

文章编号: 0258-7025(2008)11-1808-05

双束 CO₂ 激光切割玻璃的实验研究

焦俊科¹ 王新兵¹ 李又平²

(¹ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 武汉博莱技术有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了寻求更加有效的激光切割玻璃的方法, 提高玻璃的切割质量, 在激光热应力切割玻璃的基本原理的基础上, 比较了单束聚焦 CO₂ 激光与单束非聚焦 CO₂ 激光切割玻璃的优劣, 提出了双束 CO₂ 激光热应力切割的方法。先用一束低功率聚焦的 CO₂ 激光在玻璃表面划线, 而后用非聚焦的 CO₂ 激光沿着该划线进行扫描, 在热应力的作用下使玻璃沿着该划线分离, 从而实现玻璃的切割。实验分析了单束和双束 CO₂ 激光热应力切割玻璃的切割效果。结果表明, 相对于单束 CO₂ 激光切割的方法, 利用双束 CO₂ 激光进行玻璃的切割, 既可以保证切缝沿既定方向扩展又可以提高切面的光洁度, 是一种比较理想的玻璃切割方法。

关键词 激光技术; 玻璃的热应力切割; 双光束激光切割; 钠钙玻璃; CO₂ 激光

中图分类号 TG 665; TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1808

Experimental Study of Cutting Glass by Dual CO₂ Laser Beams

Jiao Junke¹ Wang Xinbing¹ Li Youping²

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Wuhan Borne Light Scie-Tech Development Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To explore a new method to improve the glass cutting quality, the principle of glass laser cutting by thermal stress was introduced. The advantages and the disadvantages of cutting glass by single focused and unfocused CO₂ laser beams were analyzed, respectively. A novel method of cutting glass by dual CO₂ laser beams was proposed, where a focused CO₂ laser was applied to pre-score a line on the glass surface and the other unfocused laser beam was applied to separate the substrate along the scoring line. The cutting qualities with single and dual laser beams were compared experimentally. The results show that cutting glass by dual laser beams is an ideal cutting method, which not only makes the cutting path in a straight line but also makes the cutting profile very smooth.

Key words laser technique; glass thermal stress cutting; dual laser beams cutting; soda-lime glass; CO₂ laser

1 引 言

玻璃材料的加工在工业加工中占有越来越重要的地位, 传统的玻璃加工都是采用机械的、接触式的方法, 如用金刚石、金属滑轮等进行玻璃切割。这些方法加工的质量和精度远不能满足工程中的某些特殊需要, 而且切割之后还要对玻璃进行打磨, 严重影响加工效率。由于激光具有高能量密度、非接触

性等优点, 人们尝试着用激光对玻璃、陶瓷等脆性材料进行加工^[1~3], 并且对激光切割进行了理论和实验研究^[4~6]。Li 等^[4]建立了激光加热玻璃的传热模型, 分析了把激光分别作为面热源和体热源处理时对玻璃温度和热应力的影响; Wei 等^[7]和 Jiao 等^[8,9]对激光切割玻璃的热效应进行了数值计算, 结果显示, 激光功率、光斑半径和切割速度对玻璃温度和热应力的影响非常显著; Tsai 等^[10,11]研究了激

收稿日期: 2008-01-18; 收到修改稿日期: 2008-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(60478028)资助项目。

作者简介: 焦俊科(1981—), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用和液晶显示玻璃切割技术的研究。

E-mail: jameshust@smail. hust. edu. cn

导师简介: 王新兵(1967—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事高功率激光器与激光加工方面的研究。

E-mail: xbwang@mail. hust. edu. cn

光作用下玻璃内部的应力分布,以及玻璃在热应力作用下的断裂情况。

目前,玻璃的激光切割主要是利用热应力切割的方法^[12~17]。为了更有效地切割厚玻璃板以及提高热应力切割玻璃速度,辅助气体(液体)被引入到玻璃切割过程中来。其原理是利用辅助气体(液体)来加剧玻璃的冷却,使之产生较大的热应力来分离玻璃,其弊端是切面容易倾斜(特别是厚玻璃的切割),裂纹扩展路径不易控制等。本文在比较单束聚焦与单束非聚焦 CO₂ 激光切割质量的基础上,提出了双束 CO₂ 激光热应力切割的方法,也即是一束聚焦的 CO₂ 激光对玻璃进行划线,另一束非聚焦的 CO₂ 激光产生热应力致使玻璃分离。实验结果表明,这种方法可以实现较高质量的玻璃切割。

2 激光热应力切割玻璃的原理

所谓激光热应力切割,就是使用低功率激光使玻璃分离,同时不造成玻璃融化的切割方法。其基本原理是利用激光引致的热应力使玻璃断裂。当 CO₂ 激光照射到玻璃表面时,90% 以上的能量被玻璃吸收,吸收深度小于 15 μm。这样玻璃表面在很短的时间内就会达到较高的温度,产生压应力,而这个应力对玻璃没有破坏作用;当激光停止对该区域的加热时,由于空气的冷却,玻璃内部就会产生较大的拉应力,致使玻璃断裂。通常情况下,玻璃自然冷却时产生的拉应力较小,而采用吹冷气或者冷却液体的方法来加剧玻璃的冷却^[16],以产生较大的拉应力,特别是在切割厚玻璃板时,冷却气体(液体)就显得特别重要。

图 1 是利用热应力切割玻璃时,温度、热应力以及玻璃断裂的发展示意图。激光在玻璃表面以适当的速度移动,在激光照射区域,由于能量的堆积会使该区域温度急剧上升并产生一定的压应力,紧随其后的是一个较大的拉应力,而玻璃就是在这个拉应力的作用下开始断裂的。随着激光的移动,玻璃会在热应力的作用下实现分离。

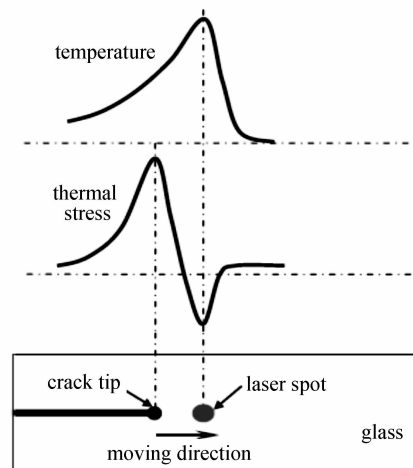


图 1 激光热应力切割玻璃的原理图

Fig. 1 Principle of glass laser cutting by thermal stress

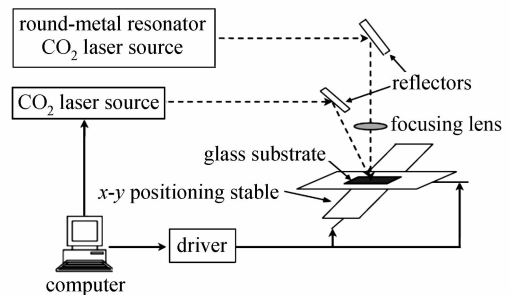


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of the experimental setup

3 实验装置与条件

实验装置如图 2 所示。实验中的激光器有武汉博莱技术有限公司生产的 500 W CO₂ 旋流激光器^[18]和 Synrad 公司生产的 50 W 射频 CO₂ 激光器。前者产生的激光通过聚焦镜作用在玻璃表面,对玻璃进行划线;后者产生的激光则是经过反射镜从侧面斜射到玻璃表面,紧随聚焦激光在玻璃表面扫描,产生热应力对玻璃进行切割。可以通过调节反射镜架的旋钮来调整两束光在玻璃表面上的距离,以得到最佳的切割效果。玻璃样板固定在升降台上,可以通过调节升降台的高低使玻璃板处在聚焦镜的焦

表 1 钠钙玻璃的物理参数

Table 1 Physical parameters of soda-lime glass

Temperature / °C	20	200	400	600	800	1000
Density / (kg · m ⁻³)	2520	—	—	—	—	—
Expansion coefficient	8.7 × 10 ⁻⁶	—	—	—	—	—
Thermal conductivity / (W · °C ⁻¹)	1.4	1.62	1.82	2.1	—	—
Heat capacity / (J / (kg · °C))	680	955	1075	1145	1195	1220
Poisson's ratio	0.165	0.173	0.177	0.182	0.186	0.194
Yang's modulus / GPa	72.9	75	77.2	78.8	80	81

点位置上;升降台固定在 xy 自动位移平台上,通过计算机对切割速度和切割路径进行控制。

玻璃板被分离后,用显微镜对切逢和切面进行观察,并用数码相机拍摄下来,进行分析比较。实验用玻璃样板的尺寸为 $75\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的钠钙玻璃板,其物理性能参数如表 1 所示。

4 实验分析

4.1 单束 CO_2 激光热应力切割

4.1.1 非聚焦 CO_2 激光热应力切割

切割原理如图 1 所示,非聚焦 CO_2 激光在玻璃表面以适当的速度扫描,玻璃在热应力的作用下实现分离。使用这种切割方法,玻璃在热应力的作用下自由断裂,切面光滑,但是裂纹的扩展方向不规则。图 3 给出了在激光功率 40 W ,切割速度 20 mm/s 下的切割效果。可以看出,断裂面基本上没有毛糙,比较光滑(图 3(a)),但裂纹在激光扫描路径附近无规则扩展,切缝弯曲而非直线(图 3(b))。解决这个问题的一种方法就是切割前在玻璃的表面进行划线,这样就可以使热应力沿着划线的方向发展,从而使玻璃沿着划线断裂。目前,划线的方法主要采用机械法,如用金刚石、金属滑轮在玻璃表面划槽等^[16,17],这些方法存在诸多弊端,如操作复杂,精确度不好控制,而且容易对玻璃产生损伤等。

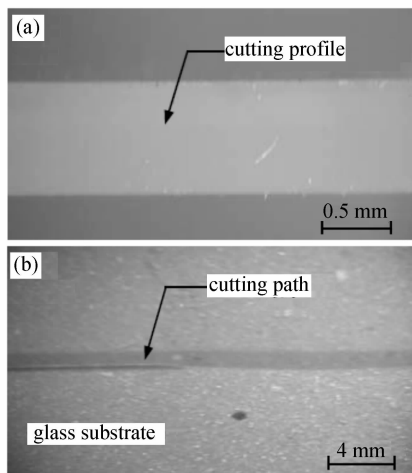


图 3 单束非聚焦 CO_2 激光切割玻璃的效果
(a) 切面图;(b) 切缝图

Fig. 3 Cutting glass by a single un-focused CO_2 laser beam. (a) cutting profile; (b) cutting path

4.1.2 单束聚焦 CO_2 激光热应力切割

切割原理是利用聚焦激光对玻璃进行扫描,在玻璃表面形成一条划线,然后利用冷却过程中产生

的热应力使玻璃沿着划线断裂。其优点是可以使断裂沿着既定方向进行,缺点是对激光功率要求比较苛刻:功率过大,划线时产生的划槽较深,划槽周围会产生很多裂纹,切面比较粗糙;功率太低,划线周围裂纹较少,但是玻璃在冷却的过程中产生的热应力较小,不能达到玻璃的断裂应力极限,不能实现玻璃的分离。这就需要找到一个合适的激光功率来进行切割,不同实验条件下寻求最佳激光功率需要多次重复实验,是一个十分繁琐的过程。

用这种方法进行玻璃切割的切割质量如图 4 所示,激光功率为 20 W ,切割速度为 20 mm/s 。这种情况下,由于激光功率大,聚焦后能量密度较高,导致划线较深,划线周围热影响比较严重,产生大量的细微裂纹。从图中可以看出,虽然切缝沿着划线方向(图 4(a)),但是切面质量明显下降,切面上方有很多裂痕和毛糙(图 4(b))。

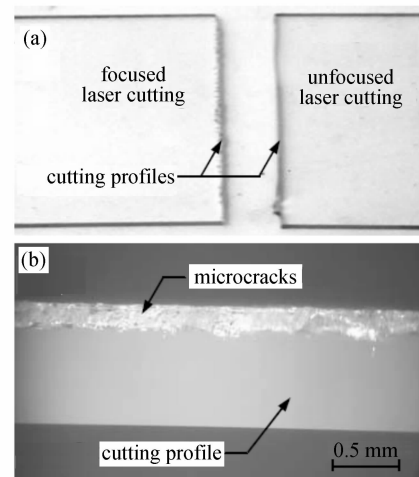


图 4 (a) 单束 CO_2 激光切割玻璃的切缝图;
(b) 单束聚焦 CO_2 激光切割玻璃的切面图

Fig. 4 (a) Cutting path of glass cut by a single CO_2 laser beam; (b) cutting profile of glass cut by a single focused CO_2 laser beam

4.2 双束 CO_2 激光切割

利用单束非聚焦 CO_2 激光对玻璃进行切割,切面光滑但断裂方向不规则(不可控制),而利用单束聚焦 CO_2 激光则恰好相反,玻璃沿划线方向断裂(可控制)但切面粗糙。如果能把二者有效地结合起来,扬长避短,既可以保证玻璃切缝的质量,又可以使玻璃沿着既定方向断裂。

双光束应力切割方法的切割原理如图 5 所示。先用一小功率的聚焦 CO_2 激光(功率小于 10 W)在玻璃表面划下一条痕迹(小功率激光既可保证划线对切割质量影响达到最小,又可以保证断裂沿划线

方向进行), 而后用一束非聚焦 CO₂ 激光(光斑直径大于 3 mm) 沿着划线方向进行扫描, 冷却过程中产生热应力使玻璃沿划线断裂, 从而实现玻璃的切割。

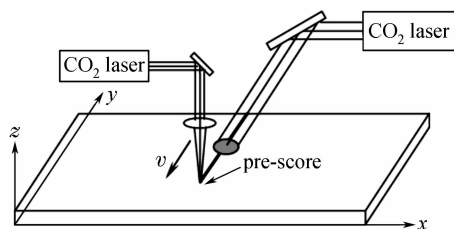


图 5 双束 CO₂ 激光切割玻璃的示意图

Fig. 5 Scheme of cutting glass by dual CO₂ laser beams

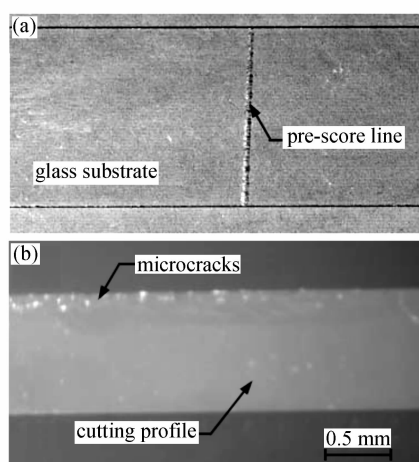


图 6 (a) 玻璃表面形成的划线; (b) 双束 CO₂ 激光热应力切割玻璃的切面图

Fig. 6 (a) Prescore line on the glass surface; (b) profile of glass cutting by dual CO₂ laser beams

这里, 旋流 CO₂ 激光器的输出功率为 8 W, 激光透过聚焦镜作用在玻璃表面, 对玻璃进行划线, 图 6(a) 是该束激光在玻璃表面的划线效果。射频 CO₂ 激光器输出功率为 30 W (光斑直径为 3.5 mm) 的激光紧跟其后对玻璃进行加热, 在热应力的作用下使玻璃沿着划线断裂。两束激光光斑中心的距离为 15 mm, 切割速度为 20 mm/s。切割效果如图 6(b) 所示, 可以看出, 在切面上方仍然存在微细裂纹, 这是由于划线激光引起的, 但切割质量已经远远超过单束聚焦 CO₂ 激光切割的效果(图 4(b))。

在双束 CO₂ 激光切割玻璃的过程中, 很多的因素都会直接影响到玻璃的切割质量。首先是聚焦 CO₂ 激光的参数, 如果功率密度过高, 划线时形成的划槽会较深, 切面会有较多的微细裂纹和毛刺; 如果功率密度过低, 则划线不明显而起不到引导裂纹扩展的效果。其次是非聚焦激光的参数, 功率过大, 则玻璃会被软化甚至融化; 功率过低, 则 CO₂ 激光

产生的应力过小而不能使玻璃分离。另外, 切割速度以及两束 CO₂ 激光之间的距离也会影响到玻璃的切割质量。因此, 在切割过程中, 参数的选取显得十分重要。

5 结 论

利用 CO₂ 激光热应力切割可以实现玻璃的分离。单束非聚焦 CO₂ 激光切割时, 切面光滑, 但裂纹扩展不规则, 切缝弯曲而非直线; 单束聚焦 CO₂ 激光切割时, 玻璃可以沿着既定方向断裂但切割质量较差, 切面粗糙。相对于这两种单束激光切割的方法, 利用双束 CO₂ 激光进行切割可以达到更好的切割效果, 不仅保证了玻璃沿着既定方向断裂, 而且切面光洁度相对于单束聚焦 CO₂ 激光得到了很大的提高。

参 考 文 献

- 1 I. Black. Laser cutting decorative glass ceramic tile [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1998, **77**(9):53~57
- 2 G. K. Chui. Laser cutting of hot glass [J]. *Ceramic Bulletin*, 1975, **54**(5):514~518
- 3 Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huadong *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1441~1445
马南钢, 王希军, 丁华东等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1441~1445
- 4 J. F. Li, L. Li, F. H. Stott. Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**:1159~1174
- 5 Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser scanning line facula [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):981~986
王云山, 杨洗陈, 刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):981~986
- 6 Shi Jingwei, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Numerical simulation of bending properties for sheet metal with different laser source modes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1303~1307
石经纬, 李俐群, 陈彦宾等. 不同激光热源模式下薄板弯曲特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1303~1307
- 7 C. Y. Wei, H. B. He, Z. Deng *et al.*. Study of thermal behaviors in CO₂ laser irradiated glass [J]. *Opt. Engineering*, 2005, **44**(4):044202
- 8 J. K. Jiao, X. B. Wang. A numerical simulation of machining glass by dual CO₂-laser beams [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(3):297~301
- 9 Jiao Junke, Wang Xinbing. Temperature distribution of moving quartz glass heated by CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1):1~4
焦俊科, 王新兵. CO₂ 激光作用下运动石英玻璃的温度分布[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1):1~4
- 10 C. H. Tsai, C. S. Liou. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, **125**(8):519~528
- 11 C. H. Tsai, B. C. Lin. Laser cutting with controlled fracture

- and pre-bending applied to LCD glass separation [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, **32**(3):1155~1162
- 12 R. M. Lumley. Controlled separation of brittle materials using a laser [J]. *Ceramic Bulletin*, 1969, **48**(9):850~854
- 13 H. Y. Zheng, T. Lee. Studies of CO₂ laser peeling of glass substrates [J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(9):2093~2097
- 14 Y. Z. Wang, Jehnming Lin. Characterization of the laser cleaving on glass sheets with a line-shape laser beam [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(9):892~899
- 15 Christopher Barnes, Pranav Shrotriya, Pal Molian. Water-assisted laser thermal shock machining of alumina [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(4):1864~1874
- 16 C. H. Tsai, B. W. Huang. Diamond scribing and laser breaking for LCD glass substrates [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2008, **198**(1-3):350~358
- 17 Yin Sumin, Zhang Leihong, Xu Renjun *et al.*. Experimental analysis of glass cutting by laser thermal stress [J]. *Engineering Science*, 2007, **19**(3):67~70
殷苏民,张雷洪,许仁军等. 激光热应力切割玻璃实验与分析 [J]. *中国工程科学*, 2007, **19**(3):67~70
- 18 Li Zaiguang, Gong Wei. The round-metal-resonator CO₂ laser with spiral flow [J]. *Engineering Science*, 2001, **3**(1):58~61
李再光,龚威. 圆形金属腔旋流二氧化碳激光器 [J]. *中国工程科学*, 2001, **3**(1):58~61