

文章编号: 1001-4322(2007)01-0001-04

CO₂ 激光作用下运动石英玻璃的温度分布*

焦俊科, 王新兵

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 研究了运动石英玻璃板在 CO₂ 激光作用下的热效应, 在考虑表面辐射和空气对流的情况下建立了数学模型, 采用有限元软件 ANSYS 进行数值计算, 得到了运动情况下石英玻璃的温度分布。比较了激光功率、光斑半径和运动速度对温度分布的影响, 得到了温度分布与运动速度和激光参数之间的关系。结果显示石英玻璃板的表面温度随激光功率的增加而增加, 随光斑半径、运动速度的增加而减小。

关键词: CO₂ 激光; 温度场; ANSYS; 石英玻璃

中图分类号: TG506.4; TG4 文献标识码: A

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。随着激光加工技术的发展, 人们尝试着用激光对玻璃进行加工^[1-2], 因为激光具有能量密度高、非接触性等优点。激光加工是利用它的高能量密度进行热加工, 加工的质量与玻璃内的热分布有着密不可分的联系, 因此玻璃在激光作用下的热效应成为人们研究的焦点。彭玉峰等分析了单晶硅在不同的吸收系数、光斑半径、加热时间下的温度分布^[3]; 魏朝阳等给出了玻璃在激光静止作用下的温度变化^[4]; W. X. Tian 等研究了玻璃棒在激光扫描作用下的热分布, 并对其在不同参数下的温度分布作了比较^[5]; P. A. Atanasov 等根据激光作用玻璃的热效应建立了激光切割玻璃棒的理论模型^[6]等。这些研究为玻璃的激光加工提供了较好的理论指导。本文以石英玻璃板为研究对象, 连续 CO₂ 激光作为加热热源, 采用数值计算的方法来研究运动石英玻璃板在激光作用下的温度分布。

1 理论分析

图 1 是激光加热运动石英玻璃板的示意图, 石英玻璃板在连续 CO₂ 激光的作用下以恒定的速度 v 沿 x 轴负方向运动。

1.1 控制方程

假设石英玻璃板为各向同性, 其热传导方程为^[7]

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

式中: c , ρ 和 k 分别是石英玻璃的质量热容、密度和导热系数; $P(x, y, z, t)$ 为体热源的生热率。

1.2 初始条件^[8]

$$t = 0, \quad T(t) = T_0 \quad (2)$$

式中: T_0 为石英玻璃的初始温度, 这里视为环境温度。

1.3 边界条件

在激光加载面, 热传导向玻璃内部传送的热能, 对流换热向外界逸出的热能以及表面向外界辐射的热能, 三者之和应该等于其吸收的激光能量, 即

$$\alpha I(x, y, z, t) = -k \frac{\partial T}{\partial z} + h(T_s - T_0) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_0^4) \quad (3)$$

式中: T_s 为激光加载面的表面温度; h 为对流传热系数; ϵ 为表面热辐射系数; σ 为玻耳兹曼常数; α 为石英玻璃

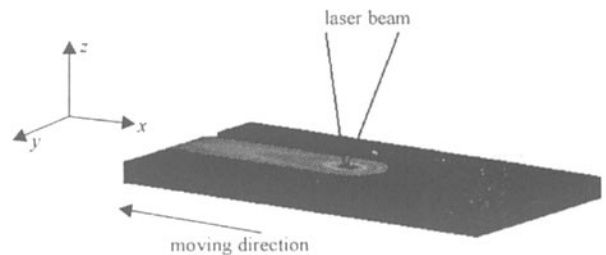


Fig. 1 Moving quartz glass heated by CO₂ laser
图 1 CO₂ 激光加载运动的石英玻璃板

* 收稿日期: 2006-06-09; 修订日期: 2006-11-24
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60478028)
作者简介: 焦俊科(1981—), 男, 博士, 从事激光与物质作用方面的研究工作; jameshust@smail.hust.edu.cn.
联系作者: 王新兵, xbwang@hust.edu.cn.

对 CO₂ 激光的吸收率; $I(x, y, z, t)$ 表示光能密度。

在石英玻璃板的前后左右和下表面, 仅通过对流的方式与外界进行热量交换, 因此设置为对流的边界条件^[9], 即

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_n - T_0) \quad (4)$$

式中: $\partial T / \partial n$ 表示温度沿表面外法线方向的偏导数; T_n 表示玻璃表面的温度。

由于 Si-O 的振动波段在 9~11 μm , CO₂ 激光($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) 辐射可以被充分的吸收, 且吸收深度极小(1~2 μm), 激光辐射可以看作表面加热源^[10], 因此方程(1)中的 $P(x, y, z, t) = 0$ 。方程(3)中的 $I(x, y, z, t)$ 为面热源的光能密度, 也即是激光的功率密度, 当石英玻璃板以恒定速度 v 沿 x 轴负方向运动时, CO₂ 激光在玻璃板表面的功率密度可以用 δ 函数表示为

$$I(x, y, z, t) = I(x - vt, y) \delta(z) \quad (5)$$

这里以基模 CO₂ 激光作为加热热源, 则

$$I(x - vt, y) = \frac{P_0}{\pi r^2} \exp\left[-\frac{(x - vt)^2 + y^2}{r^2}\right] \quad (6)$$

式中: P_0 为激光功率; r 为激光相对石英玻璃板静止时的光斑半径。

上述方程联立求解, 就可以得到运动石英玻璃板在连续 CO₂ 激光作用下的温度分布 $T(x, y, z, t)$ 。

2 数值计算与分析

一些文献给出了工件在激光扫描作用下的解析解^[7,11], 但结果都比较复杂。特别是在考虑了辐射和对流的影响以及材料的物理性质随温度变化的情况下, 解析解的求解变得更加困难。在实际的工程应用中, 一般都采用有限元的数学方法来求解, 因此, 本文选用有限元计算软件 ANSYS 进行数值计算。

由于玻璃的膨胀系数较小, 可视其密度不随温度的变化而变化, $\rho = 2\,200 \text{ kg/m}^3$, 其它物理参数如表 1 所示。由于石英玻璃对 CO₂ 激光能够充分的吸收, 几乎所有能量都转化为热能用于玻璃加工, 假设吸收率 $\alpha = 1$, 表面热辐射系数 $\epsilon = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。取环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 对流换热系数 $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。石英玻璃板的尺寸选为 40 mm × 20 mm × 2 mm。

表 1 石英玻璃的物理性能表

Table 1 Physical parameters of quartz glass

$\theta / ^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1 000	1 200
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	600.0	660.4	836.0	900.0	973.9	1 000.0	1 061.7	1 108.0	1 086.8	1 103.5	1 128.6
$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.38	1.53	1.65	1.74	1.86	1.91	2.02	2.09	2.15	2.29	2.43

CO₂ 激光功率 $P = 75 \text{ W}$, 光斑半径 $r = 2 \text{ mm}$, 石英玻璃板的运动速度 $v = 2 \text{ mm/s}$ 。图 2 给出了深度方向上 3 点的温度随时间的变化曲线, 这 3 点距激光加载的初始位置的水平距离均为 10 mm。从图中可以看出, 在 0~3.4 s 的时间内, 3 点的温度都没有明显的变化, 这是由于激光还没有对它们进行加热的缘故。当激光运动到能够对它们进行加热的区域时, 由于对高功率密度激光的吸收, 石英玻璃表面的温度会迅速升高, 而石英玻璃较低的热传导率会导致其内部温度的上升比较缓慢, 深度方向上产生了一个较大的温度梯度。在激光移出该区域的较短时间内, 玻璃表面的温度下降比较显著, 而此时玻璃内部的温度仍在上升, 这是由于玻璃表面与内部存在着温度差, 热量以热传导的形式由表面向内部传递的缘故; 接下来深度方向上的温度梯度越来越小, 表面温度与玻璃的内部温度逐步趋于一致, 最终达到一种平衡, 此时玻璃表面热量散失主要是由表面的辐射和空气对流引起的, 温度的变化非常缓慢。

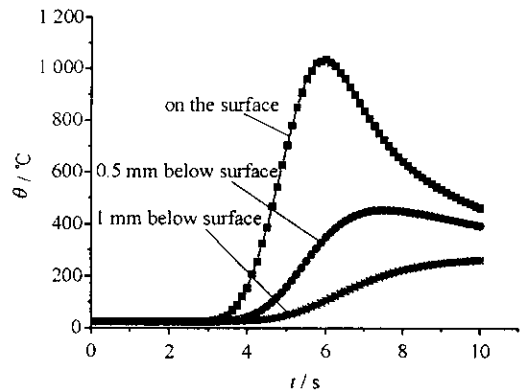


Fig. 2 Temperature histories of three points in the thickness direction of quartz glass

图 2 石英玻璃深度方向上 3 点温度随时间的变化

3 不同参数下温度分布的计算比较

3.1 不同运动速度的比较

CO₂ 激光的功率 $P=50$ W, 光斑半径 $r=2$ mm, 当石英玻璃板的运动速度分别取为 1, 2 和 4 mm/s 时的温度分布如图 3 所示。从图中可以看出, 玻璃表面的温度随着运动速度的增大而减小, 这是因为运动速度直接影响着单位面积的玻璃与激光的作用时间, 运动速度越快, 作用时间越短, 温度自然也就越低。另外, 从图中可以看出, 运动速度越低, 温度梯度越大, 产生的热应力也就越大, 这对玻璃的激光加工是不利的。当运动速度低到一个特定值时, 产生的热应力就会超过玻璃的极限应力, 出现裂纹。因此, 合适的控制玻璃板的运动速度可以提高玻璃的加工质量。

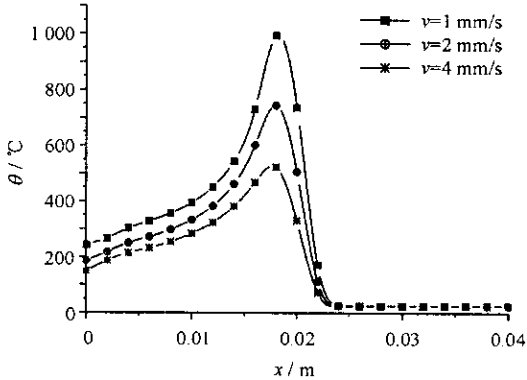


Fig. 3 Comparison of surface temperature for different velocity

图 3 石英玻璃在不同运动速度下的表面温度分布

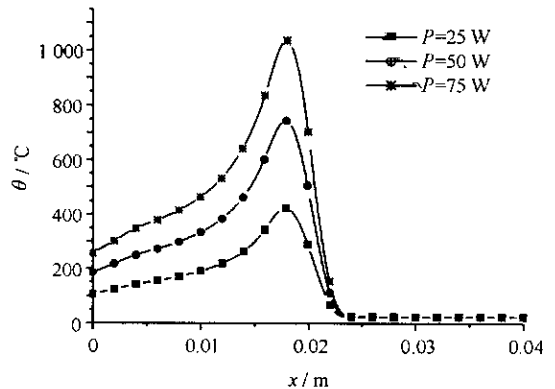


Fig. 4 Comparison of surface temperature for different laser power

图 4 石英玻璃在不同功率的 CO₂ 激光作用下的表面温度分布

3.2 不同激光功率的比较

光斑半径 $r=2$ mm, 玻璃板的运动速度 $v=2$ mm/s, 当激光功率分别为 25, 50 和 75 W 时的温度分布如图 4 所示。从图中可以看出, 在相同的运动速度和光斑半径的情况下, 玻璃表面的温度随着功率的增大而增大, 这是因为功率越大, 玻璃板单位面积在单位时间内吸收的激光能量越高。当功率取 25, 50 和 75 W 时, 玻璃表面的最高温度分别为 450, 750 和 1 050 °C, 可以看出在其它参数不变的情况下, 温度的最高值并不是功率的线性函数, 这是由玻璃表面辐射对流以及材料的非线性引起的。

3.3 不同光斑半径的比较

激光功率 $P=50$ W, 运动速度 $v=2$ mm/s, 光斑半径分别取 1, 2 和 3 mm 时, 温度分布如图 5 所示。从图中可以看出, 在相同激光功率和运动速度的情况下, 光斑半径越大其温度值就越低。这是由于半径大, 功率密度低, 单位面积的玻璃在单位时间内获得的能量低的缘故。在加热过程中, 半径越小, 玻璃表面的温度上升越快, 温度梯度越大, 产生的热应力也就越大。另外, 从图中可以看出, 不同光斑半径的温度变化曲线相交于 230 °C, 这由于加热区域随光斑半径增大而变大的缘故。

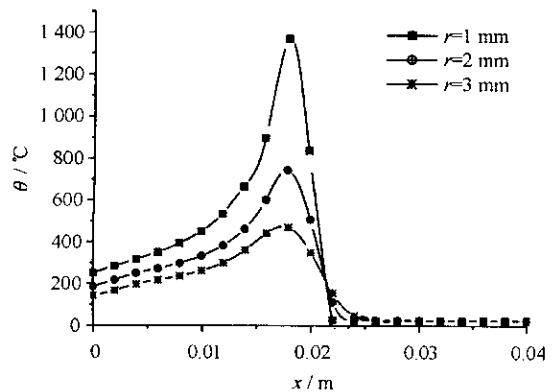


Fig. 5 Comparison of surface temperature for different laser focus

图 5 石英玻璃板在不同光斑半径的 CO₂ 激光作用下的表面温度分布

4 结论

通过数值计算的方法, 可以求得运动石英玻璃板在 CO₂ 激光作用下的温度分布。在激光与玻璃作用的瞬间, 由于激光的高能密度, 使玻璃表面的温度迅速升高, 产生较大的温度梯度。在随后的降温过程中, 由于玻璃内部的热传导和表面对流辐射的影响, 在光束移出作用区的很短时间内, 降温比较迅速。当玻璃内部的温度趋于平衡时, 温度的变化趋势就会比较平缓, 这时主要是靠表面热辐射和对流向外传递热量, 对温度的影响不是很大。不同的移动速度和激光参数, 会影响到石英玻璃板的温度分布。从计算结果可以看出, 玻璃表面的温度随着激光功率的增大而增大, 随光斑半径的增大而减小, 随运动速度的增大而减小。本文的结果对激光加工时参数的选取有一定的指导作用。

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] 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研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1225-1228. (Peng Y F, Sheng Z X, Zhang H, et al. Theoretical analysis of temperature distributions of solid materials irradiated by high power laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10): 1225-1228)
- [4] Wei C Y, He H B, Deng Z, et al. Study of thermal behaviors in CO₂ laser irradiated glass[J]. *Opt Eng*, 2005, **44**: 044202.
- [5] Tian W X, Wilson K S C. Temperature prediction for CO₂ laser heating of moving glass rods[J]. *Optics and Laser Technology*, 2004, **36**: 131-137.
- [6] 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.
- [7] 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. (Zheng Q G. Laser advanced manufacture. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 34-40)
- [8] 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. (Yuan H, Zhao J H, Tan F L, et al. Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 681-684)
- [9] 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**: 1527-1532. (Xi M Z, Yu G. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**: 1527-1532)
- [10] 金花漫. 在 CO₂ 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. (Jin H M. Measure and calculate the temperature of glass heated by CO₂ laser. *Translations of Overseas Building Materials*, 1997, (1): 43-48)
- [11] 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. (Li J C. Laser's diffractive and thermal effect calculation. Beijing: Science Press, 2002: 352-366)

Temperature distribution of moving quartz glass heated by CO₂ laser

JIAO Jun-ke, WANG Xin-bing

(Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the thermal effect of moving quartz glass heated by CO₂ laser, a mathematical model was established as the influence of irradiation and convection was considered. The temperature distribution was obtained using the software ANSYS. The relationships between temperature and velocity and laser parameters (power and radius) were obtained by comparing the temperature distribution for different velocity and laser parameters. The results show that the surface temperature of quartz glass increases when the laser power increases, the laser focus decreases and the speed of the quartz glass decreases.

Key words: CO₂ laser; Temperature field; Software ANSYS; Quartz glass