

# 激光辐照漫反射金属靶板温升研究

杨雨川 关小伟 张政龙 超 蔡 雷

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

**摘要** 漫反射非接触测量方法是测量入射激光功率密度分布的有效手段。但强激光长时间辐照漫反射金属靶板, 材料上升到一定温度表面反射率将显著下降, 影响测量效果。基于有限元方法, 结合热源抖动和风速对流, 对镀金膜的铝板进行了强激光辐照条件下的温度变化模拟, 结果表明材料表面能量吸收率是决定温度升高的关键因素。通过粗糙度设计可实现与光滑表面吸收率接近的漫反射表面, 有效降低靶板温度, 为优化漫反射金属靶板设计提供参考。

**关键词** 激光技术; 功率密度; 金属靶板; 温度分布; 表面粗糙度

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.s102001

## Study of the Temperature Increment of Diffusing Metal Target under Laser Irradiation

Yang Yuchuan Guan Xiaowei Zhang Zheng Long Chao Cai Lei

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** The diffusing non-contact measurement method is effective for measuring incident laser power density. However, the strong laser irradiates diffusing metal plane for a long time, which once makes the temperature of target plane rise to a degree, causing the surface reflection descend significantly. The measuring results are affected. Based on the finite element method, considering hot source and wind convection, the temperature changes of Al plane coated Au film are simulated under strong laser irradiation, the results show that the energy absorption is the key factor to temperature rising. The energy absorption of diffusing surface can be designed similar to smooth surface, reducing the temperature of target plane effectively. the optimum design reference for diffusing metal target plane is provided.

**Key words** laser technique; power density; metal target plane; temperature distribution; surface roughness

**OCIS codes** 010.1080; 010.1290; 110.1085; 110.2960

## 1 引 言

高能激光系统性能直接取决于发射激光到达靶目标处光斑的功率密度。一般的激光功率/能量检测设备因接收口径有限, 只能检测到极小特定空域内的激光能量, 不能满足在远场对光束质量的检测。目前, 最常用的两种测量远场激光大光斑方法分别为: 非接触式测量方法, 即利用漫反射屏接收远场激光照射, 利用成像光电探测器接收漫反射屏上激光光斑的漫反射光信号, 测量激光光斑的相对光强分布, 光电探测器单元信号幅度经过功率标定后, 可实现功率密度测量; 探测器点阵法, 即用探测器阵列靶直接接收激光光斑, 靶面按照一定的密度和分布安装激光探测器, 通过处理电路同时对激光探测器的信号进行处理得到激光光斑功率密度分布。两种测量技术各有优缺点<sup>[1-2]</sup>, 重点分析非接触式测量方法中, 强激光入射条件下, 漫反射靶测量激光光斑存在的温升问题。

强激光长时间辐照在目标靶面上, 通过能量耦合, 靶板整体温度上升。文献[3-4]研究了温度变化条件下金属材料的反射率特性, 实验结果显示不同不锈钢材料在 500 °C ~ 700 °C 范围内, 反射率存在不同程度下降, 铝合金材料反射率下降温度拐点则在 400 °C ~ 500 °C 范围内。因此利用漫反射金属靶板对强激光进行

**收稿日期:** 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-02-15

**基金项目:** 国家 863 计划

**作者简介:** 杨雨川(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: yyc\_online@126.com

长时间的功率密度测量,必须抑制靶板温度,最直接的方法就是降低靶板的能量耦合率。强激光漫反射靶常采用航空硬铝材料,为减小能量耦合,镀上一定厚度的金膜,通过喷砂处理,使之具备表面漫反射特性。本文假设了一个高斯分布强激光热源,采用有限元方法,模拟热源抖动和风速对流条件下靶板(硬铝基底镀金膜)的温升情况;同时,通过几何光学近似法分析了不同粗糙度表面的反射和能量吸收特性。

## 2 热传递问题的有限元法

考虑一块金属靶板(半径和厚度分别为  $l_r, l_h$ )样品,高斯激光垂直辐照到样品表面,以激光源为原点,建立直角坐标系  $(x, y, z)$ ,如图 1 所示。

样品以速度  $v$  沿  $x$  方向作正弦移动,则三维热传导方程可表示为<sup>[5-6]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \left( k \frac{\partial T}{\partial t} - \sin v \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

式中  $T(x, y, z, t)$  表示  $t$  时刻的温度分布,  $k, c$  和  $\rho$  分别表示样品热传导率,比热容和密度,  $t$  为时间,  $v$  为激光的移动速度。

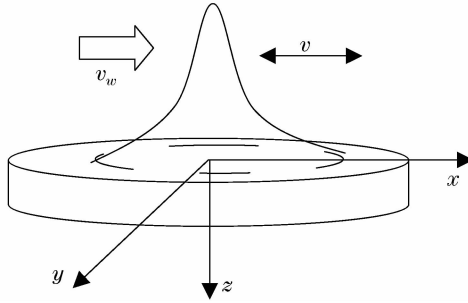


图 1 激光辐照示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser irradiation on a target

当样品表面存在辐射和对流热交换,样品上、下表面及侧面的边界条件表示如下:

$$\begin{cases} -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y) - h_u(T - T_a) - \epsilon_u \sigma (T^4 - T_a^4) \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l_h} = h_b(T - T_a) - \epsilon_b \sigma (T^4 - T_a^4) \\ -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=l_r} = h_s(T - T_a) - \epsilon_s \sigma (T^4 - T_a^4) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $h_i$  表示对流传热系数,  $\epsilon_i$  表示热辐射系数,下标  $i=u, b$  和  $s$  分别表示上、下表面及侧面参数,  $T_a$  表示环境温度,  $\sigma$  为玻尔兹曼常数。

$q(x, y)$  表示高斯光源,表达式如下<sup>[7]</sup>:

$$q(x, y) = \frac{P}{\pi r_0^2} \exp \left[ - \left( \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right) \right], \quad (3)$$

式中  $r_0$  为激光半径,  $P$  为入射功率。

## 3 有限元算法

根据三维热传导方程,可将其写成有限元的形式:

$$\nabla \cdot (\vec{c} \cdot \nabla U) = d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{\beta} \cdot \nabla U, \quad (4)$$

式中  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ,  $U$  对应为温度变量  $T$ , 系数  $\vec{c}, d_a$  和  $\vec{\beta}$  分别对应:

$$\vec{c} = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$d_a = \rho c, \quad (6)$$

$$\vec{\beta} = \begin{bmatrix} \rho c v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

边界条件有限元形式如下所示：

$$n \cdot (c \cdot \nabla U) = g, \quad (8)$$

式中  $n$  为边界外法线单位向量。对应于(2)式,系数  $g$  为等式右边部分。激光强度分布为高斯分布,且进行正弦抖动,在中心抖动区域内采用加密网格,在温度缓变区域采用一般密度网格,时间步长选择 1 s,总计时间为 30 s。

## 4 模型及参数

基于上述理论和计算方法,构建激光辐照靶板表面的瞬态温度场有限元数值模型。目标靶为圆盘结构,基底为航空铝材,半径为 18.5 cm,厚度为 5 cm,基底上方覆盖金膜,厚度为 150  $\mu\text{m}$ ,总质量约为 16 kg,对应材料物理参数见表 1。

表 1 材料基本物理参数

Table 1 Basic thermal physical parameters of the material

	Dural basic parameters	Gold membrane basic parameters
Atmospheric heat capacity/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	900	129
Thermal conductivity/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	160	317
Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2700	$1.93 \times 10^4$
Conductivity Conductivity/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$3.777 \times 10^7$	$45.6 \times 10^6$
Thermal expansion coefficient/ $\text{K}^{-1}$	$23 \times 10^{-6}$	$14.2 \times 10^{-6}$
Young's modulus/Pa	$70 \times 10^9$	$70 \times 10^9$
Poisson's ratio	0.33	0.44

热源半径为 7.5 cm,峰值功率密度约为  $5 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ ,强度呈高斯分布,在目标靶表面作正弦抖动,抖动频率和幅度分别为 20 Hz 和 3 cm,高斯热源分布和抖动信号如图 2 所示。在数值模拟计算时,考虑靶目标表面存在 50 m/s 速度的对流风速,能量吸收率分别为 5% 和 10% (金膜在可见和近红外波段的吸收率范围为 1%~10%)。

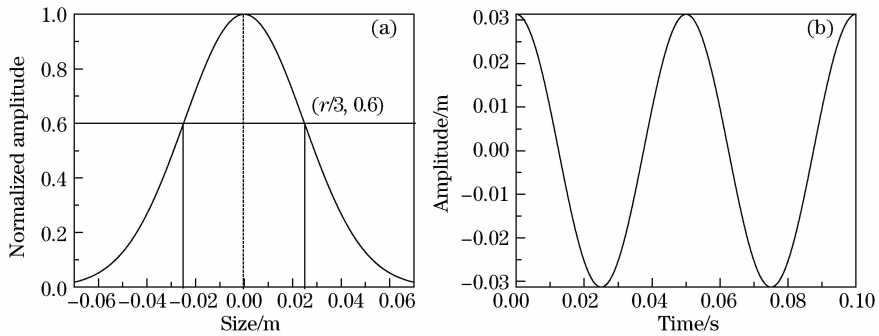


图 2 激光热源参数。(a)强度分布;(b)抖动信号

Fig. 2 Parameters of laser heating source. (a) Intensity distribution; (b) vibration signal

## 5 数值结果和讨论

根据上述参数,计算目标靶板温度的时空分布,图 3 显示了某时刻靶板的温度空间分布。从图 3 可以看出,靶板的温度空间分布与入射激光强度分布类似,中心强边缘弱,受光束抖动影响,中心热斑区略有扩展,其他时刻温度空间分布与此类似。但由于受到光束抖动和靶板表面风速对流的影响,靶板峰值温度随时间的变化情况较为复杂。

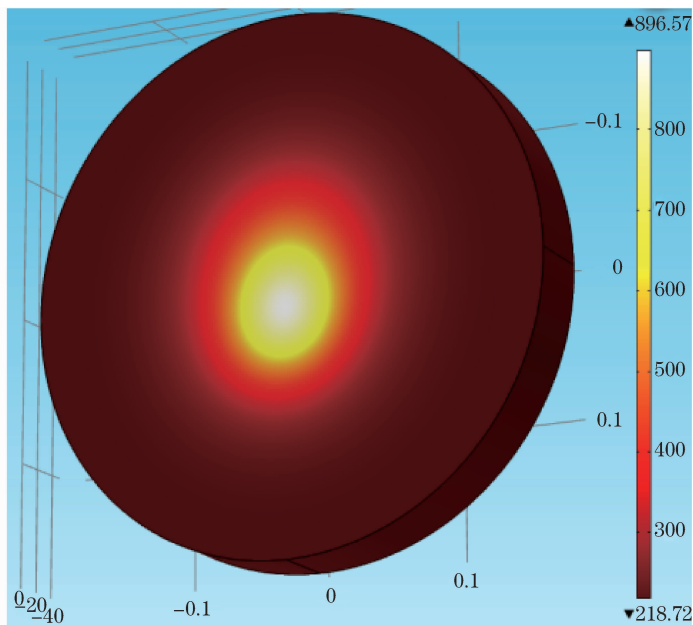


图 3 靶目标温度空间分布

Fig. 3 Temperature spatial distribution of target

图 4 为靶板上峰值温度随时间的变化曲线。从图 4 可以看出,吸收率越大,温度越高;相比无风速对流,50 m/s 风速对流时,30 s 时刻峰值温度分别下降 26 K[5%吸收率(A)]和 14 K(10%吸收率),对应三角和方形标识线;同时考虑风速对流和光束抖动,30 s 时刻峰值温度分别下降 68 K(5%吸收率)和 108 K(10%吸收率),对应三角和圆形标识线。由此可知,影响温升最显著的因素是靶板表面的吸收率,其次是光束抖动,风速对流对温升影响最小;考虑到金膜熔点为 1064 °C,需要将吸收率控制在 7%以下。不考虑与吸收率相关的材料本征属性,影响金属靶板吸收率的参数主要有材料表面粗糙度、氧化层和表面杂质缺陷等<sup>[8]</sup>。由于氧化层和表面杂质缺陷具有很大的随机性,因此重点考虑表面粗糙度对吸收率的影响。

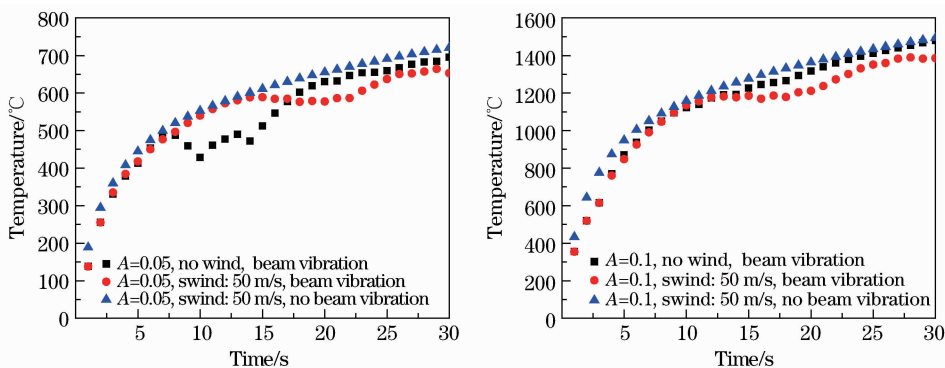


图 4 峰值温度随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of peak temperature vesus time

## 6 表面粗糙度影响分析

表面粗糙度在多个方面影响材料吸收率。首先是激光入射时,激光辐照表面积增加导致吸收率增加。其次,表面沟槽和裂纹可能成为光波导,产生多次光反射,引起吸收率增加。可采用基于光线追迹的几何光学近似法<sup>[9-10]</sup>,来分析表面起伏特性对反射光束的影响。垂直入射条件下,产生一定粗糙度的离散随机高斯分布起伏面,材料表面起伏的均方根(RMS)高度值为  $\delta$ ,相干长度为  $\tau$ (取波长值),则  $\delta/\tau$  反映了表面起伏的坡度。离散反射面的每个采样单元遵循镜面反射,利用采样点法线和斯涅耳反射定律进行散射计算:

$$\vec{o} = \vec{i} - 2\vec{n}(\vec{i} \cdot \vec{n}), \tag{9}$$

式中  $\vec{i}$  和  $\vec{o}$  分别是入射和散射光线,  $\vec{n}$  是表面法线方向。

散射能量  $E_s$  为

$$E_s = F(n, k, \theta_{loc}) E_i, \quad (10)$$

式中菲涅耳系数是材料光学常数(折射率  $n$  和消光系数  $k$ )的函数,垂直条件下  $\theta_{loc}$  为面采样点切线角。散射过程中产生的能量吸收为入射光能量和散射光能量的差值。为得到统计结果,采用相同  $\delta$  和  $\lambda$  值,不同随机数种子,进行多次计算,平均后得到最终结果<sup>[8]</sup>。

图 5 和图 6 显示了 1064 nm 波长光束垂直入射,材料表面相干长度  $\tau$  取波长值,不同  $\delta/\tau$  条件下金膜的二维散射强度分布和吸收率曲线, $\delta/\tau$  的选值参考文献<sup>[8]</sup>。从图 5 可以看出,当  $\delta/\tau=0.01$  时,散射光分布近似镜面反射,但是由于表面存在较小起伏坡度,反射光方向稍微改变,反射光斑半峰全宽略有展宽;当  $\delta/\tau=0.3$  时,反射光在各个散射角上传输,漫反射特征显著;当  $\delta/\tau=2$  时,在入射光方向产生了显著的后向散射。文献<sup>[11]</sup>从实验上研究了表面随机粗糙度对反射率的影响,与理论分析结果近似。图 6 进一步分析了粗糙表面对入射光吸收的影响,结果表明, $\delta/\tau < 0.2$  时能量吸收率几乎不发生变化,当  $\delta/\tau > 0.25$  能量吸收率呈线性关系增加。结合图 5、6 的分析,通过设计金属靶板表面粗糙度能够产生近似漫反射效果( $\delta/\tau \approx 0.3$ ),且能量吸收率与平滑表面金属靶板相当,即图 3 和图 4 的温升结果也适用于漫反射表面金属靶板,在满足漫反射前提下降低靶板表面能量吸收率,从而降低靶板温度。

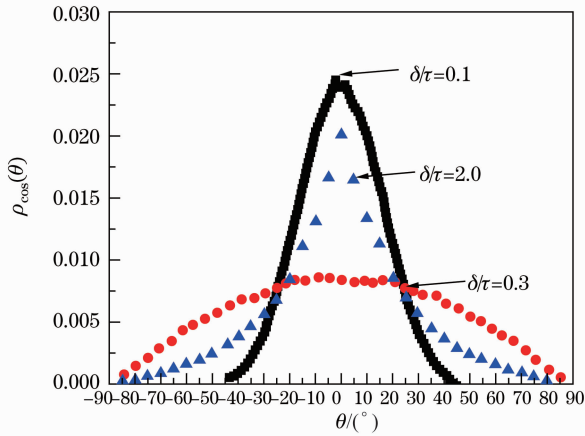


图 5 反射系数随散射角的变化曲线

Fig. 5 Curve of reflective coefficient vesus scatter angle

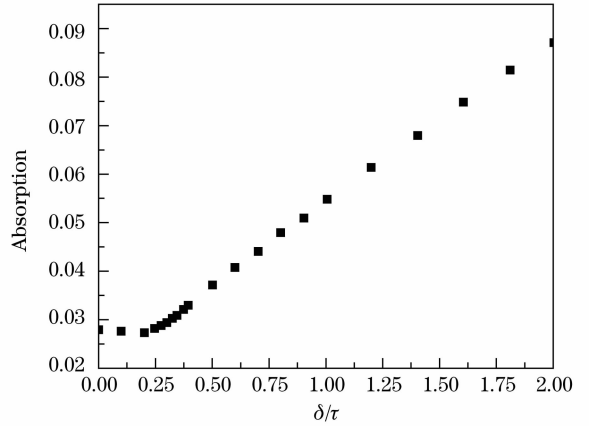


图 6 光能量吸收率随表面粗糙程度的变化曲线

Fig. 6 Light energy absorption ratio vesus surface roughness

## 7 结 论

温度升高引起漫反射金属靶板表面的反射和吸收特性发生变化,实验研究表明存在反射率变化的温度拐点,当温度大于拐点值,反射率显著下降(吸收率显著上升),因此必须控靶板温度。基于有限元方法,计算了强激光热源对镀金膜硬铝靶板的加热效果,仿真结果表明,风速对流和光束热源抖动对温升的影响较为有限,导致温度升高最主要的因素是靶板的能量吸收率;不考虑表面氧化的影响,分析了不同表面粗糙度对反射特性和能量吸收的影响,通过粗糙度设计可实现与光滑平面吸收率接近的表面漫反射。为优化金属靶斑仪的设计和加工提供技术途径。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Guobin, Yang Pengling, Wang Qunshu, *et al.*. Measuring technology for far-field beam profile of high power laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7):1615-1619.  
冯国斌, 杨鹏翎, 王群书, 等. 强激光远场光斑强度分布测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7):1615-1619.
- 2 Li Zhongmin, Zhang Haizhuang, Zhao Gang, *et al.*. Research of gamma correction and energy revision algorithm in CCD photograph law survey laser distant field facula [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(2):19-21.  
李钟敏, 张海庄, 赵 纲, 等. CCD 摄像法测量激光远场光斑中图像校正和能量修正算法研究[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(2):19-21.
- 3 Robert K H, Fred A R. Temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation [J]. J Thermophysics & Heat Transfer, 2000, 14(3):305-312.
- 4 Wang Guibing, Luo Fei, Liu Cangli. Reflectance change of 45# steel irradiated by laser in atmosphere[J]. High Power Laser and Particle

- Beams, 2006, 18(2):181-183.
- 王贵兵, 罗 飞, 刘仓理. 大气环境下重复频率激光辐照 45# 钢反射率变化分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2):181-183.
- 5 Li Peng, Sun Hongxiang, Zhang Shuyi, *et al.*. Finite element analyses of temperature fields in moving solids irradiated by a laser source [J]. Journal of Nanjing University, 2011, 47(2):171-177.
- 李 鹏, 孙宏祥, 张淑仪, 等. 激光辐照移动平板温度常分布的有限元分析[J]. 南京大学学报, 2011, 47(2):171-177.
- 6 Bianco N, Manca O, Nardini S, *et al.*. Transient heat conduction in solids irradiated by a moving heat source[C]. Proceedings of the COMSOL Users Conference, 2009, 283:358-363.
- 7 Shen H, Yao Z Q, Hu J. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming[J]. Computational Mater Sci, 2009, 45(2): 439-442.
- 8 Bergstrom D. The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces[D]. Porson; Lulea University of Technology, 2008.
- 9 Bergstrom D, Powell J, Kaplan A. A ray-tracing analysis of the absorption of light by smooth and rough metal surfaces[J]. Appl Phys, 2007, 101(11):113504.
- 10 Vornonvich A. Wave Scattering from Rough Surfaces[M]. 2 nd Edition, Berlin;Springer, 1999.
- 11 Navarrete A, Chaikina E, E Méndez. Experimental study of the reflectance of two-dimensional metal surfaces with a random roughness distribution[J]. Opt Technol, 2002, 69(2): 71-76.

栏目编辑: 何卓铭