

文章编号: 1001-3806(2012)06-0719-05

激光熔覆沸腾式送粉器气固两相流数值模拟研究

韦俊尤^{1,2} 胡晓冬^{1,2} 姚建华^{1,2*}

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 激光加工技术工程研究中心 杭州 310014)

摘要: 为了改进激光熔覆沸腾式送粉器的性能,对送粉器的送粉过程运用 FLUENT 软件进行了 3 维非定常的气固两相流仿真。通过对比 Syamlal-O'Brien, Gidaspow, Mckeen 和修正的 Syamlal-O'Brien 曳力模型中 Ni 基合金粉末输送的模拟结果,发现 Mckeen 模型得到的粉末流量与实验值相符。利用 Mckeen 模型,分别对不同沸腾气流量进行计算,其平均的粉末流量也与实验值接近,从而确定了 Mckeen 曳力模型适用于该类送粉器的数值模拟;并分析了 2.6L/min 的沸腾气流量下的气体与粉末的流化特性。结果表明,沸腾进气口 2 对送粉的影响不大,关闭该气流入口也可得到很好的送粉结果。这为激光熔覆送粉器结构改进和优化提供了理论依据。

关键词: 激光技术; 气固两相流; 数值模拟; 沸腾式送粉器; 曳力模型

中图分类号: TF124; TG156.99 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.002

Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in fluidized bed based powder feeder for laser cladding

WEI Jun-you^{1,2}, HU Xiao-dong^{1,2}, YAO Jian-hua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the properties of fluidized bed based powder feeder for laser cladding, 3-D unsteady gas-solid two-phase flow during the powder feeding process was simulated with FLUENT software. The simulation results of Ni-based alloy powder feeding process in Syamlal-O'Brien, Gidaspow, Mckeen and modified Syamlal-O'Brien drag law model were compared, which show that the mass flow rate obtained from Mckeen drag model is consistent well with the experimental results. And the simulation results of different fluidizing gas flow rate also agree well with the experimental results, which indicate that Mckeen model is suitable to simulate this kind of powder feeder. Fluidizing characteristics of gas-solid flow rate in 2.6L/min were analyzed, which shows that fluidizing gas flow inlet 2 has little effect on powder feeding. Thus fine powder delivering characteristics can also be achieved without fluidizing gas flow inlet 2. Therefore, the numerical simulation in Mckeen model can provide a theoretical basis for optimization of powder feeder for laser cladding.

Key words: laser technique; gas-solid two-phase flow; numerical simulation; fluidized bed based powder feeder; drag law model

引言

目前,在激光熔覆中常用到的送粉器有刮吸式送粉器、螺旋式送粉器、载气式送粉器等,有些已得到广泛的应用,但它们都存在着各方面的不足,如有粉末流

量不均匀、容易堵粉、机械部件容易磨损等缺陷^[1]。为此,设计流量均匀且易于控制、尽量减少机械运动部件的送粉器变得十分重要。作者研究的这类基于气固两相流设计的沸腾式送粉器,完全由气流对粉体进行流化并输送,没有运动的部件,因而具有较高的可靠性,并易于实现自动化控制。

基金项目: 国家国际科技合作项目资助项目(2011DFR71030); 浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室开放研究基金资助项目(2011EM009)

作者简介: 韦俊尤(1986-),男,硕士研究生,现主要从事激光熔覆送粉器气固两相流模拟方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

收稿日期: 2012-03-15; 收到修改稿日期: 2012-03-27

国内外学者在激光加工的送粉系统的研究中,基于计算流体力学软件的仿真多用于粉末喷嘴部分,对粉末流的形状、聚焦、载气的影响等进行分析^[2-4]。而对于送粉仓内粉末流化并输送的部分,运用计算流体力学仿真进行研究的成果还比较少。本文中运用 FLUENT 软件欧拉两相流模型,对送粉器粉仓内粉末

流化和输送过程进行模拟,通过送粉模拟的结果与实验进行对比,确定适用于该类送粉器的数值模型,并在此基础上对送粉器内部流场进行分析。

1 气固两相流模拟的数值模型

在气固两相流中,欧拉模型将颗粒相看成具有类似流体的连续性介质,因而每一项动量和质量守恒都可以用单相流的理论来处理,并引入相间相互作用和体积分数等概念使得守恒方程封闭。该模型现已广泛地应用于气泡柱、上浮、颗粒悬浮、以及流化床等的模拟与验证^[5-6]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_q + \sum_{p=1}^n (\mathbf{F}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{\text{lift } q} + \mathbf{F}_{\text{VM } q}) \quad (2)$$

式中 α 为空隙率, ρ 为密度, \mathbf{v} 是速度矢量, \dot{m}_{pq} 表示 p 相到 q 相的质量传递, $\boldsymbol{\tau}_q$ 为 q 相的压力应变张量, p 是所有相共享的压力, \mathbf{F}_q 是外部体积力, $\mathbf{F}_{\text{lift } q}$ 是升力, $\mathbf{F}_{\text{VM } q}$ 是虚拟质量力, \mathbf{F}_{pq} 是相之间的相互作用力, 可表示为 $\mathbf{F}_{pq} = K_{pq}(\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q)$, K_{pq} 指相间曳力系数。

目前有关双流体模型相间相互作用的研究已有较多的报道。而与颗粒相运动相关的作用力中,曳力的作用尤为突出,它作为气固两相流中使颗粒加速运动的唯一作用力,直接关系着数值计算结果的准确性。FLUENT 软件提供的 Syamlal-O'Brien, Gidaspow 和 Wen-yu 等均为经验或半经验曳力模型^[7],能广泛应用于多种工况。而之后也发展出新的曳力模型或修正的模型,如 Di-Felice 基于离散型模型提出曳力模型; Koch-hill 基于格子玻尔兹曼方法推导出纯数学模型,其抛弃了阻力系数的概念^[8]。

Syamlal-O'Brien 模型曳力与固体的最小流化速度 v 相关,其速率 v 表示为:

$$v = \frac{1}{2} \times$$

$$\left[a - 0.06Re + \sqrt{(0.06Re)^2 + 0.12Re(2b - a) + a^2} \right] \quad (3)$$

式中 Re 为雷诺数, $a = \alpha_g^{4.14}$, 当 $\alpha_g < 0.85$ 时, $b = 0.8\alpha_g^{1.28}$, 否则 $b = \alpha_g^{2.65}$, 该模型对多数流速低的工况均出现曳力过大等现象, ZIMMERMANN^[9] 提出基于最小流化速度对该模型进行了修正。对临界流化速度低的 A 类流化催化裂化颗粒进行仿真,其结果也得到了

实验的验证。

由于流态化过程中颗粒相的团聚导致曳力减小,因而 McKEEN 提出在 Gibilaro 模型的基础上引入了一个常数修正因子 C , 其表达式如下^[10]:

$$K_{g,s} = C \left(\frac{17.3}{Re_s} + 0.336 \right) \rho_g \frac{v_s - v_g}{d_s} \alpha_s \alpha_s^{-1.8} \quad (4)$$

式中, C 为 0.15 ~ 1 之间的常数, d_s 为粉体颗粒直径,该模型中曳力是对雷诺数的连续性函数。且 McKEEN 对 A 类颗粒的仿真结果与实验相符。

因此,根据本文中研究的实际情况,需要输送的粉末粒径(90 μm)属于 A 类颗粒粒径范围,用于粉末沸腾的气流流速为 0.02m/s 左右,镍基合金粉末密度远大于气体密度等特点,McKeen 曳力模型和 ZIMMERMANN 提出针对 Syamlal-O'Brien 模型的修正所应用的工况与本文中的相似,因此,通过自定义程序接口将修正的曳力模型应用到数值模拟中。

结合 McKEEN 对 A 类颗粒的研究结果和本实验所用激光熔覆合金粉末的特点,参量 C 将在 0.8 左右选取恰当的值进行仿真。并根据参考文献[9]中的计算方法,采用当 $\alpha_g < 0.85$ 时, $b = 0.254\alpha_g^{1.28}$, 否则 $b = \alpha_g^{2.65}$ 对 Syamlal-O'Brien 模型的 v 进行修正。将各个模拟结果与实验所得的出口粉末流量进行对比,以确定适用于该类送粉器模拟的数值模型。

2 送粉器的模型与参量设置

沸腾式送粉器是通过两个沸腾管路的气体使送粉器内的粉末达到临界流化以上,粉末通过小孔输送到送粉管路中,送粉管路的气流对粉末加速并送到相应的激光加工喷嘴的过程。其示意图如图 1 所示。

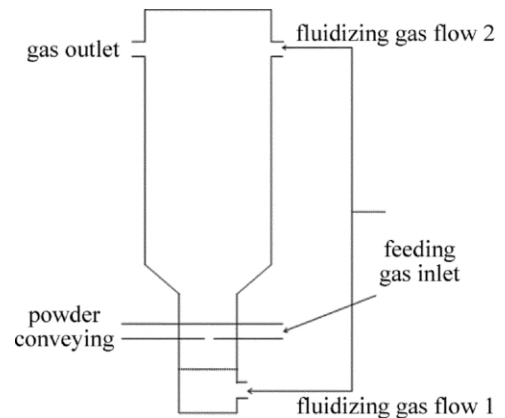


Fig. 1 Section of fluidized bed powder feeder

根据实验所用的送粉器,建立等尺寸的 3 维模型,对不同区域分别画上结构与非结构网格,并对关键部位进行网格加密。送粉器对粉末输出的精度要求比较高,因此,利用双精度求解器进行计算。

在进行送粉实验时,只调整沸腾回路的气流量,而

沸腾进气口 1 和沸腾进气口 2 之间的流量分配则通过实验进行测定,其结果如图 2 所示,从而在数值模拟中可根据其线性拟合的比例关系分别对上下气流入口进行流量设定。

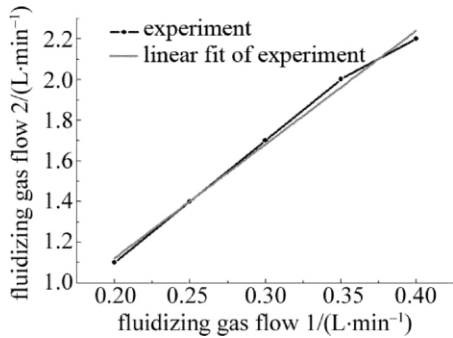


Fig. 2 Flow rate distribution of fluidizing gas 2

3 模拟结果与讨论

3.1 不同曳力模型下的送粉流量模拟

针对沸腾气路流量 2.83L/min 输送气流量 2.4L/min 的测试条件,分别采用 Syamlal-O' Brien, Gidaspow 模型、Mckeen 模型和修正的 Syamlal-O' Brien 模型对送粉过程进行计算仿真。

运用欧拉模型,以空气为气相,激光熔覆常用的镍基合金粉末为固相。其它参量设置如表 1 所示。

Table 1 Other parameters of powder feeding simulation

powder density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8800
packing limit	0.63
gas density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.225
gas viscosity/($\text{kg} \cdot \text{ms}^{-1}$)	1.79×10^{-5}
powder diameter/ μm	90
time step size/s	0.0003
the initial powder packing height/mm	80
the initial volume friction of powder	0.6

每 5 个时间步记录一次出口流量,送出的粉末流量随时间变化如图 3 所示,在粉末输送起始阶段,粉末流量波动性较大,2s 后流量基本稳定在一定范围内,分别求 2s ~ 11s 的平均送粉流量,其结果见表 2。

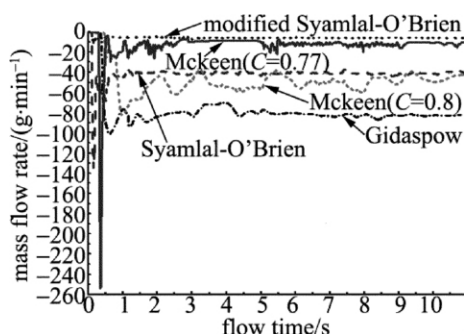


Fig. 3 Mass flow rate of powder with different drag law model

Table 2 Simulation results of different drag law model

drag model	mass flow rate of simulation/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	experiment result/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	relative error/%
Gidaspow	81.1	13.2	514
Syamlal-O' Brien	40.8	13.2	209
modified Syamlal-O' Brien	5.88	13.2	54
Mckeen($C=0.8$)	50.2	13.2	280
Mckeen($C=0.77$)	13.4	13.2	1.5

可见 Syamlal-O' Brien, Gidaspow 模型仿真结果得到的送粉量都偏大,与许多文献中这两模型的固相体积分数大于实际情况相符合。而由 ZIMMERMANN 提出修正的 Syamlal-O' Brien 模型所得到的送粉量比实验值小。

Mckeen 模型在 $C=0.8$ 的情况下得到的送粉量偏大, $C=0.77$ 时得到的送粉量与实验值最接近。通过对比其模拟结果的颗粒相速度矢量分布, $C=0.8$ 时颗粒输送出得最高速率为 3.46m/s,而 $C=0.77$ 时颗粒最高速率为 2.3m/s,可见常数 C 越小,相应曳力也越小,粉末速率低,其沸腾进入送粉管中的较少。且激光熔覆送粉的流量 g/min 是很小的单位,因而以上不同的曳力模型得到的结果相差较为明显。

3.2 不同沸腾气流量下的模拟结果

在 Mckeen 模型中,选 $C=0.77$ 结合实验测量的参量,分别对沸腾气路总气流量选择 1.9L/min, 2.36L/min, 2.6L/min, 2.83L/min, 3.1L/min, 送粉气路流量固定为 2.4L/min 进行数值计算。在粉末输送稳定后,不同沸腾气流下得到的粉末流量平均值如图 4 所示,模拟的平均输送流量与实验值基本相符,尤其是在沸腾气流在 2.2L/min ~ 2.8L/min 之间时。可见 Mckeen 模型在 $C=0.77$ 时最适用于该类送粉器的模拟。

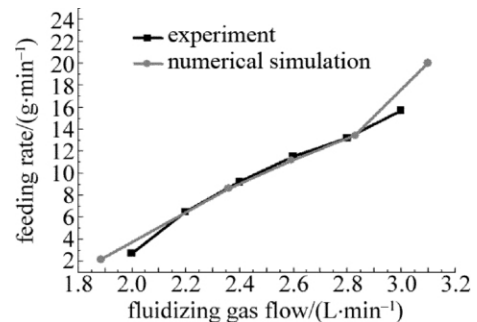


Fig. 4 Comparison between simulation and experiment results

4 送粉仓内粉末流化与传输特性

对 2.6L/min 沸腾进气量的模拟结果进行分析,图 5 从左到右分别对应 0s, 5.4s, 10.8s 3 个状态的粉末体积分数分布图,可见 10.8s 时的流场与 5.4s 类似,粉末的沸腾已相对稳定,但由于气体对粉末进行沸腾

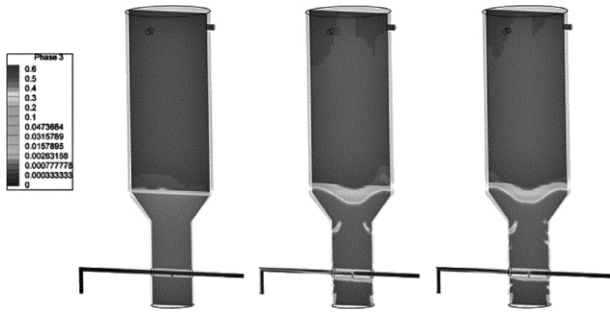


Fig. 5 Powder volume fraction of x-y section in different time

时,类似于流化床,床层的涨落会导致送粉流量存在一定的波动。这会在一定程度上影响送粉的均匀性,从而使送粉器使用的可重复性下降。

10.8s时颗粒相的速率分布如图6所示,粉末颗粒在小孔附近得到较大的加速度,进入输送管道后在直角弯处达到约2.2m/s。但由于直角弯管的存在,使得颗粒碰撞后速率有所降低,浓度变大。因此,这是容易在管内造成堵粉的地方之一,应减少直角弯管的使用。

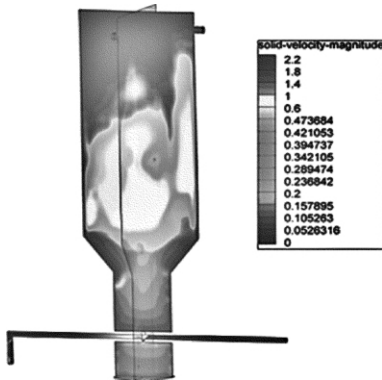


Fig. 6 Solid velocity contours of x-y and y-z section

图7上部分为气体从沸腾进气口2到气流出口的3维气流迹线图,在下部分显示了粉末相的体积分数分布。可见沸腾进气口2的气体在沿送粉器左壁向y轴负方向流动,在遇到粉末床层后,没再往粉末床层内部流动,而在送粉器中心转向y轴正方向流动,最后从上端气流出口流出。因此,图6中送粉器粉末层上方的粉末浓度分布主要是这路气体向y轴正方向流动时

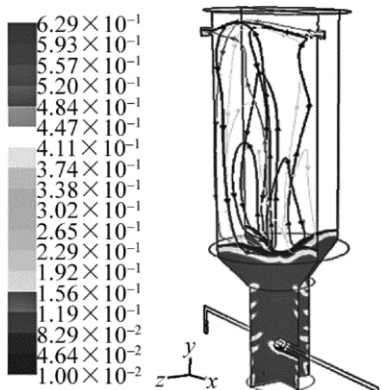


Fig. 7 Pathlines of fluidizing gas flow 2

所吹起的。该路气体只在粉末堆积层上方流动,并未直接参与对粉末的沸腾和输送。

为此,本文中对沸腾进气口2做了调整,将送粉器上端沸腾进气口2和气流出口均做完全封闭处理,仅在沸腾进气口1输入气体对粉仓中的粉末进行沸腾,气流量为0.4L/min,输送气流为2.4L/min。送粉模拟的粉末流量随时间变化结果见图8,从2s~12s间的平均流量为8.53g/min,流量的稳定性较好,且如果保留送粉器上方的气流进出口,输送同样流量的粉末则需要约2.4L/min的沸腾气流。可见,对沸腾进气口2进行流量调整,也可得到较好的送粉效果,同时降低了所需的输送气流量,降低了成本。

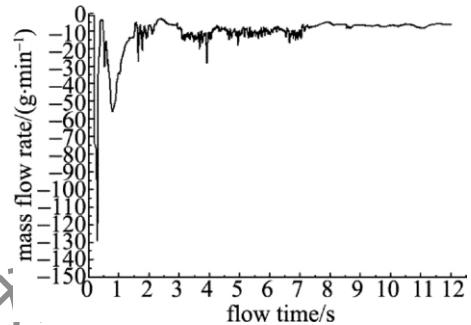


Fig. 8 Numerical result after modified the fluidizing gas flow

5 结论

选择不同的曳力模型进行计算和对比,McKEEN提出的曳力系数模型在C=0.77时得到的送粉量与实验相符,是适用于沸腾式送粉器送粉过程模拟的曳力模型,一定程度上反映了送粉器内部的颗粒动力学行为,也为激光熔覆粉末输送各个阶段的仿真提供了可靠的数值模型。

通过对送粉器内的气流特性及粉末沸腾情况的分析,发现沸腾进气口2并未直接对输送的粉末起到沸腾或传输的作用,因此,通过调整沸腾进气口2及气流出口的参量进行仿真,也可得到较好的送粉效果,并减少了送气流量,为全面了解该类送粉器的性能及其改进其结构提供了理论基础。

参考文献

- [1] HU X D, MA L, LUO Ch. Research status of powder feeder for laser cladding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(9): 46-49(in Chinese).
- [2] ZHANG A F, LI D Ch, ZHOU Zh M, et al. Numerical simulation of powder flow field on coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2010 49(9/12): 853-859.
- [3] DONG Ch H, YAO J H, HU X D, et al. Three dimensional numerical simulation of coaxial powder feeding flow with carrying gas[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 261-265(in Chinese).
- [4] ZEKOVIC S, DWIVEDI R, KOVACEVIC R. Numerical simulation

and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2007 47(1): 112-123.

[5] WANG W W , ZHOU Zh T , CHEN G H , *et al.* Research and development of simulation for fluidization process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress 2011 30(1): 58-65(in Chinese) .

[6] ZHANG K , BRANDANI S. CFD simulation of particle-fluid two-phase flow in fluidized beds [J]. CIESC Journal 2010 60(9): 2192-2207(in Chinese) .

[7] LIN L Ch , ZHENG Zh , CHEN W , *et al.* A simulation study of gas-solid two phase flow in a bubbling fluidized bed with various drag force modles [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology 2010 6(5): 390-398(in Chinese) .

[8] LI D Y. Study on gas-solid flow model of fluidized bed based on fluent software [D]. Chongqing: Chongqing University 2009: 14-18(in Chinese) .

[9] ZIMMERMANN S , TAGHIPOUR F. CFD modeling of the hydrodynamics and reaction kinetics of FCC fluidized-bed reactors [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research , 2005 44(26): 9818-9827.

[10] McKEEN T , PUGSLEY T. Simulation and experimental validation of a freely bubbling bed of FCC catalyst [J]. Powder Technology , 2003 129(1/3): 135-152.

• 简 讯 •

请向邮局订阅 2013 年度《激光技术》!

国内邮发代号: 62-74; 国内统一刊号: CN51-1125/TN

版权所有 ©

《激光技术》编辑部