

# 基于热权函数技术的热裂法切割液晶玻璃的研究

王传光 周国斌 卢炎麟 李 航

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要** 激光切割液晶玻璃是一个复杂的激光与材料相互作用的过程。在使用热裂法切割液晶玻璃时,裂纹尖端的应力强度因子(SIF)的大小是决定裂纹是否扩展的关键。使用热权函数技术计算了激光切割过程中裂纹尖端 SIF 的大小,与断裂判据相比较判断裂纹的扩展情况。研究了激光功率、光斑半径、切割速度和裂纹长度对切割过程中裂纹尖端 SIF 的影响,结果表明激光功率越大、切割速度越小、光斑半径越小时,裂尖 SIF 的增大速度越快、峰值越大以及不同裂纹长度下裂尖 SIF 的增大速度和峰值也不同。并通过实验进行验证,说明了该技术的可行性。

**关键词** 激光技术; 激光切割; 裂纹; 热权函数; 应力强度因子; 液晶玻璃

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1203005

## Research of Cutting LCD-Glass with Thermal Cracking Method Based on Thermal Weight Function Technology

Wang Chuanguang Zhou Guobin Lu Yanlin Li Hang

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract** Laser cutting liquid crystal display (LCD)-glass is a complex process of interaction between laser and material. In thermal cracking method laser cutting, the size of the crack tip stress intensity factor (SIF) decides whether the crack extends in the whole cutting process. The size of the crack tip SIF during cutting process is calculated using thermal weight function, comparing with the fracture criterion judges the crack's extension situation. The effects of laser power, spot radius, the cutting speed and crack length on the crack tip SIF are studied. It is concluded that the greater the laser power, the smaller the cutting speed, and the smaller the spot radius, the faster the crack tip SIF increaseing the bigger the peak value. Under different crack lengths, the crack tip SIF increase speed and the peak value are also different. The experimental verification illustrates the feasibility of this technology.

**Key words** laser technique; laser cutting; crack; heat weight function; stress intensity factor; LCD-glass

**OCIS codes**

## 1 引 言

液晶显示器、大规模集成电路等在制造过程中需要对脆性材料基板进行切割加工。对这类脆性材料基板的切割目前应用比较多的是机械切割法,即先用金刚石划线<sup>[1]</sup>,然后用机械力将其折断,从而完成切割。传统的机械法切割在加工过程中不可避免

地产生粉末,此外在切割边缘上还会产生微裂纹,影响了脆性材料基板切割表面的质量。

为了提高脆性材料基板的切割质量,人们发明了多种脆性材料基板的非接触式切割法<sup>[2-3]</sup>,热裂法是其中的一种,该方法首先用激光加热脆性材料的表面,然后再对加热区域进行急剧冷却,急剧的降

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(10972198)、浙江省科技厅项目(2009C31104)

作者简介: 王传光(1988—),男,硕士研究生,主要从事热权函数技术激光热裂法方面的研究。

E-mail: 272876960@qq.com

导师简介: 周国斌(1970—),男,博士,副教授,主要从事 CAD/CAE 方面的研究。E-mail: gbzhou@zjut.edu.cn (通信联系人)

温会使材料表面产生较大的温度梯度和拉应力,这个拉应力会使材料表面沿着预定划线的方向开始破裂,从而实现脆性材料的切割。使用该方法切割获得的表面切割质量要比机械法好得多。Kang等<sup>[4-6]</sup>通过加入预应力、弯矩、冷源、超声振动等进行激光切割实验研究,提高了激光切割的质量和速度。Yamamoto等<sup>[7-10]</sup>对激光切割玻璃材料的过程分别进行了温度场和应力场的仿真分析,得出了激光功率、切割速度、光斑大小等切割参数与材料的温度和应力之间的关系,给出了在对称切割时裂纹可连续扩展的速度-功率范围。Nisar等<sup>[11-12]</sup>研究了光斑的形状、激光功率、切割速度、玻璃板厚对玻璃板切割前沿和尾部产生偏移的影响,并通过实验验证和解释了产生偏移的机理。

前述研究者大都以裂纹尖端的应力变化来研究脆性材料基板的热裂法切割过程,以这种方式研究热裂法,特别是在进行热裂法切割参数的优化分析研究中,对同一块基板,需要反复进行不同温度场作用下的应力分析,计算工作量非常大。与前述研究者不同,本文对热裂法切割参数分析中采用了热权函数法<sup>[13-15]</sup>,避免了对不同温度场作用下的同一构件进行反复的应力场分析,可以比较详细地进行热裂法切割过程的研究。

## 2 热权函数法

在断裂力学中,构件的权函数只与物体的几何

形状有关,与时间及载荷类型无关。故可以对给定的裂纹体先进行简单载荷下的有限元分析,求出位移场,从而确定其权函数;然后再进行传热分析,得到形体的温度场分布,最后利用温度载荷与权函数乘积的积分,便可求得裂纹尖端每一时刻的应力强度因子(SIF)。

利用热权函数法求裂尖处的 SIF 基本公式为

$$K_I^{(2)} = \frac{\alpha H}{2K_I^{(1)}} \int_A \Theta^{*(2)} \frac{\partial \sigma_{kk}^{(1)}}{\partial a} dA, \quad (1)$$

式中上标(1)和(2)分别表示参考载荷和当前载荷作用下的物理量,  $K_I^{(2)}$  为待求的温度载荷下的 SIF,  $\alpha$

为热膨胀系数,材料参数  $H = \begin{cases} E \\ \frac{E}{1-u^2} \end{cases}$ ,  $E$  为杨氏模

量,  $u$  为泊松比,  $K_I^{(2)}$  为参考载荷下的 SIF,  $A$  为积分区域,  $\Theta^{(2)}$  为温度载荷,  $a$  为裂纹的长度,  $\sigma_{kk}^{(1)}$  为裂尖附近的应力。

由于  $\sigma_{kk}^{(1)}$  对裂纹的长度  $a$  比较敏感,所以直接用有限元求得应力值来计算  $K_I^{(2)}$  的值是不合适的,对平面问题有

$$\sigma_{kk} = \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} = \begin{cases} \frac{E}{1-u} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), & \text{plane stress} \\ \frac{E}{1-2u} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), & \text{plane strain} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u, v$  是节点位移。进一步化简,可得到热权函数法 SIF 的计算式

$$K_I^{(2)} = \frac{H''}{2K_I^{(1)}} \left[ \oint_C \Theta^{*(2)} \left( \frac{\partial u^{(1)}}{\partial a} dy - \frac{\partial v^{(1)}}{\partial a} dx \right) - \iint_A \left( \frac{\partial \Theta^{*(2)}}{\partial x} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial a} + \frac{\partial \Theta^{*(2)}}{\partial y} \frac{\partial v^{(1)}}{\partial a} \right) dx dy \right], \quad (3)$$

其中

$$H'' = \begin{cases} \frac{aE^2}{1-u}, & \text{plane stress} \\ \frac{aE^2}{(1-2u)(1-u^2)}, & \text{plane strain} \end{cases}.$$

## 3 理论分析

研究玻璃基板的尺寸是  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,使用移动的  $\text{CO}_2$  激光束进行辐射切割,激光热裂法<sup>[16]</sup>加工原理如图 1 所示。在建模之前需做如下假设:

- 1) 玻璃的力学特性和热特性是各向同性的;
- 2) 激光的能量密度分布是高斯模式;
- 3) 在激光加热的过程中不考虑相变;

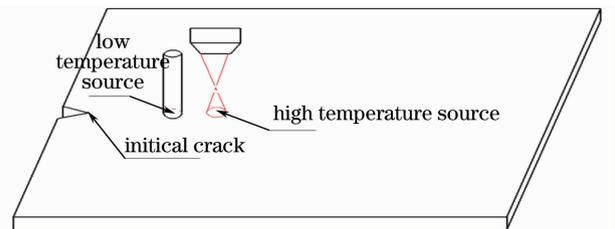


图 1  $\text{CO}_2$  激光切割玻璃模型

Fig. 1 Diagram of glass irradiated by  $\text{CO}_2$ -laser beams

4) 玻璃板的应力应变关系是完全线弹性的;

5) 在激光加热之前假定样本已经退火,初始条件是无应力的。

基于如上假设,激光切割过程中的瞬态热传导方程及其边界条件为

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z, t) \\ T(x, y, z, 0) = T_0, \text{ on the } \Gamma_1 \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = q, \text{ on the } \Gamma_2 \\ k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0, \text{ on the } \Gamma_3 \end{cases}, (4)$$

式中  $\rho$  为密度,  $c$  为比热容,  $t$  为时间,  $T_0$  为室温,  $T$  为温度场变化的函数,  $k$  为热导率,  $n$  为边界的外法线方向,  $h$  为空气的对流换热系数,  $Q$  为物体内部的热流密度,  $\Gamma_1$  为温度边界,  $\Gamma_2$  为热流边界,  $\Gamma_3$  为对流边界。

激光在切割的过程中是沿  $x$  方向以恒定的速度移动, 加载的能量是以热流密度的方式施加到玻璃表面, 且热流密度呈高斯分布, 其函数表达式为

$$I(x, y, z, t) = \frac{\alpha P}{\pi r^2} \exp \left[ -\frac{(x - st)^2 + y^2}{r^2} \right], (5)$$

式中  $I$  为热流密度,  $\alpha$  为玻璃的吸收率,  $r$  为激光光斑半径,  $P$  为激光功率,  $s$  为激光的移动速度。

CO<sub>2</sub> 激光沿对称路径进行切割, 可以建立一半的几何模型进行模拟, 减少有限元分析所用的时间。激光热裂法涉及到很多非线性物理现象, 包括温度分布、应力分布和材料的属性变化, 这些变量之间的关系是非常密切的。在热裂法切割的过程中, 由应

变能产生的热量与激光输出的能量相比, 可以忽略不计。为了简化分析, 基于热权函数技术的激光热裂法的问题可以看成是两个分析模型: 参考载荷的分析模型和热分析模型。在用参考载荷进行有限元分析求单元节点的位移时, 要根据所选的参考载荷选择合适的单元类型和节点数。参考载荷为拉应力, 采用 8 节点的 CPS8R 单元, 在进行热分析时采用 4 节点的 DC2D4 单元, 两个分析模型的计算区域采用相同的网格, 且网格如图 2 所示, 激光移动路径上加密的网格用于模拟热影响区的温度梯度, 整个玻璃模型包含 2580 个单元。选用 EAGLE2000TM 液晶玻璃基板材料的密度为 2380 kg/m<sup>3</sup>, 杨氏模量为 70.9 GPa, 剪切模量为 28.9 GPa, 泊松比为 0.23, 热膨胀系数为 3.18 × 10<sup>-6</sup> /°C, 材料参数随温度变化的物理参数如表 1 所示。

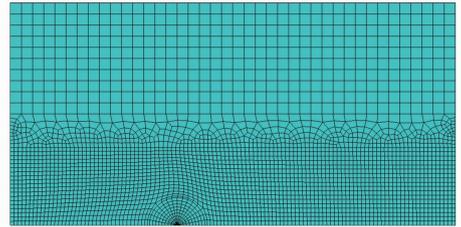


图 2 液晶玻璃基板的网格

Fig. 2 Mesh of liquid crystal display (LCD)-glass

表 1 液晶玻璃板随温度变化的物理参数

Table 1 Temperature-dependent thermal physical parameters of LCD glass substrate

T / °C	23	50	100	200	300	400	600
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	736.736	774.41	841.386	946.036	1021.38	1088.36	1205.57
$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.891618	0.94185	1.02138	1.13859	1.21813	1.2851	1.43998

液晶玻璃为脆性材料, 满足线弹性断裂力学的准则, 由于本实验选用 I 型裂纹模型进行计算, 故其断裂准则为

$$K_I \geq K_{IC}, (6)$$

式中  $K_{IC}$  为液晶玻璃的断裂韧性,  $K_I$  为通过热权函数的方法求得的裂纹尖端的 SIF。

## 4 热权函数技术的应用和分析

### 4.1 裂纹尖端的 SIF 变化历程

建立一个预制有 30 mm 初始裂纹的液晶玻璃模型, 然后再复制一个模型, 分别以不同的名字命名, 一个是参考载荷的分析模型, 另一个为热分析模型。给参考载荷分析模型的上边缘施加一个 15 N 的均布拉应力后进行有限元分析, 求出节点的位移场, 从而通过权函数程序确定该模型的权函数, 然后用功率为 45 W, 光斑半径为 0.5 mm 和切割速度为

10 mm/s 的激光从热分析模型的边缘开始扫描进行传热分析, 得到形体的温度场分布, 最后利用温度载荷与权函数乘积的积分, 便可求得裂纹尖端每一时刻的 SIF。图 3 给出了激光切割过程中裂纹尖端 SIF 的变化历程曲线。可以看出裂纹尖端 SIF 的变化分为 3 个阶段: 1) 裂纹的 SIF 为负值阶段。SIF 的负值主要是由压应力引起的, 因为当激光距裂纹尖端较近时, 裂尖的附近受热膨胀, 受到周围的挤压从而导致压应力; 2) SIF 的逐渐增大阶段。随着激光光斑和裂纹尖端之间的距离逐渐增大, 激光移动路径上区域开始向周围进行传热, 再加上热对流和热辐射的影响, 受到扫描路径周围区域的拉力, 从而导致 SIF 逐渐增大; 3) SIF 逐渐减小阶段。由于持续的热传导和冷却作用, 使得温度梯度的变化逐渐减小, 继而导致裂纹尖端的应力强度也逐渐减小, 且从第二阶段进入第三段出现了 SIF 的峰值。

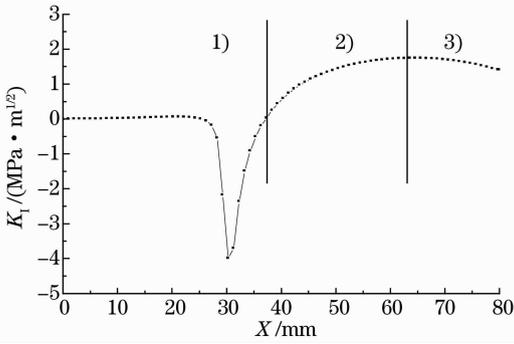


图 3 裂尖的 SIF 分布

Fig. 3 Profile of crack tip's stress intensity factor

#### 4.2 切割参数对裂尖 SIF 的影响

从图 4 中可以看出,在切割速度为 10 mm/s,光斑半径为 0.5 mm,裂纹长度为 30 mm 时,随着激光功率的增大,裂纹尖端 SIF 的增大速度和峰值都增大了。从图 5 中可以看出,在切割速度为 10 mm/s,激光功率为 60 W,裂纹长度为 30 mm 时的情况下,随着激光光斑半径的增大,裂纹尖端 SIF 的增大速度和峰值都减小。当激光光斑半径大于 2 mm 时,光斑半径的改变对裂纹尖端 SIF 的影响不是很明显。但当光斑的半径小于 2 mm 时,光斑半径对裂纹尖端 SIF 的影响比较大。从图 6 中可以看出,在激光功率为 60 W,光斑半径为 0.5 mm,裂纹长度为 30 mm 时,随着切割速度的增大,裂纹尖端 SIF 的增大速度和峰值都减小。

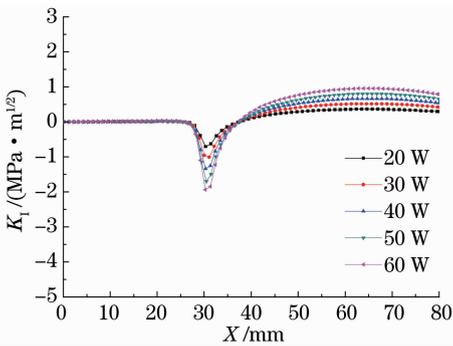


图 4 功率对裂尖 SIF 的影响

Fig. 4 Impact of laser power on crack tip's stress intensity factor

由于所选用的液晶玻璃材料的断裂韧性  $K_{IC}$  为 0.83,只要当裂纹尖端的 SIF 达到断裂阈值  $K_{IC}$ ,裂纹就开始扩展。从图 4 中可以看出,随着激光功率的改变,光斑距离裂纹尖端的距离发生了改变,即随着激光功率的增大,光斑和裂纹尖端之间的距离开始减小。说明激光功率越大,越容易切割。从图 5 中可以看出,随着光斑半径的改变,光斑距离裂纹尖端的距离也发生改变,且随着光斑半径的减小,光斑和裂纹

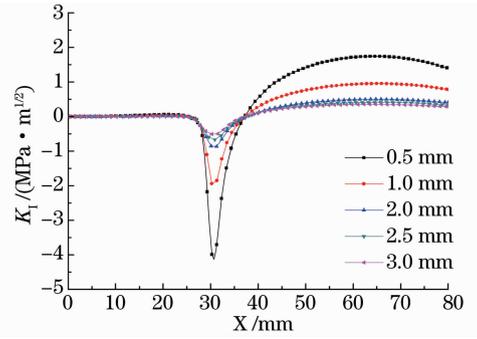


图 5 光斑半径对裂尖 SIF 的影响

Fig. 5 Impact of spot radius on crack tip's stress intensity factor

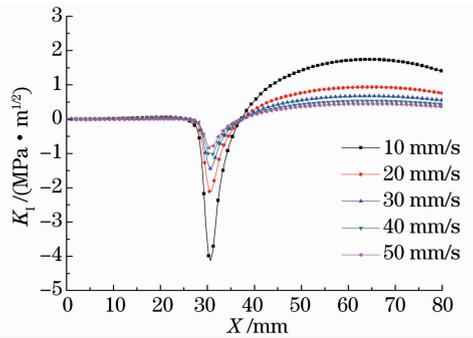


图 6 速度对裂尖 SIF 的影响

Fig. 6 Impact of speed on crack tip's stress intensity factor  
尖端之间的距离开始减小。说明光斑半径越小,越容易切割。从图 6 中可以看出,随着激光移动速度的改变,光斑距离裂纹尖端的距离也发生改变,且随着激光移动速度的减小,光斑和裂纹尖端之间的距离开始减小。这说明切割速度越小,越容易切割。综合以上 3 种情况,激光的功率不能无限增大、光斑半径和移动速度不能无限减小,否则会导致激光的能量密度过高,使液晶玻璃的温度达到软化点并开始熔化,此时就不属于热裂法的范畴,并且切割质量较差。

#### 4.3 裂纹长度对 SIF 的影响

从图 7 中可以看出,用激光功率为 60 W,光斑

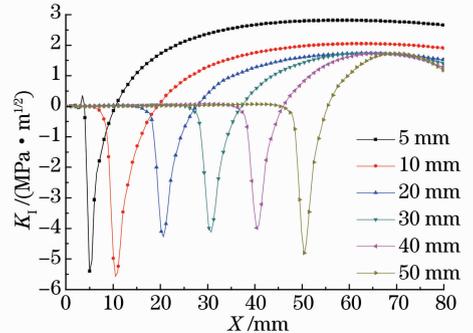


图 7 裂纹长度对裂尖 SIF 的影响

Fig. 7 Impact of crack length on crack tip's stress intensity factor

半径为 0.5 mm,切割速度为 10 mm/s 的激光进行切割时,随着裂纹长度的增加,裂纹尖端的 SIF 峰值逐渐减小,但 SIF 的增大速度则呈现不规则的变化趋势,从而导致光斑和裂纹尖端之间的距离不断发生变化,这说明激光在切割液晶玻璃的过程中裂纹的扩展速度是不稳定的。

#### 4.4 实验验证

当以功率为 45 W,光斑半径为 0.5 mm 和切割速度为 15 mm/s 的激光进行切割实验时,裂纹的长度扩展到 20 mm 时就停止,实验结果如图 8 所示。此现象可以通过前面计算分析得出的结论来进行解释,随着切割过程中裂纹长度的增加,裂纹尖端 SIF 的峰值逐渐减小,当峰值小于断裂阈值  $K_{IC}$  时裂纹停止扩展。裂纹比较清晰,表面质量完好,且存在的裂纹经过一段时间的自然冷却后,表面会出现吸合现象。

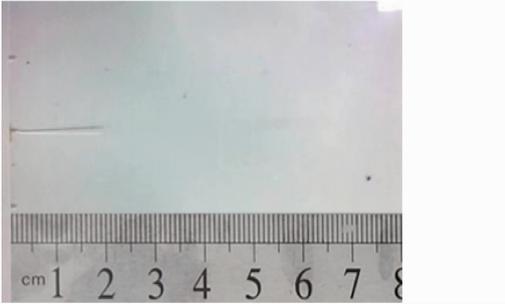


图 8 裂纹停止扩展

Fig. 8 Stop of crack expanding

当以激光功率为 60 W,光斑半径为 0.5 mm 和切割速度为 15 mm/s 的激光进行切割实验时,激光可以完成整个切割过程,且在切割过程中,裂尖始终在距激光后 5~10 mm 范围内变化,实验结果如图 9 所示。说明裂纹在切割的过程中,扩展的速度是不稳定的。和前面求得的不同裂纹长度下裂尖到光斑中心的距离是变化的现象相吻合。

当以功率为 60 W,光斑半径为 0.5 mm 和切割

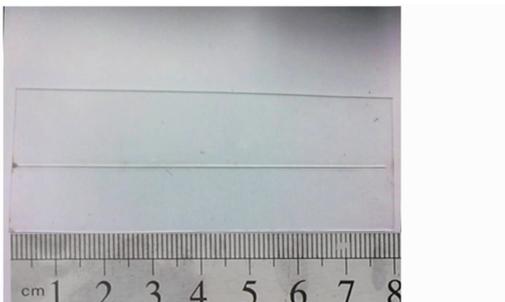


图 9 裂纹连续扩展

Fig. 9 Continuation of crack expanding

速度为 5 mm/s 的激光进行切割实验时,裂纹跟随激光扩展,直至完成整个切割过程,同时在激光扫描过的区域,扫描路径两旁迅速出现爆裂现象,实验结果如图 10 所示。此现象可以解释为所选取的激光参数在单位时间内获得的能量较大,裂纹尖端的 SIF 增速较快且峰值也较大,从而出现了裂纹紧随激光扩展的现象。出现爆裂现象是由于在激光扫描区域内产生了强大的残余应力引起的。

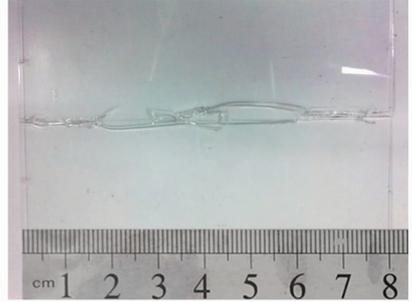


图 10 热量极高时产生的爆裂

Fig. 10 Burst generated by high heat

## 5 结 论

通过使用热权函数技术求得了激光在整个切割过程中裂尖 SIF 的变化历程,并对整个变化历程进行了解释。热权函数的计算结果表明:随着激光功率的增大,裂尖 SIF 的增大速度和峰值均增大;随着光斑半径的增大,裂尖 SIF 的增大速度和峰值均减小;随着切割速度的增大,裂尖 SIF 的增大速度和峰值均减小。计算了在不同裂纹长度(可以看作是激光在切割过程中满足连续扩展的情况)下裂尖的 SIF 的变化历程,发现随着切割过程中裂纹长度的增加,SIF 的峰值逐渐减小,但增大速度呈现不规则的变化趋势,这说明裂纹的扩展速度是不断变化的,并通过激光切割液晶玻璃的实验,验证了热权函数算法的正确性。因此通过热权函数法求得裂尖 SIF 的变化历程曲线,合理地解释了激光的热裂法机理,并有效地提高了实验的研究效率。

## 参 考 文 献

- 1 CH Tsai, H W Chen. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 136(1-3): 116-173.
- 2 Xie Xiaozhu, Huang Xiandong, Chen Weifang, et al.. Study on scribing of sapphire substrate by pulse green laser irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203010.  
谢小柱, 黄显东, 陈蔚方, 等. 脉冲绿激光划切蓝宝石基片过程研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203010.
- 3 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806002.

- 张英聪, 沈 华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三位温度场[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806002.
- 4 C H Tsai, B C Lin. Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(11-12): 1155-1162.
- 5 V S Kondratenko. Method of Splitting Non-Metallic Materials; US,5609284[P]. 1997-03-11.
- 6 K Yamamoto, N Hasaka, H Morita, E Ohmura, *et al.*. Three-dimensional thermal stress analysis on laser scribing of glass[J]. Precision Engineering, 2008, 32(4): 301-308.
- 7 V S Kondratenko. Cutting Method of Brittle Non-metallic (two variants); US, 20040251290A1[P]. 2004-12-16.
- 8 Tao Weiming, Bi Guoli, Zhang Huiquan, *et al.*. Finite element simulation of laser-controlled thermal stress separation of soda-lime glass plate[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(9): 1423-1427.
- 陶伟明, 毕国丽, 章惠全, 等. 钠钙玻璃板激光热应力切割过程的有限元仿真[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(9): 1423-1427.
- 9 C H Tsai, C S Liou. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(3): 519-528.
- 10 Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin, *et al.*. Finite element simulation of thermal stress filed in cutting LCD glass substrate by laser[J]. Applied Laser, 2006, 26(4): 267-271.
- 叶圣麟, 马军山, 黄 鑫, 等. 液晶显示玻璃基板激光切割热应力场的有限元仿真[J]. 应用激光, 2006, 26(4): 267-271.
- 11 S Nisar, M A Shei, L Li, *et al.*. The effect of material thickness, laser power and cutting speed on cut path deviation in high-power diode laser chip-free cutting of glass[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(6): 1022-1031.
- 12 S Nisar, M A Sheikh, L Li, *et al.*. The effect of laser beam geometry on cut path deviation in diode laser chip-free cutting of glass[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(1): 011002.
- 13 Y L Lu, X P Huang, C D Lu, *et al.*. A novel technique for determination of histories of SIF distributions along 3-D crack fronts of a body subjected to thermal shock[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 60(8): 1317-1337.
- 14 Y L Lu, X P Huang, X F Jiang, *et al.*. Rapid determination of histories of SIF distributions along 3-D crack fronts of a plate subjected to thermal shock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(9): 1307-1323.
- 15 Y L Lu, S J Zhang, X P Huang, *et al.*. Determination of histories of SIF distributions for axial semi-elliptical surface cracks in hollow cylinders subjected to thermal shock[J]. Int J Pres Ves Piping, 2003, 80(3): 167-178.
- 16 Zhou Guobin, Huang Xianping, Lu Yanlin. One Cutting Method of Brittle Material Substrate; China, 101444875A[P]. 2009-06-03.
- 周国斌, 黄鲜萍, 卢炎麟. 一种脆性材料基板的切割方法: 中国, CN101444875A[P]. 2009-06-03

栏目编辑: 张 雁