

# 液晶玻璃基板激光切割数值模拟与实验

汪旭煌<sup>1,2,3</sup> 姚建华<sup>1,2</sup> 周国斌<sup>1</sup> 楼程华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014  
<sup>3</sup> 浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310014

**摘要** 激光切割液晶玻璃基板是一个复杂的光致热过程,在整个切割过程中温度起着至关重要的作用。运用可控断裂激光切割技术断裂液晶玻璃基板,热应力用于诱导裂纹并使材料沿着切割路径扩展开裂。为了给实际激光热应力切割以指导,减少切割过程中的盲目性,提高激光热应力切割的质量,提出了一种激光切割液晶玻璃基板的数值模拟方法。利用有限元软件 ANSYS 进行温度场数值计算,建立了激光切割液晶玻璃基板温度场的有限元模型。研究了激光功率和光斑直径对激光切割过程中温度场的影响,得到了温度分布与激光功率、光斑直径的关系。用数值计算结果指导切割,获得了良好的切割效果。

**关键词** 激光技术;激光切割;温度场;液晶玻璃基板;数值模拟

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603003

## Numerical Simulation and Experiment of Laser Cutting Liquid Crystal Display Glass Substrates

Wang Xuhuang<sup>1,2,3</sup> Yao Jianhua<sup>1,2</sup> Zhou Guobin<sup>1</sup> Lou Chenghua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

<sup>2</sup> Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

<sup>3</sup> College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

**Abstract** Laser cutting of liquid crystal display (LCD) glass substrate is a complex light-induced heat process, in which the temperature plays a vital role. In fracture controlled laser cutting technology, thermal stress is used to induce fissure and break the LCD glass substrate. In order to guide the actual thermal stress laser cutting, as well as reduce the blindness and improve the quality in the cutting process, a numerical simulation is proposed for laser cutting LCD glass substrate. The distribution of temperature is obtained by using finite element analysis software ANSYS. A temperature field numerical simulation is established as laser cutting LCD glass substrate. The effects of laser power and spot diameter on the temperature field are studied and the relationship is obtained. A good cutting profile is obtained in experiment with the help of the numerical simulation results.

**Key words** laser technique; laser cutting; temperature field; liquid crystal display glass substrate; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3390; 140.3470; 140.6810; 160.2750; 160.3710

收稿日期:2011-03-23; 收到修改稿日期:2011-03-28

基金项目:浙江省科技厅(2009C31104)资助课题。

作者简介:汪旭煌(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: wxhhz2004@163.com

导师简介:姚建华(1965—),男,教授,主要从事激光表面改性与激光制造等方面的研究。E-mail: laser@zjut.edu.cn

(通信联系人)

# 1 引 言

近年来,随着现代加工制造业突飞猛进的发展,激光在加工业中得到了广泛的应用。激光切割技术在很多领域已经代替了传统切割手段并逐步发展成为一种新型的切割方法<sup>[1]</sup>。液晶玻璃基板传统切割是采用金刚石或硬质合金进行刻划,然后用外力使其分离。用该方法进行切割极易产生断片、边缘碎屑与微裂纹等缺陷。另外一种方法是采用熔断法<sup>[2]</sup>,即用激光产生局部高温使材料熔化,然后用辅助气流将其分离,其缺点是加工后易产生微裂纹并有严重的热影响区<sup>[3]</sup>。

Grove 等<sup>[4]</sup>将可控断裂理论应用到切割玻璃材料上,并对6 mm厚的玻璃进行了实验。Tsai 等<sup>[5~7]</sup>对激光切割脆性材料的裂纹扩展机理进行了研究,并对加工过程中的应力场和温度场进行了模拟;对预弯曲的液晶显示器(LCD)玻璃基板进行了激光切割实验,并与金刚石切割作了对比。陶伟明等<sup>[8]</sup>对激光作用下钠钙玻璃的热应力进行了仿真。叶圣麟等<sup>[9]</sup>对脆性材料在激光作用下的温度场进行了模拟。焦俊科等<sup>[10]</sup>研究了钠钙玻璃在 CO<sub>2</sub> 激光作用下的热应力分布以及激光作用下石英玻璃的温度分布,并进行了实验。杨伟等<sup>[11]</sup>对水下激光切割硅片进行了研究。许国良等<sup>[12]</sup>提出用双光束 CO<sub>2</sub> 激光进行切割并对切割过程进行了数值模拟。Nisar 等<sup>[13]</sup>研究了应力对半导体激光切割玻璃的影响。

本文从数值计算的角度分析了激光切割过程中温度场的分布,研究了不同激光参数下温度场的变化及其对切割的影响,有利于实际切割过程各种工艺参数的选择。

# 2 理论分析

## 2.1 传热数学模型

图 1 为激光切割坐标系示意图。CO<sub>2</sub> 激光以恒定的速度  $v$  沿  $x$  轴正方向对液晶玻璃基板进行切割。

假设液晶玻璃基板是均匀、各向同性的。在激光扫描过程中,激光能量迅速转化为热量。材料表面及内部的温度随即发生剧烈的变化,材料的热物性性能也随之变化。因而温度场的分析属于一个非线性瞬态热传导问题。其瞬态热传导解析方程为<sup>[14]</sup>

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

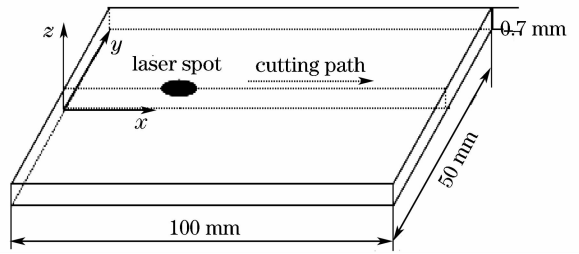


图 1 LCD 玻璃基板及坐标系

Fig. 1 LCD glass specimen and coordinate system

## 2.2 初始条件和边界条件

液晶玻璃基板在实验之前置于室温环境下,温度场的初始条件可以表示为

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

在激光加工过程中,玻璃表面通过对流方式与环境进行热交换,其对流边界条件<sup>[15]</sup>可表示为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \quad (3)$$

边界上的热流密度分布为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = I(x, y, z, t) \quad (4)$$

(1) ~ (4) 式中,  $T_0$  为室温,  $T$  为温度场函数,  $k$  为导热系数,  $\rho$  为密度,  $c$  为热容,  $n$  为边界外法线方向,  $Q(x, y, z, t)$  为体热源生热率(实验中其值为 0),  $h$  为对流换热系数,  $I(x, y, z, t)$  为热流密度。

CO<sub>2</sub> 激光为 TEM<sub>00</sub> 模,以恒定速度沿  $x$  正方向运动(如图 1 所示)。液晶玻璃对 CO<sub>2</sub> 激光吸收率极高,吸收深度小于 15  $\mu\text{m}$ ,可近似认为表面热源。其热流密度可以用高斯分布函数来表示

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

式中  $P$  为激光功率,  $r$  为照射在液晶玻璃基板上的光斑半径。根据热导方程和边界条件联立(4)和(5)式即可求得温度场分布。

# 3 实验材料与装置

实验所使用的仪器主要有 UNIVERSAL 50 W CO<sub>2</sub> 激光器,扫描电镜(SEM),CNC 精密三维工作台,Metis 红外温度测量仪等。玻璃选用的是 100 mm × 50 mm × 0.7 mm 的 Corning EAGLE XG™ 系列液晶玻璃基板,其密度为 2380 kg/m<sup>3</sup>,杨氏模量为 73.6 GPa,软化点温度为 971  $^{\circ}\text{C}$ 。

图 2 为液晶玻璃基板激光切割系统示意图。选用 CO<sub>2</sub> 激光作为加热源对其进行加热并用 Metis 红外温度测量仪监测液晶玻璃基板表面温度。

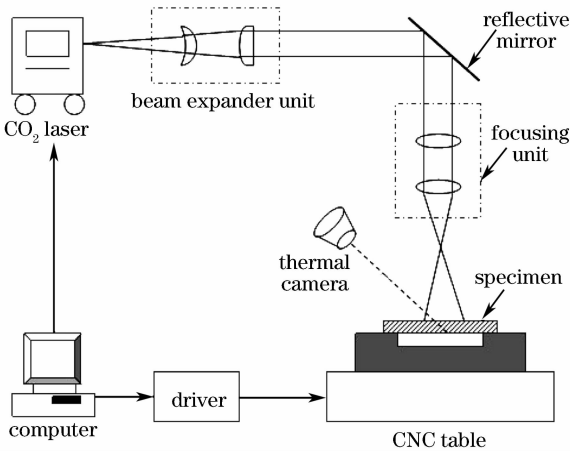


图2 激光切割系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser cutting system

表1 LCD玻璃基板随温度变化热物理参数

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

$T / ^\circ\text{C}$	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	768	896	998	1067	1110	1154	1201	1263	1301	1349	1395
$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.09	1.22	1.29	1.34	1.37	1.42	1.53	1.60	1.66	1.71	1.77

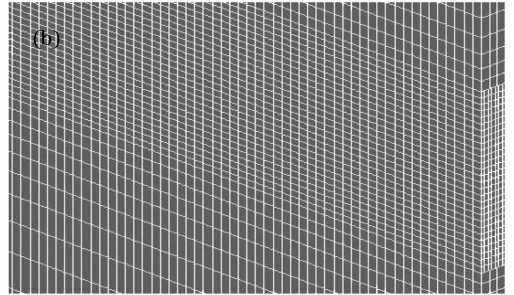
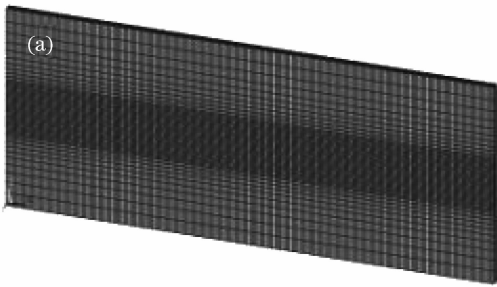


图3 三维网格图。(a) 全景网格,(b) 区域网格划分

Fig. 3 Three-dimensional grid map. (a) full view, (b) domain view

实验中选用功率为 40 W, 光斑直径为 3 mm 的激光, 以 24.4 mm/s 的切割速度进行切割实验与模拟, 并用红外温度测量仪实时监测液晶玻璃基板表面温度。如图 1 所示建立坐标系, 激光沿  $x$  轴正方向移动, 选取坐标点 (50, 0, 0.7) 研究温度随时间变化的曲线。图 4 即为所选点模拟温度与实验所测温度对比图。由图可以看出, 实验所测温度与模拟的温度吻合得非常好。

实验所得光斑中心实际温度为 920  $^\circ\text{C}$ 。从图 4 中可以看出温度的最大值有一个延迟, 在 2.05 s 并没有达到最大值, 而是再过了 0.15 s 才达到 930.1  $^\circ\text{C}$ , 这也与实验吻合得很好。这是由于温度的升高需要一个过程, 最高温度点滞后于激光照射时刻。在激光照射到材料表面之前, 基体温度维持在 25  $^\circ\text{C}$ , 在 0~1 s 的时间内, 上下表面温度没有明显变化, 这是激光还没有对它进行加热的缘故。而

## 4 数值计算与分析

选用的液晶玻璃材料随温度变化热物理参数如表 1 所示。激光从液晶玻璃基板较窄的一条边的中点开始沿平面进行切割, 由此建立三维网格模型, 如图 3 所示。在激光扫描路径范围内, 由于温度梯度和应力梯度很高, 采用 0.25 mm  $\times$  0.25 mm 的极细网格, 以满足精度要求, 而两边则采用 0.5 mm  $\times$  0.5 mm 较为稀疏的网格以减少计算时间。

用有限元软件 ANSYS 的 APDL 命令流对温度场进行求解。选用的单元类型为 8 节点 6 面体单元 SOLID70。初始温度  $T_0$  为 25  $^\circ\text{C}$ , 表面热辐射系数  $\epsilon = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ , 对流换热系数  $h = 21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

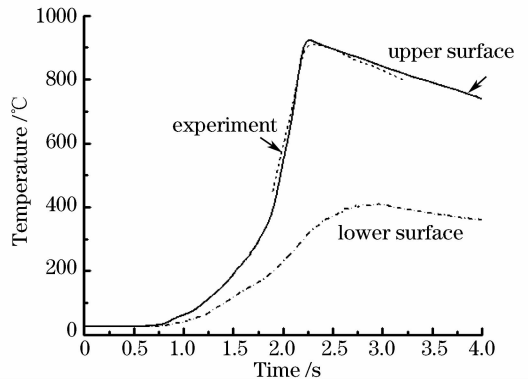


图4 LCD玻璃表面温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temperature versus time on LCD glass surface

当激光照射到该点时, 该处的温度迅速上升, 因为液晶玻璃基板的热传导率比较低使热量往下表面传导较慢, 所以此时下表面温度上升得比较缓慢。在激光束扫描过后, 其上表面温度下降比较显著, 最后维

持在一个稳定的温度,而此时下表面由于热传导温度正逐步上升,当达到最大值310.7 °C时开始下降,最终处于一个稳定的热交换状态。

图5为液晶玻璃基板上下表面温度分布图。从图中可以看出,上表面在激光作用时温度迅速升高,在光斑扫描过后温度趋于一个稳定的状态。下表面温度的上升并没有上表面那么急速,而是一个缓慢的过程,最高温度在310 °C左右并维持很长一段时间。当玻璃内部的温度趋于平衡时,上下表面温度维持在一个相对稳定的状态,温度的变化趋于缓和,此时热量的散失主要是表面热辐射和对流。

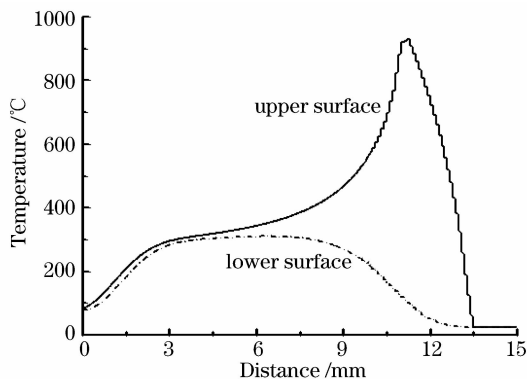


图5 0.47 s时LCD玻璃沿扫描路径的温度分布  
Fig. 5 Temperature distribution of LCD glass at 0.47 s

#### 4.1 光斑直径对切割温度的影响

在激光功率为40 W,切割速度为24.4 mm/s时,光斑直径分别取1.5,3.0和4.0 mm,LCD玻璃上表面温度分布如图6所示。光斑直径越小时,同样功率的激光照射到材料表面的功率密度越高,所产生的温度场梯度越大,表面吸收的热量也就越多。当光斑直径为1.5 mm时,光斑中心处温度达到了1192 °C,超过了玻璃的软化点温度,此时液晶玻璃表面出现熔融和烧损(如图7所示)。这进一步验证了模拟数据的可靠性,对实际切割过程中激光光斑

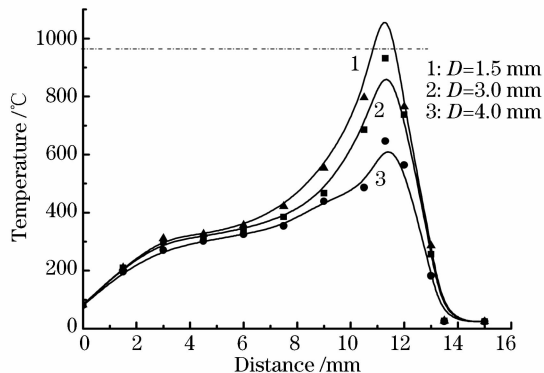


图6 光斑直径对温度的影响

Fig. 6 Impact of spot diameter on temperature

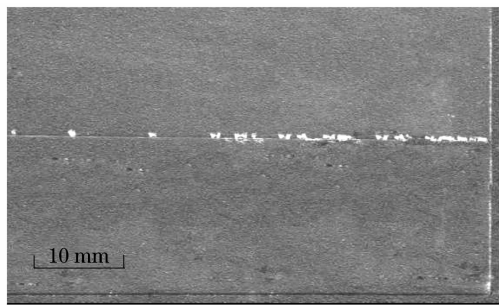


图7 部分烧损切割效果图

$P=40\text{ W}, v=24.4\text{ mm/s}, D=1.5\text{ mm}$

Fig. 7 Parts of burning loss after laser cutting

$P=40\text{ W}, v=24.4\text{ mm/s}, D=1.5\text{ mm}$

直径的选择具有一定的指导作用。当光斑直径增加到4.0 mm时,照射到材料表面的功率密度急速下降,所产生的热应力不足以达到液晶玻璃的断裂阈值,从而只在材料表面留下被加热的痕迹。

#### 4.2 激光功率对切割温度的影响

在保持切割速度24.4 mm/s和光斑直径3.0 mm不变的基础上,分别选用了30,40和50 W激光功率进行切割。其上表面温度分布如图8所示。从图中可知,在其他参数不变的情况下,功率越

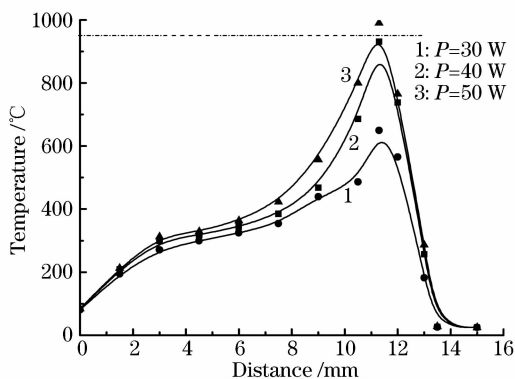


图8 激光功率对温度的影响

Fig. 8 Impact of laser power on temperature

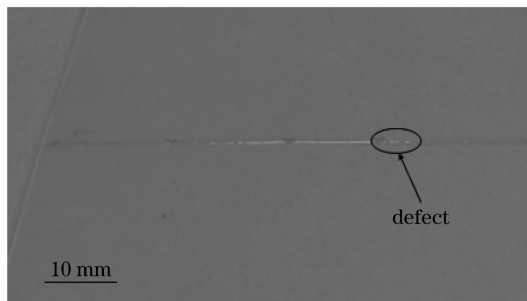


图9 部分烧损切割效果图

$P=50\text{ W}, v=24.4\text{ mm/s}, D=3.0\text{ mm}$

Fig. 9 Parts of burning loss after laser cutting

$P=50\text{ W}, v=24.4\text{ mm/s}, D=3.0\text{ mm}$

高表面的温度升高得越快,这是因为单位时间和面积内吸收的激光能量更多。在激光功率为50 W时,液晶玻璃表面温度(990.2 ℃)稍微超过玻璃的软化温度,其切割质量稍优于图7所示结果,但仍有局部烧蚀和爆裂点,如图9所示。

当功率为30 W时,理论温度为649.3 ℃,此时并未达到液晶玻璃软化点温度。以此参数指导进行

切割,得到的切割效果如图10所示。从图10(a)宏观形貌可以看出,切割路径上无明显烧蚀、熔融现象。图10(b)是选取图10(a)中切割断面的局部放大图片,可以看出切割断面光滑平直、无烧损,断面外观精美。图10(c)为切割断面SEM图片,从图中可以看出切割断面内无微裂纹,切割效果优良。

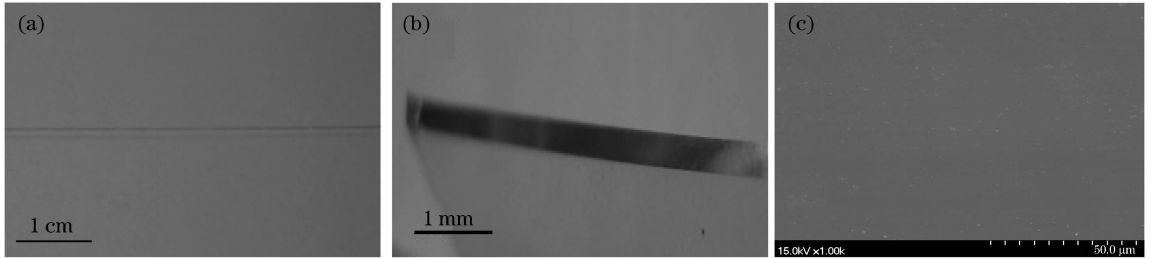


图10 激光切割效果图。(a)整体形貌,(b)断面宏观形貌,(c)断面SEM图片

Fig. 10 Photo of laser cutting. (a) full view, (b) whole morphology of profile, (c) SEM graph of profile

## 5 结 论

通过实验和数值计算的方法获得了液晶玻璃基板激光作用下的温度分布情况。对比了实验所测温度与数值计算所得温度,结果表明,测量结果与模拟结果基本吻合。实验和数值计算表明,激光光斑直径过大或过小都不宜切割,过大的激光光斑直径使能量密度不能达到液晶玻璃的断裂阈值,而过小的光斑则容易使其烧损。不同的激光参数会影响到液晶玻璃基板的温度分布。材料表面温度随着功率的增加而增加,随着光斑直径的增大而减小。数值计算结果表明,在扫描速度为24.4mm/s的情况下最优光斑直径在2.0~4.0 mm范围内,最优功率在30~46 W范围内。这些结果对激光切割液晶玻璃基板工艺选择具有一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- Jao Junke, Wang Xinbin, Li Youping. Research progress on glass cutting by laser [J]. *Glass*, 2007, **34**(4):8~12  
焦俊科,王新兵,李又平. 激光切割玻璃的研究进展[J]. *玻璃*, 2007, **34**(4):8~12
- Fu Guozhu. Laser cutting technology glass [J]. *OME Information*, 2008, **13**(7):5~11  
付国柱. 玻璃的激光切割技术[J]. *光机电信息*, 2008, **13**(7):5~11
- Zhou Shengfeng, Zeng Xiaoyan. Laser separation of brittle material [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(3):321~325  
周圣丰,曾晓雁. 激光分离脆性材料的研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(3):321~325
- F. J. Grove, D. C. Wright, F. M. Hamer. Cutting of glass with a laser beam: United States, 3543979[P]. 1970. 10. 01
- Chwan-Huei Tsai, C. S. Liou. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture [J]. *J. Manufactur. Sci. Eng.*, 2003, **125**(8):519~528
- Chwan-Huei Tsai, B. C. Lin. Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation [J]. *Int. J. Adv. Manufactur. Technol.*, 2007, **32**(3):1155~1162

- Chwan-Huei Tsai, Bo-Wen Huang. Diamond scribing and laser breaking for LCD glass substrates [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **198**(1-3):350~358
- 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(工学版)*, 2005, **39**(9):1423~1427
- Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin. Simulation of the temperature field in laser cutting of brittle materials [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(4):599~606  
叶圣麟,马军山,黄鑫. 激光切割脆性材料的温度场模拟[J]. *光学技术*, 2007, **33**(4):599~606
- Jao Junke, Wang Xinbin, Li Youping. Experimental study of cutting glass by dual CO<sub>2</sub> laser beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1808~1812  
焦俊科,王新兵,李又平. 双束CO<sub>2</sub>激光切割玻璃的实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11):1808~1812
- Yang Wei, Peng Xinhan, Zhang Jun. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11):3064~3067  
杨伟,彭信翰,张骏. 水下激光切割硅片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11):3064~3067
- Xu Guoliang, Li Yingxia, Huang Suyi *et al.*. Numerical simulation of cutting glass with double beam CO<sub>2</sub> laser [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(1):88~90  
许国良,李迎霞,黄素逸等. 采用双光束CO<sub>2</sub>激光的玻璃切割过程数值模拟[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(1):88~90
- Salman Nisar, M. A. Sheik. Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(3):318~327
- Zheng Qiguang. *Advanced Laser Manufacturing Technology* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. 34236  
郑启光. *激光先进制造技术* [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002. 34236
- Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1527~1532  
席明哲,虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1527~1532