

915 nm 激光辐照下 45 # 钢在 3.8 μm 处反射率变化

李新梦, 江厚满, 张天宇

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 在激光破坏机理研究中, 经常关注材料对入射激光的反射率随辐照面温度的变化规律。利用基于积分球法的反射率测量系统, 测量了 915 nm 激光辐照下 45 # 钢对 3.8 μm 探针光的反射率的变化, 确定了探针光辐照区的温度变化。结果表明, 反射率的快速减小是由高温下样品表面快速氧化导致的, 反射率随温度的缓慢变化是由电导率随温度变化导致的。

关键词 激光技术; 激光破坏; 反射率测量; 积分球; 45 # 钢; 辐射测量; 氧化

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071401

Reflectivity Change of 45 # Steel at 3.8 μm Under 915 nm Laser Irradiation

Li Xinmeng, Jiang Houman, Zhang Tianyu

College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In the study of laser damage mechanism, the change rule of incident laser reflectivity by materials versus the irradiated surface temperature is always concerned. Under the irradiation of a 915 nm laser, the change of the 3.8 μm probe laser reflectivity by 915 nm laser irradiated 45 # steels is measured by the reflectivity measurement system based on the integrating sphere method. The temperature change of the irradiated regions is determined. The results show that the steep decrease of reflectivity is caused by the rapid oxidation of specimen surfaces at high temperature, and the slow variation of reflectivity with temperature is the result of the variation of conductivity with the temperature change.

Key words laser technique; laser damage; reflectivity measurement; integrating sphere; 45 # steel; radiation measurement; oxidation

OCIS codes 140.3330; 140.6810; 140.3390

1 引言

激光与物质相互作用过程中, 靶物质的能量耦合系数是一个非常重要的物理量, 它不仅体现了物质对激光的光学吸收率, 而且能够反映相关力学、物理和化学过程对能量平衡的影响。在激光的诸多应用中, 例如激光打标、激光医疗等, 均需要测量靶物质对激光的能量耦合系数。

在激光对靶物质的辐照过程中, 被辐照材料的温度往往会有较大的变化, 而温度的变化会导致材料能量耦合系数的变化, 因此在实际问题中, 需要研究材料能量耦合系数随温度的变化规律。当采用辐射测温法监测辐照面的温度变化时, 需要动态测量辐射系数的变化。

对于热平衡状态下的非透明体, 根据基尔霍夫定律可知, 通过测量物体对探针激光的反射率即可确定物体在该波长激光下的能量耦合系数和辐射系数^[1]。

收稿日期: 2017-02-10; **收到修改稿日期:** 2017-02-27

作者简介: 李新梦(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: 1242846977@qq.com

导师简介: 江厚满(1970—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: jhm3395@sina.com

研究者对激光辐照下的材料响应进行了模拟和实验研究。焦路光等^[2]利用积分球装置测量了 45 # 钢对 1.319 μm 激光的反射率随温度的变化,认为材料表面的氧化是使反射率发生变化的主要原因。金云声等^[3]采用积分球装置测量了 30CrMnSiA 钢在激光多次辐照下反射率随温度的变化情况。彭国良等^[4-5]分别建立了玻璃纤维/环氧树脂复合材料和金属材料在激光辐照过程中的烧蚀模型,计算了玻璃纤维/环氧树脂复合材料在激光烧蚀过程中的激光透射率及表面温度,模拟并分析了不同气流速度对不同厚度金属锡板的激光辐照熔化烧蚀的影响。杨雨川等^[6]模拟了强激光辐照条件下镀金膜铝板的温度变化,通过对漫反射表面的粗糙度设计使其吸收率减小到与光滑表面的吸收率接近。

本文搭建了基于积分球法的反射率动态测量装置^[7]。利用该装置,在 915 nm 激光辐照下,测量了 45 # 钢对 3.8 μm 探针激光的反射率变化。利用反射率测量数据和热像仪记录的灰度变化,得到了样品前表面中心的温度变化,进而得到反射率随温度的变化关系,最后分析了反射率的变化原因。

2 实验原理

2.1 实验装置

实验使用的反射率测量装置如图 1 所示。3.8 μm 激光器输出的激光束经过分光镜后分为两束,一束进入积分球 1,探测器 1 可以监测激光功率的波动;另一束即为探针光,经透镜聚焦后进入积分球 2 辐照到样品上,被反射的探针光在积分球 2 内形成的照度由探测器 2 探测。

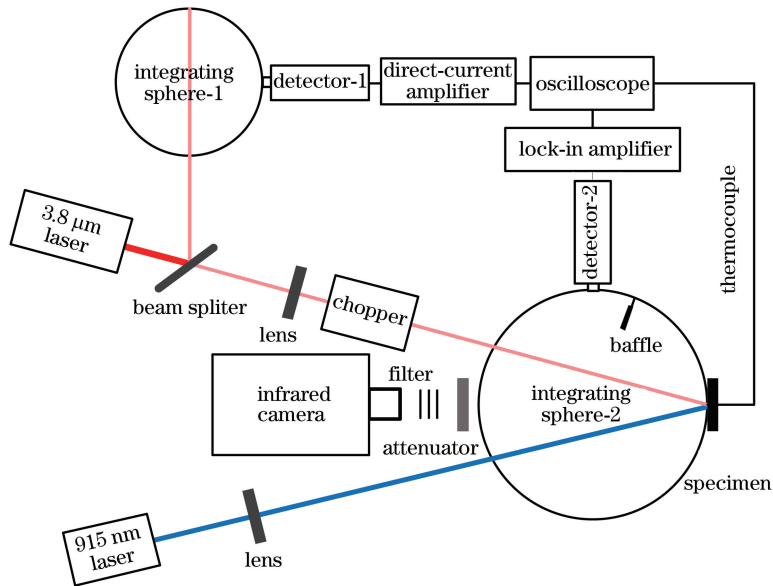


图 1 反射率测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflectivity measurement apparatus

探测器 2 接收到的能量除了来自探针光外,还来自包括样品本身热辐射在内的背景光。虽然可采用滤光片滤除与入射激光波长不同的背景光,但样品热辐射中与入射激光波长相同部分的能量是无法滤除的。当样品温度较高时,这部分能量对测量结果有较大的影响。考虑到热辐射随时间缓慢变化,利用斩波锁相技术来抑制背景辐射的影响^[8]。

使用 915 nm 半导体激光器作为加热光源,其输出功率为 36.8 W,样品表面的光斑直径为 20 mm,小于样品直径并且与样品基本同心。进入积分球 2 的探针光功率约为 0.3 W,辐照在加热光斑的中心区域,光斑直径为 5 mm。探针光功率密度远小于加热光功率密度,对样品的加热作用可以忽略。

待测样品材料为 45 # 钢,将其加工成直径为 27 mm、厚为 1 mm 的薄圆片。在样品后表面中心焊接热电偶进行测温,采用热像仪测量前表面的温度变化,将两条测温曲线进行对比。

2.2 反射率的计算

采用替换法测量样品反射率,计算方法如下^[9]。在积分球 2 样品孔处放置参考样品,有

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{k_2 V_{r2}/R_r}{k_1 V_{r1}/R'} = C, \quad (1)$$

式中 P_1 为进入积分球 1 的激光功率, V_{r1} 为探测器 1 输出的电压信号; P_2 为进入积分球 2 的探针光功率, V_{r2} 为探测器 2 输出的电压信号; R' 为积分球 1 的内壁反射率, R_r 为积分球 2 中放置的参考样品的反射率; k_1 、 k_2 为比例系数, 仅与积分球结构和探测器响应度有关, 与样品材料和激光功率无关; C 为分光镜的分光比。将参考样品替换为待测样品, 有

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{k_2 V_{s2}/R}{k_1 V_{s1}/R'} = C, \quad (2)$$

式中 R 为待测样品的反射率, V_{s1} 和 V_{s2} 分别为探测器 1 和探测器 2 的输出电压信号。由于分光比 C 为定值, 由(1)式和(2)式, 可得样品的反射率计算公式为

$$R = R_r \cdot \frac{V_{r1}}{V_{r2}} \cdot \frac{V_{s2}}{V_{s1}}. \quad (3)$$

2.3 热像仪辐射测温

使用中红外热像仪对样品前表面进行辐射测温。热像仪的响应范围为 $3.7 \sim 4.9 \mu\text{m}$, 为滤除 $3.8 \mu\text{m}$ 探针光对辐射测温的影响, 在热像仪镜头前放置截止波长为 $4.0 \mu\text{m}$ 的长波通滤光片; 同时, 在镜头前放置衰减片, 以防止热像仪饱和。进行实验前, 需用标准黑体炉对红外热像仪进行标定, 对标定点处温度值和灰度值进行拟合, 拟合函数^[10-11]为

$$N = B [\epsilon_b T_b^n + (1 - \epsilon_b) T_u^n] + N_0, \quad (4)$$

式中 N 为灰度值, ϵ_b 为黑体炉的辐射系数, T_b 为黑体炉的温度, T_u 为环境温度, N_0 为背景灰度值, B 、 n 、 N_0 为待定参数。标定后得到的标定点和拟合曲线如图 2 所示。

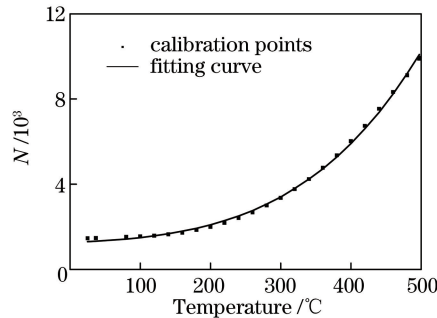


图 2 标定点与拟合曲线

Fig. 2 Calibration points and fitting curve

对于样品前表面上的某一点, 通过热像仪测出了灰度值随时间的变化 $N(t)$; 通过反射率的测量, 可以确定该物点的辐射系数随时间的变化 $\epsilon(t)$ 。根据(4)式, 有

$$N(t) = B \{ \epsilon(t) [T_r(t)]^n + [1 - \epsilon(t)] T_u^n \} + N_0, \quad (5)$$

由此得到待测样品表面对应点温度 $T_r(t)$ 的计算公式:

$$T_r(t) = \left\{ \frac{1}{\epsilon(t)} \left\{ \frac{N(t) - N_0}{B} - [1 - \epsilon(t)] T_u^n \right\} \right\}^{\frac{1}{n}}. \quad (6)$$

3 结果与分析

实验时, 首先将参考样品放置于积分球的样品窗口位置。打开探针光激光器, 待激光器出光稳定后, 用示波器记录下探测器 1 的输出信号 V_{r1} 和探测器 2 的输出信号 V_{r2} , 记录结果如图 3 所示。

取下参考样品, 将待测样品放置于样品窗口位置, 其他条件保持不变, 待探针光激光器出光稳定后打开加热光激光器, 样品加热时间为 360 s ; 然后关闭加热光激光器, 使样品自然冷却, 冷却时长为 440 s 。示波器记录的探测器 1 和探测器 2 的输出信号及热电偶测温(T)曲线如图 4 所示。根据(3)式得到的样品反射率变化曲线如图 5 所示。

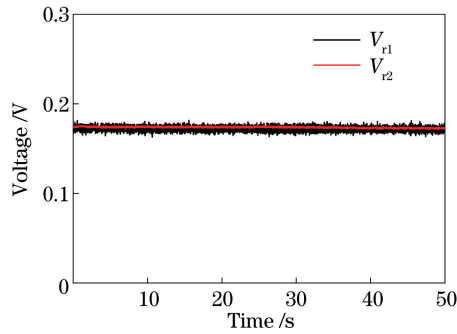


图3 参考样品输出信号

Fig. 3 Output signals of reference specimen

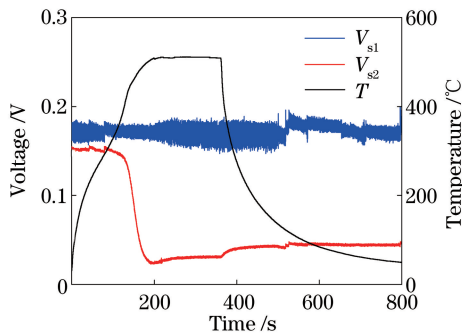


图4 待测样品输出信号

Fig. 4 Output signals of specimen to be measured

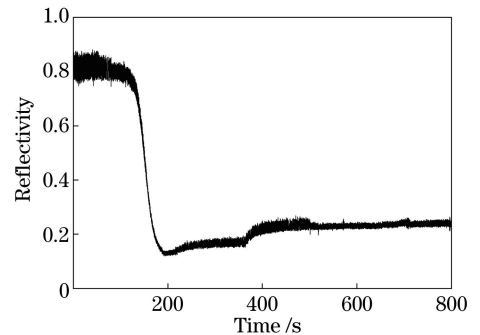


图5 反射率随时间的变化

Fig. 5 Reflectivity versus time

辐射测温结果 T_r 如图 6 所示,与热电偶测温结果 T 对比,可以看出,两曲线走势基本一致,这表明在上述实验条件下,样品前后表面中心区域的温度变化趋势一致。反射率随温度的变化曲线如图 7 所示,可以看出,当温度小于 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 时,45# 钢样品的表面反射率缓慢减小,维持在 0.8 左右;当温度到达 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 后,反射率开始快速减小,由 0.8 减小至 0.12 左右;停止加热后,随着温度的降低,反射率缓慢增大,最终稳定在 0.23 左右。

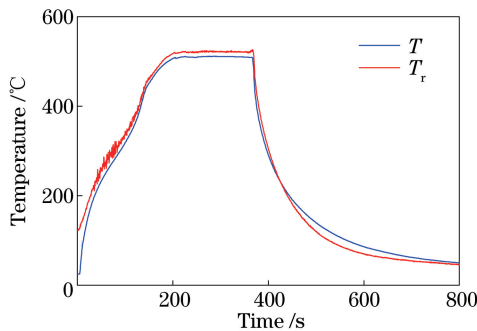


图6 温度随时间的变化

Fig. 6 Temperatures versus time

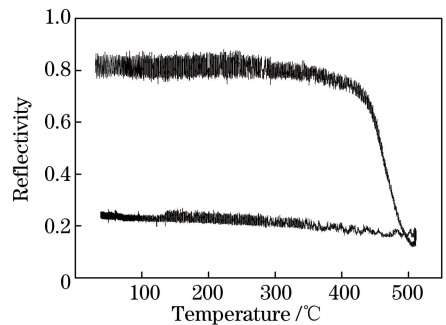


图7 反射率随温度的变化

Fig. 7 Reflectivity versus temperature

从降温段可以看出,当样品恢复到室温时,反射率相对初始状态有明显减小,可见加热过程中样品表面发生了不可逆的改变。辐照前后样品的表面形貌如图 8 所示,可以看出,激光加热后,样品中心区域变黑,边缘区域变蓝。根据实验过程中样品反射率的变化和样品表面颜色的变化可知,这一改变是由高温下样品表面快速氧化导致的^[2]。降温阶段反射率的缓慢增大被认为是升温阶段反射率缓慢减小的逆过程,其主导因素是电导率随温度的变化。

根据经典电磁理论,金属复折射率 n 与电导率 σ 的关系^[12]为

$$n^2 = 1 + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \cdot \frac{-\omega\tau + i}{1 + i\omega\tau}, \quad (7)$$

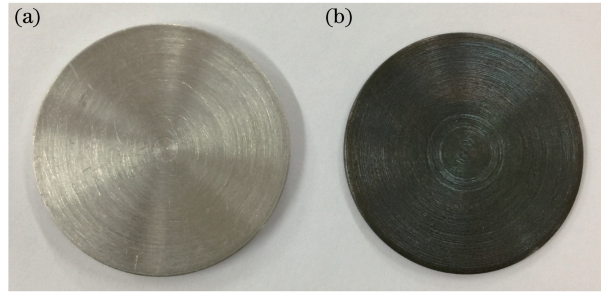


图 8 样品表面形貌变化。(a)辐照前;(b)辐照后

Fig. 8 Morphology change of specimen. (a) Before irradiation; (b) after irradiation

式中 $\sigma = \sigma_0 / (1 - i\omega\tau)$, σ_0 为金属的直流电导率, ω 为光波圆频率, ϵ_0 为真空介电常数, τ 为金属中电子弛豫时间。直流电导率与温度的关系^[13]可以表示为

$$\sigma_0(T) = \frac{\sigma_0(T')}{1 + \beta(T - T')}, \quad (8)$$

式中 T' 为参考温度;对于常用金属,参数 β 取值为 $0.04 \sim 0.07 \text{ K}^{-1}$ 。不考虑氧化反应,利用菲涅耳公式计算空气中垂直入射条件下,铁在 $3.8 \mu\text{m}$ 处反射率与温度的关系如图 9 所示。可以看到,反射率随温度的上升呈缓慢减小趋势,与测量结果变化趋势基本一致,验证了金属电导率对反射率的影响,而数值上的差异是由样品表面状态和样品成分差异引起的。

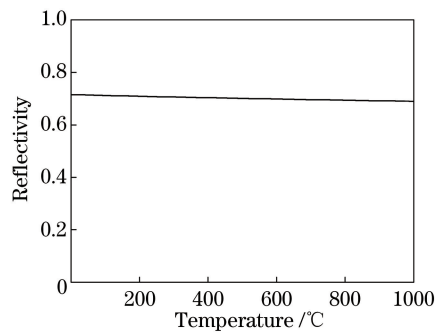


图 9 反射率变化模拟曲线

Fig. 9 Simulated curve of reflectivity change

4 结 论

利用基于积分球法的反射率动态测量装置,测量了 45 # 钢样品对 $3.8 \mu\text{m}$ 探针光反射率的变化。根据红外热像仪记录的灰度和辐射系数的变化,确定了探针光辐照区的温度变化,结果与样品后表面中心处热电偶的测温曲线基本相符。获得了从室温到 $520 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内 45 # 钢样品的反射率随温度的变化曲线,升温过程中,温度低于 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,45 # 钢样品表面反射率缓慢减小,保持在 0.8 左右;当温度升到 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,反射率开始快速减小,由 0.8 减小至 0.12 左右;停止加热后,随着温度的降低,反射率缓慢增大,最终稳定在 0.23 左右。结合样品表面颜色的变化和对反射率变化的模拟,认为反射率的快速减小是由高温下样品表面快速氧化导致的,反射率随温度的缓慢变化是由电导率随温度的变化导致的。

参 考 文 献

- [1] Wu Lixiong, Ye Xisheng, Wang Lijun, *et al.* Reflectance of epoxy/organsilicone composite coating at $1.3 \mu\text{m}$ under laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0814002.
吴丽雄, 叶锡生, 王立君, 等. 激光作用下环氧/硅树脂复合涂层的 $1.3 \mu\text{m}$ 反射特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0814002.
- [2] Jiao Luguang, Zhao Guomin. Temperature dependence of reflectivity of 45 # steel at the wavelength of $1.319 \mu\text{m}$ [J].

Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 983-987.

焦路光, 赵国民. 1.319 μm 处 45# 钢反射率随温度变化的实验研究[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 983-987.

- [3] Jin Yunsheng, Tan Fuli, Li Mu, *et al.* Reflectivity of 30CrMnSiA steel under continuous-wave laser repeated irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2827-2830.
金云声, 谭福利, 李 牧, 等. 连续激光重复加载下 30CrMnSiA 钢的反射率[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2827-2830.
- [4] Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.* Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203001.
彭国良, 杜太焦, 刘 峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203001.
- [5] Peng Guoliang, Wei Chenghua, Du Taijiao, *et al.* Effect of airflow on metal plate melted through by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061408.
彭国良, 韦成华, 杜太焦, 等. 气流作用下激光熔穿金属板效应研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061408.
- [6] Yang Yuchuan, Guan Xiaowei, Zhang Zhenglong, *et al.* Study of the temperature increment of diffusing metal target under laser irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s102001.
杨雨川, 关小伟, 张政龙, 等. 激光辐照漫反射金属靶板温升研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102001.
- [7] Zhang X Y, Chen M S, Zhao G M, *et al.* Research on the energy coupling coefficient of 45# steel and 304 stainless steel under 3.8 μm CW laser irradiation[C]. SPIE, 2016, 10016: 1001619.
- [8] Scofield J H. Frequency-domain description of a lock-in amplifier[J]. American Journal of Physics, 1994, 62(2): 129-133.
- [9] Jacquez J A, Kuppenheim H F. Theory of the integrating sphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1955, 45(6): 460-470.
- [10] 杨 立, 杨 楨. 红外热像仪测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] Ma Cuihong, Liu Junmi, Yang Youliang. Infrared thermal image of molten steel temperature measurement based on wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101001.
马翠红, 刘俊秘, 杨友良. 基于小波变换的红外热像钢水测温研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101001.
- [12] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] 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.