

文章编号: 1001-3806(2007)05-0483-03

CO₂ 激光辐照下玻璃表面温度分布实验研究

王小华, 王新兵*, 焦俊科, 汪盛烈

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了研究激光预热玻璃温度场分布, 采用实验和数值计算相结合的方法, 利用红外热像仪测温装置, 对普通钠钙平板玻璃试件在 CO₂ 激光辐照下表面的温度进行了测量, 并利用热电偶对红外热像仪进行了校正, 得到了真实的温度场, 对实验和理论计算进行了比较。结果表明, 实验得到的温度变化规律与数值计算基本一致。

关键词: 激光技术; 温度场; CO₂ 激光; 红外热像; 钠钙玻璃

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Experimental analysis of the surface temperature distribution of soda-line glass irradiated by CO₂ laser

WANG Xiao-hua, WANG Xin-bing, JIAO Jun-ke, WANG Sheng-lie

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

Abstract In order to investigate the temperature distribution of the soda-line glass irradiated by laser beam, experimental and numerical computing method was used. The temperature distribution of the soda-line glass on the surface of the heated region under CO₂ laser irradiation was measured with the thermovision infrared system. The thermocouple device was used to correct the thermovision infrared system, so the real temperature distribution was obtained. The result showed that the experimental temperature transformation was in accordance with the numerical computing.

Key words laser technique; temperature field; CO₂ laser; thermovision infrared system; soda-line glass

引 言

CO₂ 激光系统将成为玻璃机加工的有用工具。其优点在于: 高能量密度、非接触性加工、与生产线结合容易且运用灵活等, 另外玻璃对 CO₂ 激光的吸收系数大, 吸收深度小。玻璃产品是通过切割、熔接及刻花等工序完成的, 而所有这些都可以通过使用 CO₂ 激光辐射加热玻璃的方法完成^[1]。为了获得最佳处理效果, 必须控制在适当的温度范围, 因此, 很有必要了解表面的温度以及渗透进玻璃的热量多少。

温度场决定了应力场与应变场, 它还与结晶与相变过程有着不可分割的联系, 温度场信息的获得对材料的加工有着重要的意义。温度场的测量分为接触法和非接触法两种。接触法缺点较多, 不仅工作量很大, 而且很难同时得到多点乃至全场温度, 作为非接触法之一的红外热像仪测温法则能实时地进行温度场观测

并一次性获得全场温度信息。国内外学者对红外热像法在测温方面的应用做了很多相关工作^[2-7], 而关于玻璃的激光切割方面的红外热像测像报道却很有限。温度的数值模拟是一种有效的温度场预测手段, 国内外学者在玻璃的数值模拟及预测方面也做了很多工作^[8-10]。

本文中以普通的钠钙玻璃平板为研究对象, 采用红外热像仪研究玻璃板与激光相互作用后的温度场分布特点, 从实验上得到了玻璃板与激光作用的温度变化规律。

1 实验原理简介

1.1 红外测温原理

一切温度高于绝对零度的物体都在不停地向周围发出红外辐射能量。物体的红外辐射能量的大小及其按波长的分布与它的表面温度有着十分密切的关系。因此, 通过对物体自身辐射的红外能量的测量, 便能准确地测定它的表面温度。红外测温技术的理论基础是普朗克分布定律: $W = \sigma T^4$, 其中, W 为外界辐射总能量, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T 为温度。黑体仅仅是一种理想的物体, 黑体的发射率为 1, 但实际被测物

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60478028)

作者简介: 王小华 (1980), 男, 硕士研究生, 从事激光与物质相互作用方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: xbwang@hust.edu.cn

收稿日期: 2006-07-13 收到修改稿日期: 2006-08-25

体(灰体)的发射率 ε 是一个在 0 和 1 之间的常数。

灰体表面温度可表示为: $T = \sqrt[4]{\frac{W}{\varepsilon \sigma}}$ 红外热像仪就是

利用红外测温原理进行测温的装置。目前使用的红外测温装置从其构造上可分为可调发射率和固定发射率两种类型的测温仪。可调发射率的测温仪,其发射率可根据所测目标不同在 0~1 之间进行设置;固定发射率的测温仪,其发射率是一固定值。实践证明,一般情况下,在用红外测温仪测量物体的表面温度时,只有将仪器发射率调节到与被测目标物体的发射率相一致时,才能测得被测目标物体的实际温度。因此,在使用红外测温仪时,应根据所测目标的不同,将其发射率调节到相应值,这样测得的温度才能较真实地反映被测物体的表面实际温度。在实际测量的过程中,一般先采用热电偶标定被测物体的发射率,然后再利用红外热像仪测定物体的温度场。

1.2 实验设备与实验方法

实验使用美国 SYNRAD 公司生产的型号为 J48-SW 的 CO₂ 激光器;激光器的功率使用美国 COHERENT 公司生产的 FM 型功率计测量测得。实验中,激光器的功率和作用时间由计算机系统和相关的激光控制软件共同完成。玻璃片由夹具夹持形成悬臂梁,激光作用在玻璃的中心,光斑半径为 3.5mm,通过红外摄像仪测量作用点的温度场。实验中所使用的玻璃为普通钠钙玻璃,其尺寸参数为 25.4mm × 76.2mm,厚度为 1mm。测温主要使用北京华北光电所研制的红外热像仪 HWRX-3,扫描速度为 25 场/s,在室温约 1000°C 范围内标定。使用热电偶标定玻璃的发射率,对红外热像仪测得的温度进行校正。温度场的测量主要从正面进行拍摄。HWRX-3 红外热像仪可以进行多幅温度场测量并存储。采集到的温度场可以利用 MATLAB 数学绘图分析软件进行后续处理。

2 实验结果与分析

2.1 发射率的校正

发射率与发射体本身的性质、表面状态、温度及波长有关,而且发射率对测温结果的影响很大。本实验中采用电炉加热的方式,利用热电偶并结合红外热像仪来测定选用的钠钙玻璃的发射率,并对红外热像仪的数据进行了校正。通过 MATLAB 的曲线拟合功能,得到如图 1 所示拟合曲线,并得到如图中的修正公式。可以发现,当 $\varepsilon = 0.357$ 时,热电偶与红外测温值较为符合。图中, T 为热电偶测得的真实温度, T' 为红外热像仪测得的温度。这样通过校正,红外热像仪测得的温度就可以转化得到真实温度值。从而可以得到真实

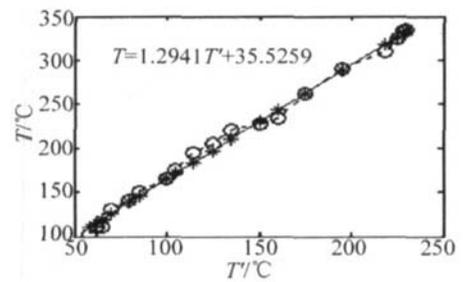


Fig 1 Fitting curve of real temperature and measured by the movision 的温度场信息。以下提到的温度均为经过修正公式校正后的结果。

2.2 实验结果分析

图 2 即为实际测量的红外热图和相同条件下理论仿真的比较。图 2a 为实际测量的玻璃表面的温度经

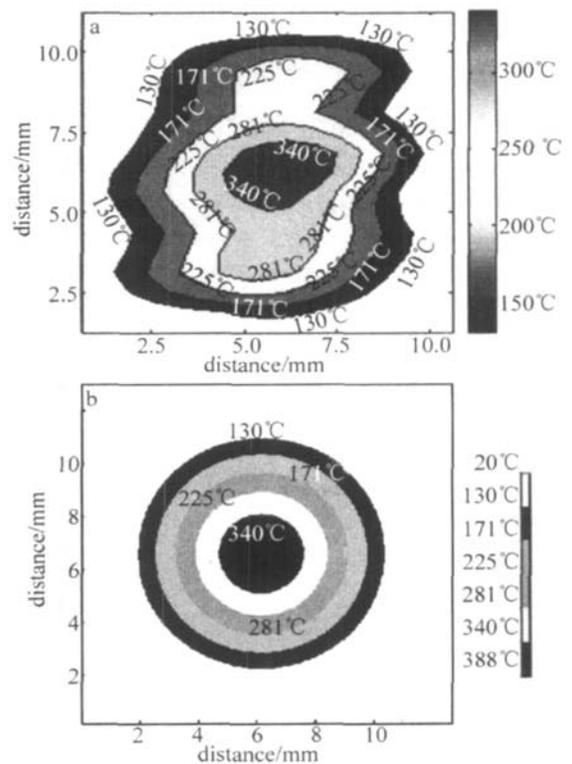


Fig 2 a—the 2-D distribution of temperature measured by the movision b—the 2-D distribution of temperature computed by ANSYS

过 MATLAB 进行简单插值处理后的二维温度分布图。图 2b 即为利用 ANSYS 计算玻璃在高斯热源作用下的二维温度分布,加载的激光功率为 45W,选取玻璃的吸收系数取 0.9。

发现实测的二维温度图经过插值后远不如 ANSYS 计算的理想,这主要是因为实际的激光束不是理想的高斯分布 (TEM₀₀ 模),另一方面红外热像仪的场扫描电机带动镜头抖动也会造成热图的不理想。钠钙玻璃板在激光的作用下的横向温度分布如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在相同的作用时间 (200ms) 下玻璃表面的温度随着激光功率的增加而上升。在相

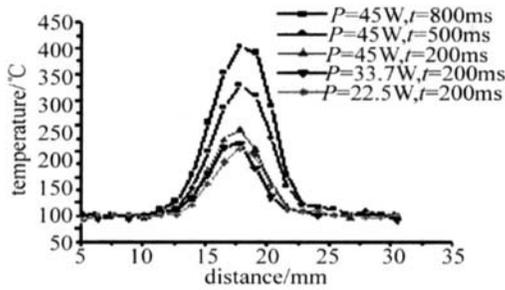


Fig 3 The curve of the temperature distributions on the glass surface in transverse direction

同的功率下,随着激光照射时间的加长,玻璃表面温度逐渐升高。玻璃表面温度最高点在光斑的中心,表面温度随着离中心点的距离的增加而降低。

TIAN 等人^[8]对玻璃温度场进行了详细的理论分析,并简要选取激光辐照 500ms 时的情况,利用激光能量的高斯分布进行数值计算,则数值计算和实验可进行对比。玻璃和激光的物理参数为: $\kappa = 1.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $c = 800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\rho = 2520 \text{ kg}/\text{m}^3$, $P = 45 \text{ W}$, $r = 3.5 \text{ mm}$, 玻璃的吸收系数选取为 0.9, 激光作为面热源加载。得到光斑中心温度循环曲线见图 4。

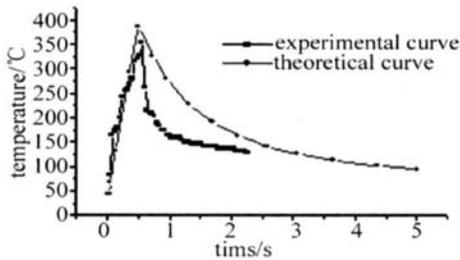


Fig 4 Comparison of theoretical and experimental thermal circular curve

从图 4 中可以看到,在温度上升部分,理论数值计算和实验比较吻合,但也有差异,主要是由于实际玻璃的比热容 c 、热导率 κ 都是温度的函数,而数值计算时取为常数,造成了理论和实际曲线的差异;在温度的下降部分,两条曲线差异较大,但总体趋势一致,造成这种差异的原因是数值计算时忽略了辐射的影响。总的来看,实验曲线和理论计算曲线温度变化规律上是基本吻合的,因此实验数据基本是可信的。

在激光加热和自然冷却的实验过程中,玻璃表面的温度最高点的温度变化随时间的变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,玻璃的温度变化分为升温过程和降温过程。在升温过程中,在激光与玻璃作用时,玻璃表面的温度迅速上升;随着激光功率的升高或者激光照射时间的加长,玻璃表面的最高温度都随之升高。在降温过程中,表面温度随着激光的卸载而迅速下降;且玻璃表面温度下降到一定值后,下降将很缓慢。另外从图 5b 可以看出,相同的功率不同作用时间下的 3 次测量的温度值在同一时刻存在一定的差异,

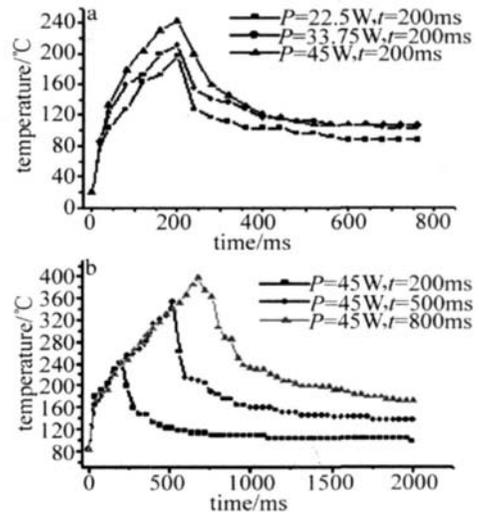


Fig 5 a—the thermal circular curve of the highest temperature on the surface of the glass irradiated by laser with different laser power b—the thermal circular curve of the highest temperature on the surface of the glass irradiated by laser with different irradiation time

这是由于红外热像仪和激光辐照开始时间的不同步和红外热像仪的分辨率不高造成的。

3 结论

利用红外热像仪测量物体的温度必须选择合适的量程,且必须准确测定物体的发射率,对其进行精确的标定才能完成测温目的。

玻璃表面的温度分布与激光的加热参数有较大的影响。随着激光功率的加大或者激光照射时间的加长,玻璃表面的温度都会相应升高;随着激光的卸载,玻璃表面的先经过一个快速的下降区,而后缓慢降低。这些都与理论计算的结果基本相吻合。

参 考 文 献

- [1] ZHOU W, J YUAN Y H, GUI Y Zh *et al* Thermal effect of T₀₂/SiO₂/K₉ film by 1.06 μm CW laser [J]. High Power Laser and Particle Beams 2005, 17(9): 1307~1311 (in Chinese).
- [2] ZHANG J Y, GAO L X, CUI L L *et al* Analysis of the temperature field induced by laser strengthening [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 56~59 (in Chinese).
- [3] HOLM H, KJELDSEN H C E, KRISTENSEN J K A reference architecture for the design of an industrial temperature feedback welding control system [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(3): 499~504.
- [4] AL-HABA BEH A, PARK N R. An autonomous low-cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2003, 22(4): 249~258.
- [5] MENART J, HEBERLEIN J, PFENDER E. Theoretical radiative transport results for a free-burning arc using a line-by-line technique [J]. J Phys 1999, D32(1): 55~63.
- [6] PENG Y F, SHENG Zh X, ZHANG H *et al* Theoretical analyses of temperature distributions of solid materials irradiated by high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beams 2004, 16(10): 1225~1228 (in Chinese).

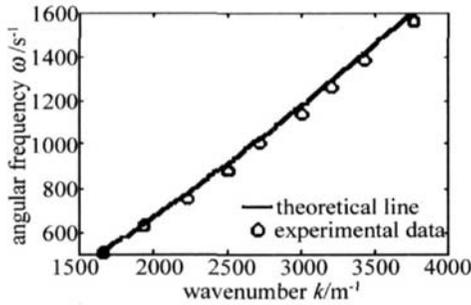


Fig 4 Theoretical plot and experimental data points of angular frequency ω vs wavenumber k at film thickness 0.1603mm

2.2 表面波频率不变, 波数和薄膜厚度的关系

当表面波频率取 220Hz 时, 在蒸馏水中加入不同厚度薄膜, 加入不溶性液体的体积从 2.5mL 至 50mL, 以 2.5mL 间隔增加, 通过激光衍射法测量出不同厚度下表面波的波数 k , 同样以蒸馏水中加入煤油为例。薄膜色散关系的理论曲线与实验数据如图 5 所示, 二者基本吻合。

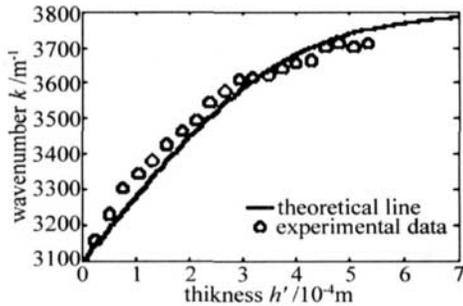


Fig 5 Theoretical plot and experimental data points of wavenumber k vs film thickness h' at frequency 220Hz

上述两种情况下, 实验数据与理论曲线基本吻合, 说明液体薄膜的色散关系正确。当选用苯和二甲苯为液体薄膜, 得到的结论与选用煤油相同。实验数据与理论曲线偏差的原因是液体薄膜厚度不均匀、薄膜在液体上的漂移或者薄膜的挥发性引起薄膜厚度的变化, 通过改善实验技术和减少测量时间, 可减小实验误差。

如图 5 所示, 当表面波频率不变, 液体薄膜厚度小于 0.5mm 时, 液体薄膜表面波的波数随薄膜厚度的增加而增加; 当薄膜厚度大于 0.5mm 时, 表面波的波数几乎不随薄膜厚度的变化。所以针对厚度小于 0.5mm 的薄膜, 当表面波频率保持不变时, 通过测量 ± 1 级激光衍射光斑的间距, 计算出液体薄膜表面波的波数, 进而利用液体薄膜的色散关系可得液体薄膜的厚度。

3 结论

实现了频率为几百赫兹的液体薄膜表面波的激光衍射, 观察到了清晰的衍射图样, 衍射效率及反衬度都非常高。分两种情况验证液体薄膜的色散关系, 当薄膜表面波的角频率保持不变时, 波数和薄膜厚度的关系; 当薄膜厚度保持不变时, 角频率和波数的关系, 两种情况下薄膜色散关系正确。针对厚度小于 0.5mm 的液体薄膜, 提出了激光衍射法测量不溶性液体薄膜厚度的方法, 该方法具有实时、准确、无损和非接触的特点, 无论被测液体透明或不透明, 这一方法都适用。

参考文献

- [1] BARTER J D. Surface strain modulation of insoluble surface film properties [J]. *Phys Fluids* 1994, 6(8): 2606~2616
- [2] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Time frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating-substrate systems [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 609~612 (in Chinese).
- [3] MAO R C, YANG Z L. Physical properties of liquid surface wave and its optical diffraction [J]. *Acta Physica Sinica* 1996, 45(9): 1521~1525 (in Chinese).
- [4] BARTER J D, LEE P H Y. Imaging surface wave analyzer for liquid surfaces [J]. *Appl Opt* 1997, 36(12): 2630~2635.
- [5] WANG J J, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the transparent coating-substrate system [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 177~180 (in Chinese).
- [6] WEISBUCH G, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves [J]. *American Journal of Physics* 1979, 47(4): 355~356
- [7] YANG Y Z. The physical properties of liquid surface wave grating [J]. *Acta Optica Sinica* 1990, 10(2): 183~188 (in Chinese).
- [8] MAO R C, YANG Z L, ZHU J T *et al*. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. *A P L*, 2002, 80(17): 3033~3035
- [9] BARK T K, ROY A, KAR S A. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves [J]. *American Journal of Physics* 2005, 73(8): 725~729
- [10] MAO R C, ZHAO X F, SHI J M. Modulated interference of reflected light from a liquid surface wave at tens hertz frequencies [J]. *Opt Commun*, 2006, 259: 592~597.
- [11] KLEMENS P G. Dispersion relations for waves on liquid surfaces [J]. *American Journal of Physics* 1984, 52(5): 451~452
- [12] BARK T K, CHAUDHURI P R, ROY A *et al*. Probing liquid surface waves: liquid properties and liquid films with light diffraction [J]. *Meas Sci Technol* 2006, 17(6): 1553~1562
- [13] ЛАНДАУ Л Д, ЛИФШИЦ Е М. Fluid mechanics [M]. Beijing Higher Education Press, 1983, 48~49 (in Chinese).
- [7] JIAO J K, WANG X B, LU H. Analysis of temperature field and thermal stress field in quartz glass heated by laser beams [J]. *Laser Technology* 2007, 31(4): 427~430 (in Chinese).
- [8] TIAN W X, CHU W K S. Temperature prediction for CO₂ laser heating of moving glass rods [J]. *Optics & Laser Technology* 2004, 36(2): 131~137
- [9] GRELLIER A, ZAYER N, PANNELL C. Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres [J]. *Opt Commun* 1998, 152: 324~328
- [10] WEI Ch Y, HE H B, DENG Zh *et al*. Study of thermal behaviors in CO₂ laser irradiated glass [J]. *Opt Engng* 2005, 44(4): 044202-1~044202-4

(上接第 485 页)