

自适应 FGM 激光熔覆成形的粉体快速混合机理

辛 博, 程 光, 姚 俊, 巩亚东
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 多相粉体的快速、精确混合是自适应功能梯度材料 (A-FGM) 零件的成形基础. 为提高载气驱动下的粉体混合均匀性, 建立了气固两相流数值分析模型, 采用雷诺时均法进行数值模拟, 设计了一种载气驱动的快速混粉设备, 通过 ANSYS-FLUENT 分析了不同混粉参数和混粉器构型对混粉腔体内流场的影响规律, 并通过元素分析和图像处理实验测量了粉末混合的均匀度. 实验结果表明: 载气驱动下的合金粉体混合机制以对流混合为主, 提高粉粒的平均流速和位移能有效增加粉粒群的流动性, 提高粉体混合均匀度.

关 键 词: 自适应功能梯度材料; 激光熔覆成形; 粉体混合; 气固两相流

中图分类号: TB 44 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)08-1123-06

Powder Mixing Mechanism of Laser Cladding Forming for Adaptive FGM

XIN Bo, CHENG Guang, YAO Jun, GONG Ya-dong
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: XIN Bo, E-mail: xinbo@me.neu.edu.cn)

Abstract: Fast and accurate mixing of multiphase powder is the foundation of forming parts from adaptive functional graded materials (A-FGM). In order to improve the powder mixing homogeneity driven by gas, a numerical analysis model of gas-solid two-phase flow was established. The Reynolds time average method was used for numerical simulation. A kind of powder mixing equipment driven by carrier gas was designed. A finite element method based on ANSYS-FLUENT was used to analyze the effect of mixing parameters and configurations on the flow field in the powder mixer. The experiment for testing mixing homogeneity based on elemental analysis and image processing was designed. The results show that the gas-dynamic mixing mechanism of the alloy powders is mainly in convective mix. As the average velocity and displacement of the powders increase, the powder flowability can be improved to increase the mixing homogeneity.

Key words: adaptive functional graded materials (A-FGM); laser cladding forming; powder mixing; gas-solid two-phase flow

自适应功能梯度材料 (adaptive functional graded materials, A-FGM) 是由多种异性材料通过渐变过渡复合而成, 使零件不同区域满足不同功能需求的新型复合材料^[1]. 与传统功能梯度材料相比, A-FGM 材料适应度更高, 内部无明显界面, 减重的同时具有更好的力学性能, 其快速制造是高端飞行器和国防武器装备发展的关键技术^[2]. 针对 A-FGM 零件的制备, 采用实时送粉的激光熔覆成形技术优势显著^[3], 其送粉灵活易控, 适于复杂梯度结构的控形控性一体化制造; 而气力驱动的粉体快速、精确混合是激光熔覆成形 A-FGM 零件的基础和关键技术之一. 多相流快速混合过程中, 流型和相界面复杂多变, 具有强非线性, 对认清多相粉体的混合规律造成了阻碍, 增加了粉体均化控制的难度, 限制了 A-FGM 材料的成形性能和效率. 作者在 A-FGM 零件的混粉及熔覆成形实验中发现了大量未混合均匀的粉团, 粉体均化状态较差并产生偏析, 导致在两固相

结合面处存在气孔与裂纹缺陷,严重影响 A - FGM 零件的机械性能.

目前公认的粉体混合机理为对流、剪切和扩散作用^[4],使共混相在限定空间内随机均布,得到宏观均化的混合相. 现有的干粉快速混合方法主要为气力混合,其混合机制以对流为主,所需的驱动风速高于粉料的临界流化速度,适于混合弱黏性粉状细颗粒^[5]. 粉体颗粒尺寸的差异会影响混粉均匀性,提高粉粒直径的一致性可减小偏析程度,因此采用粒径差异较小的合金粉末有利于粉体均化^[6]. 目前气力混合的研究对象主要集中在内循环流化床、喷动床、鼓泡床等,在分析气流场和粉体属性对多相流型及混合效果的影响规律方面已取得诸多成果^[7]. 粉体混合过程的数值分析模型主要包括:连续介质模型、离散颗粒模型和流体拟颗粒模型^[8]. 由于粉体颗粒的流动表现为宏观上的连续性和微观上的离散性,描述气固系统的数学模型可分为宏观层的双流体模型和微观层的连续 - 离散模型,代表方法为计算流体力学和离散单元法(CFD - DEM)的耦合模型^[9],适于研究气力驱动的粉末混合行为^[10].

综上,现有研究较好地解释了多相粉体的混合机理,部分解决了混粉系统的控制问题,但面向激光熔覆成形的多相粉体的实时混合机理及混合工艺仍鲜有研究. 因此,本文首先建立载气驱动混合的气固两相流模型,设计了多级串列式混粉器,并通过 ANSYS - FLUENT 分析混粉器构型对混粉腔体内流场的影响规律. 实验中对对比分析了不同混粉器构型下的混合均匀度,验证了仿真模型的有效性.

1 气固两相流建模

气力驱动的粉体混合过程属于典型的气固两相流,可采用 CFD - DEM 耦合模型求解粉末颗粒的运动状态. 针对两相流中的连续相,由于混粉器主要流通区域为圆形管路,雷诺数通常大于 2 300,因此其流动状态为湍流运动. 对于湍流控制方程,采用雷诺时均法进行数值模拟,湍流为时间平均和瞬时脉动两种流动的叠加,采用雷诺时均 N - S 方程求解:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}) + S_i. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_i 和 u_j 为直角坐标中 i, j 方向的速度分量; μ 为载气的动力黏度; S_i 为自定义源项; u'_i 和 u'_j 为气体湍流脉动速度; ρ 为载气密度.

对混粉装置内流场进行数值计算时,由于标准 $\kappa - \varepsilon$ 模型的精确度相对较高,易收敛,可反映混粉装置内的流场情况,因此选择标准 $\kappa - \varepsilon$ 两方程湍流模型求解,湍流能 κ 和耗散率 ε 的方程为

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_\kappa. \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} + (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon. \quad (3)$$

式中: G_κ 为平均速度引起的湍流能产生项; G_b 为浮力引起的湍流能产生项; Y_M 为湍流中脉动扩张作用系数; σ_κ 为湍流 Prandtl 系数(取经验值 1.0); σ_ε 为与耗散率对应的系数(取 1.3); S_κ 和 S_ε 为自定义源项; $G_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数(取经验值 1.44, 1.9, 0.99); $\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \varepsilon$ 为湍流黏度系数, C_μ 为与平均应变率相关的系数,取经验值 0.09^[11].

针对离散相模型,由于载气驱动下的粉末流中,颗粒体积分数通常小于 10%,故将颗粒视为离散相,采用离散相模型. 载气视为连续相,采用 Euler - Lagrange 法求解. 离散相粒子动量方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x, \\ F_D &= \frac{3\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为曳力; F_x 为作用于固相颗粒上的其他力,由于颗粒以恒定速度进入混粉器后,在扰流板的作用下颗粒速度有剧烈变化,因此考虑 Basset 力; u_p 为颗粒速度; ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒平均直径,相对雷诺数 Re_p 和曳力系数 C_D 分别为

$$Re_p = \rho d_p |u_p - u| / \mu, \quad (5)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}. \quad (6)$$

式中 a_1, a_2, a_3 为 Moris, Alexander 设定的常数.

2 混粉流场仿真分析

基于提出的气固两相流模型,本节采用

ANSYS-FLUENT 流体仿真软件分析不同混粉参数和混粉器构型对混粉器内流场的影响规律。根据前期激光熔覆工艺实验获取的粉末输送经验参数,仿真初始参数设置包括:送粉率(送粉流量) $Q=13.88\text{ g/min}$,混粉腔进口速度 $v=1\text{ m/s}$,混粉腔拐角处的边界层数设为 5,单层增长率 1.2,扰流板数 $N=1\sim 3$ 。采用自适应网格划分法,扰流板及筛孔附近密化网格。

2.1 假设条件

建模与网格划分前,提出如下假设:①粉末颗粒为规则球形且忽略颗粒旋转;②载气不可压缩;③粒子和筒壁为弹性碰撞,不考虑粒子与壁面间以及粒子间的热量交换;④粉粒的直径相等,仅考虑重力、曳力、Basset 力,忽略其他力的作用。

2.2 混粉器设计

为实现气力驱动下的粉体快速混合,本文设计一种多级串列式混粉器,其混粉腔内布置多级可调的带孔扰流板(图 1),混粉器基本尺寸为:200 mm \times ϕ 80 mm,扰流板厚度 3 mm,相邻扰流板间距 48 mm,扰流板筛孔尺寸:8 mm \times ϕ 8 mm。

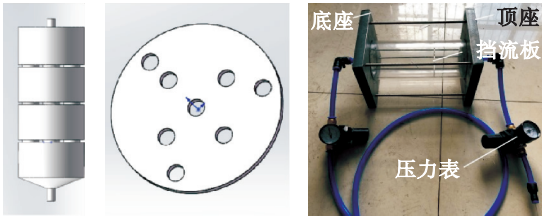


图 1 混粉器结构及带孔扰流板

Fig. 1 Powder mixer structure and spoiler with holes

2.3 仿真结果分析

安装不同数量扰流板的速度场云图及粉粒流

动迹线如图 2 所示。粉粒迹线图中,不同颜色代表不同粉粒的运动轨迹,在相同的运动时间下,运动迹线长度与速度均值正相关。由图可知,两相流体从粉管入口进入混粉器后,由于截面积增大而速度减小。带筛孔挡流板的增设改变了流体走向及流型,使得气流流被不断分流且流速逐级下降;并且可发现,混粉器内部速度场有环形的分布趋势,即加装扰流板后会对粒子产生阻碍作用,导致粒子产生大范围的位置移动,混粉器内部产生了粉末循环流,增强了粉末的对流混合过程。每增加一级扰流板就会增加一个速度激增点。

由图 2 的迹线分析还可发现,扰流板和混粉腔轴线两侧以及混粉器入口区域附近的粒子做回旋运动。随着扰流板数量的增加,回旋运动的趋势更明显。同时,增加扰流板层数使多相粉体在混粉腔内部进行循环流动并产生大规模位移,提高了对流混合作用,进而影响混合均匀度。

图 3 为以混粉器轴线长度中点位置为原点,沿轴线方向的粒子运动速率。根据图 3 和表 1,当扰流板数 $N=2$ 时,混粉器内流体的总体速度均值达到最大值 0.496 m/s,粉粒平均位移达到最大值 49.6 m。单块扰流板时,粉粒平均位移最短为 45.6 m。

3 实验及讨论

3.1 实验条件

实验采用自主设计的多级串列式混粉器,可通过调压阀调节进、出口载气的压强,通过多级带孔的扰流板增强混粉腔内的湍流作用。混粉前的粉末输送和混粉后的激光熔覆成形在SVW80C-3D

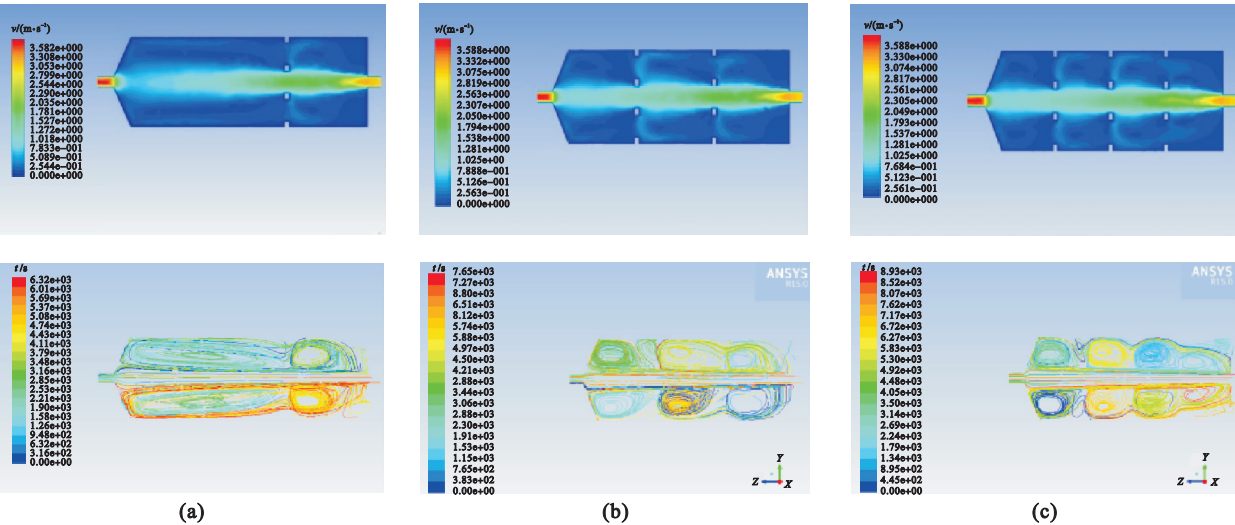


图 2 不同数量扰流板两相流速度场和粉粒迹线仿真结果

Fig. 2 Velocity and trajectory distribution of the two-phase flow under different number of spoilers

(a)— $N=1$; (b)— $N=2$; (c)— $N=3$.

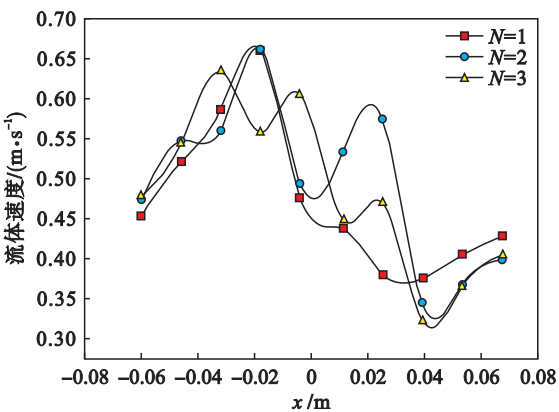


图 3 不同数量扰流板流体沿混粉器轴向的速度曲线
Fig. 3 Velocity curves along the axis of the powder mixer with different number of spoilers

表 1 不同数量扰流板粉粒的平均位移
Table 1 Average displacement of particles with different number of spoilers

扰流板数量	时间/s	平均速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位移/m
1	100	0.473	45.6
2	100	0.496	49.6
3	100	0.484	48.4

五轴增/减材复合加工中心完成. 混粉试样的均匀度分析由 Ultra Plus 场发射分析扫描电镜通过元素测量完成. 基于激光熔覆设备和工艺对粉体材料和粒度的要求,实验采用粒度为 $50\sim150\text{ }\mu\text{m}$ 且较经济的 316L 不锈钢粉末和 IN718 镍基高温合金粉末进行混合分析,316L 的化学组成为 $w(\text{C})\leq0.03\%$, $w(\text{Ni})=12\%\sim15\%$, $w(\text{Si})\leq1\%$, $w(\text{Cr})=16\%\sim18\%$, $w(\text{Mn})\leq2\%$, $w(\text{P})\leq0.035\%$, $w(\text{Mo})=2\%\sim3\%$, $w(\text{S})\leq0.03\%$;IN718 的化学组成为 $w(\text{C})\leq0.08\%$, $w(\text{Ni})=50\%\sim55\%$, $w(\text{Co})\leq1\%$, $w(\text{Cr})=17.2\%\sim21\%$, $w(\text{Mo})=2.8\%\sim3.3\%$, $w(\text{Ti})=0.65\%\sim1.15\%$, $w(\text{Al})=0.2\%\sim0.8\%$.

3.2 实验方案

为研究并验证扰流板数量及粉粒平均流速对两相合金粉末混合均匀度的影响规律,探究最优的混粉腔体构型,共设计 4 组混合均匀度分析实验,扰流板数 $N=1,2,3$ 为对比组,无扰流板构型作为参照组,每组混粉试样取 6 个样本,两相流初始参数设置同第 2 节混粉流场仿真分析.

3.3 混合均匀度测定原理

粉体颗粒的混合是随机、自由的混合状态,混合物中不同区域同相成分的含量存在差异,可采用统计学理论计算粉末的混合均匀度. 在实验后的混合粉体中取 n 个试样构成总体样本,每个试样中某元素的质量分数为 X_i ,通过计算该样本中某种元素质量分数的均值和标准偏差 S ,可求出

变异系数:
$$R=(S/\bar{X})\times100\% . \tag{7}$$

由式(7)可知,变异系数越大,混合均匀度越低. 由于 316L 和 IN718 粉粒的粒径、颜色相近,难以直接标记区分,因此采用间接测量方法计算混合均匀度. 不同粉粒的化学组成不同,可根据不同组成的元素含量及分布求解两种粉末的含量占比. 混合相的 SEM 图像通过 ImageJ 进行亮度区分并提取各相粉粒的数量,计算混合均匀度.

3.4 混合均匀度测定结果

图 4 为加装不同数量扰流板,316L 和 IN718 粉末按 1:1 混合后试样的 SEM 合成图,经图像处理后的 Fe,Ni 元素分布见图 5,计数后得到的实际粉末比例、理论同实际混合均匀度间的标准偏差,以及变异系数见表 2. 根据以上图表可知,无扰流板时变异系数达到最大值 10.98%,混合均匀度最低;扰流板数为 2 时,变异系数达到最小值 6.34%,混合均匀度最高. 对比仿真结果可知,扰流板数为 2 时,粉粒的平均速度及位移最大,循环流动趋势强,对流混合作用明显.

根据实验结果,随着扰流板数量的继续增加,粉粒的循环流动趋势得以增强,扰流板间区域内的粒子运动轨迹趋于一致. 但增加的扰流板也进一步阻碍了粉粒的高速流动,降低了粉粒的流动性,因此限制了混合均匀度的提升.

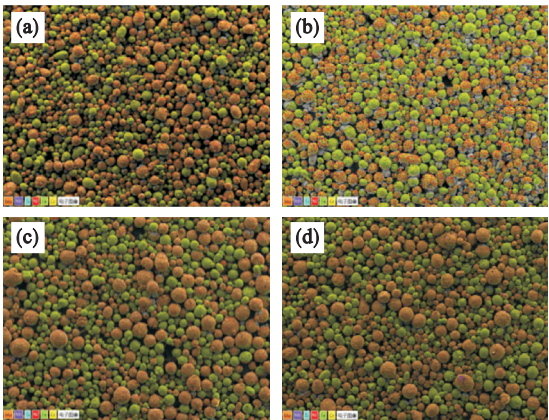
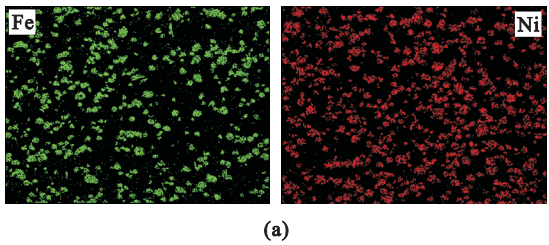


图 4 SEM 合成图像
Fig. 4 SEM composite images
(a)— $N=0$; (b)— $N=1$; (c)— $N=2$; (d)— $N=3$.



(a)

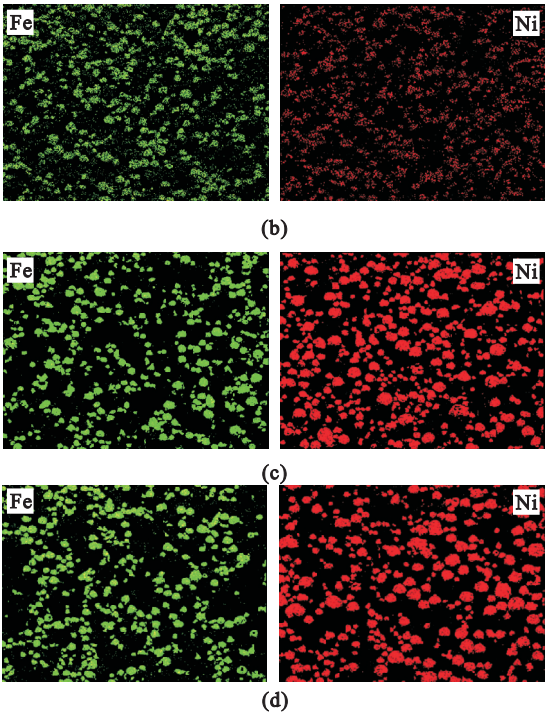


图 5 图像处理后的 Fe,Ni 元素分布
Fig. 5 Element distribution of Fe and Ni after image processing
(a)— $N=0$; (b)— $N=1$; (c)— $N=2$; (d)— $N=3$.

表 2 不同扰流板数量时的标准偏差及变异系数
Table 2 Standard deviation and variation coefficient with different number of spoilers

样本序号	扰流板数量	实际粉末比例	$S \times 10^2$	$R/\%$
1	0	0.458	5.488	10.98
2		0.442		
3		0.467		
4		0.443		
5		0.435		
6		0.463		
1	1	0.535	4.246	8.49
2		0.541		
3		0.517		
4		0.463		
5		0.457		
6		0.449		
1	2	0.460	3.174	6.34
2		0.515		
3		0.467		
4		0.492		
5		0.539		
6		0.477		
1	3	0.480	3.332	6.66
2		0.514		
3		0.537		
4		0.462		
5		0.471		
6		0.464		

3.5 粉粒流速 – 混合均匀度数据拟合

为获得粉粒平均流速与混合均匀度的映射关系,实现混粉参数的准确控制,对混粉流场仿真分析和实验研究结果进行数据拟合,求解不同混粉腔构型的粉粒平均流速和混合均匀度间的函数关系.其中,不同扰流板数对应的粉粒平均流速值可由仿真拟合的粉粒速度云图中提取并求解,其对应的变异系数值来源于实验结果,如表 3 所示.以平均流速为横轴,变异系数 R 为纵轴,采用 Origin 进行线性拟合,拟合结果见图 6.

表 3 不同粉粒平均流速下的变异系数
Table 3 Variation coefficients correspond to the average velocity of powders

平均流速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.473	0.496	0.484	0.417	0.354	0.520
$R/\%$	8.49	6.34	6.66	7.74	8.64	6.34

拟合后的线性方程为

$$y = -22.48785x + 12.95036. \tag{8}$$

根据图 6 可知,变异系数与平均流速呈负相关的线性关系,即随着粉粒平均流速的增加,混合均匀度线性提高,与仿真及实验分析的结论相吻合.粉粒平均流速的增加使其在相同时间内的平均位移值也相应增加,而粉体的混合均匀度与粉粒间的相对位移有直接关联,相对位移的增加能显著提高粉末的对流混合作用,进而提高混合均匀度.

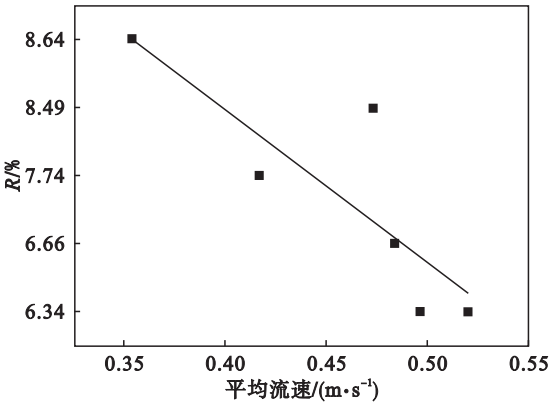


图 6 粉粒平均流速、变异系数的线性拟合
Fig. 6 Linear fitting of the average velocity of powders vs the variation coefficient

3.6 讨论

根据上述研究分析可知,载气驱动下的多相合金粉体快速混合,其混合机制主要以对流混合作用为主,剪切和扩散混合影响较小.粉末的混合均匀度与粉粒的平均流速和平均位移量存在明显关联.随着粉粒流速的增加,其流动性和平均位移

量将明显提升,从而增强粉末的对流混合作用. 但该结论的成立需满足前提条件:提高粉体的混合均匀度不仅要保证粉粒具有较大的流速和相对位移,还要加强两相流的循环流动,从而使粉粒在混粉腔体中实现大范围的位置变化,提高混合效果.

4 结 论

1) 本文提出的气固两相流数值分析和仿真模型能有效描述多相粉体的流动及混合同样,设计的扰流板式混粉器能提高 316L 和 IN718 合金粉末的混合均匀度. 同时,载气驱动下的多相合金粉体快速混合,其混合机制主要以对流混合作用为主,剪切和扩散混合影响较小.

2) 多级串联式混粉器内无扰流板时,变异系数高于 10%,混合均匀度最低;安装扰流板后,混合均匀度显著提升. 扰流板层数为 2 时,变异系数达到最小值 6.34%,粉粒分布均匀度最高,且粉粒的平均流速和位移最大,循环流动趋势强,对流混合作用明显. 扰流板数量的进一步增加,阻碍了粉粒的高速流动,降低了粉粒的流动性,限制了混合均匀度的提升.

3) 载气驱动下的粉体混合均匀度与粉粒的平均流速和平均位移相关. 粉粒的流速和平均位移的增加提高了粉粒群的流动性,增强了粉粒间的对流混合作用;但提高粉体的混合均匀度还需要增加两相流的循环流动,使粉粒在混粉腔体中实现大范围的位置变化,提高混合效果.

参考文献:

[1] Naebe M, Shirvanimoghaddam K. Functionally graded

materials: a review of fabrication and properties[J]. *Applied Materials Today*, 2016, 5: 223–245.

- [2] Xin B, Zhang Z L, Zhang J, et al. Dynamic property regulation of axially functional graded beams for airfoil structure [C/OL]//ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Charlotte, 2016 [2019-11-18]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2016/50206/V008T10A006/257492>.
- [3] Shah K, Haq I, Khan A, et al. Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct metal deposition[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 531–538.
- [4] Huang A N, Kuo H P. Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems—a review[J]. *Advanced Powder Technology*, 2014, 25(1): 163–173.
- [5] Zhong W Q, Yu A B, Liu X J, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications[J]. *Powder Technology*, 2016, 302: 108–152.
- [6] Norouzi H R, Mostoufi N, Sotudeh-Gharebagh R. Effect of fines on segregation of binary mixtures in gas-solid fluidized beds[J]. *Powder Technology*, 2012, 225: 7–20.
- [7] Zhang Y, Zhong W, Jin B, et al. Mixing and segregation behavior in a spout-fluid bed; effect of the particle density[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(15): 5489–5497.
- [8] 叶涛. 多组分粉体混合过程的理论分析与实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
(Ye Tao. Theoretical analysis and experimental study for process of multicomponent powders mixing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.)
- [9] Ren B, Shao Y J, Zhong W Q, et al. Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method[J]. *Powder Technology*, 2012, 222: 85–94.
- [10] Rhodes M J, Wang X S, Nguyen M, et al. Study of mixing in gas-fluidized beds using a DEM model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(8): 2859–2866.
- [11] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new κ - ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3): 227–238.