

文章编号: 1001-3806(2009)02-0121-03

## 外加电场对金属材料激光吸收率的影响

陈君, 张群莉, 姚建华\*, 傅纪斌

(浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室, 杭州 310014)

**摘要:** 在激光热表面热处理行业中, 高反射的金属材料对激光热处理非常不利。为增加金属材料在激光热处理过程中的激光吸收率, 研究了外加电场对金属材料激光吸收率的影响, 提出了一种饱和温度法测激光吸收率的方法, 并应用此方法测得 2Cr13 不锈钢在外加电压下的激光吸收率。结果表明, 外加电场可增加金属材料的激光吸收率。

**关键词:** 激光技术; 金属吸收率; 外加电场; 饱和温度法

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A

### The effect of external applied electric field on the laser absorption of metal materials

CHEN Jun, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua, FU Ji-bin

(MOE Key Laboratory of Mechanic Manufacture and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** High reflective metal materials have some disadvantages on laser heat treatment. In order to increase the laser absorption of metal materials, the effect of external applied electric field on the laser absorption was studied. A so-called saturated temperature technique was put forward to measure the laser absorptivity of 2Cr13 stainless steel with external applied electric field applied. The test results indicated the external electric field could increase the laser absorptivity of metal materials.

**Key words:** laser technique; absorptivity of metal materials; external applied electric field; saturation temperature method

## 引言

金属材料在红外区域的光吸收率非常低, 10.6 $\mu\text{m}$ 波长的 CO<sub>2</sub> 激光器在表面激光热处理中占着主导地位, 这为激光热处理增加了难度。当前增加金属材料激光吸收率的主要方法是在材料表面涂上一层吸光涂料, 如传统的碳素墨汁涂料, LIU 等人<sup>[1]</sup>研究的新颖涂料, GUO 等人<sup>[2]</sup>研制的 89-1 涂料等, 这些涂料都可在不同程度上增加金属材料的激光吸收率。然而在工件表面预涂涂料并不能解决所有问题, 许多工件需要进行深度的热处理强化, 而此时工件表面的涂料大部分被激光消耗掉, 激光直接照射到金属材料表面, 激光吸收率下降, 工件表面的加热速度发生了变化, 不均匀的加热速度必然会对热处理效果产生影响。而有些工件(如一些化学容器耐腐蚀件)对热处理的要求较高, 不希望在工件表面涂覆涂料, 以免造成表面的污染, 这就为激光热处理增大了难度。为解决这些问题, 作者提出采用外加电场的方法来增加金属材料的激光吸收

作者简介: 陈君(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事材料的激光吸收及激光与材料相互作用方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

收稿日期: 2007-11-20; 收到修改稿日期: 2008-03-12

## 1 电场对金属材料激光吸收率影响的机理

金属材料中存在大量的自由电子, 并且集中在金属的表面, 因此, 对激光的吸收主要是由自由电子来完成的。通常情况下, 激光的频率只有在接近自由电子的固有频率的时候才会被较好的吸收, 当激光频率远大于自由电子的固有频率时, 激光基本被透射, 此时激光对金属是透明的; 当激光频率远小于自由电子的固有频率时, 激光在材料表面基本上被反射, 金属对激光的吸收率非常低。金属自由电子的固有频率一般处于紫外到近红外波段, 而当前用于激光热处理的大部分为波长为 10.6 $\mu\text{m}$  处于远红外波段的 CO<sub>2</sub> 激光, 金属对远红外激光的高反射率对激光热处理是非常不利的。要提高 CO<sub>2</sub> 激光对金属的吸收率, 就必须改变金属表面自由电子分布, 降低金属表面被激光热处理区域的自由电子密度将可以提高激光吸收率。

实验装置如图 1 所示, A, B 为电容器的两极, 并连上可变电压器, 在电容中间放上 2Cr13 不锈钢试样, 试样尺寸为  $a \times b \times d'$ , 两端的面积为  $S_1 = a \times d'$ , 上下面的面积为  $S_2 = a \times b$ , 电容两极之间的距离为  $d$ , 在加上电场时打开激光器加热试样表面, 电容中的电场强度

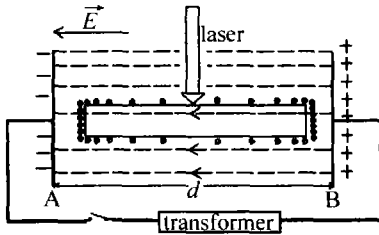


Fig.1 Schematic of external electric field in laser treatment

为:

$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

电场中的试样内的电场为0,试样为等势体,试样两端感生的电势差  $U'$  为:

$$U' = Ed' \quad (2)$$

则试样两端的电荷数  $q'$  为:

$$q' = U'C' = Ed' \frac{\epsilon_r S_1}{d'} = \epsilon_r ES_1 = \epsilon_r S_1 \frac{U}{d} \quad (3)$$

式中,  $C' = \frac{\epsilon_r S_1}{d'}$  为试样的电容,  $\epsilon_r$  为试样的相对介电常数。由菲涅耳公式可知金属材料的激光吸收率  $A$  为:

$$A = 2 \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} = 2 \sqrt{\frac{2c\epsilon_0}{\lambda\sigma}} \quad (4)$$

式中,  $\sigma, c, \lambda, \epsilon_0$  分别为金属表面的自由电子密度、光速、入射光波长、真空中的介电常数。

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{q'}{1.6 \times 10^{-19} \times 2S_2} = \sigma_0 - \frac{\epsilon_r US_1}{3.2 \times 10^{-19} dS_2} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_0$  为试样未加电场前的表面自由电荷密度,将(5)式代入(4)式得:

$$A = 2 \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} = 2 \sqrt{\frac{2\pi c\epsilon_0}{\lambda[\sigma_0 - \epsilon_r US_1 / (3.2 \times 10^{-19} dS_2)]}} \quad (6)$$

(6)式仅仅考虑了金属自由电子对激光的吸收,加入电场后金属表面自由电子密度在一定程度减少后,一部分激光得以透过表面自由电子的封锁进入到金属内部,被金属材料中的束缚电子吸收,表现出一定的非金属特性,即此时激光一部分被表面自由电子吸收,另一部分被金属内的束缚电子吸收。从式中可看出,金属的光吸收率随着外加电压的增加而升高,同时试样的端面面积与上下表面面积的比值也影响着光吸收率的变化。

## 2 饱和和温度法测吸收率的实验原理

实验中选取不锈钢 2Cr13 为基材,试样尺寸为  $2.86\text{mm} \times 8.16\text{mm} \times 24.46\text{mm}$ ,并且调整激光光斑大小和试样的尺寸相同,因此,可认为整块试样的温度和表面温度近似相等,只要测得表面温度值即可利用集总参量法测得材料的激光吸收率<sup>[3]</sup>。实验中用  $\text{CO}_2$  激光器对试样进行加热,并用红外线测温仪对加热过

程进行实时温度监控<sup>[4-5]</sup>。由能量守恒可知,在激光加热过程中的能量守恒方程:

$$A \cdot W \cdot \Delta t = \int_0^{\Delta t} [\epsilon\sigma S(T^4 - T_0^4) + h_c S(T - T_0)] dt + Cm\Delta T \quad (7)$$

式中,  $A, \epsilon, \sigma, h_c, S, T_0, C, m$  分别为材料的激光吸收率、热辐射发射率、黑体辐射常数、热交换系数、材料换热表面积、环境温度、材料的热容和材料的质量。使用 280W 的  $\text{CO}_2$  激光对试样进行加热,试样温度随着加热时间的增加而增加,直到试样的温度达到一个饱和值,此时试样散发的热量和吸收的激光能量是相等的,则  $\Delta T=0$ , (7)式变为:

$$A \cdot W \cdot \Delta t = \int_0^{\Delta t} [\epsilon\sigma S(T^4 - T_0^4) + h_c S(T - T_0)] dt \quad (8)$$

当确定试样温度达到饱和值时,关闭激光器,使得试样自然冷却,记此时间  $t=0$ ,温度为饱和温度,则  $W=0$ , (7)式变为:

$$\int_0^{\Delta t} [\epsilon\sigma S(T^4 - T_0^4) + h_c S(T - T_0)] dt = Cm\Delta T \quad (9)$$

由(8)式、(9)式得:

$$A \cdot W \cdot \Delta t = \int_0^{\Delta t} [\epsilon\sigma S(T^4 - T_0^4) + h_c S(T - T_0)] dt \Big|_{t=0} = Cm\Delta T \Big|_{t=0} \quad (10)$$

$$A \cdot W = \frac{Cm\Delta T}{\Delta t} \Big|_{t=0} = Cm \left| \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (11)$$

$$即: A = \frac{Cm}{W} \left| \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} = \frac{Cm}{W} T' \Big|_{t=0} \quad (12)$$

因此,只要测得试样在激光器关闭后的降温过程,并根据测得的温度数据对降温过程进行曲线拟合,求出试样在  $t=0$  时刻的导数即温度变化率,即可求得试样的激光吸收率。

## 3 电场对材料激光吸收率的影响及实验验证

在 2Cr13 试样进行激光加热处理时,在试样两端加入 0V ~ 250V 的电压,每隔 25V 测一次,使用 METIS MI16-MB25 型红外线测温仪对实验过程进行实时温度监测,试样及实验所需的数据见表 1。表 2 为根据上面数据处理方法所计算得到的在不同电压下的激光吸收率结果。由此可见,随着电压的增加,激光吸收率也随着增加,曲线变化就相对平稳,吸收率接近线性升高,符合(7)式的变化规律。

为增加试样的激光吸收率,对试样表面进行了处理,使其粗糙度增大,用德国马尔粗糙度测量仪测得试样表面粗糙度  $R_a = 7.014\mu\text{m}$ ,表面轮廓线见图 2 所示。材料的光吸收率必须考虑表面粗糙度的影响,根据计算公式<sup>[6]</sup>,得试样表面斜角  $\theta = 0.4686\pi$ ,光在表面经

Table 1 Parameters of 2Cr13 stainless steel

material	laser power/W	mass/g	specific heat/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	resistivity/(10 <sup>-8</sup> Ω · m)	temperature coefficient of resistivity/°C
2Cr13	280	4.16	461	55	0.065

Table 2 Laser absorptivity at material in different voltage

voltage/V	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
absorptivity/%	40.32	44.23	45.08	45.62	46.34	47.90	48.89	49.41	50.06	52.91	54.44



Fig.2 Contour line of material surface

过11次反射吸收后的吸收率为:

$$A' = A + (1 - A)A + (1 - A)^2 A + (1 - A)^3 A \cdots + (1 - A)^{11} A \quad (13)$$

式中,A为材料一次反射的吸收率,A'为经过表面多次反射吸收的总吸收率。把表1中不锈钢2Cr13的参量代入(6)式,计算得试样在800°C时的表面单次反射的吸收率随电压变化的曲线(见图3)。而实际表面吸

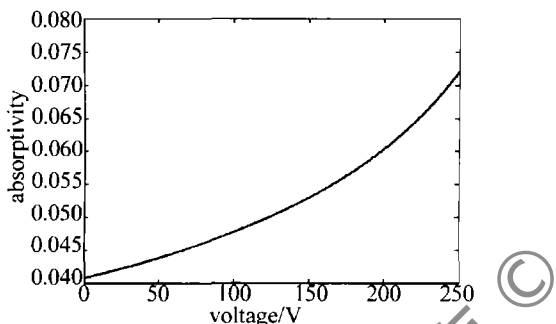


Fig.3 The theoretical laser absorptivity dependent on voltage (one-way reflection)

收受表面粗糙度影响较大,根据粗糙度计算公式(13)式,可得激光在粗糙表面多次反射吸收的吸收率曲线(见图4),图中虚线为计算表面粗糙度后的理论吸收

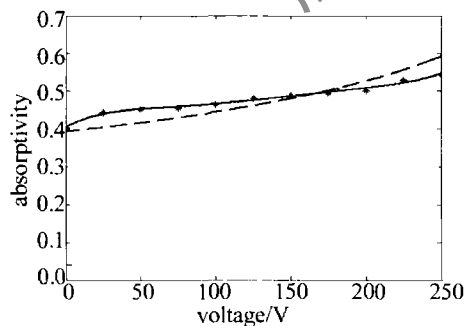


Fig.4 Absorptivity of theoretical values (broken line) and experimental values (real line)

率曲线,实线为实验所测得的吸收率曲线。由图可知,理论值与实验值存在一定的误差,由于材料表面氧化等原因,误差必不可少,但误差尚在可接受范围内,实验值大致上和理论值相吻合。

从实验中可看出,金属材料的激光吸收率随着电压的增大而增大,可方便地应用于金属材料激光表面热处理。这对预置了涂料的金属表面同样适用,对于涂覆了涂料的金属表面,在激光热处理过程中必然会烧掉一部分涂料,另外一部分涂料与基体相结合形成合金层,此时表面的激光吸收率必然下降,在工件两端加入电场同样可增加激光吸收率<sup>[7-8]</sup>。

### 4 结论

(1)详细分析了外加电场对金属材料的激光吸收率的影响机理,并推导了电压对金属材料激光吸收率的影响模型;(2)设计了饱和温度法测激光吸收率的实验方法,并推导了实验测激光吸收率的计算方程;(3)用所设计的饱和温度法测得在0V~250V的电压变化范围内2Cr13不锈钢的激光吸收率随电压的变化曲线,实验中所得的激光吸收率变化曲线和理论推导相吻合,证明了在激光热处理过程中对金属材料外加电压可增大激光吸收率。

### 参 考 文 献

- [1] LIU Q B, LI H, LI Sh, *et al.* A comparative study on new type laser-absorbing coating materials and carbonic ink for laser heat treatment [J]. *Modern Machinery*, 2003, 5(5): 89-91 (in Chinese).
- [2] GUO Y J, YU Zh Y, HE Ch L, *et al.* Applications of 89-1 paint in laser heat treatment [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2002, 27(7): 32-34 (in Chinese).
- [3] LIN X Ch, SHAO T M. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 856 - 859 (in Chinese).
- [4] ZHAO G, HAO Q L, QI W Z, *et al.* Thermal behavior of thin metal films irradiated by ultra-short pulse laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 9-12 (in Chinese).
- [5] LONG R Sh, LIU W J, SHANG X F. Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 394-396 (in Chinese).
- [6] CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* Influence of surface roughness on laser absorptivity [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 624-627 (in Chinese).
- [7] SUN Ch W, LU Q Sh, FAN Zh X. *Laser irradiation effects* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-24 (in Chinese).
- [8] JIN Ch, ZHOU X X, ZHAO S F. Effects of static electric field on high-order harmonic generation of hydrogen atom in intense laser field [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(2): 195-201 (in Chinese).