

S 形通道中金属熔体与固体颗粒流动混合的 数值模拟研究

曹文炅 黄文博 蒋方明

(中国科学院可再生能源重点实验室, 中国科学院广州能源研究所先进能源系统实验室, 广州 510640)

摘要 金属基复合材料的性能、应用、成本等在很大程度上取决于材料的制造技术, 因此研究和发展的制造技术一直是金属基复合材料研究中的最重要的问题之一。本文提出了一种基于 S 形流道的固体颗粒-金属流体混合方法, 并采用欧拉-离散相模型分析计算了该流道内的颗粒-流体混合过程。研究表明, S 形流道内流体具有周期性变化的流动方向及流速, 同时在横截面内存在旋转方向周期性改变的涡流, 能够强化颗粒在金属流体中的分散过程。分析了颗粒在 S 形通道内的均匀度, 在第三级出口处的颗粒均匀度达到 0.915, 表明该方法能够较好的实现固体颗粒在金属液内的均匀分散, 进而实现颗粒增强金属基复合材料的制备。

关键词 S 形通道; 金属基复合材料; 欧拉离散相模型; 数值模拟

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2017)11-2415-04

Numerical Study on the Mixing Process of Molten Metal and Particles in an S-shaped Channel

CAO Wen-Jiong HUANG Wen-Bo JIANG Fang-Ming

(Laboratory of Advanced Energy Systems, CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences (CAS), Guangzhou 510640, China)

Abstract The performance, application and cost of metal matrix composites depend largely on the manufacturing technology. Development of an effective manufacturing technology is one of the most important research tasks. In this paper, a new method based on the S-shaped channel for mixing the solid particles and metal fluid is presented. The particle and fluid mixing process in the channel is analyzed and calculated by using the Euler discrete phase model. The simulation results show that the flow direction and flow rate in the channel periodically change and at the same time on the cross-sectional plane of the channel there exist vortices with periodical-changing rotation direction, enhancing the dispersion of particles in the metal fluid. We further discuss the uniformity of particles along the S-shaped channel. The uniformity of solid particles reaches 0.915 (close to 1) at the end of the third S-shaped unit. We deduce that this method can achieve homogeneous dispersion of the solid particles in the liquid metal and can be used for manufacturing particle-reinforced metal matrix composites.

Key words S-shaped channel; metal matrix composites; euler discrete phase model; numerical simulation

0 引 言

金属基复合材料 (Metal Matrix Composites, MMCs), 特别是以铝等轻金属为基体的复合材料因其密度低, 机械性能优异, 还兼具多种功能特性, 已成为军事、国防、航天航空等高新技术领域不可缺少的轻量化结构材料和功能材料, 并在交通、电子、能源、环境等国民经济和高新技术领域获得了越来越多的应用^[1,2]。固体添加物增强金属基复

合材料是 MMCs 的一种, 是指以铝、镁、钛等金属或合金为基体, 以纤维、颗粒、晶须等固体添加物为增强体, 均匀分散于基体材料形成的两相或多相组合的材料体系复合而成的材料。在保留了金属基体轻质、易加工成形、导电导热优良等性能的同时, 通过加入的固体增强相特性还能够使材料具备高强度、高硬度、高耐磨性以及低线膨胀系数等优异

收稿日期: 2017-03-16; 修订日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No.51406213); 中科院“百人计划”

作者简介: 曹文炅 (1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事多孔介质传热传质的研究。

通信作者: 蒋方明, 研究员,

jiangfm@ms.giec.ac.cn

性能。

金属基复合材料的性能、应用、成本等在很大程度上取决于材料的制造技术，因此研究和发展的制造技术一直是金属基复合材料研究中的最重要的问题之一。尽管近年来已发展了一些金属基复合材料的制备方法，但尚没有一种成熟、工业化的制备工艺^[3-5]。液态搅拌法是目前制备固体添加物增强金属基复合材料最主要的方法，其过程是在熔炼后的金属液中加入固体添加物，并在一定搅拌工艺参数条件下进行搅拌混合，使固体添加物均匀地分布在金属熔体中，最后对该混合熔体进行铸造，制成铸锭、铸坯等，便于后续二次加工。然而，液态搅拌方法存在难以避免的死区，导致制备的材料不均匀，增大搅拌速率也将造成溶液吸气严重。此外，固体添加物在液态金属中容易团聚，需要进行较为复杂的预处理。近年来，采用超声振动混合方法实现固体颗粒在液态金属基体中的分散得到一些学者关注^[6-8]，超声振动能够有效的将固体颗粒分散至金属液中，降低颗粒团聚问题，但由于超声波在介质中传播时存在扩散衰减和吸收，能量传递范围有限，因此单纯依靠超声波振动仅能制备较小尺寸的该类复合材料。

在化工领域，S形微通道被应用于不同流体层流状态的混合过程。Jiang等^[9]通过数值模拟方法及实验对比探讨了S形微通道的混合机理，证明了该通道内流体流通过程中纵截面上具有混沌效应，不仅能够实现层流状态不同液体的混合，也能够缩短流体混合所需的时间。以此为基础，本文将该方法扩展为固体颗粒-金属流体混合方法，以实现颗粒增强金属基复合材料的制备。

1 金属熔体与固体颗粒流动混合的数值计算模型

本文采用 Fluent 的欧拉 DDPM(Dense Discrete Phase Model) 多相流模型进行颗粒-金属流体混合过程的数值模拟^[10]。其中金属流体采用欧拉描述求解连续性方程及动量守恒方程：

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} = -\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q \mathbf{u}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_q \mu_q (\nabla \mathbf{u}_q + \nabla \mathbf{u}_q^T)] + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (2)$$

式中， α_q 、 ρ_q 、 \mathbf{u}_q 分别为第 q 相的体积分数、密度及速度矢量， p 为压力， \mathbf{g} 为重力加速度， \mathbf{F}_s 为合外力。

离散颗粒的迁移通过拉格朗日描述求解，其运动轨迹由颗粒的平衡力系决定，并符合牛顿第二定律。单位质量颗粒的加速度可表示为：

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_{\text{drag}}(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + \mathbf{F}_x \quad (3)$$

其中， \mathbf{u}_p ，为颗粒速度， F_{drag} 为曳力， ρ_p 为颗粒密度， \mathbf{F}_x 为其余附加力。曳力系数 F_{drag} 为金属流体驱动颗粒运动的力，可表示为：

$$F_{\text{drag}} = \frac{18\mu_f C_d Re}{\rho_p d_p^2} \quad (4)$$

式中， μ_f 为金属流体相的粘度， d_p 为颗粒物的直径， C_d 为曳力系数，本文采用 Wen-Yu 模型^[7]：

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (5)$$

其中 Re 为相对雷诺数，定义为：

$$Re = \frac{\rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu_f} \quad (6)$$

在湍流状态下，颗粒的运动轨迹需要考虑湍流动能的影响，这里采用离散元随机行走模型 (discrete random walk, DRW) 对式 (3) 中流体速度进行修正：

$$u_f = \bar{u}_f + \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (8)$$

其中， \bar{u}_f 为修正前流体速度， ζ 为具有正态分布的随机数， k 为湍流动能。

对式 (3) 进行积分即可得到当前时刻颗粒的运动速度，颗粒的瞬时坐标则通过对式 (9) 进行积分获得：

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (9)$$

2 算例及分析

本文对一平面内三级 S 形流道进行建模，分析固相颗粒加入该通道后随着金属液流动过程的分散行为，几何模型如图 1 所示。每一级 S 形通道由两个 3/4 圆环反接而成，圆环半径为 50 mm，圆环截面为边长 10 mm 的正方形通道。入流边界距第一个 S 形流道圆心位置 200 mm，固体颗粒注入位置距入流边界 50 mm。金属流体材料为铝，密度为 2700 kg/m³，动力粘度为 0.002 Pa·s；注入颗粒材料为碳化硅，密度为 3200 kg/m³，颗粒平均直径为 50 nm。金属流体入流边界为定流速边界，入流速度为 0.5 m/s，注入颗粒的质量流率为金属液入流边界处质量流率的

5%, 即 0.00675 kg/s。由于模型中固相的体积分数较低, 即离散相较稀疏, 因此假设颗粒与颗粒之间不发生碰撞, 颗粒仅与流体互相作用。

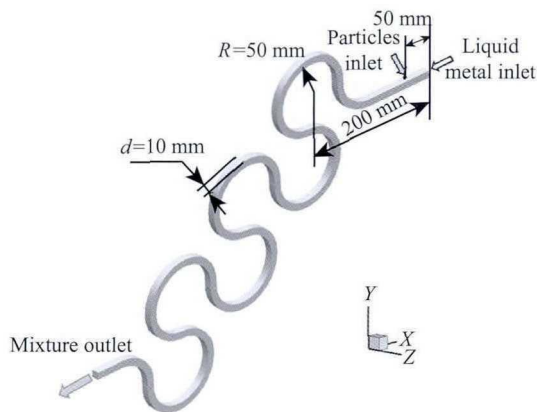


图 1 S 形混合通道几何模型

Fig. 1 Geometry of the S-shape channel

图 2 为 S 形通道纵剖面上金属液速度分布以及不同横截面位置的速度矢量。可以看出, 由于 S 形通道的结构特性, 通过其中的流体在周期性变化的通道壁面约束下不断改变流动方向。在 R 方向上, 金属流体还存在显著的流速差异。在经过每个拐点位置后, 处于圆环内测的金属液达到最高流速, 外侧则为最低流速, 在向下一个拐点流动过程中这种速度差异逐渐减小并发生反转。在这种周期性变化的流动方向及流速下, 流道横截面能够产生涡流, 如图 2 所示。以一级 S 形流道为例, 在截面 S_a 位置, 靠近左右两侧壁面位置存在一组对称的涡; 至截面 S_b 位置, 中心区域以及两侧靠下位置分别存在两组对称的涡流, 且靠近壁面位置的流动方向发生反转; 至截面 S_c 位置, 依然存在两组对称的涡, 但位置和旋转方向与截面 S_b 位置相反; 至截面 S_d 位置, 涡形和流向再次与 S_a 一致。后续各级 S 形流道内的涡流演化过程均与第一级相似。Jiang 等的研究表明这种涡流不仅存在于高雷诺数流场下, 在低雷诺数下也同样存在类似的涡流, 但涡流数量降为两个。

涡流的存在极大程度强化了通道内流体的混合性能, 图 3 为混合通道内 SiC 颗粒分布情况。颗粒在注入系统后在金属液驱动下首先呈直线簇的状态移动, 在经过第一个 S 形通道时, 颗粒簇在涡流作用下开始产生纵向波动。至第一级与第二级 S 形通道连接位置时, 颗粒簇已分离为两簇。在第二级 S 形流道内的流动混合过程中, 颗粒簇继续受到涡流作用, 并开始横截面内均匀分散。流出第二级 S 形流道时, 颗粒已较均匀的分散在金属流体中。在第

三级 S 形流道内, 颗粒进一步均匀混合, 最终达到预期混合效果。

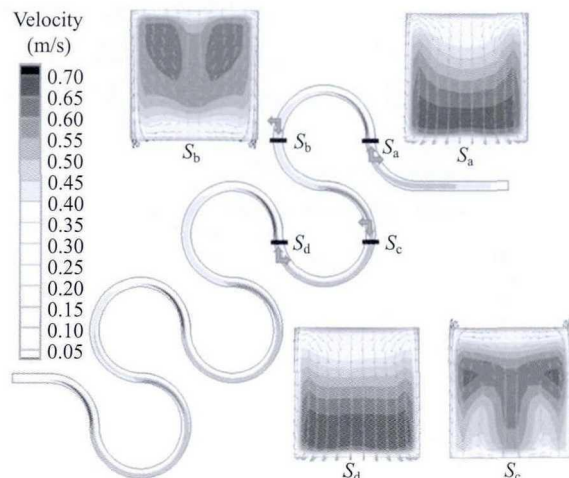


图 2 沿 S 形混合通道及其代表性纵剖面上金属液流速 (图中直角箭头表示截面的视图方向)

Fig. 2 Liquid metal flow velocity along the S-shaped channel or on representative 2D sectional planes (The diagonal arrows indicate the view directions.)

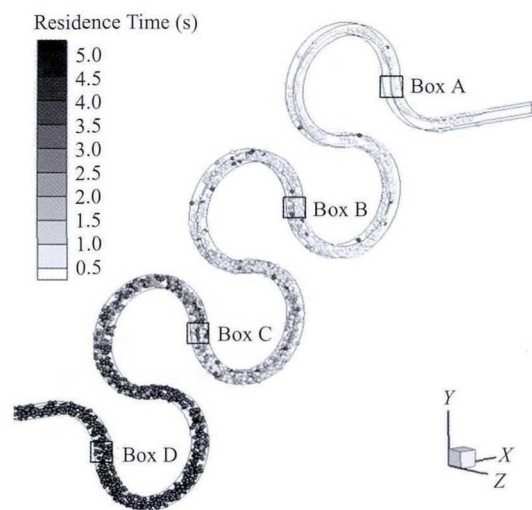


图 3 S 形混合通道内固体颗粒分布

Fig. 3 Distribution of solid particles in the S-shaped channel

为了量化分析 S 形通道的混合性能, 我们在图 3 中标记的 Box A 至 Box D 建立 4 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的立方区域, 将立方区域均匀划分为 125 个格子, 统计每个格子内的颗粒数目, 并定义颗粒的均匀度 U , 定义式如下:

$$U = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - \bar{P}|}{N\bar{P}} \quad (10)$$

其中, P_i 为格子 i 内的颗粒数目, N 为格子总数,

$N=125$, \bar{P} 为格子内的平均颗粒数目, $\bar{P}=3$ 。均匀度 U 越接近于 1 表示混合越均匀。图 4 为不同位置的颗粒均匀度对比图, 可以看到在该工况下, 颗粒经过第一级 S 形通道时均匀度由 0.04 升至 0.075, 在第二级 S 形通道中均匀度上升至 0.872。第三级 S 形通道对均匀度的提升减弱, 在其出口位置的均匀度达到 0.915。

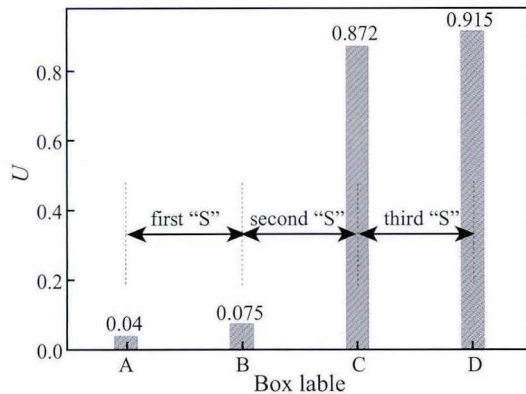


图 4 S 形通道纵剖面上的颗粒均匀度

Fig. 4 The uniformity of solid particles on different 2D sectional planes along the S-shaped channel

3 结 论

本文提出了一种基于 S 形流道的固体颗粒 - 金属流体混合方法, 并采用欧拉 - 离散相模型分析计算了该流道内的颗粒 - 流体混合过程。研究表明, S 形流道内流体具有周期性变化的流动方向及流速, 同时在横截面内存在旋转方向周期性改变的涡流, 能够强化颗粒在金属流体中的分散过程。分析了颗粒在 S 形通道内的均匀度, 在第三级出口处的颗粒均匀度达到 0.915, 表明该方法能够较好地实现固体颗粒在金属液内的均匀分散, 进而实现颗粒

增强金属基复合材料的制备。

参 考 文 献

- [1] Sohrabi D, Heidary B, Akhlaghi F. Theoretical and Experimental Study on Settling of SiC Particles in Composite Slurries of Aluminum A356/SiC [J]. Acta materialia, 2011, 59: 4556-4568
- [2] El-Sabbagh A, Soliman M, Taha M, et al. Hot Rolling Behaviour of Stir-cast Al 6061 and Al 6082 alloys - SiC fine Particulates Reinforced Composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 497-508
- [3] Naher S, Brabazon D, Looney L. Computational and Experimental Analysis of Particulate Distribution During Al-SiC MMC Fabrication [J]. Composites Part A, 2007, 38: 719-729
- [4] Matin A, Saniee F F, Abedi H R. Microstructure and Mechanical Properties of Mg/SiC and AZ80/SiC Nano-Composites Fabricated Through Stir Casting Method [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 625: 81-88
- [5] Chen F F, Zhao H D, Zhu G, et al. Experimental and Numerical Analysis of Flow Behavior and Particle Distribution in A356/SiCp Composite Casting [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68: 39-47
- [6] Zhang D J, Nastac L. Numerical Modeling of the Dispersion of Ceramic Nanoparticles During Ultrasonic Processing of Aluminum-based Nanocomposites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2014, 3(4): 296-302
- [7] Song S Y, Zhou X, Li L, et al. Numerical Simulation and Experimental Validation of SiC Nanoparticle Distribution in Magnesium Melts During Ultrasonic Cavitation Based Processing of Magnesium Matrix Nanocomposites [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 24: 43-54
- [8] Jia S, Zhang D, Xuan Y, et al. An Experimental and Modeling Investigation of Aluminum-Based Alloys and Nanocomposites Processed by Ultrasonic Cavitation Processing [J]. Applied Acoustics, 2016, 103: 226-231
- [9] Jiang F M, Drese K S, Hardt S, et al. Helical Flows and Chaotic Mixing in Curved Micro Channels [J]. AIChE Journal, 2004, 50: 2298-2305
- [10] Nguyen D, Rasmuson A, Björn I N, et al. CFD Simulation of Transient Particle Mixing in a High Shear Mixer [J]. Powder Technology, 2014, 258: 324-330