

文章编号: 1001-3806(2006)04-0406-03

## 石英玻璃薄板激光精密切割技术

袁明权, 凌宏芝, 彭 勃

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了实现石英玻璃薄板的激光精密切割, 对石英玻璃薄板激光切割原理进行了探讨, 提出了依照材料光学透过率特性来选择激光切割用激光源的方法。通过对材料光学透过率的特性分析可以得知, 用来切割石英玻璃的激光源波长应在  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  范围内。对石英玻璃薄板的激光精密切割进行了实验验证, 实验结果表明, 激光精密切割技术能够较好地运用于石英玻璃薄板的精密切割加工中, 其加工精度优于  $20\mu\text{m}$ 、中心对称度小于  $3\mu\text{m}$ 。这一结果和激光源选择方法对石英材料激光精密加工技术研究及其设备研制是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 激光精密切割; 石英玻璃薄板; 光学吸收率

**中图分类号:** TG485; TN249 **文献标识码:** A

### Precision laser cutting technique for thin quartz glass plates

YUAN Ming-quan, LING Hong-zhi, PENG Bo

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** For laser cutting thin quartz glass plates precisely, its principle is discussed, how to choose laser cutting equipment is introduced according to the quartz glass' optical transmissivity. I.e., the laser's wave length should be in  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  for laser cutting application. The specimen laser cutting experiments show that it is feasible to cut thin quartz glass plates precisely with laser cutting technique with accuracy of better than  $20\mu\text{m}$  and central symmetry of less than  $3\mu\text{m}$ . The experimental results and choosing method are helpful for precision quartz laser cutting application and development of laser cutting equipment.

**Key words:** laser technique; precision laser cutting; thin quartz glass plates; optical absorptivity

## 引 言

激光材料加工涉及范围很广, 材料的烧结<sup>[1]</sup>、打孔<sup>[2]</sup>、打标<sup>[3]</sup>、切割<sup>[4]</sup>、焊接<sup>[5]</sup>、表面改性<sup>[6]</sup>和化学气相沉积<sup>[7]</sup>等都已把激光作为一种必不可少的能源。

激光切割的工业应用始于 20 世纪 70 年代初, 最初用在硬木板上切非穿透槽、嵌刀片、制造冲剪纸箱板的模具。随着激光器件和加工技术的进步, 其应用领域逐步扩大到各种金属和非金属的切割<sup>[8]</sup>。激光精密切割加工一般以薄板 ( $0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$ ) 为主要对象, 其加工精度一般在十微米级<sup>[9~14]</sup>。

石英玻璃属于高硬度、高熔点的脆性透明材料, 一般加工方法很难满足加工要求。现有的石英玻璃加工方法 (例如机械研磨、磨料喷射加工、超声落料、化学腐蚀等) 均存在各种缺陷, 改进现有的石英玻璃加工

技术在实际生产中十分重要。将激光精密切割技术应用于石英玻璃加工中, 可以大大地改善石英玻璃加工的表面质量并提高加工的生产率。

作者从石英玻璃光学透过率特性角度讨论了激光精密切割石英玻璃薄板的可行性, 总结了激光精密切割石英玻璃薄板的相关工艺技巧, 通过试验验证了激光精密切割技术运用于石英玻璃薄板精密切割加工中的可行性。

## 1 石英玻璃薄板激光切割原理

激光切割石英玻璃时的温度场和应力场问题可看作是半无限 ( $x \geq 0$ ) 固体中在密度为  $\rho_0$  的轴对称光通量作用下的温度场和弹性应力场的问题。

石英玻璃沿  $x$  轴吸收辐射遵从布格-朗别特定律, 且辐射在径向上是按高斯定律分布。用不动的激光束作用于石英玻璃, 在时间  $t$  内所产生的温度场可用柱面坐标系解导热性方程表述<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_0 \frac{\alpha a}{\kappa} e^{-\beta r^2} e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为吸收系数,  $\beta = v_0/a$ ,  $v_0$  为边界运动速度,  $\kappa$ ,  $a$  分别是导热系数和导温系数。

基金项目: 国防科技“十五”预研基金重点资助项目 (421010401)

作者简介: 袁明权 (1972-), 男, 工学硕士, 助理研究员, 目前主要从事惯性传感器与 MEMS 技术研究工作。

E-mail: mq\_yuan@163.com

收稿日期: 2005-07-16; 收到修改稿日期: 2006-01-05

将起始条件和边界条件代入 (1) 式求解, 可以推导出以下结果 ( $T_0$  为初始温度):

$$T(r, x, t) = T_0 + q_0 \frac{\alpha d}{\kappa} \left( 1 + \frac{4\beta^2 r^2}{\alpha - 4\beta} \right) e^{-\beta^2 t} e^{-\alpha x} \quad (2)$$

在激光辐射束的轴上 ( $r=0$ ), 温度分布公式为:

$$T(x, t) = T_0 + q_0 \frac{\alpha d}{\kappa} e^{-\alpha x} e^{-\beta^2 t} \quad (3)$$

由上式可知, 石英玻璃在受激光作用后温度  $T$  与中心纵向距离  $x$  呈负指数关系, 即  $T$  随着  $x$  增大而急速降低。由此, 石英玻璃在受到激光作用后会在作用点附近产生一梯度很大的温度场。石英玻璃表面温度较高要发生膨胀, 而内层温度较低要阻止其膨胀。结果, 内层产生沿径向的挤压应力, 表层则相对内层产生拉应力。此应力的作用超过石英玻璃的强度极限, 就会造成材料的破坏并形成裂缝。因为最大的机械变形区域是激光束加热区, 只要保持均衡的加热梯度, 激光束可引导裂缝在任何需要方向产生, 由此形成所需要的切割加工图形轮廓。

## 2 激光切割设备选择

材料能够实现激光切割的首要条件是该材料对切割用激光的吸收要好, 也即材料对切割用激光的光学吸收率要高、光学透过率要低。

待切割材料为上海石英玻璃厂生产的 JGS1-1 远紫外光学石英玻璃薄板, 其厚度为 0.9mm。

通过对待切割石英材料样品进行光学透射谱线测试, 得到了石英材料样品在不同波长下的光学透过率曲线, 见图 1。

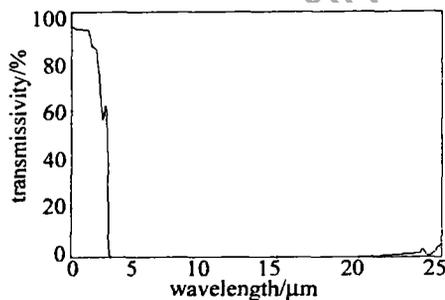


Fig 1 Optical transmissivity of JGS1-1 quartz glass

从图 1 可知, JGS1-1 石英玻璃对波长小于  $5\mu\text{m}$  的光来说, 其光学透过率很高, 对波长在  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  范围内的光而言, 其光学透过率接近于 0; 也即 JGS1-1 石英玻璃对波长在  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  范围内的光而言, 其光学吸收率很高, 要实现 JGS1-1 石英玻璃的激光切割就需要选择波长在  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  范围内的激光源。 $\text{CO}_2$  激光器产生的激光波长为  $10.6\mu\text{m}$ , 可被 JGS1-1 石英玻璃较好地吸收, 因此, 选用  $\text{CO}_2$  激光加工数控机床进行 JGS1-1 石英玻璃的切割是可行的。

## 3 石英玻璃薄板激光精密切割实验

### 3.1 切割实验图形与设计尺寸

运用美国 Lumonics 公司生产的 Versa-Lase V500/1044 型  $\text{CO}_2$  激光加工数控机床进行了 JGS1-1 石英玻璃薄板的激光精密切割试验。

激光精密切割样品设计图形与尺寸见图 2。

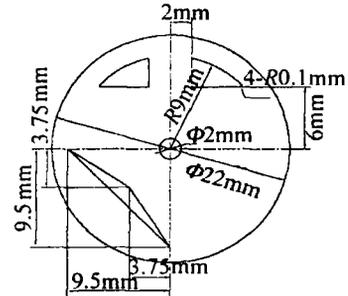


Fig 2 Pattern of laser cutting specimen

### 3.2 切割程序编制和工艺技巧

切割程序的编制和工艺技巧对切割质量有直接的影响, 正确、有效的工艺技巧是实现激光精密切割加工的重要保证。对于不同的激光加工数控机床来说, 切割程序的编制有一定差别; 在进行切割程序编制之前需要熟悉所使用的激光加工数控机床的程序编制语言。在编制程序时需要综合考虑激光精密切割加工的各种影响因素, 从而选择出所用的激光精密切割加工路径。下面是本次激光精密切割加工所涉及的一些工艺技巧。

(1) 设置辅助切割路径是保证零件切割质量的重要工艺措施<sup>[8]</sup>。辅助切割路径的选择要考虑有利于提高工件完整性和切割质量。图 3 中给出了几种辅助切割路径选择方法。

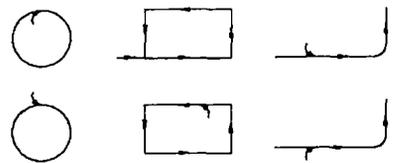


Fig 3 Some assistant paths about laser cutting

(2) 加工路径选择要考虑热量散发、保持热平衡状态, 防止热平衡的破坏对切割质量带来的不利影响。

(3) 激光加工过程中, 激光束焦点需要尽可能聚集在加工方向的材料中心。

(4) 通过工件试切割后实测尺寸误差进行修正, 在切割中根据不同情况进行工件尺寸的切缝补偿。

(5) 对工件尖角等易烧损处, 切割时要绕圈进行, 避免热量在尖角处集中。

### 3.3 试验结果与数据分析

激光精密切割所得样品如图 4 所示。切割样品的表面质量与切割面质量较好, 没有出现裂痕和崩角。

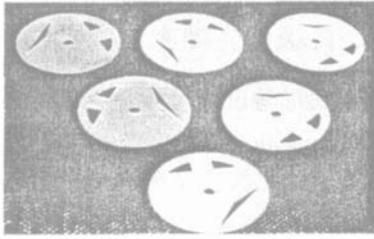


Fig 4 The samples of precision laser cutting thin quartz glass plates

利用大型工具显微镜对激光精密切割所得样品内圆、外圆以及两个扇形孔边长尺寸进行了测量。样品内、外圆直径及其中心对称度数据见表 1。样品扇形孔边长尺寸数据见表 2。

Table 1 The internal diameter, exterior diameter and central symmetry

No	exterior/mm		internal/mm	
	diameter	central symmetry	diameter	central symmetry
1	22.013	0.002	2.006	0.002
2	22.009	0.001	2.004	0.001
3	22.017	0.003	2.009	0.003
4	22.005	0.001	2.002	0.001
5	21.998	0.002	1.999	0.002
6	22.004	0.002	2.001	0.002

Table 2 Fan-shaped hole's side length

No	fan-shaped hole 1		fan-shaped hole 2	
	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm
1	4.487	2.656	4.488	2.656
2	4.485	2.653	4.487	2.657
3	4.491	2.659	4.489	2.658
4	4.483	2.649	4.482	2.650
5	4.479	2.648	4.478	2.648
6	4.482	2.650	4.480	2.649

从图 2可知:样品外圆直径设计尺寸为 22mm、内圆直径设计尺寸为 2mm。由表 1数据可得:样品内、外圆直径加工精度优于  $20\mu\text{m}$ ,中心对称度小于  $3\mu\text{m}$ 。从图 2数据可以计算出切割样品扇形孔边长设计值为 4.481mm和 2.649mm。与表 2数据对比后可知:样品扇形孔边长加工精度优于  $15\mu\text{m}$ 。

#### 4 结束语

通过对材料光学透过率的特性分析可以得知,用来切割石英玻璃的激光源波长应在  $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  范围内。

为了保证石英玻璃薄板激光切割能够达到较高的加工精度,除了选择适合的激光数控加工机床外,还需

要重视激光加工过程中的工艺技艺。

试验表明,激光精密切割技术能够较好地运用于石英玻璃薄板的精密切割加工中,其加工精度优于  $20\mu\text{m}$ 、中心对称度小于  $3\mu\text{m}$ 。

由于激光精密切割薄板型石英玻璃存在热影响区,在工件的切缝边缘必然存在着一定的残余应力。因此,对应力有特殊要求的工件需要在激光精密切割后进行残余应力消除工作。

#### 参 考 文 献

- [1] XIE X Zh, LIL J, ZHANG Y *et al* Newly developed technique of laser cutting thick metal plates [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (3): 251 ~ 254 (in Chinese).
- [2] WANG X D, ZHAO X M, WANG Sh L *et al* The study on dynamic and high speed laser drilling system [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (6): 563 ~ 566 (in Chinese).
- [3] WEN X M, SHIM X, YANG X L. Study of marking to enamelware with excimer laser [J]. *Laser Technology*, 2000, 24 (1): 9 ~ 11 (in Chinese).
- [4] LEIH D, WANG B R, HUANG W R *et al* Laser conducting-limited welding of thin-wall HR-2 steel parts [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (1): 28 ~ 31, 34 (in Chinese).
- [5] GUO Z X, SHEN P, HU J D *et al* A study on laser reaction sintering of Cu-Al system powder compacts [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (1): 11 ~ 13 (in Chinese).
- [6] WANG A H, XIE Ch Sh, WU R. Present status and prospect of laser surface modification of refractory materials [J]. *Laser Technology*, 2002, 26 (6): 413 ~ 415, 418 (in Chinese).
- [7] JI G Sh, ZHANG Y K. Laser polishing of chemically vapor-deposited diamond films [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (2): 106 ~ 109 (in Chinese).
- [8] ZHANG Y K, ZHOU J Zh, YE Y X. *Laser processing technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 12 ~ 15, 23 ~ 26 (in Chinese).
- [9] ZHANG Y J, FANG M G. The study on the solid laser precise cutting technology [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34 (3): 192 ~ 193 (in Chinese).
- [10] LI X Y, ZENG X Y, LU Y *et al* Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, A28 (12): 1125 ~ 1129 (in Chinese).
- [11] CAO B, ZHANG H O, WANG G L. The study on metal parts fabricating by laser precision cutting [J]. *New Technology & New Process*, 2004 (9): 40 ~ 41 (in Chinese).
- [12] CHEN Zh. Laser precision process technology and its applications [J]. *New Technology & New Process*, 2002 (8): 27 ~ 29 (in Chinese).
- [13] JIANG Ch, WANG Y Q. Experimental study on precision machining K9 glass by KrF excimer laser [J]. *Electromachining & Mould*, 2003 (2): 16 ~ 18 (in Chinese).
- [14] SHI J, YANG H L, ZHANG X B. Application study on new method of laser precise drilling of ceramic material [J]. *Applied Laser*, 2005, 25 (3): 53 ~ 55 (in Chinese).
- [15] LUXON J T, PARKER D E. *Industrial lasers and their applications* [M]. Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985. 200 ~ 219.