

# 送粉式激光熔覆获得最佳熔覆层的 必要条件及其影响因素

刘喜明

(吉林工学院材料工程系 长春 130012)

关振中

(中国科学院长春光机所 长春 130012)

**提要** 在分析自动送粉式激光熔覆过程中熔覆材料颗粒加入方式及其在激光束中的行为的基础上,建立热平衡方程,推导出反映熔覆过程实际情况的参数:熔覆材料颗粒尺寸、在激光束中运动距离、加热温度、激光功率密度之间的相互关系式等。指出在自动送粉式激光熔覆中能够获得最佳熔覆层的必要条件是:熔覆材料颗粒进入激光束后直到其落到基体材料表面之前,必须始终在激光束中。激光束沿着扫描方向必须有足够的宽度是满足上述条件的关键,同时提出其计算方法及公式,并阐明获得最佳熔覆层的工艺参数之间的匹配原则。

**关键词** 自动送粉,激光熔覆,最佳熔覆层

## 1 引 言

送粉式激光熔覆在很多方面需要研究和探索,尤其是理论上的研究尚很少,很多问题不清楚,如目前还不能精确获得所需要的熔覆层的成份、形状、厚度、稀释率等;各工艺参数之间的相互联系、制约关系等方面尚未建立起较准确实用的定量依据,而这些方面的研究对按需获得激光熔覆层而言是极其重要的<sup>[1-7]</sup>。为了解决这些问题,我们进行了大量的试验研究,在以前曾经提出并讨论了关于送粉式激光熔覆的熔覆层厚度、激光热有效利用率、稀释率(真实稀释率、名义稀释率)、送粉率(有效送粉率、实际送粉率)及其与激光熔覆工艺参数:激光功率、光斑直径、扫描速度之间的关系,并对所提出的有关参数进行实验检测(包括提出对激光热有效利用率、真实稀释率、透光率等的检测方法)的基础上,进行了进一步的试验研究,取得了比较满意的结果。在研究熔覆层成型过程中发现:熔覆层的成型性、组织、性能、基体与熔覆材料的界面形态受熔覆材料成份、颗粒度、颗粒在激光束中的停留时间、颗粒在激光束中的运动方式、激光束的能量密度、扫描速度等因素的影响很大,关于对组织、性能的影响以后将另有报道,本文仅对这些因素对熔覆层的成型性进行分析研究。

## 2 熔覆材料颗粒在激光束中的行为

熔覆材料颗粒进入激光束的方式有两种:一体式自送粉激光熔覆和两体式自送粉激光熔覆,由于送粉方式的差别使其在激光束中的运动情况不同。对一体式送粉激光熔覆而言,熔覆

材料粉颗粒从喷嘴喷出进入激光束, 颗粒流出方向与激光走向有较小的夹角, 因此, 颗粒在激光束中的运动可以认为是斜下抛运动, 或近似看作是竖直下抛运动。对两体式自动送粉激光熔覆而言, 熔覆材料粉颗粒从喷嘴喷出进入激光束, 颗粒流出方向与激光走向有较大的夹角, 因此, 颗粒在激光束中的运动可以认为是平抛运动。

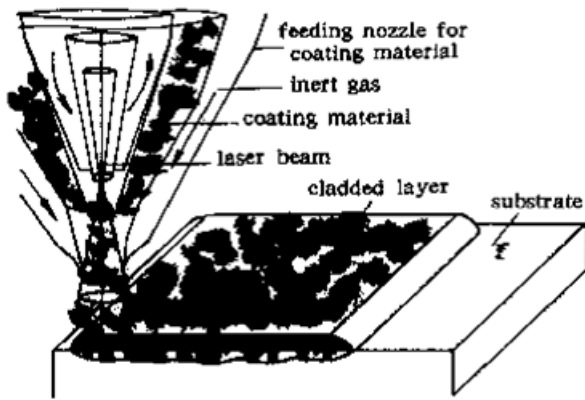


图1 一体式自送粉激光熔覆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the integrated type automatic feeding laser cladding device

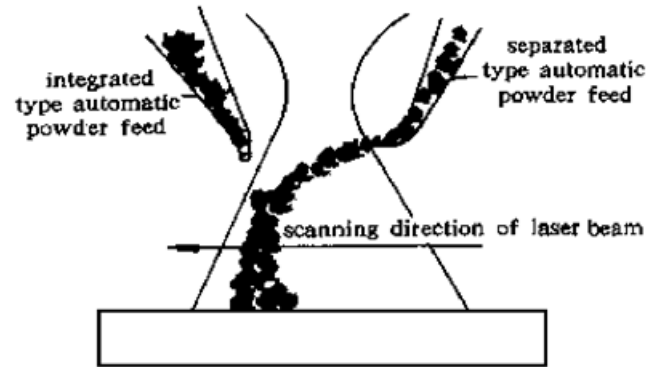


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device

### 3 熔覆材料颗粒加热过程的热平衡计算

激光加热的最显著特点是能量密度极大、加热速度极快。因此, 熔覆材料颗粒在激光束中的热交换可以认为是绝热过程, 即认为颗粒在撞击基体表面之前只是吸收激光热, 而不会将热量传递给其他颗粒, 颗粒向外辐射及传导热量只是在其与基体相接以后才能进行。为说明问题方便, 首先对有关的一些参数及单位进行设定:

激光功率  $P$ : kW; 功率密度  $P_m$ : kW/cm<sup>2</sup>; 激光束直径  $d$ : mm; 扫描速度  $V_g$ : mm/s; 熔覆材料颗粒对激光的吸收率  $\epsilon$ ; 熔覆材料颗粒半径  $r$ : mm; 熔覆材料密度  $\rho$ : g/mm<sup>3</sup>; 熔覆材料比热  $C(t)$ : J/g · °C; 熔覆材料颗粒在激光束中的运动速度  $V_k$ : mm/s; 熔化潜热  $\Delta H_r$ : J/g; 送粉率  $V_f$ : g/s; 熔覆材料颗粒在激光束中的运动距离  $L$ : mm; 重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ; 激光束沿运动方向的宽度  $B$ : mm; 熔覆材料颗粒在激光束中停留时间  $t$ : s。

#### 3.1 熔覆材料颗粒在激光束中的停留时间

熔覆材料颗粒在激光束中的停留时间决定了颗粒的加热温度, 根据熔覆材料颗粒进入激光束的方式不同停留时间有所差异。在不考虑风压、光压的情况下:

两体式自动送粉时根据物体平抛运动推得

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \quad (1)$$

一体式自动送粉时根据物体斜下抛运动推得

$$t = \frac{1}{g} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} \cdot [\sqrt{\cos\theta + 1} - 1] \quad (2)$$

式中  $\theta$  为熔覆材料颗粒流向与激光束轴向之间的夹角。

#### 3.2 熔覆材料颗粒在激光束中的热平衡计算

根据前面设定条件, 以进入激光束的任意半径为  $r$  颗粒为例进行热平衡计算。

##### 3.2.1 激光放热

在不考虑风压、光压的情况下,两体式自动送粉时

$$\Delta H_f = P_m \cdot \pi \cdot r^2 \cdot t = P_m \cdot \pi \cdot r^2 \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \right] \quad (3)$$

一体式自动送粉时

$$\Delta H_f = P_m \cdot \pi \cdot r^2 \cdot t = P_m \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{1}{g} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} (\sqrt{\cos\theta + 1} - 1) \quad (4)$$

### 3.2.2 熔覆材料颗粒在激光束中吸热

$$\Delta H_x = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot [C(t) \cdot T + \Delta H_r] \quad (5)$$

将式(3), (5)在考虑熔覆材料对激光吸收率的基础上建立热平衡方程

当  $\epsilon \cdot \Delta H_f = \Delta H_x$  时,有

$$\epsilon \cdot P_m \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \right] = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot [C(t) \cdot T + \Delta H_r] \quad (6)$$

从上式中解得

$$r = \frac{3}{4} \cdot \frac{\epsilon \cdot P_m}{\rho \cdot [C(t) \cdot T + \Delta H_r]} \cdot \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \right] \quad (7)$$

同样将式(4), (5)在考虑熔覆材料对激光吸收率的基础上建立热平衡方程解得

$$r = \frac{3}{4} \cdot \frac{\epsilon \cdot P_m}{\rho \cdot [C(t) \cdot T + \Delta H_r]} \cdot (\sqrt{1 + \cos\theta} - 1) \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot L}}{g} \quad (8)$$

### 3.3 式(7), (8)的实际意义

式(7), (8)反应了熔覆材料颗粒尺寸、物理性能、进入激光束的方式、在激光束中行走的距离、激光功率密度、熔覆材料加热温度之间的相互关系。当激光功率密度、熔覆材料化学成份、加入方式、在激光中行走距离设定以后,关系式反应了熔覆材料颗粒尺寸与被加热温度之间的匹配关系,即随着颗粒尺寸的增大被加热的温度降低,这个关系式对实际生产中控制激光熔覆过程是十分重要的。一般地,在满足能实现熔覆冶金过程的前提下,应尽可能使熔覆材料加热到较低的温度,这样可以减小熔覆开裂、变形倾向,减轻熔覆材料的蒸发及烧损。根据冶金学原理,为保证熔化的熔覆材料具有良好的润湿性、流动性,获得最佳的冶金状态,需控制熔化材料在熔点  $T_m + (30 \sim 50)^\circ\text{C}$ 。对激光熔覆而言,由于其加热冷却速度极快,为减少熔覆冶金缺陷,可将温度提高到  $T_m + (50 \sim 80)^\circ\text{C}$  或更高些。显然,在这种情况下,要求熔覆材料尺寸必须在一定的范围内才行,太大会出现熔化不均、不足;太小会出现蒸发、烧损严重现象。

### 3.4 实现上述关系式控制的必要条件

关系式是建立在熔覆过程中,熔覆材料颗粒落到基体表面之前始终在激光束中被加热的条件基础之上的。为满足这个条件,激光束沿着扫描方向必须有足够的宽度。根据送粉器喷嘴与激光束的相对位置关系可以有以下几种情况:

(1) 一体式自动送粉: 由于熔覆材料粉的流向与激光束成较小角度,呈斜下抛运动,熔覆材料粉到达基体表面需时间很短,送粉器喷嘴如能保证进入激光束的熔覆材料粉在激光束的前半部(如图1所示),喷嘴口设在扫描方向上激光束的前侧,且喷嘴口大小不超过该位置的激光束直径。这样如果照射到基体表面的光斑直径满足如下关系式,将会获得良好的熔覆效果。

一体式自动送粉光斑直径为

$$d = V_g \cdot t = V_g \cdot \frac{1}{g} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} \cdot (\sqrt{\cos\theta + 1} - 1) \quad (9)$$

(2) 两体式自动送粉: 熔覆材料喷嘴既可以布置在激光束前也可以布置在激光束后, 对布置在激光束后的装置如图 2 所示, 喷嘴的大小不超过该处的激光束直径, 在这种情况下, 照射到基体表面的光斑直径满足如下关系式

$$d = 2 \cdot (V_g - V_0) \cdot t = 2 \cdot (V_g - V_0) \cdot \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \right] \quad (10)$$

对布置在激光束前的喷嘴装置, 喷嘴口大小不超过该位置处激光束直径的大小, 在这种情况下, 照射到基体表面的光斑直径满足如下关系式

$$d = 2 \cdot (V_g + V_0) \cdot t = 2 \cdot (V_g + V_0) \cdot \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{g}} - \sqrt{\frac{2 \cdot (L - h)}{g}} \right] \quad (11)$$

式(10), (11) 中的  $V_0$  是熔覆材料粉从喷嘴喷出的水平初速度。上述三个关系式也是在不同条件下实现获得良好熔覆层的必要条件之一。

(9)~(11) 式的推导, 是针对矩形截面激光束进行的。对矩形截面激光束而言, 将式(9)~(11) 中的激光斑直径用激光沿着扫描速度方向的宽度  $B$  来代换, 关系式仍然成立。

## 4 影响自动送粉式激光熔覆熔覆层形态的因素

影响自动送粉式激光熔覆熔覆层形态的因素较多, 相互制约关系也很复杂。如送粉率、扫描速度、熔覆材料颗粒尺寸、基体材料表面状态、预热温度、激光功率密度等。为说明问题方便, 首先设定能够反映熔覆层外观(宏观)形态的参数: 如图 3 中的熔覆层宽度  $D$ , 熔覆层厚度  $S_f$ , 熔覆层外表面与基体表面之间的夹角  $\varphi$ 。

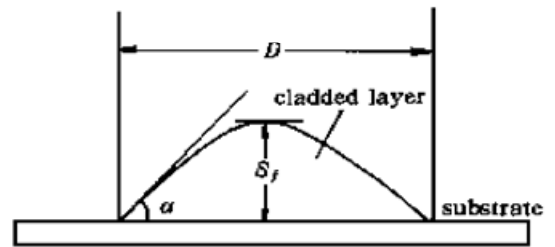


图 3 激光熔覆层参数示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the parameters in the laser cladding layer

### 4.1 工艺参数对熔覆层宏观形态的影响及实验结果

为了搞清工艺参数对熔覆层形态的影响, 在激光功率为 3.1 kW, 光斑直径为 8 mm, 基体材料为宽 60 mm, 厚 7.8 mm 的 Q235 钢带板, 熔覆材料为颗粒尺寸  $r = 0.08$  mm 的 Ni60A 自熔合金等条件下, 调整其他工艺参数进行单道激光熔覆实验。在本次实验中调整了扫描速度和送粉速率。实验结果见表 1, 表 1 记录了实验参数及该条件下获得的熔覆层的外观形态参数。表中各符号所代表的含义:

(1) 有效送粉速率  $V_f'$ ; 起始端熔覆层宽度  $D_1$ , 厚度  $S_{f1}$ , 接触角  $\varphi$ ; 终止端熔覆层宽度  $D_2$ , 厚度  $S_{f2}$ , 接触角  $\varphi$ ;

(2) 图 3 装置中有关参数的确定依据: 激光束直径  $d = 7.5 \sim 8$  mm 时, 在(实测)  $L = 40$  mm,  $M = 25$  mm,  $T = T_m + 80^\circ\text{C} = 1100^\circ\text{C}$ ,  $P_m = 61.71 \sim 70.2$  W/mm<sup>2</sup>,  $\Delta H_r = 0.284$  J/mg,  $\rho = 8.522$  mg/mm<sup>3</sup>,  $C(t) = 0.46 \times 10^{-3}$  J/mg  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ , 将上述数值代入(7) 式计算得出:  $h = 8.95 \sim 10.6$  mm, 因此确定  $h = 10$  mm。

(3) 满足实现熔覆必要条件的激光束直径验证: 将上述相关数据代入(11) 式。其中

$$V_0 = \frac{M}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} = \frac{25}{2 \times 40} \times \sqrt{2 \times 40 \times 9800} = 276.69 \text{ mm/s}$$

$V_g = 2.08 \sim 14.29$  mm/s; 解得  $d = 6.74 \sim 7.04$  mm; 因此设定的  $d = 7.5 \sim 8$  mm 满足实现熔覆的必要条件。

表 1 激光熔覆工艺参数及熔覆层宏观形态参数

Table 1 Parameters of the laser cladding process and macro morphological parameters of the coated layer

No.	$V_g$ /mm/s	$V_f$ /mg/s	$V_f'$ /mg/s	$D_1$	$D_2$	$S_{f1}$	$S_{f2}$	$\varphi_1$	$\varphi_2$
1	2.08	0.00		6.54	8.40				
2		350	114	6.22	8.44	1.00	0.86	17	15
3		375	147	6.56	8.14	1.34	0.94	38	35
4		425	217	6.02	8.24	2.30	1.10	47	42
5		475	460	6.00	9.92	3.58	2.64	86	85
6	3.85	0.00		6.20	7.56				
7		350	151	5.70	6.92	0.70	0.80	12	12
8		375	161	5.74	6.10	0.80	0.90	27	24
9		425	329	5.70	6.34	2.00	1.44	38	32
10		475	459	5.50	7.04	2.30	2.30	76	63
11	8.33	0.00		5.00	6.14				
12		350	270	6.80	7.00	0.64	0.44	7	7
13		375	289	5.00	5.50	0.60	0.50	21	19
14		425	403	5.00	5.46	1.34	1.02	30	26
15		475	458	4.22	4.48	1.56	1.37	56	30
16	14.29	0.00		4.40	4.40				
17		350	151	4.40	4.66	0.34	0.24	0	0
18		375	206	4.68	4.52	0.54	0.22	8	8
19		425	223	3.32	3.54	0.64	0.46	18	17
20		475	321	3.54	4.00	0.80	0.64	22	21

从计算中可以看出,影响激光束在扫描方向宽度的因素主要是熔覆材料粉喷出时的水平初速度  $V_0$ ,而扫描速度的影响相对而言是很小的。对一体式自动送粉激光熔覆而言,  $V_0 = 0$  mm/s,此时决定激光束在扫描方向宽度的因素主要是扫描速度  $V_g$ 。因而,所需要的激光束宽度很窄。这样在相同激光功率的情况下,能量密度可提高十到几十倍。显然,控制熔覆材料的加入方式,对实现宽带激光熔覆是很有意义的。目前,国内宽带激光熔覆较难控制,不易获得完好熔覆层的主要原因是:(1) 采用了两体式送粉方式,激光能量密度显得不足;(2) 沿扫描方向激光束的宽度不足。

## 4.2 实验结果的分析讨论

### 4.2.1 送粉速率对熔覆层形态的影响

在其他条件相同的情况下,随着实际送粉率的增大,熔覆层宽度减小、厚度增加、接触角增大、表面粗糙度增大。实验表明,这些现象均随扫描速度的降低而趋于严重。

### 4.2.2 扫描速度对熔覆层形态的影响

在其他条件不变的情况下,随着扫描速度的增加,熔覆层的厚度减薄,熔覆宽度减小。此现象受实际送粉速率的影响很大,当送粉速率较高时,会形成较窄的、接触角较大且有相当厚度的熔覆层,此时,熔覆层的开裂倾向较大。在实际送粉率较低且激光束的能量密度足够大时,提高扫描速度可以提高熔覆层的平整度。

### 4.2.3 预热对熔覆层形态的影响

在实验结果中发现,在 50 mm 长的单道熔覆层上,无论在何种工艺条件下获得的熔覆层,

其宽度、厚度、接触角都随形成的先后顺序而变化, 即在同一熔覆层上起始处的宽度较窄、厚度较厚、接触角较大; 而终止处的宽度较宽、厚度较薄、接触角较小。以上结果是由在起始点和终止点附近 10 mm 范围内测量的平均值获得的, 见表 1。这个现象随扫描速度的降低和实际送粉速率的增大而更为显著。当扫描速度大到一定程度后(本实验是  $V_g = 14.29 \text{ mm/s}$ ), 此现象变得不明显了。造成此现象的原因是先熔覆部分对后续熔覆部分的热作用的结果。在扫描速度较低时, 热量传递充分, 热影响较大; 当速度较大时, 这种热影响减小; 速度大到一定程度, 热量来不及传递, 影响便不明显。由此可以推论: 熔覆前对基体材料进行预热, 可以在其他条件相同的情况下, 改善熔覆层的形态, 减小开裂、变形倾向, 有利于获得满意的熔覆层。

#### 4.2.4 实际送粉速率与有效送粉速率分析

实际送粉速率: 是单位时间内喷出的熔覆材料量; 而有效送粉速率是指熔覆过程中进入并最后形成熔覆层的熔覆材料量。实验表明有效送粉速率随着熔覆参数的变化有很大的差异, 实验结果见图 4。从图 4 中可以看出: 在相同的实际送粉速率下, 有效送粉速率随扫描速度的变化曲线在某扫描速度下出现极大值(本实验极大值均出现在扫描速度为  $8.33 \text{ mm/s}$  的情况下)。这个现象随实际送粉速率的变化有很大差异。当扫描速度低于  $8.33 \text{ mm/s}$  时, 随着实际送粉速率的增大, 有效送粉速率增大; 当实际送粉速率为  $475 \text{ mg/s}$  时, 在实验的扫描速度范围内, 有效送粉速率基本保持不变而为  $460 \text{ mg/s}$  左右。在实际送粉速率较低的情况下, 当扫描速度低于  $8.33 \text{ mm/s}$  时, 随着扫描速度降低, 有效送粉速率减小, 这个现象可能与熔覆材料的烧损有关, 即在相同的扫描速度下, 实际送粉速率越低, 熔覆材料被加热的温度越高, 烧损越严重; 而实际送粉速率增加会导致加热程度的降低, 减少烧损。在扫描速度高于  $8.33 \text{ mm/s}$  时, 无论采用哪种实际送粉速率, 都表现出有效送粉速率随扫描速度的增加而降低, 这可能是由于扫描速度的增加使得熔覆材料飞散落于激光束外的比例增大的缘故。

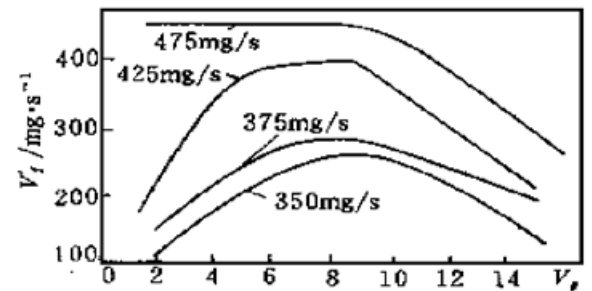


图 4 实际送粉速率、有效送粉速率、扫描速度关系曲线

Fig. 4 Relationship between actual powder feeding rate, effective powder feeding rate and scanning speed

### 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Zheng Tianxi, Zhang Naikun *et al.*. Convection and mass transfer in laser cladding on Fe-CrSiB alloy. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 1992, **28**(2): B84 (in Chinese)
- 2 Zou Hongcheng, Dai Shujuan, Luo Xin *et al.*. The thermal deformation study and thermodynamics analysis under laser cladding. *Applied Laser* (应用激光), 1995, **15**(2): 56~ 61 (in Chinese)
- 3 Song Wulin, Zhu Beidi, Zeng Xiaoyan. The effect of Ni Content on physical properties and cracking susceptibility of laser cladding Fe-Cr-Ni coatings. *Transactions of Heat Treatment* (金属热处理学报), 1996, **17**(1): 62 (in Chinese)
- 4 Tang Bin, Guo Yuanqiang, Yu Shaolo. Study on temperature field induced by YAG laser rapid solidification treatment of intermetallics  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . *Transactions of Heat Treatment* (金属热处理学报), 1996, **17**(1): 38 (in Chinese)
- 5 Chen Xin, Tao Zengyi. Maximum thickness of laser cladding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1990, **17**(3): 185~ 189 (in Chinese)
- 6 Xiaoyan Zeng, Beidi Zhu, Zengyi Tao. Analysis of energy conditions for laser cladding ceramic-metal composite coatings. *Elsevier Surface and Coatings Technology*, 1996, **79**: 162



- 7 Zeng Xiaoyan, Zhu Peidi, Tao Zengyi *et al.*. Investigation of auto-feeding powder apparatus and technology for laser cladding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(3): 210~ 214 (in Chinese)

## Conditions and Factors for Obtaining Optimum Coatings in the Laser Coating Process by a Powder Feeding Method

Liu Ximing

(*Jilin Institute of Technology, Changchun 130012*)

Guan Zhenzhong

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012*)

**Abstract** On the basis of an analysis on the feeding pattern of the coating material and its behavior in the laser beam during the process of laser coating with automatic powder feeding, a heat equilibrium equation was established and expressions relating the parameters in the process were obtained. The parameters include the grain size of the coating material, its distance of motion in the beam, heating temperature and power density. It is pointed out that the necessary condition for obtaining optimum coating in the process with automatic powder feeding is that from the instant of the powder grains entering the laser beam to the instant that the grains reach the substrate surface, the powder grains must be persistently within the laser beam to fulfill the above condition. The laser beam must have enough width along the scanning direction, and this width can be calculated by the expression suggested in this paper. Finally, the principle for matching the process parameters to obtain an optimum coating is presented.

**Key words** automatic powder feeding, laser coating, optimum coating