

同轴送粉激光熔覆中粉末流对光束能量的衰减作用

靳绍巍 何秀丽 武扬 宁伟健 虞钢*

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 为了得到同轴送粉激光熔覆中激光束穿过粉末流后的能量变化, 研究了粉末浓度分布对激光能量的衰减作用。模拟了稳态、存在基底和熔池的情况下粉末流的空间分布, 通过粉末浓度与激光能量衰减的关系, 得到了任意粉末分布及激光能量分布下的衰减率。研究了基底对气流场的作用以及基底对粉末的反弹作用两种因素对粉末浓度分布的影响, 并比较了平顶形光束在不同熔池尺寸和送粉率下的衰减率。结果表明, 存在基底时粉末流对激光的衰减率比无基底作用时一般高 2 倍以上, 与送粉率成正比, 在熔池尺寸较小时与其大小成反比。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 粉末浓度; 能量衰减

中图分类号 TG665; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0903005

Laser Power Attenuation by Powder Flow in Coaxial Laser Cladding

Jin Shaowei He Xiuli Wu Yang Ning Weijian Yu Gang

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The laser power attenuation by powder flow in coaxial laser cladding is investigated numerically and experimentally. A steady model of powder concentration distribution is developed, considering the effect of substrate on gas flow and rebound of powder particles. The relationship between powder concentration and attenuation of laser power is analyzed. The effects of melt pool size and powder flow rate on a top hat laser beam attenuation are investigated. Results indicate that power attenuation by powder flow with the effect of substrate can be twice more than that without substrate. The attenuation is proportional to the powder flow rate and decreases with the increase of melt pool size when the pool size is small.

Key words laser technique; laser cladding; powder concentration; power attenuation

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

激光熔覆技术是现有的重要表面改性技术之一, 因其在材料性能、经济效益、环境效益等方面的优秀表现而日益受到重视。同轴送粉激光熔覆是激光熔覆技术的重要组成部分, 具有稀释率低、合金混合性能好等优点^[1]。在常见的载气式同轴送粉激光熔覆中, 金属粉末由气体输运, 并由外侧气流约束粉末流形状, 使其投入到由激光照射基底表面而产生的熔池当中, 粉未经快速的熔化及冷却后与基底冶

金结合, 形成熔覆层。

这种同心圆或轴对称形式的喷嘴出口可以摆脱对加工方向的依赖, 但由于其结构所限, 很难获得理想的聚焦粉末, 所以熔覆效率较侧向送粉差^[2]。而且在粉末到达熔池之前一定距离内存在粉末流、气流和激光束之间的相互作用^[3~8], 对于激光熔覆效率及熔覆质量有重要影响, 其中粉末对激光的衰减率(或激光的透射率)是既重要但又难以获得的参数之一^[9]。现有的数值或解析模型均没有考虑存在基

收稿日期: 2011-03-28; 收到修改稿日期: 2011-04-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832011)和面上项目(10972222)资助课题。

作者简介: 靳绍巍(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆工艺力学与数值模拟方面的研究。

E-mail: jsw10000@163.com

导师简介: 何秀丽(1973—), 女, 副研究员, 主要从事激光先进制造传输现象及工艺力学等方面的研究。

E-mail: xlhe@imech.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: gyu@imech.ac.cn

底以及粉末受基底反弹后的浓度分布情况,而是通过调整吸收率等参数模拟实际加工状况,这不利于对整个过程的正确认识。鉴于此,本文建立了同轴送粉激光熔覆中粉末浓度分布的三维(3D)模型,模拟了稳态下存在基底及熔池时的粉末浓度分布,并通过粉末浓度与激光能量衰减率的关系,考察了不同熔池尺寸及送粉率条件下粉末浓度分布对激光衰减率的影响。

2 同轴送粉模型的建立

2.1 物理模型

激光同轴送粉熔覆过程中,激光器发出的光经过光纤传送至送粉头,经准直、扩束、聚焦等一系列过程从送粉头中间内环的空腔射出,送粉器输送要熔覆的金属粉末从送粉头的中环喷出,同时在送粉头外环喷出惰性气体,兼有防止氧化和约束粉末流形状的作用。其基本原理如图1所示。影响最终熔覆质量的因素很多,为了建立适合本文研究对象的数学模型,采取如下假设:

- 1) 送粉通路足够长,载粉气和粉末在进入送粉头入口时速度相同,且方向垂直于入口平面。
- 2) 忽略粉末之间的遮挡,即认为激光照射空间内所有的粉末均被照射,下层粉末不会处于上层粉末的阴影遮挡之下。
- 3) 只考虑粉末的重力、浮力以及拽力,忽略粉末颗粒间的碰撞、压力、粘性等作用,忽略其他受力。
- 4) 认为粉末颗粒为球形,且激光束穿过粉末流时,不发生散射、衍射等作用。当粉末颗粒直径在80 μm左右时,Nd:YAG激光(波长1.06 μm)照射到球形颗粒时散射角小于3°,衍射作用可以忽略^[10]。
- 5) 不考虑激光能量对气、粉的作用。
- 6) 不考虑激光束与基底的相对运动,认为熔池上表面在基底的投影是圆形,忽略熔覆道及熔池高

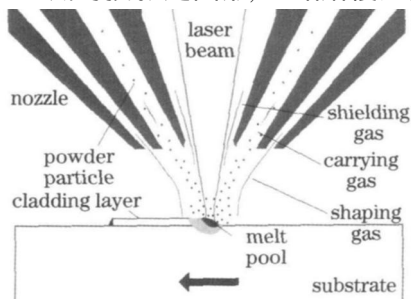


图1 同轴送粉激光熔覆示意

Fig.1 Schematic of coaxial laser cladding

度对基底表面形状的影响。

经以上假设后,在垂直于激光传播方向的任一平面内,在任意位置处粉末对于激光能量的衰减(遮挡)系数可以表达为粉末云的横截面积与光束照射面积之比,即

$$A(x, y, z) = \frac{dS_P}{dS_L}, \quad (1)$$

式中 dS_L 表示激光照射面积微元, dS_P 表示在 dS_L 内的粉末云的截面积,可表示为

$$dS_P = dn_P \pi \left(\frac{\bar{d}_P}{2} \right)^2, \quad (2)$$

式中 \bar{d}_P 为粉末颗粒的平均直径, dn_P 为在纵向 dz 长度内 dS_L 截面内的粉末颗粒个数,可表示为

$$dn_P(z) = \frac{c(x, y, z) dx dy dz}{\rho_P \times \frac{4}{3} \pi (\bar{d}_P/2)^3}, \quad (3)$$

式中 ρ_P 为粉末颗粒密度, $c(x, y, z)$ 为粉末浓度。

在直角坐标系中,有

$$dS_L = dx dy. \quad (4)$$

由(1)~(4)式可得

$$A = \frac{3c}{2\rho_P \bar{d}_P} dz. \quad (5)$$

则总衰减率 β 可表示为

$$\beta = \frac{\iiint I(x, y, z) dx dy dz}{\int P_0 dz}, \quad (6)$$

式中 $I(x, y, z)$ 为激光束的能量密度, Ω 为激光束的传播空间, P_0 为激光束的初始功率。

2.2 数值模型

2.2.1 计算区域选取

金属粉末经送入口进入送粉头后,在中环通道内经多次反射后从中环喷口喷出,最终落入熔池或被基底反弹而飞走。为了完整地考察这一过程,所建数值模型计算区域包含整个送粉头内部以及送粉头出口至基底的空间。根据送粉头尺寸建立了流场模拟计算区域如图2所示,以送粉头出口中心为原点,各坐标取向如图。由于其对称性,取实际部分的1/2计算即可。另外,在气流速度不大(远低于当地音速)时,内环空腔内的锥形壁面对内部气流的影响很小^[11],故内环只取出口附近的一小段圆柱形壁面计算。

在模型中,按照激光束传播的形状划分了部分体积用于后处理,其形状可按双曲方程描述为

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2}, \quad (7)$$

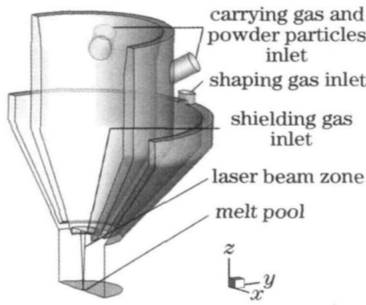


图2 3D计算区域示意

Fig. 2 Schematic of 3D computation domain

式中 w_0 为光束的束腰半径, w 为光束半宽, z_R 为光束的瑞利长度, z_0 为光束焦点位置。

2.2.2 连续介质模型

对于连续介质, 可由质量和动量守恒方程来描述。质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (8)$$

式中 ρ 为气体密度, 向量 x_i 和 u_i 分别代表位置和速度。惯性坐标系中的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + S_i, \quad (9)$$

式中 P 为静压, g_i 为重力矢量, S_i 为源项, τ_{ij} 为应力张量,

$$\tau_{ij} = \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (10)$$

式中 μ 为动力粘度; δ_{ij} 为狄拉克算子, 当 $i = j$ 时 $\delta_{ij} = 1$, 当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij} = 0$; μ_t 为湍流粘度, 可定义为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (11)$$

式中 C_μ 为经验常量, 对于空气取 0.09; k 为湍流脉动动能, ε 为湍流脉动动能的耗散率, 均由湍流模型中的标准 $k-\varepsilon$ 模型定义。

2.2.3 固态相模型

对于固态颗粒项, 因其体积分数小于总体积的 10%, 可以使用基于欧拉-拉格朗日模拟方法的离散相模型描述。离散相颗粒轨迹的拉式坐标系下的受力平衡微分方程为

$$\frac{d u_{p_i}}{d t} = F_D(\mathbf{u} - u_{p_i}) + \frac{\mathbf{g}_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (12)$$

式中 u_{p_i} 为颗粒速度, ρ_p 为颗粒密度, F_i 为附加力, $F_D(\mathbf{u} - u_{p_i})$ 为颗粒的单位质量拽力, 可表示为^[12]

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (13)$$

式中 d_p 为颗粒直径, Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺

数), 其定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (14)$$

拽力系数 C_D 采用的表达式为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}. \quad (15)$$

对于球形颗粒, 在一定的雷诺数范围内, (15) 式中的 a_1, a_2, a_3 为常数。

采用随机游走模型来计算由于流体湍流引起的颗粒扩散。考虑颗粒与流体的离散涡之间的相互作用, 对湍流标准 $k-\varepsilon$ 模型, 流涡团中流体脉动速度 u', v', w' (假定其满足高斯概率密度分布) 采样, 有

$$\sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\overline{v'^2}} = \sqrt{\overline{w'^2}} = \sqrt{2k/3}, \quad (16)$$

式中带根号的量为当地速度脉动的雷诺应力。此时, 流场中每一处的湍流动能都是已知量。涡团的特征生存时间可定义为常量

$$\tau_c = 2C_L k / \varepsilon, \quad (17)$$

对于标准 $k-\varepsilon$ 模型, 由实验得经验值 $C_L \approx 0.15$ 。

3 计算结果与验证

3.1 计算主要参数

计算的主要参数如表 1 所示, 其中粉末为镍基碳化钨粉末, 内环保护气和外环束粉气流均为空气, 载粉气为氧气。

表 1 主要计算参数

$\rho_p /$ (kg / m^3)	Powder size / μm	Shielding & shaping gas flow / (L/min)	Carrying gas flow / (L/min)	Powder flow / (g/min)
11257	40~120	10	5	4

对于粉末粒径的分布的表达, 由 Rosin-Rammler 分布拟合, 表达式为

$$Y_d = \exp[-(d_p/d_m)^n], \quad (18)$$

式中 Y_d 为粉末样本中大于直径 d_p 的颗粒的浓度, d_m 为中位径, n 为分布指数, 本研究取 $d_m = 101 \mu\text{m}, n = 5.47$ 。

3.2 衰减率计算结果及分析

3.2.1 基底及其反弹作用的影响

在实际加工过程中, 为了达到最大熔覆效率, 基底位置一般在粉末焦点处, 在本例中为送粉头下方 10 mm 处。图 3 为无基底存在和有基底存在时过入粉口中心纵截面的粉末浓度分布结果。两种情况下光束传播空间内粉末浓度分布趋势大体相同, 都是由上到下依次增加, 并在焦点处达到最高, 且在送

粉头下方横截面内的粉末浓度均可划分为3种类型的区域,由上到下依次为环状浓度分布区、过渡区、高斯型浓度分布区^[13],但两者在每一部分区域内的浓度数值有所差别,且越靠近焦点的位置相差越大,在焦点位置附近时相差可达2倍以上。还可以看出,两者在环状浓度分布区内浓度变化均不大,浓度在从环状区过渡到过渡区时迅速增加,说明由中环送粉口喷出的粉末在此处开始汇聚。

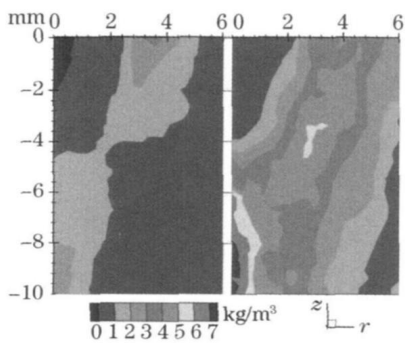


图3 无/有基底时入粉口中心纵截面粉末浓度分布
Fig. 3 Powder concentration distribution along the longitudinal cross-section without and with substrate

定义粉末浓度大于最大值的 $1 - 1/e \approx 63\%$ 质量分数时的浓度区域为粉末的高浓度区域。则有基底存在时,粉末的高浓度区域较无基底存在时径向直径以及轴向长度均增大2倍左右。这是由于有基底存在时,基底对气流的阻挡使基底附近的气压增大,气体流动减缓,粉末加速度减小,数量增加,从而使粉末高浓度区域较无基底时变宽。而且靠近中心轴的粉末颗粒由于在垂直于中心轴方向的速度较小,故被基底反弹后大部分仍将经过基底上方中心轴附近的空间,甚至会多次落回碰撞基底,使得有基底存在时粉末的高浓度分布空间会比无基底存在时增加。粉末颗粒受反弹后,速度方向将会与气流方向相反,粉末受气流的减速作用,低速区的粉末颗粒个数也将会增加。综上所述,有基底存在时粉末的高浓度区域较无基底存在时范围和数值均有所增加。

本文中所取的激光光束截面能量分布为平顶形,激光的能量密度 I 的分布只随 z 变化。由(6)式计算可得无基底存在时,沿送粉头至粉末焦点处的总衰减率 $\beta = 2.81\%$ (图3左)。有基底存在时,沿送粉头至粉末焦点处的总衰减率 $\beta = 14.03\%$ (图3右)。后者比前者高出约4倍,这是激光能量分布与粉末浓度分布共同作用的结果。

3.2.2 熔池直径的影响

取3.2.1节有基底存在的模型,设在光束正下

方的基底处存在熔池,熔池表面中心与光束中心重合,到达熔池范围的粉末将不再参与浓度计算。改变熔池直径的大小得到熔池直径与激光衰减率之间的关系如图4所示,直径为零表示无熔池存在。由图4可见,在熔池直径不太大(小于2.5 mm)时,衰减率与熔池直径成反比关系。这是因为反弹粉末的多少与熔池面积有关,其数量显然与熔池面积成反比。之后当熔池直径与粉末高浓度区域尺寸接近时(参见图3),二者之间的变化趋于平缓。这是因为大多数反弹后可能经过激光照射范围的粉末已被熔池吸收,外围粉末的反弹对光束传播空间内的浓度影响已经非常微弱。同时还可以看到,即使在熔池很大,被反弹的粉末不再对衰减率有所影响时,激光衰减率仍在6%左右,仍然大于不考虑基底的2.81%的两倍,这是由于上文提到的基底对气流场的改变使得粉末的浓度分布发生变化造成的。

3.2.3 送粉率

选取3.2.2节中基底上有直径为1.5 mm的熔池粉末浓度模型,其他条件不变,改变送粉率得到送粉率与激光衰减率之间的关系,也在图4中给出。可以看到,激光能量的衰减率与送粉率近似成线性正比关系,即单位时间内进入送粉头的粉末颗粒越多,存在于激光束传播空间内的粉末颗粒也将越多。但是鉴于2.1节中假设3),本文所采取的模型对于载气式同轴送粉(送粉率一般较小)或大熔池尺寸的情况吻合程度较好。

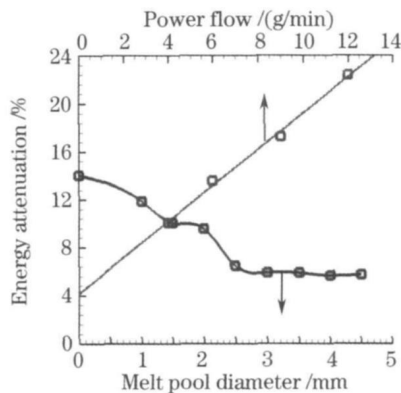


图4 熔池直径及送粉率与激光衰减率之间的关系

Fig. 4 Effects of melt pool diameter and powder flow on laser power attenuation

4 激光衰减率的实验验证

首先对模型的有效性进行验证。由于考虑基底反弹作用时的粉末流形状难于观测,本文只对无基底时的粉末流形状与模拟结果进行了对比,结果如

图 5 所示(彩图请见网络电子版)。左边为采用侧向白炽灯光照射下粉末流形状的照片,其中的红色部分为对应的激光光束范围,右边为对应参数下粉末流浓度及形状示意图。可以看出,模拟值与实验值的粉末流外观基本一致,粉末焦点位置基本相同,焦点以上的倒锥形浓度区域以及下方的快速分叉形浓度区域形状基本对应,吻合情况良好。

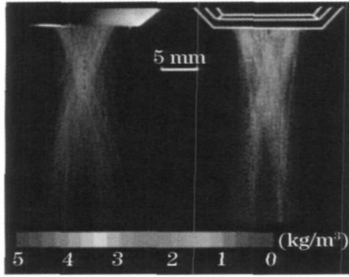


图 5 无基底时粉末流照片与模拟结果对比
Fig. 5 Comparison between the experimental and simulated results of powder distribution without substrate

因为现有条件下无法直接测量有熔池存在时粉末对激光的衰减率,所以对有基底和熔池存在时的衰减率的实验采用模拟方法。选取 3.2.2 节中基底上有直径为 1.5 mm 的熔池的粉末浓度模型,将熔池所在区域的边界条件设为压力出口,则有熔池对气流阻挡和无熔池对气流阻挡两种情况下速度场的分布如图 6 所示,两者的速度场仅在左下角即熔池上方很小的范围内有所差别,说明在熔池尺寸比较小的情况下,两者的速度场近似相同。而空间中的粉末浓度分布主要受重力场和气流场的影响,可以预见两者的浓度分布差别也会很小。由(6)式可得后者的总衰减率 $\beta = 8.18\%$,模型中从孔中穿出的粉末总质量浓度为 2.55 kg/m^3 ,假设这些粉末均经过孔下方 11.5 mm 长度内的激光束传播空间(与实

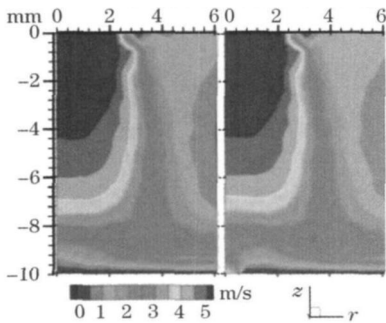


图 6 无/有气流穿透熔池区域时速度分布示意
Fig. 6 Velocity distribution without/ with melt pool existence

验相对应),按其体积取均值可得补偿的衰减率 $\beta = 0.84\%$,则新的总衰减率为 9.02% 。

对激光衰减率的验证实验采用 Nd:YAG 连续激光器,其波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。验证对比实验设计如图 7 所示。在同轴送粉装置正下方与送粉头喷嘴距离 10 mm 粉末焦点处放置一帶有 1.5 mm 直径圆孔的不锈钢平板,板厚 1.5 mm,孔中心与激光光束中心重合,在板下方 10 mm 处由一侧吹气体喷嘴将粉末颗粒从侧向吹走,在送粉头正下方合适位置放置激光功率计,其读数与出光功率相比较即可得粉末对激光的衰减率。侧吹气体喷嘴出口为细长形,出口很薄,侧吹气流量为 55 L/min ,可以形成厚度小于 1 mm 的质量较好的气帘。为了防止器材损坏并满足忽略激光热作用对粉末和气流影响的条件,出光功率为 50 W。为了修正功率读数偏移,激光初始功率以无送粉时的激光功率计读数为准。另外,作为对比在同轴送粉装置正下方与送粉头喷嘴距离 21.5 mm 处放置一侧吹气体喷嘴直接将粉末颗粒从侧向吹走,其余过程相同。

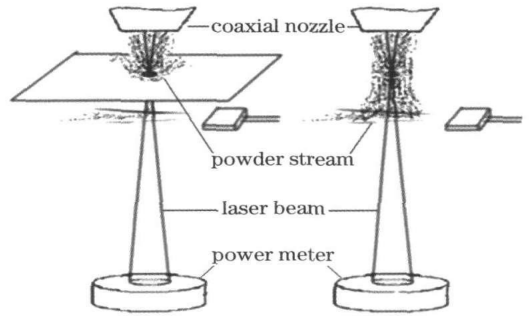


图 7 有/无反弹作用衰减率实验示意
Fig. 7 Schematic of laser power attenuation experiment with and without powder rebound

实验结果如表 2 所示,其中的读数为多次长时间(大于 60 s)测量的平均结果。 P_0 表示无粉末时的功率计读数, P_p 表示有粉末时功率计读数, $\bar{\beta}$ 表示实验衰减率, β 表示模拟衰减率。由结果可见实验值与模拟值吻合良好,在做了一定的修正假设后,两者的相对误差在 5% 左右,证明了所建模型的有效性。

表 2 粉末反弹实验对比结果

Table 2 Experimental result of laser power at attenuation with/ without powder rebound

	P_0/W	P_p/W	$\bar{\beta}$	β
With powder rebound	49.21	44.60	9.35	9.02
Without powder rebound	49.22	47.22	3.45	3.67

5 结 论

研究了同轴送粉激光熔覆中粉末浓度分布与粉末对激光能量衰减率之间的关系,建立了可适用于任意激光光强、光束形状及粉末流形状的激光衰减率模型。利用数值模拟方法得到了沿激光束传播空间的粉末浓度分布,计算了不同送粉率及熔池直径下的激光能量衰减率。主要结论如下:

1) 有基底存在时,气流场分布会发生改变,粉末会受到基底的反弹作用,使得粉末浓度增大,粉末对激光束能量的衰减率增加。

2) 有基底存在时,粉末浓度在激光束传播空间内的分布趋势与无基底时相似,都存在同轴送粉浓度分布的3种特征区域,但越接近粉末焦点,区域的数值相差越大,最大可达4倍。

3) 当熔池尺寸小于粉末高浓度区域尺寸时,熔池面积与衰减率成反比关系;当熔池尺寸与粉末高浓度区域尺寸接近时,熔池继续增大将不再对衰减率产生明显影响。

4) 当粉末的浓度较小、粉末间的相互作用可忽略时,送粉率与衰减率近似成线性正比关系。

参 考 文 献

- 1 Li Xiaowei, Zhang Chunhua, Zhang Song *et al.*. Developments of laser cladding technology[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(2): 1~2
- 2 李晓薇, 张春华, 张松等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(2): 1~2
- 3 R. R. Unocic, J. N. DuPont. Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process[J]. *Metal. Mater. Trans. B-Process Metal. Mater. Process. Sci.*, 2004, **35**(1): 143~152
- 4 Li Huishan. Theoretical and Experimental Study on the Interaction of Laser and Metal Powder Flow in the Laser Remanufacturing[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2004
- 5 李会山. 激光再制造的光与粉末流相互作用机理及试验研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2004
- 6 Changyi Liu, Jehnming Lin. Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, **35**(2): 81~86
- 7 Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 562~566
- 8 席明哲, 虞钢, 张永忠等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 562~566
- 9 S. Y. Wen, Y. C. Shin, J. Y. Murthy *et al.*. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, **52**(25-26): 5867~5877
- 10 Lu Qiaopan, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation and experimental study on gas-carrier coaxial powder nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 11 路桥潘, 张安峰, 李涤尘等. 载气式同轴送粉喷嘴的数值模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 12 Jichang Liu, Lijun Li, Yuanzhong Zhang *et al.*. Attenuation of laser power of a focused Gaussian beam during interaction between a laser and powder in coaxial laser cladding[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(10): 1546~1550
- 13 Andrew J. Pinkerton. An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(23): 7323~7334
- 14 Dong Zhe, Yang Xichen. Research of scattering intensity with spherical particles in laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1296~1300
- 15 董哲, 杨洗陈. 激光熔覆中球形粒子对激光散射强度的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1296~1300
- 16 Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi. Fundamentals of Fluid Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009
- 17 S. A. Morsi, A. J. Alexander. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *J. Fluid Mech.*, 1972, **55**(2): 193~208
- 18 I. Tabernero, A. Lamikiz, E. Ukar *et al.*. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, **210**(15): 2125~2134