

# 送粉式激光熔覆过程中透光率的理论推算、测试方法及其影响因素

刘喜明

关振中

(吉林工学院材料工程系 长春 130012) (中国科学院长春光机所 长春 130022)

**提要** 提出了透光率、吸收透光能量线密度的概念,建立其计算模型并实验检测了透光率、吸收透光能量线密度。两者在反映送粉熔覆过程的客观规律方面及理论计算值和实验检测计算值方面均获得良好的吻合。对送粉利用率随扫描速度变化出现极大值现象进行了合理的解释。

**关键词** 透光率,吸收透光能量线密度,送粉激光熔覆

自动送粉式激光熔覆克服了预置激光熔覆的诸多缺点。熔覆材料与基体材料表面同时被激光加热,实现了熔化的熔覆材料与熔化的基体表面之间的液体交融,且简化了工艺过程,展示出极强的研究开发价值<sup>[1~6]</sup>。加热基体表面的能量来源大多数人认为主要是熔化了了的熔覆材料对基体表面的高温辐射和热传导,很少有人认为是激光直接加热基材表面,至少目前尚没有有利的证据。为此,作者试验研究了自动送粉激光熔覆过程中,基体表面被加热的真正能量来源。提出了透光率、吸收透光能量线密度等概念,推导出透光率的计算公式、基体表面吸收的总的能量的计算公式。并实验检测出透光率、吸收透光能量线密度。计算值与实验检测结果获得良好的吻合。同时还实验研究了工艺参数对透光率、吸收透光能量线密度的影响。从理论、实验上证明了在送粉式激光熔覆过程中,熔覆材料与基体材料表面同时被激光加热的观点是符合实际的。

## 1 实验过程及实验现象

采用两台 2 kW 横流式 CO<sub>2</sub> 激光器串联起来,输出功率  $P = 3.1$  kW; 圆形截面激光束直径  $d = 8$  mm; 熔覆材料为 Ni60A; 颗粒半径  $r = 0.04$  mm; 基体材料为 Q235, 板厚度 = 8 mm, 宽度 = 60 mm; 在此条件下,调整送粉速率  $V_f$  (mg/s) 和激光扫描速度  $V_g$  (mm/s) 进行系列单道激光熔覆试验。并将获得的试样沿垂直于扫描方向断开,分析横断面热影响区的状态。考查基材的吸热情况。

在其他工艺参数不变的情况下,基材热影响区的宽度  $M$  及深度  $S_g$  受送粉速率  $V_f$  和激光扫描速度  $V_g$  的影响很大,随送粉速率的增大而减小;随扫描速度的增大而减小。

在相同的扫描速度下,比较无送粉时的熔池宽度和较低送粉率(本实验中  $V_f = 350$  mg/s)

下的熔覆层宽度,熔覆层的宽度均大于无送粉时的熔池宽度。

将基材表面分别涂黑和磨光处理,其他工艺条件完全相同:(1)无送粉,表面涂黑的试样形成的熔池宽度均大于表面磨光试样的熔池宽度。(2)较低送粉速率( $V_f = 350 \text{ mg/s}$ )下,磨光表面的试样形成的熔覆层宽度均大于涂黑表面试样形成的熔覆层的宽度。

上述实验现象证明自动送粉式激光熔覆过程中,基体表面被加热的能源主要是透过熔覆材料的激光束,熔化的熔覆材料的高温辐射和热传导的作用只占很少部分。否则应该呈现相反的实验结果即:随送粉率的增大熔覆层体积增大,从而使热影响区增大。

## 2 透光率、吸收透光能量线密度的基本概念及相关数学模型的建立

### 2.1 基本概念

熔覆材料与基体材料表面同时被加热是无需置疑的事实。在熔覆过程中,单位时间内激光能量分配可表示为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (1)$$

式中, $P_1$ 为熔覆材料吸收量; $P_2$ 为基体材料吸收量; $P_3$ 为熔覆材料与基体材料烧损吸收量; $P_4$ 为激光散射、反射掉的量。

为分析计算 $P_2$ 而引入透光率 $\mu$ ,以其反映单位时间内透过熔覆材料的激光能量占单位时间内激光的总能量的比率

$$\mu = P_2/P \quad (2)$$

而 $P_2$ 不能反映其沿熔覆层纵向(扫描方向)的能量分布情况,因此提出吸收透光能量线密度 $P_m^*$ 的概念

$$P_m^* = P_2/V_g \quad (3)$$

$P_2, P_m^*$ 直接影响熔覆实现的可能性。

### 2.2 透光率 $\mu$ ,基材单位时间内吸收能量 $P_2$ 的计算数学模型

首先设定相关参数:激光功率 $P$ (W),激光束直径 $d$ (mm),扫描速度 $V_g$ (mm/s);熔覆材料颗粒半径 $r$ (mm),送粉速率 $V_f$ (mg/s),密度 $\rho$ (mg/mm<sup>3</sup>);基体材料密度 $\rho$ (mg/mm<sup>3</sup>),比热 $C(t)$ (J/g·°C),熔化潜热 $\Delta H_r$ (J/mg),熔池加热温度 $T$ (°C),熔点 $T_m$ (°C),基体热影响区与母材之间任意等温面温度 $T_0$ (°C),热影响区宽度 $M$ (mm),熔化区宽度 $L$ (mm),过热区深度 $S_g$ (mm),熔化区深度 $S_r$ (mm)。

#### 2.2.1 透光率 $\mu$ 的计算数学模型

假设熔覆材料粉颗粒从送粉器喷嘴喷出进入激光束后,单位时间内在扫描方向上有 $a$ 个、横向有 $b$ 个、光束方向有 $c$ 个颗粒。进一步假设激光束在透过熔覆材料颗粒空隙时不发生衍射、散射。这样透光率 $\mu$ 就可以看成是空隙面积占激光扫过面积的比率,即

$$\mu = \frac{V_g \cdot d - a \cdot b \cdot \pi \cdot r^2}{V_g \cdot d} \quad (3)$$

$$\text{而} \quad V_f = a \cdot b \cdot c \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^3 \quad (4)$$

$$L = c \cdot r \quad (5)$$

在熔覆过程中,激光束有效直径随扫描速度的增大而减小,因此需用 $M$ 来代换 $d$ ,将式(4),(5)代入式(3)得

$$\mu = 1 - \frac{V_f}{V_g \cdot M \cdot L \cdot \theta} \tag{6}$$

式(6)即是透光率计算数学模型。

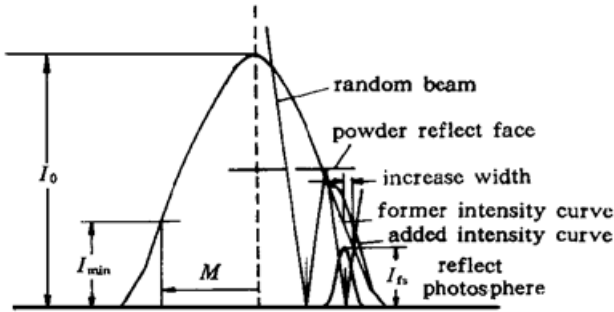


图 1 熔覆材料粉、基材表面反射光与源光强度叠加示意图

Fig. 1 Schematic illustration: the superimposition of the intensities of laser beams reflected from the coating material and the substrate surface with the source beam

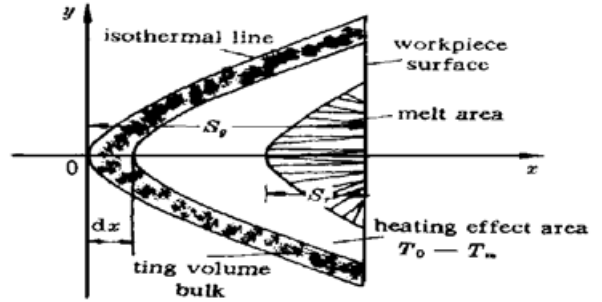


图 2 金相法检测透光率热影响区吸热分析示意图

Fig. 2 Diagram showing schematically the measurement of transparency by a metallographic method and the analysis of the absorption of heat in the heat affected zone

### 2.2.2 基体材料吸收量 $P_2$ 的计算数学模型

激光束透过熔覆材料照射到基体表面, 部分激光能量被吸收, 设吸收率为  $\alpha$ , 而剩余的激光被反射到熔覆材料粉区, 之后部分激光被漏掉、部分被粉吸收、部分再被反射到基体表面。因此, 基体材料单位时间吸收激光总能量可表示为

$$\begin{aligned} \text{一次吸收} & \quad \Delta H_1 = \mu \cdot \alpha \cdot P \\ \text{二次吸收} & \quad \Delta H_2 = (1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha \cdot \mu \cdot \alpha \cdot P \\ \text{三次吸收} & \quad \Delta H_3 = [(1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha]^2 \cdot \mu \cdot \alpha \cdot P \\ & \quad \dots \dots \\ \text{总吸收} & \quad P_2 = \Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots \end{aligned}$$

因为  $(1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha < 1$ , 所以, 以  $(1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha$  为公比的等比级数收敛, 由此得

$$P_2 = \frac{\mu \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha} \cdot P \tag{7}$$

式(7)是在自动送粉激光熔覆过程中, 透过熔覆材料粉颗粒的激光束直接加热基体材料表面时, 基体单位时间内直接吸收的能量。

### 2.2.3 理论吸收透光能量线密度 $P_m^*$

根据吸收透光能量线密度  $P_m^*$  的定义, 可求得

$$P_m^* = \frac{P_2}{V_g} = \frac{\mu \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha} \cdot \frac{P}{V_g} \tag{8}$$

式(7), (8)中的基体材料对激光的吸收率可以通过下面的实验测得。

## 3 透光率、吸收透光能量线密度的实验检测

采用金相分析法确定基体表面熔化区、热影响区的形状及大小, 进行基材吸热计算。利用吸收率  $\alpha$  建立关系方程, 求得透光率、吸收透光能量线密度。如图 2, 在表层形成熔化区、过热

区、重结晶区、不完全重结晶区、再结晶区、低温区。由于热影响区很小,近似计算较容易实现,下面将对基体吸收能量进行推算。

首先设定相关参数:实验检测透光率  $\mu_s$ , 吸收透光能量线密度  $P_{ms}^*$ ; 熔化区单位时间吸收能量  $\Delta H_{x1}$ , 热影响区单位时间吸收能量  $\Delta H_{x2}$ 。其余参数如前所设。假设:(1) 熔化区温度均匀,且无气化、烧损,温度  $T_m$  在 + 50 ~ 100 °C; (2) 忽略热影响区固态相变潜热,认为低温区吸收的能量与熔覆材料高温辐射能量相当。设各区之间的界面与横断面的交线为抛物线,且是该位置的等温线,各等温线之间的温度梯度呈线性均匀分布。在此条件下,根据材料吸热计算方程求得

$$\Delta H_{x1} = C(t) \cdot \frac{2}{3} \cdot L \cdot S_r \cdot V_g \cdot \vartheta \cdot T + \frac{2}{3} \cdot L \cdot S_r \cdot V_g \cdot \vartheta \cdot \Delta H_r = \frac{2}{3} \cdot L \cdot S_r \cdot V_g \cdot \vartheta \cdot [C(t) \cdot T + \Delta H_r] \quad (9)$$

$$\Delta H_{x2} = \int_0^{S_g - S_r} \frac{2}{3} \cdot C(t) \cdot \vartheta \cdot V_g \cdot \left[ T_0 + \frac{T_m - T_0}{S_g - S_r} \cdot x \right] [S_g \cdot M - (S_g - dx) \cdot (M - 2 \cdot dx)] = \frac{1}{3} \cdot C(t) \cdot \vartheta \cdot V_g \cdot (M + 2 \cdot S_g) [T_0 \cdot (S_g - 3 \cdot S_r) + T_m \cdot (S_g + S_r)] \quad (10)$$

在上述积分计算中,略去了高阶微分。计算取  $T_0 = 0.3 \sim 0.35T_m$ , 因此,式(10)可写成

$$\Delta H_{x2} = \frac{1}{3} \cdot C(t) \cdot \vartheta \cdot V_g \cdot T_m \cdot (M + 2 \cdot S_g) (1.3 \cdot S_g + 0.1 \cdot S_r) \quad (11)$$

总的单位时间内吸收的能量  $\Delta H_x$  为

$$\Delta H_x = \Delta H_{x1} + \Delta H_{x2} \quad (12)$$

因此,实验检测透光率  $\mu_s$  和吸收透光能量线密度  $P_{ms}^*$  可通过下列关系式求得

$$\mu_s = \Delta H_x / \alpha \cdot P \quad (13)$$

$$P_{ms}^* = \Delta H_x / V_g \quad (14)$$

吸收率  $\alpha$  可以通过上述实验过程中,在无送粉的情况下检测出来。通过

$$\alpha = \Delta H_x / P \quad (15)$$

求得吸收率  $\alpha$  平均值为  $\alpha = 0.1085$ 。

实验检测结果、计算结果见表 1。

表 1 相关参数金相检测结果及  $\mu_s$ ,  $P_{ms}^*$ ,  $\mu$ ,  $P_m^*$  的计算结果

Table 1 Experimental results of related parameters obtained by metallographic method and the calculated results of  $\mu_s$ ,  $P_{ms}^*$ ,  $\mu$ ,  $P_m^*$

$V_g$ / mm/s	$V_f$ / mg/s	$M$ / mm	$L$ / mm	$S_g$ / mm	$S_r$ / mm	$\mu_s$	$\mu$	$P_{ms}^*$ / W/mm·s	$P_m^*$ / W/mm·s
2.08	0	7.86	5.76	2.66	1.24				
	350	7.40	6.28	2.62	0.48	0.612	0.572	95.9	96.5
	375	7.60	6.24	2.34	0.40	0.518	0.554	83.7	93.6
	425	7.00	5.62	2.56	0.30	0.524	0.391	84.8	67.2
	475	6.78	6.14	2.20	0.08	0.385	0.356	62.3	61.4
14.29	0	5.30	3.48	1.08	0.28				
	350	4.84	3.70	1.10	0.20	0.856	0.840	24.6	20.0
	375	4.70	3.64	1.00	0.16	0.799	0.820	19.5	19.6
	425	4.80	3.30	0.90	0.10	0.691	0.798	16.3	19.4
	475	4.76	3.74	0.80	0.04	0.559	0.781	13.2	19.3

## 4 分析讨论

### 4.1 误差分析

根据表1,实验数据与理论计算数据均反映了相同的规律性,即在相同的扫描速度下,随送粉速率增大,透光率减小、吸收透光能量线密度降低;在相同的送粉速率下,随扫描速度增大,透光率增大、吸收透光能量线密度降低。尽管如此,两者在数值上尚有一定偏差,产生偏差的影响因素较复杂,可从以下几个方面来分析:

(1) 数学模型建立过程中,假设熔覆材料粉颗粒排列方式与实际熔覆材料粉颗粒在激光束中分布有差异。粉颗粒分布尚受送粉器喷嘴形状及布置的影响,关于这方面尚需进一步积累经验 and 资料。(2) 金相分析法检测的熔覆层参数存在误差,导致两方面计算均出现偏差。(3) 金相法检测透光率计算公式推导过程中,没包含固态相变潜热、低温区吸热和熔覆材料层高温辐射及热传导的作用。热影响区的等温线假设成抛物线可能与实际有些偏差。(4) 基材、熔覆材料飞溅、烧损损失的能量没有被检测计入。(5)  $T_0$ 、 $T$  值的确定直接影响金相检测计算结果,本实验确定  $T_0 = (0.3 \sim 0.35)T_m$ ,  $T = T_m + (50 \sim 100^\circ\text{C})$  也会带来计算误差。若直接监测  $T$ , 情况会得到改善。

### 4.2 实验现象分析讨论

#### 4.2.1 熔覆层宽化分析

实验过程中,无论哪种扫描速度下低送粉率时均表现出熔覆层宽度大于无送粉时的熔池宽度。见表2( $L$ 随 $V_g$ 的变化)。原因是激光束强度在光束截面上的分布是不均匀的,对基模激光而言,激光强度在横断面半径上满足高斯分布即  $I = I_0 \cdot \exp(-\alpha r^2)$ , 见图1。在激光扫过基体材料表面时,只有当强度  $I \geq I_0 \cdot \exp(-\alpha r_0^2)$  ( $2r_0$ 为基材表面形成熔池宽度) 时才能使基材表面熔化。一方面随扫描速度增加,基材表面吸收激光能量线密度下降,满足上述条件的  $r_0$  减小,形成的基材熔化宽度减小。在有送粉的情况下,由于熔覆材料粉吸收部分激光能量使其透过激光强度降低,随送粉速率的增加透光率下降,导致基材熔化区宽度减小。另一方面,经基材表面反射掉的部分激光与熔覆材料粉再相遇,同样发生透过、吸收、反射,这部分反射激光又回到基体表面进行二次吸收,此过程可无限进行下去。在此过程中激光散化,二次反射激光与源激光强度叠加如图1,使得  $r_0$  增大。两个矛盾方面共同作用产生上述实验结果。此现象随透光率的增大趋于显著。由此可推算一定条件下熔覆层最大增加宽度为

$$\Delta L_{\max} = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (16)$$

式(16)中  $h$  为熔覆材料粉假想反射面到基体材料表面之间的距离,  $\theta$  为激光束发散角(一般小于  $5^\circ$ )。

#### 4.2.2 熔覆材料利用率(有效利用率)分析

实验发现,多数情况下熔覆层厚度与实际送粉速率不相符合,实际熔覆层厚度小于理论计算值。此偏差的大小与送粉速率、扫描速度、送粉器喷嘴的形状、尺寸关系很大。熔覆材料利用率  $\varepsilon$  在一定扫描速度下,随送粉速率的增大而增大;在一定的送粉速率下,随扫描速度的增大出现极大值现象。实验结果见图3。原因是从送粉器喷嘴喷出的熔覆材料粉在形成熔覆层的过程中,可

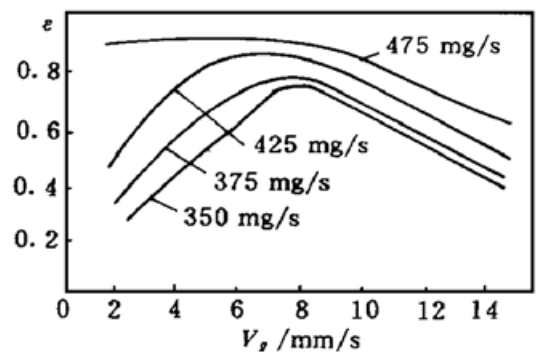


图3 熔覆材料利用率与送粉速率、扫描速度之间关系曲线

Fig. 3 Relationship between the utilization ratio of the coating material, powder feeding rate and the scanning speed

能有两种情况会导致其损失,即加热温度过高被烧损和飞散于激光束外被损失。扫描速度较小时,加热温度过高而被烧损,熔覆材料利用率较低。随送粉速率增大,烧损程度减轻,熔覆材料利用率增大。扫描速度增加,激光束动直径减小,熔覆材料散落于激光束外的倾向增大,熔覆材料利用率降低,导致其出现极大值现象。送粉器喷嘴直径为 4 mm,在扫描速度为  $V_g = 8.33$  mm/s 时,激光束动直径为 4.8 mm,两者尺寸相当;在  $V_g = 14.29$  mm/s 时,激光束动直径为 3.6 mm。因此,在扫描速度为  $V_g = 8.33$  mm/s 时出现熔覆材料利用率最大值。显然,要想获得良好的熔覆层,提高熔覆材料利用率,送粉器喷嘴形状、尺寸与扫描速度、送粉速率之间匹配很重要。

### 参 考 文 献

- 1 Xiaoyan Zeng, Zengyi Tao, Beidi Zhu. Investigation of laser cladding ceramic metal composite coatings processing modes and mechanisms. *ELSEVIER Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**(2): 209~ 217
- 2 Xinwei Wu, Beidi Zhu, Xiaoyan Zeng. Critical state of laser cladding with powder auto-feeding. *ELSEVIER Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**(2): 200~ 204
- 3 Xiaoyan Zeng, Beidi Zhu, Zengyi Tao. Analysis of energy conditions for laser cladding ceramic-metal composite coatings. *ELSEVIER Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**(2): 162~ 169
- 4 Y. P. Hu, C. W. Chen, Kali Mukherjee. Laser cladding of wear resistant tool steel. *Tech Spotlight*, 1997, **152**(2): 31~ 33
- 5 Christine Maier, Peter Schaaf, Ulrich Gonser. Calculation of the temperature profile for laser treatment of metallic samples. *Mater. Sci. Eng.*, 1992, **A150**(2): 271~ 280
- 6 P.-A. Vetter, Th. Engel, J. Fontaine. Laser cladding: the relevant parameters for process control. *SPIE*, 1997, **2207**: 452

## The Theoretical Calculation and Experimental Measurement of the Laser Beam Permeability and Related Factors in the Process of Powder Feeding Type Laser Coating

Liu Ximing<sup>1</sup> Guan Zhengzhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials, Jilin Institute of Technology, Changchun 130012

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

**Abstract** The concepts of laser beam permeability and absorbed line density are proposed. A theoretical model is established. The beam permeability and the absorbed line density of laser energy were determined by means of metallography. The theoretical and experimental results coincide well with each other quantitatively and are consistent in reflecting the objective reality of the process. A reasonable explanation on why a maximum is observed in the relationship between the effective powder feeding rate and the scanning speed is presented.

**Key words** laser beam permeability, absorbed line density of laser energy, powder feeding type laser coating