

文章编号: 0258-7025(2009)09-2431-07

激光熔覆中同轴粉末流温度场的 CCD 检测

栗 丽 杨洗陈 董 哲

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 在激光同轴送粉中,存在激光能量的吸收和衰减过程。利用 Beer-Lambert 定律,建立了同轴送粉中气粉两相流的温度场理论计算模型。依据所建立模型数值模拟研究了激光熔覆中的各种参数对温度场变化的影响,如激光功率、送粉量和送气量等。为验证计算模型的有效性,采用 CCD 实验测量粉末流温度值,从粉末流温度场分布图中可以看到,实验结果与理论计算结果十分接近。研究粉末流温度场分布情况对提高激光熔覆质量有很大帮助。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 温度场; 计算模型; CCD 摄像机; 粉末流; Beer-Lambert 定律

中图分类号 TN249; TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2431

CCD Measurement of Temperature Field of Coaxial Powder Flow in Laser Cladding

Li Li Yang Xichen Dong Ze

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract There is physical processing of laser energy absorption and attenuation in coaxial powder flow. Theoretical models of temperature fields for carrying gas/powder two phase flow from coaxial nozzle have been presented from Beer-Lambert law. Based on the models, the calculated simulation of temperature field in powder flow has been achieved. The influences of laser cladding parameters, such as laser power, powder mass flow rate and gas flow volume, on temperature distribution have been discussed. Temperature field in powder flow has been measured by CCD camera. It is shown from both simulated and experimental results that temperature in centre axial line of powder flow will be significantly increased from outlet of nozzle to part surface. It is available to laser cladding.

Key words laser technique; laser cladding; temperature field; calculation model; CCD camera; powder flow; Beer-Lambert law

1 引 言

以激光熔覆为基础的激光制造与再制造技术已广泛应用于重要领域中,例如,航天、汽车等行业。同轴送粉激光熔覆的过程为:激光束与载气粉末流同时从粉嘴处射出,在数控机床(CNC)工作平台下,由计算机辅助设计与计算机辅助制造(CAD/CAM)控制三维实体工件,使其形成熔覆层。在激光与粉末流中存在能量、动量和质量转换过程,这 3 个过程直接影响熔覆层的性能和质量^[1,2]。

激光与粉末流相互作用的温度效应国内外已有若干报道,文献[3~5]分别根据热传导方程和能量守恒定律研究了单个金属粒子的温升、作用时间及金属粉末粒子的吸收随时间的变化。文献[6]采用针孔相机测量了粉末流中单个粒子的温度分布。但是,上述工作仅限于研究单个粒子的温度变化,也未能给出粉末流整体温度分布。实际上,激光同轴粉末流中存在大量众多的金属粉末粒子,激光束与粉末流相互作用是整个粉末流的集体行为;同轴粉末/

收稿日期: 2008-10-27; **收到修改稿日期**: 2008-12-25

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)和国家自然科学基金(60478004)资助项目。

作者简介: 栗 丽(1983—),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆 CCD 温度场测量方面的研究。

E-mail: lanhai511@yahoo.com.cn

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

气体二相流属于一种特殊的软物质——稀疏准连续介质,激光在同轴粉末/气体二相流中的物理过程则可以采用光在稀疏准连续介质中传输的 Beer-Lambert 定律来进行描述。为此,本文建立了激光能量在粉末流中衰减吸收理论模型,结合能量守恒定律给出了粉末流空间温度分布的表达式;并采用 CCD 测温方法对不同参数下粉末流的温度场进行了测试,获得了与理论模型基本一致的结果。因此,从理论和实验相结合角度研究粉末流温度场分布,合理分配激光能量的吸收率和透过率,对提高激光熔覆性能和质量具有实际意义和参考价值。

2 温度场理论模型

2.1 激光能量在粉末流中的衰减

在激光同轴送粉中,载流气体和金属粉末构成气/粉二相流。金属粉末在载流气体作用下,形成一种特殊的软物质——稀疏准连续介质。光束通过该介质时,入射光的能量 I 一部分被介质吸收 I_1 , 一部分被介质散射 I_2 , 其余的能量 I_3 通过介质入射到基体零件上,则有 $I = I_1 + I_2 + I_3$ 。在激光同轴送粉条件下,光在粉末流中会被大量的粉末粒子散射,这些散射基本在粉末流中进行,多次散射能量又转化成吸收或输出能量,仅有很少激光能量散射出粉末流外面。因此,在一级近似下这部分散射能量可以忽略不计,则有 $I = I_1 + I_3$, 即假定入射光的能量 I 主要用于金属粉末流的吸收 I_1 , 其余的能量 I_3 通过粉末流。根据 Lambert 定律,光通过介质薄层 dZ 后能量发生衰减 dI , 衰减量 dI 与入射光的能量 I 和吸收层厚度 dZ 成正比,即

$$dI = -KI dZ, \quad (1)$$

式中 K 为吸收系数。

根据 Beer 定律,吸收系数与介质浓度 $C(Z)$ 和金属颗粒光学系数 ϵ 成正比。则利用 Beer-Lambert 定律,可以得到激光能量衰减量 dI 与吸收层厚度 dZ 的关系式

$$dI = -\epsilon C(Z) I dZ, \quad (2)$$

式中 $\epsilon = 3\alpha/2r_p\rho_p$, r_p 为金属粒子半径, ρ_p 为金属粒子密度, α 为金属粒子光学吸收率,由(2)式可知,激光能量衰减与粉末流浓度和入射光的能量 I 成正比。

2.2 粉末流浓度

在我们以前的工作中,提出了图 1 所示的激光与粉末流相互作用几何模型^[7]。同轴粉末流呈现为 3 个不同的浓度分布区域,环状粉末流区、粉末流焦柱区和锥形粉末流区。

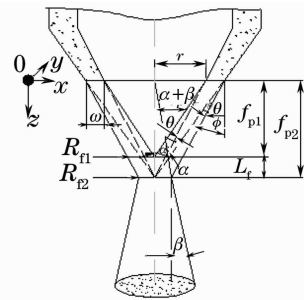


图 1 粉嘴与粉末流的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship between coaxial nozzle and powder stream

根据粉末流浓度公式

$$C(Z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p r_i^2}$$

可以推导出不同区域粉末流的浓度值。

1) $0 < Z < f_{p1}$ 环状粉末流区 (Z 为粉末流的轴向距离)

在此区间里,粉末流与激光束不存在相互作用,在 XY 截面上,粉末流呈环形分布

$$C(Z) = \frac{M_p}{\pi V_p [(r + w) - Z \tan(\phi - \theta)]^2 - [(f_{p1} - Z) \tan(\theta + \alpha)]^2}, \quad (3)$$

2) $f_{p1} < Z < f_{p2}$ 粉末流焦柱区

在此区间,粉末流形成聚焦,激光束与粉末流间形成良好耦合,粉末流在 XY 截面上呈高斯分布

$$C(Z) = \frac{M_p}{\pi V_p [R_{f2} + (f_{p2} - Z) \tan(\phi - \theta)]^2}. \quad (4)$$

3) $Z > f_{p2}$ 锥形粉末流区

在此区间,聚焦后的粉末流开始发散,形成发散角为 β 的圆锥形粉流

$$C(Z) = M_p / \{ \pi V_p [Z(R_{f2}/f_{p2})]^2 \}, \quad (5)$$

上述公式中 r 为粉嘴内壁半径, w 为粉嘴出口宽度, α 为粉腔内壁与中心轴线 Z 的夹角, ϕ 为粉腔外壁与中心轴线 Z 的夹角, θ 为聚焦前的粉末流发散角, β 为粉末流聚焦后的发散角, f_{p1} 为粉末流的上焦点位置, f_{p2} 为粉末流下焦点位置, R_{f1} 为粉末流上焦点半径, R_{f2} 为粉末流下焦点半径, L_f 为粉末流焦长 ($f_{p2} - f_{p1}$), Z 轴为环形粉嘴中心对称线, V_p 是粉末流的速度, S 为粉嘴出口截面积, M_p 为粉末流质量流率。

2.3 激光能量衰减计算

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。在空气中粉末粒子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) 粉末流作为吸光整体介质吸收激光能量,且以整体的形式向外辐射能量。粉末粒子是体积恒定半径为 r_p 的球体。由于粉末粒子足够小,即认为粉末粒子是均匀的吸光介质;

2) 激光束光强为均匀分布;

3) 激光通过粉末流后的衰减能量全部被粉末流吸收;

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和粉末颗粒的熔化潜热;

6) 粉末粒子在气-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;

7) 考虑激光随着传输距离的增加所产生的光束发散,激光强度与下落距离的关系为

$$I = \frac{I_0}{\pi[\tan(\sigma/2)Z + R_0]^2}$$

式中 R_0 为激光束初始半径, δ 为激光束的发散角度, I_0 为粉末流柱区间的入射光强。

将(3)~(5)式分别代入(2)式中并对 Z 进行积分,即可得到不同位置 Z 的激光衰减后的能量 I_Z 计算公式。

1) $0 < Z < f_{p1}$ (环形粉末流区)粉末流与激光束无相互作用

$$I_Z = I_0, \quad (6)$$

2) $f_{p1} < Z < f_{p2}$ (粉末流聚焦区)

$$I_Z = -\epsilon \int_{f_{p1}}^{f_{p2}} C(Z) IdZ = I_{f_{p1}} \bar{\omega}_1(Z), \quad (7)$$

其中 $I_{f_{p1}}$ 为粉末流柱区间的入射光强为

$$I_{f_{p1}} = \frac{I_0}{\pi[\tan(\sigma/2)f_{p1} + R_0]^2},$$

$$\bar{\omega}_1(Z) = \left[\epsilon \frac{M_p}{\pi V_p \tan(\phi - \theta)} (C - D) \right],$$

$$C = \frac{1}{R_{f2} + (f_{p2} - f_{p1}) \tan(\phi - \theta)},$$

$$D = \frac{1}{R_{f2} + (f_{p2} - Z) \tan(\phi - \theta)}.$$

3) $Z > f_{p2}$ (锥形粉末流区)

$$I_Z = -\epsilon \int_{f_{p2}}^Z C(z) IdZ = I_{f_{p2}} \bar{\omega}_2(Z), \quad (8)$$

其中, $I_{f_{p2}}$ 为锥形粉末流区间的入射光强

$$I_{f_{p2}} = \frac{I_0}{\pi[\tan(\sigma/2)f_{p2} + R_0]^2}$$

$$\bar{\omega}_2(Z) = \exp\left[\frac{\epsilon M_p f_{p2}^2}{\pi V_p R_{f2}^2} \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{f_{p2}}\right)\right]$$

3 粉末流温度场计算模拟

假设 Z 轴的粉末流吸收了激光衰减的全部能量($I_0 - I_Z$),根据能量守恒定律可得

$$I_0 - I_Z = C_V \cdot M \cdot (T - T_0), \quad (9)$$

其中 M 为粉末流的总质量, C_V 为粉末流的比热,将(6)~(8)式代入(9)式,可推导出粉末流整体温度场分布公式

1) $0 < Z < f_{p1}$ (环形粉末流区)

$$T = T_0. \quad (10)$$

2) $f_{p1} < Z < f_{p2}$ (粉末流聚焦区)

$$T - T_0 = (I_0 - I_Z) / C_V \cdot M =$$

$$(I_0 - I_{f_{p1}} \bar{\omega}_1) / C_V \cdot M =$$

$$Pt \left\{ 1 - \frac{\bar{\omega}_1}{\pi[\tan(\sigma/2)f_{p1} + R_0]^2} \right\} / C_V \cdot M =$$

$$(P / C_V \cdot M_p) \left\{ 1 - \frac{\bar{\omega}_1}{\pi[\tan(\sigma/2)f_{p1} + R_0]^2} \right\}. \quad (11)$$

3) $Z > f_{p2}$ (锥形粉末流区)

$$T - T_0 = (I_0 - I_Z) / C_V \cdot M =$$

$$(P / C_V \cdot M_p)$$

$$\left\{ 1 - \frac{\bar{\omega}_2}{\pi[\tan(\sigma/2)f_{p2} + R_0]^2} \right\}, \quad (12)$$

其中 P 为激光功率, t 为激光与粉末流作用时间, $M_p = M/t$, $I = Pt$ 。可以看出,粉末流沿 Z 轴的温度分布是下列参数的函数:粉末粒子参数(α , r_p , ρ_p , C_V)、粉嘴结构(r , ω , ϕ , θ)、熔覆参数(M_p , V_p , P)、环境温度(T_0)和粉嘴中心轴线距离 Z 等,即

$$T = T(\alpha, r_p, p_p, C_V, r, \omega, \phi, \theta, M_p, V_p, P, Z, T_0). \quad (13)$$

设环境温度 T_0 为 20°C ,采用 CO_2 激光器,其波长为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。NiCrSiB 合金(质量分数分别为 $0.84\% \text{C}$, $4.2\% \text{Si}$, $3.8\% \text{B}$, $16\% \text{Cr}$, $5\% \text{Fe}$)粉末的物理参数及同轴送粉嘴的结构参数见表 1,表 2 所示^[6]。

表 1 NiCrSiB 合金粉末物理参数

Table 1 Physical parameters of NiCrSiB

Absorptivity $\alpha / \%$	14.7
Density $\rho_p / (\text{g}/\text{cm}^3)$	7.8
Specific heat $C_V / \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$	460

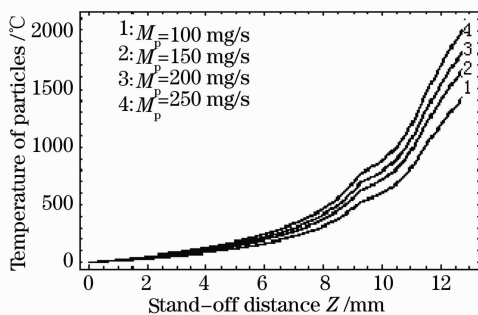
表2 送粉嘴结构参数

Table 2 Structure parameters of coaxial nozzle

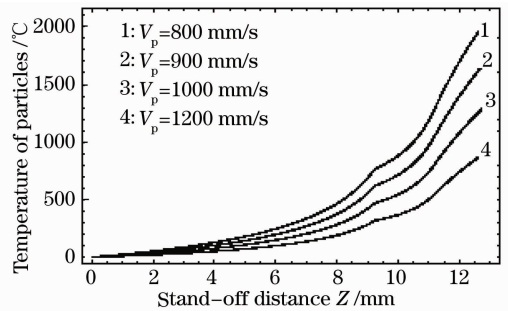
Nozzle inter radius r / mm	3
Nozzle exportation width w / mm	1.5
Angle of the inter cavity α / ($^\circ$)	15
Angle of the outer cavity φ / ($^\circ$)	25
Divergence angle θ / ($^\circ$)	3

采用数学软件,将(10)~(12)式绘制成图,用以分析激光熔覆参数对粉末流整体温度的影响。

当 $V_p = 1000$ mm/s, $r_p = 0.04$ mm, 送粉量不同粉末流温度沿 Z 轴变化曲线如图2所示。从图2中可以看到,从粉嘴口至12.5 mm的区域内,粉末流温度处于上升趋势,在该段区域中粉末流受热熔化,温度由20 $^\circ\text{C}$ 逐渐升至1300~2000 $^\circ\text{C}$,金属粉末粒子的熔化温度在1434 $^\circ\text{C}$ 左右;在距粉嘴口12 mm左右的位置粉末流达到熔化温度,此时金属粉末的利用率最高。随着送粉量的增加,同一位置处的粉末温度逐渐上升,且不同送粉量的温度差随下落距离的增大而增加,这是由于送粉量的改变会影响粉末流的浓度变化,较大送粉量会产生较大的粉末。送粉量从100 mg/s增大至250 mg/s,在距粉嘴口12.5 mm处温度升高500 $^\circ\text{C}$ 左右。

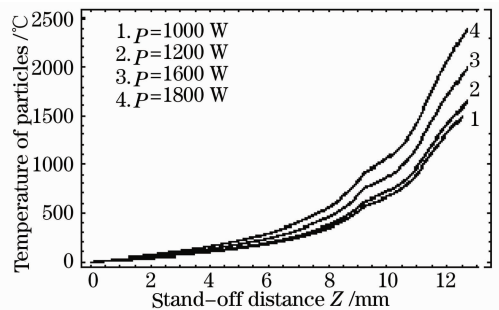
图2 不同送粉量时 Z 轴的温度分布Fig. 2 Temperature distribution curves in Z of powder stream at different M_p

当 $M_p = 200$ mg/s 和 $r_p = 0.04$ mm, 不同送气量条件下,沿 Z 轴粉末流温度变化如图3所示。由(4)式可知,激光能量衰减与粉末流浓度成正比,当送气量增加时,粉末流的速度随之增大,这时粉末流浓度会相应减小,所以粉末流吸收的能量会随着送气量的增加而减少。从图3中可以看到,送粉量从800 mm/s增加至1200 mm/s时,温度下降了1300 $^\circ\text{C}$ 左右;且当送气量大于900 mm/s时,在距粉嘴口12 mm处粉末流温度没有达到熔化温度,此时粉末的利用率较低。同上述的送粉量影响相比,送气量对粉末流温度的影响较大;且送粉量与粉末流温度呈正

图3 不同送气量时 Z 轴的温度分布Fig. 3 Temperature distribution curves in Z of powder stream at different V_p

比,而送气量则与粉末流温度呈反比趋势。

当 $M_p = 200$ mg/s, $r_p = 0.04$ mm, $V_p = 800$ mm/s, 激光功率不同时,粉末流温度场沿 Z 轴的变化如图4所示。激光与粉末流相互作用,粉末粒子吸收激光能量使得温度升高。由图4可知,激光功率从1000 W增加至1800 W时,在距粉嘴口12 mm处的温度也随之升高约1000 $^\circ\text{C}$ 。激光功率增大,使得单个粉末粒子表面受到的热量增加,自身的温度也随之升高,所以粉末流整体的温度随激光功率的增大而升高。

图4 不同激光功率时 Z 轴的温度分布Fig. 4 Temperature distribution curves in Z of powder stream at different laser power P

4 粉末流温度场的 CCD 测量

4.1 实验原理及系统结构

利用我们前期开发的激光熔池 CCD 比色测温方法,测试激光同轴粉末流的温度场^[8,9]。将 CCD 采集到的粉末流热辐射图像通过采集卡记录在计算机中,使用自主开发的专用粉末流测温软件对辐射图像进行预处理和温度值计算。

测温实验装置如图5所示,包括 HL5000 CO₂ 激光器($P = 1 \sim 5$ kW), SIEMENS 802D-CNC 工作平台,JKJ-6 送粉嘴,CCD 工业用摄像机以及计算机等。实验采用半径为40~80 μm 的 NiCrSiB 合金粉末粒子。

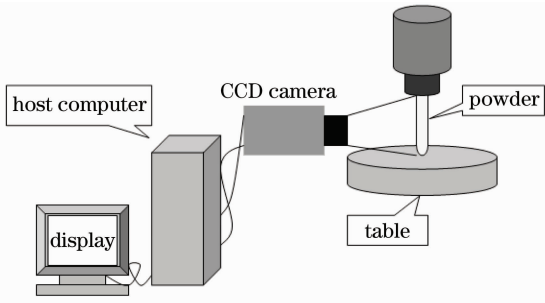


图 5 测温实验装置

Fig. 5 Experimental devices

实验中,待粉末流下落速度稳定后(即激光束开始照射粉末流后,大约 1.2 s 时粉末流处于稳态),用 CCD 拍摄粉末流整体辐射图像,此时得到的图像为粉末流以吸光整体的形态向外辐射的辐射能量图像。

4.2 实验测量结果

CCD 采集的粉末流热辐射图像如图 6(a)所示,图 6(b)为图像处理后的粉末流温度场分布图。

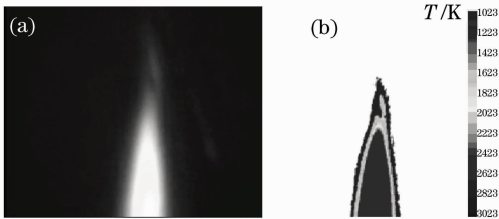


图 6 粉末流温度场. (a) 粉末流热辐射图像; (b) 温度场分布图

Fig. 6 Temperature field of hot powder stream

(a) Radiations picture; (b) processed thermal image

当 $P=700\text{ W}$ 和 $V_p=800\text{ mm/s}$ 时,不同送粉量 M_p 下粉末流热辐射图像及温度场分布图如图 7 所示。从图 7 中可以看到,当高功率的激光束穿越粉末流时,粉末流形成一片高亮光区域;随着送粉量的增加,与激光相互作用的粉末流的颜色由暗变亮,而且亮度区域也随之变长。处理后的温度场分布图显示出在 $M_p=100\text{ mg/s}$ 时,粉末流温度较低,此时

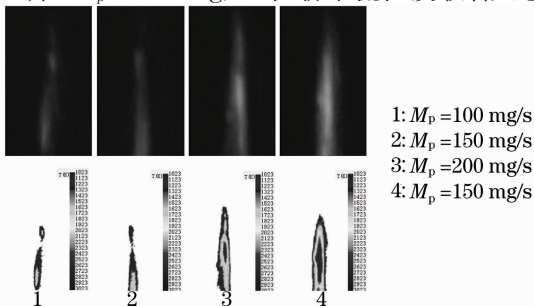


图 7 不同送粉量时的 CCD 图片及其温度场云图

Fig. 7 Temperature field CCD picture and processed thermal image of hot powder stream for different M_p

粉末流的熔化程度较小。随着送粉量的增大,粉末流中心温度也在不断增加,但增加幅度不大。粉末流温度场分布图也反映了激光模式分布的信息:激光光斑内功率分布不均匀,中心功率密度高,导致粉末流横向温度分布呈现不均匀状态。

由图 7 提取 Z 轴温度分布示于图 8。从图 8 中可以看到从粉嘴口到距 z 轴 12 mm 处,温度从 20 °C 升至 1300~2000 °C;且不同送粉量产生的温度差约在 120 °C。

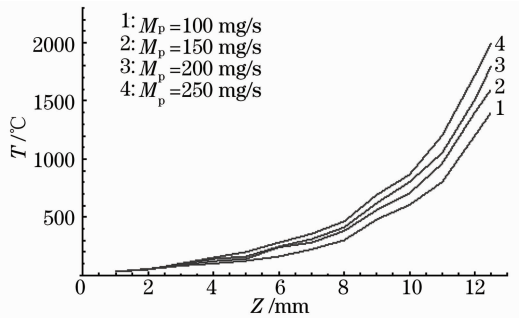


图 8 不同送粉量时 Z 轴的温度分布

Fig. 8 Experimental curves of temperature field in Z of powder flow for different M_p

当 $P=1300\text{ W}$ 和 $M_p=100\text{ mg/s}$ 时,不同送气量下 CCD 采集的粉末流热辐射图像及其温度云图如图 9 所示。从粉末流热辐射图像中可以看到随着送气量的增加,粉末流亮度由亮变暗,且区域长度也随之变小。因为送粉量或是送气量的改变都会影响粉末流的运动速度,当粉末流速度增大时,伴随的是粉末流浓度的减少,这时粉末流温度随浓度的减少而降低;但是送粉量的增加,一方面会使粉末流速度增大,另一方面也会增加粉末流的浓度,从图 7 中观察到送粉量的增大会使粉末流的温度值升高。如图 9 温度场分布图所示,随着送气量的增大粉末流温度随之下降,且其对粉末流温度的影响比送粉量的影响更大。

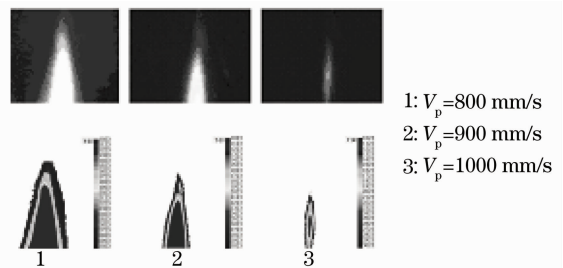


图 9 不同送气量时的 CCD 图片及其温度场云图

Fig. 9 Temperature field CCD picture and processed thermal image of hot powder stream for different V_p

由图 9 提取 Z 轴温度分布示于图 10。由图 10

可以看到,随着送气量的增大,相同 Z 值的温度值变小,且不同送气量之间粉末流的温度差较大,大约为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

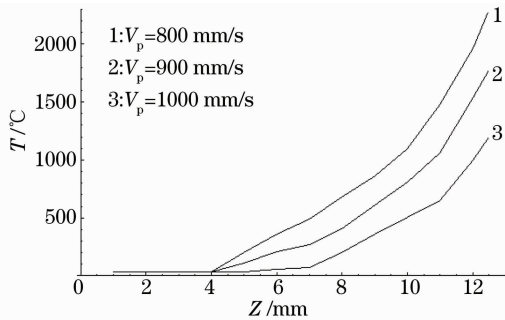


图 10 不同送气量时 Z 的轴温度分布图

Fig. 10 Experimental curves of temperature field in Z of powder flow for different V_p

在 $V_p=800\text{ mm/s}$ 和 $M_p=100\text{ mg/s}$ 时,不同激光功率下粉末流图像及其温度场云图如图 11 所示。

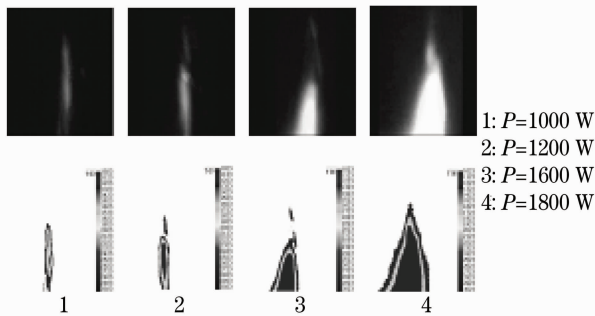


图 11 不同激光功率下的 CCD 图片及其温度场云图

Fig. 11 Temperature field CCD picture and processed thermal image of hot powder stream for different P

如图 11 粉末流热辐射图像所示,随着激光功率的增大粉末流辐射区域和区域中的亮度随之增加。因为激光功率的增大使粉末粒子单位面积受到的热量增加,所以粉末流的温度随激光功率的增大而升高。从粉末流温度场分布图中可以看到,激光功率从

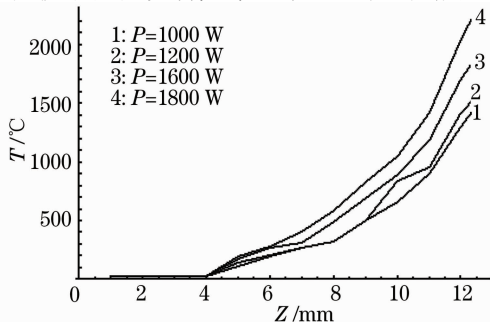


图 12 不同激光功率下 Z 轴的温度分布图

Fig. 12 Experimental curves of temperature field in Z of powder flow for different P

700 W 加到 1500 W ,温度值有明显升高。金属粉末粒子的熔化温度在 $1434\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,图 11 所示功率在 1100 W 以上才能满足粉末流的熔化要求,而在 1100 W 以下的粉末流熔化程度无法达到工业要求。

由图 11 提取 Z 轴温度分布示于图 12。从图 12 中可以看到,功率低于 1200 W 时,沿轴线 Z 几乎观察不到高温。

5 结 论

1) 利用 Beer-Lambert 定律,建立了激光束在粉末流中衰减吸收的物理模型,给出了同轴粉末流的温度场表达式。可以看出,沿轴线 Z 的粉末流温度场分布与下列参数有关:粉末颗粒参数 (α, r_p, ρ_p, C_V)、粉嘴构造 (r, ω, ϕ, θ) 参数、激光熔覆参数 (M_p, V_p, P)、环境温度 (T_0) 及粉嘴距离 Z 等。

2) 开展了激光能量衰减和粉末流整体温度场分布的计算机模拟。在粉嘴结构和粉末流参数一定条件下,温度场分布主要受激光功率、送粉量、送气量的影响。

3) 采用 CCD 测量粉末流温度场,并利用开发的专用测温软件进行数字图像处理和温度场计算。从测温实验结果可以看到,理论计算和实验检测结果基本一致。

参 考 文 献

- Jehming Lin, Bor-Chyang Hwang. Coaxial laser cladding on an inclined substrate [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**: 571~578
- Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application [J]. *China Surface Engineering*, 2003, **16**(4): 43~46
杨洗陈, 李会山, 刘运武 等. 激光再制造技术及其工业应用[J]. *中国表面工程*, 2003, **16**(4): 43~46
- Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1745~1750
杨 楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 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
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
- 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相互作用[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3): 280~284
- Jehming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technol.*, 1999, **31**: 565~570
- Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser

- manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 993~997
杨洗陈, 雷剑波, 刘运武等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 993~997
- 8 Chen Juan, Yang Xichen, Lei Jianbo *et al.*. Calibration study on measurement of temperature field in laser processing by CCD [J]. *Chinese J. Lasers*. 2007, **34**(4): 354~356
陈 娟, 杨洗陈, 雷剑波等. 激光加工温度场 CCD 检测中的温度标定[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 354~356
- 9 Chen Juan, Yang Xichen, Lei Jianbo. Application of digital image processing to measurement system of temperature field in molten pool for laser remanufacturing [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(4): 220~222, 256
陈 娟, 杨洗陈, 雷剑波. 数字图像处理在激光再制造熔池温度场检测中的应用[J]. *应用激光*, 2006, **26**(4): 220~222, 256