

强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究

王振宝, 吴 勇, 杨鹏翎, 冯国斌, 张 磊

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 采用喷砂、磨砂、镀金表面处理工艺得到了铝靶的激光能量耦合系数。从经典傅里叶热传导方程出发, 建立了强激光辐照铝靶下铝靶温度场分布数值模拟理论模型。利用有限元软件, 模拟计算了连续激光辐照下铝靶的温度场分布, 给出了连续均匀光斑和高斯光斑辐照下, 不同表面处理工艺的铝靶所对应的最大温升。开展了铝靶强激光辐照验证实验, 利用热电偶实际测量得到了辐照激光光斑中心对应的铝靶背表面最大温升, 该实验结果与计算结果吻合较好。对铝靶前表面的烧蚀形貌进行了分析, 与理论计算的温度场分布情况相符合, 验证了数值模拟的有效性。

关键词: 强激光; 表面处理; 耦合系数; 温度场; 有限元

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2061-05

Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser

Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, Feng Guobin, Zhang Lei

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Laser energy coupling coefficients of surface of aluminum target were obtained by different technics, such as sandblast, roughening by sand paper and plating gold. According to classical Fourier heat conduction equation, the theoretical model for numerical simulation on temperature fields of aluminum target under intensive laser was built up. The software based on finite element method was used to analyze temperature field distribution of aluminum target under continuous-wave (CW) laser irradiation. Temperature field distribution of aluminum target with different surface roughness was calculated, when incident laser was regular beam or Gauss beam. In authentication test, the maximum temperature rise of back surface at the center of laser beam which irradiated on surface of aluminum target was measured by thermocouple. Comparison of the numerical results with the experimental results shows the availability of the finite element method. Analyzing ablation morphology after laser irradiation, the results are coincident with the numerical simulation.

Key words: intensive laser; surface treatment; coupling coefficient; temperature field; finite element

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室创新基金(SKL111103)

作者简介: 王振宝(1981-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事激光参数测量方面的研究。Email: zhenbao_wang98@163.com

0 引言

激光与物质相互作用是从入射激光被物质反射和吸收开始的。当激光束辐照到均匀且各向同性的靶物质时,部分能量被周围空气和靶表面所散射或反射,其余部分被靶面吸收。激光与物质的相互作用一方面与入射激光参数(如波长、强度、光斑分布、辐照时间)密切相关,另一方面又与物质本身的参数(如组成成分、光学、热学和力学特性等)密切相关。激光辐照材料引起的温升效应在很多领域都有重要应用,并且得到了国内外许多学者的广泛研究^[1-6]。在强激光参数测量领域,由于入射激光能量较高,能量转化为热量在测量装置的激光接收表面沉积,进而引起测量装置的损伤,因此,在实际应用中如何对测量装置进行有效的防护、确保测量设备自身的安全和稳定工作已经成为一项非常关键的技术难题。铝合金是阵列探测器光斑参数测量系统^[7]中最为常见的强激光防护材料。

文中从连续强激光辐照下有限元数值计算模型出发,通过数值模拟和实验研究相结合的方法,分析了在高斯光斑和均匀光斑辐照情况下,采用不同表面处理工艺的铝靶温度场分布,数值模拟的结果也为强激光辐照后铝靶表面烧蚀形貌分析提供了理论依据和数据参考。

1 理论模型

激光束辐照金属靶材后,靶材吸收激光能量而使体内的温度发生变化,通常因为所涉及的结构形状以及变温条件的复杂性,传统的解析方法无法精确地确定温度场和热应力场,此外有限差分法在处理不规则形状的结构问题时精度偏低,但有限元法在解决上述问题时却有着明显的优势。

当激光垂直照射靶材表面($z=0$)引起其内部温度会发生变化,是瞬态热传导问题。假定靶材各向同性,入射激光为圆形光斑, $t=0$ 时激光开始辐照靶材。在直角坐标系下,由经典傅里叶热传导方程^[1]来表示靶材内瞬态温度场分布 T :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = (1-R)\beta I_0(x,y;t)e^{-\beta z} + Q \quad (1)$$

式中: k 、 c_p 、 ρ 分别为靶材的热导率、定压比热容和密度; R 为靶材表面对激光的反射率; β 为靶材对激光的能量耦合系数; Q 是其他体热源; $I_0(x,y;t)$ 为到达材料表面激光强度的时空分布。上式右边第一项是激光束深层吸收的体热源。

在材料表面上可建立如下的边界条件:

$$T=T(x,y,z;t) \quad (2)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q \quad (3)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = h(T_a - T) \quad (4)$$

$$\bar{q} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_b^4) \quad (5)$$

其中,公式(2)是强制边界条件,给定边界上的温度,可随空间和时间的不同而变化,称为第一类边界条件。公式(3)是第二类边界条件,在边界上给定热流强度 q ,当 $q=0$ 时为绝热边界条件。公式(4)是对流换热的边界条件,称为第三类边界条件。其中 h 为对流换热系数, T 是表面温度, T_a 是外界环境温度,对流换热系数通常是环境温度及其他材料特性和结构尺寸的复杂函数。公式(5)是热辐射边界条件, σ 是玻耳兹曼常数, ε 是表面辐射效率, T_b 是与辐射面进行热交换的环境温度。第二、三类边界条件是自然边界条件。

对于三维轴对称圆形靶材模型,在柱面坐标系下,材料内的温度场遵从的经典傅里叶热传导方程可表示为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = (1-R)I_0 \beta e^{-(r^2/a^2) - \beta z} + Q \quad (6)$$

相应的边界条件为:

$$T=T(x,y,z;t) \quad (7)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q \quad (8)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = h(T_a - T) \quad (9)$$

$$\bar{q} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_b^4) \quad (10)$$

2 数值模拟

铝材料表面与激光能量耦合系数随温度的变化(尤其在接近熔点时)有一定的变化,一般可利用积分球直接测量得到。通常情况下,激光能量耦合系数

随温度变化曲线如图 1 所示。

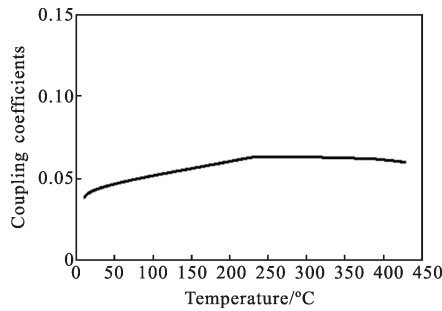


图 1 铝激光能量耦合系数随温度变化曲线

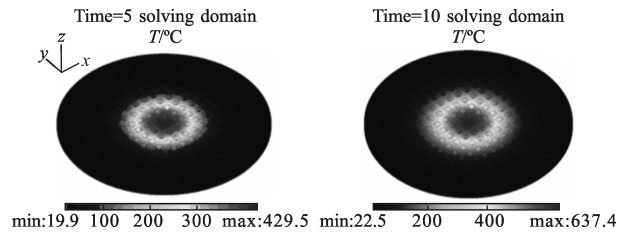
Fig.1 Laser energy coupling coefficients vs temperature of aluminum

可以看出,铝的吸收率先增加后略有下降,分析认为铝在被加热时其表面形成了氧化铝层。表面的氧化层影响了铝的反射特性。因为耦合系数在熔点前变化不大,且文中主要考虑材料的抗激光损伤阈值(即更多关注熔点前的情况),为简化计算模型,在计算过程中将此耦合系数作为定值处理。

为避免铝靶表面镜面反射光对光路中的其他光学元件构成潜在威胁,通常作为防护材料的铝靶表面均需进行相应的喷砂、磨砂或喷砂镀金工艺处理。铝靶材料型号为 7075 硬铝合金。7075 铝合金是常见的铝合金中强度最好的,固溶处理后塑性好,热处理强化效果特别好,在 150 °C 以下有高的强度,并且有特别好的低温强度,适合飞机构架及高强度配件的超高强度变形铝合金。其熔点范围为 475~635 °C。计算模型中铝靶厚 7 mm、直径 320 mm,内部均匀设置 216 个激光取样孔(孔直径 6 mm),空间分辨率为 18 mm。利用积分球反射率测量装置实际测量了几种不同表面处理工艺的激光能量耦合系数,测量结果为:喷砂表面为 0.3,磨砂表面为 0.2,喷砂镀金表面为 0.1。

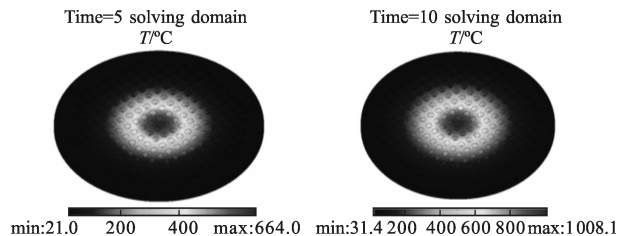
数值模拟的边界条件是:对激光加载表面施加公式(3)、(5)的边界条件,其他表面施加公式(5)的边界条件,忽略公式(4)对应的边界条件,即考虑了第二类边界条件和热辐射条件,忽略了第三类边界条件(对流放热系数 $h=0$)。利用有限元软件模拟中考虑了均匀光斑和高斯光斑辐照情况下,辐照时长为 5 s 和 10 s 时铝靶的温度场分布和温升最大值。模拟光斑直径 100 mm,均匀光斑功率密度 500 W/cm²,高斯

光斑峰值功率密度 1 000 W/cm²。初始环境温度设为 20 °C。图 2 给出了针对喷砂表面工艺处理的铝靶数值模拟结果。图 3 给出了磨砂表面工艺处理的铝靶数值模拟结果。图 4 为喷砂镀金表面工艺处理的铝靶数值模拟结果。



(a) 均匀光斑

(a) Regular beam

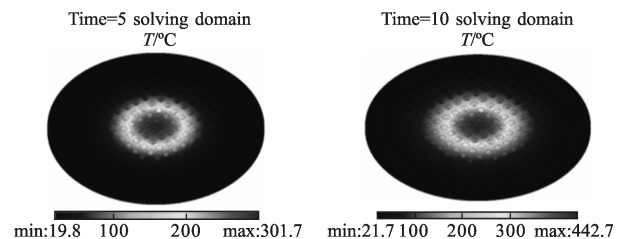


(b) 高斯光斑

(b) Gauss beam

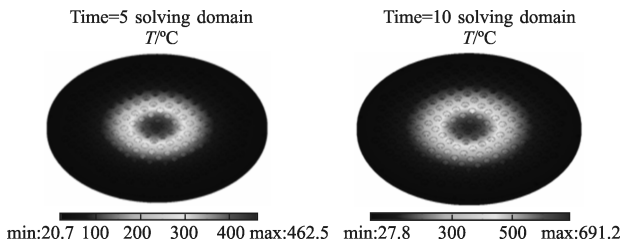
图 2 喷砂铝靶模拟计算结果

Fig.2 Numerical simulation of sandblast aluminum target



(a) 均匀光斑

(a) Regular beam



(b) 高斯光斑

(b) Gauss beam

图 3 磨砂铝靶模拟计算结果

Fig.3 Numerical simulation of roughening aluminum target

by sand paper

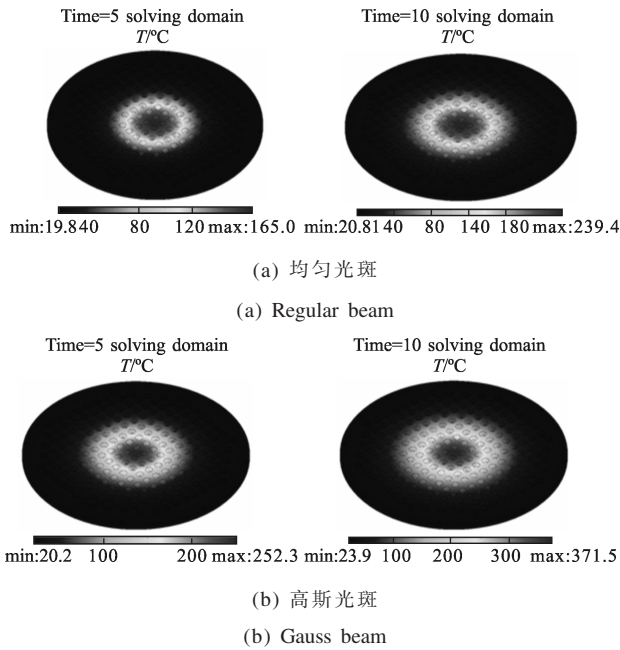


图 4 喷砂镀金铝靶模拟计算结果

Fig.4 Numerical simulation of sandblast aluminum target with plating gold

表 1 为数值模拟结果对比情况。

表 1 不同表面处理铝靶模拟计算结果

Tab.1 Numerical simulation of aluminum target with difference surface technics

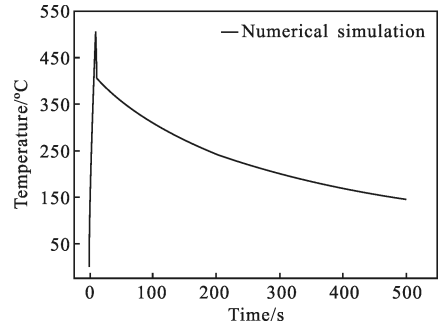
Spot distribution	Treatment process	Irradiation time/s	Maximum temperature/ $^\circ\text{C}$	Remark
	Sandblast	5/10	429.5/637.4	-/melt
Regular beam (500 W/cm ²)	Roughening	5/10	301.7/442.7	-/-
	Sandblast and plating gold	5/10	165.0/239.4	-/-
	Sandblast	5/10	664.0/1 008.1	Melt/melt
Gauss beam (1000 W/cm ²)	Roughening	5/10	462.5/691.2	-/melt
	Sandblast and plating gold	5/10	252.3/371.5	-/-

由有限元数值模拟的结果可以看出，对于采用喷砂、磨砂和喷砂镀金三种表面处理工艺的铝靶而言，喷砂处理工艺抗激光损伤阈值最低，喷砂镀金处理工艺抗激光损伤阈值最高。

3 实验

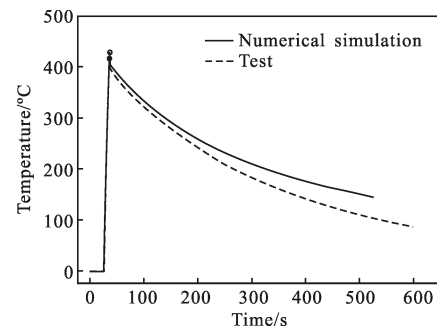
实验光源选用波长 1075nm 的光纤激光器，其最大输出功率为 2000W，光斑直径为 9.6mm，峰值功率密度为 4600W/cm²。实验铝靶直径为 40mm，厚度为 7mm，激光能量耦合系数实测为 0.28，利用热电偶在背表面激光辐照位置进行温度监测。图 5 给出了有限元数值模拟

与热电偶实测铝靶温度曲线， t 为激光辐照时长。



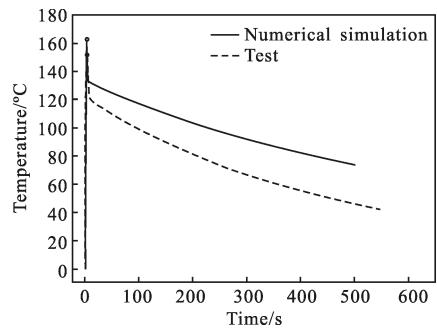
(a) 前表面温度($t=10$ s)

(a) Temperature of front surface($t=10$ s)



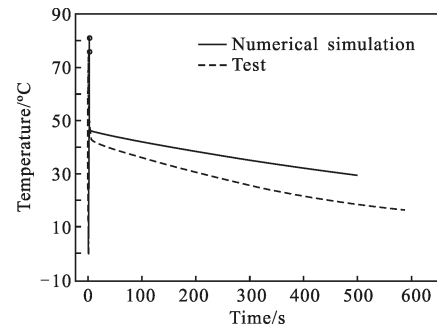
(b) 背面温度($t=10$ s)

(b) Temperature of back surface($t=10$ s)



(c) 背面温度($t=3$ s)

(c) Temperature of back surface($t=3$ s)



(d) 背面温度($t=1$ s)

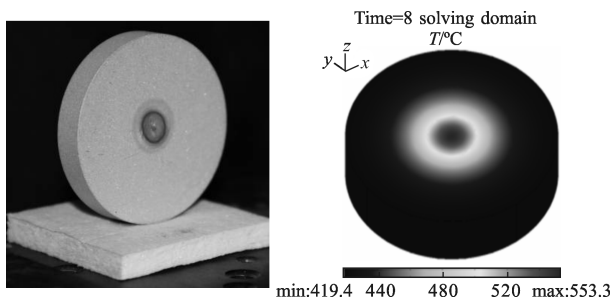
(d) Temperature of back surface($t=1$ s)

图 5 喷砂铝靶模拟计算与实验研究

Fig.5 Numerical simulation and experimental test for sandblast aluminum target

对比图4中数值模拟的结果与实际测量的结果可以看出,二者在温度的最大值和上升沿吻合较好,说明计算过程中所选择的模型是合理的。对于铝靶温度曲线的后沿数值计算和实际测量存在一定的差异,分析认为主要是数值模拟过程中忽略了对流换热的边界条件,而实际实验环境中对流换热是不可避免的,且对铝靶长时间的散热过程中温升曲线后沿起到一定的影响。

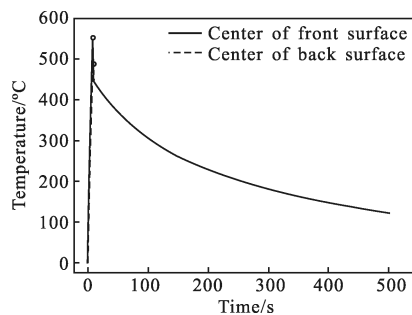
在与图5相同的实验条件下,图6给出了直径40 mm,厚度为5 mm 铝靶激光辐照实验结果,激光辐照时长为8 s。



(a) 烧蚀形貌

(b) 温度场分布

(a) Ablation morphology (b) Temperature fields distribution



(c) 前后表面温度

(c) Temperature of front and back surface

图6 喷砂铝靶损伤实验

Fig.6 Damage experiment of sandblast aluminum target

数值模拟的结果表明,此时铝靶前表面的温度为553℃,达到了铝靶的熔点,后表面温度为480℃左右,处于熔点的下限。分析铝靶前表面的烧蚀形貌可以看出,与理论计算的结果相符合。

4 结论

随着强激光技术的不断发展,强激光对材料的破坏效应越来越受到人们的重视,并且也得到了广泛的研究。文中从最经典的傅里叶热传导方程出发,建立了强激光辐照铝靶下铝靶温度场分布数值模拟理论模型。针对所设计的结构模型,采用有限元数值模拟软件计算得到了连续均匀光斑和高斯光斑辐照下,喷砂、磨砂和喷砂镀金表面处理工艺的铝靶所对应的温度场分布。开展的大功率激光辐照验证实验结果表明,数值模拟结果与实验测量结果吻合较好,表明了有限元法的有效性。

参考文献:

- [1] Sun Chengwei. Laser Irradiation Effects [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] Jiao Luguang, Zhao Guomin, Chen Minsun. Simulation of temperature rise of 45# steel irradiated by combined laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 42-46. (in Chinese)
- [3] Ma Liang, Huang Weidong, Yu Jun, et al. Parametric finite element model of temperature/stress field evolution by metal laser solid forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3226-3232. (in Chinese)
- [4] Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0103004-1-0103004-6. (in Chinese)
- [5] Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qingbang, et al. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high power laser beam in different airflow [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2531-2534. (in Chinese)
- [6] Yuan Yonghua, Liu Changling, Wang Chunyan, et al. Analysis on temperature rise and its rate of coated 45# steel irradiated by CW-YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3): 379-382.
- [7] Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, et al. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 521-525. (in Chinese)