

文章编号: 0258-7025(2010)05-1398-06

脉冲激光热应力切割 Al_2O_3 陶瓷板

刘 剑 陆 建 倪晓武 戴 罡 陈彦北

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要 运用热应力切割脆性材料的可控断裂激光切割技术,是在切割过程中激光能量诱发的拉应力使材料沿光束移动方向分离来完成切割。材料的分离类似于裂纹的扩展且分离的过程是可控的。基于固体热传导理论,运用有限元方法建立了三维热弹计算模型。通过对脉冲激光扫描切割 Al_2O_3 陶瓷板过程中的温度场和应力场的变化情况进行模拟分析,得到了切割过程中温度场和热应力场的分布及随时间的变化规律。分析了激光照射陶瓷板期间,激光作用区域压应力与拉应力之间沿厚度方向的转化规律。进而根据可控断裂激光切割原理分析了陶瓷板裂纹沿脉冲激光扫描方向进行扩展的原因。

关键词 激光技术;激光切割;脉冲激光;温度场;热应力

中图分类号 TG485;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103705.1398

Thermal Stress Cleaving of Al_2O_3 Ceramic Plate by Pulsed Laser

Liu Jian Lu Jian Ni Xiaowu Dai Gang Chen Yanbei

(School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In laser thermal stress cleaving of brittle materials using controlled fracture technique, the applied laser energy absorbed in a local area produces a tensile thermal stress that causes the material to separate along the moving direction of the laser beam. The material separation is similar to a crack extension and the fracture growth is controllable. A three-dimensional finite element thermoelastic calculational model with the heat transfer theory is established to investigate the process when pulsed laser is applied to cut the Al_2O_3 ceramic plate. The temperature field and thermal stress field at the area irradiated by the laser are simulated. During the laser pulse, the distribution of the tensile stress and compressive stress with depth is obtained. The mechanism of crack propagation is investigated by analyzing the development of the thermal stress field during the process.

Key words laser technique; laser cutting; pulsed laser; temperature field; thermal stress

1 引 言

陶瓷因具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温、高绝缘以及热膨胀系数小等优点,在电子器件、能源构件等领域得到广泛应用。但其还具有硬度高、脆性大、抗热震性差等弱点,采用传统技术加工分离陶瓷材料时容易产生裂纹与边部碎屑,难以满足加工精度与清洁度的要求。激光加工由于采用了无接触式加工技术,减少了接触应力对脆性材料的损伤,正成为加工脆性材料的一种重要技术。近年来关于激光加工脆性材料的研究较多^[1~6],但对利用脉冲激光加工脆性材料的研究相对较少,特别是利用脉冲激光对陶

瓷材料扫描过程的分析鲜见报道。

可控断裂激光切割技术^[7~11]是通过利用激光在脆性材料表面扫描时引起的温度场梯度变化产生的热应力进行切割的技术。当应力值达到一定阈值时,材料表面出现裂纹,可控制该裂纹沿激光束行进的方向扩展直至材料断裂。该方法相对其他激光加工方法具有所需激光能量小、切割质量高的优点。本文根据可控断裂激光切割技术的思想,运用有限元方法,对利用波长 1064 nm 的脉冲激光以恒定速率扫描 Al_2O_3 陶瓷板的过程进行了模拟,得到了过程中温升和应力随时间的变化情况。对在脉冲激光

收稿日期: 2009-10-27; 收到修改稿日期: 2009-10-31

作者简介: 刘 剑(1983—),男,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: liujiannjlg@yahoo.com.cn

导师简介: 陆 建(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

作用瞬间,在激光作用区内沿深度方向压应力与拉应力之间的转化规律进行了研究,并分析了裂纹沿激光扫描方向扩展的原因。

2 计算模型的建立

建立如图 1 所示的 Al₂O₃ 陶瓷板模型,其尺寸为 37.5 mm×16 mm×1 mm,激光以恒定速率沿 x 方向扫描陶瓷板。

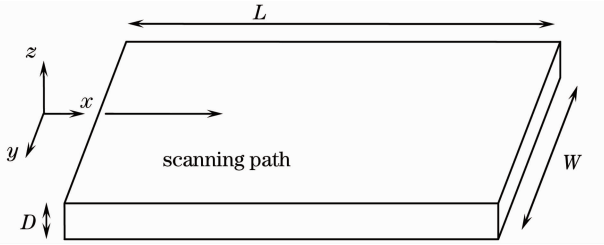


图 1 激光切割陶瓷板模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cleaving process

陶瓷在与波长 1064 nm 脉冲激光相互作用过程中,热弹范围内陶瓷热力学参数稳定,随温度变化极小。陶瓷对激光能量表现为强吸收,且吸收深度小,激光能量在材料表面被大量吸收。在此过程中激光脉宽为毫秒量级,对流及热辐射作用在边界上造成的热损失在毫秒量级内非常小。为了简化计算,对该模型进行如下假设:

- 1) 激光与陶瓷板相互作用过程中,陶瓷板的热力学参数不随温度发生变化;
- 2) 激光能量被材料完全吸收;
- 3) 激光能量作为面载荷进行加载;
- 4) 忽略对流及热辐射作用在边界上造成的热损失。

考虑到激光扫描过程中首先是温度场发生变化,进而引发热应力等过程,对温度场、热应力场依次进行分析。

2.1 瞬态热传导基本方程

对于各向同性的材料,瞬态热传导方程为^[12]

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + A(x, y, z, t) \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} = \epsilon I \end{cases}, \quad (1)$$

边界条件

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \epsilon I, \quad (2)$$

初始条件

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = T_0, \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

式中 ρ 为材料密度, c 为材料比热容, T 为温度, T_0 为计算时的初始温度, t 为时间变量, k 为热导率, ϵ 为材料对激光的吸收系数, $A(x, y, z, t)$ 为内热源。此时激光载荷被看作表面热源,玻璃无内热源,即 $A(x, y, z, t) = 0$ 。 I 为作用于陶瓷表面激光的功率密度;当模式为 TEM₀₀ 的脉冲激光以恒定速率 v 沿陶瓷板表面扫描时,激光功率密度可表示为

$$I(x_v, y_v) = \frac{p \epsilon}{\pi r^2} \exp \left[- \left(\frac{x_v^2 + y_v^2}{r^2} \right) \right], \quad (4)$$

式中 p 为激光峰值功率, r 为激光光斑半径,且有 $x_v = x - vt, y_v = y$ 。

2.2 热弹性平面应力问题基本方程

由于陶瓷板的厚度远小于长度和宽度,激光照射薄板时,在升温后需进一步讨论的问题可简化为热弹性平面应力问题,其本构方程^[13]为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_x + \mu \epsilon_y) - \frac{E\alpha \Delta T}{1-\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_y + \mu \epsilon_x) - \frac{E\alpha \Delta T}{1-\mu} \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 ϵ_x, ϵ_y 分别为 x, y 方向上的正应变, γ_{xy} 为剪应变, E 为杨氏模量, μ 为泊松比, α 为线性膨胀系数, ΔT 为温差。结合相应的平衡方程和几何方程^[14] 可解得 x, y 方向上的正应力 σ_x, σ_y 和剪应力 τ_{xy} 。

3 有限元分析模型

应用有限元方法对脉冲激光扫描过程进行分析时,激光沿着陶瓷表面对称轴 x 方向进行扫描。根据图 1 给出的模型面对称的特点,以扫描路径所在 xz 面为对称面,建立二分之一有限元模型进行分析,模型网格划分如图 2 所示。为了使计算更加准确,对扫描路径附近区域进行了精细网格划分,网格

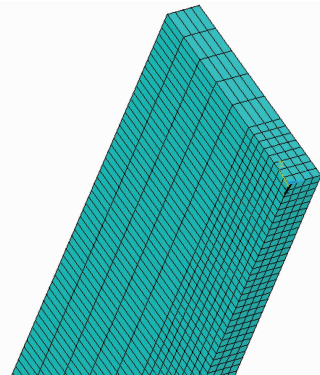


图 2 有限元网格划分图

Fig. 2 Finite element meshes of ceramic plate

划分长度为 0.25 mm。为节省计算资源,离扫描路径区域较远位置网格划分相对稀疏。

4 激光和材料参数

数值计算时环境温度设为 300 K;作用激光波

长为 1064 nm,脉宽为 2 ms,重复频率为 10 Hz,峰值功率为 600 W;照射在材料上的激光光斑半径为 0.5 mm,光束扫描速率为 25 mm/s;且假设激光能量完全被陶瓷吸收,即 $\epsilon = 1$ 。Al₂O₃ 陶瓷材料参数^[15]如表 1 所示。

表 1 陶瓷的物理参数

Table 1 Physical parameters of ceramic

Density ρ /(kg/m ³)	Specific heat c /[J/(kg · K)]	Thermal conductivity k /[W/(m · K)]	Thermal expansion coefficient β /(10^{-6} K ⁻¹)	Young's modulus E /GPa	Poisson's ratio σ
3960	800	33.5	8.2	400	0.22

5 结果分析和讨论

脉冲激光在 $t = 0$ 时从陶瓷板边缘开始以恒定速率 25 mm/s 进行扫描。相比连续激光扫描,激光加热区域并不连续,而是跳跃式前进(如图 3 所示),每次加热时间与脉宽相同(2 ms)。第一次脉冲 $t = 0 \sim 0.002$ s,激光从陶瓷板边缘开始扫描,考虑边缘区域对应力分析可能造成的奇异影响,从第二次脉冲开始时刻 $t = 0.1$ s 开始进行分析。

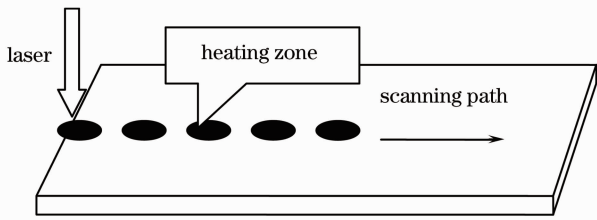


图 3 脉冲激光扫描陶瓷板加热区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scanning zone during pulsed laser cleaving process

5.1 温度场的计算

对 $t = 0.1 \sim 0.102$ s 脉冲期间进行分析。图 4 所示为不同时刻材料表面温度沿 x 的方向分布情况。激光扫描区域内 x 方向各点温度随时间不断升高, $t = 0.102$ s 各点温度达到最高。从脉冲开始至结束,不同时刻温度最高点都位于扫描区域的中心位置($x = 2.5$ mm)附近。

图 5 所示为从材料表面激光扫描区域中心位置($x = 2.5$ mm)开始,不同时刻温度随深度的变化情况。脉冲期间,深度方向各点温度随时间逐渐升高,且从材料表层至底层沿深度方向,温度梯度随时间逐渐增大。

由于激光能量大多在陶瓷材料表层附近区域被吸收,导致表层附近沿深度方向产生较大温度梯度,当深度增大到一定值时,温度梯度开始变小。如图 5 所示,同一时刻,当深度到达 0.25 mm 时,温度随

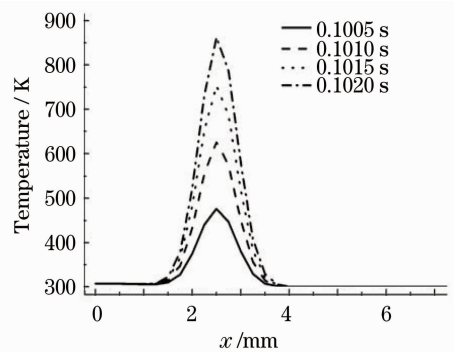


图 4 不同时刻材料表面温度沿 x 方向的分布

Fig. 4 Temperature distribution on the surface of ceramic plate along the x -axis at various time steps

深度变化图线出现拐点,由 $z = 0.25$ mm 开始沿深度方向温度梯度变小。

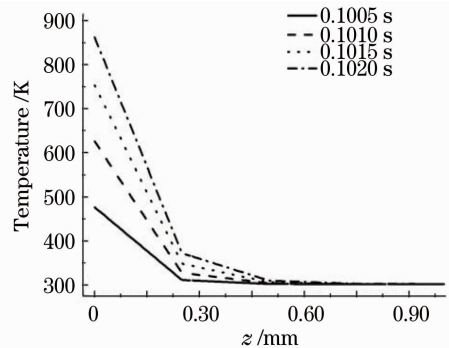


图 5 不同时刻温度随深度方向的分布

Fig. 5 Temperature changes with depth at various time steps

图 6 所示为 0.1~0.102 s, 0.2~0.202 s 前后两次脉冲时间内,位于前后两激光扫描区域内 $x = 2.5$ mm, $x = 5.0$ mm 两点温度随时间的变化情况。如图所示,在 0.1, 0.2 s 两时刻,两点的温度开始迅速升高;2 ms 过后,激光停止扫描,由于热传导、辐射和对流的作用,温度开始下降,但与温升阶段对比可知降温阶段相对缓慢。

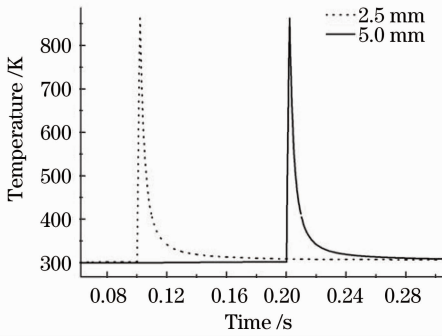


图 6 路径上 $x=2.5\text{ mm}$, $x=5.0\text{ mm}$ 两点温度随时间的变化

Fig. 6 Temperature history of two points on the scanning line ($x=2.5\text{ mm}$, $x=5.0\text{ mm}$)

位于前后两个激光扫描区域之间的间隔区域,在整个扫描过程中,并没有受到激光的直接辐照,此区域的温升主要是由热传导作用造成的。图 7 所示是位于扫描路径上坐标为 $x=3.5\text{ mm}$, $x=4.0\text{ mm}$ 两点温度随时间变化的情况。两点位于前后两个激光扫描区域之间,在扫描过程中并没有受到激光直接照射,温度升高是由热传导作用引起的。 $x=3.5\text{ mm}$ 点,在总的时间历程里,受前后两次激光脉冲的影响,有两次温升历史。由于前一次脉冲作用区域与后一次作用区域距离较近,第一次温升的峰值高于第二次温升的峰值。在 $x=4.0\text{ mm}$ 点,距离后一次脉冲作用区域较近,第二次温升峰值高于第一次温升峰值。

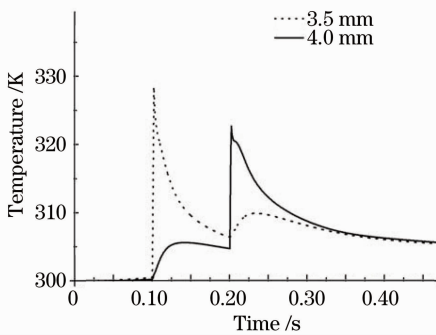


图 7 扫描路径上 $x=3.5\text{ mm}$ 和 $x=4.0\text{ mm}$ 两点温度随时间的变化

Fig. 7 Temperature history of two points on the scanning path ($x=3.5\text{ mm}$, $x=4.0\text{ mm}$)

5.2 应力场的模拟

沿扫描路径,激光辐照区的材料吸收激光能量,导致温度迅速升高,与周围常温区域形成温度梯度,发生热膨胀,受到周围区域的挤压而产生压应力,而周围区域受到方向相反的反作用力。图 8 给出了 $t=0.1\sim 0.102\text{ s}$ 脉冲期间不同时刻材料表面 y 方

向应力沿扫描路径的分布情况。在脉冲期间,激光扫描区域中心位置($x=2.5\text{ mm}$)压应力随时间不断增大,当达到 0.102 s 时刻,压应力达到最大。从脉冲开始至结束,压应力最高点都位于扫描区域的中心位置。

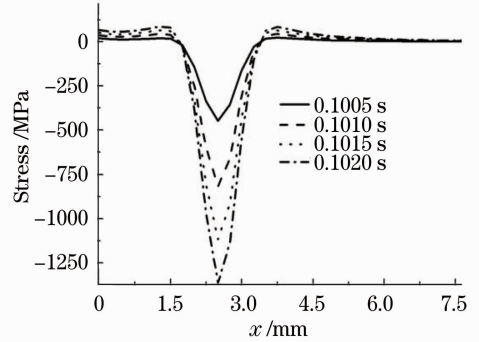


图 8 不同时刻材料表面点($x=2.5\text{ mm}$) y 方向应力沿扫描路径的分布

Fig. 8 Distribution of the thermal stress of the point ($x=2.5\text{ mm}$) on the surface of ceramic plate along the y -axis at various time steps

图 9 为从材料表面扫描中心位置($x=2.5\text{ mm}$)开始,不同时刻 y 方向应力沿深度的变化情况。不同时刻 y 方向应力随深度变化趋势保持一致,从表层开始, y 方向应力随深度由压应力逐渐转化为拉应力,再由拉应力逐渐转化为压应力。压应力最高点出现在材料表层,激光扫描区域中心位置。而拉应力最高点也出现在同一位置($z=0.25\text{ mm}$),即表层以下 0.25 mm 处。由于陶瓷的抗拉强度 (300 MPa) 远小于抗压强度 (3000 MPa),因此,在激光加热过程中,先达到材料的抗拉强度,材料最先被破坏的区域并非出现在表层,而是出现在表层以下 0.25 mm 处,破坏形式为被拉应力作用导致开裂,进而才导致陶瓷板厚度方向形成的贯穿性裂纹。

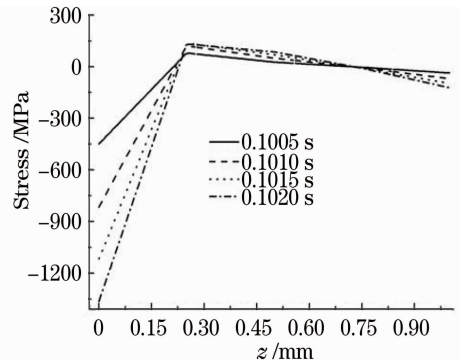


图 9 不同时刻 y 方向应力沿深度方向的变化
Fig. 9 Thermal stress changes with depth along the y -axis at various time steps

图 10 为扫描路径上坐标为 $x=4.0$ mm 点 y 方向应力随时间的变化情况。扫描方向上坐标为 $x=4.0$ mm 点位于前后两次激光作用区域之间,过程中并没有被激光直接照射。其温度历程如图 7 所示。当前一次脉冲作用时,激光作用区域受热产生热膨胀现象,导致在此区域之间的 $x=4.0$ mm 点产生被动膨胀,诱发图中所示的第一次拉应力峰值。当第二次脉冲作用时,激光作用区域受热产生热膨胀现象,导致在此区域之后的 $x=4.0$ mm 点产生被动膨胀,产生如图 10 所示的第一次拉应力峰值。其他脉冲作用区域因距离较远,相对于前后这两个区域影响产生的拉应力较小。

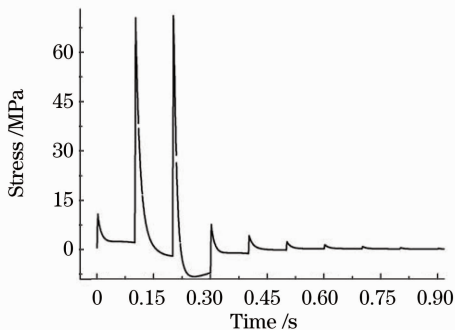


图 10 扫描路径上 $x=4.0$ mm 点应力随时间的变化
Fig. 10 Thermal stress of the point ($x=4.0$ mm) changes with time along the scanning path

图 11 为不同时刻沿扫描路径应力的分布情况。在不同时刻,激光辐照持续时间或者激光作用区域位置发生改变,压应力大小或压应力区域亦发生改变,但不同时刻拉应力最大的区域都位于陶瓷板扫描开始的位置($x=0$)。合理控制激光功率密度,使产生的拉应力超过 Al_2O_3 陶瓷的抗拉强度时,陶瓷板就会从扫描最初位置,即陶瓷板的边缘产生裂纹。下一时刻的最大拉应力位置,由于应力集中,又会出现开裂后裂纹的尖端位置,使裂纹得以不断地扩展,

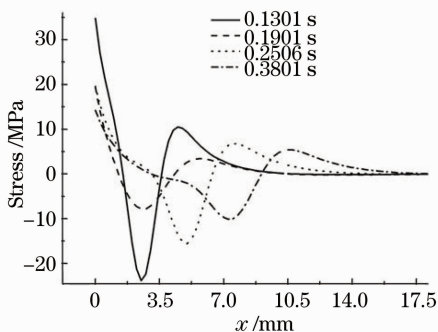


图 11 不同时刻材料表面 x 方向应力沿扫描路径的分布
Fig. 11 Thermal stress distribution on the surface of ceramic plate along the x -axis at various time steps

最后靠拉应力完成对陶瓷板的切割。

6 结 论

对利用毫秒量级脉冲激光扫描 Al_2O_3 陶瓷薄板的过程进行了数值模拟。在激光与材料相互作用期间,激光的高能量密度使陶瓷表面的温度迅速升高,随后受陶瓷内部热传导等因素的影响,温度下降。相对于温升阶段,降温比较缓慢。当激光功率密度足够大时,在陶瓷板边缘表层以下 0.25 mm 处产生的拉应力超过材料的抗拉强度,使材料由边缘产生裂纹。最大拉应力总是出现在边缘位置,拉应力会继续引导裂纹沿扫描方向开裂,直至切割完成。

运用可控断裂激光切割技术切割脆性材料时,单晶硅、陶瓷、玻璃等脆性材料在切割过程中表现的断裂现象基本一致。关于脉冲激光切割脆性陶瓷材料过程的数值模拟得到的结论与文献[14]中关于硅、陶瓷等脆性材料的脉冲激光切割实验过程基本吻合。至于实际过程中采用何种激光参数、扫描速度和重复频率可使切割质量提高等问题则尚待进一步研究。

参 考 文 献

- Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong *et al.*. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1686~1692
季凌飞,闫胤洲,鲍勇等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1686~1692
- Zhang Shan, Kang Shaoying. Experimental studies of laser processing of constructural ceramics [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(10): 797~800
张珊,康少英. 激光加工结构陶瓷的实验研究[J]. 中国激光, 1995, **A22**(10): 797~800
- Chen Hongxin, Jia Tianqing, Huang Min *et al.*. Visible-infrared femtosecond laser-induced optical breakdown of 6H SiC[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 467~470
陈洪新,贾天卿,黄敏等. 飞秒激光的波长对 SiC 材料烧蚀的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 467~470
- J. Pascual-Cosp, A. J. Ramirez del Valle, J. Garcia-Fortea *et al.*. Laser cutting of high-vitrified ceramic materials: development of a method using a Nd: YAG laser to avoid catastrophic breakdown [J]. *Materials Lett.*, 2002, **55**(4): 274~280
- D. Triantafyllidis. Dual laser beam modification of high alumina ceramics[J]. *J. Laser Application*, 2003, **15**(1): 49~54
- Avanish Kr. Dubey, Vinod Yadava. Experimental study of Nd: YAG laser beam machining-An overview [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2008, **195**(1-3): 15~26
- R. M. Lumley. Controlled separation of brittle materials using a laser [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1969, **48**: 850~854
- Kondra Ten Ko V S. Method of splitting non-metallic materials [P]. U S Patent, 5609284, 1997. 205~211
- V. K. Sysoev, A. V. Zakharchenko, P. A. Vyat. Increasing the efficiency of controllable laser thermal cleavage of insulating

- materials[J]. *J. Opt. Technol.*, 2004, **71**(2): 1172120
- 10 Chuwan-Huei, Hong-Wen Chen. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **136**(10): 166~173
- 11 I. Black, K. L. Chua. Laser cutting of thick ceramic tile[J]. *Optics Laser Technology*, 1997, **29**(4): 193~205
- 12 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. Analysis and Application of Thermal Stress[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 70~82
李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力的理论分析和应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 70~82
- 13 Zhang Jianyu, Gao Lixin, Cui Lingli *et al.*. Analysis of the temperature field induced by laser strengthening [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 56~58
张建军, 高立新, 崔玲丽 等. 激光强化温度场的理论解析与实验论证[J]. 激光技术, 2006, **30**(1): 56~58
- 14 T. Ueda, K. Yamada, K. Oiso *et al.*. Thermal stress cleaving of brittle material by laser beam [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, **51**(1): 149~152
- 15 Chwanhuei tsai, Hongwen Chen. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **136**(1-3): 166~173