

文章编号: 1001-4322(2007)11-1817-05

外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟*

张 健, 黄晨光

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 考虑激光与运动目标相互作用的基础上, 利用有限元方法分析了亚声速条件下运动目标在激光辐照全过程的温度场和热应力场的分布与演化规律。结果表明: 高速流场的存在, 导致了明显的冷却效应; 加热过程中目标材料出现了屈服, 导致激光熄灭后结构内出现残余应力和变形; 激光辐照区边缘产生很高的温度梯度和应力梯度, 并且由于气流影响, 受辐照区域前后两端应力分布不对称。

关键词: 温度场; 热应力; 热流固耦合; 流场; MFS 方法

中图分类号: TN246

文献标识码: A

在强激光辐照下, 结构的热力耦合破坏是激光与结构相互作用领域的一个重要研究方向。激光辐照下随着辐照区温度的急剧上升, 在辐照区周围产生很大的温度梯度, 从而引起结构的热应变和热应力的产生。目前, 已有许多学者对不同条件下激光作用于结构的温度场和应力场进行了研究。赵剑衡等^[1]用有限元方法计算了在强激光辐照下柱壳温度场的变化和分布情况; 王伟平等^[2]研究了激光对旋转金属壳的加热效应, 得到在长时间激光辐照加热下, 旋转频率对加热效果影响很小; 袁红等^[3]利用有限元方法对连续激光辐照下旋转柱壳温度场的变化和分布情况进行了数值模拟, 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; 另外, 对于激光扫描作用的情况, 漆海滨等^[4]考虑到实际的激光加热问题中辐照激光和被辐照物体之间存在的相对运动, 利用热传导理论分析了强激光对运动物体的加热问题, 得出了物体表面温度、激光功率密度、激光尺寸及光斑相对于物体运动速度之间的关系; Wang 等^[5]研究了激光淬火条件下的热应力场, 得到了在温度和屈服条件给定的情况下, 工件激光淬火表面残余应力的形成使该区域的基底材料得到硬化; Elperin 和 Rudin^[6]研究了覆层材料在激光加载下的热弹塑性响应, 指出基底材料的应力水平也超过了屈服极限; Paek 和 Gagliano^[7]分析了移动激光热源作用下材料温度场分布及应力的传播, 得到的理论值与实验结果吻合; Kalyon 和 Yilbas^[8]得到了脉冲激光作用下的应力场的解析解, 指出高应力水平区靠近辐照表面区域; 另外, Khan 和 Yilbas^[9]还研究了激光作用于薄钢板时的热应力变化, 发现激光扫描速度对温度场和应力场产生明显影响, 且在靠近热源区为压应力, 而远离热源区则变成拉应力。

以上文献中都没有考虑靶材表面气流的冷却作用。对于高速运动的物体, 气流的冷却效应以及物体与流场之间的流固耦合作用对物体内部的温度和应力分布起着重要的影响。本文对激光辐照下亚声速飞行物体进行了热流固耦合分析, 用有限元方法计算了结构的温度场和热应力场, 在计算中考虑了材料物性随温度的变化, 得到了结构的温度和应力分布曲线以及流场的分布曲线。

1 数学模型

1.1 问题描述

考虑高速飞行的轴对称物体受激光辐照的热流固耦合问题。由于其几何对称性, 可简化为如图 1 所示(分析中认为气流来流端为辐照区右端, 尾流端为辐照区左端)的 2 维轴对称模型。其中平板长 1.0 m, 前端圆弧壳外径 310 mm, 壁厚 10 mm, 设激光为均匀连续辐照, 辐照时间为 3 s, 激光辐照宽度为 375 mm, 吸收的激光功率密度为 800 W/cm^2 , 辐照位置如图 1 所示;

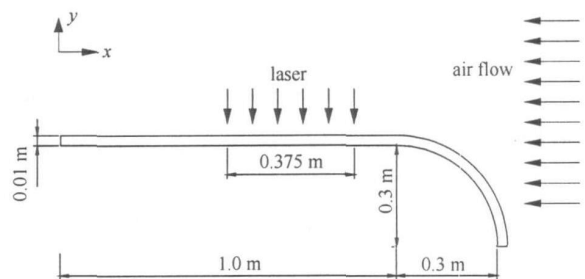


Fig. 1 Physical model of moving object

图 1 简化的物理模型

* 收稿日期: 2006-12-04; 修订日期: 2007-08-09

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 张 健(1982—), 男, 博士生, 从事激光与物质相互作用研究; Zhangjian04@mech.ac.cn.

气流为无穷远处的均匀来流。

1.2 基本方程

1.2.1 温度场的计算

将激光辐照视为均匀恒定热源加载,环境温度为 20 。本文建立的模型为 2 维轴对称模型,在柱坐标系中的热传导方程为^[10]

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

在流固交界面处的边界条件为

$$\left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_B = q(r, t) - h(T_A - T_B) \quad (2)$$

固体其它边界视为绝热边界

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

考虑到空气的性质及其流速在亚声速以内,将流动看作 2 维不可压缩流动,其控制方程为^[11]:

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

动量方程

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (5)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (T_f u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T_f}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

以上各式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容; k 为材料的热传导系数(本文中考虑材料为各向同性的); h 为相对放热系数; q 为单位面积的热流量; n 为材料表面法线方向; T_A , T_B 分别为周围环境温度及材料表面温度; u_i , u_j 分别为气流速度分量; p 为压强; μ 为粘性系数; T_f 为气体温度; Pr 为普朗特数。

1.2.2 应力的计算

强激光辐照下材料温度急剧上升,且在高温下材料性质随温度会有明显变化,因此,在辐照区会出现屈服。假设材料为理想塑性的,其应力应变关系为^[7]

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^T \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{E}{1 - \nu} [\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{T}] + (1 - \nu) (\text{sgn } \dot{\epsilon}_{ij}) \dot{Y} \quad (8)$$

平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

边界条件

$$\sigma_{ij} n_j = p_j \quad (10)$$

屈服条件

$$\sigma_{ij}^2 = Y^2 \quad (11)$$

式中:在屈服时取 $g = 1$,没有发生屈服时取 $g = 0$; E 为弹性模量; ν 为泊松比; p_j 为固体结构材料外表面压力; Y 为屈服极限。

1.3 材料参数

轴对称板壳的材料为 30CrMnSiA 钢。该材料常温下的密度为 $\rho = 7.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.25$,材料物理性质随温度的变化见表 1^[13],其中 α 为材料热膨胀系数。气流为标准状态下的空气,密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$,比热容 $c = 1.0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

表 1 材料物理性质随温度变化情况

Table 1 Material characteristics vary with temperature

/	$k / (W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$c / (J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	E / GPa	ν / GPa	$\alpha / (10^{-5} \cdot ^\circ C^{-1})$
20	27.63	473.1	200	1.055	1.100
100	29.30	519.1			
200	30.56	581.9	177	1.016	1.172
300	30.56	644.7	167	0.955	1.292
400	30.56	699.1	162	0.900	1.362
500	29.51	766.1	157	0.685	1.390
600	28.67	841.5			1.422
700	27.31	910.1			1.450
800	25.33	975.0			1.343
900	24.61	1 040.0			1.273

2 结果分析

利用 MFS 程序方法对该模型进行了分析,计算出当气流速度为 255 m/s 时的温度场的分布情况以及热应力分布情况。

图 2 为激光辐照区不同位置不同时刻的温度分布曲线。由图可以看出:随着热源的加载板上表面的温度逐渐上升,到 3 s 时达到最高,热源停止加载后温度逐渐下降,且随着时间的增加由于前端气流的影响,温度出现不对称分布;板下表面温度在热源停止后由于热传导的缘故仍在上升,且曲线有向左移动的趋势,这是由于表面热源受气流影响而引起的;加载板上下表面的热源边缘出现很高的温度梯度。图 3 为激光辐照区距表面不同深度三点的温度随时间变化曲线。由图可以看出,随着深度的增加,温升速度减慢且温度逐渐降低,停止加热后表层温度急剧下降,当表层温度下降时内部温度继续上升。

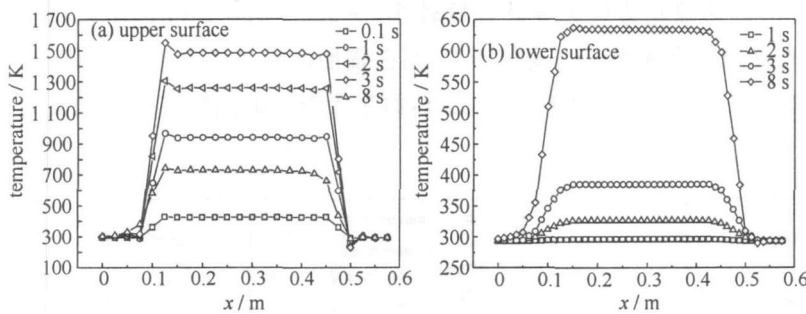


Fig. 2 Temperature distribution of upper surface and lower surface

图 2 板上下表面的温度分布

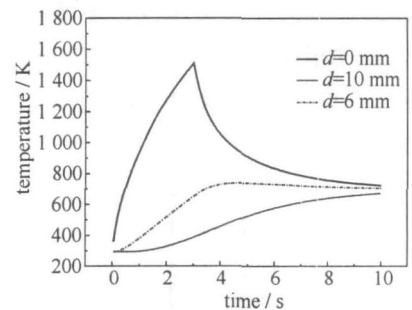


Fig. 3 Temperature history at different depth

图 3 距表面不同深度三点的温度随时间的变化

图 4 为平板 ($x=0.5 \text{ m}$ 处) 上部横截面气体在不同时刻的速度和温度分布曲线。由图 4(a) 可以看出,平板表面附近气体有较高温度,随着距离的增加温度急剧下降,很快达到与外围气体相同的温度,停止加热后温度边界层更薄;从图 4(b) 可以看出,从板表面开始流速迅速增加达到外围气流速度,在不同时刻流速变化很小。

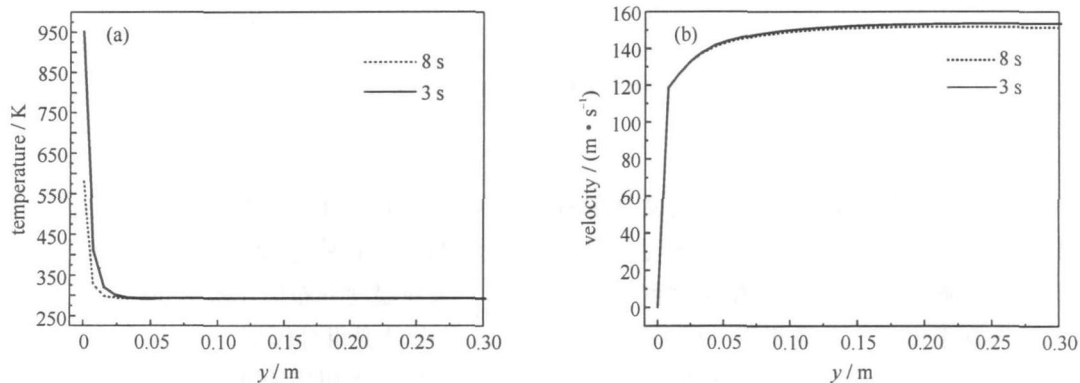


Fig. 4 Temperature and velocity of the airflow

图 4 横截面气体的温度和速度分布曲线

图5显示了辐照区热源内外不同深度轴向应力的演化。图5表明:在结构表层轴向应力迅速增大至最大值并随着热源的加热而持续在600 MPa左右,这是因为在高温下材料达到屈服而压应力无法再上升;停止加热后板材的压应力迅速减小并随之变成拉应力。处于板的中间层的 $y = 0.306$ m处首先产生拉应力,随着温度的上升,拉应力上升,达到极值200 MPa左右,并开始逐渐减小,直至出现压应力;而下表面则情况相反,先出现压应力再变为拉应力,这是由于在开始阶段,结构前端来流方向气流压力产生的弯曲作用使得原来应受拉的区域向上移动,随着热传导的进行热应力分布逐渐改变。热源左侧外边缘处上表面先出现压应力,随着热源的加载达到最大值300 MPa,停止加热后应力逐渐转变为拉应力;而下表面正好相反,先出现拉应力并达到极值450 MPa,随后逐渐减小至100 MPa左右;且在不同深度应力最后趋于相等。且在不同深度处,应力最后趋于相等。由图5可以看出,在激光辐照区,由于温升较高使得材料发生屈服,出现较大的残余应力。

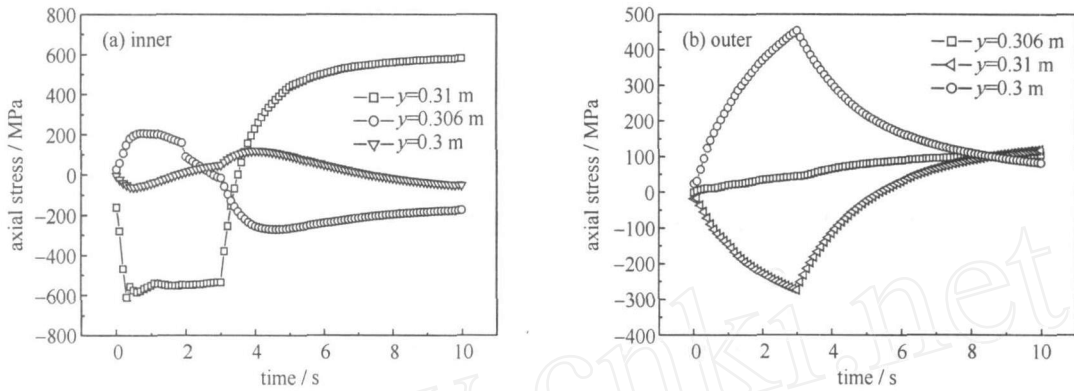


Fig. 5 Axial stress in and out of the irradiation area at different depth

图5 辐照区内外不同深度处轴向应力

图6为平板部分上下表面在不同时刻的轴向应力分布图。从图6可以看出,平板上表面在激光辐照区应力变化较大,在受压时达到屈服,应力不再上升,在来流方向的热源右边缘处压应力最大(800 MPa左右);随着热源加载的停止由压应力逐渐转变为拉应力,热源左边应力变化幅度较小(-300~100 MPa),而右边应力变化幅度相对较大(-500~100 MPa);激光辐照区下表面应力变化不大,而在辐照区以外则有较大变化,在热源停止加载时达到450 MPa左右,且热源左边在8 s时仍处于拉应力状态,而来流方向的热源右边已经变为压应力。

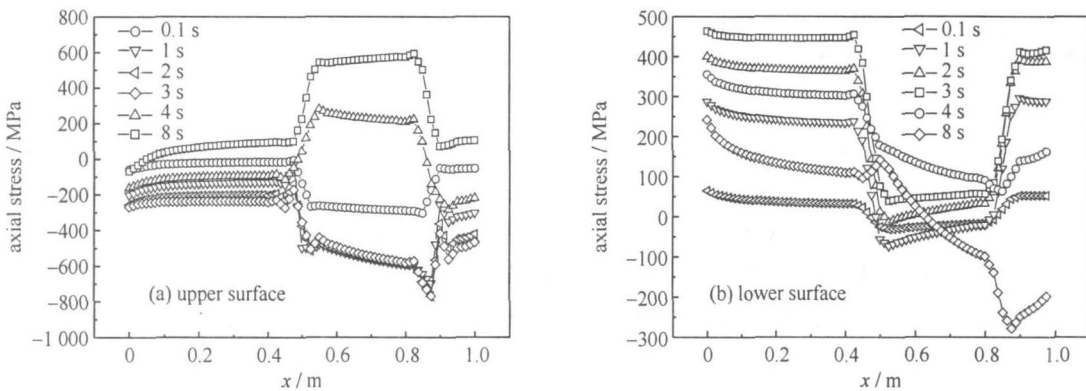


Fig. 6 Axial stress distribution of the upper surface and lower surface at different time

图6 不同时刻平板上下表面轴向应力

3 结论

本文考虑了气流对受激光辐照的高速运行物体的冷却作用,数值模拟了2维轴对称物体的温度和应力演化过程,结果显示:(1)在热源加热过程中,板的温度迅速上升达到最大值,停止加热后由于气流影响上表面温度急剧下降,且温度分布出现不对称,并随着时间增加的影响,下表面温度分布向左移动;在热源加载边缘出现很高温度梯度;不同深度温度上升速率不一样,底层上升较慢且最高温度相对较低。另外,热源对板表面附近气体的温度产生了一定影响,但对气流的速度分布影响很小。(2)激光辐照区由于温度的集聚上升会出现屈服,之后应力不再上升,停止加热后应力由压应力变成拉应力,最后有较大残余应力产生;在下表面应力首先出

现压应力而不是拉应力;而热源外边缘附近不同深度处应力最后趋于相等。(3)上表面激光辐照区应力变化较大,左右两边应力变化不对称,右边在高温下受气流影响明显,应力变化幅度相对左边要大;而下表面激光辐照区应力变化相对辐照区左右两边的应力变化要小,且热源右边最后出现较大压应力,而左边一直处于受拉状态。本文未考虑激光吸收对温度的依赖,以及屏蔽等效应。

参考文献:

- [1] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 强激光辐照下柱壳温度场的数值模拟[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)
- [2] 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)
- [3] 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, **15**(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, **15**(5):681-684)
- [4] 漆海滨,李文煜. 强激光束对运动物体的加热[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(1):33-35. (Qi H B, Li W Y. High-power laser beam heating up the moving body. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1):33-35)
- [5] Wang H G, Guan Y H, Chen T L, et al. A study of thermal stresses during laser quenching[J]. *J Mater Process Technol*, 1997, **63**:550-553.
- [6] Elperin T, Rudin G. Thermo-elasticity problem for a multilayer coating-substrate assembly irradiated by a laser beam[J]. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 1996, **23**:133-142.
- [7] Paek U, Gagliano F P. Thermal analysis of laser drilling processes[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1972, **8**:112-119.
- [8] Kalyon M, Yilbas B S. Analytical solution for thermal stresses during laser pulse heating process[J]. *J Mech Eng Sci*, 2001, **215**:1429-1445.
- [9] Khan O U, Yilbas B S. Laser heating of sheet metal and thermal stress development[J]. *J Mater Process Technol*, 2004, **155-156**:2045-2050.
- [10] Wang J R, Min J C, Song Y Z, et al. Forced convective cooling of a high-power solid-state laser slab[J]. *Appl Thermal Engineering*, 2006, **26**: 549-558.
- [11] 竹内洋一郎. 热应力[M]. 北京: 科学出版社, 1977. (Takeuchi Y. Thermal stress. Beijing: Science Press, 1977)
- [12] Gatewood B E. Thermal stresses, with applications to airplanes, missiles, turbines and nuclear reactors[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1957.
- [13] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1988. (The editing committee of engineering material application manual. Engineering material applied manual. Beijing: China Metrology Press, 1988)

Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation

ZHANG Jian, HUANG Chengguang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The flow field outside a moving object with high velocity has much influence on the object's temperature and stress distribution under laser irradiation. The thermo-fluid-mechanical coupling of a moving cylinder with a subsonic velocity is considered, and the temperature and stress field are obtained using finite element method. It is found that there is a high temperature gradient at the region of the heat source. The stress of the material reaches the yielding limit quickly due to the high temperature, and high residual stresses occur in the material. At the inner surface of the cylinder the stress component is compressive at first, and then becomes tensile gradually due to the temperature rise outside the cylinder. Because of the airflow pressure the stress distribution was not symmetry after the heating process, the stress component of the head of the structure is compressive while it becomes tensile at the tail.

Key words: Thermal field; Thermal stress; Thermal-fluid-solid coupling; Flow field; MFS method