

文章编号 1004-924X(2012)06-1310-06

激光冲击效应下的力学电化学微细刻蚀加工

张朝阳, 李中洋*, 王耀民, 毛卫平

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:在所构建的纳秒脉冲激光电化学加工系统中,利用激光辐照和脉冲电化学刻蚀复合的方法对铝合金进行了加工试验,研究了激光穿过溶液作用于物质时产生的力效应和电化学效应对加工质量的影响。试验结果表明:高能脉冲激光透过电解液辐照在工件表面时,激光在电解液中产生的冲击波力效应和射流冲击力效应会使工件发生弹性变形,从而改变电极电势,提高电流密度,加速了对工件的刻蚀。激光产生的力效应能够去除加工区的钝化层,使其发生电化学反应,而非加工区不发生反应,从而显著增强了电化学的定域蚀除能力。最后,利用力学电化学效应,在浓度为0.5 mol/L的NaNO₃溶液中实现了线宽140 μm左右、深宽比较大的微细刻蚀加工,获得了较好的加工质量和成形精度。

关键词:脉冲激光;激光冲击;电化学刻蚀;力学电化学效应;复合加工

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1310

Mechanical-electrochemical micro-etching under laser shock effect

ZHANG Zhao-yang, LI Zhong-yang*, WANG Yao-min, MAO Wei-ping

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

* Corresponding author, E-mail: lizhongyang 200907@163.com

Abstract: An aluminum alloy workpiece was etched by a compound processing of laser and electrochemistry in an experimental system established, and the influence of mechanic effect caused by a laser shock and an electrochemical effect on the process quality was investigated. The results show that when a high-energy pulsed laser irradiates on the metal workpiece in the solution, it will take the elastic deformation by the jet impact and the shock wave force caused by the laser. Under the stress of the laser shock wave, the potential electrode is changed, current density is increased, and the electrochemical corrosion of metallic materials is accelerated. Moreover, the mechanics effect of laser shock could remove the passivation layer on the workpiece surface irradiated by the laser, and the material at this zone is eroded and removed. However, the other zone material could not be corroded with the protection of the passivation layer, which enhances the locally etching ability of electrochemical machining significantly. Finally, the compound machining of the laser shock and electrochemical corrosion was used to achieve a micro-etching with a high aspect ratio and a line width of 140 μm in the NaNO₃ solution with a concentration of 0.5 mol/L, which obtains good processing quality and satisfactory sha-

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2012-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975127); 教育部博士点新教师基金资助项目(No. 20093227120006); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2011522); 中国博士后基金特别资助项目(No. 201003558)

ping precision.

Key words: pulse laser; laser shock; electrochemical etching; mechanical and electrochemical effect; coupling processing

1 引言

激光加工和电化学加工都属于特种加工方式,都是非接触加工,不会产生接触应力和变形,具有进行复合的理论和技術基础。两种加工方式又各有特点:激光加工通过光路传输将激光聚焦于工件表面,以高能量的光束作为加工能源;电化学加工需要电路将电流传至电极两端,电极之间以电解液作为介质,最终在电极/溶液界面发生电化学反应。激光电化学复合加工就是在电化学体系中引入激光束,在光传输光路中选择合适的透镜成像比例来得到一定大小和功率密度的聚焦光斑,利用激光所具有的高能量改变辐照区域的电极状态,激发、诱导电化学反应,提高电化学反应速度,由电化学和激光两种能量共同作用而实现的加工技术。

利用激光照射的微区效应增强或诱导电化学反应,可以实现对电极材料的刻蚀加工。英国 Pajak P. T. 等人研究了电解液束喷射与激光束的复合刻蚀加工技术,利用喷射装置将经过阴极极化的电解液喷射到工件表面,激光束沿电解液束同轴方向照射在加工区域,对作为阳极的导电金属材料进行电化学刻蚀,刻蚀速度可达 $10 \mu\text{m/s}$ 。H. S. Shin 等在不锈钢上加工出了复杂的三维型腔。在国内,江苏大学以及华中科技大学等单位都对该技术进行了卓有成效的探索^[1-3]。

激光冲击与电化学复合加工能够利用激光的高分辨率显著提高电化学反应的微细加工能力,实现微尺度复杂结构的去除加工,获得理想的加工效果,满足微器件对表面质量、加工影响区等的严格要求,为高性能金属材料的微细加工提供新的加工途径,为特种复合加工技术开拓发展方向^[4-9]。

纳秒脉冲激光电化学复合加工过程中,当激光透过溶液作用于工件表面时,产生的等离子冲击波和射流冲击力与电化学腐蚀相互促进、共同作用来实现对工件的快速刻蚀加工。本文分析了

力学电化学刻蚀原理,以逐点照射的方法进行了加工试验。结果表明:纳秒脉冲激光电化学复合加工工艺定域性好,可获得较好的加工质量。

2 加工装置与方法

纳秒脉冲激光电化学微细加工试验系统如图1所示。试验系统用 SGR-10 脉冲固体激光器为试验提供激光能量,输出波长为 $1\ 064 \text{ nm}$,脉冲宽度为 10 ns ,输出能量在 $50 \sim 1\ 000 \text{ mJ}$ 可调,重复频率为 $1 \sim 10 \text{ Hz}$ 。激光器所发出的激光光斑的大小由透镜成像比例来决定。利用聚焦透镜将该激光束光斑缩小后,辐照在工件表面。通过手动调整来改变聚焦透镜与工件之间的距离,从而得到符合加工要求的聚焦光斑。被加工材料为 7075 航空铝合金,用丙酮溶液清洗其表面后,固定到 X-Y 工作台上的工作腔中。激光器和 X-Y 工作台由计算机统一控制。采用直径 2 mm 的不溶性金属圆环作为工具阴极浸没于电解液中,距工件 1 mm ,提供电化学反应过程中所需的电场。电解液选用浓度为 0.5 mol/L 的 NaNO_3 溶液,考虑到溶液太厚,激光经过溶液时的能量损失严重;溶液太薄,脉冲激光辐照产生的等离子体会溅起水花,因此,工件表面以上的溶液厚度为 2 mm 。采用 DF1511A 脉冲信号发生器提供微细电解加工过程中所需频率、波形的脉冲电源。整个试验

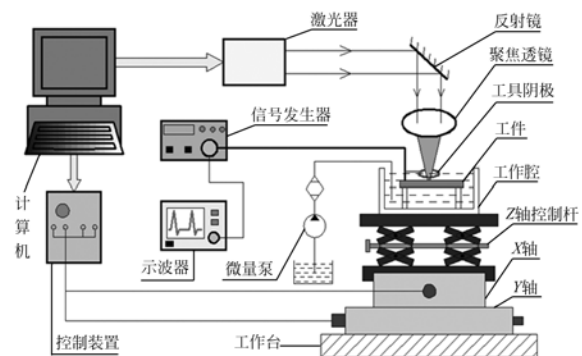


图1 纳秒脉冲激光电化学加工试验系统示意图

Fig. 1 Sketch of laser electrochemical micro etching process

在室温下进行。泰克公司生产的 TDS3012B 数字存储示波器用于观测加工过程中电极之间脉冲波形的变化。图 2 为试验装置的实物照片,试验结果采用扫描电子显微镜观察和图像采集,采用光学轮廓仪测量刻蚀加工的深度和宽度。

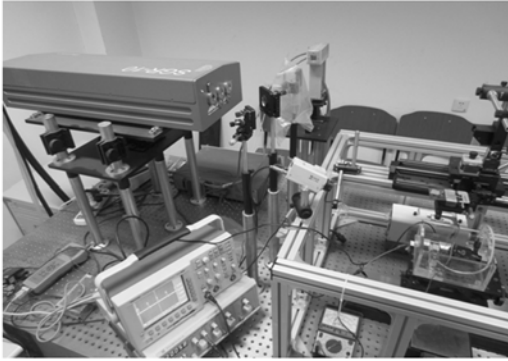


图 2 纳秒脉冲激光电化学加工试验系统实物图

Fig. 2 Photo of laser electrochemical micro etching process

3 力效应促进电化学反应的机理分析

脉冲激光作用于溶液中的工件表面时,激光能量造成电解液的光学击穿,试验中可以观察到闪光,听到清晰的爆破声;工件表面生成的气泡在溃灭时会产生等离子体冲击波与射流冲击力,其中等离子体冲击波压强表达式为^[10]:

$$p_1 = 0.01 \left[\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{0.5} Z^{2.5} (a_A I_0)^{0.5}, \quad (1)$$

式中, p_1 为等离子体刻蚀压强; α 为激光等离子体内能转化为热能的比例系数; Z 为约束介质和被作用工件的折合阻抗: $2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$; a_A 为工件对激光的吸收比; I_0 为激光功率密度。

而气泡溃灭所产生的射流冲击力对工件的压强为:

$$p_2 = \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} v, \quad (2)$$

式中, p_2 为射流冲击压强; c_1, c_2 分别为液体和被作用工件中的声速; ρ_1, ρ_2 分别为液体和被作用工件的密度; v 为射流冲击速度。

由激光辐照产生的压力 p_1 和 p_2 都集中作用在工件表面激光焦点附近的微小区域内,工件受到应力作用,发生弹性变形;如图 3 所示, X 为工件受力点处的位移。

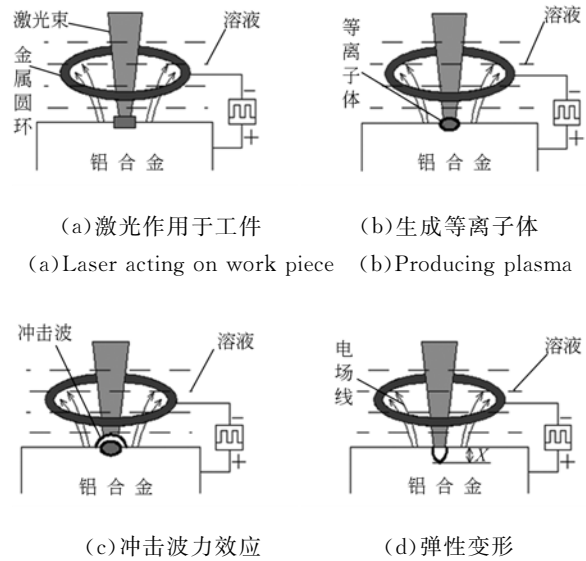


图 3 工件受力作用的弹性形变示意图

Fig. 3 Sketch of distorted workpiece under force action

对于金属工件,其化学位 $\Delta\mu$ 与所受应力 p (p_1 与 p_2 之和)的关系可表示为^[11]:

$$\Delta\mu = \int_{P_a}^{P_b} V(p) dp = V_0 \Delta p, \quad (3)$$

式中: V_0 为变形前金属的摩尔体积。 P_a 和 P_b 分别为工件表面发生弹性变性前、后的应力。

对一个金属电化学体系而言,若力学因素和电化学因素同时作用于一个金属电极系统,金属离子的电化学位 $\bar{\mu}$ 的表达式为^[11]:

$$\bar{\mu} = \mu_0 + RT \ln a + ZF\varphi + \Delta PV = \mu_0 + RT \ln \tilde{a}, \quad (4)$$

式中: \tilde{a} 为力学电化学活度; a 为金属的热力学活度。 μ_0 为标准状态下物质的化学位。

在激光辐照应力作用下,发生弹性变形的电极电势的变化值为^[11]:

$$\Delta\varphi_{II} = \bar{\varphi}_{II} - \varphi_{II} = -\frac{V\Delta p}{ZF}, \quad (5)$$

式中: $\bar{\varphi}_{II}$ 为发生弹性变形电极的电极电势; φ_{II} 为未变形金属电极的平衡电势; Z 为金属离子的化合价; F 为法拉第常数; V 为物质(金属)的摩尔体积。

由式(4)~(5)知,金属工件发生弹性变形后,电化学位发生变化,金属的电极电势向负的方向偏移,这意味着金属被氧化的趋势增大,净阳极溶解电流密度增大,即 \bar{I}_a 增大。

根据法拉第定律导出阳极金属溶解速度为 v_a :

$$v_a = \eta \omega \bar{I}_a, \quad (6)$$

式中, η 为电流效率; ω 为体积电化学当量; \bar{I}_a 为阳极净电流密度; 由式(6)知, 随着电流密度的增大, 金属溶解速度加快; 反之, 电流密度减小, 金属溶解速度减慢。

由以上各式可知, 激光穿过溶液作用于物质产生的力效应引起金属工件的弹性变形, 改变了电极电势, 提高了电流密度, 进而强化应力集中区域的局部腐蚀, 加快变形金属的刻蚀速度。

4 试验结果与讨论

铝合金的纳秒脉冲激光电化学微细刻蚀加工的试验条件为: 铝合金厚度为 4 mm, 激光能量为 60 mJ, 激光的脉冲频率为 5 Hz, 平均电流为 5 mA, 化学溶液为 0.5 mol/L 的 NaNO_3 溶液, 加工前后用丙酮溶液清洗工件表面。图 4 为激光电化学加工原理图。

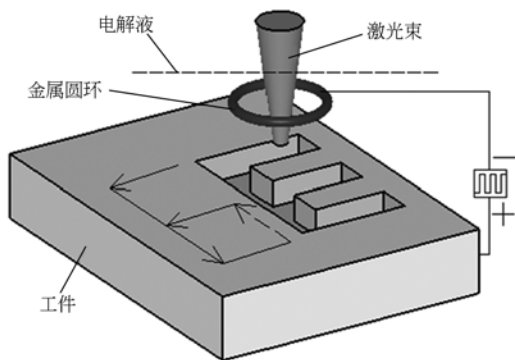


图 4 激光电化学加工原理图

Fig. 4 Principle of laser electrochemical micro etching

激光产生的力效应与电化学刻蚀过程为: 铝合金浸入 NaNO_3 溶液后, 表面会生成一层致密的钝化膜, 在钝化膜的保护下, 工件表面不会继续发生电化学反应。当脉冲激光聚焦后穿过 NaNO_3 溶液辐照在工件表面时, 在激光辐照的光斑区域造成光学击穿, 产生等离子体冲击波, 工件表面形成的气泡溃灭时产生的力效应使钝化膜破坏, 露出的基体材料发生电化学反应, 或变成离子融入到溶液中, 或生成沉淀产物被水流带走, 暴露出的基体材料腐蚀并重新成膜, 该处在激光脉冲作用下容易形成新的气泡, 气泡破灭, 膜再次破坏, 基体材料又发生电化学反应。该过程反复进行, 实现微细结构的定域刻蚀加工。

激光冲击作用在辐照区域的工件表面产生了复合应力刻蚀效应, 强化了电化学反应的区域选择性, 使电化学反应仅发生在加工区, 而工件表面没有被激光辐照的非加工区则在钝化膜的保护下不发生电化学反应。这样, 纳秒脉冲激光冲击效应下的力学电化学刻蚀作用都只在激光光斑辐照处进行, 显著增强了复合加工的定域蚀除能力。

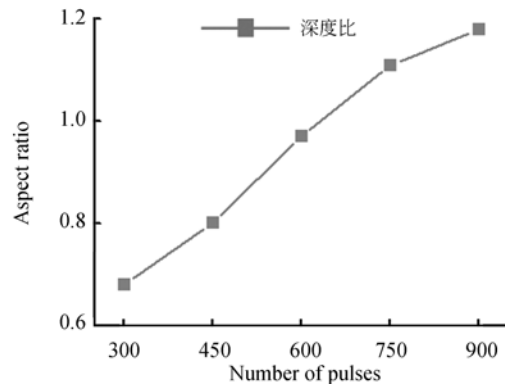


图 5 脉冲个数与深宽比的关系

Fig. 5 Relationship between pulse number and the aspect ratio

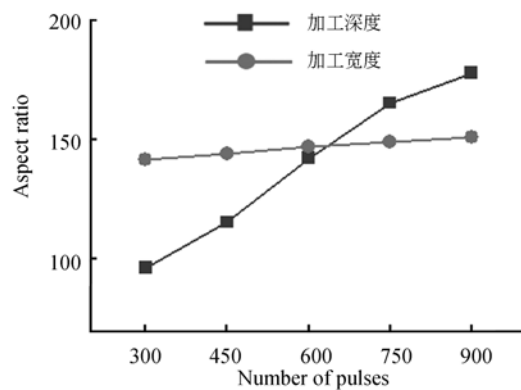


图 6 脉冲个数与加工深度、加工宽度的关系

Fig. 6 Relationship between the number of pulses and processing depth, processing width

纳秒脉冲激光电化学微细刻蚀加工中激光脉冲个数和深宽比的关系。如图 5 所示, 随着激光脉冲个数的增加, 深宽比逐渐增加, 这是因为激光脉冲次数的增加, 使得力学电化学作用对工件的刻蚀时间增多。激光冲击产生的力效应不断去除辐照区深度方向上的钝化膜, 而其它方向上的铝合金材料一直处于钝化膜的保护下没有发生电化学反应, 这样, 在力学电化学作用下, 整个刻蚀过程主要沿深度方向发展^[12-13]。采用光学轮廓仪测

量线槽的深度和宽度,每个数据为测得的至少 3 个数据的平均值。如图 6,在钝化膜的保护下,辐照区域的加工深度在增大的同时,加工线宽却不明显增加,从而实现形状精度较好、深宽比较大的激光电化学复合加工。当然,加工深宽比的提高也会受到激光聚焦位置的限制。

激光电化学微细加工系统中,力效应由激光束提供,同时圆环形工具阴极距工件 1 mm,因此在加工过程中几乎不会出现短路现象,而脉冲电解

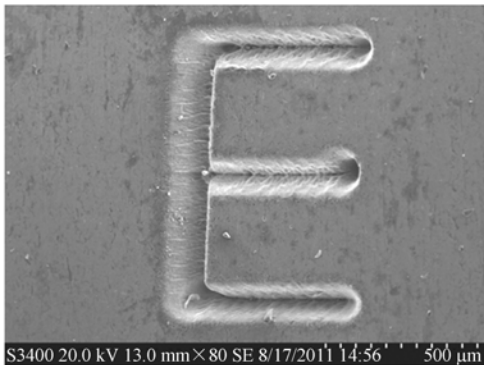


图 7 铝合金的整体形貌图

Fig. 7 Whole image of etching cavity on the surface of aluminum alloy

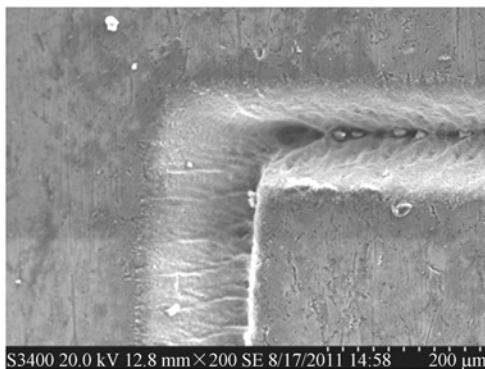


图 8 铝合金的局部形貌图

Fig. 8 Local image of etching cavity on the surface of aluminum alloy

参考文献:

- [1] PAJAK P T, DESILVA A K M, HARRISON D K, *et al.*. Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(3):288-298.
- [2] SHIN H S, PARK M S, CHU C N. Electrochemical etching using laser masking for multilayered

微细加工要求工具电极与工件的距离为微米级,在加工过程中极易发生短路现象。因此,激光电化学微细加工的稳定性的提高。

图 7 为所加工“E”的整体形貌,进给速度为 0.05 mm/s,单次进给量为 0.05 mm,逐点照射的激光脉冲个数为 300,激光的脉冲频率为 5 Hz;脉冲电源脉冲宽度为 50 ns,平均电流为 5 mA,占空比为 1:10,脉冲频率为 2 MHz。由图 7 看出,在激光的冲击作用下,光斑附近溶液层产生局部扰动加快了传质速度,以及溶液的导热作用,加工出的线条边缘无明显热影响区;加工部位的材料基本以电化学反应形式被溶解去除,因此,加工出的线条轮廓清晰,具有良好的形状精度,边棱明显;图 8 为所加工“E”的局部形貌,加工结果表明激光电化学复合加工技术具有较好的选择定域性。

5 结 论

本文构建了激光电化学微细加工的试验系统,分析了力效应对电化学的影响。以铝合金为加工对象,在 NaNO_3 溶液中进行了激光电化学复合加工试验,通过试验得出激光冲击作用下,力学电化学效应对微细刻蚀加工的主要影响;激光辐照在溶液中的工件上产生的力效应使金属表面发生变形,强化了应力集中区域的局部腐蚀,增强了力学电化学效应对材料的刻蚀效果。与脉冲电解微细加工相比,激光电化学复合加工的力效应和电化学效应分别由非实体的激光束和圆环形的工具电极提供,几乎不会出现短路现象,过程稳定性有很大的提高。采用纳秒脉冲电源和 0.5 mol/L 的 NaNO_3 溶液,使电化学刻蚀被局限在激光辐照的加工区域内,增强了加工的定域蚀除能力,最终加工出了线宽为 140 μm 左右、深宽比较大、成形精度较好的图形。

structures on stainless steel[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59:585-588.

- [3] 龙茅宏, 史铁林, 熊良才. 准分子激光电化学刻蚀金属的研究[J]. *光学技术*, 2008, 34:227-230.
- LONG Y H, SHI T L, XIONG L C. Study on excimer laser-induced electrochemical etching metal[J]. *Optical Technique*, 2008, 34:227-230. (in Chinese)
- [4] SEN M, SHAN H S. A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes[J]. *Inter-*

- national Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(2):137-152.
- [5] DE SILVA A K M, PAJAK P T, HARRISON D K, *et al.*. Modelling and experimental investigation of laser assisted jet electrochemical machining[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):179-182.
- [6] SHOR J S, ZHANG X G, OSGOOD R M. Laser-assisted photoelectrochemical etching of n-type -SiC [J]. *Journal Electrochemical Society*, 1992, 139: 1213.
- [7] 黄文浩, 朱兰芳, 陈宇航, 等. 基于原子力显微镜的 PMMA 飞秒激光纳米加工技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12):1959-1962.
HUANG W H, ZHU L F, CHENG Y H, *et al.*. AFM based femto-second laser nanofabrication of PMMA [J]. *Opt. Precision Engineering*, 2007, 15(12):1959-1962. (in Chinese)
- [8] 刘勇, 曾永彬, 朱荻, 等. 三维微细电解铣削加工的实时控制与检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 9(2): 1310-1318.
LIU Y, ZENG Y B, ZHU D, *et al.*. Real-time control and data acquisition system for 3D micro electrochemical milling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1310-1318. (in Chinese)
- [9] 胡洋洋, 朱荻, 李寒松, 等. UV-LIGA 制作超高微细阵列电极技术[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 670-676.
HU Y Y, ZHU D, LI H S, *et al.*. Fabrication of ultra-high metal micro electrode array using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Engineering*, 2010, 18(3):670-676. (in Chinese)
- [10] 许健. 脉冲激光与水下金属靶材相互作用力学效应的实验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
XU J. *Experimental study on mechanical effect of underwater workpiece with pulse laser* [D]. Nanjing, Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] ㊦. M. 古特曼. 金属力学化学与腐蚀防护[M]. 北京:科学出版社, 1989.
Gutman ㊦ M. *Mechanochemistry and Corrosion Prevection of Metals* [M]. Peking: Science Publication, 1989. (in Chinese)
- [12] KARIMZADEH R, ANVARI J Z, MANSOUR N. Nanosecond pulsed laser ablation of silicon in liquids[J]. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2009, 94(4):949-955.
- [13] GACEK S, WANG X W. Dynamics evolution of shock waves in laser-material interaction[J]. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2009, 94(3):675-690.

作者简介:



张朝阳(1973—),男,河南洛阳人,副教授,硕士生导师,2007年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事为特种加工新技术及新工艺方面的研究。E-mail: zchaoyang@126.com



李中洋(1986—),男,河南许昌人,硕士研究生,2010年于郑州轻工业学院获得学士学位,主要从事特种加工新技术及新工艺方面的研究。E-mail: lizhongyang200907@163.com



王耀民(1983—),男,河南新乡人,硕士研究生,2009年于中原工学院获得学士学位,主要从事特种加工新技术及新工艺方面的研究。E-mail: woswan-gyaomin@163.com



毛卫平(1964—),男,江苏镇江人,副教授,1995年于江苏大学获得硕士学位,主要从事液压传动与控制、激光加工技术方面的研究。E-mail: weipingmao@ujs.edu.cn