

CO₂ 激光切割电子强化玻璃过程的有限元模拟与实验

王星罡^{1,2} 周明^{1,2} 狄建科^{1,2,3} 赵裕兴³

¹江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

²江苏省光子制造科学技术中心重点实验室, 江苏 镇江 212013; ³苏州德龙激光有限公司, 江苏 苏州 215021

摘要 在激光热裂法切割玻璃的过程中,温度起着至关重要的作用。为了准确掌握切割过程中温度场的分布,提高切割质量,提出了一种 CO₂ 激光切割玻璃基板的数值模拟方法。在 ANSYS 有限元环境下,建立了激光热应力切割电子强化玻璃的三维有限元分析模型,对温度场进行了分析。通过实验验证,得到了切割过程中温度场在不同参数下的变化及其对切割质量的影响以及温度分布与激光功率、光斑尺寸和扫描速度的非线性关系。

关键词 激光技术;CO₂ 激光;激光切割;电子强化玻璃;温度场

中图分类号 TB34;O433;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.091402

Numerical Simulation and Experiment of CO₂ Laser Cutting Electronic Strengthened Glass

Wang Xinggang^{1,2} Zhou Ming^{1,2} Di Jianke^{1,2,3} Zhao Yuxing³

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²Jiangsu Center for Photon Manufacturing Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

³Suzhou Delphi Laser Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Temperature plays a vital role in the laser cutting glass substrate process. To know the dynamic distribution of temperature and improve the cutting quality, a simulation method for temperature field is proposed. The three-dimensional finite element analytic model of the CO₂ laser thermal stress in cutting electronic strengthened glass is put forward and the temperature field is analyzed in finite element analysis software ANSYS. The changes of temperature field with different parameters and the effects on the cutting quality are studied. The relations between distribution of temperature and parameters including laser power, spot size and scanning speed are obtained. Certain guidance in selection of parameters in actual process is manifested.

Key words laser technique; CO₂ laser; laser cutting; electronic strengthened glass; temperature field

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

随着信息产业的发展,电子玻璃的需求持续增长。用于电子产品的玻璃厚度越来越薄,强度越来越高,因而对玻璃基板的切割提出了更高要求。传统的玻璃切割是采用砂轮或机械轮进行刻划。这些方法切割后的断裂面会存在微裂纹、碎屑以及残余应力等。在切割中产生的微粒会作用在导电薄膜或者线路上,造成器件的失灵。另外,切割后还必须进行打磨、抛光、清洗等后处理。传统切割方式对玻璃造成的内在破坏成为导致显示器和触摸屏失效的重要原因^[1~3]。

采用激光热应力切割则可以避免这些问题的出现。由于激光具有非接触、无污染、易控制等优点,使其

收稿日期: 2012-04-24; 收到修改稿日期: 2012-05-23; 网络出版日期: 2012-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(50975129)、江苏省普通高校博士研究生科研创新计划(CX08B_053Z)和江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)资助课题。

作者简介: 王星罡(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工技术方面的研究。E-mail: wxg_86@163.com

导师简介: 周明(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微细加工方面的研究。

E-mail: zm_laser@126.com(通信联系人)

成为当代玻璃切割的应用热点。早在 1969 年, Lumley^[4] 就提出了激光热应力切割理论。Grove 等^[5] 于 1970 年首次将热裂法应用到玻璃的切割。Kondratenko^[6] 在激光加热后, 采用喷水冷却, 来达到加快裂纹扩展的目的, 进一步改善了切割工艺。Tsai 等^[2,7] 对激光热应力切割脆性材料的机理进行了研究, 并对应力场和温度场进行了数值分析。陶伟明等^[8] 对激光辐照下钠钙玻璃的热应力进行了模拟。叶圣麟等^[9,10] 在 ANSYS 环境下, 对激光切割液晶玻璃基板的热应力场进行了有限元仿真, 得到了激光功率、光斑尺寸、切割速度等参数对温度和应力的相互关系, 并对仿真结果进行了实验验证。许国良等^[11,12] 对双光束 CO₂ 激光切割的过程进行了数值模拟。但对矩形光斑切割电子强化玻璃的有限元仿真还未见报道, 而电子玻璃切割的应用越来越广。针对目前的产业发展趋势, 本文采用 ANSYS 有限元软件, 建立了矩形激光光斑热应力切割电子强化玻璃的三维有限元分析模型, 系统验证了切割过程中温度场在不同激光参数下的变化及其对切割质量的影响。

2 理论分析

图 1 为激光热应力切割玻璃模型。假设玻璃基板为均匀、各向同性材料, 温度场的分析属于非线性瞬态热传导问题, 其瞬态热传导方程为^[13]

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

边界条件包括边界上的热流密度分布

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_x + \frac{\partial T}{\partial y}n_y + \frac{\partial T}{\partial z}n_z\right) = q_s(x, y, z, t), \quad (2)$$

和玻璃基板与环境的对流换热

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_x + \frac{\partial T}{\partial y}n_y + \frac{\partial T}{\partial z}n_z\right) = h(T_s - T_0). \quad (3)$$

(1)~(3)式中, ρ 为材料密度, c 为比热容, Q 为内热源, T 为温度场分布函数, t 为传热时间, q_s 为热流密度, h 为对流换热系数, T_s 为材料表面温度, T_0 为周围环境温度, k 为导热系数, n_x 、 n_y 、 n_z 为边界外法线的方向余弦。

实验采用波长为 10.64 μm 的远红外 CO₂ 激光器。玻璃强烈吸收波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光, 吸收率达 90% 以上。几乎所有的激光能量都被玻璃表面 1~2 μm 层所吸收, 故可近似认为表面热源。实验采用光斑为矩形光斑, 假设激光光强在 z 轴方向恒定近似为 I_0 , 则对于扫描光束截面为矩形均匀的分布, 其功率密度分布可表示为^[14]

$$P(x, y) = \frac{P_0}{4AB} \text{rect}\left(\frac{x}{2A}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{2B}\right), \quad (4)$$

式中 P_0 为激光功率, $2A$ 为光斑长度, $2B$ 为光斑宽度。根据瞬态热导方程(1)式和边界条件(2)、(3)式, 联立(4)式即可求得温度场分布。

3 实验装置与方法

采用的 CO₂ 激光切割系统如图 2 所示。CO₂ 激光器为 SYNRAD Firestar f-Series F100W, 聚焦系统采用的是 LEO 公司标准化产品。此聚焦系统是球面透镜和柱透镜结合的复合柱透镜聚焦系统, 焦距 $f = 189 \text{ mm}$ 。此系统可将光束调制成为条形光斑, 保证激光能量均匀分布, 避免能量过于集中造成玻璃破裂或产生熔融, 有利于热应力促发裂纹和传导。实验中采用的光斑尺寸为 30 mm × 0.2 mm。

运用热裂法切割玻璃, 首先球形刀轮在玻璃断裂位置始端初切一个应力源点, 然后利用矩形光束从应力点源开始沿切割路径扫描。被辐照区域吸收激光能量温度迅速升高, 与周围未受辐照区域形成巨大的温度梯度, 受热区材料发生热膨胀, 受周围材料的挤压而产生压应力, 如图 3(a) 所示; 再经过低温冷却, 材料收缩, 此时受到周围材料的拉应力, 当拉应力大于玻璃的断裂阈值时, 玻璃沿切割线产生裂纹, 如图 3(b) 所示。裂纹从应力源点开始扩展, 沿扫描路径形成一条光滑而笔直的裂缝, 从而达到切割目的。

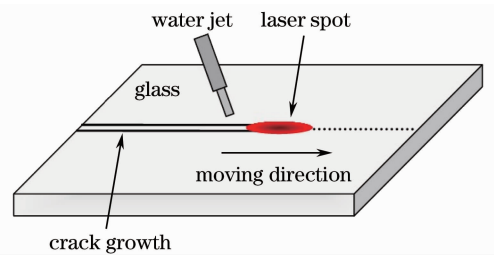


图 1 激光热应力切割玻璃模型

Fig. 1 Model of cutting glass by thermal cracking method

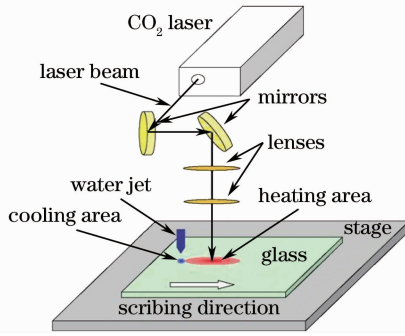
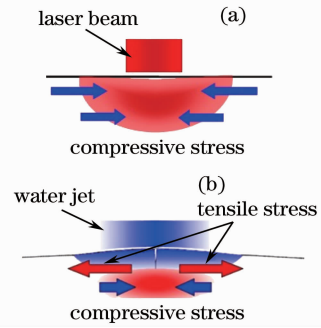
图 2 CO₂ 激光切割系统示意图Fig. 2 Schematic diagram of CO₂ laser cutting system

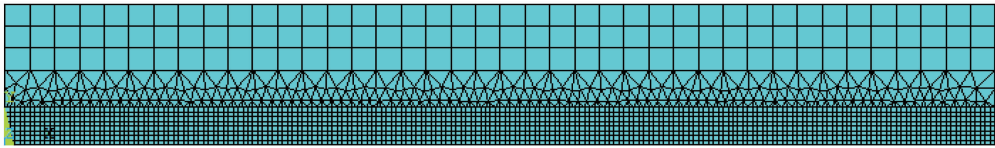
图 3 激光热裂法切割玻璃原理图

Fig. 3 Schematic of laser cutting glass mechanism

4 有限元模拟与分析

4.1 有限元模型

实验选用的材料为 0.7 mm 厚电子强化玻璃,长度 100 mm,宽度 30 mm。在模型建立上,考虑到温度分布关于 x 轴对称,所以只建立 y 轴正方向的模型。如图 4 所示,建立 100 mm × 15 mm × 0.7 mm 电子强化玻璃 ANSYS 有限元分析模型。

图 4 CO₂ 切割玻璃的 ANSYS 有限元模型Fig. 4 ANSYS finite element model of glass in CO₂ laser cutting

在网格划分上,将作用区域的网格划分得极为细密,以提高计算精度;远离作用区域的地方网格适当划分得稀疏一些,以减少节点数量,进而缩短计算时间。模拟选用 8 节点六面体单元 SOLID70。初始温度 $T_0 = 25$ °C,电子强化玻璃的具体参数如表 1 所列。

表 1 电子强化玻璃参数

Table 1 Material parameters of electronic strengthened glass

Density ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Softening temperature T / °C	Specific heat C / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal conductivity k / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Surface radiation coefficient ϵ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	Convective heat-transfer coefficient h / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
2380	971	768~1395	1.09~1.77	1	21

4.2 仿真结果及讨论

在以下实验参数下进行模拟和实验:激光功率 38 W,光斑尺寸 30 mm × 0.2 mm,矩形光束在 $t = 0$ 时从玻璃边缘以 240 mm/s 的速度开始扫描,当光束末端离开玻璃边缘时定为结束时间。实验中采用 Metis 系列 MQ11 红外测温仪测量玻璃表面温度。图 5 为 $t = 0.3$ s 时,切割路径上的温度分布曲线。可以看出,模拟温度与实际测量温度十分吻合。最高温度为 922 °C,未达到玻璃的软化温度 971 °C。玻璃切割线上的温度分布近似为高斯分布。

图 6 为扫描不同时刻,激光切割玻璃表面的仿真温度分布云图。由图可以看出,切割的最高温度为 922 °C,低于电子强化玻璃的应变点,最高温度位于矩形光斑的尾端。由于矩形光斑宽度较窄,仅为 0.2 mm,所以不会产生较大的热影响区。

图 7 为扫描线上起始点、中间点和末尾点 3 点的温

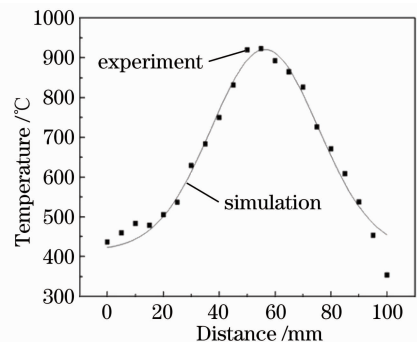


图 5 激光切割路径上温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the cutting path

度随时间变化曲线。从图中可以看出,扫描线上3点的温度变化曲线是相似的,只是相差了一个扫描时间。

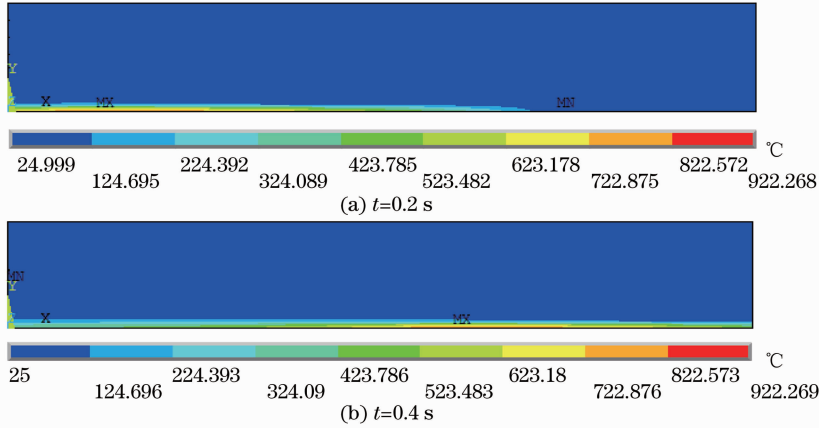


图6 不同时刻温度分布云图

Fig. 6 Temperature distributions at different time

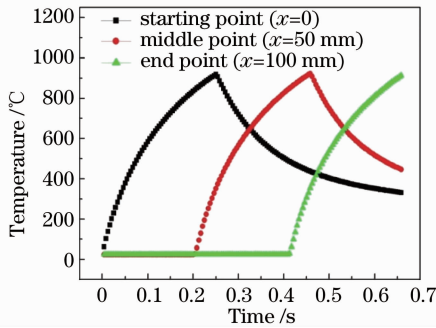


图7 扫描线上不同位置温度随时间变化曲线

Fig. 7 Thermal cycle curves at different positions

4.2.1 光斑宽度对温度和切割质量的影响

保持激光功率 38 W,切割速度 240 mm/s 不变,选用不同的光斑尺寸进行模拟和实验。光斑宽度分别取 0.1 mm,0.2 mm 和 0.4 mm。选取扫描线上中间点研究温度变化。图 8 为中间点在不同光斑宽度下的温度变化曲线。由图可以看出,光斑宽度对温度的影响十分显著。在光斑宽度为 0.1 mm 时,最高温度达到了 1240 °C,大大超过了玻璃的软化点温度,实验结果如图 9 所示。可以看出,切割线上出现严重的烧损和崩裂。随着光斑宽度加宽,温度降低很明显。宽度为 0.4 mm 时,温度迅速降低至 600 °C 以下。在后续断裂中,热应力不足,很难形成光滑的断裂面。所以,激光光斑宽度的选择对实际切割效果具有重要的影响。

4.2.2 激光功率对温度和切割质量的影响

在切割速度 240 mm/s 和光斑宽度 0.2 mm 条件下,选用不同的激光功率来进行切割。图 10 为扫描线上中间点在不同激光功率下的温度循环曲线。可以看出,随着功率增大,温度升高速度加快。在激光功率为 40 W 时,玻璃表面最高温度为 962 °C,接近玻璃的软化温度,

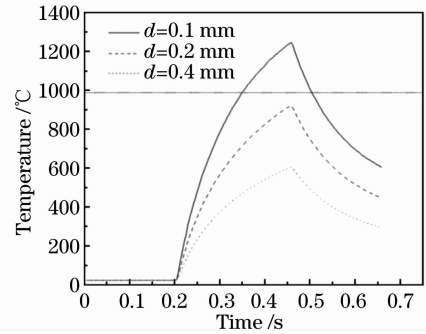


图8 不同光斑宽度下的温度变化曲线

Fig. 8 Temperature cycle curves under different spot widths

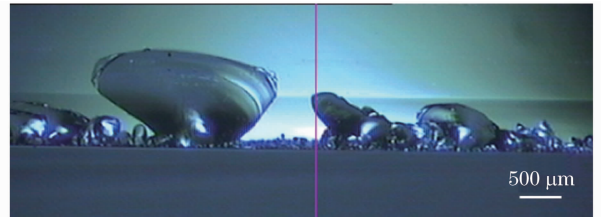


图9 严重烧损切割图

Fig. 9 Burning loss after laser cutting

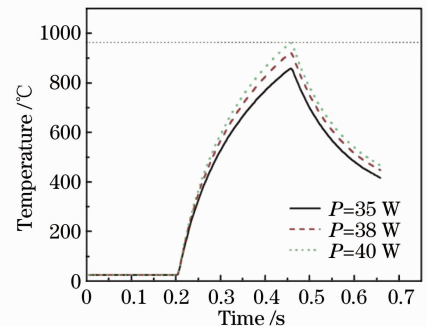


图10 不同功率下的温度变化曲线

Fig. 10 Temperature cycle curves under different laser powers

切割能量稍大,切割面波纹较大,如图 11 所示。在该参数下,当功率为 38 W 时,经实验验证,可以获得较好的切割效果。

4.2.3 扫描速度对温度和切割质量的影响

保持激光功率 38 W,光斑尺寸 $0.2\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,选用不同的切割速度进行切割。玻璃表面最高温度随切割速度的变化如图 12 所示。随着切割速度的增加,温度线性递减,这是因为单位时间内吸收的激光能量变少。切割速度过快,玻璃在后续断裂工艺中不易断裂。切割速度过慢,温度过高,造成局部烧蚀。经实验验证,在激光功率 38 W 时,选用 230~240 mm/s 的切割速度,可以取得较好的切割效果。

通过分析,采用激光功率 38 W,光斑尺寸 $0.2\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,切割速度 240 mm/s 的参数对 0.7 mm 厚的电子强化玻璃进行切割实验。切割效果图如图 13 所示。从图 13(a)可以看出玻璃边缘整齐,切割线上无烧蚀、熔融现象,产生碎屑少、微粒少,可减少电子玻璃上电路的破坏。玻璃断裂面如图 13(b)所示,可以看出,玻璃断面十分平整,上下表面都无裂纹源或者裂纹,无需二次加工。切割效果优良,激光划线影响厚度不到玻璃厚度的 20%。传统的刀轮切割玻璃效果如图 14 所示,切割刀轮在玻璃表面形成一道划痕,裂纹源比较多,而且产品在后续应用中裂纹会继续生长,直至玻璃破裂。

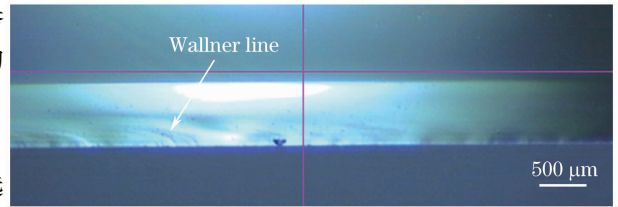


图 11 切割后存在波纹

Fig. 11 Corrugating after laser cutting

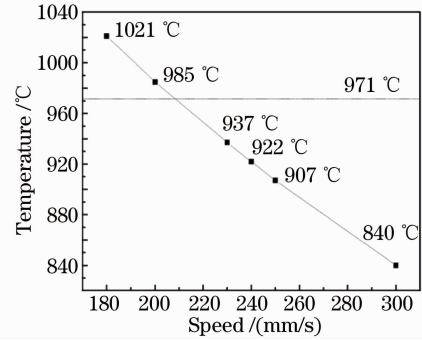


图 12 温度随切割速度的变化

Fig. 12 Temperature changes with cutting speed

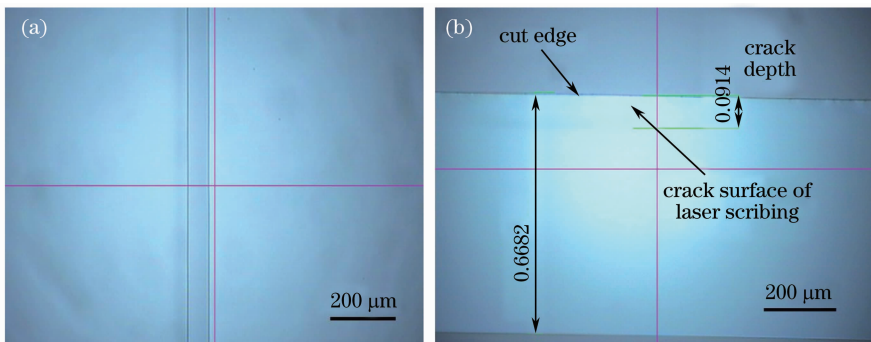


图 13 CO_2 激光切割效果图。(a)切割线;(b)玻璃纵剖面图

Fig. 13 Photo of CO_2 laser cutting. (a) Photo of cutting path; (b) photo of crack surface

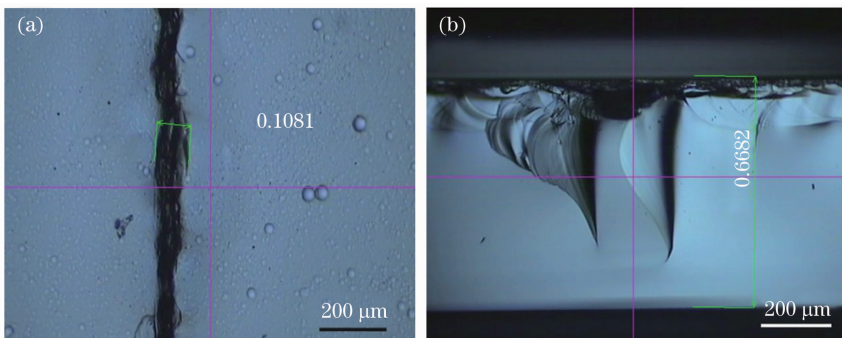


图 14 刀轮切割玻璃图。(a)切割线;(b)玻璃纵剖面图

Fig. 14 Photo of diamond scribing. (a) Photo of cutting path; (b) photo of crack surface

5 结 论

运用 ANSYS 软件,对矩形激光光斑切割电子强化玻璃基板的温度场进行了有限元仿真。分析了不同加工参数对温度和切割质量的影响,并进行了实验验证。实验和模拟结果表明,所用矩形光斑的宽度对切割质量具有较大影响,过宽或过窄都不利于切割。玻璃表面温度随着功率的增大而增加,随着光斑宽度和切割速度的增加而减小。实验和计算结果表明,对于 0.7 mm 厚的电子强化玻璃,采用激光功率 38 W,光斑尺寸为 30 mm×0.2 mm 时,选用 230~240 mm/s 的切割速度可以取得较好的切割效果。

参 考 文 献

- 1 Y. L. Kuo, J. Lin. Laser cleaving on glass sheets with multiple laser beams[J]. *Opt. Laser Engng.*, 2008, **46**(5): 388~395
- 2 C. H. Tsai, B. W. Huang. Diamond scribing and laser breaking for LCD glass substrates[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **198**(1-3): 350~358
- 3 A. E. Segall, G. Cai, R. Akarapu *et al.*. Studies on the use of offset and angled prescores for fracture control during laser machining of alumina ceramics[J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(4): 325~329
- 4 R. M. Lumley. Controlled separation of brittle materials using a laser[J]. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1969, **48**(9): 850~854
- 5 F. J. Grove, D. C. Wright, F. M. Hamer. Cutting of Glass with a Laser Beam[P]. US 3543979, 1970-12-01
- 6 V. S. Kondratenko. Method of Splitting Non-Metallic Materials[P]. US 5609284, 1997-03-11
- 7 C. H. Tsai, C. S. Liou. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture[J]. *J. Manufactur. Sci. Engng.*, 2003, **125**(8): 519~528
- 8 Tao Weiming, Bi Guoli, Zhang Huiquan *et al.*. Finite element simulation of laser-controlled thermal stress separation of sodalime glass plate[J]. *J. 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
- 9 Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin *et al.*. 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, 黄鑫等. 激光切割脆性材料的温度场模拟[J]. *光学技术*, 2007, **33**(4): 599~606
- 10 Wang Xuhuang, Yao Jianhua, Zhou Guobin *et al.*. Numerical simulation and experiment of laser cutting liquid crystal display glass substrates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603003
汪旭煌, 姚建华, 周国斌等. 液晶玻璃基板激光切割数值模拟与实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603003
- 11 Xu Guoliang, Li Yingxia, Huang Suyi *et al.*. Numerical simulation of cutting glass with double beam CO₂ laser[J]. *J. 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 CO₂ 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
- 12 Jiao Junke, Wang Xinbing, Li Youping *et al.*. Experimental study of cutting glass by dual CO₂ laser beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1808~1812
焦俊科, 王新兵, 李又平等. 双束 CO₂ 激光切割玻璃的实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1808~1812
- 13 Zheng Qiguang. *Advanced Laser Manufacturing Technology*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002
郑启光. *激光先进制造技术*[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- 14 Li Junchang. *Laser Diffraction and Thermal Effects Calculation*[M]. Beijing: Science Press, 2008
李俊昌. *激光的衍射及热作用计算*[M]. 北京: 科学出版社, 2008