

同轴送粉喷嘴气固两相流流场的数值模拟

张安峰, 周志敏, 李涤尘, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在激光金属直接制造过程中, 为获得较小特征尺寸和组织致密的熔覆零件, 采用气固两相流理论对载气式同轴送粉喷嘴的内外流场进行了数值模拟, 应用 FLUENT 软件中的离散相模型计算了粉末的流场浓度分布规律及汇聚特性. 计算结果表明, 同轴送粉喷嘴的焦点浓度在径向和轴向都近似服从高斯分布, 在同轴送粉喷嘴锥角不变时, 锥环间隙越小, 粉末流场焦点处的浓度越大, 聚焦半径和焦距越小, 汇聚特性就越好. 在同轴送粉喷嘴锥环间隙不变时, 锥角过大或过小均不利于粉末汇聚, 选择最佳锥角有利于获得最佳汇聚特性. 在其他条件不变时, 外层保护气体流速过大或过小也不利于粉末汇聚, 当外层保护气体流速为 6 m/s 时, 同轴送粉喷嘴粉末的汇聚特性最佳. 因此, 所建模型和模拟结果对同轴送粉喷嘴的设计和结构优化具有参考价值.

关键词: 激光金属直接制造; 同轴送粉; 气固两相流; 数值模拟

中图分类号: TN248; TH16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1169-05

Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Flow Field on Coaxial Powder Nozzle in Laser Metal Direct Manufacturing

ZHANG Anfeng, ZHOU Zhimin, LI Dichen, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the laser metal direct manufacturing, gas-solid two-phase flow theory is considered to simulate the inside and outside flow field of coaxial powder nozzle with carrying gas to obtain cladding parts of less characteristic size and compact structure. The separate model in FLUENT is used to evaluate the concentration distribution and the powder focusing characteristics of the powder flow field. The computed results indicate that the focal point concentration of the coaxial powder nozzle in radial direction and axial direction is approximately obeyed by the Gaussian distribution. When the cone angle of a coaxial powder nozzle is invariable, the cone ring gap is smaller, the focal point concentration in the powder flow field is bigger, the focus radius smaller, the focal distance also smaller, the gathering characteristic better. When the cone ring gap of the coaxial powder nozzle is invariable, the cone angle getting too big or too small is harmful for powder gathering, choosing the best cone angle facilitates obtaining the best gathering characteristics. When other conditions are invariable, too large or too small protect gas velocity is harmful for powder gathering. When the protect gas velocity approaches to 6 m/s, the gathering characteristic of the coaxial powder nozzle achieves the best.

Keywords: laser metal direct manufacturing; coaxial powder feeding; gas-solid two-phase flow; numerical simulation

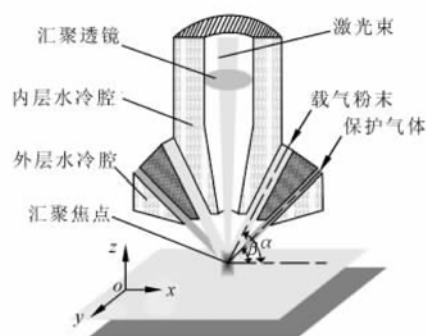
激光金属直接制造(LMDM)技术^[1-3]是近几年兴起的先进制造技术, 是在快速成型技术的基础上,

采用激光或电子束等作为热源,以预置或同步供给金属粉末(丝)为成形材料,在金属基体上逐层堆积形成金属零件的制造技术.在激光金属直接制造中,同轴送粉喷嘴是实现激光三维直接制造的关键技术之一,它主要依靠气体动能把粉末均匀、稳定地输送到激光熔池中.在同轴送粉中,粉末流场与激光束同轴输出,克服了侧向送粉只适合线形轨迹运动而不适合于复杂轨迹^[4]运动的缺点,能够将粉末均匀分散成环形,经再汇聚后送入聚焦的激光光束熔池中,并能很好地适应扫描方向的变化,因此具有激光金属直接制造技术所需要的各向同性功能.

本文重点研究了同轴送粉喷嘴锥角、锥环间隙和保护气体流速对粉末流场汇聚特性的影响,采用离散相模型对粉末流场进行数值计算,同时应用 FLUNT 软件计算同轴送粉喷嘴粉末的聚焦特性,并分析了粉末流场浓度的分布规律及粉末流场参数的变化规律.

1 载气粉末在喷嘴流场中的数值模型

如图 1 所示,在 LMDM 中,同轴送粉喷嘴是由与激光束轨道同轴的 2 个锥环间隙 H 形成的送粉轨道,通过气流作用,使粉末汇聚在激光束焦点处. Lin 等人^[5]研究了 Re 为 2 000 时的同轴送粉喷嘴内的气粉两相流流动,计算表明,距喷嘴约 5 mm 处的粉末汇聚浓度达到了最大值 (0.315 kg/m^3). 在载气式同轴送粉系统中,金属粉末流存在能量、动量和质量的输送物理过程中,并直接决定激光制造零件的尺寸、精度和性能,因此需要对金属粉末流场进行深入的研究,而国内外在这方面的研究^[6-7]较少.



α, β : 分别为载气粉末、保护气体与水平方向的夹角

图 1 同轴送粉喷嘴的工作原理

在本文研究的离散相模型中,运用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对气相进行求解,而离散相的求解则是通过建立颗粒轨道模型、求解颗粒运动学方程来获得.

在 FLUENT 软件计算中做如下假设:①离散相模型中颗粒运动是稳态的,气、粉具有相同的速度和均匀的流场;②不考虑激光束对颗粒的热影响,忽略传热计算;③只考虑惯性力和重力的影响,忽略附加质量力、升力等;④不考虑颗粒之间的碰撞,不存在颗粒压力和颗粒黏性.

1.1 气相湍流控制方程

在离散相模型中,压缩气体为理想气体,忽略激光束对颗粒的热影响,湍流基本控制方程包括连续性方程和动量方程^[8]. 湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 模型,该模型由 Launder 和 Spalding^[9] 于 1972 年提出,在模型中, k 方程和 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: μ_t 是湍流黏度; G_k 是由平均速度梯度而引起的湍流动能; G_b 为浮力引起的湍流动能; Y_M 表示可压湍流中脉动扩张的贡献; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 $k-\epsilon$ 模型所对应的湍流普朗数; C_1, C_2 为经验常数; ρ 为压缩气体的密度; k 为湍动能; μ 为流体的动力黏度; ϵ 为耗散率; 下标 i 和 j 为采用张量指标形式表示的时均连续方程. 根据 Launder 等的推荐值及后来的试验验证, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$.

1.2 颗粒相轨迹计算方程

在 FLUNT 软件中,通过积分拉格朗日坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨道. 颗粒的作用力平衡方程在笛卡儿坐标系下的形式(x 方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

式中: u 为压缩气体速度; u_p 为粉末的速度; g_x 为 x 方向的重力加速度分量; F_D 为粉末单位质量的曳力; ρ_p 为粉末密度; F_x 为其他作用力. 在式(3)的计算中,忽略了热泳力(考虑传热时)、布朗力(处理亚观尺寸颗粒时)和 Saffman 升力(处理亚观尺寸颗粒时),只考虑了视质量力(由使颗粒周围流场加速而引起的附加质量力)和重力^[8].

2 送粉喷嘴粉末内外流场的数值求解

2.1 离散相模型及网格划分

应用 FLUNT 软件对离散相模型的多相流工

况进行数值模拟. 在 FLUENT 软件中, 当颗粒相体积分数小于 10% 时, 把颗粒作为离散相处理; 当颗粒相体积分数大于 10% 时, 颗粒相按拟流体处理. 在离散相模型中, 计算了在气体作用下颗粒的运动轨道以及喷嘴内、外部速度场和浓度场的分布, 根据喷嘴聚焦原理, 圆锥喷嘴为圆柱体. 利用轴对称模型建立了二维计算区域, 计算区域的大小为 50 mm × 55 mm, 内喷嘴的内锥角为 α , 外喷嘴的外锥角为 β , 喷嘴计算区域如图 2 所示. 由不同的喷嘴结构可以得到粉末的不同浓度场, 对不同锥环的间隙 ($H=1\text{ mm}, 1.5\text{ mm}, 2\text{ mm}$)、喷嘴内外锥角 ($\alpha, \beta=45^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 50^\circ$)、粉末颗粒的浓度分布情况进行了研究.

在喷嘴流场中, 不管是喷嘴内的压缩空气携带颗粒部分, 还是喷嘴外大气环境中的空气携带颗粒部分, 体积加载率 (单位时间内通过截面的颗粒体积与气体体积之比) 都很小, 远小于 10%. 当粒子平均间距很大时, 颗粒就可以看成是相互孤立的, 因此可忽略颗粒间的相互碰撞. 当送粉量为 12 g/min、载气压强为 3 MPa 时, 通过计算得到粉末在喷嘴内外的体积加载率分别为 0.007, 0.000 25. 采用遵循欧拉-拉格朗日方法的离散相模型, 流体相被处理为连续相, 再通过求解 Navier-Stokes 方程, 可计算出流场中大量粒子的运动规律并得到离散相.

对于轴对称的二维计算区域, 由于计算模型及边界条件都是完全对称的, 因此只需对 $\frac{1}{2}$ 的几何区域进行网格划分. 在 FLUENT 软件计算中, 区域分为流动和固体区域, 由几何模型可以看出, 流动区域是不规则的, 不能使用结构网格直接划分, 因此考虑把流动区域划分为 6 个规则的小区域, 对每个小区域进行结构网格划分, 最后再组合成一个大区域. 同时, 为了保证几何的对称性, 加入了固体区域, 但计算时不进行热耦合计算, 因此不会对流体区域的计算造成影响.

在划分网格时, 由于采用了标准 $k-\epsilon$ 模型, 对于近壁区域采用壁面函数法来处理湍流情况, 在外层保护气体通道区域进行网格划分时, 不需要在壁面区域进行网格加密, 只需把第 1 个内节点布置在对数规律成立的区域内, 即配置到湍流充分发展的区域. 引入归一化参数

$$y^+ = \frac{\Delta y_p (C_\mu^{1/4} k_p^{1/2})}{\mu} \quad (4)$$

式中: k_p 是节点 P 的湍动能; Δy_p 是节点 P 到壁面的距离; C_μ 是经验黏度常数; μ 是流体的动力黏度.

当与壁面相邻的控制体单元节点满足 $y^+ < 11.63$ 时, 控制体内的流动处于黏性底层. 根据本文初始计算条件, 初步计算结果可得出 $k_p = 3$, 氮气的 $\mu = 1.663 \times 10^{-5}$, $C_\mu = 0.09$, 代入式 (3) 可以求出 $\Delta y = 0.2\text{ mm}$.

当网格第 1 个节点距边界层为 0.2 mm 时, 可使网格布置在湍流充分发展区域. 在划分网格时, 由于粉末在喷嘴外部汇聚, 因此外部发展流场的网格质量对于整个计算的收敛性以及计算速度十分重要. 当外部流场区域的网格数为 68 972、总的计算网格数为 87 124 时, 计算收敛. 当继续增加网格数时, 喷嘴外部汇聚处的浓度值将不再变化, 并得出与网格无关的解. 利用 FLUENT 中的前处理软件进行的网格划分如图 3 所示.

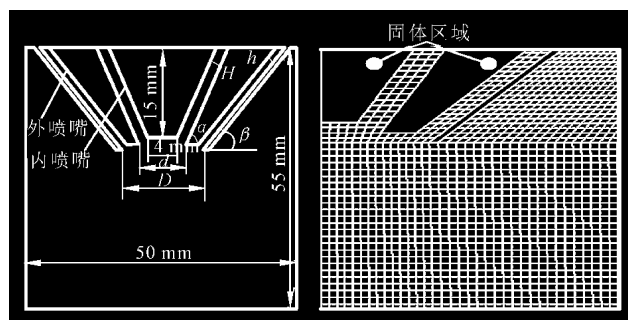


图 2 二维计算区域

图 3 网格划分

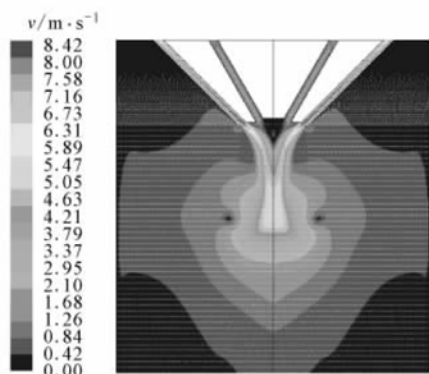
2.2 计算结果及分析

2.2.1 相同锥角、不同锥环间隙的影响 在气相计算中, 当载气速度为 1 m/s、外层保护气体速度为 6 m/s 时, 对于离散相模型定义颗粒相的速度为 1 m/s, 当以平面进口方式、送粉量为 12 g/min、平均粒径为 45 μm 时, 计算追踪到的粒数为 120 个. 若颗粒穿过流体, 并且颗粒相引起气相不再变化, 可认为整个计算过程收敛, 且忽略颗粒之间碰撞的影响, 计算结果如图 4 所示.

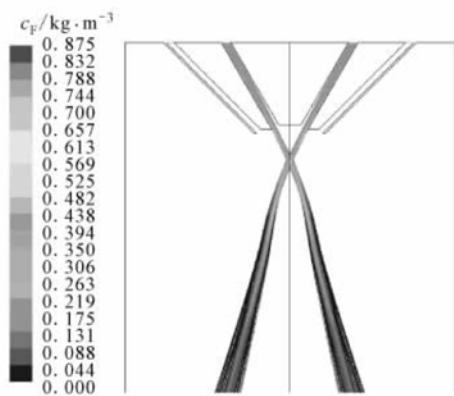
计算机的模拟结果如图 5 所示, 沿 x 方向 (以粉末汇聚中心为原点的圆周半径) 和 z 方向 (以喷嘴出口为原点的沿轴线距离) 上的浓度分布均服从高斯分布, 不同 H 对粉末汇聚处的质量浓度 C_F 的影响见表 1. 比较 3 种不同 H 的计算结果, 当 $H=1\text{ mm}$ 时, 焦点处的最大 C_F ($C_{F\text{max}}$) 为 0.966 0 kg/m^3 , 焦点半径 r 为 4.2 mm; 当 $H=1.5\text{ mm}$ 时, $r=0.8\text{ mm}$, 焦距 $f=4.9\text{ mm}$, 焦点处的 $C_F=0.779\text{ 2 kg/m}^3$. 因此, 在相同锥角下, 随着 H 的减小, 焦点处的 C_F 增

表1 不同 H 对 c_F 分布的影响

H/mm	$c_{F\text{max}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	f/mm	r/mm
1.0	0.966 0	4.2	0.70
1.5	0.779 2	4.9	0.80
2.0	0.660 0	5.4	1.16

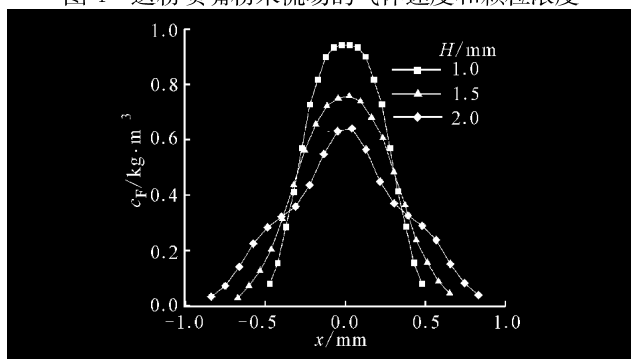
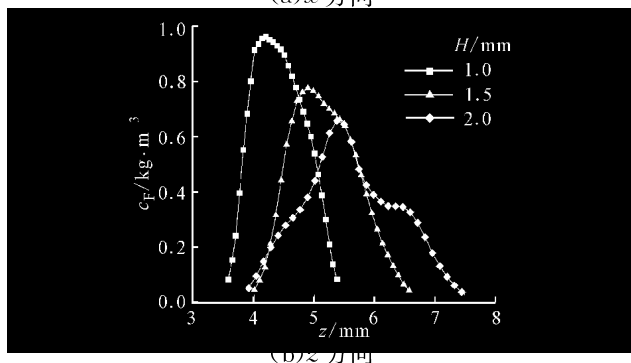


(a) 气体速度云



(b) 颗粒浓度分布

图4 送粉喷嘴粉末流场的气体速度和颗粒浓度

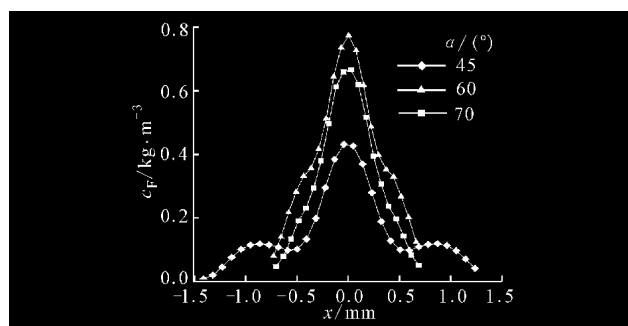
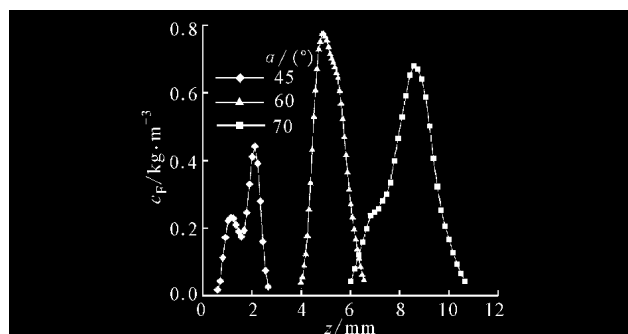
(a) x 方向(b) z 方向图5 H 对2个方向粉末质量浓度分布的影响

大, r 却越来越小, 考虑到当 r 太小时, 喷嘴下端距离激光熔池很近, 熔池内的热量对喷嘴的影响使得喷嘴温度上升, 从而导致喷嘴变形且喷粉受阻, 所以焦距不能太小. 根据实验, 焦距应为 5 mm 左右较合适, 因此选择 $H=1.5$ mm 为宜.

2.2.2 对送粉喷嘴粉末流场的影响 当 $H=1.5$ mm 时, 在不同喷嘴锥角下, 粉末焦点的质量浓度分布近似高斯分布, 如图 6 所示. 当 $\alpha=45^\circ$ 时, 焦点的汇聚特性比较差; 随着喷嘴锥度的增大, 即当 $\alpha=45^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 时, c_F 分别为 0.443 3、0.779 2 和 0.682 7 kg/m³. 可见, 不同 α 的喷嘴对粉末聚焦有很大影响, 当 $\alpha=60^\circ$ 时, 焦点的质量浓度值最大, 汇聚性也最好(见表 2).

表2 不同 α 对粉末质量浓度分布的影响

$\alpha/(\circ)$	$c_{F\text{max}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	f/mm	r/mm
45	0.443 3	2.1	0.3
60	0.779 2	4.9	0.8
70	0.682 7	8.6	0.7

(a) x 方向(b) z 方向图6 不同 α 对2个方向粉末质量浓度分布的影响

2.2.3 外层保护气体流速的影响 在喷嘴间隙和锥角一定时, 送粉量和载气速度保持不变的情况下, 模拟了外层保护气体流速对粉末汇聚特性的影响, 并选择 $H=1.5$ mm, $\alpha=60^\circ$, $\beta=45^\circ$ 的喷嘴结构. 当外层气体流速 $v=2, 4, 6, 8$ m/s 时, 焦点的质量浓度分布规律如图 7 所示.

为了获得较好的焦点汇聚特性, 载气粉末速度

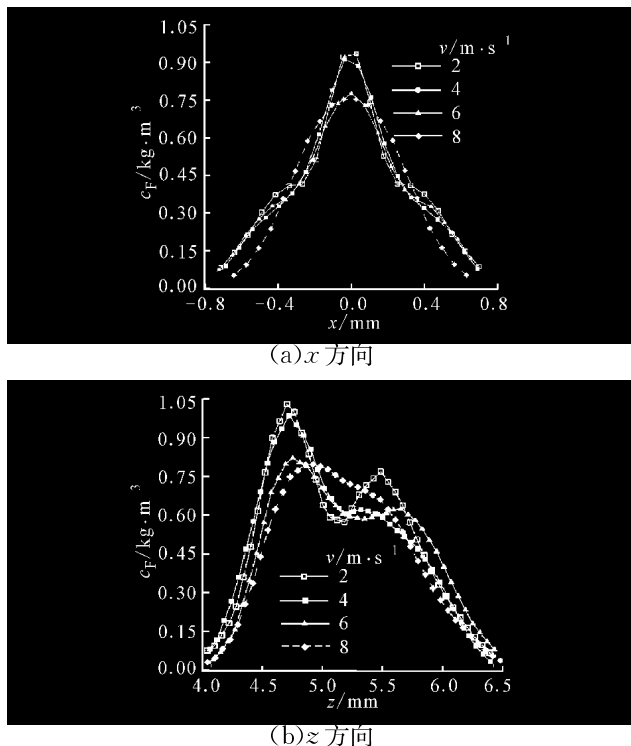


图7 保护气体不同流速对2个方向粉末质量浓度的影响

一般比较小,在气体的作用下,粉末受到了锥环通道的聚焦作用,而焦点的速度场比较均匀.通过上述计算可知,外层保护气体能够影响粉末在喷嘴外的汇聚,外层气体流速越大,粉末聚焦点的质量浓度分布越均匀,最大质量浓度值降低.在满足均匀性和峰值的要求下,即在送粉量为 12 g/min、载气速度为 1 m/s、外层气体为 6 m/s 时,送粉喷嘴粉末的汇聚性最佳.

3 结 论

本文采用气固两相流理论对载气式同轴送粉喷嘴的内外流场进行了数值模拟,应用 FLUENT 软件中的离散相模型计算了粉末流场质量浓度的分布规律和粉末的汇聚特性,并得出以下结论.

(1)同轴送粉喷嘴焦点的质量浓度在径向和轴向都近似服从高斯分布,在同轴送粉喷嘴的锥角大小一定时,锥环间隙越小,焦距也越小,而粉末流场焦点处的质量浓度值越大,聚焦半径越小,汇聚特性就越好.

(2)在同轴送粉喷嘴锥环间隙大小一定时,锥角越大,粉末汇聚焦点越均匀,但随着锥角的继续增大,汇聚特性随之变差.在本文的实验条件下,当喷嘴锥角为 60° 时,粉末流场的焦点浓度值最大,粉末的汇聚特性最好.

(3)在同轴送粉喷嘴锥角和锥环间隙一定、送粉

量和载气速度保持不变时,外层保护气体流速过大或过小都不利于粉末汇聚,外层气体速度为 6 m/s 时,送粉喷嘴粉末的汇聚性较好.

参考文献:

- [1] 张安峰,李涤尘,卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(5): 68-72.
ZHANG Anfeng, LI Dichen, LU Bingheng. Development of research on laser direct metal rapid prototyping technology [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 68-72.
- [2] 杨森,钟敏霖,张庆茂,等. 金属零件的激光直接快速制造 [J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(4): 234-238.
YANG Sen, ZHONG Minlin, ZHANG Qingmao, et al. Directly rapid fabrication of metal components by laser cladding [J]. Powder Metallurgy Technology, 2002, 20(4): 234-238.
- [3] 张魁武. 国外激光熔覆应用和直接熔覆金属零件及梯度材料制造 [J]. 金属热处理, 2002, 27(9): 1-4.
ZHANG Kuiwu. Industrial applications of laser clad and laser deposited metal parts and graded materials [J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(9): 1-4.
- [4] JENG Jengywan, PENG Shengchen, CHOU Changjiu. Metal rapid prototype fabrication using selective laser cladding technology [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(6): 681-687.
- [5] LIN Jehnming. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. Journal of Material Processing Technology, 2000, 105(1/2): 17-23.
- [6] 靳晓曙,杨洗陈,冯立伟,等. 激光制造中载气式同轴送粉粉末流场的数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 161-166.
JIN Xiaoshu, YANG Xichen, FENG Liwei, et al. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 161-166.
- [7] HENG P, FRANK L. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(2): 230-244.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 7-9.
- [9] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. London, UK: Academic Press, 1972: 127-133.

(编辑 管咏梅)