

# 基于光纤激光表面改性的不锈钢微细电解加工技术

李小海, 薛贝贝, 王淑铭, 张霞, 黄德臣, 史立秋

佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154002

**摘要** 将光纤激光表面改性技术和微细电解加工技术相结合,在不锈钢表面加工复杂微细型腔等微小零件。先利用光纤激光在 304 不锈钢表面制作掩模图案;再利用掩模的耐腐蚀性,在微细电解加工时实现微细型腔的定域加工。研制了光纤激光掩模微细电解的复合加工装置,以 304 不锈钢为试样,通过工艺对比试验,优化了系统参数。试验结果表明,使用该装置可以快速地加工典型结构的微细型腔。

**关键词** 激光技术; 电解加工; 微细加工; 掩模; 304 不锈钢

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.071404

## Electrochemical Micromachining Technology of Stainless Steel Based on Fiber Laser Surface Modification

Li Xiaohai, Xue Beibei, Wang Shuming, Zhang Xia, Huang Dechen, Shi Liqiu

College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi, Heilongjiang 154002, China

**Abstract** In order to fabricate a microcavity with a complex structure on the surface of stainless steels, the electrochemical micromachining technology based on fiber laser surface modification is adopted. First, the 304 stainless steel surface is masked with a predefined pattern by using a fiber laser. Then, by virtue of the corrosion resistance property of laser masked layers, a microcavity can be locally machined by the electrochemical etching technology. A composite machining system based on electrochemical micromachining in combination with fiber laser masking is developed. The system parameters are optimized through process comparison experiments by using 304 stainless steel as specimens. The results show that a microcavity with any typical structure can be fabricated quickly with this system.

**Key words** laser technique; electrochemical machining; micromachining; masking; 304 stainless steel

**OCIS codes** 140.3510; 310.1515; 350.3850

## 1 引言

随着科学技术的发展,金属微小零件将在未来的军事、航空航天、医疗、模具等领域起到至关重要的作用,微细加工也成为目前制造业急需解决的难题之一。特种加工在微细加工领域异军突起,其中电解加工和激光束加工是国内外学者研究较多的微细加工方法。Schuster 等<sup>[1-2]</sup>采用纳秒级超窄脉冲电流微细电解铣削技术加工微小金属零件;朱荻等<sup>[3]</sup>利用纳秒级超短脉冲电流进行微幅往复走丝微细电解线切割试验,取得了较好的研究成果;孙树峰等<sup>[4]</sup>用飞秒激光双分子聚合技术加工了高精度微齿轮。但电解加工和激光加工在微细加工领域也有各自的局限性:激光加工利用光热效应去除金属,属于热加工,加工的工件表面有热影响层且受热易变形;微细电解加工存在杂散腐蚀问题,被加工零件的形状精度和尺寸精度难以保证。现在国内外多位学者尝试将电解加工和激光加工结合起来,实现复合微细加工。张朝阳等<sup>[5]</sup>选用导电透明的氧化锡玻璃作为电解加工阴极,用光纤激光辐射去除电解加工中形成的钝化膜,然后再电解,实现了激光电解复合微细加工。Pajak 等<sup>[6]</sup>采用激光辅助加热电解液射流复合加工微小件,取得了较好的加工效果。

收稿日期: 2017-02-16; 收到修改稿日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51375208)、佳木斯大学科技创新团队项目(Cxtdpy-2016-04)

作者简介: 李小海(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事特种加工方面的研究。E-mail: li\_xh@jmsu.edu.cn

本文将激光加工与电解加工相结合,采用光纤激光对金属零件进行表面改性,形成耐腐蚀的保护性掩模,再利用微细电解技术,对非掩模区进行电解去除,快速地制造微小模具型腔等工件。

## 2 激光掩模微细电解复合加工机理

### 2.1 基本原理

通过激光表面处理技术,可以改变某些金属材料表面的抗腐蚀性能<sup>[7]</sup>。光纤激光打标机在金属表面通过加热或熔化来改变金属表面的金相组织或使金属发生氧化熔凝,从而使金属表面的颜色发生改变形成标记。利用激光表面改性技术,使高能量密度的激光束按规划路径扫描不锈钢材料的表面,生成具有一定图案的掩模层,具体过程如下。精密光纤激光器产生的激光束,经过高分辨率的三轴进给滑台、振镜、光学聚焦透镜,在工件表面产生光斑直径很小的激光焦点。控制激光焦点扫描路径,在工件表面进行激光直写,利用数控系统严格控制工件表面加热区域的尺寸和形状,制备掩模图案,如图 1(a)所示。不锈钢表面新生成的激光掩模图案具有耐腐蚀的特殊性质,实现了金属表面改性处理<sup>[8]</sup>。然后进行高频脉冲电流微细电解加工,以片状金属电极为电解阴极,生成掩模的不锈钢为电解阳极。电解时,调整片状金属电极的位置,保证与工件表面相隔一定距离,反复进行扫描。电解中,工件表面耐腐蚀掩模图案区域的金属溶解缓慢,而其他区域的金属被快速地电解去除,形成二维微细型腔,如图 1(b)、(c)所示。

一次加工出的型腔深度很浅,可以重复几次加工,增加型腔深度。多次加工时,当第一层结构加工后,可根据第二层掩模图案进行激光扫描,再电解生成第二层型腔结构,如此反复,能加工出三维立体微细结构,如图 1(d)~(f)所示。

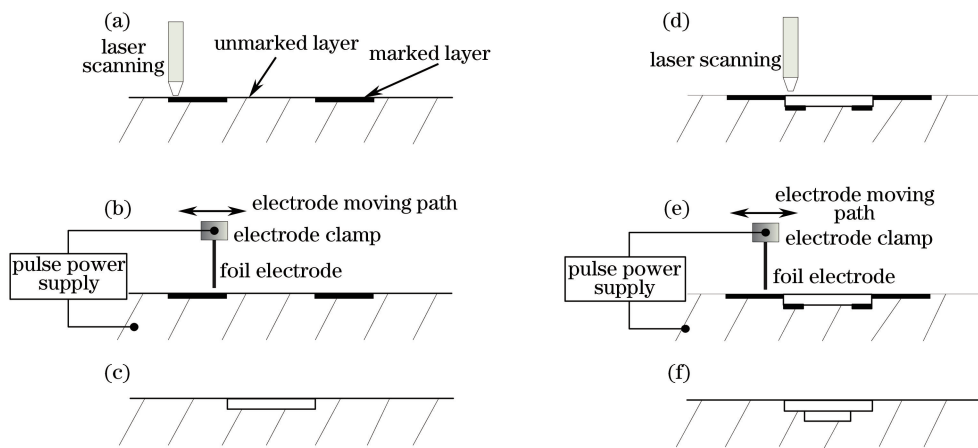


图 1 激光掩模微细电解复合加工原理。(a)激光制表面掩模;(b)电解腐蚀;(c)电解腐蚀结果;  
(d)二次激光制表面掩模;(e)二次电解腐蚀;(f)二次电解腐蚀结果

Fig. 1 Schematic diagram of composite machining principle based on electrochemical micromachining combined with laser masking. (a) Laser surface masking; (b) electrochemical etching; (c) etching result; (d) second laser masking; (e) second electrochemical etching; (f) second etching result

### 2.2 激光掩模层抗腐蚀特性机理分析

对 304 不锈钢表面进行激光制掩模处理,激光功率为 5 W,激光扫描速率为 20 mm/s,频率为 80 kHz,线间距为 10  $\mu\text{m}$ 。由于所用光纤激光为脉冲输出,功率小,其脉冲宽度仅为 100 ns,因此激光制掩模时熔化层极薄、热影响层厚度很小,生成的掩模层厚度小于 1  $\mu\text{m}$ 。对经激光制掩模和未经激光制掩模处理的 304 不锈钢表面进行 X 射线衍射(XRD)分析对比,结果如图 2 所示,其中  $2\theta$  为衍射角。由图 2 可知,经光纤激光加热扫描后的 304 不锈钢表面含有新生成的  $\text{Fe}+2\text{Cr}_2\text{O}_4$ ,其为 Fe 和 Cr 的复合氧化物,由  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  复合而成,有专门的相结构,比纯 Fe 氧化物的抗腐蚀性更强。它能阻碍电解反应,大大降低电解蚀除金属的速度,在电解中能起到保护作用。同时,激光扫描加热也会引起不锈钢金属表面发生相变,由图 2 可知,304 不锈钢表面经激光制掩模后,掩模区的奥氏体  $\gamma\text{-Fe}$  相增加,其可提高不锈钢的耐腐蚀性,有利于电解过程中掩模区金属电解溶解速度的降低。另外,脉冲式输出的光纤激光能量密度足够大,能使 304 不锈钢工件

表面金属瞬间熔化,再快速冷却、凝固,在工件表面生成熔凝金属薄层。熔凝层的金属骤热骤冷,金相组织晶粒变得细密,金属材料性能得到改善,掩模层的耐腐蚀性得到进一步增强<sup>[7]</sup>。同时,激光熔凝也能修复不锈钢表面的微裂纹等缺陷,增强工件表面的耐腐蚀性。

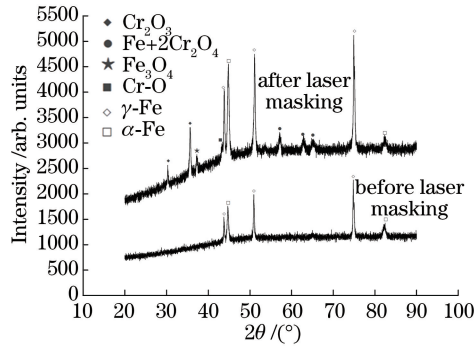


图2 304 不锈钢表面 XRD 分析

Fig. 2 XRD analysis of 304 stainless steel surface

### 3 激光掩模微细电解加工装置

按照第 2 节所述机理,研发了一套激光掩模微细电解复合加工的装置,如图 3 所示。采用德国 IPG 脉冲光纤激光器,其具有光束质量好、免维护时间长、电光转换效率高、脉冲频率高、无须水冷、运行费用低等优点<sup>[9]</sup>,工作参数如下:功率在 0~20 W 范围内可调,激光最小光斑直径为 10  $\mu\text{m}$ ,频率在 0~100 kHz 之间可调,激光波长为 1.064  $\mu\text{m}$ ,重复精度小于 2  $\mu\text{m}$ 。光学系统采用德国 SCANLAB 振镜。选取花岗岩材料作为机床床身,其具有高硬度、耐磨损、抗振性好、耐酸耐碱、无内部残余应力、热膨胀系数小等优点。选用进给分辨率为 0.4  $\mu\text{m}$  的三轴进给滑台实现 X、Y、Z 三轴进给,将光纤激光表面改性模块与微细电解加工片状电极都安装在 Z 轴上,解决激光制掩模和电解复合加工的定位问题。微细电解加工系统由微细电解加工电源、电解液循环系统组成。本设计采用微细电解加工专用的微能脉冲电源,其具有频率和占空比可调、输出特性精确稳定、短路时自保护等特性。电解电源中还设计了定位感知电路,以便电解加工时能精确控制工具电极与工件之间间隙的大小。电解液循环系统包括电解加工槽、电解液输送管道、电解液箱、喷嘴、微型耐腐蚀隔膜泵、控制阀、过滤网等,电解液为  $\text{NaNO}_3$  钝化电解液。

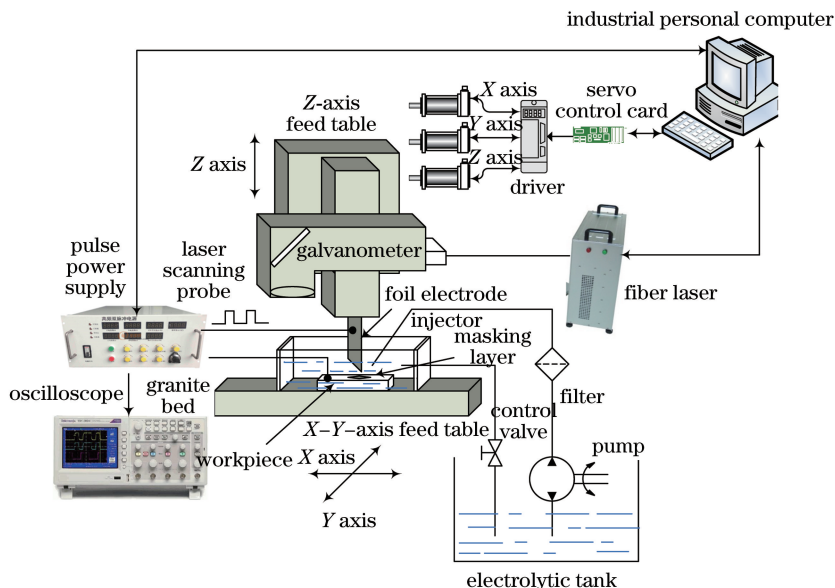


图3 光纤激光掩模微细电解复合加工装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composite machining device based on electrochemical micromachining combined with laser masking

激光制掩模时,采用光纤激光直写方式,通过激光机数控系统控制光纤激光器的扫描振镜,按预定图案来规划激光扫描路径,在不锈钢表面进行二维扫描刻蚀,产生具有耐腐蚀性的掩模图案。在微细电解加工中,不锈钢电极片被专用工具夹头夹装,并作为电解阴极。不锈钢片状电极往复扫描工件表面,控制极间距离,利用掩模图案的耐腐蚀性,工件表面(电解阳极)有选择性地被溶解,从而实现复杂微细结构的加工。

## 4 光纤激光微细电解复合加工试验和分析

### 4.1 激光制掩模

假设激光能量热源为点热源,不考虑相变和结晶潜热等因素,经典热学模型<sup>[10]</sup>为

$$T = \frac{2Q}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{3\alpha t}\right) = \frac{2fW_m t}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{3\alpha t}\right), \quad (1)$$

式中  $T$  为温度; $Q$  为热量; $\rho$  为工件密度; $\alpha$  为传热系数; $c$  为比热容; $r$  为计算温度点与热源中心的距离; $f$  为激光频率; $W_m$  为单个激光脉冲的能量; $t$  为热源作用时间,激光扫描速率越大, $t$  越短。由(1)式可知,光纤激光在金属表面直写制掩模过程中达到的温度  $T$  是由材料热学常数和激光器的功率、频率、脉冲宽度及扫描速率决定的。工控机设定加工参数,如激光扫描功率、频率、扫描路径方式、扫描速率、光斑直径等,通过工艺对比试验优化激光加工参数。如激光功率过大,激光容易过度烧蚀工件表面,且生成的掩模粗糙度值大,影响加工精度;若功率过小,掩模层过薄,电解时掩模易熔解而起不到保护作用。同时,在激光制掩模时,激光光斑能量呈正态分布,光束中心点能量密度最大;热源密度分布与高斯热源模型类似,任一点的激光热源能量密度<sup>[11]</sup>可表达为

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

式中  $q_m$  为热源中心密度最大值, $R$  为高斯热源分布的外径。激光光斑直径即为激光扫描线宽。由(2)式可知,图形填充的线宽和线间距大小设定值决定了激光掩模是否耐腐蚀。如果线宽过大,扫描线边缘处能量密度将过低;如果线间距过大,由(1)式可知,在相邻的激光扫描线间,部分不锈钢表面温度过低,不能生成掩模。因此,光纤激光制掩模时,应合理选择激光扫描的线间距,通常使激光扫描线宽部分重叠,以提高掩模的耐腐蚀性,如图4所示。

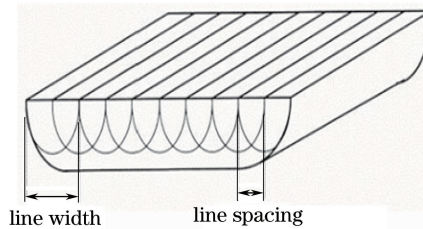


图4 激光扫描填充图案制掩模示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mask formation by laser scanning pattern

### 4.2 微细电解加工

在微细电解加工阶段,阳极加工速度  $\nu_a$  为

$$\nu_a = \eta\omega i = \eta \frac{A}{nF\rho} i, \quad (3)$$

$$i = \kappa \frac{U_R}{\Delta} = \kappa \frac{U - E}{\Delta}, \quad (4)$$

式中  $\eta$  为加工电流效率, $\rho$  为工件密度, $E$  为阴极阳极电位总和, $n$  为阳极金属的化合价, $F$  为法拉第常数, $\kappa$  为电解液导电率, $U$  为阴极阳极间的电压, $i$  为电流密度, $\Delta$  为极间距离, $\omega$  为阳极的体积电化学当量, $A$  为电极面积, $U_R$  为电解液的欧姆电压。由(3)、(4)式可知,加工速率与电流密度和电流效率成正比。微细电解中采用钝化电解液,其中  $\eta$ - $i$  曲线是非线性的,当  $i$  超过切断电流密度时  $\eta$  才大于零。电流密度的增加有利于提高金属去除速率,但当去除速度太快时,阳极表面的离子浓度太高,将出现浓度极化,阻碍电解进行,因此要保证电解液流量足够大。本装置电解液循环系统中的微型隔膜泵提供的电解液流量为 320 mL/min,能快速



冲走电解产物,使电解加工顺利进行。本装置电解工具电极为不锈钢薄片,为了不引起薄片电极的振动,电解液流动方向应与片状电极平行。采用高频脉冲电源,可利用脉冲间隔去极化、去除电解产物、散热,使加工间隙的化学特性、流场、电场恢复初始状态。另外,提高激光输出频率、减小激光扫描脉宽和降低脉冲电流的占空比有利于提高定域加工能力,结合激光掩模,可加工出形状复杂的型腔。通过工艺试验可知,当使用直流电压、脉冲电流的占空比过大、或使用的加工电压过高时,所生成的掩模图案在电解过程中都会熔解,无法实现微细加工。优化后激光制掩模的加工参数见表 1,微细电解加工参数见表 2。

表 1 激光制掩模的加工参数

Table 1 Parameters of laser masking

Parameter	Value
Average power /W	5.1
Frequency /kHz	80
Laser scanning speed /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	20
Spot diameter / $\mu\text{m}$	50
Line spacing / $\mu\text{m}$	10

表 2 微细电解的加工参数

Table 2 Parameters of electrochemical micromachining

Parameter	Value
Pulse width / $\mu\text{s}$	50
Pulse interval / $\mu\text{s}$	750
Machining voltage /V	9.5
Concentration of $\text{NaNO}_3$ electrolyte /( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	1.80
Interelectrode gap / $\mu\text{m}$	220
Scanning speed of foil electrode /( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	200

一次掩模复合电解加工的型腔深度小,可重复多次加工,加工后的型腔深度能显著提高。按表 1,2 加工参数,每次加工后的型腔深度如图 5 所示。图 6 所示为经 4 次掩模微细电解加工后的实物样件,型腔深度约为  $30\ \mu\text{m}$ ,非掩模区金属经电解形成的型腔表面光滑、无热影响层,粗糙度值小于  $0.5\ \mu\text{m}$ 。每次制掩模后,片状电极在工件表面上方往复扫描电解两次,再进行下一次激光制掩模。无需制作微细成型电极,并可在不锈钢工件表面同时制作多个掩模图案,一次电解加工多个复杂型腔,大大提高了加工微细型腔零件的效率。

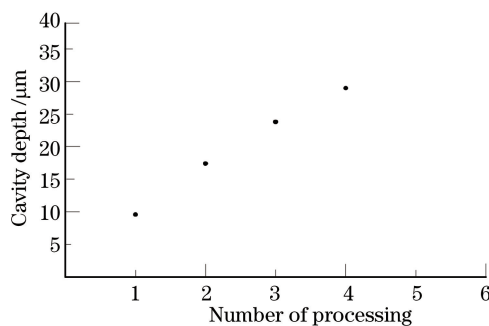


图 5 加工次数与型腔深度的关系

Fig. 5 Relationship between number of processing and cavity depth

## 5 结 论

研究了激光掩模微细电解复合加工的机理,构建了一套基于光纤激光表面改性的不锈钢微细电解加工系统,并以 304 不锈钢为试样进行了加工试验,试验和分析结果如下。

1) 选取合适的光纤激光器参数,对不锈钢 304 工件表面进行激光制掩模,能生成氧化铬、氧化铁等氧化物掩模层,其能够在微细电解中起到减缓工件表面腐蚀的作用。

2) 本装置在进行微细电解加工时,无需光刻技术,利用激光直写生成掩模图案,实现定域加工。可以在

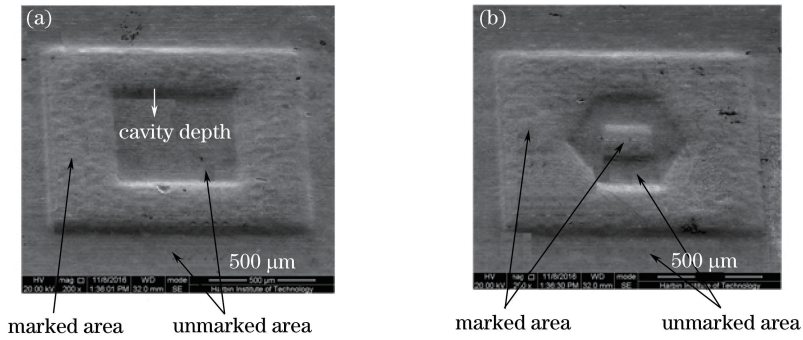


图 6 典型样件。(a)方形型腔;(b)六边形型腔

Fig. 6 Typical samples. (a) Square cavity; (b) hexagonal cavity

同一不锈钢表面同时绘制不同复杂图案,通过多次激光制掩模-微细电解过程,实现快速制作多个不同型腔的微细零件,提高加工效率。

### 参 考 文 献

- [1] Trimmer A L, Hudson J L, Kock M, *et al.* Single-step electrochemical machining of complex nanostructures with ultrashort voltage pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3327-3329.
- [2] Kock M, Kirchner V, Schuster R. Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses versatile method with lithographical precision[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48(20-22): 3213-3219.
- [3] Yu Qia, Zhu Di, Zeng Yongbin, *et al.* Wire electrode micro-electrochemical machining with tool micro-amplitude reciprocating motion[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2012, 33(5): 920-927.  
于 洽, 朱 荻, 曾永彬, 等. 微幅往复走丝微细电解线切割试验研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(5): 920-927.
- [4] Sun Shufeng, Wang Pingping, Xue Wei. Fabrication technique research on micro gear based on two-photon of femtosecond laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(23): 193-198.  
孙树峰, 王萍萍, 薛 伟. 基于飞秒激光双光子的微齿轮加工技术研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(23): 193-198.
- [5] Zhang Chaoyang, Feng Qinyu, Zhou Jianzhong, *et al.* Analysis of laser thermal-mechanical effect on morphology of electrochemical etching on various materials[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0502002.  
张朝阳, 冯钦玉, 周建忠, 等. 激光热力效应对不同材料电化学刻蚀形貌的作用研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502002.
- [6] 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.
- [7] Bai Xinde, Xu Jian, Fan Yudian. Applications of laser surface processing for improving corrosion resistance[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1998, 38(12): 65-68.  
白新德, 徐 健, 范毓殿. 激光表面处理技术在改善材料抗腐蚀性能上的应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, 38(12): 65-68.
- [8] Styer P, Valette S, Forest B, *et al.* Surface modification of martensitic stainless steel by laser marking and its consequences regarding corrosion resistance[J]. *Surface Engineering*, 2006, 22(3): 167-172.
- [9] Kwon Y, Park K, Lee D, *et al.* Current status and prospects of high-power fiber laser technology[J]. *Korean Journal of Optics and Photonics*, 2016, 27(1): 1-17.
- [10] Zhang Ping, Ma Lin, Zhao Junjun, *et al.* The heat source model of the numerical simulation in the laser cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2006, 19(z1): 161-164.  
张 平, 马 琳, 赵军军, 等. 激光熔覆数值模拟过程中的热源模型[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(z1): 161-164.
- [11] Zhang Jian, Li Jianyun, Zhao Longzhi, *et al.* Current status of numerical simulation of laser surface technology[J]. *Foundry Technology*, 2013, 34(4): 423-425.  
张 坚, 李建云, 赵龙志, 等. 激光表面技术数值模拟研究现状[J]. *铸造技术*, 2013, 34(4): 423-425.