机械工程学院 激光技术研究所, 江苏 镇江 212013
² 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 激光电化学复合微加工技术将激光能量与电化学加工相结合, 利用激光的热-力学效应和电极反应去除工件材料, 实现选择性定域刻蚀加工。针对激光电化学复合加工中的多能量场耦合特点, 利用有限元分析软件 ANSYS 对复合刻蚀加工靶材的瞬态温度场和电场进行了有限元数值模拟, 研究了温度、电场变化对复合加工区域范围及加工深度的影响; 并与试验结果对比, 分析了激光电化学去除材料、刻蚀成形的机理, 探讨了激光电化学微加工所得表面形貌的特征。

关键词 激光技术; 激光电化学; 复合加工; ANSYS; 温度场; 电场

中图分类号 TG665; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.121403

Simulation Research of Temperature Field and Electric Field in Laser Electrochemical Compound Processing

Yin Jie¹ Zhang Zhaoyang¹ Zeng Yongbin² Li Zhongyang¹ Qin Changliang¹

¹ Institute of Laser Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

² Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Laser electrochemical compound etching, combining laser energy and electrochemical etching processing, removes the workpiece material by using the thermal-mechanical effect of laser and electrode reaction, and achieves the selective localized etching processing. For the multiple-field coupling characteristics of laser electrochemical compound processing, the finite element analysis software ANSYS is used to perform finite element numerical simulation of transient temperature field and electric field of the compound etching target material. The influence of changes in the transient temperature field and electric field on the scope and depth of processing area is studied. By comparing the results with experimental ones, the laser electrochemical mechanism of material removal and etching forming is shown. The surface topography characteristic of the micro-machining process in laser electrochemical compound processing is discussed, which provides the guidance for the optimization of compound processing technology.

Key words laser technique; laser electrochemistry; compound processing; ANSYS; temperature field; electric field

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

近年来,集微型机械、微传感器和微控制电路等于一体的微机电系统(MEMS)迅速地发展起来,它可以完成传统机电系统不能实现的任务,对工业、农业、信息、环境、生物医疗、空间国防等领域的发展产生重大的

收稿日期: 2013-08-05; **收到修改稿日期:** 2013-08-14; **网络出版日期:** 2013-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(50975127, 51275218)、江苏省自然科学基金(BK2011522)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金(BM2012009)、江苏大学第 11 批学生科研课题(11A380)

作者简介: 印洁(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光电化学复合加工方面的研究。E-mail: yj_2013@foxmail.com

导师简介: 张朝阳(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光加工和电化学微细加工技术方面的研究。

E-mail: zzhaoyang@126.com

影响,具有广阔的应用前景。微机械在材料、结构、工艺等方面与传统的机械有着较大的差异,研究表明微机械构件表面的摩擦力、粘性力等对微机械传动具有重大影响,微细加工形成的规则凹凸非光滑表面,就具有良好的摩擦润滑性能^[1]。制造微型机械的微细加工技术属于微机电系统的核心技术,是近 20 年来极为活跃的研究领域^[2-3]。

激光电化学复合微加工技术是一种将激光加工技术与电化学加工技术相结合而形成的新型微细加工技术^[4],它利用激光的热-力学效应去除激光辐照区的金属材料,电解液的冷却作用可以减少激光加工所引起的热影响区;同时电化学腐蚀可以溶解激光加工的再铸层。因此,与单纯的激光加工或是电化学刻蚀加工相比,激光电化学复合微细加工可以提高加工精度和效率。

对激光电化学复合微细加工中的瞬态温度场和电场进行有限元数值模拟,可以揭示激光电化学加工去除材料、刻蚀成形的机理,预测激光电化学微细加工所得表面形貌的特征。目前,国内外研究激光加工成形过程所采用的数值模拟方法主要有有限元分析软件 ANSYS、Matlab、ABAQUS 等,并已取得了一定的成果。Childs 等^[5]对选择性激光熔结(SLM)成形过程的温度场与应力分布进行了初步的探索。刘会霞等^[6]使用 ANSYS 软件,建立了使用激光透射焊接技术焊接透明聚氯乙烯(PVC)的三维有限元热分析模型,得到了温度场的分布。陈怡星^[7]采用 ANSYS 软件对激光微造型中的烧蚀温度场和弹坑进行数值模拟,提出了激光功率密度对于热场及弹坑的影响规律。江天等^[8]利用有限元分析软件计算了熔石英在 DF 激光辐照下的温升曲线和热应力场分布曲线,分析了熔石英的激光破坏机理。但是,关于激光电化学复合微加工成形过程中瞬态温度场和电场模拟的研究目前还鲜见报道。

本文初步建立了复合微细加工过程中传热与电解的理论模型,考虑了温度、电场变化对复合加工的影响,利用有限元分析软件 ANSYS 对激光电化学复合微细加工中刻蚀靶材的瞬态温度场和电场进行了有限元数值模拟,说明复合加工能够获得更高的加工效率和更好的表面质量,实现了选择性激光电化学的定域刻蚀加工。

2 模型的建立

2.1 激光电化学微细加工机理的物理模型

激光电化学微加工系统使用 SGR-10 脉冲固体激光器和脉冲信号发生器分别为试验系统提供激光能量和脉冲电源。高能脉冲激光透过电解液照射到靶材表面时,由于激光能量造成电解液的光学击穿,产生的高温高压等离子体冲击波与射流冲击热-力效应会破坏工件表面辐照区域的钝化膜^[9]。在钝化膜受损区域,工件发生微观应力变形,脉冲激光产生的高温能促进电化学反应腐蚀去除工件材料。当激光进入脉冲间歇时,电化学反应又会形成钝化膜。最终,在激光热-力效应和电化学反应的共同作用下,加工区的钝化膜发生破坏-形成-再破坏-再形成的重复过程,工件材料被逐渐去除。非加工区域的材料受到钝化膜保护不会被去除,从而实现区域性应力刻蚀的加工效果。其物理模型如图 1 所示。

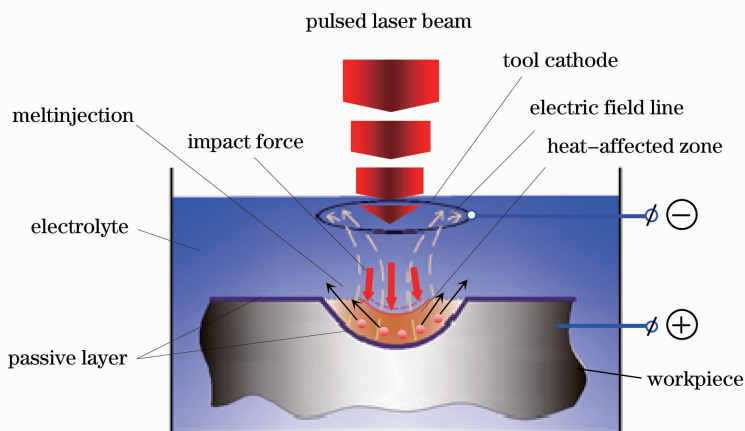


图 1 脉冲激光电化学复合打孔微加工模型

Fig. 1 Pulsed laser electrochemical compound micro-punch processing model

2.2 数学模型的建立

非线性瞬态热传导微分方程为^[10]

$$c(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k_x(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k_y(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k_z(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right] + \bar{Q}, \quad (1)$$

式中 $k_x(\theta)$ 、 $k_y(\theta)$ 、 $k_z(\theta)$ 分别为材料沿 x 、 y 、 z 三个方向的热传导系数； $\rho(\theta)$ 为材料的密度； $c(\theta)$ 为材料的比热容； \bar{Q} 为内热源的热量。为了简化计算，现假设材料各向同性，则(1)式可以简化为

$$c(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) + \bar{Q}. \quad (2)$$

电解加工过程中电位分布的数学模型方程组为^[11]

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

电场中各点的电场强度等于该点电位梯度矢量的负值，即 $E_e = -\frac{\partial\phi}{\partial n}\mathbf{n}$ 。电流密度则可由电场强度表示为 $i = \kappa_e E_e$ 。阳极表面的边界条件为

$$\phi = U_0, \frac{\partial z_a}{\partial t} = \kappa_e \eta \omega \left| \frac{\partial\phi}{\partial n} \right|_a \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial r}\right)^2},$$

阴极表面的边界条件为

$$\phi = 0.$$

以上各式中 ϕ 为电位， \mathbf{n} 为工件表面的法向量， κ_e 为电解液的导电率， η 为电流效率， ω 为单位电量溶解的元素体积。

2.3 模拟方法

在激光电化学复合加工中，为了揭示电解液对激光加工区域热影响的效果，利用 ANSYS 软件建立了三维有限元模型，分别在空气和电解液中模拟激光辐照加工的温度场特点。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件，它可以用来解决各种瞬态变化的问题。对于有限元瞬态热分析，可以认为在空气和溶液中激光加工的热作用之间的差异主要是由不同热对流系数决定的。水的热对流系数 [500~10000 W/(m²·K)] 远远高于空气 [10~100 W/(m²·K)]^[12]。在本文中，电解液的热对流系数设为 1000 W/(m²·K)，空气的设为 100 W/(m²·K)。热对流换热系数作为一个边界条件被附加在工件模型的表面，对流热损失表示为^[13]

$$k\frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_\infty), \quad (4)$$

式中 T_∞ 和 h 分别表示环境温度和热对流系数， n 是工件表面法向量的大小。空气和溶液环境温度都设为 25 ℃，激光向外辐射流失的热能忽略不计。

当激光穿透溶液辐照靶材表面时，激光能量以热流密度的形式输入到金属工件表面。本文采用基模高斯激光束，热流密度分布 $I(x, y)$ 可以表示为^[14]

$$I(x, y) = \frac{P_0}{\pi r_0^2} \exp[-(x^2 + y^2)/r_0^2], \quad (5)$$

式中 r_0 为激光聚焦到工件表面时光斑的半径，设置为 120 μm； P_0 是到达工件表面的激光功率，通过公式 $P_0 = Qf$ 换算得到， Q 为脉冲激光的能量， f 为频率。

同时，在激光电化学复合加工中，为了揭示激光辐照靶材温度升高对电化学加工区域电场的影响，利用 ANSYS 软件建立了二维有限元模型，模拟溶液与靶材界面的电场分布，从而体现电化学加工过程的实际电场情形。本文采用了 ANSYS 的间接耦合方法，先对二维模型进行激光辐照温度场的模拟（模拟方式同上，三维模型改为二维），再把瞬态温度场分析的结果作为电场分析的载荷，来模拟电化学过程的电场模型，然后再把电场分析的结果作为温度场分析的载荷，来模拟激光辐照过程的温度场模型。每个时间段的脉冲激光温度场的作用结果与电化学的作用结果反复迭代，从而实现两种物理场的耦合效应。

电化学加工过程加载纳秒脉冲电压，产生的脉冲电流有利于提高微细电化学加工的精度。该脉冲电压

为可变可控的环形电压,能够实时改变加工区域的电场分布。整个复合微细加工过程由激光打孔、电化学反应刻蚀相互作用叠加复合而成。

激光电化学微细加工打孔试验材料为 7075 铝合金,材料的热物性参数^[15]见表 1。在该复合微细加工的温度场、电场分布模拟过程中,为简化计算作以下假设:

1) 纳秒脉冲激光辐照到靶材,靶材的吸收率^[16]为 0.3。由于靶材表面液体的厚度较小,仅为 1 mm,可认为激光光斑形状没有变化,且忽略电解液对激光吸收的能量损失^[4]。

2) 在整个加工过程中,假设溶液和靶材交界面的温度相同,且靶材为各向同性均匀介质;电解液各向同性,各处导电率、电流效率都分别相同,保持为常数。

3) 由于纳秒脉冲激光作用时间较短,热作用区域小,忽略热辐射对激光能量的损耗^[17]。

4) 加工过程中,阳极与电解液的分界面、阴极与电解液分界面的电极电位分别保持常数;阳极电化学反应服从法拉第定律^[11]。

表 1 7075 铝合金的热物性参数

Table 1 Thermal physical property parameters of 7075 aluminum alloy

Temperature / °C	25	100	200	300	400	500
Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	860	900	970	1020	1120	1320
Heat conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	156	161	175	185	193	197

3 模拟结果及讨论

3.1 瞬态温度场的有限元数值模拟

脉冲激光加工温度场模拟的有限元模型如图 2 所示。用 r_x 、 r_y 、 r_z 分别表示在 X、Y、Z 方向的尺寸,即基体的三维尺寸为 40 mm×40 mm×8 mm。本文在网格划分时对激光光斑辐照的靶材区域进行了单元细化,其他区域划分较粗,兼顾了计算精度和运算速度。纳秒脉冲激光作用于实体中心,由于该实体模型是对称分布的,取其四分之一,可以更清晰地看到脉冲激光辐照区域模拟温度场的温度分布。

模拟条件设置为:纳秒脉冲激光的能量 80 mJ,脉冲宽度 10 ns,频率 5 Hz。激光能量的输入为高斯分布,以热流密度的方式输入到基体表面。模型中能量损失为对流传热,激光束穿透溶液到达基体表面过程的损失忽略不计。在空气和液体中加工主要区别为环境的差异,由空气与液体中的热对流换热不同决定,可以在基体表面附加不同的对流换热系数为条件,从而达到模拟的效果。

图 2 为在不同介质中脉冲激光辐照靶材的中心区域温度分布图。图 2(a)为空气中纳秒脉冲激光辐照靶材时作用区域的温度分布图。可以看到:在激光作用的很短时间内,温度就升高到了 2209.92 °C,且热影响区范围很大,深度方向尤为明显。图 2(b)为在 NaNO₃ 电解液中激光电化学复合微细加工的温度场分布,与在空气中加工相比,溶液中纳秒脉冲激光辐照区域的最高温升小了将近 230 °C,复合加工的热影响区较

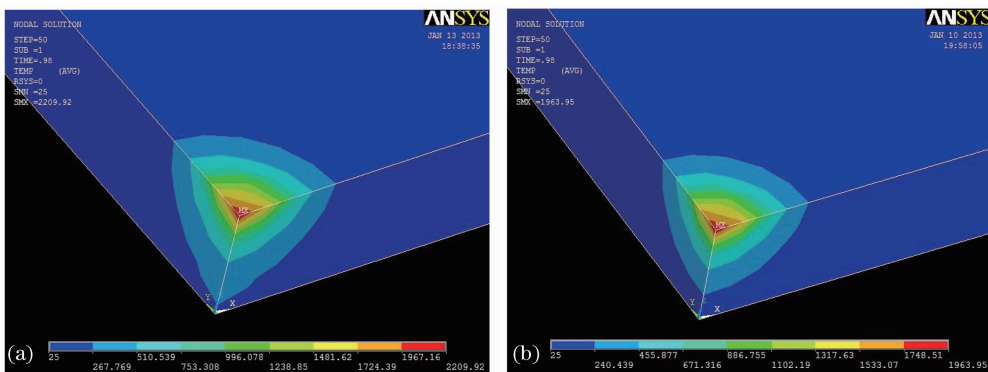


图 2 在不同介质中脉冲激光辐照靶材的温度分布。(a)空气中;(b)电解液中

Fig. 2 Temperature distributions of target material under pulsed laser irradiation in different media. (a) In the air; (b) in the electrolyte

小。这是由于整个加工过程都在电解液中进行,溶液的循环流动能够带走热量,对于激光加工的热影响区域有着良好的冷却、散热效果。

图3给出了空气和电解液中激光辐照区域中心点温度随时间的变化曲线,由图可知:在0.10 s时间内作用区域中心点的温度升高非常快,在0.04 s时就已经达到了757.5 °C(表2),铝合金的熔化范围在477 °C~638 °C,此时靶材已经开始熔化。在0.4 s之后,温升就趋于平缓。由温度-时间变化曲线可知:在0.10 s之后,在空气与电解液中激光辐照区域中心点的温差开始明显,逐渐变大,随着时间的推移,温差趋于平缓。这表明与空气中的激光加工相比,电解液中工件上加工区域温升减小,但对温度场分布的基本趋势没有太大的影响。

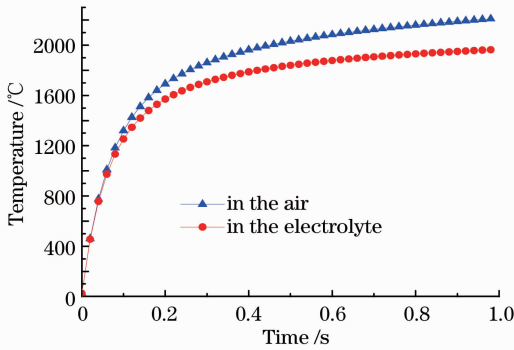


图3 激光辐照区域中心点温度随时间的变化

Fig.3 Temperature changes over time in the center of laser irradiation area

表2 各时刻对应的温度

Table 2 Corresponding temperature at different time

Time /s	Temperature /°C
1×10^{-8}	25.0001
0.02	455.915
0.04	757.568
0.06	973.696
0.08	1133.21
0.1	1253.43

图4是激光电化学复合微细加工的瞬态温度场分布图,分别对应 $T=0.02$ 、 0.10 、 0.20 、 0.60 s时刻加工区域的温度分布。由图4可知:随着时间的增加,激光辐照区域的温度逐渐升高,热影响区不断扩大,横向变化较小,深度方向的热影响十分明显。随着加工时间的推移,温度升高趋于平缓,热影响区向深度方向不断扩大。

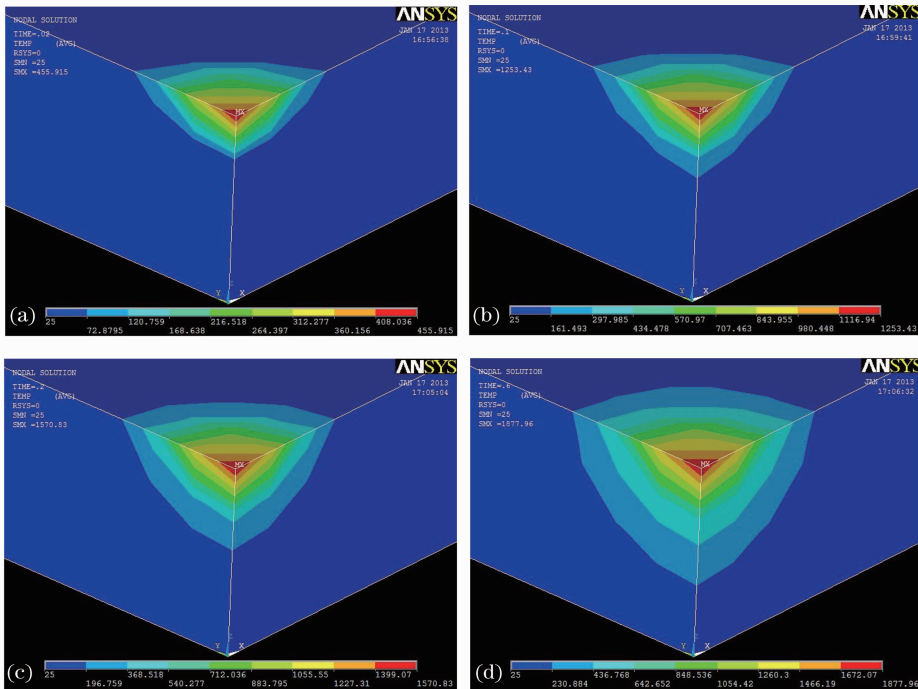


图4 激光电化学复合微细加工的瞬态温度场分布。(a) $T=0.02$ s; (b) $T=0.10$ s; (c) $T=0.20$ s; (d) $T=0.60$ s

Fig.4 Transient temperature field distributions in laser electrochemical compound micro-machining. (a) $T=0.02$ s;

(b) $T=0.10$ s; (c) $T=0.20$ s; (d) $T=0.60$ s

图 5 是激光辐照区域各节点在各时刻的温度变化曲线。图 5(a)是分别在 $T=0.02、0.10、0.20、0.60、0.98$ s 时刻,激光辐照区域横向各节点温度变化的曲线,图 5(b)是分别在 $T=0.02、0.10、0.20、0.60、0.98$ s 时刻,辐照区域深度方向各节点温度变化的曲线。由图 5 可知:温度从激光中心向横向和深度方向都快速衰减,产生了较大的温度梯度;在距离激光中心 1 mm 的区域内,深度方向的温度梯度比横向变化大;而 5 mm 之外,横向温度始终保持在室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,而深度方向的温度还是 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。这表明只是在激光辐照光斑中心的微区产生很高的温度,周围区域温度急剧下降;靶材辐照区域的横向温升较快,影响区较小;深度方向温升略慢,但影响区比横向大。因此,通过模拟复合加工瞬态温度场,可以对工件的加工区域范围和加工深度加以控制,体现了选择性激光电化学的定域性刻蚀加工。

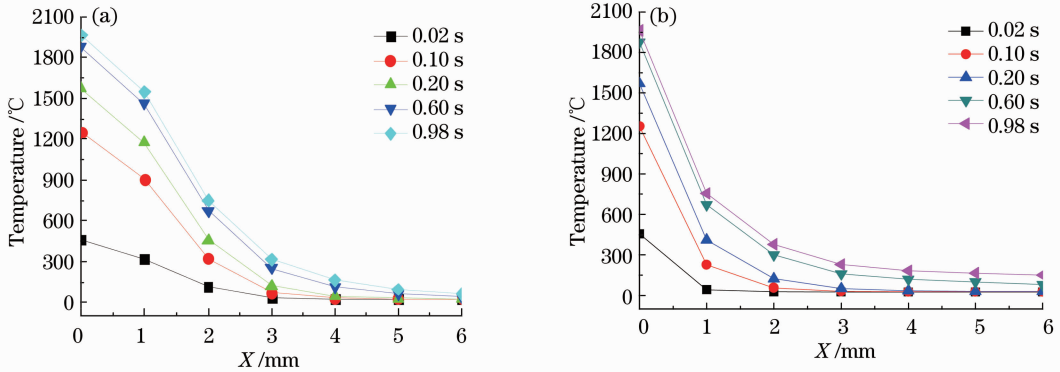


图 5 激光辐照区域各节点在各时刻的温度变化曲线。(a)横向;(b)深度方向

Fig. 5 Temperature variation curves of each node at different time in laser irradiation area. (a) In landscape orientation; (b) in depth direction

3.2 电场的有限元数值模拟

为了模拟激光电化学复合加工中电化学刻蚀时的电场,采用了有限元分析软件 ANSYS 的间接耦合方法。首先对复合加工区域的温度场进行分析,然后对其电场进行分析,通过把温度场分析的结果作为电场分析的载荷来模拟两种物理场的耦合效应。

电化学刻蚀靶材起初是在工件表面进行的,随着打孔孔型逐级形成,电化学腐蚀反应在孔的表面持续进行,脉冲激光、电化学相互作用。因此,模拟溶液与靶材界面的电场二维分布就可以体现加工的实际电场情形。为简化计算,设其电场数值模拟的有限元模型为二维平面模型,大小为 $6\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,液体厚度设为 2 mm ,靶材厚度设为 4 mm ,如图 6 所示。模拟条件为:纳秒脉冲电源峰值电压 2.5 V ,脉冲宽度 60 ns ,频率 2 MHz 。

该激光电化学复合微加工孔的纳秒脉冲电压为可变的环形电压(如图 6 中工具电极的剖面视图所示),能够实时改变加工区域的电场分布,加工区域中间电场较弱、周围较强,配合激光高斯分布中间强、周围弱的

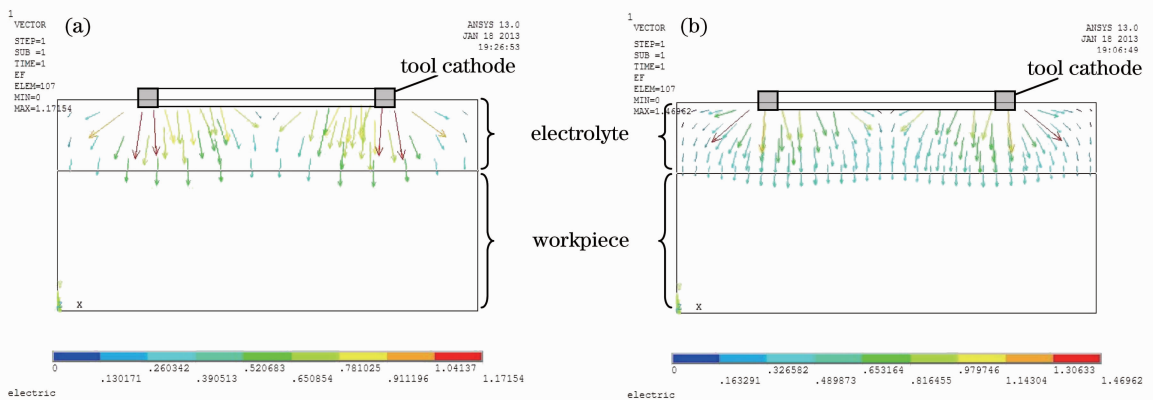


图 6 电解液与工件界面的电场分布。(a)电化学加工;(b)激光电化学复合加工

Fig. 6 Electric field distributions at the interface between electrolyte and workpiece. (a) Electrochemical machining; (b) laser electrochemical compound processing

特点,实现加工区域内多维复合能量的均匀分布,同时保证了激光能量与电化学体系的高效复合。考虑到电化学加工电场的模拟效果以及工具电极的视图效果,将实体三维的环形可变电场转化为该模拟的二维模型。首先按上述温度场模拟的方法,建立二维模型模拟脉冲激光辐照靶材的温度分布,再将温度作为载荷加载到电场分析中,即得到图 6 所示的二维电场分布:中间电场较弱、两端电场较强,改变电压值的大小便可以调控电场分布,改善电化学定域刻蚀的效果,使得激光电化学复合刻蚀加工的孔型清晰、表面平整。

图 6 为不同加工方式下的界面电场分布。图 6(a)是未加激光时电化学腐蚀的电解液、靶材界面的电场分布模拟图,图 6(b)是纳秒脉冲激光电化学复合加工时,加工区域受到激光辐照作用的界面电场分布模拟图。由图 6 可知:未加激光辐照、单纯的电化学腐蚀加工电场线分布较稀疏,电场强度较弱,可推断电化学反应速率较慢,该加工的生产效率较低;而纳秒脉冲激光电化学复合加工的电场线分布密集,电场强度明显增强,使得电化学反应速度加快,加工效率显著提升。

图 7 为激光电化学复合加工出微孔形貌界面的电场分布图。纳秒脉冲激光电化学复合作用一段时间后,靶材表面外形发生变化,即出现模型所示的微孔形貌。在复合微加工过程中,表面微观形貌会出现尖峰,出现图 7 所示模型电场分布的“尖端效应”,电场线高度集中、电场强度增加,形成较大的电流密度,优先且快速溶解,实现“强制”性的电化学选择蚀除,从而减小微孔表面的微观不平度,使得微孔的底部、侧壁光滑平整。

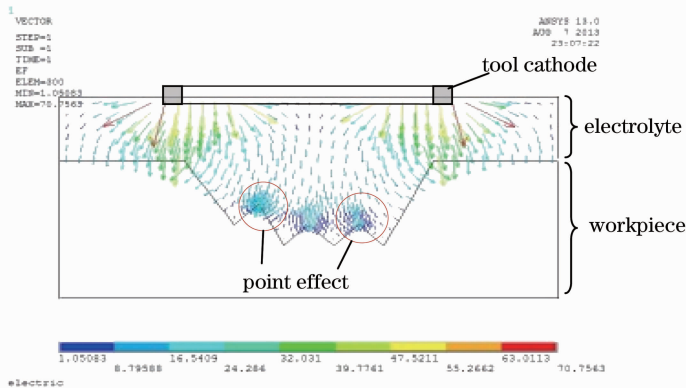


图 7 复合加工微孔界面的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution in microporous interface in composite processing

4 实验结果与讨论

4.1 实验验证

基于上述激光电化学复合加工温度场与电场的有限元数值模拟,针对该模拟推断的结果进行了实验验证。实验条件为:脉冲激光能量为 80 mJ,脉宽为 10 ns,频率为 5 Hz,纳秒脉冲电源峰值电压为 2.5 V,脉冲

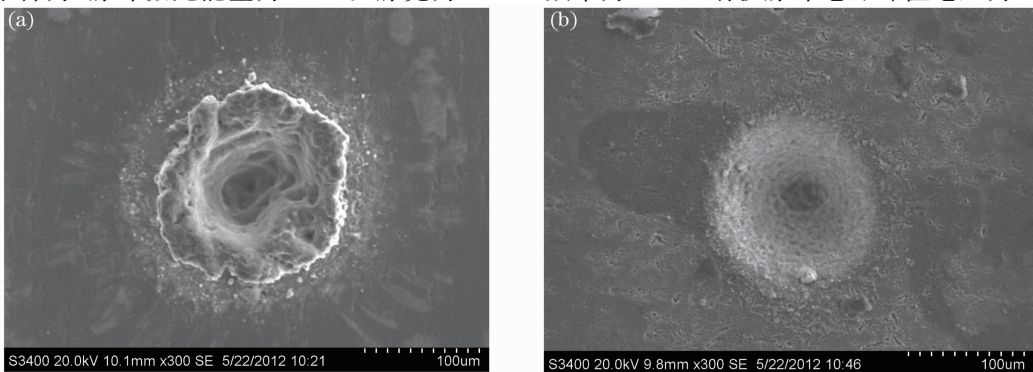


图 8 不同加工条件下激光打孔的 SEM 图。(a)空气中激光打孔;(b)激光电化学复合加工打孔

Fig. 8 SEM pictures of laser drilling under different processing conditions. (a) Laser drilling in the air; (b) laser electrochemical composite processing

宽度为 60 ns, 频率为 2 MHz。图 8 为在铝合金材料上进行多脉冲定点加工 200 个脉冲时得到的形貌的扫描电子显微镜(SEM)图片。

图 8(a)是在空气中纳秒脉冲激光打孔的 SEM 图片,图 8(b)是纳秒脉冲激光电化学复合微细加工孔的 SEM 图片。图 8(a)与(b)对比明显:在空气中单纯的激光打孔,靶材表面产生了许多熔渣和喷溅物,而激光电化学复合加工出的孔型清晰得多,靶材表面以及孔的底部和侧壁光滑平整,加工区的表面质量较好,实现了选择性激光电化学的定域性刻蚀效果。

4.2 模拟效果与实验结果的分析讨论

纳秒脉冲激光与电化合作用可提高微细加工的能力,其主要是以激光加工的热-力效应为手段去除钝化膜和工件材料,电化学腐蚀作用来溶解基体材料和激光加工产生的熔渣,并且利用激光诱导或激发电化学反应,可以加快材料的去除速率,同时电解液的热传导有利于减小激光加工引起的热影响区。因此复合加工可以提高加工效率,获得更好的加工质量。对于电-热耦合^[18],简要分析如下。

1) 电场对温度场的作用可表示为

$$Q = \sigma |\nabla V|^2, \quad (6)$$

式中 Q 为产生的热, σ 为电导, V 为电势。其物理意义是:当电流通过导电物体时会导致热量产生。热量的大小与该点的电势梯度(即电场强度)的平方成正比,与该点的电导率成正比。

2) 温度场对电场的作用可表示为

$$R = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (7)$$

式中 R 为电阻, T 为温度, T_0 为参考温度, ρ_0 为温度 T_0 时的电阻率。温度场对电场的作用主要表现为温度对电阻的影响。当温度升高时,金属导体电阻增大,而电解质溶液电阻减小。

在激光电化学复合加工过程中,电场对温度场的作用很小,由于脉冲电源电压为 0~5 V,产生的电流较小,加工区域电场强度小,则所产生的热量也很小。因此,主要表现为电化学腐蚀,而非热量转化。纳秒脉冲激光的能量很高,产生的高温比前者大几个数量级,对电场作用表现为温度对电阻的影响:激光透过电解液辐照工件表面,在溶液/工件界面处的加工区域温度升高,金属工件阻值变大;电解液阻值变小,升温区域的电场强度会略微变化。另一方面,高温有利于电化学反应的进行,激光作用区域的材料由于温度瞬间升高,电化学反应所需的活化能迅速变小,阴、阳离子的活度增加,对靶材辐照区域钝化膜的破坏力加强,增加了金属阳极的溶解速度,使得电流密度显著增大,电场强度明显增强;同时,激光辐照区的液层在激光的作用下产生了热扰动,加快了液体传质速度,从而加快了电化学反应速度。

由 ANSYS 有限元分析软件模拟的温度场、电场与加工试验结果对比可知:在复合微加工过程中,表面微观形貌会出现凸起的尖峰。由于电场分布的尖端效应,该凸起部位会聚集较多的电场线,形成较大的电流密度,并且温度较高,此处的电化学反应速度最快。因此,加工区域内的凸起部位会首先被电化学反应腐蚀掉,使复合加工的孔型清晰,微观表面平整,加工质量较好(图 8)。

5 结 论

在激光电化学复合微细加工工艺中,由于存在纳秒脉冲高能量激光加工、电化学腐蚀加工及两者的耦合作用,因此采用复合加工将会获得更高的加工效率,以及更好的加工质量。本文通过有限元分析软件 ANSYS 对激光电化学复合加工过程中的瞬态温度场及电场进行了数值模拟研究,得到以下结论。

1) 通过对复合加工瞬态温度场的模拟分析可知:在 0.10 s 时间内,靶材作用中心升温很快,在 0.04 s 时温度就达到 757.5 °C,靶材开始熔化;温度从激光中心向横向和深度方向都快速衰减,产生了较大的温度梯度;在距离激光中心 1 mm 的微区内,深度方向的温度梯度比横向变化大。模拟所得数据可为复合加工工艺的优化提供帮助,以控制加工区域范围及加工深度,从而实现选择性激光电化学的定域刻蚀加工。

2) 通过对复合加工中电化学刻蚀时的电场模型进行模拟分析可知:经高功率密度激光辐照,材料微区及其临界溶液温度迅速上升,复合加工的电场线分布密集,电场强度明显增强,形成较大的电流密度,使电化学反应速度加快,加工效率显著提升。模拟所得的数据对于材料内部热应力、热疲劳强度及电场分析也具有基础研究意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhanhe, Zhu Yongwei, Fan Zhongjun. Design and rest of special machining for micro-pits of working surface between friction pairs [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2009, (4): 87-90.
王占和, 朱永伟, 范仲俊. 摩擦副表面圆形微坑特种加工工艺设计和试验[J]. *制造技术与机床*, 2009, (4): 87-90.
- 2 G Ryk, Y Kligerman, I Etsion. Experimental investigation of laser surface-texturing for reciprocating automotive components [J]. *Tribol Trans*, 2002, 45(4): 444-449.
- 3 Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. *Tribol Lett*, 2003, 17(4): 733-737.
- 4 Long Yuhong. Research on Mechanism and Experiment of Laser Electrochemical Micromachining Process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
龙芋宏. 激光电化学微加工机理与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- 5 Childs T HG, Hauser G, Badrossamay M. Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modeling [J]. *Proc Inst Mech Eng B: J Eng Manuf*, 2005, 219(4): 339-357.
- 6 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong, *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1801-1807.
刘会霞, 邢安, 张惠中, 等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1801-1807.
- 7 Chen Yixing. Numerical simulation of 3-dimensional internal showing of the surface induced by laser micro-texturing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, (9): 208-210.
陈怡星. 激光微造型技术中表面微形貌的数值模拟研究[J]. *机械设计与制造*, 2010, (9): 208-210.
- 8 Jiang Tian, Cheng Xiang'ai. Theoretical simulation of surface temperature and stress distribution of fused silica under DF laser irradiation [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s106001.
江天, 程湘爱. DF激光辐照对熔石英表面温度与应力分布的理论模拟[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s106001.
- 9 Zhang Zhaoyang, Li Zhongyang, Qin Changliang, *et al.*. Analysis of stress-etching quality based on nanosecond pulse laser electrochemical machining [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094210.
张朝阳, 李中洋, 秦昌亮, 等. 脉冲激光与电化学复合的应力刻蚀加工质量研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094210.
- 10 Zhang Lei, Zhang Qingmao. The numerical simulation of process in laser drilling [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2009, 38(8): 16-18.
张磊, 张庆茂. 激光打孔过程的数值模拟[J]. *机电工程技术*, 2009, 38(8): 16-18.
- 11 Zhang Hua. Basic Research on Hybrid Processing of Laser Beam Machining Combined with Jet Electrochemical Machining [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
张华. 喷射液束电解-激光复合加工的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- 12 Chung CK, Lin SL. CO₂ laser micromachined crackless through holes of Pyrex 7740 glass [J]. *Int J Mach Tool Manuf*, 2010, 50(11): 961-968.
- 13 Negarestani R, Sundar M, Sheikh MA, *et al.*. Numerical simulation of laser machining of carbon-fibre-reinforced composites [J]. *Proc Inst Mech Eng B: J Eng Manuf*, 2010, 224(7): 1017-1027.
- 14 Y Yan, L Li, K Sezer, *et al.*. CO₂ laser underwater machining of deep cavities in alumina [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2011, 31(15): 2793-2807.
- 15 Guo Guifang, Chen Furong, Li Linhe. Numerical simulation of temperature field of electron beam welding for 7075 alloy [J]. *Welding*, 2006, (3): 28-30.
郭桂芳, 陈芙蓉, 李林贺. 7075 铝合金电子束焊接温度场数值模拟[J]. *焊接*, 2006, (3): 28-30.
- 16 Huang Yanlu, Yang Fuhua, Liang Gongyin, *et al.*. Using *in-situ* technique to determine laser absorptivity of Al-alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(5): 449-453.
黄延禄, 杨福华, 梁工英, 等. 用原位法测定铝合金对激光的吸收率[J]. *中国激光*, 2003, 30(5): 449-453.
- 17 Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603001.
褚庆臣, 虞刚, 卢国权. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603001.
- 18 Song Shaoyun. Modeling of multiphysics problem and research of coupling relation [J]. *J Wuhan Polytechnic University*, 2005, 24(4): 21-23.
宋少云. 多场耦合问题的建模与耦合关系的研究[J]. *武汉工业学院学报*, 2005, 24(4): 21-23.