

文章编号: 0253-2239(2009)11-3114-07

激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟

杨洗陈 栗 丽 张 焯

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 在激光同轴送粉熔覆中,由于激光与粉末流相互作用,粉末流整体温度分布直接影响激光熔覆的质量。基于非预混燃烧模型,将激光相处理为连续性介质,粉末颗粒相看作离散相物质,建立了激光作用下粉末流的质量、动量和能量方程。用 Fluent 软件进行了不同激光功率和粉末流速度条件下粉末流整体温度场数值模拟,讨论了各种参数对温度场分布的影响。为了验证该模型的准确度,利用 CCD 比色测温方法测量了粉末流整体温度场分布。结果表明,数值模拟与 CCD 检测结果具有良好的一致性,数值模拟结果对激光熔覆具有指导意义。

关键词 激光熔覆;粉末流;温度场;数值模拟;Fluent 软件;CCD 相机;温度测量

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3114

Numerical Simulation of Temperature Field of Coaxial Powder Flow in Laser Cladding

Yang Xichen Li Li Zhang Ye

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

Abstract In laser coaxial cladding, laser casing qualities are directly affected by temperature field of powder flow for the interaction between laser and powers. According to the model of non-premixed combustion, regarding laser beam as continuity medium phase and powder as disperse medium phase, the conservation equations of mass, momentum and energy are established in laser and powder flow. Computer simulations of temperature field in different parameters are finished using Fluent software. Some effects of laser cladding parameters on temperature distribution such as laser power and powder flow velocity are discussed. Temperature field distribution in the powder flow is measured by CCD camera. It is shown that simulation and experimental results agree well, numerical simulation of temperature field in powder flow is important for laser cladding.

Key words laser cladding; powder flow; temperature field; numerical simulation; Fluent software; CCD camera; measurments temperature

1 引 言

基于激光同轴送粉熔覆的激光制造近年来在航空航天机械电子等重要领域已获得许多应用^[1~3]。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。在激光同轴送粉熔覆过程中,入射激光能量其中一部分被金属粉末粒子吸收用于加热粒子形成温度场,其余部分激光能量穿过粉末云射入工件被表面吸收,用于熔化基体和落入基体的金属粉末形成熔覆层。在 CNC 工作平台上,逐层

熔覆,由 CAD/CAM 控制生成三维实体工件。研究激光同轴粉末流中温度场对激光制造工艺应用具有重要指导作用,在国内外受到广泛重视,于理论计算和试验检测等方面开展了若干研究。由于粉末流是由大量稀疏细小的高温金属粒子组成,使理论和试验研究具有很大的难度。早期的研究中都集中在激光束与单个粉末粒子的相互作用,文献[4~7]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

收稿日期: 2009-07-20; 收到修改稿日期: 2009-09-28

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

作者简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与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

的变化。在我们以前工作中应用 Mie 散射理论建立了激光被球形粉末粒子散射的物理模型^[8]。文献[9]和[10]分别采用针孔相机和 CCD 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,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,粉末流中不仅存在单个粒子吸收激光能量问题,而且还有粒子之间热传递问题,研究粉末流整体温度分布具有更重要的意义。我们以前的工作基于比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律建立了激光束在整体金属粉末流中衰减和吸收的物理模型,并采用 CCD 测温方法对不同参数下粉末流的整体温度场进行了检测研究^[11],但是该模型忽略了传热因素。更精确的研究需要综合考虑激光作用下粉末流的质量、动量和能量物理传输。同轴粉末/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非预混燃烧模型来进行模拟计算^[12]。本文将激光束做为连续性介质,粉末颗粒相做为离散相物质,建立了激光作用下粉末流的质量、动量和能量守恒方程,利用 Fluent 软件开展了热粉末流温度场的数值模拟,获得了与试验检测基本一致的结果。为合理分配激光能量透过比率提供依据,对提高激光熔覆性能和质量具有实际意义和参考价值。

2 热粉末流温度场计算模型

激光束与粉末流相互作用如图 1 所示,粉末流从送粉嘴射出后汇聚,形成环状区,焦柱区和锥形区 3 个浓度区域^[13]。在 a1 区域内粉末流未进入激光中,此时粉末流没有吸收能量升温;在 a2 区域,进入激光束中的粉末流则吸收激光能量,产生温度场。

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

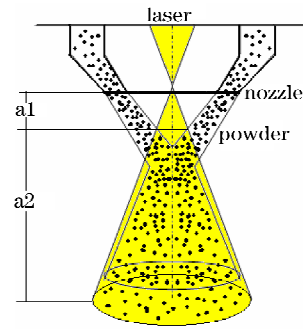


图 1 激光束与粉末流相互作用区域示意图

Fig. 1 Schedule of interaction area between laser beam and powder stream

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) 激光通过粉末流后的衰减能量全部被粉末流吸收。
- 3) 粉末不吸收来自基体的反光。
- 4) 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。
- 5) 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。

粉末流与激光束作用区域内的激光的控制方程

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} + S_{P_{\phi}}, \quad (1)$$

式中 ϕ 可分别表示直角坐标系 x, y, z 三个方向速度分量 u, v, w , 当 $\phi = 1$ 时为连续性方程。 k 为湍流动能, ϵ 表示湍流动能耗散率, Γ 为广义扩散系数。 S_{ϕ} 表示由气相引起的源项或汇项, $S_{P_{\phi}}$ 表示由固体颗粒引起的源项。(1) 式中 $\phi, \Gamma, S_{\phi}, S_{P_{\phi}}$ 具体形式见表 1。

表 1 控制方程(1)中的 ϕ, Γ, S_{ϕ} 和 $S_{P_{\phi}}$

Table 1 ϕ, Γ, S_{ϕ} and $S_{P_{\phi}}$ in the conservation equations (1)

ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}	$S_{P_{\phi}}$
1	0	0	S_{P_m}
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$	S_{P_u}
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right)$	S_{P_v}
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$	S_{P_z}

(续表)

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ	S_{ϕ^*}
k	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_k$	$G_k - \rho\epsilon$	0
ϵ	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_\epsilon$	$\epsilon(C_1 G_k - C_2 \rho\epsilon)/k$	0
f	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_f$	0	S_{f^*}
g	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_g$	$C_{g1}\mu_{\text{eff}}\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2\right] - C_{g2}\rho\epsilon g/k$	0
h	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_h$	$-Q_R$	S_{h^*}
Y_s	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_s$	W_s	$S_{Y_s^*}$

$$G_K = \mu_{\text{eff}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = C_{\mu p} k^2 / \epsilon,$$

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_f = \sigma_g = \sigma_h = 0.7, \sigma_s = 1.0, C_{g1} = 2.80, C_{g2} = 1.92$$

O_2, N_2, CO_2, CO 以及气相燃料的质量分数由混合分数 f 及其脉动均方值 g 求得。气体温度由焓 h 及各组分的质量分数计算。

粉末颗粒的动量方程

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) + F_X, \quad (2)$$

式中 $F_D(u - u_p)$ 表示对流传热, $g_x(\rho_p - \rho)$ 表示辐射传热, F_X 表示热解挥发分析出热和反应放热。

在激光束与粉末流相互作用的过程中, 会有温度变化, 这时需要激活能量模型, 使用能量方程计算。热焓是关于温度的函数, 其数学定义为

$$\Delta H(T) = \int_0^T \rho c(t) dt, \quad (3)$$

式中 H 为热焓; ρ 为材料密度; T 为绝对温度; $c(t)$ 为随温度 t 变化的比热容, 它是温度的分段线性函数。

3 热粉末流温度场数值模拟

通过计算比较, 本文采用非预混燃烧模型, 用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟气相湍流运输, 对固体颗粒相的求解则采用随机的颗粒轨道模型^[12]。

对激光束和颗粒采用不同的处理方法: 激光相连续性介质在欧拉(Eulerian)坐标系中描述; 粉末颗粒相看做离散相物质在拉格朗日(Lagrange)坐标系中描述。且考虑两相之间的质量、动量和能量之间的相互作用。

3.1 边界条件

图 2 为激光束与粉末流作用计算域的边界条件。粉末处的速度设置为 3 m/s, 温度 300 K, 根据其强度和水利直径, 定义 10% 的湍流强度。在粉末

流燃烧中, 所有的燃料都是离散相, 所以粉末处的混合分数值为 0。

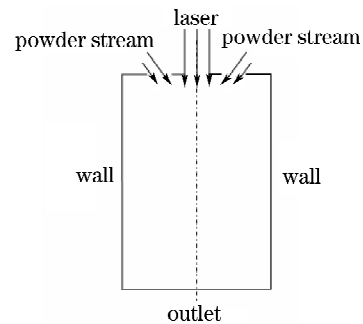


图 2 粉末流计算域及边界条件

Fig. 2 Computing region and boundary conditions in powder stream

激光入口的温度设置为 2500 K, 湍流强度同样定义为 10%; 出口(outlet)处设置为流出(outflow)状态, 出口压强为 0; 边界(wall)处选为 Wall 状态, 设定温度为 1200 K, 模拟边界条件下的情况。

3.2 网格划分

根据粉末流流动区域尺寸绘制 $6.5 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的网格, 由于粉末流与激光作用区域的对称性, 建模时只需画出一半部分就可以, 图 3 为流场二维有限元计算模型的右半侧作用区域。经过 Gambit 进行网格划分, 得到节点 4933 个、单元格 4716 个, 其中最大单元面积为 2.9833 mm^2 , 最小单元面积为 2.5333 mm^2 。

粉末流的密度为 7800 g/cm^3 , 比热 $460 \text{ J/(kg}\cdot\text{s)}$, 热传导系数 $18 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, 熔化温度 1707 K。颗粒尺寸分布不均匀, 其直径大小为 $70 \sim 200 \mu\text{m}$ 。这些尺寸分布是与 Rosin-Rammler 方程相适应的, 其平均直径大

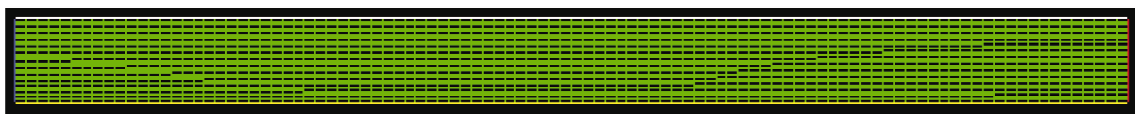


图 3 粉嘴流场网格划分

Fig. 3 Computation net of powder stream from nozzle

小为 $134 \mu\text{m}$, 展开参数为 4.52。

3.3 模拟结果及其分析

利用 Fluent 提供的图形工具可以很方便地观察 CFD 求解结果, 并得到满意的数据和图形, 用来定性或者定量研究整个计算。在 Fluent 中能够方便地生成网格图、等值线图、剖面图、速度矢量图和迹线图等图形来观察计算结果。

图 4 是粉末流温度场数值模拟彩色云图, 我们可以看到, 粉末流从送粉嘴射出, 运动一段时间后进入激光束中, 吸收能量并升高温度。刚离开粉嘴的粉末流实际上还未进入激光束中, 无法吸收激光能量, 这一区域的粉末流温度没有产生明显的变化。经过温度稳定区域后, 粉末流温度沿粉嘴轴线方向不断增大。在这个温度上升区域中, 粉末流开始进入激光束, 并且吸收激光能量; 同时, 受重力等因素影响, 粉末流逐渐形成汇聚。粉末在下落的过程中, 一方面激光作用在粉末颗粒上的能量累积增加, 另一方面由于汇聚, 距离聚焦点越近粉末流的浓度也就越大, 所以粉末流整体温度随着下落距离的增大不断增加。同样, 受重力等因素的影响, 粉末流经过汇聚后, 开始逐渐发散, 此时的粉末流浓度沿粉嘴轴线递减; 同时, 激光束并不是理想的沿直线传播, 它在传播过程光束发散, 随着下落距离的增大, 激光强度逐渐变小。由于粉末流浓度和激光强度的减小, 粉末流整体可吸收能量减少, 自身温度也随着距离的增加而下降。图 4(b) 是局部放大图, 由于激光束中心功率密度高, 导致粉末流温度场横向分布呈现

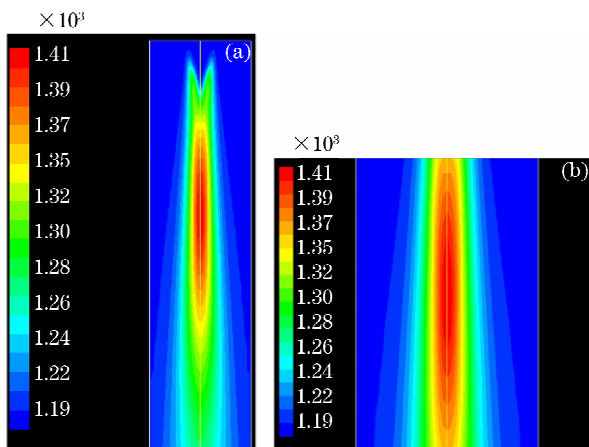


图 4 粉末流温度分布彩色云图及其局部放大图 ($P=1000 \text{ W}$, $V_p=1 \text{ m/s}$)。 (a) 粉末流整体温度场彩色云图; (b) 粉末流温度场局部放大图

Fig. 4 Color cloud of temperature field for powder steam ($P=1000 \text{ W}$, $V_p=1 \text{ m/s}$). (a) Whole color cloud of temperature field; (b) magnifying part of color cloud of temperature field

不均匀状态, 中心温度高, 两侧低。

图 5 是沿粉嘴中心轴线温度分布计算机数值模拟曲线。可以看到, 在沿粉嘴中心轴线方向上, 最初的粉末流温度较低; 随着距离的增大, 温度快速上升, 到 20 mm 左右即粉末流焦点, 温度迅速增加至 2300 K 上下; 而从 $20 \sim 100 \text{ mm}$ 的距离, 粉末流的温度开始缓慢下降, 至 100 mm 时降低到 700 K 。

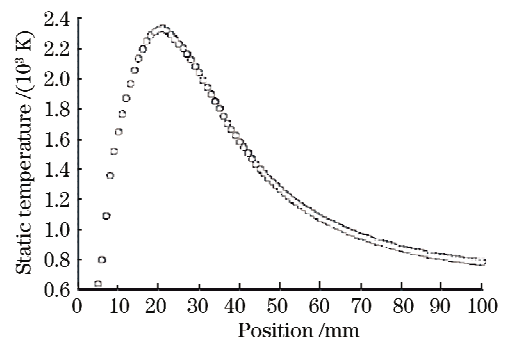


图 5 粉末流沿粉嘴轴线温度分布 ($P=1000 \text{ W}$, $V_p=1 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Temperature distribution along z -axis of nozzle ($P=1000 \text{ W}$, $V_p=1 \text{ m/s}$)

3.4 不同参数下的温度场模拟

激光束与粉末流相互作用受工艺参数的影响, 粉末流整体温度值随着参数的改变发生变化。如图 6 所示, 随着粉末流速度的增加, 高温区域逐渐变小, 同一位置处的温度逐渐下降。由于粉末流速度的增大引起浓度的降低, 而且根据 Beer-Lambert 定律推得粉末流温度与浓度成正比, 所以在激光功率相同的条件下 (即单个颗粒吸收的能量不改变), 粉末流整体温度受粉末流速度的影响, 与其呈反比趋势, 即随着粉末流速度的增加粉末流整体温度下降。

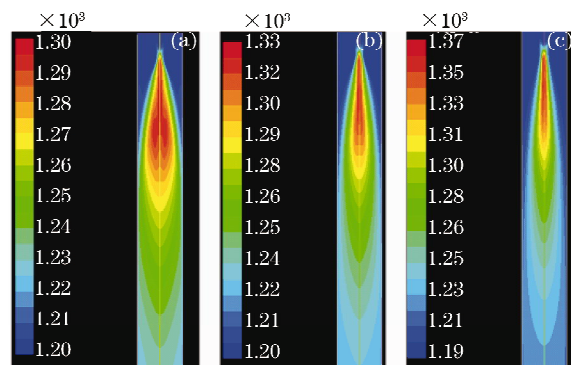


图 6 不同粉末流速度下的粉末流温度分布 ($P=1100 \text{ W}$)。 (a) $V_p=3 \text{ m/s}$; (b) $V_p=4 \text{ m/s}$; (c) $V_p=5 \text{ m/s}$

Fig. 6 Temperature distributions of powder steam at different velocities ($P=1100 \text{ W}$). (a) $V_p=3 \text{ m/s}$; (b) $V_p=4 \text{ m/s}$; (c) $V_p=5 \text{ m/s}$

粉末流速的改变影响粉末流焦点(达到最高点的下落距离)温度分布和数值,如图7所示。当粉末流速为3 m/s时,粉末流焦点在16 mm处,温度达到最高值2500 K;速度为4 m/s时,粉末流焦点在21 mm处,温度达到最高值1920 K;当速度增大至5 m/s时,粉末流焦点在23 mm处温度升至最高1450 K。

图8是粉末流速一定($V_p = 4$ m/s)下,不同激光功率对粉末流整体温度的影响。在激光与粉末流相互作用中,粉末流靠吸收激光能量产生温升,即大功率激光增加粉末颗粒表面的能量吸收,粉末流随激光功率的增大高温面积增加,且同一位置处的温度也在提高。

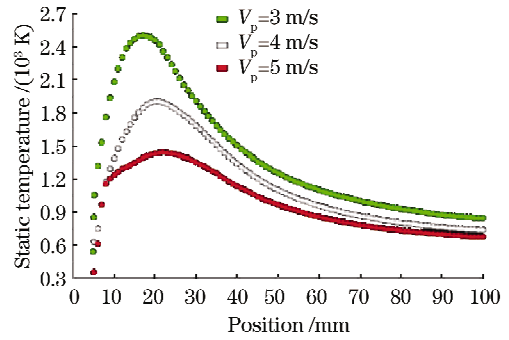


图7 不同粉末流速下粉末流焦点温度沿粉嘴轴线方向分布($P=1100$ W)

Fig. 7 Temperature distribution at focused point of powder stream along center axial line of nozzle at different velocities($P=1100$ W)

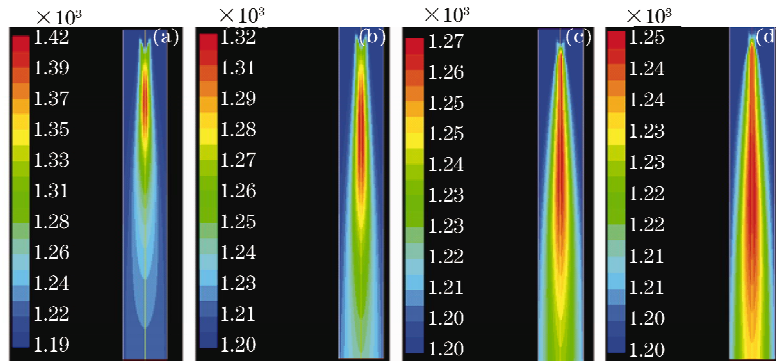


图8 不同激光功率下粉末流温度分布($V_p = 4$ m/s). (a) $P=700$ W; (b) $P=900$ W; (c) $P=1100$ W; (d) $P=1300$ W

Fig. 8 Temperature distributions of powder steam in different laser powers($V_p = 4$ m/s). (a) $P=700$ W; (b) $P=900$ W; (c) $P=1100$ W; (d) $P=1300$ W

图9是在沿粉嘴轴线方向不同激光功率对粉末流温度的影响。激光功率从700 W增大至1300 W,粉末流焦点最高温度不断上移,粉末流更早达到最高温度,且最高温度从1200 K升高到2600 K。

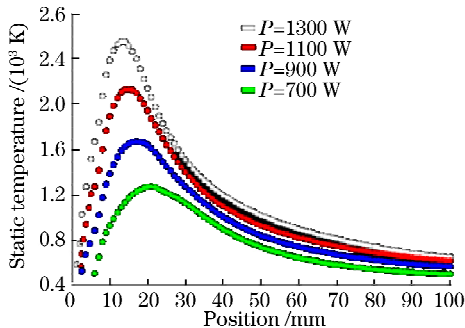


图9 不同激光功率下粉末流沿粉嘴轴线方向温度分布($V_p = 4$ m/s)

Fig. 9 Temperature distribution at focused point of powder stream along z -axis of nozzle in different laser powers($V_p = 4$ m/s)

4 粉末流温度场试验检测

为验证数值模拟的准确性,采用 CCD 比色测温方法对熔覆中的粉末流整体进行温度检测。如图10所示,粉末流整体温度检测系统主要由 CCD 摄像机、采集卡、计算机以及自主开发的专用温度计算软件等组成。

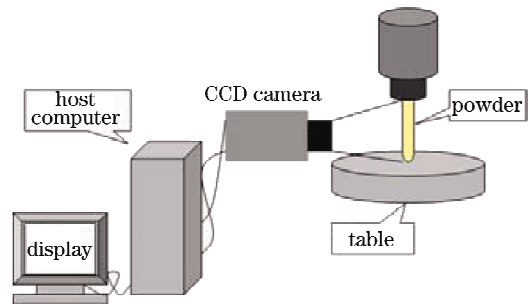


图10 粉末流整体温度测量系统

Fig. 10 Temperature measurement system for whole powder stream

激光与粉末流相互作用,粉末流在吸收激光能量的同时以吸光整体向外辐射能量,通过 CCD 采集辐射图像,利用软件提取绿色和蓝色灰度值信息,计算得到比色值 $R(R = H_g/H_b)$ 。通过比色值与温度的关系式,即比色测温公式^[14]

$$T = \frac{3.7193 \times 10^3}{0.6409 R^2 - 4.7888 R + 12.4191 - \ln R} \quad (4)$$

根据(4)式可得到图 11 所示的粉末流整体温度分布。

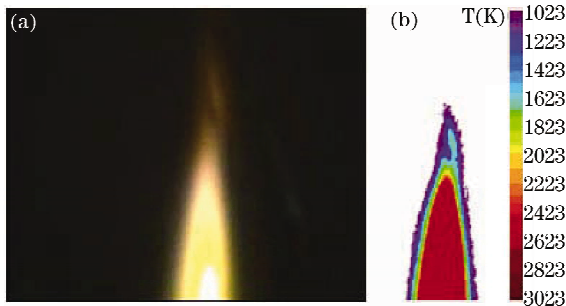


图 11 粉末流热辐射图像(a)及其 CCD 测量温度场分布(b)

Fig. 11 Hot radiation image (a) and its CCD temperature color cloud

当激光功率 $P = 1100 \text{ W}$,粉末流速度 $V_p = 4 \text{ m/s}$ 时利用 CCD 测量粉末流温度,如图 12 所示。从图中试验数据可以看出,在出粉口处由于粉末流并未进入激光束中,故在 $z < 5 \text{ mm}$ 时粉末流温度较低;沿下落方向粉末流逐渐进入激光束中,随着与激光束作用时间的增加,粉末流吸收的能量也在增加,在 $5 \sim 20 \text{ mm}$ 之间,粉末流整体温度处于上升趋势。从图 12 中可以看出,模拟结果与测量结果的别差不大,大约 $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,该误差对激光熔覆作业的温度模拟应用影响不大。

在升温区域内,粉末温度不断升高,当温度升高至 $1434 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始熔化,激光熔覆要求粉末流具有高利

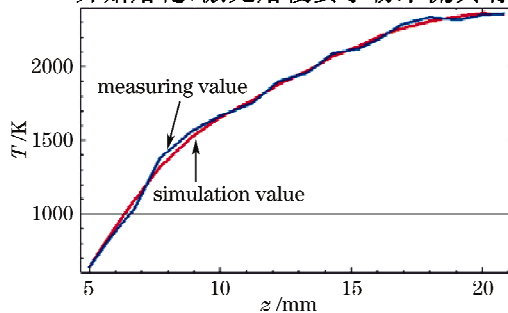


图 12 粉末流沿粉嘴方向的温度模拟值和测量值比较
Fig. 12 Comparison of temperature distribution along axis between simulation and CCD measuring

用率,故应该有效控制参数,以便优化粉末的利用率。

图 13 是在相同激光功率、不同速度下粉末流温度分布试验曲线。可以看到粉末流速度对温度影响很大,速度越小的粉末流温度升高的越快,温度最大值也越高;当粉末流速度从 3 m/s 上升至 5 m/s ,在 17 mm 处,温度随之上升了约 900 K 。

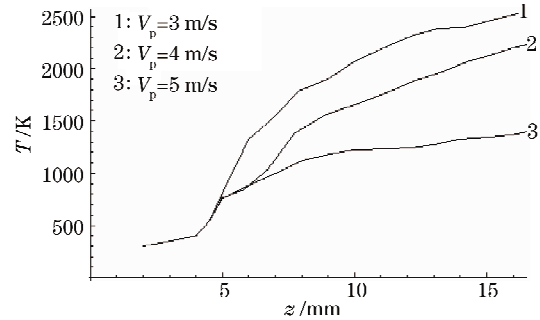


图 13 不同粉末流速度下粉末流沿轴线温度分布($P=1100 \text{ W}$)

Fig. 13 Curves of temperature distribution along z -axis at different velocities($P=1100 \text{ W}$)

图 14 为粉末流速度相同条件下不同激光功率对粉末流温度分布影响的试验曲线。可以看出,随着激光功率的增加,粉末流的温度也随之增大。这是因为,激光功率越高提供给粉末流的吸收能量越大。

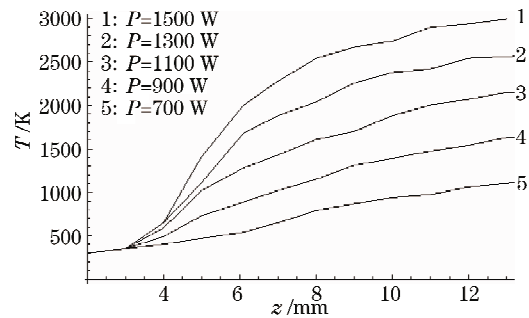


图 14 不同激光功率下粉末流沿轴线温度分布($V_p=4 \text{ m/s}$)

Fig. 14 Curves of temperature distribution of powder stream along z -axis at different laser powers($V_p=4 \text{ m/s}$)

5 结 论

1) 基于非预混燃烧理论,综合考虑激光束和粉末流两相之间的质量、动量和能量之间的相互作用,建立了激光作用条件下粉末流整体温度场的仿真模型。

2) 采用 Fluent 软件进行了粉末流整体温度场数值模拟,结果表明,沿粉嘴轴线方向,粉嘴出口粉末流温度最低,随着距离的增大温度快速上升,到粉

末流焦点(20 mm 左右)温度迅速增加至 2300 K;而从 20 mm~100 mm 的距离,粉末流的温度开始缓慢下降,至 100 mm 时降低到 700 K。激光工艺参数对粉末流整体温度值分布有很大影响:增大粉末流速度会减小粉末流的温度值,增大激光功率将引起粉末流的温度升高。

3) 利用 CCD 比色测温方法测试了粉末流整体温度值分布,结果表明,测量结果与模拟结果基本相符。数值模拟能准确可靠地给出粉末流整体的温度分布,对激光熔覆工艺选择具有实用价值。

参 考 文 献

- Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486
钟敏霖, 杨林, 刘文今等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 482~486
- Wu Jiang, Gao Bo, Tan Hua *et al.*. Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1139~1142
吴江, 高勃, 谭华等. 激光快速成形技术制造全口义齿钛基托[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1139~1142
- Jyoti Mazumder. Past present and future of art to part by direct metal deposition(CD-W0152_301) [C]. Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Melbourne Australia, 2004: 11~19
- Jehnming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8): 565~570
- 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 laser beam and alloy powders in powder feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **25**(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, **25**(3): 280~284
- 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
- Dong Zhe, Yang Xichen. Research of scattering intensity with spherical particles in laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1296~1300
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
- Jehnming Lin. Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Laser Applications*, 2000, **12**(1): 28~33
- Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in process of laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 442~446
陈静, 谭华, 杨海鸥等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 442~446
- Li Li, Yang Xichen, Dong Ze. CCD measurement of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2431~2437
栗丽, 杨洗陈, 董哲. 激光熔覆中同轴粉末流温度场 CCD 检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2431~2437
- Han Zhanzhong. Examples and Applications of FLUENT in Fluid Engineering Simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. 27~199
韩占忠. FLUENT-流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社
- 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
- 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**(S1): 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**(S1): 354~356