

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0117-04

激光烧结陶瓷温度场的数值模拟

杜新宇, 季凌飞, 蒋毅坚

(北京工业大学国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘要 根据热传导理论, 推导出了激光烧结陶瓷过程中的热传导方程; 并采用数值模拟的方法, 编写了基于有限差分法的计算机程序。在此基础上, 分别模拟计算了在各种不同的烧结工艺条件下, CO_2 激光辐照 Al_2O_3 陶瓷的温度场, 结果表明, 采用激光辐照的办法烧结陶瓷可以使陶瓷在短时间内达到很高的温度。此外, 还计算了烧结过程中材料的温度随空间的变化曲线, 结果表明, 平行于激光辐照方向的温度梯度大小不随烧结时间变化而只与激光功率有关, 激光功率越大温度梯度越大。研究还发现: 垂直激光辐照方向的温度梯度的大小取决于激光束的功率密度分布和光斑大小。

关键词 激光技术; 激光烧结; 陶瓷; 温度场; 数值模拟

中图分类号 TB32 **文献标识码** A

Numerical Simulation Study on Field of Temperature in Ceramics During the Laser Sintering

DU Xin-yu, JI Ling-fei, JIANG Yi-jian

(National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract A numerical simulation was studied on field of temperature in ceramics by using FDM (Finite Differential Method) during the laser sintering. At first, the heat conduction equations were given, then the boundary condition was given, Finally, the mathematical model of the laser sintering on ceramics was given and the equations were solved by FDM. The simulation program was given by above method, and then the change of field of temperature in ceramics was described by simulation program. The effect of technological conditions on field of temperature in ceramics was analyzed. It shows that the lengthways temperature gradient in ceramics is only relevant to the laser power, and the transverse temperature gradient in ceramics is relevant to the laser speckle radius and the transverse intensity distribution of laser.

Key words laser technique; laser sintering; ceramics; field of temperature; numerical simulation

1 引 言

激光材料制备技术是应用高能量密度激光制备具有特殊功能非金属材料的一种技术, 在非金属材料领域有着非常广阔的应用前景。该技术可以用于陶瓷的整体烧结。更重要的是通过激光辐照非平衡的加热与凝固机制, 可以改变功能材料的电、光、磁等物理性能, 制备出常规技术尚无法制备的多种新型功能材料^[1~3]。

采用激光束取代常规陶瓷烧结技术中的宽带加热源, 可使能源利用率高, 适用于高熔点材料的制备和改性^[4], 而且烧结速度快^[5,6]。更重要的是由于激光源是一种严格定向的集中加热源, 加之激光束本身具有单色性等特点, 较之常规的陶瓷烧结方法, 激光烧结陶瓷可以使陶瓷内部产生较大的纵向温度梯度。这种纵向的温度梯度与陶瓷的特殊性能有着很大的关系。实验表明烧结过程中材料内部的纵向温

基金项目: 国家自然科学基金(10674041)、北京市自然科学基金(2052003)、北京市属市管高等学校人才强教计划\北京市科技新星计划(2006B11)和北京工业大学青年科研基金(2006)资助课题。

作者简介: 杜新宇(1981—), 男, 北京人, 博士研究生, 主要从事激光烧结陶瓷研究。

导师简介: 蒋毅坚(1962—), 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料制备技术和激光拉曼光谱研究。

E-mail: yjjiang@bjut.edu.cn

度梯度越大,横向温度梯度越小烧结出的陶瓷性能越好。然而烧结过程中陶瓷的温度场既取决于激光的功率密度、光强分布、辐照时间等激光工艺参数,也取决于被辐照材料的热物理性能:如材料对激光的吸收系数、热导率、比热容以及材料的相变温度、熔化温度和密度等。众多的可变参数使得用传统的解析方法计算激光烧结陶瓷过程中的温度场变得十分复杂。

针对上述难点本文采用数值模拟的方法,编写了基于有限差分法的计算机程序,模拟计算了激光烧结陶瓷过程中的温度场。

2 实验方法

激光烧结系统主要包括一台连续输出的 CO₂ 激光器;配有可带动辐照件高速旋转的工作台;用以实时监测并记录激光烧结过程中陶瓷表面温度的红外测温仪等。图 1 为烧结系统的示意图。烧结时将陶瓷置于转台上,激光束垂直辐照陶瓷的上表面。陶瓷为直径 12 mm 厚 5 mm 的圆柱体,激光光斑直径为 4 mm。

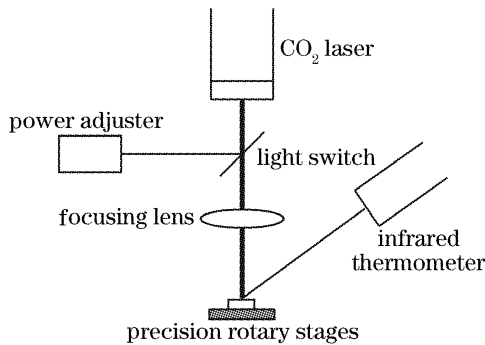


图 1 激光烧结系统示意图

Fig. 1 Sketch map of laser sintering technique

3 三维温度场的数值模拟

激光到达陶瓷表面后,在一个非常薄的表层内便被吸收,致使表层温度迅速升高。表面温度的升高事实上是表层材料的微观粒子吸收了光子能量后被激发到高能态,热运动的剧烈程度高于材料内部。热运动的不平衡将通过粒子相互间的碰撞来交换能

量,实现新的平衡,在宏观上则体现为热能从高温向低温的流动。因此研究热量在陶瓷内的传导是研究陶瓷改性的基础。

3.1 基本假设

考虑到激光烧结陶瓷的过程为一个快速升温的过程,陶瓷内部的温度场不仅与激光工艺参数有关,还与材料的热物性参数有关^[7]。为了简化,计算模型作了如下假设。

- 1) 所有热物性参数视为常数,即热物性参数不随温度改变。
- 2) 材料对激光的吸收率为常数,不随材料的温度变化。
- 3) 材料与环境的换热忽略不计。

3.2 热传导方程

由于陶瓷为圆柱体因此建立圆柱坐标系中的三维热传导微分方程^[8]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

其中 α 为热扩散系数 $\alpha = k/\rho c$, k 为材料的导热系数, ρ 为材料密度, c 为材料比热容。

如果上述三维热传导问题是轴对称的,则(1)式简化为^[9]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

3.3 边界条件

激光辐照在陶瓷上表面,根据前述基本假设陶瓷下表面和侧面视为绝热表面。因此边界条件可以写成

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\text{上表面}} = \eta P(r, \phi, t), \quad (3)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\text{下表面}} = 0, \quad (4)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\text{圆柱侧面}} = 0, \quad (5)$$

其中 $P(r, \phi, t)$ 是激光功率分布, η 是材料对激光的吸收率。

3.4 计算模型

根据有限差分法将上述热传导方程写成隐士差分方程

$$T_{i,k}^{n+1} - \alpha \lambda \left[\left(1 - \frac{1}{2i}\right) T_{i-1,k}^{n+1} - 2T_{i,k}^{n+1} + \left(1 + \frac{1}{2i}\right) T_{i+1,k}^{n+1} \right] - \alpha \lambda (T_{i,k-1}^{n+1} - 2T_{i,k}^{n+1} + T_{i,k+1}^{n+1}) = T_{i,k}^n, \quad (6)$$

边界条件:

$$T_{i,0}^{n+0.5} = \frac{1}{2} \alpha \lambda \left[\left(1 - \frac{1}{2i}\right) T_{i-1,0}^n - 2T_{i,0}^n + \left(1 + \frac{1}{2i}\right) T_{i+1,0}^n \right] + \alpha \lambda (T_{i,1}^n - T_{i,0}^n) + T_{i,0}^n + \frac{\alpha q(i,k)\tau}{kh}, \quad (7)$$

$$T_{i,K}^{n+0.5} = \frac{1}{2}\alpha\lambda \left[\left(1 - \frac{1}{2i}\right)T_{i-1,K}^n - 2T_{i,K}^n + \left(1 + \frac{1}{2i}\right)T_{i+1,K}^n \right] + \alpha\lambda (T_{i,K-1}^n - T_{i,K}^n) + T_{i,K}^n, \quad (8)$$

$$T_{R,k}^{n+0.5} = \alpha\lambda (T_{R-1,k}^n - T_{R,k}^n) + \frac{1}{2}\alpha\lambda (T_{R,k-1}^n - 2T_{R,k}^n + T_{R,k+1}^n) + T_{R,k}^n, \quad (9)$$

其中 h 为空间步长, τ 为时间步长, $\lambda = \tau/h^2$ 称为网格比, $q(i,k)$ 为 (i,k) 点的激光功率密度。陶瓷的网格划分如图 2 所示。

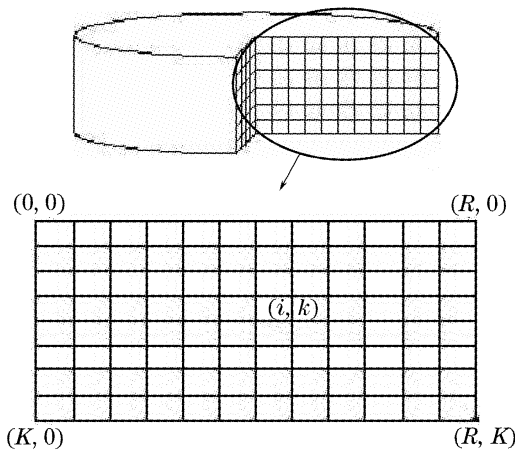


图 2 网格划分形式

Fig. 2 Finite difference network in cylindrical coordinate system

4 计算结果与讨论

根据实验条件模拟计算了波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光烧结 Al_2O_3 陶瓷的温度场。室温下 Al_2O_3 陶瓷的热物性参数如表 1 所示^[10]。

表 1 室温下 Al_2O_3 陶瓷的热物性参数

Table 1 Thermophysical constants of Al_2O_3 ceramics

Density ρ / (g/ mm^3)	3.965×10^{-3}
Specific heat c / [J/(g · K)]	7.79
Thermal conductivity k / [W/(mm · K)]	0.036
Thermal diffusivity α / (mm^2/s)	1.166

激光束垂直照射在陶瓷上表面的中心处, 材料对激光的吸收率为 0.8。激光的功率密度分布如

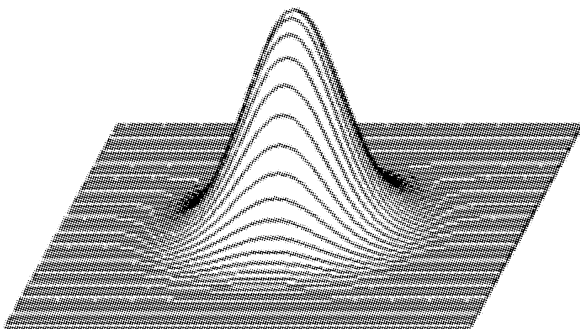


图 3 基模高斯光束的功率密度分布

Fig. 3 Transverse intensity distribution

图 3 所示, 光斑直径为 4 mm, 激光功率为 150 W。

图 4 为激光辐照 1 s, 2 s, 3 s, 5 s, 10 s, 20 s 时陶瓷片中心轴上温度随深度的变化曲线, 横坐标 0 mm 处代表陶瓷上表面中心点即激光辐照面中心点, 5 mm 处为下表面中心点。由图 4 可知, 激光辐照 0~2 s 阶段陶瓷内的纵向温度梯度是一个增大的过程; 辐照 2 s 后陶瓷内的纵向温度梯度趋于稳定, 即随着辐照时间的增加虽然各处的温度增大但纵向温度梯度保持不变。

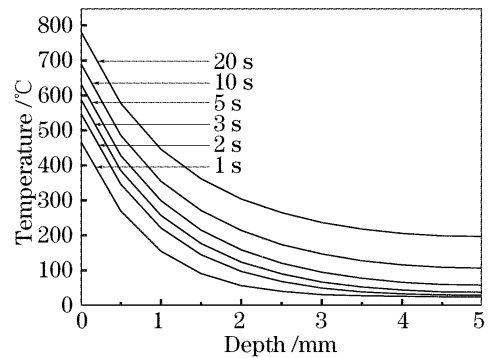


图 4 不同烧结时间陶瓷纵向温度分布曲线
Fig. 4 Lengthways temperature distribution for different irradiation time

图 5 所示为不同激光功率辐照 10 s 时陶瓷中心轴上温度随深度的变化曲线。由图可知, 纵向温度梯度的大小与辐照激光功率有关, 激光功率越大陶瓷内的纵向温度梯度越大。

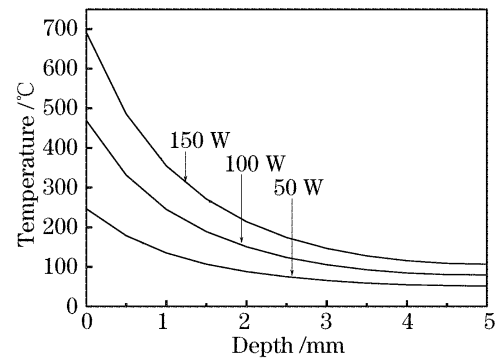


图 5 不同辐照功率下陶瓷纵向温度分布曲线
Fig. 5 Lengthways temperature distribution for different laser power

此外, 还计算了相同功率不同光斑半径辐照下陶瓷的温度场。图 6 所示为激光功率 150 W, 光斑半径分别为 2 mm, 4 mm, 6 mm, 辐照 1 s 后陶瓷上

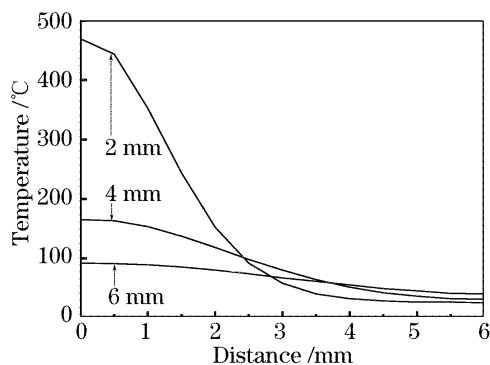


图 6 不同激光光斑半径下陶瓷横向温度分布曲线
Fig. 6 Transverse temperature distribution for different laser speckle radius

表面温度沿半径方向的变化曲线,即横向温度分布曲线。从图中可以明显地看出,烧结时陶瓷的横向温度梯度与辐照激光光斑大小有直接关系。光斑越小横向温度梯度越大。

为了验证计算结果的正确性,采用红外测温仪记录了在烧结过程中 Al_2O_3 陶瓷上表面中心点的温度。测得激光功率 55 W,光斑半径为 4 mm 辐照 20 s 时的温度为 397 °C,计算所得温度为 384 °C,相对误差仅为 3 %。

5 结 论

利用数值模拟的办法可以定量地分析激光烧结陶瓷过程中陶瓷的温度场,这为分析激光辐照使材料改性的微观机制提供了一条有效的途径,也为分析陶瓷内的残余应力提供了很好的条件。通过对烧结过程中陶瓷温度场的模拟计算还有助于得到最佳烧结工艺从而提高烧结质量和效率。

参 考 文 献

- Lingfei Ji, Yijian Jiang, Wei Wang *et al.*. Enhancement of the dielectric permittivity of Ta_2O_5 ceramics by CO_2 laser irradiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1577~1579
- Ji Lingfei, Wang Wei, Yu Zhenlong *et al.*. Investigation on the improving dielectric properties of $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{0.92}(\text{TiO}_2)_{0.08}$ ceramic by laser sintering [J]. *Appl. Laser*, 2004, **24**(6): 335~338
季凌飞,王 伟,于振龙等. $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{0.92}(\text{TiO}_2)_{0.08}$ 介电陶瓷的激光改性研究[J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 335~338
- Jiang Chengyong, Zhou Guoqing, Xu Jun *et al.*. Effect of irradiation on Ti-doped sapphire by excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 669~672
蒋成勇,周国清,徐 军等. 准分子激光对钛宝石辐照作用的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 669~672
- Li Jiarong, Zheng Qiguang, Tao Xinzhi *et al.*. Investigation of oxide ceramics synthesis using high power CO_2 laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(10): 770~774
李家榕,郑启光,陶星芝等. CO_2 激光合成陶瓷的研究 [J]. *中国激光*, 1991, **18**(10): 770~774
- Han Zhao, Cao Wenbin, Lin Zhiming *et al.*. Progress on rapid prototyping of ceramic parts by selective laser sintering [J]. *J. Inorganic Materials*, 2004, **14**(4): 705~713
韩 召,曹文斌,林志明等. 陶瓷材料的选区激光烧结快速成型技术研究进展[J]. *无机材料学报*, 2004, **14**(4): 705~713
- Cui Xuemin, Ouyang Shixi, Yu Zhiyong *et al.*. Development of advanced ceramics freeform fabrication [J]. *Ceramics*, 2001, (4): 5~10
崔学民,欧阳世翕,余志勇等. 先进陶瓷快速无模成型方法研究进展[J]. *陶瓷*, 2001, (4): 5~10
- Li Junchang. *Laser Diffraction and Numerical Heat Conduction* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 395~396
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- Yu Changmin. *Numerical Heat Conduction* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1981
俞昌铭. 传导及其数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981
- M. N. Ozisik. *Heat Conduction* [M]. Yu Changming transl., Beijing: Higher Education Press, 1983
M. N. 奥齐西克. 热传导 [M]. 俞昌铭译, 北京: 高等教育出版社, 1983
- Ma Qinfang. *Handbook of Thermophysical Properties of Material* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986
马庆芳. 实用热物理性质手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986