

文章编号: 1001-4322(2005)05-0681-04

# 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟

袁 红, 赵剑衡, 谭福利, 孙承纬

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用有限元方法数值模拟在连续激光辐照下旋转柱壳温度场的变化和分布情况,并分析了热性能参数对温度场造成的影响,同时还比较分析了不同旋转频率对柱壳温度场分布的影响。结果表明,激光作用下旋转柱壳的温升大大低于静止柱壳的温升,外表面温度呈现出与旋转频率相符的周期性上升过程,而内表面温升由于热传导的原因在较小频率下才表现出这种周期性,当频率增大到一定值时,内表面温升不出现周期性的台阶而是曲线上升。

**关键词:** 有限元方法; 激光; 旋转柱壳; 温度场

**中图分类号:** TN246

**文献标识码:** A

激光辐照下靶目标的温升效应是激光与物质相互作用的重要组成部分。激光对靶表面的加热效应与激光的波长、脉宽、频率以及靶材料和其表面状况密切相关,是一个非常复杂的物理过程。已有较多的文献<sup>[1~5]</sup>从理论、实验和数值模拟的角度较深入地研究了上述各种因素对激光加热效应的影响。王伟平等曾研究过壳体的旋转频率对激光加热效应<sup>[6]</sup>的影响,得到长时间激光辐照下旋转频率对加热效果影响很小的结论,其实验采用的是重复频率激光,实验中壳体的温升过程受到旋转和激光重复脉冲位相关系的影响,但他在数值模拟中没有考虑材料参数变化,特别是吸收系数变化对激光加热效应的影响。本文在较全面考虑材料参数随温度变化的情况下,利用有限元方法系统地研究了壳体旋转频率对激光加热效应的影响。

## 1 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟

### 1.1 计算模型

旋转柱壳长 80 mm, 外径 55 mm, 壁厚 1.5 mm, 激光到达靶面处光斑直径 30 mm, 平均功率密度为  $q=2.7$  kW/cm<sup>2</sup>。假定光斑作用于柱壳的中部, 如图 1 所示, 这样受激光辐照的旋转柱壳有一垂直于轴向的对称面,  $z$  方向为轴向, 计算时采用 1/2 对称模型, 如图 2 所示, 采用 8 节点 6 面体实体单元。

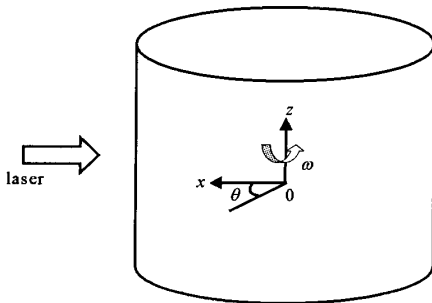


Fig. 1 Original model

图 1 初始物理模型

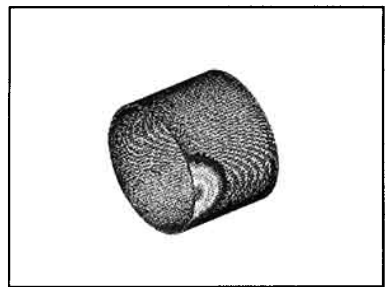


Fig. 2 Simplified and meshed model for calculation

图 2 简化计算模型

### 1.2 激光加载和有限元求解方法

计算时认为旋转柱壳上有一热流输入区, 热流以  $I=I_0 \exp(-2r^2/r_0^2)$  的高斯形式输入, 其中  $r_0$  为光斑半径,  $I_0$  为最大功率密度, 即激光功率密度  $I$  随中心距  $r$  变化。图 2 中对称面取为绝热边界条件, 忽略柱壁表面上的热对流和热辐射的影响, 假定环境温度为 20 °C。

本文建立的模型为 3 维实体模型, 在直角坐标中模型的热传导方程可写为<sup>[7]</sup>

• 收稿日期: 2005-01-25; 修订日期: 2005-03-31

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 袁 红(1977—), 女, 博士生, 从事激光与物质相互作用研究; 绵阳 919-113 信箱; E-mail: yhong1977@ustc.edu.cn.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \tag{1}$$

热流输入边界  $\Gamma$  
$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q(\Gamma, t) \tag{2}$$

初始温度 
$$T_0 = T(x, y, z, 0) \tag{3}$$

以上式中： $\rho$ 为材料的密度； $c$ 为材料比热容； $t$ 是时间； $q(\Gamma, t)$ 是 $\Gamma$ 边界上给定热流量； $k_x, k_y, k_z$ 分别是材料沿 $x, y, z$ 方向的热传导系数(本文研究各向同性材料,有 $k=k_x=k_y=k_z$ )； $n_x, n_y, n_z$ 是边界外法线的方向余弦； $T_0$ 是环境温度。

1.3 材料参数

旋转柱壳的材料为 30CrMnSiA 钢。该材料<sup>[8]</sup>的热传导系数  $k$  和比热容  $c$  随温度的变化见表 1。激光辐照材料,对材料加热,当温度升高时,将改变材料表面的状况,进而对吸收系数产生一定的影响<sup>[9]</sup>,材料吸收系数  $\alpha$  随温度变化情况见表 2。

表 1 热传导系数、比热容随温度的变化情况  
Table 1 Thermal conductivity and specific heat varying with temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	27.63	29.30	30.56	30.56	30.56	29.51	28.67	27.21	25.33	24.61
$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	473.1	519.1	581.9	644.7	699.1	766.1	841.5	910.1	975.0	1040.0

表 2 吸收系数随温度的变化情况  
Table 2 Absorption coefficient varying with temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	20	300	400	700	800	870	920
$\alpha$	0.35	0.35	0.38	0.68	0.72	0.69	0.74

2 温度场计算结果分析

图 3(a) 给出的是旋转频率(绕轴线逆时针旋转)为  $f=5 \text{ Hz}$  的旋转柱壳在激光辐照 1.6 s 时的温度分布,图 3(b) 给出了沿轴向内外表面的温度分布(起点位于初始时刻激光光斑中心),从中可以看到对应于按高斯分布的热流输入,柱壳上的温度场在轴线方向也呈高斯状分布。但是在整个环线上的分布则因为壳体的旋转而呈现出与旋转频率相关的有规律性的分布。图 4 给出了 1 s 时内外表面圆周上的温度分布(起始点位于初始时刻激光光斑中心,绕轴线沿顺时针方向)。在 1 s 时刻激光光斑回到起始点处,激光辐照区域外表面温度高,激光未辐照区域外表面温度低,而内表面则因为热传导的因素表现出不同的规律,内表面的温升滞后于外表面。从图 4 可以看出,在同一时刻旋转柱壳内外表面圆周(顺时针方向)的温度场分布反相对应,即外圆周温度最高点对应内圆周温度最低点及外圆周温度上升而内圆周温度下降。这是因为当圆柱壳旋转整数圈将要回到起点前的瞬时,初始时刻激光辐照区域内外表面温度都为极小值,外表面受激光辐照即有热流输入因而温度迅速跃升,而柱壳有厚度热扩散需要时间所以此时内表面温度继续降低,又因为激光能量呈高斯分布所以温度最高点并不对应激光光斑中心而是沿旋转方向偏后。激光功率密度及旋转频率保持不变,只改变光斑大小,即直径由 30 mm 增大一倍到 60 mm,在同一时刻同一位置(初始时刻激光光斑中心)的温度值也相应增加一倍,如图 5

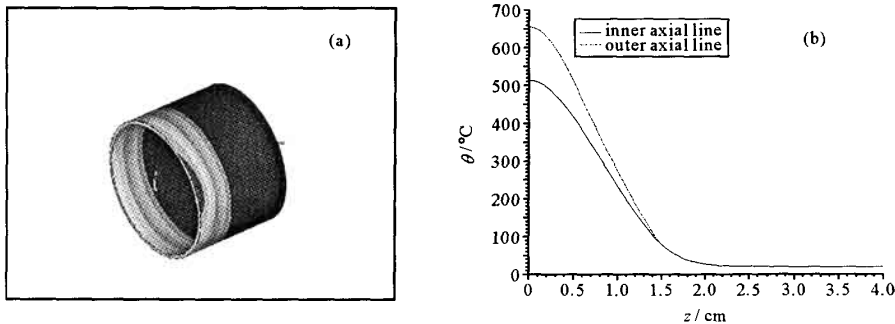


Fig. 3 Temperature distribution at 1.6 s

图 3 激光辐照 1.6 s 时壳体上的温度分布

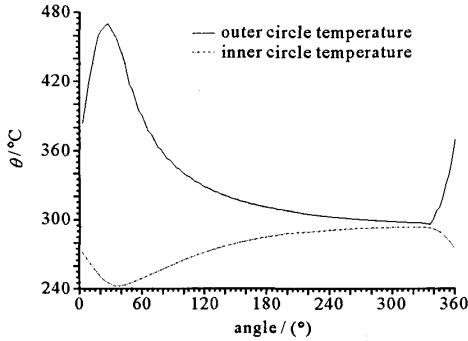


Fig. 4 Temperature at outer/inner circle at 1 s

图 4 1 s 对称面上内外圆周上的温度分布

所示,内表面点和外表面点都以  $t=0.2$  s 周期上升与旋转频率  $f=5$  Hz 相符,外表面点(1,3)幅值分别大于内表面点(2,4)。图 3~5 所示计算结果均是在吸收系数取为定值即  $\alpha=0.35$  下获得的。

图 6 给出了初始时刻激光光斑中心点对应旋转柱壳内外表面的温度历史,其中比较了激光吸收系数是否随温度变化对结果的影响。激光辐照材料,对材料加热,当温度升高时,将改变材料表面的状况,进而对吸收系数产生一定的影响(见表 2)。一般的情况是材料的吸收系数随温度的升高而增大,使得材料的升温速率不断地增大,因此采用随温度变化的吸收系数进行计算的温度值高于吸收系数取平均值( $\alpha=0.35$ )的计算结果,考虑激光吸收系数随温度变化所得数值结果更接近实验测量值<sup>[9]</sup>。

图 7 给出柱壳在静止、旋转状态及不同转速下初始时刻激光光斑中心点对应柱壳上内外表面的温升历史。如图 7(a)所示,静止状态下当辐照时间为 0.05 s 时该点的温度已超过 500 °C,而在旋转状态下却不到 200 °C,频率越高温度振荡幅度越小。如图 7(a)所示温度随时间有规律性地变化,且随着频率增大相邻的极值之差也随之减小,即沿垂直于轴向的同一圆周上温度分布趋于均匀,其温度场分布类似于均匀受热。在频率较小时内表面温度值才表现出台阶上升,当频率增加到一定值即某临界频率时,内表面温升不出现周期性的台阶而是曲线上升。

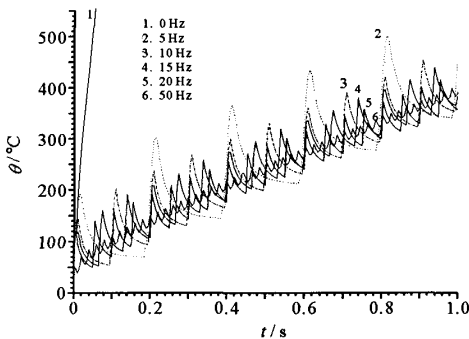


Fig. 7 Outer and inner temperature history at different frequency

图 7 在不同频率下内外表面的温升曲线

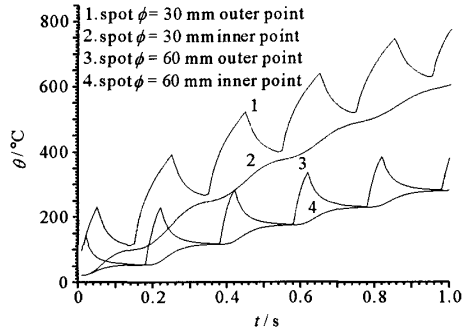


Fig. 5 Temperature history under different laser irradiation

图 5 不同光斑下内外表面的温升曲线

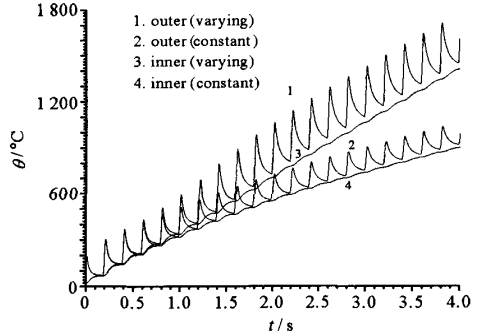
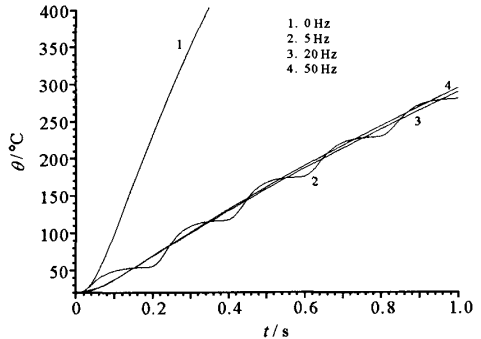


Fig. 6 Outer/inner temperature history of the spot

图 6 光斑中心内外表面的温升曲线



### 3 结 论

用有限元方法,考虑材料参数的影响模拟计算了连续激光辐照下旋转柱壳的升温特征。由上述计算结果和分析,可以得到如下几点结论:在环向方向激光辐照区域外表面温度高,激光未辐照区域外表面温度低,柱壳上的温度场在轴线方向则呈高斯状分布与高斯分布的热流输入相对应。由于热传导的原因内表面温升滞后于

外表面。同一时刻旋转柱壳内外表面圆周的温度场分布反相对应,即外表面温度最高点对应内表面温度最低点及外表面温度上升而内表面温度下降。激光光斑增大温度上升加快,本文的算例结果表明:在功率密度保持不变的情况下同一时刻相同区域温度值与光斑大小约成比例关系,即光斑直径增大一倍对应温度值增大一倍。采用随温度变化的吸收系数的计算结果高于采用恒定的吸收系数的计算结果,变吸收系数的计算结果更接近于真实情况,目前获取直观的实验数据还存在一定困难。

计算结果表明:激光作用下旋转柱壳的温升大大低于静止柱壳的温升。外表面温度呈现出与旋转频率相关的周期性上升过程,而内表面温升由于热传导的原因在较小频率下才表现出周期性。当频率增大到一定值即某临界频率时,内表面温升不出现周期性的台阶而是曲线上升。

#### 参考文献:

- [1] Bartholomeusz J B. Thermal response of a laser-irradiated metal slab[J]. *Appl Phys*, 1988, **64**(8):3815.
- [2] Sparks M. Theory of laser heating of solids; metals[ J]. *Appl Phys*, 1976, **47**(3):837.
- [3] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002. (Sun C W. The effect under laser irradiation. Beijing: National Defence Industry Press,2002)
- [4] 赵剑衡, 章冠人, 刘绪发. 激光辐照下柱壳温度场的数值模拟研究[J]. 高压物理学报,1996, **10**(1):44—49. (Zhao J H, Zhang G R, Liu X F. Numerical simulation of the temperature distribution on a tank wall under an intensive laser loading. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(1):44—49)
- [5] 王伟平, 刘绪发, 刘常龄. 连续波激光辐照下金属材料的二维非线性温度场研究[J]. 高压物理学报,1996, **10**(4):269—274. (Wang W P, Liu X F, Liu C L. An investigation on CW laser induced two-dimensional nonlinear temperature field of metals. 1996, **10**(4):269—274)
- [6] 王伟平, 唐小松, 桂元珍, 等. 激光对旋转金属壳的加热研究[J]. 应用激光,2001, **21**(5):319—321. (Wang W P, Tang X S, Gui Y Z, et al. Laser thermal effects on rotating metal shell. *Applied Laser*, 2001, **21**(5):319—321)
- [7] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997. (Wang X C, Shao M. The basic theory and numerical method of the finite element. Beijing:Tsinghua University Press, 1977)
- [8] 工程材料实用手册编委会. 工程材料实用手册[M]. 北京:中国计量出版社,1988. 208. (The Editing Committee of Engineering Material Applied Manual. Engineering material applied manual. Beijing:Chinese Metrology Press, 1988)
- [9] 谭福利, 赵剑衡, 王桂吉, 等. 连续和重复频率激光对薄钢板加热效率比较的数值模拟[A]. 第七届全国激光科学技术青年学术交流会议文集[C]. 2003. (Tan F L, Zhao J H, Wang G J, et al. Numerical simulation of thin steel plank thermal effects under a continuous or repeating laser. Proceedings of the Seventh all China Laser Science and Technology Youth Symposium. 2003)

## Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation

YUAN Hong, ZHAO Jian-heng, TAN Fu-li, SUN Cheng-wei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A numerical model is presented to simulate the temperature distribution on the rotational cylindrical shell under laser irradiation. Thermal property parameters varying with temperature and the rotating frequency of the cylindrical shell are included and the effect of the variation of the temperature distribution is studied in this paper. Results show that temperature rise induced by laser decreases largely when cylindrical shell rotates; the temperature of exterior surface rises periodically according to the rotating frequency but the temperature of inner surface only has such property with low frequency because of heat conduction.

**Key words:** Finite element method; Intensive laser; Rotational cylindrical shell; Temperature field