

# 多点激光微喷丸强化纯铜表面形貌研究

樊玉杰 周建忠 黄舒 朱伟 徐增闯 范金荣 高彬

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 为了研究多点激光微喷丸对表面形貌的影响,采用实验方法测试了激光微喷丸处理后纯铜材料的表面形貌,对不同工艺参数条件下的处理表面进行了分析,给出了合理的表征方式,探讨了主要工艺参数对表面形貌的影响规律。结果表明,激光微喷丸后表面粗糙度增加;激光脉冲能量和搭接率是影响表面轮廓以及轮廓支承长度率的主要因素;通过对多点激光微喷丸强化纯铜表面形貌的分析和合理表征,为工艺参数的选择和表面质量的有效控制提供理论指导。

**关键词** 激光技术;表面形貌;表面轮廓;支承长度率

**中图分类号** TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s103004

## Research on Surface Profile of Copper Treated by Multi-Micro Laser Shock Peening

Fan Yujie Zhou Jianzhong Huang Shu Zhu Wei Xu Zengchuang Fan Jinrong Gao Bin

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

**Abstract** In order to investigate the effect of multi-micro laser shock peening on surface morphology, experiments are adopted to analyze the surface profile of copper under different processing conditions. Based on the experimental and theoretical analysis, a reasonable characteristic method is presented, and influence rule of main processing parameters is also explored. The results show that surface roughness increases after laser shock peening, laser pulse energy and overlapping rate are the main influence factors on surface profile and bearing length ratio. With reasonable characterization of surface morphology, good guidance for further control of surface profile and optimal parameters of microscale laser shock peening are provided.

**Key words** laser technique; surface profile; surface profile; bearing length ratio

**OCIS codes** 140.3440; 140.3538; 320.5520

## 1 引言

仪表类零件多为薄小零件,如照相机的快门零件,常要求零件的某一特定微小部位具有高硬度、高耐磨性,而其余部位须保留原有塑性,因此对表面处理质量有较高的要求<sup>[1]</sup>。激光微喷丸技术<sup>[2,3]</sup>由于自身技术特点,能够在微器件表层或局部产生适度残余应力分布,增加受喷区域的硬度及弹性模量,大幅改善微构件的力学性能,进而提高其耐磨性、耐腐

性和疲劳寿命,因而已逐渐成为面向微小构件表面改性延寿的革新工艺,得到了国内外诸多学者的关注和研究。铜由于其力学和电学性能是金属微小构件中最常用的材料,2002年起,美国哥伦比亚大学的学者<sup>[4~7]</sup>对纯铜材料进行了激光微喷丸实验,研究了单点激光微喷丸诱导产生的塑性变形、残余应力场等。

但是,要实现金属微构件的表面或局部激光微

**收稿日期**: 2011-07-20; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175236),教育部博士点基金项目(200802990004),江苏省高校自然科学基金重大项目(08KJA460002),江苏省自然科学基金(BK2009219),江苏大学校科研项目基金资助项目(CX08B\_06x)和江苏高校优秀学科建设工程资助课题(2010)。

**作者简介**: 樊玉杰(1979—),女,博士研究生,主要从事激光冲击方面的研究。E-mail: fanyujie@tom.com

**导师简介**: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造和表面改性延寿技术等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn(通信联系人)

喷丸强化处理,必须采用微小光斑搭接覆盖待处理表面的方法。而工艺过程中产生的塑性变形在微米量级,与表面粗糙度相当,对喷丸后表面形貌的影响很大,而目前还没有文献涉及多点搭接下激光微喷丸前后表面质量的研究。表面质量影响零件的耐磨性、强度、抗腐蚀性、配合性质的稳定性。因此,在保证零件表面力学性能的同时,对处理表面的形貌也应该进行控制。

本文采用实验的方法,探讨激光能量、搭接率等主要工艺参数对表面形貌的影响规律,并给出表面形貌的合理表征方式,为激光微喷丸强化工艺过程中表面质量控制的研究提供指导。

## 2 多点激光微喷丸后表面形貌的表征

多点激光微喷丸强化处理后,零件耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命提高的同时,在处理表面产生规则的微凹坑塑性变形。在金属表面,微观应力的分布与其微观形貌紧密相关。材料表面缺陷处的局部微、纳观应力和应变集中是裂纹萌生、发展以致破坏的极为重要的因素<sup>[8]</sup>。因此,在评价多点激光微喷丸处理表面状态时,不能仅考虑表面粗糙度的改变,更应当综合分析各表征参数的变化。

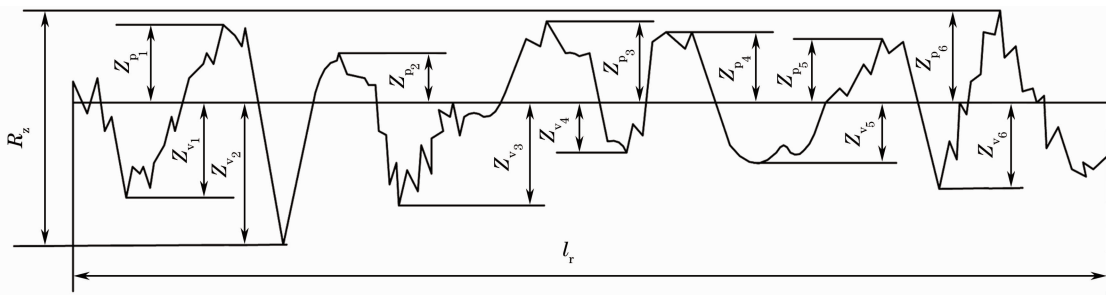


图 2 表面轮廓参数

Fig. 2 Surface profile parameters

轮廓的支承长度率  $R_{m-r}(c)$  与表面轮廓形状有关,是反映表面耐磨性能的指标。其表示在给定水平位置  $c$  上轮廓的实体材料长度  $l_M(c)$  与评定长度  $l_n$  的比率

$$R_{m-r}(c) = \frac{l_M(c)}{l_n}. \quad (3)$$

## 3 实 验

### 3.1 激光微喷丸强化实验

实验所采用 Spilight 2000 型 Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 1064 nm,脉宽 8 ns,有效光斑直径为 800  $\mu\text{m}$ ,实验所用材料为厚度 0.125 mm 和 0.5 mm

轮廓的算术平均偏差  $R_a$  是最完整、最全面地表征了零件表面的轮廓特征。在一个取样长度内,轮廓上各点到中线纵坐标绝对值的算术平均值,如图 1 所示。

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx. \quad (1)$$

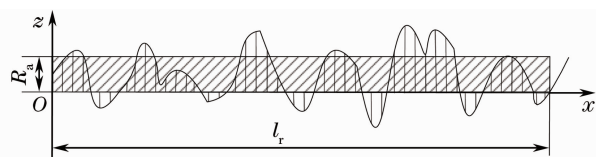


图 1 轮廓算术平均偏差

Fig. 1 Arithmetic average error of profile

然而表面粗糙度参数并不能准确描述表面的物理特性<sup>[9]</sup>,当分析多点激光微喷丸处理表面状态对疲劳性能的影响时,仅靠测量表面粗糙度参数进行分析经常无法提供可靠的结果,需要充分考虑表面微观形貌的影响<sup>[10]</sup>。

$R_z$  是反映最大高度的参数,对疲劳强度来说,表面只要有较深的痕迹,就容易产生疲劳裂纹而导致损坏。 $R_z$  表示在一个取样长度内,最大轮廓峰高  $Z_p$  和最大轮廓谷深  $Z_v$  之和,如图 2 所示。

$$R_z = Z_p + Z_v = \max\{Z_{p_i}\} + \max\{Z_{v_i}\}. \quad (2)$$

的纯铜薄板。为了探讨工艺参数对变形结果的影响,选用了不同的激光能量 515、675、835 mJ,不同搭接率 50%、62.5%、75% 进行多点激光微喷丸强化实验。喷丸轨迹如图 3 所示,其中  $\eta$  表示搭接率,  $a, b, c, d$  表示轨迹方向,喷丸区域为 10 mm  $\times$  8 mm。图 4 为放大 50 倍的多点激光微喷丸强化后试样表面形貌。

### 3.2 表面粗糙度测量

采用 Taylor Hobson Surtronic3t 粗糙度测量仪,评价长度为 1.25 mm,取样长度为 0.25 mm。测量方向平行于连续扫描方向,如图 3 所示的 X 方向。

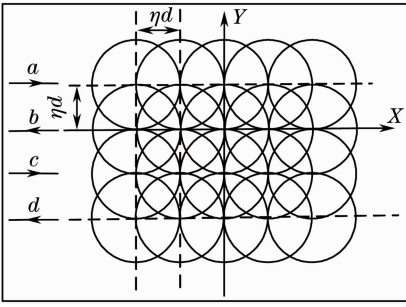


图 3 激光微喷丸轨迹

Fig. 3 Trace of multi-micro laser shock peening

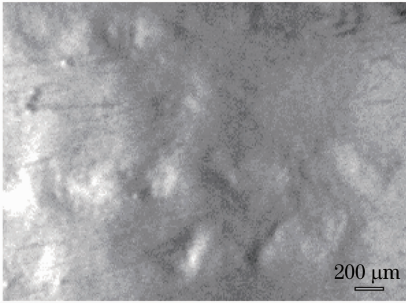


图 4 多点激光微喷丸强化后试样表面形貌

Fig. 4 Surface morphological image after multi-micro laser shock peening

### 3.3 表面轮廓测量

采用 VEECO WYKO NT1100 型非接触式光学轮廓仪对激光微喷丸强化纯铜表面进行表面轮廓测量,图 5(a)为表面三维形貌图,选取过光斑中心的 X 和 Y 方向的表面变形为表面特征轮廓。图 5(b)和 (c)分别为 X 方向的径向轮廓和 Y 方向的径向轮廓。

## 4 讨 论

### 4.1 多点激光微喷丸对粗糙度的影响

表 1 为厚度 0.125 mm 的试样,激光能量为 675 mJ,搭接率为 62.5%条件下的粗糙度值。从表中可以看出,多点激光微喷丸后表面粗糙度明显增大。受喷区域粗糙度的增加是单点激光微喷丸表面塑性变形引起的。图 6 为激光微喷丸获得的典型微凹坑阵列及其 3D 轮廓图<sup>[11]</sup>。从图中可以看出,光斑中心区域产生凹坑特征,而光斑边缘附近会引起材料凸起,产生堆积,从而增加了表面形貌的不平度。

表 1 多点搭接下喷丸前后试样的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness before and after multi-micro laser shock peening

Measurement times	1	2	3
Substrate / $\mu\text{m}$	0.06	0.08	0.10
Shock region / $\mu\text{m}$	0.12	0.14	0.14

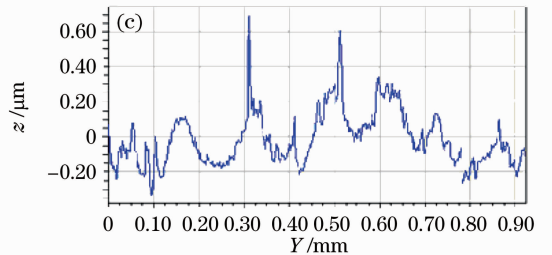
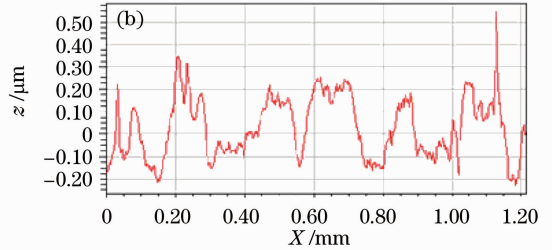
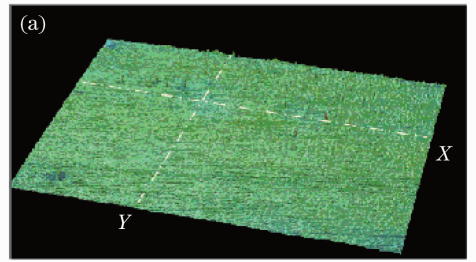


图 5 典型纯铜多点激光微喷丸区表面形貌。(a)三维形貌图;(b) X 方向径向轮廓;(c) Y 方向径向轮廓图  
Fig. 5 Typical surface profile after multi-micro laser shock peening of copper. (a) 3D morphological image; (b) radial profile along X direction; (c) radial profile along Y direction

车志刚等<sup>[12]</sup>对激光微喷丸强化后的铝块试样进行了研磨实验,证实经强化后试样表面耐磨性明显提高。在磨损减薄初期,由于表面粗糙度较大,磨损的厚度较大,但是第 3 次研磨量最小,表明试样的耐磨性最强,并沿深度方向逐渐减小。摩擦学和仿生学相关研究和实践表明,表面并非越光滑则越耐磨,具有一定非光滑形态的表面反而具有更好的耐磨性能。在摩擦过程中,凹坑面造型能够使表面摩擦系数很快趋于稳定,使表面的接触疲劳强度得到明显提高;微凹坑可以吸收两种材料对磨产生的氧化磨损颗粒,提高摩擦副的使用寿命,延缓疲劳失效。

### 4.2 工艺参数对表面轮廓的影响

#### 4.2.1 搭接率对表面轮廓的影响

图 7 是激光能量为 875 mJ,不同搭接率下的表面变形分布曲线。从图中可以看出,搭接率对受喷表面变形的  $R_z$  和波距都有着很大的影响。当搭接率为 50%时,波距约为 400  $\mu\text{m}$ ,  $R_z = 1.1 \mu\text{m}$ 。当搭接率增加到 62.5%,波距约为 300  $\mu\text{m}$ ,  $R_z = 0.8 \mu\text{m}$ 。当搭接率增加到 75%,波距约为 200  $\mu\text{m}$ ,

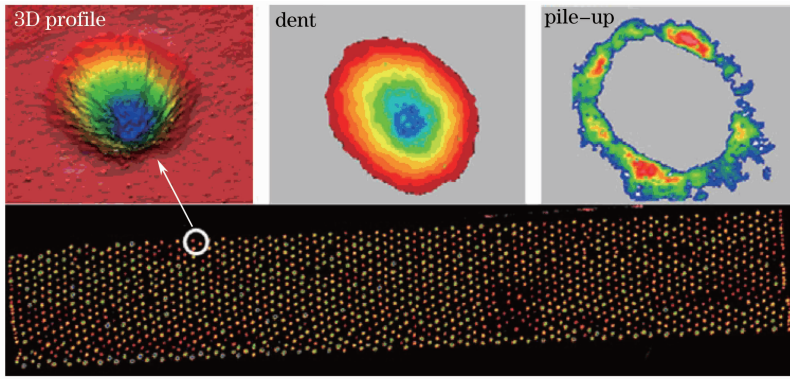


图 6 凹坑阵列和单个凹坑的 3D 形貌

Fig. 6 3D topographs of the dent array and individual dent

$R_z=0.6 \mu\text{m}$ 。随着搭接率的增加,表面轮廓幅值减小,这是单点塑性变形相互作用的结果。图 8 为不同搭接率下多点激光微喷丸塑性变形示意图。从图中可以看出,后面的喷丸变形区域受到前面塑性变形的影响。当搭接率为 50%、62.5%、75%时,塑性变形轮廓线分别为  $AO'D$ 、 $AO'C$  和  $AOB$ 。而  $AO'D$ 、 $AO'C$  和  $AOB$  的轮廓幅值和波距都呈减小的趋势。

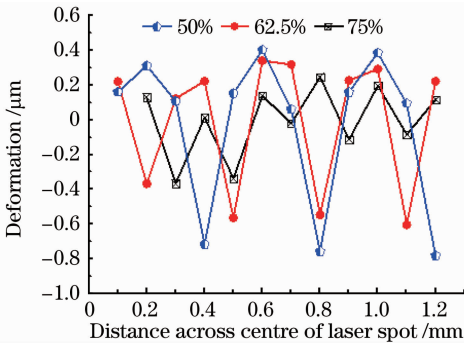


图 7 不同搭接率下的表面变形分布曲线(激光能量 875 mJ,光斑直径  $800 \mu\text{m}$ ,板料厚度 0.5 mm)

Fig. 7 Surface deformation distribution curve under different overlapping rates ( $E=875 \text{ mJ}$ ,  $d=800 \mu\text{m}$ , sheet thickness 0.5 mm)

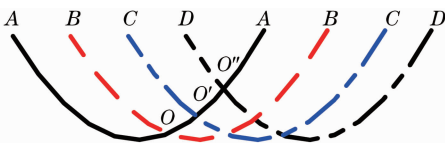


图 8 不同搭接率下多点激光微喷丸塑性变形示意图

Fig. 8 Plastic deformation schematic of multi-micro laser shock peening under different overlapping rate

#### 4.2.2 激光能量对表面轮廓的影响

图 9 为不同激光能量下受喷表面的变形曲线。当激光能量为 515 mJ 时,表面变形比较规律, $R_z=0.18 \mu\text{m}$ 。当能量增加到 675 mJ 时,表面变形波度

增大, $R_z=0.2 \mu\text{m}$ 。当能量增加到 835 mJ 时,表面变形幅值最大, $R_z=0.55 \mu\text{m}$ 。可以看出,随着能量的增加,塑性变形幅值呈增加的趋势。其根本原因是塑性变形对功率密度较敏感(光斑直径一定时,即激光能量),变形幅度随着功率密度的增加而增大<sup>[13]</sup>。图 10 为不同能量下的多点激光微喷丸塑性变形示意图。在相同的搭接率下,能量为 515、675 和 835 mJ 的情况下,表面变形曲线分别为  $OA_1A_2A_3$ 、 $OB_1B_2B_3$  和  $OC_1C_2C_3$ 。同时,由于单点喷丸诱导的塑性变形情况与激光功率密度的分布有直接的关系,因此激光功率密度的分布对多点强化后的表面形貌也有直接的影响。

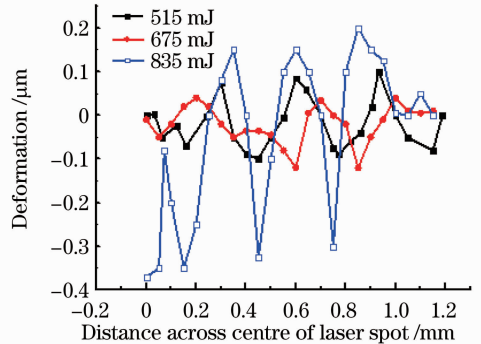


图 9 不同能量下试样表面变形的分布曲线(搭接率 62.5%,光斑直径  $800 \mu\text{m}$ ,板料厚度 0.5 mm)

Fig. 9 Surface deformation distribution curve under different laser pulse energies ( $\eta=62.5\%$ ,  $d=800 \mu\text{m}$ , sheet thickness 0.5 mm)

### 4.3 工艺参数对轮廓的支承长度率的影响

#### 4.3.1 激光能量对轮廓的支承长度率的影响

图 11 为不同激光能量下表面粗糙度的形状。由图可见,在给定水平位置  $U$  时,当激光能量为 515、675 和 835 mJ 时,实体材料的长度分别为  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  ( $b_1 > b_2 > b_3$ ),可以看出随着能量的增加,实体材料长度呈减少的趋势。事实上,激光微喷丸强

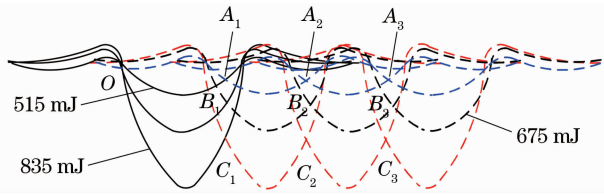


图 10 不同能量下多点激光微喷丸塑性变形示意图  
Fig. 10 Plastic deformation schematic of multi-micro laser shock peening under different energies

化后表面耐磨性能是增强的, 仅仅是减磨初期表面耐磨性能下降, 可以说明, 在减磨初期, 随着激光能量的增加受喷表面的耐磨性能减小。

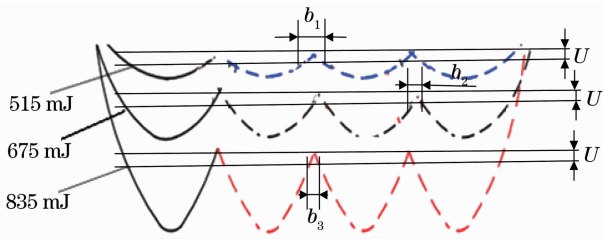


图 11 不同激光能量下表面粗糙度的形状  
Fig. 11 Shape of surface roughness under different laser energies

#### 4.3.2 搭接率对轮廓的支承长度率的影响

图 12 为不同搭接率下表面粗糙度的形状。在给定水平位置  $U$ , 评定长度  $l_n$  时, 当搭接率为 50%、62.5% 和 75% 时, 实体材料的长度分别为  $3b_1$ 、 $5b_2$ 、 $10b_3$  ( $3b_1 < 5b_2 < 10b_3$ ), 可以看出随着搭接率的增加, 实体材料长度呈增加的趋势, 所以, 其表面耐磨性能增强。

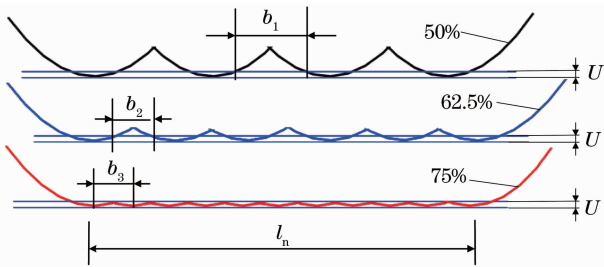


图 12 不同搭接率下表面粗糙度的形状  
Fig. 12 Shape of surface roughness under different overlapping rates

## 5 结 论

通过多点激光微喷丸强化纯铜的实验研究, 探讨了激光微喷丸工艺对纯铜表面形貌的影响, 证实粗糙度、表面轮廓和轮廓的支承长度率是多点激光微喷丸强化表面形貌的有效表征方式, 并得到如下结论:

- 1) 多点激光微喷丸强化后表面粗糙度增加, 但是材料的耐磨性能增强;
- 2) 激光脉冲能量和搭接率是影响表面轮廓的主要因素。其中, 搭接率对表面轮廓的影响最大, 不仅影响轮廓的幅值, 而且影响轮廓的波距;
- 3) 激光脉冲能量和喷丸搭接率对零件耐磨性能有较大影响。在减磨初期, 随着激光能量增加, 耐磨性能减小; 而随着搭接率增加, 耐磨性能增强。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Zutao, Xiao Min, Pu Wanlin *et al.*. The selective laser hardening of thin, small parts[J]. *Heat Treatment of Metals*, 1986, (10): 15~19  
陈祖涛, 肖敏, 蒲万林等. 薄小零件的选择性局部激光淬火[J]. *金属热处理*, 1986, (10): 15~19
- 2 Zhou Jianzhong, Fan Yujie, Huang Shu *et al.*. Research and prospect on micro-scale laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601003  
周建忠, 樊玉杰, 黄舒等. 激光微喷丸强化技术的研究与展望[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601003
- 3 Fan Yujie, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Research on mechanical response of copper treated by micro laser shock peening using nanoindentation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603026  
樊玉杰, 周建忠, 黄舒等. 激光微喷丸强化纯铜表面的纳米压痕分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603026
- 4 Hongqiang Chen, Y. Lawrence Yao, Jeffrey W. Kysar. Spatially resolved characterization of residual stress induced by micro scale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(2): 226~236
- 5 W. Zhang, Y. L. Yao. Feasibility study of inducing desirable residual stress distribution in laser micromachining [J]. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 2001, **29**: 413~420
- 6 Wenwu Zhang, Y. Lawrence Yao, I. C. Noyan. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(1): 18~24
- 7 Zhang Wenwu, Yao Y. Lawrence. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2002, **124**(2): 369~378
- 8 Gao Y. X., Yi J. Z., Lee P. D. *et al.*. A micro-cell model of the effect of microstructure and defects on fatigue resistance in cast aluminum alloys [J]. *Acta Mater.*, 2004, **52** (19): 5435~5449
- 9 Machinability Data Center, Metcut Research Associates. *Machining Data Handbook* [M]. Cincinnati: Metcut Research Associates, 1972
- 10 Arola D., Williams C. L.. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces[J]. *Int. J. Fatigue*, 2002, **24**(9): 923~930
- 11 Y. B. Guo, R. Caslaru. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti-6Al-4V surfaces [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, **211**(4): 729~736
- 12 Che Zhigang, Xiong Liangcai, Shi Tielin *et al.*. Experimental analysis of microscale laser shock processing on metallic material using excimer laser[J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2009, **25**(6): 829~834
- 13 Zhigang Che, Liangcai Xiong, Tielin Shi *et al.*. FEM calculation of microscale laser shock processing on MEMS material with excimer laser [J]. *International Conference on Advanced Design and Manufacture*, 2008. 785~792