

# 送粉激光熔覆时激光与粉末的交互作用

杨永强 宋永伦

(华南理工大学机电系 广州 510641)

**提要** 通过建立粉末在激光照射下的热传导模型,用有限差分法计算了不同合金、不同粒度的粉末在不同激光功率密度作用下的温度变化,通过实验验证得出各种粉末在不同激光功率下的临界熔化时间和相应的临界激光扫描速度。

**关键词** 激光熔覆,合金粉末,热传导

## 1 引 言

激光熔覆是近十几年来发展起来的高功率激光表面强化技术之一。激光熔覆的过程是激光束与合金粉末和基体材料相互作用的过程。激光能量被粉末和基体材料吸收而转变成热能,从而使粉末和基体表面熔化形成熔覆层。激光熔覆过程主要受热传导控制,熔覆方式有两种:1) 预置粉末,具体方法是用粘结剂粘涂和热喷涂或等离子喷涂一层粉末,然后再激光重熔;2) 同时送粉,激光照射同时送粉到激光作用区。文献[1]提出预置粉末的热传导模型,认为激光首先与粉末发生交互作用,由于粉末层有较低的热传导性,从粉层到基体熔化前的热流可以忽略不计,粉末熔化后,激光束通过熔化的粉末加热基体。这一方法中整个激光熔覆工艺可分为两个步骤:粉末熔化和基体熔化。如果熔覆层的基本元素熔点远高于基体的熔点,如钼合金熔覆于铸铁基体上,基体表面温度必须达到钼的熔点才能在基体表面形成熔化层。这种情况下,稀释是不可避免的,在界面处还易形成空洞和气孔。相反,被熔覆粉末熔点与基体接近时,如镍基合金或斯太立合金在碳钢表面则可形成较薄的熔化层,其能量积累和稀释也小。因此,预置粉末激光熔覆对于熔点接近的材料是适宜的,而熔点相差较大时,必然导致稀释的加大。送粉法可以将高熔点粉末送到熔池,可以控制基体对熔覆层的稀释度<sup>[2,3]</sup>。因此,本文主要研究送粉工艺条件下激光与粉末的交互作用。

## 2 理论分析与计算

在假定几个物理条件情况下,可以对粉末在激光束中的温度变化进行计算。由于所用激光束能量密度小于  $10^5 \text{ W/cm}^2$ ,等离子体的影响可以忽略;粒子直接吸收激光辐射能并放出辐射能;在空气中,由于对流作用,粒子也会由于热传导而失去能量。因此,提出如下物理假设:(1) 粉末粒子的密度足够低,可以忽略激光反射、折射、粒子间的相互加热和光束遮蔽等影响;(2)

粒子是半径为  $R$  的球体, 由于粉末粒子  $R$  足够小 ( $60 \mu\text{m}$  以下), 在热传导计算时可以将粒子看成一个点; (3) 热流是均匀而恒定的; (4) 粒子温度假定是均匀的, 尽管粒子有向光面和背光面, 温度肯定是有差别的, 为了计算简便假定温度是均匀的。

于是, 根据热传导理论<sup>[4]</sup>, 粒子的能量吸收为

$$E_{\text{吸收}} = \pi R^2 \eta J \quad (1)$$

其中  $\eta$  为粒子在激光波长下的吸收率,  $J$  为激光功率密度。由 Stefan-Boltzmann 定律, 得出粒子的辐射能为

$$E_{\text{辐射}} = 4\pi R^2 \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

式中  $\epsilon$  为全发射系数,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T$  为绝对温度。对于在空气中的再辐射, 根据 Newton 冷却定律, 得出

$$E_{\text{对流}} = 4\pi R^2 \times H \left[ \frac{T}{2} \right] \quad (3)$$

$H$  为周围介质在膜温度  $T/2$  处的对流换热系数。

由三维热流方程

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial T}{\partial z} \right] + A(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中  $\rho$  为粒子比重,  $K$  为热导率,  $C$  为比容,  $A(x, y, z, t)$  为单位时间、单位体积内的热能。

假定粒子为一点, 由(4)式可导出粒子的三维热流

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{3}{4\pi R^3} (E_{\text{吸收}} - E_{\text{对流}} - E_{\text{辐射}}) \quad (5)$$

对于很小的时间间隔  $\Delta t$ , 粒子的温度升高可以表示为

$$\Delta T = \frac{3\Delta t}{4\pi \rho R^3 C} (E_{\text{吸收}} - E_{\text{对流}} - E_{\text{辐射}}) \quad (6)$$

由于  $\Delta T$  既取决于时间, 也取决于温度, 可以用有限差分方法进行计算

$$T_{n+1} = T_n + \Delta T \quad (7)$$

取  $\Delta t = 0.002 \text{ s}$ ,  $T_0 = 293 \text{ K}$ , 对不同合金粉末, 在不同激光功率、不同粒度条件下与激光交互作用, 计算出粉末的温度变化。物理常数、系数等数据见表 1。

表 1 所用粉末的物理常数与系数

Table 1 Physical constants and coefficient of powders used

powders	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C / \text{kJh/kgK}$
Ni-based alloy	8314	$1.28 \times 10^{-4}$
Fe-based alloy	7689	$1.27 \times 10^{-4}$
WC-Co alloy	14300	$3.70 \times 10^{-5}$
$\eta = 0.1$ $\sigma = 5.669 \times 10^{-11} \text{ kWh/m}^2\text{K}^4$	$\epsilon = 0.54$	$H = 10^{-2} \text{ kW/m}^2\text{K}$

## 3 结 果

### 3.1 激光与粉末的相互作用

Ni 基合金粉末激光照射时的温度变化表明(图 1), 在粉末粒度和激光束直径 ( $d = 4 \text{ mm}$ ) 一定的条件下, 不同激光功率下粉末开始熔化的时间是不同的。

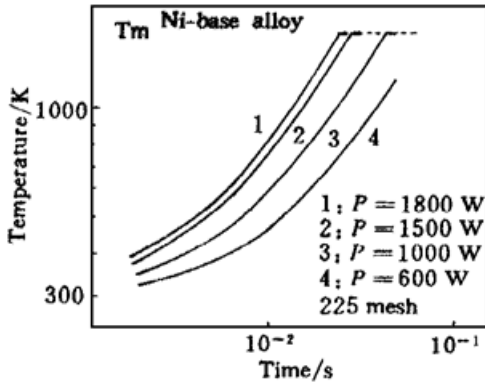


图 1 Ni 基粉末的温度-相互作用时间曲线

Fig. 1 Temperature profiles of Ni-based alloy particles irradiated by laser in variant power

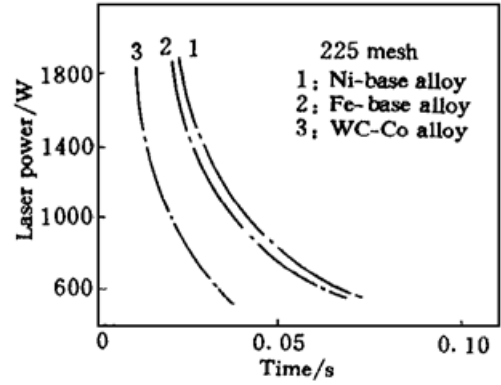


图 2 激光功率与粉末熔化时间关系曲线

Fig. 2 The relation of laser vs beginning melting time of the particles

随着激光功率的提高,粉末开始熔化的时间缩短,当功率达 1800 W 时,粒度为 225 目的粉末熔化时间为 0.023 s,而当激光功率为 1000 W 时,该粉末熔化时间为 0.040 s。图 2 为不同激光功率条件下粉末开始熔化时间与激光功率的关系曲线。

Fe 基合金粉末和 WC-Co 粉末在激光辐照下的温度变化情况分别由图 3 和图 4 给出。与 Ni 基合金相似,随激光功率的提高,粉末温度升高,开始熔化时间缩短。值得注意的是,WC-Co 合金的温升较快,开始熔化时间也较短(图 2),除了 WC 的导热性好以外,还与假定的合金开始熔化温度有关。WC-Co 合金(Co 包 WC)加热到 1400°C 时开始有液相出现,但要使 WC 全部熔化则需更长的时间和较高的激光功率。

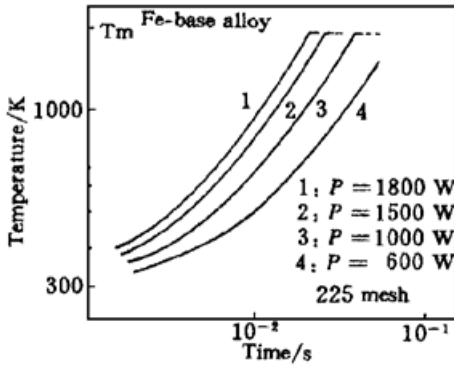


图 3 Fe 基合金温度-相互作用时间曲线

Fig. 3 Temperature profiles of Fe-based alloy particles irradiated by laser in variant power

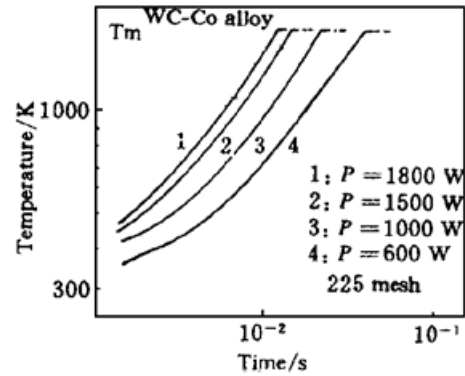


图 4 WC-Co 合金温度-相互作用曲线

Fig. 4 Temperature profiles of WC-Co alloy particles irradiated by laser in variant power

以上计算是在假定粉末对激光辐射的吸收率为一常数情况下进行的,实际上,金属对激光的吸收率随温度的升高是有变化的,接近熔点时增加很快,由室温的 10% 增加到 40~50%,在蒸发点时可达 90%。因此,在熔化前粉末的温度升高相对缓慢,开始熔化时温升急剧加快。激光熔覆时激光与粉末的作用时间不能太长,否则会造成蒸发和氧化,这就要求激光扫描速度要尽可能快。

除激光功率外,粉末的粒度对其本身的温度也有影响。图 5 为不同粒度粉末的温度-时间曲线。可见粉末越粗(如 100 目)其温升越慢;粉末越细(如 300 目)其温升越快,开始熔化时间缩短。

象所有其它热传导模型一样,以上激光与粉末的简单模型不完全精确,不仅粉末对激光吸收率是随温度变化的,全发射系数  $\epsilon$ , 比热容  $C$  也随温度变化而变化。但假定这些物理量为常

数, 简化了计算。用简化的热传导模型可以解释激光熔覆时的一些关系。

### 3.2 粉末的临界熔化时间和临界激光扫描速度

通过计算不难看出, 在不同激光功率条件下, 粉末的开始熔化时间均很短, 这就要求激光熔覆时有较高的激光扫描速度。如果扫描速度太低, 粉末熔化过多, 造成熔覆层的稀释度增大, 同时在界面处产生空洞、气孔等缺陷; 粉末氧化造成熔覆层成分变化。如果扫描速度过快, 粉末和基体熔化不够, 也不能形成好的熔覆层。对于一定粒度的合金粉末, 激光与之相互作用时间可用下式表示

$$t = 2R/V \quad (8)$$

其中  $V$  为激光扫描速度。表 2 给出粉末开始熔化时间 ( $t$ ) 和临界激光扫描速度。

表 2 粉末开始熔化时间和临界激光扫描速度计算值, 粒子尺寸: 225 目

Table 2 Beginning melting time and critical laser scanning speed by calculation, particle size: 225 mesh

powders	1800 W		1500 W		1000 W		600 W	
	$t/s$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$t/s$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$t/s$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$t/s$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Ni-based alloy	0.023	3.9	0.023	3.2	0.041	2.2	0.070	1.3
Fe-based alloy	0.021	4.2	0.025	3.6	0.038	2.4	0.066	1.4
WC-Co alloy	0.011	8.2	0.013	6.8	0.021	4.2	0.035	3.6

经实验验证, 实际激光熔覆所使用的工艺参数与计算结果十分接近, 表 3 给出了送粉量  $m = 7 \text{ g/min}$  时实际的激光工艺参数。比较表 2 和表 3 可以发现, 实际数据比计算值略低, 这一方面是由于激光能量要分散于粉末和基体, 另一方面诸多的假设条件也会造成计算值与实际值的偏差。

表 3 激光熔覆中实际采用的工艺参数

Table 3 Processing parameters used in laser cladding

powders	1800 W	1500 W	1000 W	600 W
	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Ni-based alloy	3	2.5	-	-
Fe-based alloy	3.5	2.8	-	-
WC-Co alloy	-	-	3	2

## 4 结 论

1. 建立了粉末材料在激光辐照下的热传导模型; 并用有限差分方法计算了不同合金、不同粒度粉末在不同激光功率作用下的温度变化曲线;
2. 对比粉末在激光作用下的变化曲线, 得出粉末的临界熔化时间和临界扫描速度。经实验验

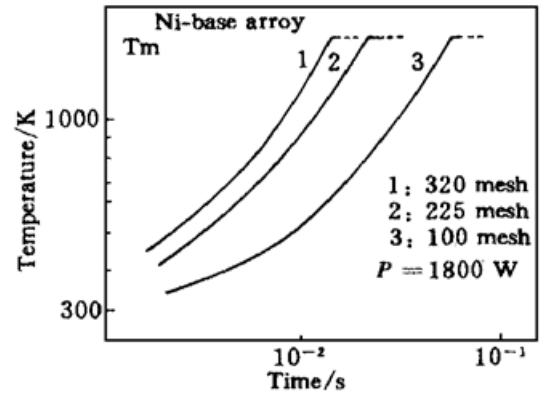


图 5 不同粒度粉末的温度-相互作用时间曲线

Fig. 5 Temperature profiles of different size Ni-based alloy powders irradiated by laser

证, 计算结果与实际激光熔覆采用的工艺参数十分接近。

### 参 考 文 献

- 1 L. J. Li, Mazumder. A study of the mechanism of laser cladding process. *Laser Processing of Materials*, 1985, 35~ 50
- 2 Yang Yongqiang, Yan Yuhe. Research on the procedure and porosity of laser cladding WC-Co by powder-feed. *Transactions of Metal Heat Treatment* (金属热处理学报), 1992, **13**(2) : 33~ 37 (in Chinese)
- 3 Yang Yongqiang, Tian Nailiang. Laser cladding of high temperature alloys and their application. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(8) : 632~ 636 (in Chinese)
- 4 Yu Changming edited. *Heat Conduction and Numerical Value Analysis*. Beijing : Tsinghua University Press, 1981 (in Chinese)

## Interaction of a Laser Beam and Alloy Powders in Powder-feed Laser Cladding

Yang Yongqiang Song Yonglun

(*South China University of Technology, Guangzhou 510641*)

**Abstract** After the establishment of a heat transfer model of alloy powders irradiated by a laser beam, the temperature histories of different alloys, particle sizes and substrate materials under different laser power levels have been calculated by a finite difference method. Also, the beginning time of melting and the relative critical scanning speed of the alloy powders under different laser power levels are obtained by calculation and verified experimentally.

**Key words** laser cladding, alloy powders, heat transfer model