

文章编号: 1001-3806 (2008) 06-0624-04

## 材料表面粗糙度对激光吸收率影响的研究

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:** 为了在激光热处理过程中能更好地控制工件温度, 并为激光热处理的数学模拟提供更为准确的激光吸收率数据, 研究了材料表面粗糙度对激光吸收率的影响原理, 等效处理了材料表面轮廓线, 建立了数学模型, 采用集总参量法测得激光的吸收率, 得到的激光吸收率与理论公式计算所得的光吸收率相吻合。结果表明, 所建立的模型可以准确地描述材料表面粗糙度对激光吸收率的影响, 更有利于激光热处理各项参量的控制。

**关键词:** 激光技术; 激光吸收率; 粗糙度; 集总参量法

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A

### Influence of surface roughness on laser absorptivity

CHEN Jun, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua, FU Jibin

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

**Abstract:** The influence of surface roughness on laser absorptivity was studied to better control the temperature of workpiece during laser heat treatment process and supply more precise calculate model of laser absorptivity for mathematical simulation. The surface outline of material was equivalent treated, then mathematical model was set up. The laser absorptivity was measured by lumped parameter method, which was agreed with the value of laser absorptivity calculated by theoretical formula. The results indicated that the mathematical model could exactly describe the influence of surface roughness on laser absorptivity.

**Key words:** laser technique; laser absorptivity; surface roughness; lumped parameter method

## 引 言

激光热处理在各大行业中体现出它独特的优势, 特别是在精密工件加工行业中有着无法替代的作用。表面光滑的金属材料的激光吸收率一般不超过 10%<sup>[1]</sup>, 非金属材料的吸收率和激光的入射角有关<sup>[2]</sup>, 而表面粗糙度会影响激光入射角, 因此, 表面粗糙度对激光在材料表面的激光吸收率的研究就显得尤为重要了<sup>[3]</sup>。材料表面的粗糙度是对激光吸收率的主要影响因素之一, 不论是对金属还是非金属都可以通过调整表面粗糙程度而达到多次吸收来增加材料的吸收率的目的, 而表面粗糙度对非金属材料激光入射角的变化关系比较明显<sup>[4]</sup>, 从而使其对激光吸收率的影响尤为突出。而在已有的文献中大部分都是关于材料表面粗糙度对光散射方面研究的报道, 部分文献中谈及材料表面粗糙度对激光的吸收率有影响<sup>[5-7]</sup>, 但没能给出它们之间的直接关系, 目前尚无相关表面粗糙度对激光吸收率影响详细计算方面的报道。

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: 2007-08-22; 收到修改稿日期: 2008-03-19

## 1 材料表面粗糙度对激光吸收率的影响原理

材料表面粗糙度对激光吸收率的影响可以分为两方面。一方面, 材料表面对激光多次反射的重复吸收。在光照射到材料表面时, 由于表面凹凸不平, 必然会产生多次反射, 其原理如图 1 所示。图 1 中左边为材料

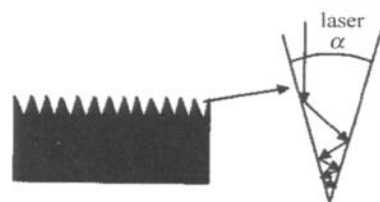


Fig 1 The principle of surface roughness

表面粗糙的轮廓线, 右边是对单个表面轮廓波谷在激光照射下的放大图, 由图可见, 垂直入射的激光束可以通过反复多次的反射而在表面 V 型凹槽中得到吸收, 当凹槽角度  $\alpha$  足够小时, 垂直入射的激光束可认为是自陷的, 即通过多次反射吸收来吸收激光束的所有能量。然而实际材料的表面形态是随机的, 即凹槽角度  $\alpha$  也是随机的, 这就很难详细地计算所有 V 型凹槽激光吸收。另一方面, 一些非金属材料的吸收率会随着激光入射角度的变化而变化, 在其入射角为布儒斯特角时, 激光在材料表面的吸收率最大, 几乎能全部吸收

光束能量。但由于材料表面粗糙度的存在,其凹凸不平的轮廓线不可能全部都相同,因此,不可能让所有光在材料表面的入射角都保持在布儒斯特角状态,而实际材料的表面形态是随机的,这使得激光入射角的大小也是随机的,这对激光吸收率的计算增加了难度。因此,为了方便计算,本文中对材料表面粗糙度做了等效处理。

### 2 材料表面粗糙度的等效处理

材料表面粗糙度情况复杂,在实际工作中不可能对每个波峰波谷进行研究,因此作者进行了等效处理。首先设定一个随机表面,如图 2 所示,将这个表面轮廓线的波峰全部对称往下折,图 3 为全部轮廓线下折后的倒三角总轮廓线,这个倒三角的高度为所有波谷高

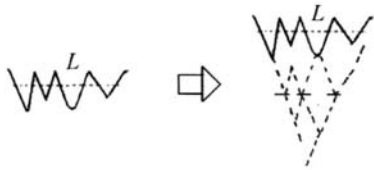


Fig. 2 Equivalent treatment of surface contour line wave crest been symmetry adown folded

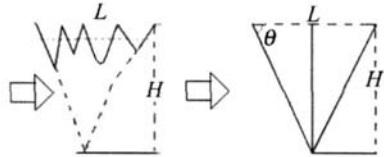


Fig. 3 Total contour line after all of surface contour line wave crest been symmetry adown folded

度总和的一半,因此,图 2 的材料表面轮廓线可利用图 3 的轮廓线来等效处理。图 3 中的轮廓边线不规则,这给计算带来不便,为此另外假设一个轮廓边线为直线的规则倒三角作等效处理(见图 3)。等效处理必然会带来相应的误差,故选取多个不同的表面来重复计算,得出图 3 的等效处理后的表面和原始表面吸收率的误差不超过 3%。

图 2、图 3 中  $L$  为取样长度,等效表面的高度  $H$  为所有波谷的和,即:

$$H = 4R_a N \tag{1}$$

式中,  $R_a$  为表面轮廓算术平均偏差,  $N$  为波谷数。

则:

$$\tan\theta = \frac{2H}{L} = \frac{8R_a N}{L} \tag{2}$$

式中,  $\theta$  为等效粗糙度倾角。

因此,只要测得材料表面的粗糙度即可求得  $\theta$  值,利用  $\theta$  值便可计算表面粗糙程度对激光吸收率的影响。

### 3 等效处理后激光吸收率的分析

由于材料表面粗糙度不同,因此激光在表面重复反射的次数也不相同,这主要反映在角度  $\theta$  的变化上,

故可按反射次数来计算在各个角度  $\theta$  上的吸收率。同时很多非金属材料的激光吸收率与入射角度有关,在计算模型中可很容易地计算出各粗糙度下的入射角度。这里  $\theta$  的取值是吸收率计算的关键。在实际应用过程中,只需测得材料表面的粗糙度,就可以按  $\theta$  的取值来选择具体的计算公式,从而求出吸收率。

(1) 当  $0 < \theta \leq \pi/6$  时: 光为全部 1 次反射, 图 4 为 1 次反射时的表面光路示意图, 则金属吸收率  $A_1 = \delta$ ,

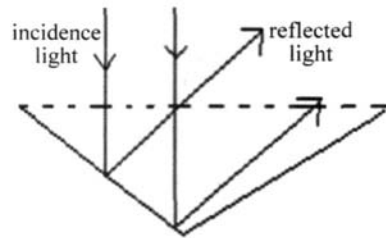


Fig. 4 Surface of once reflection

$\delta$  为光在金属材料表面单次反射的吸收率。非金属吸收率  $A_2 = \delta' = \frac{4n^2 \cos\phi (n^2 - \sin^2\phi)^{1/2}}{[n^2 \cos\phi + (n^2 - \sin^2\phi)^{1/2}]^2}$ , 其中光入射角  $\phi = \theta$ ,  $\delta'$  为光在非金属材料表面单次反射的吸收率。

(2) 当  $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$  时: 光为全部 1 次反射, 部分 2 次反射, 图 5 为相应的表面光路示意图, 则金属吸收

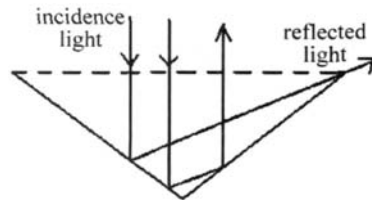


Fig. 5 Surface of partly second reflection

率  $A_1 = \delta - \frac{\cos 3\theta}{\cos\theta} (1 - \delta) \delta$ ; 非金属吸收率  $A_2 = \delta' - \frac{\cos 3\theta}{\cos\theta} (1 - \delta_1') \delta_2'$ 。  $\delta_1', \delta_2'$  分别为对应光入射角度  $\phi_1, \phi_2$  的单次激光吸收率, 其中入射角  $\phi_1 = \theta, \phi_2 = \pi - 3\theta$ 。

(3) 当  $\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{10}$  时: 光为全部 2 次反射, 图 6 为

相应的表面光路示意图, 则金属吸收率  $A_1 = \delta + (1 - \delta) \delta$ ; 非金属吸收率  $A_2 = \delta_1' + (1 - \delta_1') \delta_2'$ , 其中光入射

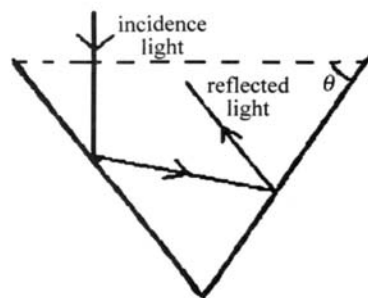


Fig. 6 Surface of the second reflection

角  $\phi_1 = \theta, \phi_2 = \pi - 3\theta$ 。

(4) 当  $\frac{3\pi}{10} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$  时: 光为全部 2 次反射, 部分 3 次反射, 图 7 为相应的表面光路示意图, 则金属吸收

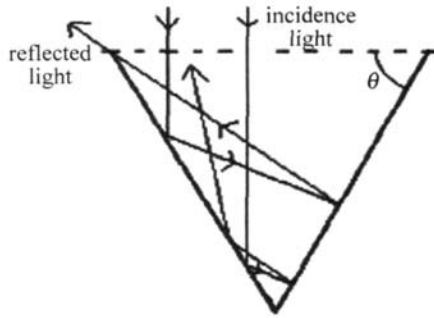


Fig 7 Surface of partly third reflection

率  $A_1 = \delta + (1 - \delta)\delta + (1 - \delta)^2\delta \frac{\cos^5\theta}{\cos\theta}$ ; 非金属吸收率  $A_2 = \delta_1' + (1 - \delta_1')\delta_2' + (1 - \delta_1')(1 - \delta_2')\delta_3' \frac{\cos^5\theta}{\cos\theta}$  (其中光入射角  $\phi_1 = \theta, \phi_2 = \pi - 3\theta, \phi_3 = 2\pi - 5\theta$ )。

当  $\theta \geq \frac{\pi}{3}$  时, 作者将不做详细分析, 读者可自己推导计算公式。

### 4 集总参量法测量激光吸收率实验

集总参量法就是当固体内部的导热热阻很小且远小于固体表面与周围环境的换热热阻时, 可认为整个固体在同一瞬间均处于同一温度, 忽略固体内部温度梯度, 将 3 维的传热问题简化为质点传热问题。实验中选取不锈钢 3Cr13 为基材, 试样尺寸为  $9.12\text{mm} \times 30.10\text{mm} \times 1.92\text{mm}$ , 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>[8-9]</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  $T$  监控。由能量守恒可知, 在激光加热过程中的能量守恒方程<sup>[6]</sup>:

$$A \times P \times \Delta t = \int_0^{\Delta t} \epsilon \sigma S (T^4 - T_0^4) + h_c S (T - T_0) J dt + cm \Delta T \quad (4)$$

式中,  $A, \epsilon, \sigma, h_c, S, T_0, c, m, P$  分别为材料的激光总吸收率、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、材料的比热容、材料的质量、激光功率。在实验中, 由于温度达到  $800\text{K}$  以上, 则  $T^4 \gg T_0^4$ , 因此综合辐射散热、对流散热为温度  $T$  的 4 次函数, 并忽略 1 次项, 假设它们的散热表达式为  $E_{b,ss} = hA (T^4 - T_0^4)$ ,  $h$  为综合散热系数, 则 (4) 式变为:

$$A \times P \times \Delta t = \int_0^{\Delta t} hS (T^4 - T_0^4) J dt + cm \Delta T \quad (5)$$

因此, 只要测得实验过程中的温度变化曲线, 即可利用 (5) 式求得吸收率  $A$ 。表 1 为在激光加热过程中, 利用红外线测温仪记录试样在各时间段的温度值。

Table 1 Temperature of laser heated process at different time

time/s	0	3.28	6.65	10.15	13.92	18.24	22.70	27.30	32.01
temperature/°C	560	590	620	650	680	710	740	770	800

为方便计算, 当温度为  $560^\circ\text{C}$  时记时间为 0, 由表 1 可见, 试样在激光加热过程中升高相同温度的时间间隔不断增加, 这是由于试样在激光加热下随着温度的升高热发散率也增加, 而激光输入功率一定, 则试样温度升高的时间必然会增加。根据表 1 中的温度数据拟合得到材料表面温度随时间  $t$  的变化方程为:

$$T(t) = 0.0011t^3 - 0.11t^2 + 9.89t + 559.4 \quad (6)$$

表 2 为试样 3Cr13 的各项热物性数据<sup>[10]</sup>, 把 (6) 式和热物性参量代入 (5) 式, 得在温度为  $590^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$  时

Table 2 Thermal physical parameters of 3Cr13 stainless steel

density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	specific volume/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	thermal conductivity/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	resistivity/( $10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ )	temperature coefficient/ $^\circ\text{C}$
7721	680	23.31	55	$2.27 \times 10^{-3}$

的方程组:

$$\begin{cases} 1.4073 \times 10^9 h + 83.02 = 1011A \\ 1.6674 \times 10^9 h + 83.02 = 1050A \end{cases} \quad (7)$$

由此解得  $590^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$  时 3Cr13 不锈钢的激光吸收率  $A = 10.38\%$ 。

### 5 光吸收率的理论值与实验结果对比

激光照射到金属表面上的透过率可由菲涅耳公式<sup>[4]</sup>算出:

$$T = 2 \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} = 0.1457 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \quad (8)$$

式中,  $\sigma$  为金属材料的电导率,  $\omega$  为入射光的频率,  $\rho$  为金属材料的电阻率,  $\lambda$  为入射光的波长。而透过金属表面的激光几乎在金属表面就被吸收, 因此吸收率就等于透过率:

$$\delta = T = 0.1457 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \quad (9)$$

把表 2 中不锈钢 3Cr13 的参量代入 (9) 式, 可算出在温

度为 590℃~650℃时的吸收率  $\delta = 5.10\%$ 。使用德国马尔 S2 型表面粗糙度测量仪测得试样表面粗糙度为  $0.563\mu\text{m}$ , 试样表面的轮廓线见图 8, 波谷数目  $N = 92$ ,

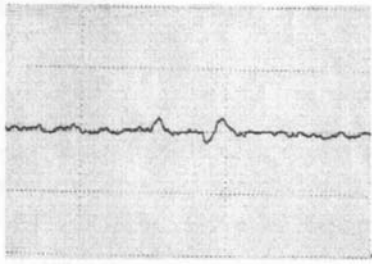


Fig 8 Contour line of measured surface

测量尺寸为  $L = 299.6\mu\text{m}$ , 代入 (2) 式的表面粗糙计算

$$\text{公式得: } \tan\theta = \frac{8R_a N}{L} = \frac{8 \times 0.563 \times 92}{299.6} = 1.3831, \text{得: } \theta =$$

$0.3007\pi$ 。由于  $\frac{3\pi}{10} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ , 光为全部 2 次反射, 部分 3 次反射, 则吸收率为:  $A = \delta + (1 - \delta)\delta + (1 - \delta)^2\delta \times \frac{\cos 5\theta}{\cos\theta} = 10.03\%$ 。

这与实验所得的吸收率 10.38% 的相对误差为 3.37%, 实验值与理论值基本相吻合, 说明了上面所述的材料表面粗糙度对激光吸收率的计算模型是可以应用与实际材料表面的计算。

## 6 结 论

(1) 等效处理材料的表面轮廓线, 并建立了表面粗糙度对激光吸收率影响的计算模型。本模型不管是对金属材料还是非金属材料都是适用的。

(2) 表面粗糙度对光的入射角有很大的影响, 有很多材料的激光吸收率都与激光入射角相关, 特别是非金属材料。作者利用等效处理的表面粗糙度计算模

型可求出激光入射角度, 根据入射角与吸收率的对应关系可方便地计算出非金属材料的激光吸收率。

(3) 采用集总参量法测得 3Cr13 不锈钢在 590℃~650℃时的激光吸收率, 用菲涅耳公式及表面粗糙度计算得出理论吸收率值, 与理论值基本吻合, 验证了计算模型的正确性。

(4) 所建立的数学模型为激光热处理过程中更好地控制工件温度提供了理论依据, 并为激光热处理的数学模拟提供了更为便利的激光吸收率计算方法。

## 参 考 文 献

- [1] LU J, NIX W, HE A Zh. Reciprocity between laser and material physics [M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 18-25 (in Chinese).
- [2] CHEN Q H. Reciprocity between laser and material & thermal simulation [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2001: 41-62 (in Chinese).
- [3] GUO Y J, LU Ch Sh, HE Ch L, et al. 89-1 coating for laser surface hardening [J]. Laser Technology, 2002, 26 (4): 252-254 (in Chinese).
- [4] ZU D L. Electrodynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 169-178 (in Chinese).
- [5] TAN L K. Wavelength roughness and light scattering [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2003, 16 (2): 37-39 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] HUNAG Y L, YANG F H, LANG G Y, et al. Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30 (5): 449-453 (in Chinese).
- [8] WEI H Zh, LI J R. Measurement of optical component absorption [J]. Laser Technology, 1999, 23 (5): 284-287 (in Chinese).
- [9] ZOU D N, LEI Y P, LANG G Y, et al. Determination of laser absorptivity of metal by numerical calculation technique and trial-and-error method [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37 (7): 737-740 (in Chinese).
- [10] TAN Zh, GUO GW. Thermo physical properties of engineering alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 130-131 (in Chinese).

(上接第 620 页)

- [6] CHEN C H. CO<sub>2</sub> laser-induced Ag deposition on epoxy resin from aqueous solution [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2003, 31 (3): 108-110 (in Chinese).
- [7] CHEN C H. The mechanism of CO<sub>2</sub> laser-induced metal deposition from aqueous solution [J]. Laser Technology, 2005, 29 (4): 383-385 (in Chinese).

- [8] YU X H. Macromolecule chemistry [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1994: 15-33 (in Chinese).
- [9] CHEN C H. The research for adhesion of metal layer deposited on epoxy-resin board by CO<sub>2</sub> laser-induced from aqueous solution [J]. Laser Technology, 2004, 28 (1): 26-28 (in Chinese).
- [10] YANG Y X. X-ray analysis [M]. Beijing: Traffic University Press, 1989: 71-88 (in Chinese).