

文章编号: 0258-7025(2010)06-1631-05

激光弯曲陶瓷片的数值模拟

胡玲玲 周建忠 杨小东 黄舒

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 基于有限元软件 ABAQUS 建立了激光弯曲陶瓷基片的三维分析模型, 对激光弯曲成形 Al_2O_3 陶瓷片进行了数值模拟; 分析了激光弯曲陶瓷片的成形机理, 研究了激光扫描过程中温度场、应力应变场和位移场的变化情况; 对不同厚度试样的模拟结果进行对比, 研究试样厚度对激光弯曲成形过程中的各场变量的变化, 随着试样厚度的增加下表面温度可能达不到陶瓷材料的塑性转变点, 残余拉应力水平明显增加。根据温度场和应力应变场的分析, 得出最佳试样厚度范围为 0.18~0.31 mm。

关键词 激光技术; 激光弯曲; Al_2O_3 陶瓷片; 数值模拟

中图分类号 TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1631

Numerical Simulation of Laser Bending of Al_2O_3 Ceramic Slice

Hu Lingling Zhou Jianzhong Yang Xiaodong Huang Shu

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

Abstract A 3D thermal-mechanical finite element model for laser bending of Al_2O_3 ceramic slice is established with the ABAQUS code. Based on the fields of temperature, stress-strain and displacement from the simulation, the forming mechanism of laser bending of ceramic slice is investigated. The simulated results of different thicknesses are compared with each other, as well as the influence of specimen thickness on the fields of temperature, strain-stress and displacement. It is observed that as the thickness increased, the temperature on the bottom surface may not reach the plastic-turning temperature and the magnitude of the surface residual stress may increase. Through the analysis, it is found that the optimum thickness is between 0.18 mm and 0.31 mm under the specified processing parameters.

Key words laser technique; laser bending; Al_2O_3 ceramic; numerical simulation

1 引言

激光弯曲成形是一种利用高能激光束扫描工件表面, 通过形成非均匀温度场来实现塑性变形的成形方法^[1]。目前, 国内外学者对激光弯曲金属进行了广泛的实验和数值模拟研究^[2~4], 并成功应用于船体建造、光学元件曲率矫正和快速成形等方面; 而对于激光弯曲陶瓷的研究报道还相对较少。陶瓷材料具有高强度、高硬度、耐腐蚀等优点, 使其在微电子、生物工程等诸多领域得到了广泛应用^[5]。而陶瓷又属于典型的硬脆性难加工材料, 其精确成形和校形引起国内外学者的广泛关注^[6,7]。目前, 已有

学者开展了利用激光和材料相互作用产生的热应力弯曲陶瓷片的实验研究^[8~10]。但由于其热敏感性使得陶瓷在加工过程中极易产生脆性裂纹, 因此研究激光扫描陶瓷片的成形机理以及如何控制微观裂纹的产生成为该领域的研究热点。

本文利用有限元软件 ABAQUS 对激光弯曲陶瓷片进行数值模拟, 分析激光扫描后的温度场、应力应变场和位移场的变化规律, 分析陶瓷激光弯曲的成形机理, 对比了不同厚度陶瓷片的模拟结果, 分析厚度对各场量的影响规律, 为实验中控制和选择陶瓷片厚度提供一定的参考。

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-12-08

基金项目: 江苏省 2008“青蓝工程”项目资助课题。

作者简介: 胡玲玲(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工及应用等方面的研究。E-mail: skyhull520@126.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技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

2 数值模拟方法

2.1 有限元模型

模拟试样选用 Al_2O_3 陶瓷片, 试样尺寸为 $10\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$, 几何模型如图 1 所示。试样一端固定, 一端自由悬空。为保证试样有足够的冷却时间, 扫描路径超过试样边缘 5 mm 。选择瞬态完全热力耦合分析模块来有效模拟激光弯曲陶瓷片的过程, 为减少计算成本和提高计算效率, 对激光扫描区域进行网格细化, 如图 2 所示。最小单元尺寸达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。

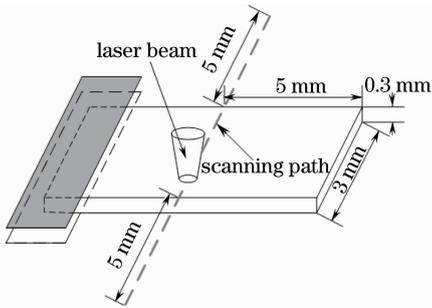


图 1 激光扫描加工示意图

Fig. 1 Schematic of laser forming

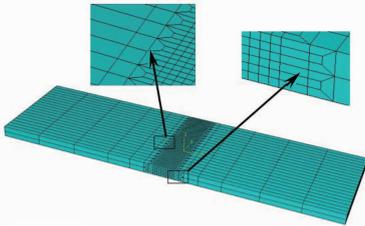


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.2 激光参数及移动热源

模拟参数设置为: 激光波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$, 激光功率为 28 W , 光斑直径为 0.3 mm , 扫描速度为 80 mm/min , 扫描次数为 1 次, 扫描路径如图 1 所示。

激光能量符合高斯分布, 对试样表面进行扫描加热处理, 因而可以将其视为面载荷热源。利用用户子程序 DFLUX 编制移动高斯热源加载, 激光热源的热通量密度表示为

$$I = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left\{-\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{R^2}\right\}, \quad (1)$$

式中 A 为材料对激光的吸收系数, 取 0.85 , P 为激光功率, R 为光斑半径, (x_0, y_0) 为某一时刻光源中心的平面坐标; (x, y) 为光斑内任一点的平面坐标。

2.3 初始与边界条件的设置

板料经激光扫描后在空气中的冷却方式有对流换热和辐射换热, 符合热力学中的第三类边界条件。模拟中采用等效总换热系数 β 来表征模型的换热方式, 公式表示为

$$q_h = \beta(T - T_0), \quad (2)$$

式中 T_0 为初始环境温度, 取为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。 T 为板料表面温度。总换热系数 β , 包括对流换热系数 h 与等效辐射换热系数 h_r 。与环境之间的对流换热系数一般取为 $20\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。与环境之间的辐射换热系数, 根据辐射定律, 可以转化成标准形式

$$h_r = \sigma \epsilon (T + T_0)(T^2 + T_0^2), \quad (3)$$

式中 σ 为玻尔兹曼常数, 取 $5.67 \times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, ϵ 为材料的热辐射率, 取 0.8 。由 (3) 式可知, 等效辐射换热系数与板料表面温度有关, 根据 (3) 式可以建立等效辐射边界条件随温度变化情况, 如图 3 所示。

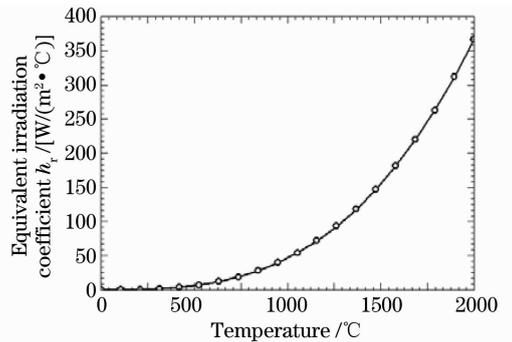


图 3 等效辐射换热系数与温度的关系

Fig. 3 Relationship between equivalent irradiation exchange coefficient and temperature

3 结果与讨论

3.1 温度场

图 4 为激光扫描加热过程中试样上表面的温度分布云图。可以看出, 整个扫描过程中, 上表面温度远高于陶瓷材料的塑性转变点。光源刚进入试样时, 扫描区域温度迅速上升到 $1170\text{ }^\circ\text{C}$; 在整个扫描过程中, 峰值温度稳定在 $1800\text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 当光源移出试样表面时, 瞬时温度上升至 $1932\text{ }^\circ\text{C}$ 。相对于激光扫描加热金属材料的模拟结果而言, 激光扫描陶瓷片过程中温度场的“长尾”现象不太明显, 主要是因为陶瓷片的导热系数相对较低, 而且尺寸效应和非稳态散热导致高温状态下试样的散热效果明显提高。

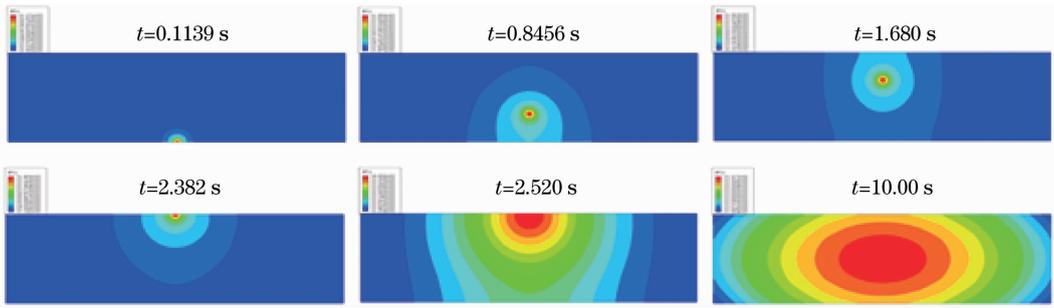


图 4 上表面温度分布云图

Fig. 4 Contours of temperature distribution on the top surface

图 5 为不同时刻温度沿扫描路径的分布曲线。可以发现激光扫描过程中的温度分布符合近高斯分布曲线,这与激光能量分布形式相吻合。在整个扫描过程中,峰值温度相对稳定(约为 1800 °C)。当光斑移出试样上边缘时,升温现象明显,峰值温度达到了 1932 °C,主要是由边缘效应引起的。

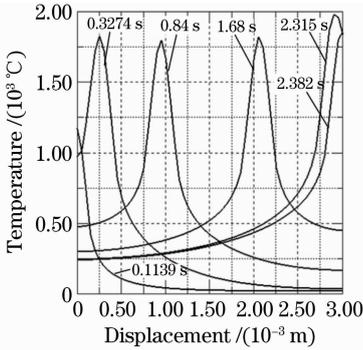


图 5 扫描路径上的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along scanning path

图 6 为试样中心处厚度方向上中下三点的温度循环曲线。可以看出,厚度方向上存在着明显的温度梯度,上下表面温差高达 1000 °C,而且大部分材料的峰值温度超过了陶瓷材料的塑性转变点,三点的温度曲线的变化趋势一致,有效加热温度持续了近 0.3 s。

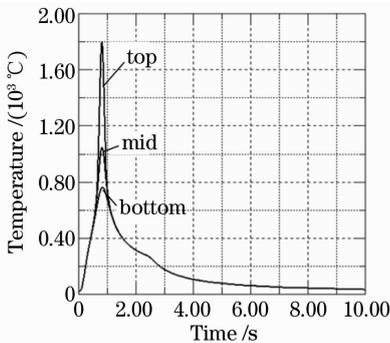


图 6 中心点温度随时间的变化

Fig. 6 Distribution of temperature with time of the midpoint

3.2 应力应变场

图 7 为试样中心处厚度方向上中下三点的塑性应变分量 P_{11} (x 轴方向的法向应变分量) 随时间的变化曲线。可以看出,当光斑未到达中心处时,该处材料处于完全脆性状态,三点塑性应变 P_{11} 为零;当光斑到达中心点时,上、中点处材料受热膨胀,并产生压缩塑性变形,上、中点的塑性应变分量 P_{11} 分别为 -0.0133 和 -0.0024 ,下点温度未达到塑性转变点,塑性应变分量 P_{11} 为零;当光源移过中心处时,温度迅速下降至塑变点以下而回到脆性状态,各点的塑性应变 P_{11} 保持不变。

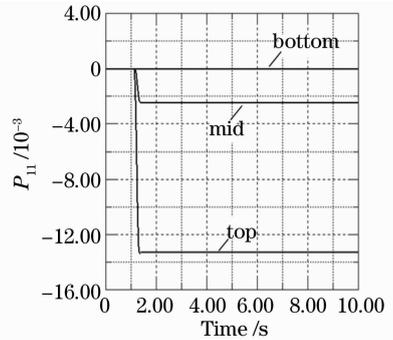


图 7 中心点塑性应变随时间的变化

Fig. 7 Distribution of plastic strain with time of the midpoint

图 8 为试样中心处厚度方向上中下三点应力分量 S_{11} (x 轴方向的法向应力分量) 随时间的变化曲线。

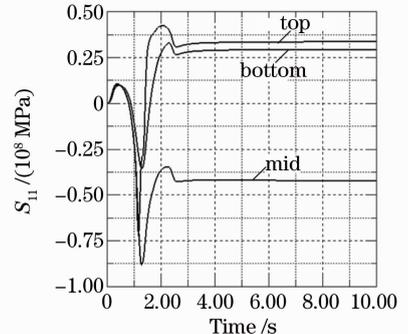


图 8 中心点应力随时间的变化

Fig. 8 Distribution of stress with time of the midpoint

线。可以看出,当光源未到达中心处时,由于前方材料受热膨胀,使得该处材料由于应力平衡而表现出一定的拉应力;当光源移动至中心时,该处材料受热膨胀而形成很大的压应力分布,上中下三点应力分量 S_{11} 分别为 $-710.67, -353.16$ 和 -87.03 MPa;当光源移过中心时,温度下降而导致非均匀收缩,应力状态重新分布并达到稳定状态,上中下三点的应力分别为 $333.85, -419.55$ 和 291.49 MPa。

3.3 位移场

图 9 为试样自由端中点处位移随时间的变化曲线。可以看出,在扫描初期由于扫描区域受热膨胀,其产生的压应力使得试样产生了一定的反向弹性弯曲,自由端下降了 $2.727 \mu\text{m}$;随着膨胀区材料冷却产生的拉应力分布逐渐加大,试样的正向弯曲越来越明显,最后自由端正向位移稳定在 $51.348 \mu\text{m}$ 左右。图 10 为不同扫描次数下试样的弯曲变形角度,可以看出随着扫描次数的增加,试样弯曲角度以线性方式增加,4 次扫描后试样的弯曲角度达到了 1.95° ,与文献[10]的实验结果基本吻合。

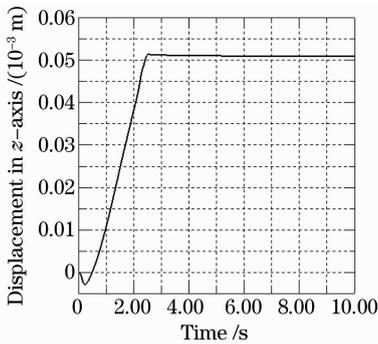


图 9 自由端 z 方向位移随时间的变化

Fig. 9 z-displacement distribution of the free end

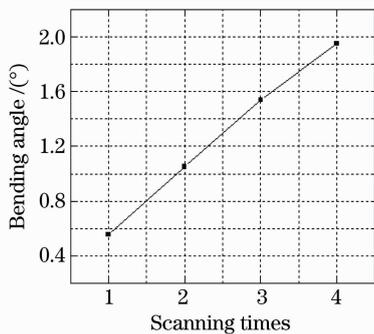


图 10 不同扫描次数下的弯曲角度

Fig. 10 Bending angles with different scanning times

3.4 试样厚度的控制与选择

图 11 为不同厚度试样在激光扫描过程中上下表面峰值温度及温差的变化曲线。随着试样厚度的增加,上下表面的峰值温度逐步减小,其温差逐步增

加。由于 Al_2O_3 陶瓷的塑性转变温度在 900°C 左右,在激光功率为 28 W ,光斑直径为 0.3 mm ,扫描速度为 80 mm/min 的情况下,当试样厚度小于 0.26 mm 时,上下表面都达到塑性转变温度;当试样厚度超过该值时,下表面部分区域不能达到陶瓷材料的塑性转变点,仅仅是发生弹性变形,因而其变形效果有限且易产生裂纹;而当厚度小于 0.18 mm 时,上表面峰值温度超过陶瓷熔点 2050°C ,表面完整性遭到破坏。

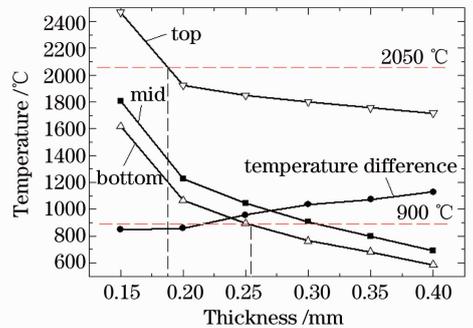


图 11 峰值温度及温差随厚度的变化

Fig. 11 Peak temperature and temperature difference with different thicknesses

图 12 为不同厚度下,激光扫描后试样上表面的残余应力 S_{11} 及塑性应变 P_{11} 的变化曲线。随着陶瓷试样厚度的增加,上表面峰值温度的下降导致加热区材料的膨胀收缩量减少,因而塑性应变 P_{11} 逐渐减小, 0.2 mm 厚时塑性应变量为 0.0235 ,而 0.4 mm 厚时仅为 0.0035 。另外,随着试样厚度的增加,其刚度也更加明显,加热区峰值温度降低,塑性变形区减小,热影响区温差增大,使得材料收缩更为迅速,因而上表面残余应力 S_{11} 逐渐增加。当残余拉应力超过陶瓷材料的断裂应力时,便会在上表面产生微观裂纹,随着微观裂纹的逐步积累及扩展,最

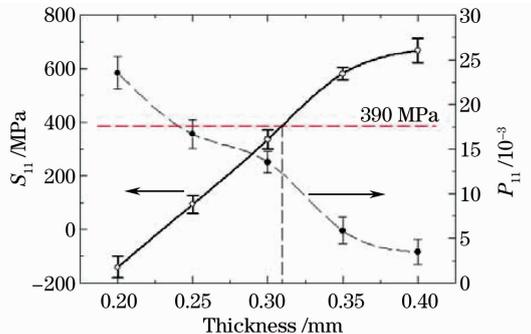


图 12 上表面残余应力 S_{11} 及塑性应变 P_{11} 随厚度的变化

Fig. 12 Stresse and plastic strain on top surface with different thicknesses

终导致陶瓷片的断裂。若假定质量分数为 96% 的 Al_2O_3 陶瓷断裂应力为 390 MPa^[11], 则厚度大于 0.31 mm 的试样表面有裂纹产生倾向。

图 13 为不同厚度下陶瓷片弯曲角度的变化曲线。可以看出, 随着试样厚度的增加, 试样弯曲角度也随之减少。结合图 11 的温度分布和图 12 应力分布, 可以按厚度分为三个区域, 如图 13 所示: 区域 I—完全塑性变形区, 激光辐照区域厚度方向均达到了塑性转变点, 试样弯曲角度取决于塑性区域的塑性应变的大小, 试样变形角度与厚度呈线性关系; 区域 II—过渡变形区, 激光辐照区域厚度方向大部分处于塑性状态, 试样的弯曲角度取决于塑性变形及弹性变形的共同作用, 试样变形角度与厚度呈非线性关系; 区域 III—弹性变形区, 激光辐照区域厚度方向大部分处于弹性状态, 试样变形量取决于弹性变形区弹性应变的大小, 试样变形角度与厚度呈线性关系。区域 III 弯曲变形量很小且易产生裂纹, 而且很难通过多次叠加扫描的方式来增加扫描角度。因此, 试样的厚度选择主要处于 I, II 阶段。

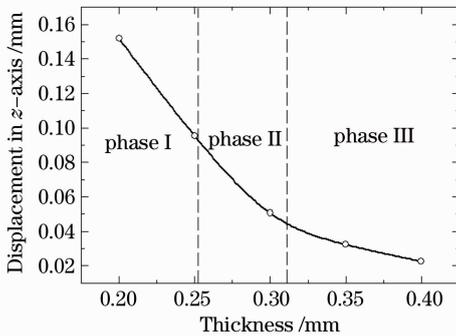


图 13 板厚与弯曲角度的变化

Fig. 13 Relationship of sheet thickness and bending angles

4 结 论

利用有限元软件 ABAQUS 建立激光弯曲 Al_2O_3 陶瓷片的分析模型, 解决了激光弯曲成形模拟过程中的网格划分、换热条件设置和移动热源加载等一系列技术问题, 对激光弯曲陶瓷片过程的温度场、应力应变场以及位移场进行了有效模拟。

激光扫描路径上厚度方向存在着强烈的温度梯度(约为 1000 °C), 大部分区域超过了陶瓷材料的塑变点; 光源移动出试样上边缘时, 由于边缘效应温度

上升明显, 达到了 1932 °C; 当材料温度超过陶瓷塑变点时, 试样中会产生明显的塑性应变, 最大塑性应变分量 P_{11} 达到了一 0.0133; 激光扫描后, 试样上下表面表现出明显的拉应力分布, 应力分量 S_{11} 分别达到了 333.85 和 291.49 MPa。

通过对不同厚度激光弯曲成形进行模拟, 发现随着厚度的增加, 上下表面温度及塑性应变 P_{11} 会随之减小; 上表面残余应力 S_{11} 会随之增加。当局部残余拉应力达到陶瓷材料的断裂应力时, 便会产生微观裂纹。通过分析不同厚度试样在激光扫描过程中的温度场、应力应变场及变形能力, 得出了该工艺参数下最佳试样厚度范围为 0.18~0.31 mm。

参 考 文 献

- 1 G. Dearden, S. P. Edwardson. Some recent developments in two and three dimensional laser forming for 'macro' and 'micro' applications[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2003, **5**(4): S8~S15
- 2 Huang Chenguang, Duan Zhuping. Numerical simulation on the micro-scale bending induced by pulsed laser beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3): 281~285
黄晨光, 段祝平. 激光微弯曲成形机理的数值研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3): 281~285
- 3 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical and experimental study on laser micro-bending process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 276~280
刘杰, 孙胜, 管延锦. 微尺度激光弯曲成形数值模拟与实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 276~280
- 4 Shi Yongjun, Liu Feng, Qi Yaoguang et al.. Effect of heating position on deformation of plate in laser forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1087~1090
石永军, 刘峰, 綦耀光等. 激光热成形工艺中加热位置对板材变形的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1087~1090
- 5 Jin Zhihao, Gao Jiqiang. Engineering Ceramic Materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000
金志浩, 高积强. *工程陶瓷材料*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000
- 6 Andrew C. Tam, Chie C. Poon, Linden Crawforth. Laser bending of ceramics and application to manufacture magnetic head sliders in disk drives[J]. *Anal. Sci.*, 2001 **17**: S419~S421
- 7 M. Naohisa. Laser micro-bending for precise micro-fabrication of magnetic disk-drive components[C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 24~29
- 8 X. R. Zhang, X. F. Xu. Microscale bending of brittle materials using pulsed and CW lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 291~296
- 9 X. R. Zhang, X. F. Xu. High precision micro scale bending by pulsed and CW lasers[J]. *J. Manuf. Sci. E. - T. ASME*, 2003, **125**(3): 512~518
- 10 Wu Dongjiang, Zhang Qiang, Guo Dongming. Experiment on bending of Al_2O_3 ceramic slice with CO_2 CW-laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10): 2473~2479
吴东江, 张强, 郭东明. Al_2O_3 陶瓷薄片 CO_2 连续激光弯曲试验研究[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2473~2479
- 11 Chihwei Chang, Churpao Kuo. An investigation of laser-assisted machining of Al_2O_3 ceramics planing [J]. *International J. Machine Tools & Manufactures*, 2007, **47**(3-4): 452~461