

激光热应力切割玻璃实验与分析

殷苏民, 张雷洪, 许仁军, 张凌峰, 葛涛

(江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

[摘要] CO_2 激光器平均输出功率为 100 W 时, 通过聚焦光路在玻璃表面形成圆型的聚焦点。玻璃强烈地吸收 10.6 μm 的激光, 激光能量被玻璃表面 15 μm 厚的吸收层吸收, 形成局部的应力纹样分布 (设定的切割线)。介绍了淬火气嘴将冷空气吹到玻璃表面对受热区域进行快速淬火; 100 W 的激光能量照射玻璃表面, 产生高于玻璃软化的温度; 吹气冷却形成应力集中的热应力层, 使玻璃从切开的断口沿切割线断开, 断口光洁。实验证明, 激光热应力切割玻璃的最佳速度是 400 mm/s。

[关键词] 激光; 玻璃; 热应力切割

[中图分类号] TG665; TN249 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 03-0067-04

1 引言

玻璃作为光学元器件的基本材料广泛用于各种光学器件^[1]。在现代生活中, 大面积装修需要的玻璃, 以及各种装饰用的玻璃平面镜, 都需要进行切割。玻璃硬而脆, 用传统的加工方法加工既困难又费时。激光器的出现, 为光学玻璃的加工提供了便利^[2]。德国汉诺威激光中心的一个研究项目涉及用激光束切割平板玻璃; 采用 CO_2 激光器在不损坏玻璃表面的情况下, 利用热应力切割玻璃可得到光滑的断口, 切割的平板玻璃厚度达 6 mm^[3]。在理论方面, 大部分研究工作集中于靶目标由于表面吸收和体吸收导致的不均匀温度场及热应力^[4,5]。最近, Hector^[6], 孙承纬^[7]等研究了双层介质中的温度场和热应力分布, 以及带膜层的光学元件; 研究了连续 CO_2 激光辐照对熔石英表面增强的影响, 通过 CO_2 激光对熔石英表面均匀加热, 用原子力显微镜和偏光显微镜观察熔石英表面微观结构变化, 发现熔石英表面形成压应力层, 表面微裂纹和凹凸度减少。

采用激光加工玻璃具有巨大的经济效益。激光雕刻玻璃的应用发展很快, 但激光加工玻璃的研究还停留在对玻璃的钢化和抛光上。用传统的机械切割玻璃方法, 断口粗糙, 不能进行大面积玻璃的切割; 激光切割玻璃方便, 断口光滑, 无微裂纹, 适用于大面积平板玻璃的切割, 实用价值很大。目前主要是激光切割, 而激光热应力切割玻璃的研究还刚刚起步。

2 激光切割

玻璃是一种常用的光学材料, 它的吸收系数较大, 气化点较高。在高功率密度的 CO_2 激光照射下, 其烧蚀机制为: 材料缺陷、夹杂物吸收激光引起的多光子吸收、自由电子加热及自聚焦效应, 导致雪崩电离击穿破坏或夹杂少量的热爆破坏等。 CO_2 激光的单光子能量为 5.0 eV, 大于普通玻璃中的主要成分 SiO_2 的 Si—O 键能 (4.7 eV)。

光子在很薄的材料表面能引起键的迅速断开。当光子密度足够大时, 使键断裂的速度超过复合速度, 大量分解的分子、原子、离子和其他成分在光

[收稿日期] 2006-02-19; 修回日期 2006-05-08

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50275068); “八六三” 高新技术研究发展计划资助项目 (2002AA421120, 2002AA336030)

[作者简介] 殷苏民 (1956-), 男, 江苏扬州市人, 江苏大学机械工程学院副教授

照层内引起压强急剧增大,被分解的材料高速喷射出去,且带走剩余能量,对周围部分影响很小。这种由于光的化学作用引起材料高速排出的过程称为“光消融”。由于相互作用过程中产生的热很小,也称为“冷加工”^[2],可逐层烧蚀玻璃,进行切割。

3 激光热应力切割

应用较低功率的激光器使玻璃分离,同时不造成玻璃融化等热影响的切割方法,称为激光热应力切割。这种方法的基本原理是利用激光引致的应力使玻璃“分离”。它得益于分离型 CO₂ 激光器技术的发展和成熟。激光切割玻璃技术更显得经济、实用。使用平均输出功率 150 W 的 CO₂ 激光器,通过聚焦光路在玻璃表面形成椭圆型的聚焦点,保证了激光能量在切割线两侧均匀的、最优化的分布。玻璃强烈地吸收 10.6 μm 的激光,几乎所有的激光能量都被玻璃表面 15 μm 吸收层所吸收,相对玻璃表面移动激光光点形成所需的切割线。选择合适的移动速度,保证既有足够的激光热量在玻璃上形成局部的应力纹样分布(设定的切割线),又不会将玻璃融化。激光切割中另一个关键部件是淬火气

(水)嘴。随着激光光点的移动,淬火气(水)嘴将冷空气(水)吹到玻璃表面,对受热区域施行快速淬火,玻璃将沿着应力最大的方向产生断裂,从而将玻璃分离。为了引发玻璃产生断裂,首先需要用机械法在切割线的起点划出微小的起始裂痕。选择不同的激光功率、光点扫描速度等加工参数,应力引致的断裂深度可达 100 μm 到数毫米,即使用激光法可一步切割深度为 100 μm 到数毫米的玻璃。由于切割过程依赖于热致机械应力,断裂深度和切割速度与材料本身的膨胀系数很有关系。一般说来,适用于激光法进行切割的玻璃的膨胀系数最小应为 3.2×10^{-6} ,多数普通玻璃都能满足这个要求^[8]。

4 实验准备

采用厚度为 3 mm 的普通玻璃,玻璃中含有杂质,以有利于对激光能量的吸收。采用江苏大学激光技术研究所的 2 000 W 的 CO₂ 激光器。切割参数如表 1 所示。为了引发玻璃产生断裂,先用机械法在切割线的起点划出微小的起始裂痕。其中光斑为椭圆形,长轴 8 mm,短轴 6 mm。

表 1 激光参数

Table 1 Parameter of the laser

激光功率/W	1 000	1 000	1 000	500	500	500	300	300	300	100	100	100
吹保护气压/MPa	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2
切割速度/mm·s ⁻¹	200	200	400	200	200	400	200	200	400	200	200	500

5 实验结果

1) 功率为 1 000 W 时,玻璃在激光作用下表面形貌如图 1 所示。

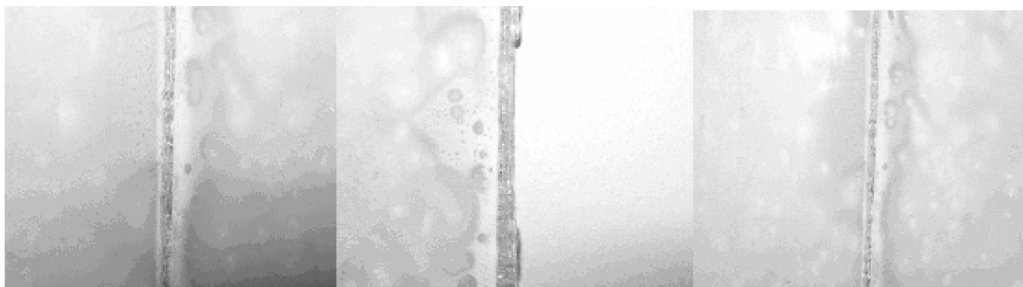


图 1 表面形貌

Fig.1 Surface description

激光能量相同,气压小时,激光能量被玻璃表层充分吸收,玻璃表面融化,敲击玻璃,玻璃没有断开;气压大时,敲击玻璃,玻璃断开;速度变大,敲击玻璃,玻璃没有断开。

2) 功率为 300 W 时, 玻璃在激光作用下表面形貌如图 2 所示。

激光量能相同, 实验结果与 1 000 W 时基本一致; 所不同的是, 激光能量变小时, 需要很大的力才能把玻璃沿切割线断开。

3) 功率为 100 W 时, 玻璃在激光作用下表面

形貌如图 3 所示。

激光能量相同, 气压小时, 激光能量被玻璃表层充分吸收, 玻璃表面融化, 敲击玻璃, 玻璃没有断开; 气压大时, 敲击玻璃, 玻璃断开; 速度变大, 无须敲击玻璃, 玻璃自动沿断口断开。

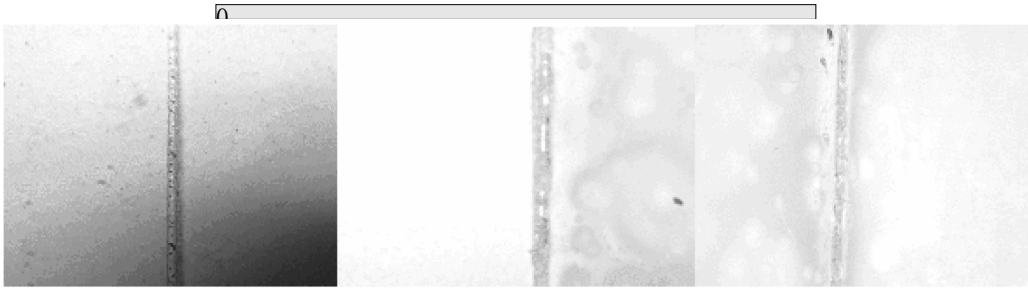


图 2 表面形貌

Fig.2 Surface description

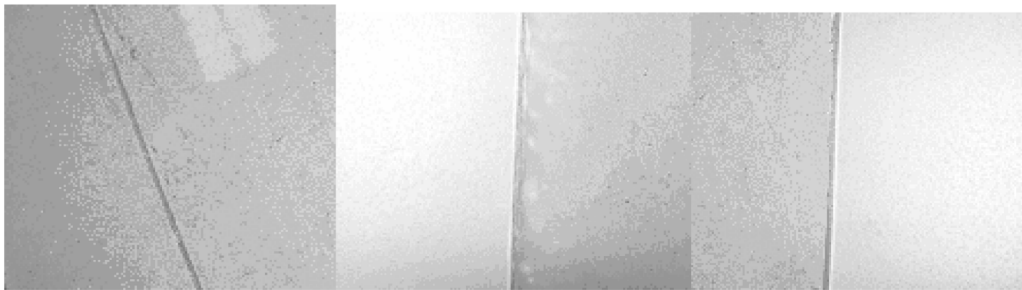


图 3 表面形貌

Fig.3 Surface description

6 实验分析

1) 在 1 000 W 高功率密度的 CO_2 激光能量照射下, 其烧蚀机制为: 所占份额很小的靠光子能量耦合破坏连接键 (一般称“光消融”) 去除材料和起主导作用的是“热”。其中热应力的的大小, 在材料将光能转换为热能机制相同的前提下, 一般规律是加热越剧烈, 冷却越充分, 热应力就越大。在功率密度相同的情况下, 冷却越充分 (即吹气压越大), 热应力越大, 使键断裂速度超过复合速度, 大量分解的分子、原子、离子和其他成分, 在光照层内引起压强急剧增长, 吹气压时被分解的材料高速喷射出去。气压小时, 气压不足以吹去所有被分解的材料, 被融化的玻璃表面材料在激光能量扩散后凝固, 形成的凹痕光洁, 不能形成裂纹, 敲击玻璃, 玻璃没有断开; 气压大时, 气压吹走了被分解的材

料, 凹痕粗糙, 形成裂纹, 敲击玻璃, 玻璃沿凹痕断开; 切割速度加大, 激光能量不能聚集, 快速分散, 被融化的玻璃表面迅速凝固, 凹痕光滑, 敲击玻璃, 玻璃没有断开。

2) 在 500 W 和 300 W 高功率密度的 CO_2 激光能量照射下的情况与 1 000 W 时基本一致, 所不同的是激光能量变小, 需要很大的力才能把玻璃沿切割线断开。

3) CO_2 激光器平均输出功率为 100 W 时, 通过聚焦光路在玻璃表面形成椭圆型的聚焦点。玻璃强烈地吸收 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光, 激光能量被玻璃表面 $15 \mu\text{m}$ 吸收层吸收, 保证既有足够的激光热量在玻璃上形成局部的应力纹样分布 (设定的切割线), 又不会将玻璃融化。激光切割中淬火气 (水) 嘴将冷空气 (水) 吹到玻璃表面, 对受热区域进行快速淬火。

CO₂ 激光照射玻璃后, 玻璃中的热应力形成过程如图4所示。激光照射玻璃表面, 玻璃表面温度升高, 表面扩张凸起如图4a, 此时的温度 T 小于玻璃的软化温度 T_c , 冷却后不能形成热应力层, 表面恢复原来形状; 当表面温度大于软化温度, 则玻璃表面软化扩展, 如图4b所示。冷却后样品表面凹陷, 形成热压应力层, 如图4c所示^[9]。

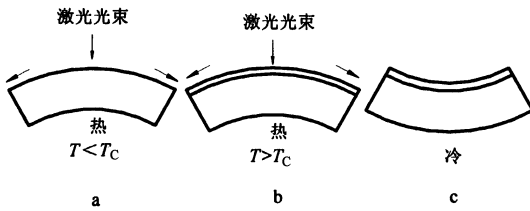


图4 在玻璃中激光热应力形成

Fig.4 Producing of laser thermal stress on the glass

100 W 的激光能量照射玻璃表面, 表面温度大于玻璃软化速度, 吹气压冷却。吹气压小时, 冷却较慢, 不足以形成热应力层; 吹气压大, 冷却变快, 形成热应力层, 应力集中, 玻璃从开始切开的断口沿切割线断开, 断口光洁。实验证明, 400 mm/s 是激光热应力切割玻璃的最佳速度。

7 结论

CO₂ 激光器平均输出功率为 100 W 时, 通过聚焦光路在玻璃表面形成圆型的聚焦点。玻璃强烈地吸收 10.6 μm 的激光, 激光能量被玻璃表面 15 μm 吸收层所吸收, 保证既有足够的激光热量在玻璃上形成局部的应力纹样分布, 又不会将玻璃融化。激

光切割中淬火气(水)嘴将冷空气(水)吹到玻璃表面, 对受热区域进行快速淬火。100 W 的激光能量照射玻璃表面, 使表面温度高于玻璃软化温度, 吹气冷却形成应力集中的热应力层, 将玻璃从切开的断口处沿切割线断开, 断口光洁。实验证明, 400 mm/s 是激光热应力切割玻璃的最佳速度。

参考文献

- [1] 罗福, 孙承纬, 杜祥琬. 1.06 Lm 连续激光照射下 K9 玻璃板的应力松弛破坏[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 19~23
- [2] 江超. KrF 准分子激光精密加工 K9 光学玻璃的实验研究[J]. 电加工与模具, 2003, (3): 33
- [3] 晓晨. 以激光切割玻璃[J]. 激光与光电子学进展, 1999, (8): 41
- [4] 杜少军, 陆启生, 赵伊君, 等. 激光窗口形状对应力和光束位相影响的数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 273~276
- [5] 陈小伟, 陈裕泽, 余同希, 等. 热力联合作用弹性薄圆板的弯曲与屈曲[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 531~536
- [6] Kim W S, Hector L G, Hetnarski R B. Thermoelastic stresses in a bonded layer due to repetitively pulsed laser radiation [J]. Acta Mechanica, 1997, 125: 107~128
- [7] 孙承纬, 赵剑衡, 袁永华, 等. 分束镜的非工作波段激光作用失效机制[A]. 激光的热和力学效应学术会议论文集[C]. 中国广西, 2000. 1~7
- [8] <http://www.antelaser.com> [EB/OL]
- [9] 龚辉, 王明利. 连续 CO₂ 激光对熔石英表面的增强处理研究[J]. 中国激光, 1997, 24(3): 256~257

Experimental Analysis of Glass Cutting by Laser Thermal Stress

Yin Sumin, Zhang Leihong, Xu Renjun, Zhang Lingfeng, Ge Tao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] When the output power of the CO₂ laser machine reaches 100 W on average, the round focusing point can be formed on the surface of glass by the focusing light path. The laser energy of 10.6 μm wavelength is absorbed fiercely by the 15 μm-thick glass layer on the surface, and the local stress line distributing is formed. At the same time the quenching mouth is blowing the colder air onto the glass surface, quenching the thermal area quickly. The temperature of the glass surface is higher than the softening point, blowing colder air onto the surface forms the thermal stress concentration layer. The glass is disconnected along the cut which is made by mechanic means before cutting, and the crack is smooth. The best pace of the laser thermal stress cutting is 400 mm/s which is testified by the experiment.

[Key words] laser; glass; thermal stress cutting