

文章编号: 0258-7025(2003)05-0449-05

## 用原位法测定铝合金对激光的吸收率

黄延禄, 杨福华, 梁工英, 苏俊义

(西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 利用文献所介绍的原位法并加以改进, 测定了铝合金表面呈固态和液态时对激光的吸收率。实验结果表明, 试样的表面状况对激光吸收率有重要影响, 激光功率对吸收率的影响甚小, 但对表面涂黑的试样, 激光功率过高会使涂层烧损而降低吸收率。当试样表面出现熔池时, 所测得的吸收率是激光斑点中液态表面和固态表面的综合平均值, 真实的液态吸收率需用实测与数值模拟相结合的方法求取。当激光入射角在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围时, 无论是固态试样还是出现熔池, 其吸收率均随入射角的增大而线性增加。文中对实测数据的回归处理方法亦做了改进, 先将较复杂的曲线方程转换成直线方程, 然后进行线性回归处理。

**关键词** 激光技术; 吸收率; 原位法; 入射角; 铝合金

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

### Using In-situ Technique to Determine Laser Absorptivity of Al-alloys

HUANG Yan-lu, YANG Fu-hua, LIANG Gong-ying, SU Jun-yi

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** In this paper, an in-situ technique was used to determine the laser absorptivity of solid and liquid surfaces of Al-alloys. The experimental results show that the surface condition of the sample is the most important factor affecting the laser absorptivity. Usually, the absorptivity increases a little with the increase in laser power. But if the laser power is too high, the absorptivity of blacked samples will be decreased because of burnout of blacking layer. When melting pool emerges on the surface of sample, the measured laser absorptivity is an ensemble average value for liquid and solid zones within the area of laser spot, and the real absorptivity of liquid surface will be determined by using a method combining experiment measurement and numerical simulation. It is also shown by the results that if the incident angle of laser beam is in a range from  $0^\circ$  to  $45^\circ$ , the absorptivity increases linearly with increasing the angle, whatever the surface of specimen is in a state of solid or liquid. The data processing procedure was also improved in this paper. The complex curvilinear equation was replaced by a linear equation and the experimental data were dealt with using linear regression method.

**Key words** laser technique; absorptivity; in-situ technique; incident angle; aluminium alloy

## 1 引言

对金属材料进行激光表面处理时, 材料表面对激光的吸收率是一个重要的参数。尤其是对此工艺过程进行数值模拟时, 更需要这一参数。由于金属对激光吸收的特征长度极短, 仅有  $0.1 \mu\text{m}$  左右, 因此吸收率对表面状态非常敏感<sup>[1]</sup>, 表面杂质、粗糙度、氧化程度和涂层等都会使吸收率急剧变化。同

时, 激光束入射角对吸收率亦有明显的影响<sup>[2]</sup>。目前, 测定吸收率的方法有好多种<sup>[3~6]</sup>, 但实用而可靠的并不多。由于影响因素多而测定方法欠可靠, 以至所报道的激光吸收率数值相差甚大, 例如洁净纯铝在熔点以下对激光的吸收率, 所报道的数据在  $2.6\% \sim 15.2\%$  范围之间<sup>[3]</sup>, 令人无所适从。至于表面呈液态时的吸收率, 有关报道极少。本文是为了铝合金激光熔覆过程数值模拟的需要, 测定其表面

收稿日期: 2002-11-18; 收到修改稿日期: 2003-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 59871038)、西安交通大学科研基金及华中科技大学激光技术国家重点实验室资助项目。

作者简介: 黄延禄(1972—), 男, 博士生, 主要从事激光应用及其数值模拟研究。E-mail: huangyanlu@xinhuanet.com

为固态和液态时对激光的吸收率;并由于激光送粉熔覆时,熔池表面是有一定角度的斜面,故还测定了不同入射角时的吸收率。鉴于实验室的条件,利用原位法<sup>[6]</sup>并对其进行了改进,特别是表面呈液态时的吸收率,采用了实测与数值模拟相结合的方法加以确定。

## 2 实验方法

图1为原位法测定激光吸收率的实验装置。试样背面焊有两支相隔一定距离的K型热电偶,且安放在一可转动的夹具上以改变激光束的入射角,夹持试样处为绝缘材料制成。当激光束扫过试样时,试样吸收部分激光能量而温度升高,这部分被吸收的能量与激光输出能量的比值即可认为是材料的吸收率。

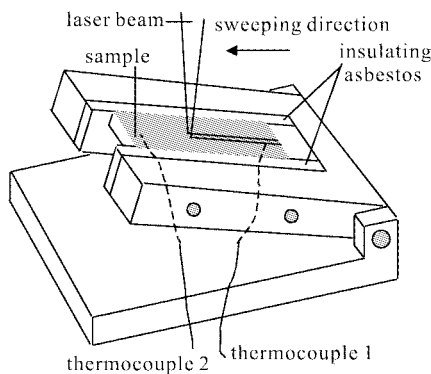


图1 测量吸收率的装置

Fig.1 Experimental apparatus for measurement of laser absorptivity

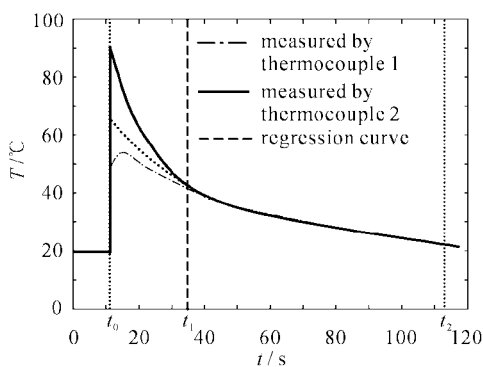


图2 温度-时间曲线

Fig.2 Temperature-time curves

当试样的内部热阻远小于试样与周围环境的界面热阻时,符合牛顿冷却的条件(毕渥准则数  $Bi < 0.1$ ),试样内部温度在激光扫过后很快会趋于一致。

设激光扫描一定时间( $t_0$ )时试样的温度为  $T(t_0)$ ,忽略此短时间内的热损失,则激光吸收率可用下式表达

$$\beta = \frac{mc_p [T(t_0) - T_a]}{Pt_0} \quad (1)$$

式中, $\beta$ 为激光吸收率, $m$ 为试样的质量, $c_p$ 为试样的比热, $T_a$ 为室温,亦即试样初始温度, $P$ 为激光功率。

实验中实际测得的两支热电偶的温度-时间曲线见图2。 $t_0$ 为激光在试样上的扫描时间,亦即激光关闭的时刻, $t_1$ 为试样达到均温(两热电偶的温差小于 $2^\circ\text{C}$ )的时刻, $t_2$ 为试样达到室温(试样与环境的温差小于 $3^\circ\text{C}$ )的时刻。由于热量在试样中的扩散需要时间,故在 $t_0$ 时刻试样中的温度分布并非均匀,温度 $T(t_0)$ 无法直接测得。由于 $t_1 \sim t_2$ 这段时间内试样中的温度分布是均匀的,可以将这段时间内所测得的温度值经回归处理成温度-时间方程,并按此方程外推到 $t_0$ 时刻,求得 $T(t_0)$ ,然后由方程(1)求得激光吸收率。试样越薄, $t_0 \sim t_1$ 间隔越小,用此外推所求得的 $T(t_0)$ 越可靠,但薄试样容易发生变形、热电偶脱落甚至熔穿等问题。

回归处理时,需先确定方程的形式。若冷却过程中温度分布均匀,则热平衡方程是<sup>[7]</sup>

$$hS[T(t) - T_a] = -mc_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (2)$$

式中, $h$ 为界面换热系数, $S$ 为换热面积, $T(t)$ 为 $t$ 时刻的试样温度。

在铝合金激光表面处理时,主要是由于空气自然对流所形成的换热,此时的换热系数 $h$ 是与试样温度有关的量<sup>[8]</sup>

$$h = B[T(t) - T_a]^{1/n} \quad (3)$$

式中, $B$ 和 $n$ 为两个常数,取决于冷却条件。

将式(3)代入式(2),并积分得

$$[T(t) - T_a]^{1/n} = \frac{BS}{nmc_p}t + C \quad (4)$$

这是一个较复杂的非线性方程,并含有三个待定的常数,按此方程回归处理较麻烦,且易造成误差。为此,采用变量代换,使方程变成线性形式。即令

$$Y = [T(t) - T_a]^{-1/n}, A = \frac{BS}{nmc_p}$$

于是式(4)就变为线性方程

$$Y = At + C \quad (5)$$

按此方程形式对 $t_1 \sim t_2$ 段的实测数据进行回归,得出 $Y-t$ 回归方程。然后再将变量还原为 $T(t)$ ,得到 $T(t)-t$ 的回归方程,即式(4)的形式,用以外推

求得  $T(t_0)$ 。

本文分别对用 1000 号砂纸打光、喷砂和石墨涂黑三种锻铝试样进行了吸收率测定。实验在 5 kW CO<sub>2</sub> 横流激光器上进行,用不同的激光功率以 32 mm/s 的速度对试样进行扫描,光斑直径 2 mm。试样成分为(质量比):Si 0.20,Cu 0.10,Mn 0.10,Mg 0.45,余量为 Al。试样尺寸为 40 mm×8 mm×1.5 mm,两支热电偶相距 30 mm,偶丝直径为 0.2 mm。

根据上述实验条件,利用外掠平板层流换热模型<sup>[7]</sup>,试样冷却过程中的 Bi 应为

$$Bi = \frac{h\delta}{\lambda_s} \quad (6)$$

$$h = Nu \frac{\lambda_g}{l} \quad (7)$$

$$Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (8)$$

$$Re = \frac{u_g l}{\nu} \quad (9)$$

其中,Nu 为努谢尔特准则,Re 为雷诺准则, $h$  为界面换热系数, $l$  为特征长度即试样长度, $\delta$  为试样半厚度, $u_g$  为空气流速试样移动速度, $\nu$  为空气运动粘度,取  $2.545 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , $\lambda_g$  为空气导热系数,取  $3.34 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ , $\lambda_s$  为试样导热系数,取  $236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ ,Pr 为空气的普朗特准则数,取 0.686。

由此可算得:  $Bi = 1.102 \times 10^{-5} \ll 0.1$ ,即充分满足牛顿冷却条件。

实验采用具有 16 路通道快速采集系统,输入信号采用 PS-010 前端信号处理板,A/D 转换采用 PC-6360 模入接口卡,配接 ISA 总线微机,A/D 转换时间为  $10 \mu\text{s}$ 。数据处理主要是将采集到的热电势转换成对应的温度值,并进行冷端补偿。本文中,所列数据均为三次试验的平均值。

### 3 实验可靠性验证

锻铝试样经 1000 号砂纸打光,激光功率为 200 W,光斑直径为 2 mm,扫描速度为 32 mm/s,用本实验装置进行吸收率测量,测得的吸收率为 9.9%。文献[3]所介绍的洁净纯铝试样在熔点下的吸收率的数据很分散,但很多方法所得吸收率数值不超过 8%。与之相比,本实验所测得的值偏高,估计与试样稍有氧化有关。

针对涂黑试样,还考察了实验结果的重现性,在相同实验条件下,进行了 4 次实验,实验结果见表 1 所示。

表 1 实验结果的重现性

Table 1 Reproducibility of experimental results

Experimental number	Laser power /W	SwEEPing velocity /mm/s	$\beta/\%$
1	400	32	46.615
2	400	32	47.966
3	400	32	48.761
4	400	32	45.552

实验的标准偏差  $S(X)$  和相对偏差  $E(X)$  分别为

$$S(X) = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - X)^2}{n-1}}$$

和

$$E(X) = \frac{S(X)}{X}$$

从表中可以得到,四次重复性实验标准偏差仅为  $S(X) = 1.423$ ,而相对偏差  $E(X) = 3.01\%$ 。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 固态表面吸收率

图 3 为激光功率不同时,不同表面状况的吸收率。从图中可以看出,随着激光功率的增加,砂纸打光试样和喷砂试样的吸收率略有增加,增幅约在 5% 左右。这是因为激光功率增加导致的试样温度升高和表面氧化造成吸收率的改变。从这点也可以说明,扫描速度的快慢对激光吸收率也将有一定影响。在三种激光功率下,喷砂试样的吸收率都比砂纸打光试样的略大,而涂黑试样的吸收率明显增加,激光功率为 200 W 时比喷砂试样高出 249.6%,激光功率为 400 W 时高出 255.5%,但当激光功率达

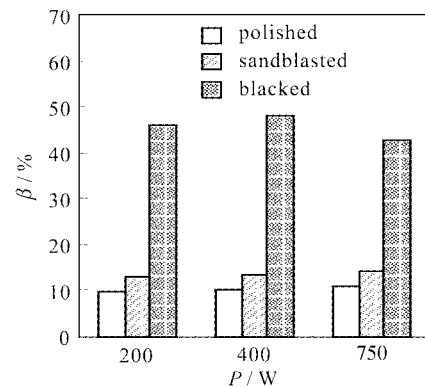


图 3 不同激光功率时,不同表面状况的固态吸收率  
Fig. 3 Absorptivities of solid surface under different surface condition and different laser power

到 750 W 时,涂黑试样吸收率略有下降,这是因为在高功率激光照射下,表面涂层迅速氧化和汽化,其作用远大于由于温度上升所造成的影响,因而使试样吸收率下降。

#### 4.2 液态表面吸收率

图 4 比较了实测所得的喷砂试样与涂黑试样分别在固态时和液态时的吸收率。从图中可以看出,对于喷砂试样,液态吸收率为 24.6%,低于文献[9]所报道的数值 35%左右。

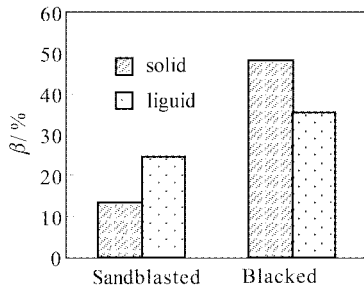


图 4 固态和液态表面吸收率

Fig. 4 Absorptivities of solid and liquid surfaces obtained in experiments

对实验过程进行数值模拟后发现,在用原位法测量液态吸收率时,激光斑点一部分照射在液态表面上,还有一部分照射在熔池周围的固态表面上。故实测所得的吸收率  $\beta_M$  实际上是这两部分综合平均后的数值,即

$$\beta_M = S_L \beta_L + S_S \beta_S \quad (10)$$

式中,  $\beta_L$  为真实的液态表面吸收率,  $S_L$  为激光斑点中液态表面所占分数,  $\beta_S$  为固态表面吸收率,  $S_S$  为斑点中固态表面所占分数。因而实测所得的数值较真实液态吸收率低,为此需用实测和数值模拟相结合的方法求取真实的液态表面吸收率  $\beta_L$ 。

数值模拟采用 Bennon 和 Incropera<sup>[10]</sup> 所提出的固液相变统一模型,把固相区、液相区和两相区看成为一个连续介质,用统一方程表示,并采用固定网格;用移动坐标处理移动热源;数值模拟程序是在商品软件 PHOENICS 的基础上添加相应子模块而编成。详细的计算方法见文献[11]。在数值模拟中,按实测所得的吸收率  $\beta_M$  求取熔池表面的形状和位置,与激光斑点的形状和位置相对照,求得  $S_L$  和  $S_S$ ,而  $\beta_S$  已由实验测得,然后按式(10)求取  $\beta_L$ 。用此法求得的  $\beta_L$  为 34%,与文献[9]所报道的数据比较接近。

图 5 为试样被激光扫描后表面上的温度场模拟

示意图,图中光斑形状与位置为三条黑色虚线的内接圆,黑色实线以内为熔化部分。由于扫描速度快,冷却速度快,熔池形状接近于圆形。

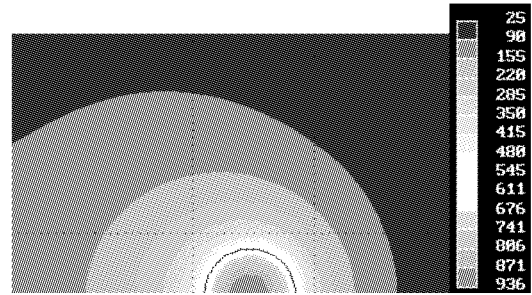


图 5 光斑和熔池的位置与形状

Fig. 5 Position and configuration of laser beam and molten pool

从图 4 中还可以看出,涂黑试样熔化后的吸收率小于未熔试样,这是因为涂层在高温下氧化及汽化后吸收率有所降低。

#### 4.3 吸收率随激光束入射角的变化

图 6 为两组试样的激光束入射角对激光吸收率的影响,一组为喷砂试样在激光功率 400 W 时的吸收率,另一组为涂黑试样在激光功率 1300 W 时(此时已产生熔池)的吸收率。从图中可以看出,吸收率随入射角增大而线性增加,对喷砂固态表面,吸收率从  $0^\circ$  时的 13.5% 线性增加到  $45^\circ$  时的 19.8%;对涂黑的液态表面,吸收率从  $0^\circ$  时的 35.2% 线性增加到  $45^\circ$  时的 41.6%。这一结论与文献[12]是基本一致的。

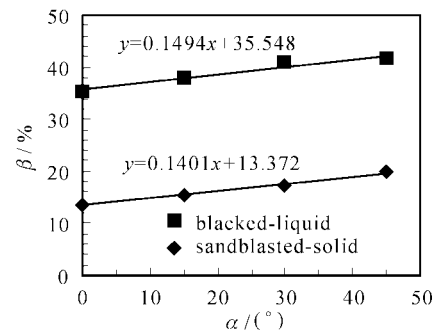


图 6 吸收率  $\beta$  随入射角  $\alpha$  的变化

Fig. 6 Absorptivity  $\beta$  varied with incident angle  $\alpha$

## 5 结 论

1) 所设计原位法可确定铝合金在固态和液态时对激光的吸收率;在确定液态吸收率时需采用实测和数值模拟相结合的方法。

2) 试样的表面状况对激光吸收率有重要影响, 相对表面粗化, 表面黑化是提高吸收率的有效手段。

3) 激光功率对固态表面的吸收率有一定影响, 当试样表面未涂黑时, 随激光功率增大吸收率略有增加; 但对涂黑表面, 在高功率下, 由于涂层烧损反而使吸收率降低。

4) 当激光入射角在  $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$  范围内时, 无论是固态表面还是液态表面, 其吸收率均随入射角的增大呈线性增加。

### 参 考 文 献

- 1 M. O. Sargent. Laser Physics [M]. Translated by Yang Shunhua, Peng Fang. Beijing: Science Press, 1982 (in Chinese)
- 2 Yan Yingbai. Applied Physical Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1990 (in Chinese)
- 3 M. Brückner, J. H. Schafer, J. Uhlenbusch. Ellipsometric measurement of the optical constants of solid and molten aluminum and copper at  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(3):1326~1332
- 4 Zhang Kexing, Liu Cangli, Zhang Ning *et al.*. The thermal coupling effects of CW/COIL radiation to LF6M aluminum alloy plates [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1994, **6**(4): 501~508 (in Chinese)
- 5 Lin Xiuchuan, Shao Tianmin. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(5):856~859 (in Chinese)
- 6 A. Frenk, A. F. A. Hoadley, J. D. Wagniere. In-situ technique for measuring the absorption during laser surface remelting [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1989, **22B**:139~142
- 7 Yang Shiming. Principle of Heat Transfer [M]. Beijing: High Education Press, 1991 (in Chinese)
- 8 J. P. Holman. Heat Transfer [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1976
- 9 H. G. Drechsler, C. Hartwich, J. H. Schafer *et al.*. Measurement of the optical constants of Al above the melting point at  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(1):238~240
- 10 W. D. Bennon, F. P. Incropera. A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems—I. model formulation [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1987, **30**(6):2162~2170
- 11 Zou Dening, Lei Yongping, Su Junyi. Numerical simulation on heat transfer and fluid flow phenomena in laser surface remelting process [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(1):81~84 (in Chinese)
- 12 A. Frenk, M. Vandyoussefi, J. D. Wagniere *et al.*. Analysis of the laser-cladding process for stellite on steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1997, **28B**:501~508