

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0130-04

# CO<sub>2</sub> 激光无缝玻璃切割工艺应用

王 中<sup>1,2</sup> 陈泽民<sup>1</sup> 李 轶<sup>2</sup> 何 里<sup>2</sup> 卢飞星<sup>\*2</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学, 湖北 武汉 430223; <sup>2</sup> 武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223)

**摘要** 介绍了一种辅助式 CO<sub>2</sub> 激光切割玻璃的方法。采用 100 W 输出功率的封离型板条 CO<sub>2</sub> 激光器直线切割 0.8 mm 厚的硼硅玻璃, 速度 450 mm/s。通过结合适当的加热和冷却工艺, 实现了玻璃的高速、高质量、精确切割及切边。通过激光切割的玻璃, 其边缘强度较传统机械切割法切割的玻璃有明显提高。通过对玻璃厚度和切割速度关系的模型计算, 表明切割速度与功率及玻璃厚度基本成线性关系, 并且与实验结果基本是一致的。分析了影响切割的因素, 表明通过增大激光器输出功率来提高切割速度理论上是可行的。

**关键词** CO<sub>2</sub> 激光; 硼硅玻璃; 无缝切割; 工艺

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0130

## Application of CO<sub>2</sub> Laser Seamless Glass Cutting

Wang Zhong<sup>1,2</sup> Chen Zeming<sup>1</sup> Li Yi<sup>2</sup> He Li<sup>2</sup> Lu Feixing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> University of Huazhong of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430223, China)  
(<sup>2</sup> Wuhan Huagong Laser Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China)

**Abstract** Assisted-CO<sub>2</sub> laser glass cutting method has been introduced. 0.8 mm thick borosilicate glass has been cut with 100 W slab CO<sub>2</sub> laser, 450 mm/s speed. With suitable heating/cooling technic, high speed, high quality, precision and accurate cutting of glass have been achieved. Side intensity of glass cut by laser method is obviously higher than traditional method. The cutting speed model has been reported and calculated, the same as experimental results. The parameters which affect cutting have been discussed. It's feasible to increase cutting speed by output power enhancement.

**Key words** CO<sub>2</sub> laser; borosilicate glass; seamless cutting; technics

## 1 引 言

玻璃的种类繁多, 应用也非常广泛<sup>[1~5]</sup>。最常见的玻璃类型可分为两类: 一类是钠钙玻璃, 也称为碱性玻璃, 一般厚度为 2~10 mm, 主要用于汽车业和建筑业; 另一类为硼硅玻璃, 或者称为非碱性玻璃, 厚度小于 1 mm, 主要用于平板显示器(FPD)和电子产品领域。现代高新技术的发展直接影响着玻璃工业的加工过程和最终产品的应用。传统的玻璃和玻璃制品机械切割方式已很难满足微裂及边缘质量方面的要求, 其最大的缺点是需要对加工后的边缘进行再处理。利用 CO<sub>2</sub> 激光实现无缝可控玻璃切割新工艺已得到成熟应用, 无缝激光玻璃切割工艺流程如下: 1) 用激光束加热玻璃表面; 2) 玻璃表层的

压缩应力加大, 但不损坏其表面; 3) 冷却剂冷却切割线表面; 4) 温度的骤然变化使玻璃表面产生较高的张应力; 5) 在玻璃板上形成初裂。激光玻璃切割采用可控玻璃开裂技术, 将加热与冷却相结合, 不仅能实现高质量的切割边缘, 而且还尽可能减少了微裂问题。同时, 使用激光技术无需额外的边缘加工技术就能去除微裂, 不仅提高了工作效率, 而且改进了边缘加工质量, 从而带来了可观的经济优势。此外, 省略了机械加工所需的打磨和抛光工艺后, 制造成本也可降低 75% 左右。

本文采用 100 W 板条放电的封离型 CO<sub>2</sub> 激光器, 实现了硼硅玻璃激光无缝切割工艺的应用。

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2007BAQ00120)资助课题。

**作者简介:** 王 中(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事激光技术应用方面的研究。E-mail: wz@hgtech.com

\* 通信联系人。E-mail: lfx@hglaser.com

## 2 实 验

### 2.1 设备

实验光路图如图 1 所示。激光器为美国 SYNRAD 公司 EVO100 封离型 CO<sub>2</sub> 激光器,最大功率为 100 W,激光模式为基模,输出光斑直径为 4 mm;采用 3 倍扩束镜;聚焦镜  $f=400$  mm;CO<sub>2</sub> 激光器的波长为 10.6  $\mu\text{m}$ ,能有效地被玻璃吸收。封离型 CO<sub>2</sub> 激光器适合于处理非金属材料。激光器完全封离,不需要气体补充,不需要维修和定期维护。激光光束质量好,可以被聚焦到很小的点,输出功率范围在数十到数百瓦之间,从而显著地提高加工效率和切割质量。板条 CO<sub>2</sub> 激光器的输出脉冲能量、脉宽以及重复频率等都实时可控,而不影响光束的聚焦。这个优点对于玻璃切割来说是非常重要的,意味着激光加工的参数可以根据不同种类、不同厚度的玻璃的温度特性进行实时优化。

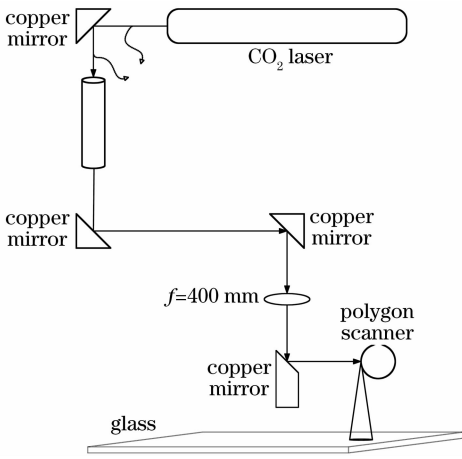


图 1 实验装置图

Fig.1 Schematic of experimental setup

### 2.2 方法

本文使用平均输出功率为 100 W 的 CO<sub>2</sub> 激光器,通过裂纹控制法实现了硼硅玻璃的激光切割。利用这种方法进行玻璃切割的原理如图 2。第一步对玻璃表面进行激光加热,玻璃强烈地吸收 10.6  $\mu\text{m}$  的激光,几乎所有的激光能量都被玻璃表面 10  $\mu\text{m}$  左右的深度所吸收。同时,通过光束整形在玻璃表面形成椭圆聚焦点,保证了激光能量在切割线两侧的均匀和最优化分布。较高的能量会使该处的温度急剧升高,选择合适的移动速度,既保证有足够的激光热量在玻璃上形成局部的压应力(沿设定的切割线方向),又不会使玻璃产生破裂;第二步,对该区域进行急剧的冷却,一般采用冷却液,急剧的降温会使玻璃表面产生较大的温度梯度和较大的拉应力,使玻

璃沿着应力最大的方向产生断裂,实现玻璃的切割。

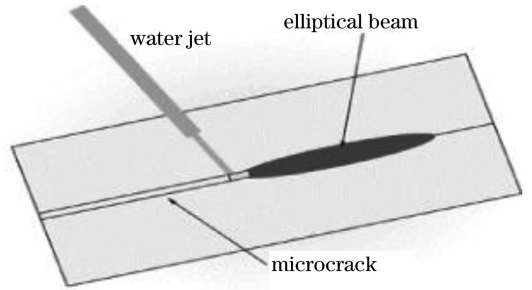


图 2 辅助式 CO<sub>2</sub> 激光玻璃切割示意图

Fig.2 Schematic diagram of assisted-CO<sub>2</sub> laser glass cutting

激光玻璃切割中的淬火气/水嘴是关键部件。随着激光聚焦点的移动,淬火气/水嘴将冷空气/水吹到玻璃表面,对受热区域进行快速淬火,加热源和冷却源的存在会产生一个应力场,它在形成裂缝前可立即削弱玻璃,从而形成一条光滑而笔直的裂缝(见图 2)。玻璃将沿着应力最大的方向产生断裂,从而将玻璃沿着设定的方向分离<sup>[1~5]</sup>。

对于不同厚度玻璃的切割,淬火嘴要与激光束保持一个合适的距离,在裂纹扩展过程中,如果裂纹得不到很好的控制,就会严重影响到切割质量,甚至使切割失败。一个很好的裂纹控制方法是切割前在玻璃的表面进行划线,使玻璃沿着划线的方向产生断裂。在本文的实验系统中,首先用机械法在切割线的起点划出微小的起始裂痕,再用激光沿着裂痕切割,同时吹气。选择不同的激光功率、扫描速度等加工参数,应力引致的断裂深度可达 100  $\mu\text{m}$  到数毫米。

### 2.3 材料

玻璃种类繁多、应用广泛,按玻璃制造产业可分为五个不同领域,如表 1 所示。

表 1 玻璃类型

Table 1 Glass type

| Industry            | Glass thickness /mm | Glass type                   |
|---------------------|---------------------|------------------------------|
| Construction        | 4~10                | Sodium calcium               |
| Automotive          | 1.6~4               | Sodium calcium               |
| Medical professions | 1                   | Sodium calcium, Borosilicate |
| FPD                 | 0.3~1.1             | Borosilicate                 |
| Electronics         | 0.05~0.5            | Borosilicate                 |

本实验材料是厚度小于 1 mm 的硼硅玻璃,主要用于平板显示器与电子产品领域。目前,对该类玻璃切割的需求越来越多,传统工艺已经很难满足微裂及边缘质量方面的要求,而利用激光切割较好

地满足了硼硅玻璃的加工工艺要求。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 边缘质量

传统机械切割通常用砂轮或机械轮在玻璃上进行刻划,由切割方向产生的切向张力使玻璃沿着划痕裂开。传统方法切割的边缘不平滑、有微小裂痕、玻璃的切割边缘上存在应力及碎屑等。传统切割的后续工序包括切割边缘的打磨、抛光或者热处理等,目的是提高边缘强度。由于机械加工中需要辅助剂辅助切割,辅助剂可能粘在玻璃边缘,还需要用水或超声波清洗。后续处理工序以及低成品率(发生不确定的裂痕)等都将增加玻璃制品的成本。

本实验使用 100 W 封离型 CO<sub>2</sub> 激光器切割厚度为 0.8 mm 的硼硅玻璃,速度为 450 mm/s。玻璃切边断面放大照片如图 3(a)、图 3(b),200×CCD 放大拍摄,玻璃上方切边放大照片如图 3(c)、图 3(d)拍摄,100×CCD 放大拍摄。

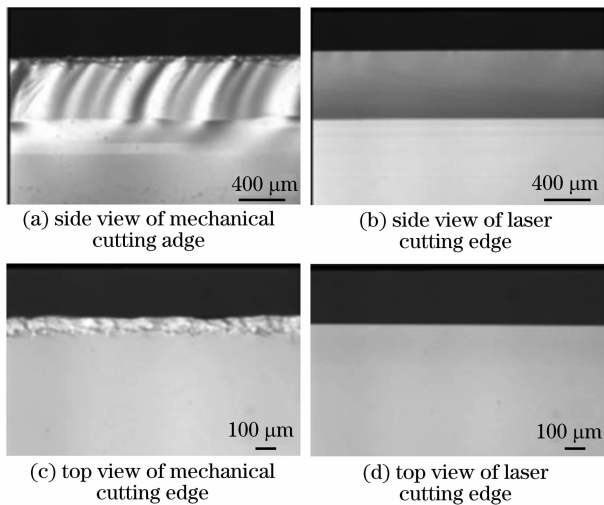


图 3 切割边缘质量比较

Fig. 3 Comparing of cutting edge quality

图 3(b)、图 3(d)中横断面上无任何纹理,玻璃切割的边缘干净没有裂片和裂痕,不需要后续处理工序。因为激光是非接触工具,没有工具的磨损问题,从而可保证持续、均匀的切割厚度和边缘质量。

使用金属轮或金刚石砂轮进行切割的边缘,沿着切割线存在各种残余张力成份和很多微小的裂痕,如图 3(a)、图 3(c)所示,图 3(a)中玻璃的横断面上可以看到清晰的纹理,图 3(c)中边缘非常粗糙。对于许多应用来说,传统切割的玻璃需要打磨切割边缘。激光切割后的边缘平均粗糙度(Ra)小于 0.5 μm,边缘质量明显优于传统机械加工。

#### 3.2 边缘强度

激光切割技术可避免侧面裂缝,同时由于加热/淬火过程中的自然回火效应不仅边缘的冲击强度加强,切割边缘强度通常也可以提高 80%,从而显著改善了部件抗加工损坏的能力。

实验表明,传统方法切割的玻璃边缘强度远低于激光切割的玻璃,如图 4 所示,图 4(a)为传统切割法处理的玻璃,图 4(b)为激光切割的玻璃,在同样压力下,图 4(a)中的玻璃已具有一定的曲度;图 4(b)中无任何变化,说明图 4(b)中玻璃的边缘强度远大于图 4(a)。

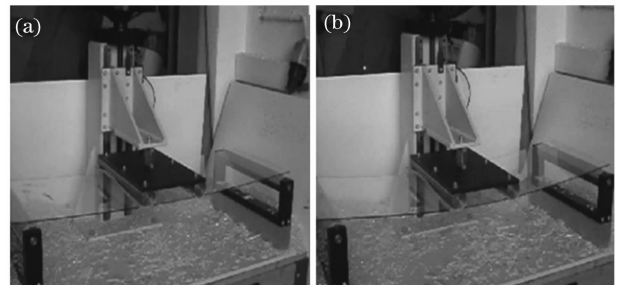


图 4 (a) 机械切割; (b) 激光切割

Fig. 4 (a) Mechanical cutting; (b) laser cutting

#### 3.3 厚度和切割速度的关系

限制切割速度主要有 3 个因素<sup>[6~10]</sup>:玻璃厚度、材料热膨胀系数以及激光器的输出功率。在本实验中,使用 100 W 输出功率的 CO<sub>2</sub> 激光器切割热膨胀系数  $\alpha = 7.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、厚度为 0.8 mm 的玻璃,直线切割,速度为 450 mm/s。样品放大照片如图 3 所示。切割速度与功率的参数模型如下式<sup>[11,12]</sup>所示。

$$P/V_{\max} = \rho q h d / \alpha,$$

式中  $P$  为激光功率, $V$  为切割速度, $\rho$  为玻璃密度, $q$  为切割中玻璃吸收的热量, $h$  为玻璃厚度, $d$  为切缝宽度, $\alpha$  为热膨胀系数。取  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ ,  $q = c\Delta T = 8 \text{ kJ/kg}$ ,  $d = 0.1 \text{ mm}$ ,  $P$  与  $V$  关系曲线为线性关系,如图 5 所示,可以看到,当玻璃厚度一定时,切割速

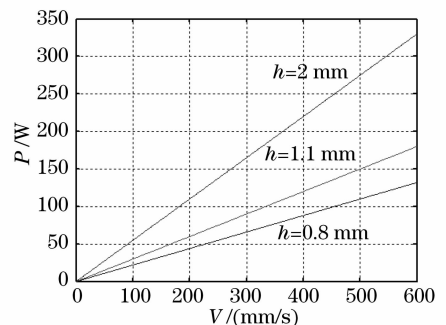


图 5  $P$ - $V$  关系曲线

Fig. 5  $P$ - $V$  curve

度与功率成正比,厚度越大,曲线斜率越大,这是由于切割所需能量增大导致。

### 3.4 结果与分析

通过裂纹控制法实现了硼硅玻璃的激光切割,切割边缘整齐无碎裂;较传统方式切割的玻璃,边缘强度更高。虽然传统方法切割同样厚度同种玻璃的速度可达 1000 mm/s,但考虑到激光切割的经济性和质量优势,切割速度上的差异基本可以接受。而进一步的加工过程优化以及采用更高输出功率的激光器进行切割都会容易地将加工速度提高 2 至 3 倍。

通过对玻璃厚度和切割速度关系的模型计算,表明切割速度与功率及玻璃厚度基本成正比,为线性关系。通过增大激光器输出功率来提高切割速度理论上是可行的。

## 4 结 论

使用 100 W 输出功率的封离型板条 CO<sub>2</sub> 激光器直线切割厚度为 0.8 mm 的玻璃,速度为 450 mm/s,得到了理想的切割结果。切割边缘光滑,没有微小裂片和裂痕;讨论了激光切割玻璃的边缘强度相比传统切割玻璃的显著提高;从理论上计算了此时的最大速度与激光功率间的关系,与实验结果基本是一致的。

近期,激光切割已在 CRTS、平板显示以及汽车的风挡玻璃等的切割等应用领域中显示了强大的技术优势。长远来说,激光引致的分离技术必将在多种玻璃的切割应用中取代传统机械法,应用激光引致的分离技术将成为必然的趋势。

### 参 考 文 献

1 Black I. Laser cutting decorative glass ceramic tile[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1998, **77**(9): 53~57

- 2 Chui G K. Laser cutting of hot glass[J]. *Ceramic Bulletin*, 1975, **54**(5): 514~518
- 3 Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu *et al.*. Theoretical analysis of temperature distributions of solid materials irradiated by high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10): 1225~1228  
彭玉峰,盛朝霞,张 虎等. 激光辐照下固体材料的温度分布理论[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(10): 1225~1228
- 4 Wei C Y, He H B, Deng G *et al.*. Study of thermal behaviors in CO<sub>2</sub> laser irradiated glass[J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(4): 044202
- 5 Tian W X, Wilson K S C. Temperature prediction for CO<sub>2</sub> laser heating of moving glass rods[J]. *Optics and Laser Technology*, 2004, **36**(2): 131~137
- 6 Zheng Q G. Laser Advanced Manufacture [M]. Wuhan Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. 34~40  
郑启光. 激光先进制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 34~36
- 7 Yuan Hong, Zhao Jianheng, Tan Fuli *et al.*. Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 681~684  
袁 红,赵剑衡,谭福利等. 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5): 681~684
- 8 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
- 9 Jin Huaman. Measure and calculate the temperature of glass heated by CO<sub>2</sub> laser[J]. *Translations of Overseas Building Materials*, 1997, (1): 43~48  
金花漫. 在 CO<sub>2</sub> 激光辐射下玻璃温度变化的测量和计算问题[J]. *国外建材译丛*, 1997, (1): 43~48
- 10 Li Junchang. Laser's Diffractive and Thermal Effect Calculation [M]. Bering: Science Press, 2002. 352~366  
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 352~366
- 11 Atannasov P A, Gendjov S I. Laser cutting of glass tubing—a theoretical model[J]. *J. Phys. D:Appl. Phys.*, 1987, **20**(5): 597~601
- 12 Xu Guoliang, Li Yingxia. Parameters model for laser glass cutting[J]. *Huazhong University of Science and Technology*, 2007, **35**(7): 48~50  
许国良,李迎霞. 激光切割玻璃的参数模型[J]. *华中科技大学学报(自然版)*, 2007, **35**(7): 48~50