

CO₂激光作用玻璃管的热效应

杨发宇 史晋芳 邱荣 胡阳阳 郭德成 杨森

Thermal effect of CO₂ laser on glass tubes

YANG Fayu, SHI Jinfang, QIU Rong, HU Yangyang, GUO Decheng, YANG Sen

引用本文:

杨发宇, 史晋芳, 邱荣, 等. CO₂激光作用玻璃管的热效应[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 923–929. DOI: 10.5768/JAO202445.0501006

YANG Fayu, SHI Jinfang, QIU Rong, et al. Thermal effect of CO₂ laser on glass tubes[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 923–929. DOI: 10.5768/JAO202445.0501006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大长径比皮料玻璃管加工工艺研究及应用

Research and application of processing technology of cladding-tube with large aspect ratio

应用光学. 2021, 42(2): 346–351 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0205003>

基于吸收光谱法的CO₂正压测量技术分析

CO₂ positive pressure measurement technology based on absorption spectroscopy

应用光学. 2022, 43(1): 106–110 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103006>

高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟

Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers

应用光学. 2023, 44(6): 1201–1211 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610006>

全固态太阳光泵浦激光器热效应分析

Thermal effect analysis of all-solid-state solar pumped laser

应用光学. 2023, 44(6): 1219–1227 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610008>

高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展

High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments

应用光学. 2020, 41(4): 675–680 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409004>

高重频飞秒激光高效加工太赫兹滤波器核心结构

Core structure of terahertz filter fabricated by femtosecond laser with high repetition rate

应用光学. 2024, 45(3): 514–521 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0923-07

CO₂ 激光作用玻璃管的热效应

杨发宇^{1,2}, 史晋芳^{1,2}, 邱 荣², 胡阳阳^{1,2}, 郭德成², 杨 森^{1,2}

(1. 西南科技大学 制造科学与工程学院 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 激光对单一玻璃管进行热熔封接的过程中, 加工质量与玻璃管内的温度分布有密不可分的联系。在考虑表面热辐射、材料内部热传导和空气热对流的情况下, 使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对 CO₂ 激光作用高硼硅酸盐玻璃管的温度场进行模拟仿真, 分析了温度场分布随时间的变化规律, 比较了激光功率、激光光斑半径和旋转速度对玻璃管温度分布的影响。仿真结果表明, 激光功率越大, 光斑半径越小, 玻璃管旋转速度越低, 玻璃管温度越高。根据仿真结果, 选择合适的加工参数能够达到高硼硅酸盐玻璃管进行激光加工的工艺要求, 此项研究为后续玻璃管激光热熔封接的工艺参数选择提供了重要理论依据。

关键词: 激光加工技术; CO₂ 激光; 温度场; COMSOL Multiphysics; 高硼硅酸盐玻璃管

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0501006

Thermal effect of CO₂ laser on glass tubes

YANG Fayu^{1,2}, SHI Jinfang^{1,2}, QIU Rong², HU Yangyang^{1,2}, GUO Decheng², YANG Sen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process (Ministry of Education), School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In the process of laser heat fusion sealing of a single glass tube, the quality of processing is inextricably linked to the temperature distribution inside the tube. Under the consideration of surface heat radiation, internal heat conduction of material and air heat convection, the finite element simulation software, which called COMSOL Multiphysics was adopted to carry out simulation of the temperature field of high borosilicate glass tube under the action of CO₂ laser, the change rule of the temperature field distribution with time was analyzed, and the effects of laser power, laser spot radius and rotation speed on the temperature distribution of the glass tube were compared. Simulation results show that the higher the laser power, the smaller the spot radius, the lower the rotational speed of the glass tube, and the higher the temperature of the glass tube. According to the simulation results, the process requirements of laser processing of high borosilicate glass tube can be achieved by selecting suitable processing parameters. This study provides an important theoretical basis for the selection of process parameters of subsequent glass tube laser hot fusion sealing.

Key words: laser processing technology; CO₂ laser; temperature field; COMSOL Multiphysics; high borosilicate glass tube

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-12-20

作者简介: 杨发宇 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事光机电一体化技术研究。E-mail: 1430383627@qq.com

通信作者: 史晋芳 (1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光机电一体化、智能化测控与图像处理研究。

E-mail: 603071939@qq.com

引言

激光加工技术为玻璃、陶瓷、半导体、晶体等轻、薄、易碎和高硬度材料的高质量和高效切割、连接、密封^[1-4]提供了先进的技术手段和广阔的应用前景。由于玻璃材料具有较低的热导率和热膨胀系数,具备良好的热力学性能和化学稳定性,面对高精度、大规模、智能化的加工需求,激光加工比机械加工和火焰加工有更大的优势^[5-7]。然而在进行激光加工过程中,激光功率、光斑大小、加工速度、升温和降温速度等工艺参数对玻璃的温度、应变、应力等参数的空间分布和变化速度有巨大影响,因此,开展激光作用下玻璃的温度场仿真研究具有重要意义,可以指导激光玻璃加工过程中的参数优化选取^[8-9]。

焦俊科等^[10]通过有限元软件 ANSYS,在考虑表面辐射和空气对流的情况下,建立了 CO₂ 激光作用运动石英玻璃的仿真模型,研究了石英玻璃板在 CO₂ 激光作用下的热效应。YANG B J 等^[11]通过有限元软件 ANSYS 模拟了激光切割钢化玻璃的温度分布,详细研究了激光功率、玻璃厚度和切割速度等不同工艺参数对温度场分布的影响。黄明贺等^[12]运用 ANSYS 软件模拟计算镀铜玻璃焊接时的瞬态温度场及瞬态应力场分布,得到了激光焊接的最佳工艺参数。孙劭伟等^[13]建立了熔石英玻璃激光损伤的三维模型,计算了熔石英玻璃内部的温度分布和应力分布,为 CO₂ 激光修复工艺的改进提供了理论依据。REN G Q 等^[14]介绍了熔融二氧化硅的激光辅助加工,并建立了详细的三维热模型,通过测量工件和刀具的温度验证其模型的准确性。ZHAI C T 等^[15]建立了激光辅助微细切削 Ti-6Al-4V 合金表面的热仿真模型,主要研究激光功率和切割速度对材料表面热影响区的作用。GUO Y J 等^[16]进行了激光辅助单晶硅优化加工的实验研究,建立了工艺参数与表面粗糙度之间的回归模型,给出了最佳的加工条件。许伟静等^[17]建立了激光辅助金刚石车削单晶硅的温度场分布模型,并结合测温实验对比其仿真结果。张开达等^[18]研究了氧化铝陶瓷在激光作用下的温度分布,并对其在不同参数下的温度分布做了比较。FAN M 等^[19]建立了玻璃陶瓷激光辅助加工的三维模型,测量了玻璃陶瓷对激光的发射率并计算了激光功率、光斑大小等对加工工艺的影响。

目前,国内外学者在研究激光玻璃加工工艺

时,大多采取不同材料的玻璃基板进行移动激光作用下的温度场数值计算分析,进而完成对玻璃基板的切削工艺,这些研究为高硼硅酸盐玻璃管的激光加工提供了较好的理论基础。受设备和技术的限制,实际激光加工高硼硅酸盐玻璃管的过程中,激光作用区的温度空间分布难以被测量。本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件,模拟 CO₂ 激光作用于旋转高硼硅酸盐玻璃管的三维瞬态温度场,分析了激光功率、激光光斑半径和玻璃管旋转速度对玻璃管温度分布的影响,为后续玻璃管的激光封口技术提供了参考和借鉴。

1 仿真过程及材料介绍

CO₂ 激光玻璃管加工系统如图 1 所示。激光经聚焦后辐照在高硼硅酸盐玻璃管表面,玻璃管吸收激光能量后温度升高,能量通过热传导向周围和玻璃管内部传递,玻璃管受热软化和熔融后完成加工。实验所用光源为 Synrad 公司的 Pulstar-p 150 金属射频 CO₂ 激光器,采用四爪卡盘夹持玻璃管,通过同轴步进电机控制转速,通过改变玻璃管表面到聚焦透镜的距离来调节靶面光斑直径。实验样品为高硼硅酸盐玻璃管 (Schott、BORO-8330™),其主要成分见表 1,主要物理参数见表 2。采用有限元分析法模拟仿真激光作用玻璃管的温度场分布规律,图 2 为仿真计算方法的流程图。

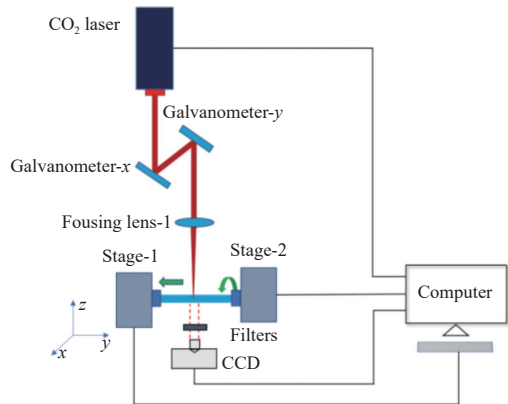


图 1 CO₂ 激光玻璃管加工系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ laser processing glass tube system

表 1 高硼硅酸盐玻璃的主要成分

Table 1 Main components of high borosilicate glass %

SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	BaO
81	12~13	2~3	4	0~2	0~2

表 2 高硼硅酸盐玻璃的主要物理参数

Table 2 Main physical parameters of high borosilicate glass

Young's modulus /Gpa	Constant pressure heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Poisson ratio	Linear expansivity/ (1/°C)	Density/ (g·cm ⁻³)	Heat transfer rate/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
64	1	0.22	4%	2.23	1.2

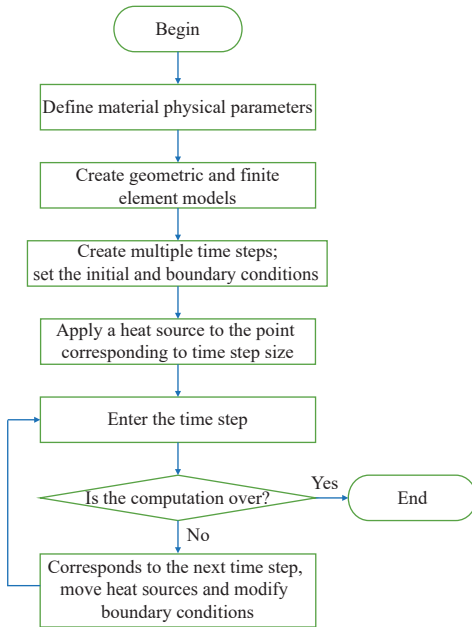


图 2 仿真计算方法流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation calculation method

2 建模与理论分析

2.1 传热基本方程和边界条件

文中采用的激光热源为高斯分布^[18], 其三维模型如图 3 所示。

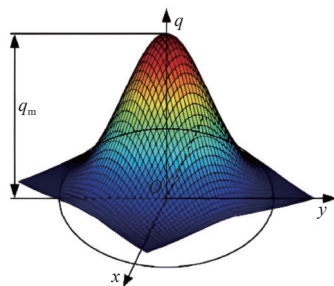


图 3 能量高斯分布三维图

Fig. 3 Three-dimensional diagram of energy Gaussian distribution

热源能量分布表达式为

$$Q(r) = \frac{2P}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) \quad (1)$$

式中: P 为激光功率; r_b 为激光光斑的半径; r 为材料表面某点到光斑中心的距离。

文中对热传导问题的研究基于 xyz 三维坐标系。由于激光加工的温度场是瞬态非线性问题, 为简化模型对模拟过程作出如下假设: 1) 加工材料为各向同性, 热物理性质参数为常量; 2) 考虑热传导、热对流和热辐射作用。

根据以上假设, 该模型的导热过程三维非稳态微分方程可表示为

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

式中: c , ρ 和 k 分别是高硼硅酸盐玻璃管的质量热容、密度和导热系数; $P(x, y, z, t)$ 为体热源的生成率。

由于高硼硅酸盐玻璃中的 Si-O 键的振动波段在 $9 \mu\text{m} \sim 11 \mu\text{m}$, 波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO₂ 激光能量可以被玻璃充分吸收, 故在 CO₂ 激光作用高硼硅酸盐玻璃的过程中, 可以将激光看作表面热源, 即在 CO₂ 激光加工玻璃管的过程中不存在体积热源, 所以式(2)中的 $P(x, y, z, t) = 0$ 。

初始条件为

$$t = 0, T(t) = T_0 \quad (3)$$

式中 T_0 为高硼硅酸盐玻璃管的初始温度, 这里视为环境温度。

被玻璃吸收的激光能量(E_a)部分以热传导的方式将能量传递到内部对材料进行加热, 当玻璃材料达到熔融状态时, 由于与未加工区域玻璃存在温度梯度差, 此时熔融区域的热能将会传递到玻璃管另一侧, 其余能量则以热对流和热辐射的方式与环境进行能量交换, 即:

$$E_a = E_n + E_s + E_f \quad (4)$$

式中: E_n 表示热传导向玻璃管内部传送的热能; E_s 表示对流换热逸出的热能; E_f 表示向外界辐射的热能。具体表达式为

$$E_a = \alpha I(x, y, z, t) \quad (5)$$

式中: α 为高硼硅酸盐玻璃对 CO₂ 激光的吸收率; $I(x, y, z, t)$ 为激光热源的功率密度。

$$E_n = -k \frac{\delta T}{\delta n} \quad (6)$$

式中: $k = K/(\rho c)$, 为材料的热扩散率, K 为传热率;

$\delta T/\delta n$ 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。

$$E_s = h(T_s - T_0) \quad (7)$$

式中: h 为表面传热系数; T_s 表示激光辐照在玻璃管处的表面温度。

$$E_f = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_0^4) \quad (8)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数; ε 为表面热辐射系数。

联立式(4)~式(8)可得边界条件为

$$\alpha I(x, y, z, t) = -k \frac{\delta T}{\delta n} + h(T_s - T_0) + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_0^4) \quad (9)$$

根据热源加载方程(1)、初始条件(3)和边界条件(9)计算出传热方程(2)中的 T , 即为高硼硅酸盐玻璃管在 CO_2 激光作用下的温度分布。吸收率 $\alpha=1$, 表面热辐射系数 $\varepsilon=1$, 环境温度为 293.15 K, 对流换热系数 $h=10\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

2.2 仿真模型建立

图 4 为激光加工高硼硅酸盐玻璃管的有限元仿真模型。该模型为三维瞬态模型, 模型尺寸为 $9\text{mm}\times 2\text{mm}\times 100\text{mm}$ (外径 9 mm, 壁厚 2 mm, 长度 100 mm), 在综合考虑计算资源、计算精度及效率之后, 本研究使用细化大小的三棱锥网格进行网格划分, 并设置旋转域来模拟玻璃管的旋转运动。在温度分布模型中, 将高硼硅酸盐玻璃管的 x 方向定义为轴向, 将 z 方向定义为径向。

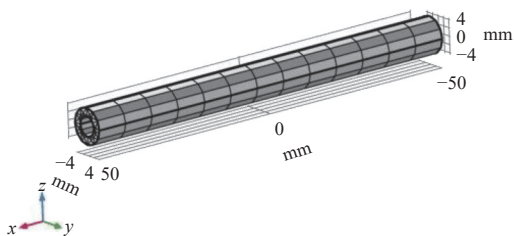


图 4 激光加工高硼硅酸盐玻璃管有限元模型

Fig. 4 Finite element model of laser-processed high borosilicate glass tubes

3 仿真结果分析

当 CO_2 激光功率 $P=120\text{W}$, 光斑半径为 1.5 mm (FWHM), 玻璃管旋转速度为 200 r/min 时, CO_2 激光辐照高硼硅酸盐玻璃的温度场仿真图如图 5 所示。图 6 给出了径向方向上 3 点的温度随时间的变化曲线, 这 3 点距激光中心的轴向距离均为 2 mm。从图 6 可以看出, 当激光作用于高硼硅酸盐玻璃管表面时, 由于玻璃热导率低, 热扩散较慢, 玻璃管

表面温度迅速升高, 内部温度上升缓慢, 径向会产生较大的温度梯度。随着激光作用时间增加, 玻璃管内外温度逐渐平衡, 此时表面热辐射和空气对流换热是玻璃管热量损失的主要原因, 温度趋于稳定。

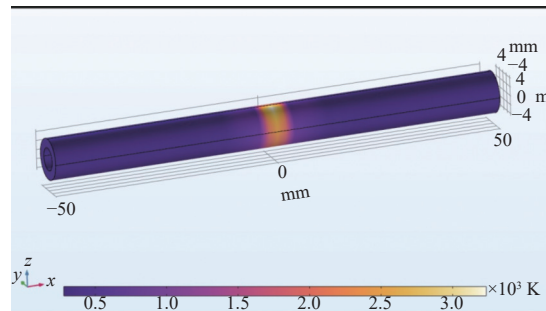


图 5 CO_2 激光辐照高硼硅酸盐玻璃的温度场仿真图

Fig. 5 Temperature field simulation diagram of CO_2 laser irradiated high borosilicate glass

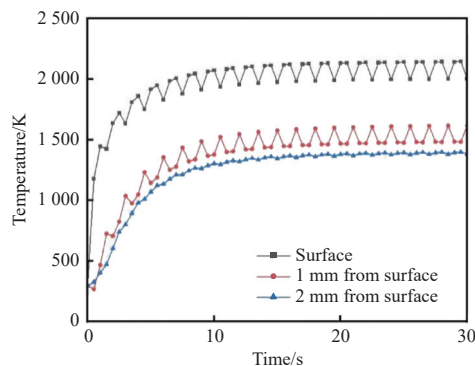


图 6 CO_2 激光作用下玻璃管不同位置的温度随时间的变化规律

Fig. 6 Temperature change law of different positions of glass tube with time under CO_2 laser action

3.1 激光功率对高硼硅酸盐玻璃管加工温度分布的影响

当激光光斑半径为 1.5 mm, 玻璃管旋转速度为 200 r/min 时, 100 W、120 W 和 140 W 不同激光功率作用玻璃管时, 玻璃管表面轴向方向在作用 20 s 时的温度分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 距离光斑中心越近, 玻璃管表面温度越高, 而在远离激光光斑中心的位置, 温度急剧下降。在相同的光斑半径和旋转速度下, 玻璃管表面的温度随激光功率的增加而增大。图 8 给出了不同激光功率作用下, 玻璃管表面距激光光斑中心的轴向距离为 2 mm 处的温度随时间的变化曲线。从图 8 中可以看出, 该点温度随激光作用时间的增加迅速升高, 在约 10 s 后趋于稳定。激光功率越大,

玻璃管能达到的最高温度越大, 达到最高温度所需要的时间越短。这是因为激光功率的增加导致热能密度的增加, 这进一步增加了玻璃管表面对激光的吸收效率, 从图 8 中的局部放大图可知, 玻璃管表面达到加工温度(1 500 K)的时间随激光功率的增大而降低, 但激光功率越大, 耗能越多, 玻璃管内外的温度梯度越大。

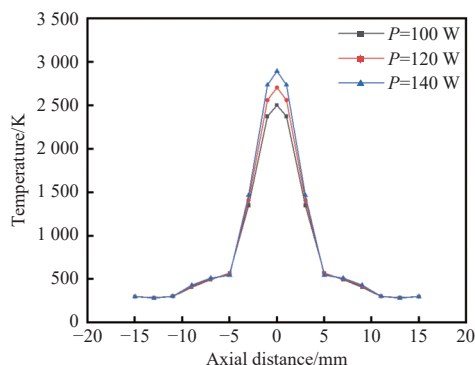


图 7 高硼硅酸盐玻璃管在不同激光功率 CO₂ 激光作用下的表面温度分布

Fig. 7 Surface temperature distributions of high borosilicate glass tubes under action of CO₂ laser with different laser powers

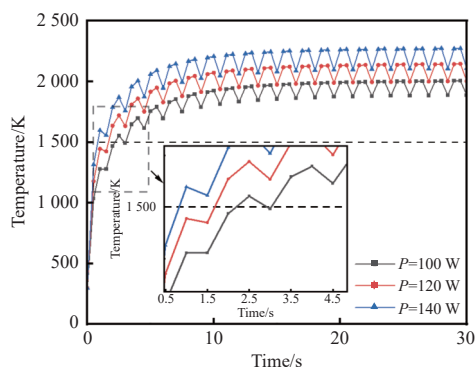


图 8 高硼硅酸盐玻璃管在不同激光功率 CO₂ 激光作用下表面温度随时间的变化规律

Fig. 8 Change law of surface temperature of high borosilicate glass tube with time under action of CO₂ laser with different laser powers

3.2 靶面光斑半径对高硼硅酸盐玻璃管加工温度分布的影响

当激光功率为 120 W, 玻璃管旋转速度为 200 r/min 时, 取同一时间点(20 s), 激光光斑半径分别为 1 mm、1.5 mm 和 2 mm 的激光作用于高硼硅酸盐玻璃管表面, 玻璃管表面轴向的温度分布如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 随着激光光斑半径的增加, 玻璃管表面激光辐照区的温度减小。这

是因为激光光斑半径越大, 功率密度就越低, 辐照区单位面积玻璃材料在单位时间内获得的能量越少。

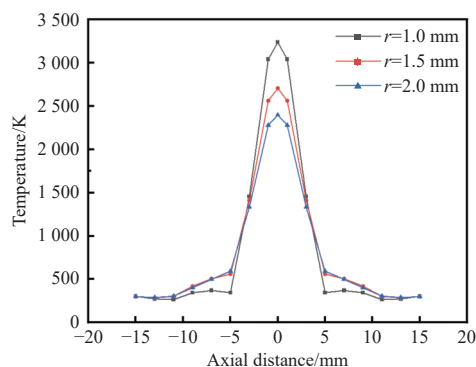


图 9 高硼硅酸盐玻璃管在不同光斑半径 CO₂ 激光作用下的表面温度分布规律

Fig. 9 Surface temperature distribution law of high borosilicate glass tubes under action of CO₂ laser with different laser spot radii

图 10 是激光光斑半径分别为 1 mm、1.5 mm 和 2 mm 时, 玻璃管径向不同位置在同一时间点(20 s)的温度分布规律, 这 5 个点距激光中心的轴向距离均为 2 mm。从图 10 中可以看出, 在相同激光功率和旋转速度下, 随着径向距离的增加, 径向温度呈现出先快速下降后缓慢下降的趋势, 且温度随光斑半径的增大而降低。在实际加工过程中, 当光斑直径增加, 要达到相同的加工温度和加工质量, 需要增加激光功率; 如果光斑太小, 玻璃管内会产生较大的温度梯度, 形成内应力, 影响加工质量。

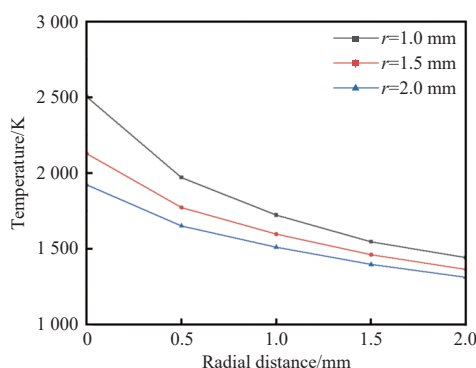


图 10 高硼硅酸盐玻璃管在不同光斑半径 CO₂ 激光作用下的径向温度分布规律

Fig. 10 Radial temperature distribution law of high borosilicate glass tubes under action of CO₂ laser with different laser spot radii

3.3 旋转速度对高硼硅酸盐玻璃管加工温度分布的影响

当光斑半径为 1.5 mm, 激光功率为 120 W 时,

玻璃管旋转速度分别为 100 r/min、200 r/min 和 300 r/min, 其轴向在同一时间点 (20 s) 的温度分布如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 在光斑半径和激光功率固定的情况下, 随着玻璃管旋转速度的增加, 其表面辐照区域的温度呈下降趋势, 这是因为当玻璃管以较低的速度旋转时, 单位面积的玻璃管表面受到的激光辐照时间更长, 吸收的能量更多, 所以温度越高; 但是旋转速度越低, 温度梯度越大, 产生的内应力也会越大, 若超过玻璃管的极限应力, 玻璃管就会产生裂纹, 因此在实际加工玻璃管时, 应该选择合适的旋转速度。

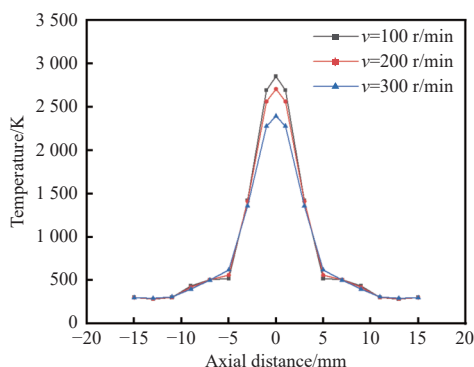


图 11 不同旋转速度的玻璃管在 CO_2 激光作用下的表面温度分布规律

Fig. 11 Surface temperature distribution law of glass tubes with different rotational speeds under action of CO_2 laser

4 结论

本研究运用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对激光加热高硼硅酸盐玻璃管的温度场进行瞬态仿真, 分析了 CO_2 激光作用高硼硅酸盐玻璃管的温度场分布的时间变化规律。在激光作用下, 玻璃管表面的温度迅速升高, 但由于较低的传热系数, 玻璃管内部温度上升缓慢, 会产生较大的温度梯度, 并形成内应力, 玻璃管有产生裂纹的风险。通过单因素控制变量法研究了激光功率、激光光斑半径和玻璃管旋转速度这 3 类工艺参数对温度场分布的影响规律, 研究表明, 玻璃管表面温度随着激光功率的增大、激光光斑半径的减小和玻璃管旋转速度的减小呈增大趋势。本文的研究结果对 CO_2 激光热熔封接高硼硅酸盐玻璃管的参数选取具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 李阳, 朱宇峰, 来悦颖, 等. 像增强管激光封接过程中的

气密性研究[J]. 应用光学, 2022, 43(6): 1202-1206.

LI Yang, ZHU Yufeng, LAI Yueying, et al. Research on air tightness of image intensifier tube during laser sealing[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(6): 1202-1206.

[2] 李欣欣, 李兴, 王翼猛, 等. 激光精密加工, 点亮智能制造[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1902001.

LI Xinxin, LI Xing, WANG Yimeng, et al. Laser precision processing lightens intelligent manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1902001.

[3] 杨毅然, 余立冬, 查榕威, 等. 激光清洗汉白玉表面油漆层的实验研究[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 352-358.

YANG Yiran, YU Lidong, ZHA Rongwei, et al. Experimental study on laser cleaning of paint layer on white marble surface[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 352-358.

[4] ZHANG J L, SONG B, WEI Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 270-284.

[5] COLLINS A R, MILNE D, PRIETO C, et al. Thin glass processing with various laser sources[C]//Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX. San Francisco, California, USA: SPIE, 2015: 93511K-1-10.

[6] WILLIAMS E, LAVERY N. Laser processing of bulk metallic glass: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 73-91.

[7] CVECEK K, DEHMEL S, MIYAMOTO I, et al. A review on glass welding by ultra-short laser pulses[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(4): 042001.

[8] 邢松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.

XING Songling, LIU Lei, ZOU Guisheng, et al. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0403001.

[9] SINGLA A K, BANERJEE M, SHARMA A, et al. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: process parameters, defects and post-treatments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 161-187.

[10] 焦俊科, 王新兵. CO_2 激光作用下运动石英玻璃的温度分布[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(1): 1-4.

JIAO Junke, WANG Xinbing. Temperature distribution of

- moving quartz glass heated by CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 1-4.
- [11] YANG B J, HE Y C, DAI F, et al. Simulation of temperature field distribution for cutting the tempered glass by ultraviolet laser[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 187: 012029.
- [12] 黄明贺, 张庆茂, 吕启涛, 等. 紫外激光焊接镀铜玻璃工艺的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1002007.
- HUANG Minghe, ZHANG Qingmao, LYU Qitao, et al. UV-laser welding process of copper-plated glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1002007.
- [13] 孙劭伟, 齐乃杰, 孔艳, 等. 熔石英玻璃激光损伤的三维应力场研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0101001.
- SUN Shaowei, QI Naijie, KONG Yan, et al. Three-dimensional stress fields of laser damaged fused silica[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0101001.
- [14] REN G Q, SONG H W, DAN J Q, et al. Thermal analysis and machinability for laser-assisted machining of fused silica[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 119078.
- [15] ZHAI C T, XU J K, LI Y Q, et al. Study on surface heat-affected zone and surface quality of Ti-6Al-4V alloy by laser-assisted micro-cutting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(7): 2337-2352.
- [16] GUO Y J, YANG X J, KANG J, et al. Experimental investigations on the laser-assisted machining of single crystal Si for optimal machining[J]. *Optics Laser Technology*, 2021, 141: 107113.
- [17] 许伟静, 舒霞云, 申昆明, 等. 激光辅助金刚石车削单晶硅的温度场建模及加工试验[J]. *应用激光*, 2022, 42(11): 37-49.
- XU Weijing, SHU Xiayun, SHEN Kunming, et al. Temperature field modeling and machining experiment of laser-assisted diamond turning monocrystalline silicon[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(11): 37-49.
- [18] 张开达, 宋李兴. 基于 COMSOL 的单次脉冲激光辐照氧化铝陶瓷温度场分析[J]. *中国水运 (下半月)*, 2022, 22(11): 46-48.
- ZHANG Kaida, SONG Lixing. Analysis of temperature field in alumina ceramics irradiated by single pulse laser based on COMSOL[J]. *China Water Transport*, 2022, 22(11): 46-48.
- [19] FAN M, ZHOU X, CHEN S, et al. Measurement of thermal properties and numerical simulation of temperature distribution in laser-assisted machining of glass-ceramic[J]. *Silicon*, 2022, 14(18): 12155-12164.