

文章编号: 0258-7025(2004)07-0875-04

# 侧向送粉激光熔覆粉末温升模型及实验研究

刘振侠, 陈 静, 黄卫东, 吴丁毅

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘要** 建立了侧向送粉激光熔覆粉末颗粒温升的数学模型, 该模型可以考虑激光束的功率分布。推导了考虑激光束直径大于粉斑直径和小于粉斑直径两种情况下, 粉末颗粒在光束辐照下的温升与其在光束下运动时间的关系式。通过算例, 给出了在不同激光功率下粉末颗粒的温升随其与激光束相互作用时间的关系曲线以及不同颗粒直径条件下粉末颗粒温度随相互作用时间的关系曲线。采用微距摄影技术对粉末颗粒到达熔池表面的状态进行实验观测, 并采用图像分割技术中的迭代阈值选取方法, 对所获得的灰度图进行处理从而得到了粉末颗粒到达熔池的温度。计算结果与实验分析获得了相同的结论, 从而验证了模型的正确性。

**关键词** 粉末冶金; 激光熔覆; 温升模型; 微距摄影

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Temperature Rise Model of Laser Cladding Material Powder by Side-Injection with Experiment Investigation

LIU Zhen-xia, CHEN Jing, HUANG Wei-dong, WU Ding-yi

(North-west Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** A temperature rise model of laser cladding material powder by side-injection is established. In this model, the distribution of laser power is considered. The relation formula between the temperature rise of the powders and the time that the particles moves under the laser beam shine is deduced by considering two kinds of circumstances when the diameter of laser beam is larger or smaller than the diameter of powder spot. The paper presents the relationship between the temperature rise and moving time of the powders for different laser power. The paper also presents the relation between the temperature rise and the interaction time for different powder diameters. The micro-distance photograph technique and the image segmentation technique are used to investigate the state and temperature of the cladding material particles after its passing through the laser beam. The experiment analysis validates the model prediction.

**Key words** power metallurgy; laser cladding; temperature rise model; micro-photograph technique

### 1 引 言

激光熔覆就是利用高能激光束的能量将熔覆材料和基体同时熔化从而在基体表面形成熔覆层。送粉式激光熔覆是在激光束移动的同时, 通过送粉器向熔池中喷射合金粉末的熔覆方法。因此, 送粉式激光熔覆实际上是激光束、熔覆粉末颗粒以及基体相互作用的过程<sup>[1]</sup>。

粉末颗粒到达基体或熔覆层的温度决定了它的状态。在穿过激光束后粉末落到熔覆层和基体表面时的状态可能的情况为: 1) 粉末已经完全熔化为液滴; 2) 粉末没有熔化仍然为固相颗粒; 3) 部分熔化, 其他部分在与液态混合过程中吸热、升温然后熔化。通过计算粉末到达熔覆层和基体表面时的温度可以知道其处于哪一种情况。对于不同的合金粉末

收稿日期: 2003-08-20; 收到修改稿日期: 2003-11-21

基金项目: 国家 973 计划(G2000067205-3)资助项目。

作者简介: 刘振侠(1963—), 男, 陕西西安人, 西北工业大学副教授, 博士, 主要从事流体、传热计算及材料激光加工技术等研究。E-mail: zxliu@nwpu.edu.cn

以及不同的工艺参数上面三种情况都可能会出现。因此,对粉末颗粒穿越激光束后温度升高的研究对掌握激光熔覆机理有重要意义。一般地说,固体颗粒撞到固体表面就会反弹掉;液态颗粒撞到固体表面就会粘附其上;而不论固态还是液态颗粒撞入液态熔池表面就会被吸收。所以,粉末颗粒到达熔覆层和基体时的状态对于建立熔覆层的质量平衡有一定影响,对于熔覆层表面质量也有很大影响。

关于激光熔覆中粉末与激光的相互作用的研究,国内外文献均有报道<sup>[2~6]</sup>。粉末颗粒温升问题的研究,同轴送粉方面理论和实验研究得较多,在侧向送粉方面虽然理论模型偶见报道但相应的实验研究则报道较少,因此模型缺少实验验证。因此,本文建立了粉末颗粒温升的数学模型,并结合理论模型采用微距摄影技术对侧向送粉激光熔覆粉末颗粒到达熔池时的状态和温度进行了实验观测和分析,印证了由理论模型得到的结论及模型的合理性。

## 2 粉末颗粒温升的数学模型

### 2.1 温升模型

图1为粉末温升模型坐标系。粉末在穿过激光束时,吸收了部分激光能量,从而使自身的温度升高。对于激光熔覆来讲应该考虑进入熔池自由表面(熔池的气-液界面)时粉末粒子的温度。因为粉末粒子温度不同除了对其落到基体和熔覆层的状态有影响外,还对熔池的能量平衡产生影响。

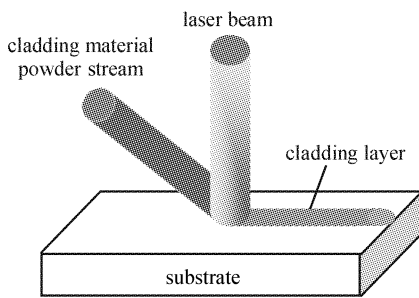


图1 粉末温升模型坐标系

Fig.1 Model coordinates system for temperature rise

实际上,在不考虑等离子体影响的情况下,粒子直接吸收激光辐射能,并放出辐射能。在空气中粉末颗粒也会由于空气对流散失能量,粒子之间也会相互加热。一方面这些能量在总能量中的比例很小,另外也为了计算方便,在模型中假设:

1) 粉末颗粒在气-粉射流中的体积分数很低,可以忽略激光的反射、折射和粒子之间的相互加热,

忽略其间的对流换热;2) 粉末颗粒体积恒定,是半径为  $r_p$  的球体。由于粉末颗粒足够小,在能量计算时可将其看成一个点,粒子的热导率为无限大,即认为粉末颗粒的温度是均匀一致的,在迎光面和背光面没有差异;3) 粉末颗粒只在迎光面吸收能量,但对外辐射则在整个球体表面发生,且吸收率及发射率为一常数;4) 粉末不吸收来自基体的反光;5) 不考虑粉末颗粒的物性参数随温度的变化;6) 激光束光强为均匀分布。

根据假设,在时间段  $(t, t + \Delta t)$  内,一颗位置在  $(x(t), y(t), z(t))$  的粉末粒子其吸收的激光能量为

$$dQ = \alpha_p \pi r_p^2 P(x(t), z(t)) dt \quad (1)$$

其中  $\alpha_p$  为粉末对激光的吸收系数,  $P(x(t), z(t))$  为激光功率分布,  $r_p$  为粉末颗粒半径,其中假设此分布与  $y$  无关,如果令

$$I_p(t) = \int_0^t P(x(t), z(t)) dt$$

$$\text{则} \quad Q = \alpha_p \pi r_p^2 I_p(t) \quad (2)$$

根据假设6)

$$P(x, z) = P_l / (\pi r_l^2)$$

其中  $P_l$  为均匀分布的激光输出功率,  $r_l$  为激光束半径。所以有

$$I_p(t) = \frac{P_l}{\pi r_l^2} \Delta t \quad (3)$$

则(2)式变为

$$Q = \alpha_p \pi r_p^2 I_p(t) = \frac{\alpha_p r_p^2 P_l}{r_l^2} \Delta t \quad (4)$$

同理,粉末粒子在该时间段内的散热量为

$$E = 4\pi r_p^2 \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \Delta t \quad (5)$$

其中,  $\sigma$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,  $\epsilon$  为全发射系数,  $T_a$  为环境温度,  $T$  为粉末颗粒温度。令

$$Q_{in} = Q - E \quad (6)$$

并且令

$$Q_1 = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p c (T_m - T_a)$$

$$Q_2 = Q_1 + \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p l_p \quad (7)$$

其中,  $c, l_p, T_m$  分别为粉末粒子的比热、熔化潜热及熔点温度,  $\rho_p$  为粒子的物质密度。根据能量平衡得到粉末颗粒的温度为

$$T = \begin{cases} T_a + \frac{3\Delta t}{4\pi c \rho_p r_p} \left[ \frac{\alpha_p P_l}{r_l^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \right] & Q_{in} < Q_1 \\ T_m & Q_1 \leq Q_{in} \leq Q_2 \\ T_a + \frac{3\Delta t}{4\pi c \rho_p r_p} \left[ \frac{\alpha_p P_l}{r_l^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \right] - \frac{l_p}{c} & Q_{in} > Q_2 \end{cases} \quad (8)$$

显然,粉末粒子温升与其在光束照射下运动的时间有关。

### 2.2 粉末颗粒在光束下运动的最大距离

图 2(a),(b)为激光束与粉末流相交示意图,图中  $\theta_{jet}$  为粉末流轴线与水平向夹角。图 2(a)为  $r_{jet} > r_l$  的情况,图 2(b)为  $r_{jet} < r_l$  的情况,两种情况下粉末颗粒运动的最大距离为

$$\zeta = \frac{2r_l}{\cos(\theta_{jet})}$$

对应的粉末颗粒在激光束中运动的最长时间为

$$\Delta t = \frac{\zeta}{v_p} = \frac{2r_l}{v_p \cos(\theta_{jet})}$$

代入(8)得

$$T = \begin{cases} T_a + \frac{3r_l}{2\pi c \rho_p r_p v_p \cos \theta_{jet}} \left[ \frac{\alpha_p P_l}{r_l^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \right] & Q_{in} < Q_1 \\ T_m & Q_1 \leq Q_{in} \leq Q_2 \\ T_a + \frac{3r_l}{2\pi c \rho_p r_p v_p \cos \theta_{jet}} \left[ \frac{\alpha_p P_l}{r_l^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \right] & Q_{in} > Q_2 \end{cases} \quad (9)$$

从(9)式进行迭代得到的是光束辐照下粉末颗粒的最高温升。

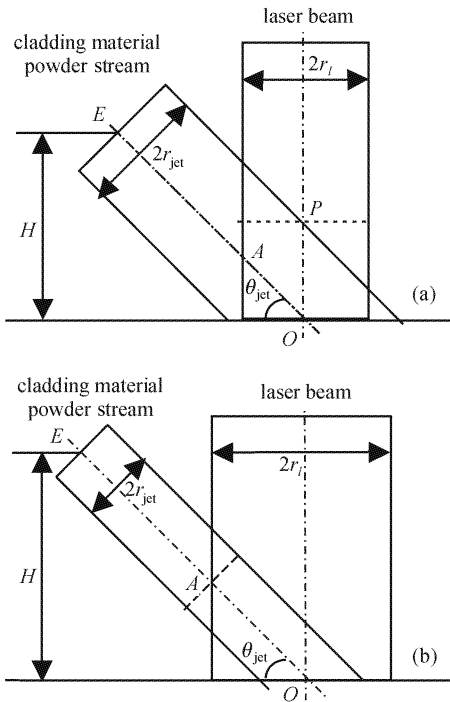


图 2 激光束与粉末射流束相交示意图  
Fig. 2 Sketch map of the interaction between laser beam and powder stream  
(a)  $r_{jet} > r_l$ ; (b)  $r_{jet} < r_l$

### 3 粉末颗粒温升的计算分析

根据(8)式计算粉末颗粒的温升和它与激光相互作用时间的关系。计算所用参数如表 1 所示(其中  $v_p$  为实测参数)。

表 1 计算参数(熔覆材料为 316L 不锈钢)

Table 1 Calculation parameters (cladding material: 316L stainless steel)	
$\alpha_p = 0.1$	$\epsilon = 0.54$
$\theta_{jet} = 60^\circ$	$\rho = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$v_p = 1.0 \text{ m/s}$	$c = 0.5 \times 10^3 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$r_p = 50 \text{ }\mu\text{m}$	$T_a = 300 \text{ K}$
$r_l = 2.0 \text{ mm}$	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$
$P = 1500 \text{ W}$	

图 3 为粉末颗粒在激光束下运动的时间与其温度的关系曲线,显然作用时间越长粉末颗粒的温度越高,且随着激光功率的升高温度随作用时间升高的斜率增大。图中画出了  $T = T_m = 1375 \text{ K}$  线,  $T_m$  为 316L 不锈钢的熔点,在此线之下则表明粉末颗粒没有熔化,在此线之上,则表明颗粒开始熔化。

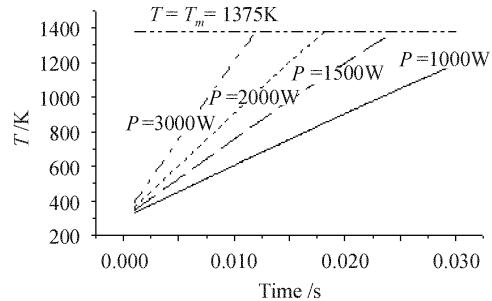


图 3 粉末颗粒的温度及其与激光相互作用的关系曲线  
Fig. 3 Relations between particles temperature and interaction time for various laser powers

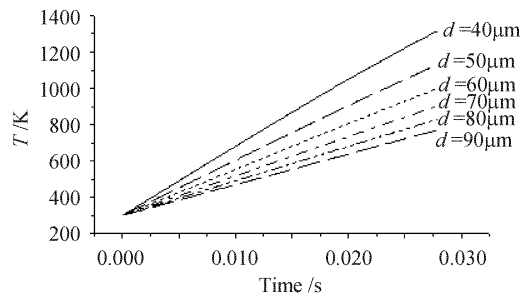


图 4 不同直径粉末颗粒的温度及其与激光相互作用的关系曲线  
Fig. 4 Relations between temperatures rise of various diameter particles and the interaction time,  $P = 1000 \text{ W}$

图 4 给出不同颗粒直径条件下,粉末温度随相互作用时间的变化曲线,可以看出,颗粒直径越小在相同作用时间内其温度升高越多。

根据(9)式计算出表 1 条件下 ( $\theta_{\text{jet}} = 60^\circ$ ,  $v_p = 1.0 \text{ m/s}$ ),粉末颗粒在激光束下运动时间约为  $0.008 \text{ s}$ ,316L 不锈钢粉末温度最大值为  $373.29 \text{ K}$ ,温升为  $73.29 \text{ K}$ ,显然不会熔化。

## 4 实验结果及分析

图 5(a)所示为尼康 F3 相机拍摄到的熔覆区侧视照片。图中,熔覆区由液态熔池、热影响区及未受热基材三个区域组成,熔池上方粉末的影像也比较清晰。由斯蒂芬-玻耳兹曼定律可知,任何温度高于绝对零度的物体,都会不断地发出红外辐射。而发射的辐射功率大小由物体的温度所决定。采用微距连续方法拍摄时,激光熔池发出的辐射亮度(或辐射功率)被彩色胶片感光,并在胶片上形成层次较分明的彩色图案。扫描彩色照片,并将该彩色图像转化为灰度图,灰度值在  $0 \sim 255$  之间变化,0 为黑,255 为白。由以上分析可知,图像中某像素点的灰度值与该处的温度值是一一对应的,灰度值越高,表示该点处温度值也越高。由于熔池温度高于金属的熔点,因此最直观的认识是某像素点的灰度值高于某个阈值,表示该点“熔化”,反之则表示该点“未熔

化”。基于这样一个认识,采用图像分割技术中的迭代阈值选取方法,对获得的灰度图进行处理,编写程序自动搜寻比较合适的阈值,并对图像进行分割。

分割后图像中的前景表示发生熔化的区域,分割后的图像如图 5(b)所示。比较图 5(a)和 5(b),在(a)图中熔池附近清晰可见的金属粉末(箭头 1 所指)在(b)图中消失在黑色背景中,表明金属粉末进入熔池前确实未发生熔化;未送进到液态熔池的金属粉末与温度较低的固态基体材料碰撞,其结果是粉末被反弹(图 5(a)中箭头 2 所指);进入熔池后发生熔化的粉末颗粒也可能受到气流的冲击从熔池中飞出,从而形成飞溅(图 5(a)及(b)中箭头 3 所指)。

从图中看出,粉末颗粒从喷嘴出口到落入熔池之前,没有发生熔化,与计算结果相符。

## 5 结 论

本文建立了侧向送粉激光熔覆粉末颗粒温升的数学模型,根据模型计算分析了粉末颗粒穿过激光束时温度升高的影响因素,并给出了文中算例条件下的温升值。结合模型采用微距摄影技术和图像分割技术对粉末到达熔池表面的状态和温度进行实验观测和分析。计算与实验分析获得了相同的结论,从而验证了模型的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):567~570  
刘振侠,黄卫东,万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):567~570
- 2 M. Picasso, C. F. Marsden, J.-D. Wanière *et al.*. A simple but realistic model for laser cladding [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1994, **25B**(4):281~291
- 3 Jehnming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8):565~570
- 4 Jehnming Lin. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(3):233~238
- 5 Yunchang Fu, A. Loredò, B. Martin *et al.*. A theoretical model for laser and powder particles interaction during laser cladding [J]. *Materials Processing Technology*, 2002, **128**(1~3):106~112
- 6 Yang Yongqiang, Song Yonglun. Interaction of a laser beam and alloy powders in powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):280~284  
杨永强,宋永伦. 送粉激光熔覆时激光与粉末的交互作用[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):280~284

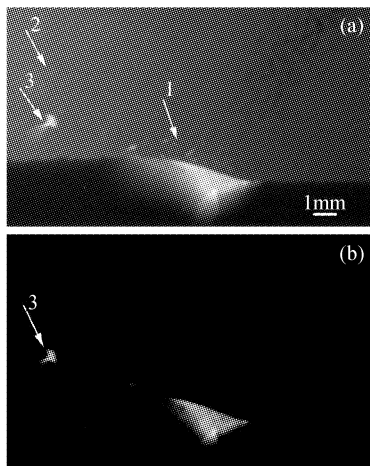


图 5 激光熔覆区侧视照片

(a) 原始图像;(b) 分割后的图像

Fig. 5 Picture of laser cladding

(a) original photograph;

(b) photograph after picture segmentation