

基于 DEM-CFD 的立式搅拌磨机耦合仿真方法及实验研究

瞿铁¹, 马立峰², 宋现洲^{1,3}, 王朝华^{1,2,3}, 张升奇¹, 赵炎龙², 纪昊男²

1. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039;
2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;
3. 洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 河南 洛阳 471039

中图分类号: ID453 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)01-0015-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.01.001

摘要 针对立式搅拌磨机筒体内部存在螺旋搅拌器、研磨介质球、矿浆等复杂的多相物质耦合运动,开展基于 DEM-CFD 的耦合仿真方法及实验研究。首先,基于立式搅拌磨机工作原理,采用离散元方法(DEM)和流体动力学(CFD)分别模拟颗粒相和流体相,建立筒体内部流固耦合理论模型;其次,建立实验样机简化模型,研究介质球 DEM 模型、矿浆流体域 CFD 模型和 DEM-CFD 耦合模型的构建方法及参数;然后,通过实验验证不同仿真模型的准确性。结果表明,DEM-CFD 仿真结果比 DEM 模型更接近实验值,DEM-CFD 仿真得到的搅拌器扭矩与实验扭矩存在 5.43% 的偏差,而 DEM 模型存在 8.14% 的偏差。通过对比筒体内部介质球速度、碰撞次数及搅拌器扭矩发现:矿浆作为流体域对立式搅拌磨机筒体内部的介质球运动存在显著影响,其浮力和黏性降低了介质球的速度和碰撞次数,相反增加了螺旋搅拌器的扭矩。

关键词 立式搅拌磨; DEM-CFD; 离散元分析; 流固耦合; 介质球速度; 碰撞次数

引言

立式搅拌磨机是一种以摩擦研磨为主要工作方式的节能型超细粉磨设备,相比传统卧式球磨机可降低高达 30% 的生产能耗^[1],具有能耗低、噪音小、占地面积小等优点,近年来在矿物加工中得到广泛应用^[2]。随着立式搅拌磨机逐步向大型化、高效化方向发展,对磨机设计提出了新的挑战。

为了改善立式搅拌磨机磨矿效率,降低生产能耗,可通过优化转速、搅拌器螺旋角、研磨介质填充量等参数来实现,当前主要通过实验或仿真分析两种手段开展研究^[3]。实验研究是指在不同的参数下研究相同磨矿时间的产品粒度分布,可直观地获得不同参数对磨矿效果的影响规律^[4],但实验成本高、周期长,且立式搅拌磨机的大型化进一步增加了实验研究的难度,于是仿真技术成为研究其磨矿效率的主要手段。仿真研究是指利用离散元方法(DEM)、计算流体动力学(CFD)等模拟设备的运行过程,通过设置不同的参数研究其磨矿效率。谢朋书等^[5]基于 DEM 建立了立

式螺旋搅拌磨机的仿真模型,分析了主轴转速、搅拌器导程和研磨介质球尺寸对磨矿性能的影响;母福生等^[6]运用 DEM 对磨机内介质颗粒的复杂运动过程进行了数值模拟;孙小旭等^[7]建立了搅拌装置 CFD 模型,研究了流场分布状态和输入功率变化情况;Rhymer 等^[8]采用 DEM 研究了立式搅拌磨机磨粒恢复系数和滑动摩擦系数对仿真结果的影响;Esteves 等^[9]采用 DEM 研究了立式搅拌磨机螺纹衬套的磨损情况;Oliveira 等^[10]利用 DEM 分析了操作变量对搅拌磨机研磨铜矿的表观破碎率和破碎分布函数的影响。以上对立式搅拌磨的仿真分析包括颗粒场或流场作用下搅拌磨运行参数与性能参数之间的关系研究,未同时考虑颗粒场和流场耦合作用下的运行规律。

针对矿浆和研磨介质球的耦合作用,刘伟等人^[11]建立了矿浆与研磨介质的流固耦合仿真模型,对不同尺寸和形状的研磨介质球在磨矿过程中的运动速度、碰撞力、碰撞次数以及搅拌器扭矩进行了分析;孙新明等^[12]采用流固耦合的方法研究了螺旋搅拌器运行阻力矩及结构强度;Jayasundara 等^[13]采用 DEM-CFD

收稿日期: 2024 - 09 - 24

基金项目: 山西省科技创新人才团队专项计划(202204051002002)

作者简介: 瞿铁(1963—),男,江苏靖江人,正高级工程师,研究方向为矿山装备设计与制造, E-mail: qutie@citic-hic.com.cn。

通信作者: 王朝华(1993—),男,山西运城人,博士,副教授,研究方向为矿山装备设计与优化, E-mail: wangzhaohua@tyust.edu.cn。

对比分析湿式磨机和干式磨机筒体内部矿浆对介质球运动规律的影响; Beinert 等^[14]利用 DEM-CFD 模拟湿式搅拌磨机和行星式球磨机中介质球之间的接触行为, 获取介质球在矿浆中的冲击、扭转、剪切等载荷信息。由此可见, 矿浆和介质球作为立式搅拌磨机内部的两相介质, DEM-CFD 的耦合分析已成为其仿真研究的发展趋势^[15], 但现有耦合仿真模型仍处于理论研究阶段, 缺乏必要的实验验证及矿浆对研磨介质球运动规律的影响分析。

本文将立式搅拌磨机研磨过程视为离散的固体颗粒(研磨介质球)与连续的流体介质(矿浆)相互作用的动态过程, 分别采用 DEM 和 CFD 模拟颗粒相和流体相, 构建筒体内部流固耦合理论模型, 研究基于 DEM-CFD 的立式搅拌磨机耦合仿真方法, 并通过实验验证不同仿真模型的准确性。

1 立式搅拌磨机工作原理

立式搅拌磨机由电机、减速器、螺旋搅拌器、筒体、研磨介质球、衬板等结构组成, 工作过程如图 1 所示, 由电机驱动螺旋搅拌器旋转, 带动筒体内的研磨介质球和矿浆混合物螺旋上升到一定高度后, 在离心力作用下运动到筒体边缘下落, 细颗粒受浮力不断上升并从溢流口流出, 研磨介质球在循环运动中产生相互挤压、冲击、剪切等作用力实现对粗颗粒的细化。

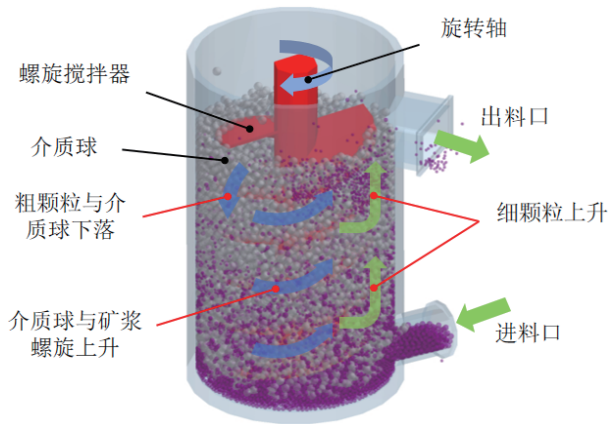


图 1 立式搅拌磨机工作过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working process of vertical stirring mill

螺旋搅拌器、研磨介质球、矿浆在筒体内部运动过程非常复杂, 涉及多相物质耦合运动。其中, 螺旋搅拌器和介质球属于固相, 可通过离散元方法求解, 矿浆属于液相, 其运动规律受螺旋搅拌器结构的影响, 与搅拌器接触的区域运动速度相对较大, 而靠近筒壁端运动速度相对较小。

根据式 (1) 所示的流体雷诺数计算公式^[16], 筒体内部中心区域矿浆流动属于湍流状态, 而靠近筒壁区域流体速度非常小, 可近似于层流。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

式中: Re 为雷诺数, ρ 为流体密度, v 为流体流速, L 为管道直径, μ 为流体的动力黏度。

2 筒体内部流固耦合理论模型

2.1 流体相控制方程

湍流是自然界非常普遍的流体流动状态, 其特征是在运动过程中液体质点具有不断混掺的现象, 速度和压力等物理量在空间和时间上具有随机性质的脉动值。因此, 立式搅拌磨机筒体内部流体计算要满足以下控制方程。

2.1.1 质量守恒方程

筒体内部流体满足质量守恒定律, 即单位时间内流体微元体中质量的增加, 等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量^[17], 见式 (2) 所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: t 为时间, u 、 v 、 w 为速度矢量 $\mathbf{u}$ 在 x 、 y 和 z 方向的分量。

2.1.2 动量守恒方程

筒体内部流体的动量对时间的变化率等于外界作用在流体上的各种力之和^[18], 见式 (3) 所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 、 τ_{zz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的体力。

2.1.3 能量守恒方程

假设筒体内部流体能量是一种理想的无能量耗散状态, 即筒体内部流体能量的增加率等于进入流体的静热流量加上体力与面力对流体所做的功^[19], 见式 (4) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (4)$$

式中: c_p 为比热容, T 为温度, k 为流体的传热系数, S_T 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转化为

热能的部分, 有时简称为黏性耗散项。

2.2 流体运动模型

湍流是一种高度非线性的复杂流动, 湍流的瞬时控制方程^[16]为:

$$\begin{cases} \text{div} u = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad} u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad} v) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad} w) \end{cases} \quad (5)$$

目前针对湍流的数值模拟可分为直接和间接两种方法, 直接模拟方法是指直接求解瞬时湍流控制方程, 无需作任何简化, 理论上可以得到相对准确的计算结果, 但其要求非常小的离散步长, 导致计算效率非常低, 在工程中应用困难; 相反, 间接模拟方法是对湍流作某种程度的近似和简化, 将湍流引起的平均流场变化视为整体效果, 求解均化的 Navier-Stokes 方程, 将瞬时脉冲量均化体现, 可以大幅提高计算效率。其中, Reynolds 平均法是目前使用最广泛的湍流数值模型^[17], 在湍动能 k 的基础上, 引入湍动耗散率 ε , 形成标准的 $k-\varepsilon$ 模型, 见式 (6) 所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_i 和 x_j 为空间中对应 i 或 j 方向的坐标, μ_t 为湍动黏度, u_i 和 u_j 为流体速度在 i 或 j 方向上的时均速度, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项。在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, 根据 Launder 等的推荐值及后来的实验验证, 模型常数取值为 $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.92$ 、 $C_{3\varepsilon}=0.09$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。 G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, 计算公式为:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

G_b 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项, 计算公式为:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (8)$$

其中, Pr_i 是湍动 Prandtl 数, g_i 是重力加速度在第 i 方向的分量, β 是热膨胀系数, 由可压流体的状态方程求出, 其计算公式为:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (9)$$

Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, 计算公式为:

$$\begin{cases} Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2 \\ M_t = \sqrt{k/a^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中, M_t 是湍动 Mach 数, a 是声速。

2.3 介质球接触模型

筒体内部介质球在搅拌器和矿浆耦合作用下必然会发生相互碰撞, 接触模型的分析计算直接决定了粒子所受的力和力矩的大小。根据牛顿第二定律可知其平衡方程为:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_d + F_b + F_c \quad (11)$$

式中: m_p 为研磨介质球质量; u_p 为研磨介质球速度; F_g 为研磨介质球自身重力; F_d 为研磨介质球所受曳力; F_b 为浮力; F_c 为研磨介质球之间以及研磨介质球与壁面之间的接触力。

研磨介质球之间的曳力模型选择 Wen Yu & Ergun 模型^[18], 其计算公式可表示为:

$$F_d = \frac{\beta V_p |u_t| u_t}{1 - \varepsilon_1} \quad (12)$$

式中: V_p 为研磨介质球体积, u_t 为研磨介质与矿浆的相对流速, ε_1 为空隙率, β_1 为放大系数。

矿浆对研磨介质球的浮力可用式 (13) 表示:

$$F_b = \rho_l g V_p \quad (13)$$

式中: ρ_l 为筒体内部的矿浆密度。

为了提高计算效率, 研磨介质球之间、介质球与筒壁之间接触模型选择 Hertz-Mindlin 无滑动模型^[19], 法向接触力 F_n 和法向阻尼力 F_n^d 可由式 (14) 求得:

$$\begin{cases} F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \\ F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{S_n m^* u_n^{\text{rel}}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: E^* 为等效弹性模量, R^* 为等效半径, δ_n 为法向重叠量, m^* 为等效质量, u_n^{rel} 为相对速度的法向分量, e 为恢复系数, S_n 为法向刚度。

切向接触力 F_t 和法向阻尼力 F_t^d 可由式 (15) 求得:

$$\begin{cases} F_t = -S_t \delta_t \\ F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{S_t m^* u_t^{\text{rel}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_t 为切向重叠量, u_t^{rel} 为相对速度的切向分量, S_t 为切向刚度。

仿真过程中介质球间的滚动摩擦对分析结果很重要, 可以通过式 (16) 所示的接触表面的力矩来计算。

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (16)$$

式中: μ_r 为滚动摩擦系数; R_i 为质心到接触点间的距离; ω_i 为接触点处物体的单位角速度矢量。

3 DEM-CFD 仿真模型

3.1 三维模型

为了确保仿真分析与实验结果的对应,本文选择如图 2a 所示的立式搅拌磨实验样机作为研究对象,其可通过批次磨矿实验测定物料的研磨效果,依据其工作原理简化结构特征,建立筒体、螺旋搅拌器三维模型如图 2b 所示,其筒体外径、高度及壁厚分别为 300 mm×500 mm×20 mm,材料为 316 不锈钢,搅拌器最大外径为 220 mm,材料为 Q355B。

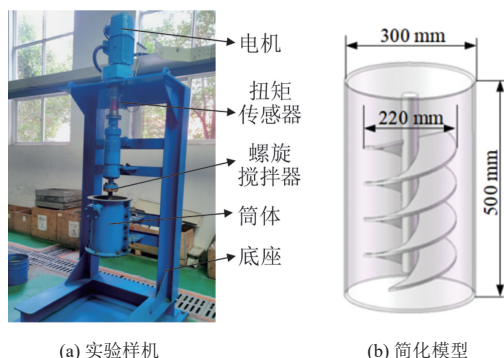


图 2 实验样机及简化模型

Fig. 2 Experimental prototype and simplified model: (a) experimental prototype; (b) simplified model

根据实验样机结构及功能特征,本文以龙鳞铁精矿作为矿浆基料,以直径为 8 mm 的钢球为研磨介质,选用螺旋搅拌器的螺旋角为 14.21°,对应的螺距为 175 mm,将 11.2 kg 干料与水充分混合后加入筒体,矿浆质量浓度为 62.5%,建立搅拌器转速为 175 r/min 的 DEM-CFD 耦合仿真模型,具体的工作参数见表 1。

表 1 实验样机工作参数

Table 1 Working parameters of experimental prototype

参数	转速 (r·min ⁻¹)	介质球填 充量/kg	介质球 直径/mm	搅拌螺 旋角/(°)	矿浆质量 浓度/%	矿浆密度 (kg·m ⁻³)
数值	175	49	8	14.21	62.5	1957.4

3.2 介质球 DEM 模型

已知筒体内部填充的介质球材料为钢球,泊松比为 0.32、密度为 7 850 kg/m³、剪切模量为 79 GPa,钢球半径设置为 4 mm,钢球间的恢复系数、滚动摩擦系数、静摩擦系数分别设置为 0.7、0.01、0.2^[11]。按介质球总质量 49 kg 计算,筒体内部介质球数量约 23 300 个,设置自制的颗粒工厂几何体每秒生成 12 000 个颗粒,2 s 内生成完毕,赋予介质球在竖直向下 5 m/s 的初始速度,使其快速下落至筒底,等待所有颗粒堆积到静止状态,测量得介质球堆积高度为 165 mm,将搅拌器转速设置为 175 r/min,导出离散元模型,如图 3 所示。

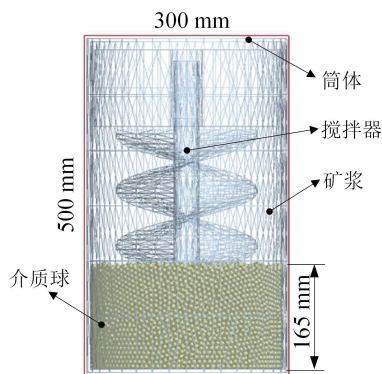


图 3 离散元模型

Fig. 3 Discrete element model

3.3 流体域 CFD 模型

由于筒体内部直径为 300 mm,而搅拌器最大外径为 220 mm,在搅拌器的旋转作用下筒体内部远离筒壁的流体运动属于湍流模型,在靠近筒壁的流体属于被动运动,相对速度较低。为了准确模拟筒体内部流场的运动规律,本文利用交接面将流体域划分为旋转域和静止域,如图 4 所示,旋转域为主动运动区域,静止域为被动运动区域,将旋转域网格设置 175 r/min 的旋转速度,模拟筒体内部工作稳定阶段流体域的运动。交接面的直径略大于搅拌器最大外径,本文取 250 mm,对流体域进行网格划分,并对靠近搅拌器和筒壁的网格进行适当加密,网格尺寸设置为 12 mm,该值为介质球半径的 3 倍,得到的网格模型见图 4,将流体域密度设置为 1 957.4 kg/m³ 模拟矿浆浓度,建立流体域 CFD 模型。

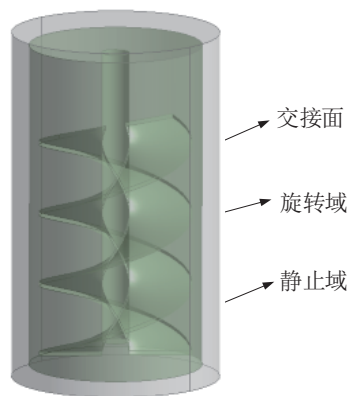


图 4 流体域 CFD 模型

Fig. 4 CFD model of the fluid domain

3.4 DEM-CFD 耦合参数

流固耦合中能够实现固体与流体双向耦合的模型有 Lagrangian 和 Eulerian 两种:Lagrangian 模型只考虑固体和流体之间的动量交换,不涉及固液相的能量和热量传递,且适用于单相或固体体积占比小于 10% 的稀相流;Eulerian 模型是复杂的多相流模型,可应用

于各种场合。立式搅拌磨筒体内部介质球的体积占比远超 10%, 本文选择 Eulerian 模型进行耦合分析, 将流体相设置为主相, 介质球离散颗粒设置为次相, 湍流模型选择式 (6) 给出的标准 $k-\varepsilon$ 模型。

4 仿真及实验

4.1 仿真结果分析

将仿真总时长设置为 6.5 s, 其中搅拌器和流体旋转域运行时间设置为 6 s, 提交计算, 筒体内部介质球在 0.5 s 后逐渐趋于稳定运行状态。图 5a 所示为 2 s 时筒体内部介质球运行速度云图, 为了对比研究流体域(矿浆)对介质球的影响, 本文同时建立了忽略流体域后筒体内部介质球的离散元模型, 其工作参数与 DEM-CFD 仿真模型均相同, 介质球在 2 s 时运行速度云图如图 5b 所示。

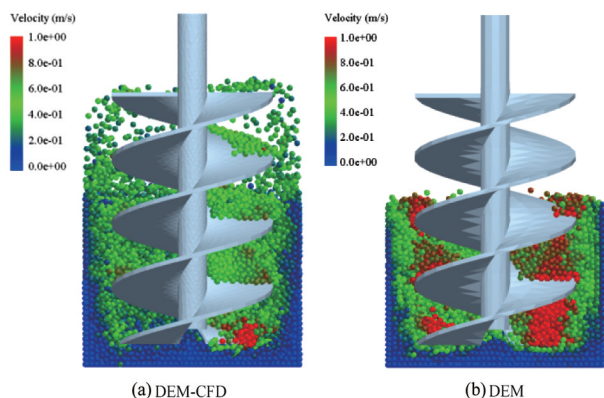


图 5 筒体内部介质球运行速度云图 ($t=2$ s)
Fig. 5 Velocity diagram of the medium ball ($t=2$ s): (a—DEM-CFD; b—DEM)

由图 5 可知, 在 $t=2$ s 时, DEM-CFD 模型与 DEM 模型中介质球在速度和空间上存在显著差别。两个模型中, 筒体内壁和底面的介质球速度均小于筒体中间搅拌器附近的介质球, 不同的是 DEM 模型中介质球的速度差更大, 而 DEM-CFD 模型中的介质球速度分布相对均匀; 在空间分布上, 筒体内部运行稳定后, 相同时刻 DEM-CFD 模型中的介质球空间分布的离散度远高于 DEM 模型, 由图可看出 DEM-CFD 模型中介质球在搅拌器和矿浆的耦合作用下不断上升至螺旋搅拌器叶片顶部后下落, 而 DEM 模型中介质球并未出现明显上升, 在搅拌器作用下受离心力不断向筒壁扩散。分析其原因, 矿浆作为流体存在一定的浮力和黏性, 浮力驱使介质球更容易沿搅拌器叶片上升, 黏性一定程度上增加了介质球的运动阻力, 使其线速度下降, 受到的离心力更小, 因此能被带到更高的位置后抛落。

图 6 给出了两种仿真方法得到的介质球平均速度随时间的变化规律。

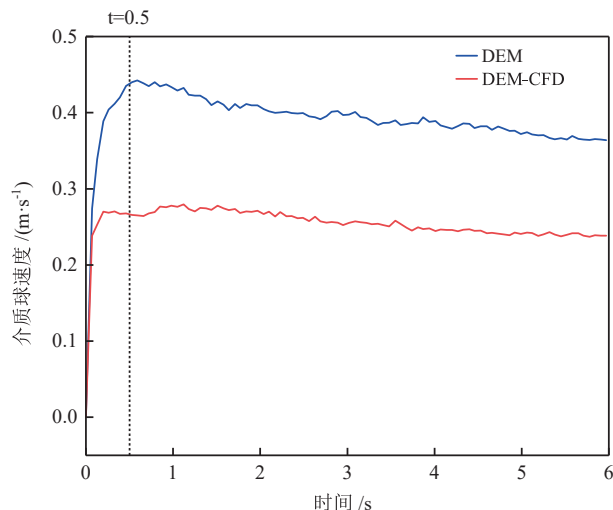


图 6 平均速度随时间的变化规律
Fig. 6 Variation of average speed over time

由图 6 可知, 介质球平均速度在启动初始阶段快速上升到一定位置, 随着筒体内部不同位置介质球运行模式趋于稳定, 部分介质球速度降低为 0 导致平均速度出现略微下降的现象。DEM-CFD 仿真分析得到的介质球平均速度明显低于 DEM 仿真分析结果, 进一步说明矿浆的存在降低了介质球的平均速度。

图 7 给出了两种仿真方法螺旋搅拌器的扭矩随时间的变化。可以看出, 扭矩随时间不断变化且存在一些峰值, 这主要是仿真过程中筒体内部介质球不稳定导致搅拌器叶片载荷不断变化, 但总体扭矩 DEM 模型略小于 DEM-CFD 模型。为了对比两种仿真模型扭矩差异, 剔除局部扭矩峰值后取平均值, 得到 DEM-CFD 耦合仿真的搅拌器扭矩为 15.34 N·m, DEM 模型的搅拌器扭矩为 14.90 N·m, 可见矿浆的存在增加了螺旋搅拌器的扭矩。

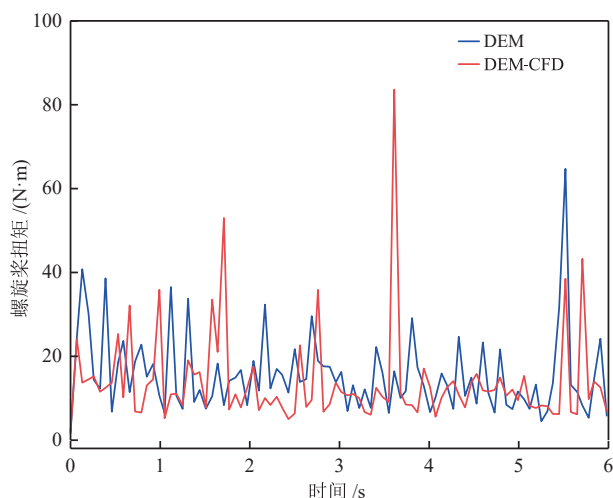


图 7 扭矩随时间的变化规律
Fig. 7 Variation of torque over time

图 8 给出了两种仿真方法得到的介质球碰撞次数随时间的变化规律。由图 8 可知, 稳定后 DEM-

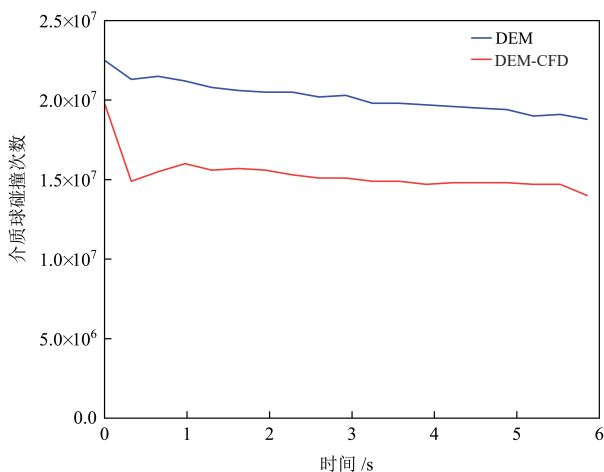


图 8 碰撞次数随时间的变化规律
Fig. 8 Variation of collision frequency over time

CFD 仿真分析得到的介质球碰撞次数小于 DEM 仿真分析结果,可见矿浆降低了介质球的碰撞次数。

根据以上分析可知,矿浆作为流体域对立式搅拌磨筒体内部的介质球运动产生了显著影响,由于其浮力和黏性降低了介质球的运行速度,进而降低了介质球的碰撞次数,相反增加了螺旋搅拌器的扭矩。

4.2 实验结果分析

以龙蟒铁精矿作为矿浆基料,将干料与水充分混合后加入筒体进行实验,相关参数见 3.1 节,启动电机后将搅拌器转速控制在 175 r/min,共运行 30 min,使用 KRT 扭矩转速传感器检测搅拌器的扭矩,见图 9 所示,可知启动后扭矩快速上升到一定位置后趋于稳定,取稳定运行阶段的扭矩平均值作为实验扭矩,经计算得到实验扭矩为 16.22 N·m。

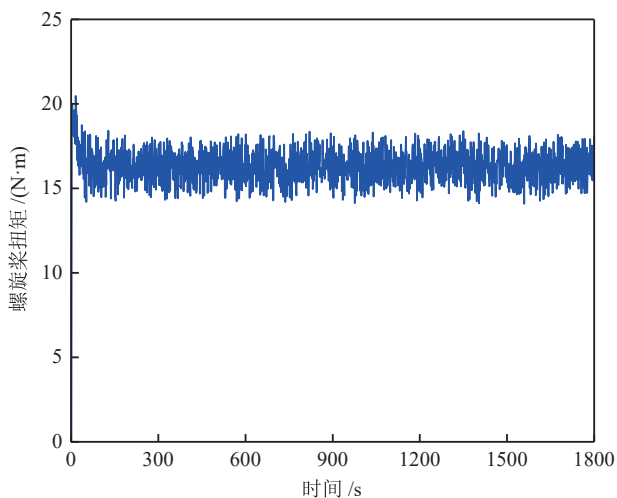


图 9 实验扭矩
Fig. 9 Experimental torque

对比实验结果与两种仿真结果的扭矩偏差,见表 2 所示,DEM-CFD 耦合仿真得到的搅拌器扭矩与实验扭矩存在 5.43% 的偏差,而 DEM 仿真扭矩与实验扭

矩存在 8.14% 的偏差,可知本文提出的 DEM-CFD 模型更接近实验扭矩。此外,两种仿真结果得到的扭矩值均小于实验扭矩值,这主要源于实验过程中存在矿浆浓度分布不均匀、介质球摩擦产生的热量损失等一系列能量耗散现象,而仿真分析假设筒体内部流体能量是一种理想的无能量耗散状态。

表 2 实验与仿真扭矩结果对比

Table 2 Comparison of experiment and simulation torque

参数	实验扭矩	DEM-CFD 扭矩	DEM 扭矩
数值/(N·m)	16.22	15.34	14.90
偏差/%	—	-5.43	-8.14

5 结论

(1) 立式搅拌磨机筒体内部中心区域矿浆流动属于湍流状态,而靠近筒壁区域流体速度非常小,可近似于层流。根据其工作原理,筒体内部研磨过程可视作离散的固体颗粒(介质球)与连续的流体介质(矿浆)相互作用的动态过程,基于此本文提出了筒体内部流固耦合理论模型,为筒体内部运行过程的 DEM-CFD 耦合仿真提供了理论依据。

(2) 当立式搅拌磨机筒体内部运行过程趋于稳定时,相同时刻 DEM-CFD 与 DEM 模型中介质球在速度和空间上存在显著差别:两种模型筒体内壁和底面的介质球速度均小于筒体中间搅拌器附近介质球,但 DEM 模型中介质球的速度差更大,而 DEM-CFD 模型介质球速度分布相对均匀;在空间分布上,DEM-CFD 模型中的介质球空间分布离散度远高于 DEM 模型,DEM-CFD 模型中介质球在搅拌器和矿浆的耦合作用下不断上升至螺旋搅拌器叶片顶部后下落,而 DEM 模型中介质球并未出现明显上升,在搅拌器作用下受离心力作用不断向筒壁扩散。分析其原因,矿浆作为流体存在一定的浮力和黏性,浮力驱使介质球更容易沿搅拌器叶片上升,黏性一定程度上增加了介质球的运动阻力,使其线速度下降,受到的离心力更小,因此能被带到更高的位置后抛落。

(3) DEM-CFD 仿真分析得到的介质球速度、碰撞次数低于 DEM 仿真分析结果,而扭矩大于 DEM 仿真分析结果,对比仿真及实验结果可知 DEM-CFD 模型更接近实验扭矩,表明矿浆作为流体域对立式搅拌磨筒体内部的介质球运动存在显著影响,由于其浮力和黏性降低了介质球的运行速度,进而减少了介质球的碰撞次数,相反增加了螺旋搅拌器的扭矩。

参考文献:

- [1] 瞿铁,全丽娟,杨纪昌.东鞍山烧结厂铁精矿细磨中立磨机与球磨机的比能耗研究[J].矿山机械,2021,49(10): 26-30.
QU T, TONG L J, YANG J C. Study on specific energy consumption of

- neutral mill and ball mill in fine grinding of iron concentrate in Donganshan Sintering Plant[J]. Mining Machinery, 2021, 49(10): 26–30.
- [2] 龙渊, 刘瑜, 肖骁, 等. 秦皇岛某微细粒铁矿搅拌磨细磨—磁选工艺试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 123–126.
- LONG Y, LIU Y, XIAO X, et al. Research on technology optimization of fine grinding and magnetic separation for a fine-grained iron ore in Qinhuangdao[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 123–126.
- [3] KUMAR A, SAHU R, TRIPATHY K S. Energy-efficient advanced ultrafine grinding of particles using stirred mills— a review[J]. Energies, 2023, 16: 5277.
- [4] 肖正明, 王鑫, 伍星, 等. 塔磨机运行参数优化匹配的仿真分析与试验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 483–487.
- XIAO Z M, WANG X, WU X, et al. Simulation analysis and experimental study on optimal matching of tower mill operation parameters[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 483–487.
- [5] 谢朋书, 崔达, 王国强, 等. 基于离散元的立式螺旋搅拌磨机工作性能[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1–9 [2024-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230227.2028.001.html>.
- XIE P S, CUI D, WANG G Q, et al. Working performance of vertical spiral stirring mill based on discrete element [J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering Edition): 1–9 [2024-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230227.2028.001.html>.
- [6] 母福生, 杨鹏. 搅拌磨机介质运动离散元数值模拟分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2465–2468.
- MU F S, YANG P. Discrete element numerical simulation analysis of media movement in stirring mill[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2465–2468.
- [7] 孙小旭, 祝启恒, 姚建超, 等. 基于 CFD 超细磨用搅拌装置关键参数影响研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1): 76–81+97.
- SUN X X, ZHU Q H, YAO J C, et al. Study on the influence of key parameters of stirring device for ultra-fine grinding based on CFD[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2020(1): 76–81+97.
- [8] RHYMER D R, INGRAM A, SADLER K, et al. A discrete element method investigation within vertical stirred milling: Changing the grinding media restitution and sliding friction coefficients[J]. Powder Technology, 2022, 410: 117825.
- [9] ESTEVES P M, MAZZINGHY B D, GALÉRY R G, et al. Industrial vertical stirred mills screw liner wear profile compared to discrete element method simulations[J]. Minerals, 2021, 11(4): 397–397.
- [10] OLIVEIRA A, RODRIGUEZ V, CARVALHO D R, et al. Mechanistic modeling and simulation of a batch vertical stirred mill[J]. Minerals Engineering, 2020, 156: 106487.
- [11] 刘伟, 刘俊, 程波, 等. 基于流固耦合的搅拌磨磨矿离散元仿真及试验研究[J]. 金属矿山, 2023(10): 189–195.
- LIU W, LIU J, CHENG B, et al. Discrete element simulation and experimental study of stirring grinding based on fluid-solid coupling[J]. Metal Mine, 2023(10): 189–195.
- [12] 宁晓斌, 孙新明, 余翊妮, 等. 搅拌磨 DEM-CFD 耦合仿真研究及搅拌器强度分析[J]. 有色金属工程, 2016, 6(4): 63–67+72.
- NING X B, SUN X M, SHE Y N, et al. Study on DEM-CFD coupling simulation of stirring mill and strength analysis of agitator[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2016, 6(4): 63–67+72.
- [13] JAYASUNDARA C T, YANG R, GUO B, et al. CFD-DEM modelling of particle flow in IsaMills— comparison between simulations and PEPT measurements[J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 181–187.
- [14] BEINERT S, FRAGNIÈRE G, SCHILDE C, et al. Analysis and modelling of bead contacts in wet-operating stirred media and planetary ball mills with CFD-DEM simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 134: 648–662.
- [15] LARSSON S, RODRÍGUEZ PRIETO J M, HEISKARI H, et al. A novel particle-based approach for modeling a wet vertical stirred media mill[J]. Minerals, 2021, 11(1): 55.
- [16] 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.
- WANG F J. Computational fluid dynamics analysis: Principles and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2004.
- [17] 李凯. 立式螺旋搅拌磨机粉磨过程数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LI K. Study on the numerical simulation of the vertical spiral stirred mill grinding process[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [18] 彭恺然, 刘红帅, 平新雨, 等. CFD-DEM 耦合模拟中拖曳力模型精度[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1400–1407.
- PENG K R, LIU H S, PING X Y, et al. Accuracy of drag force model in CFD-DEM coupling simulation[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1400–1407.
- [19] 杨国彪, 王朝华, 王志霞, 等. 物料动态安息角对矿用自卸车厢斗结构影响规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2099–2104.
- YANG G B, WANG Z H, WANG Z X, et al. Effects law of material dynamic rest angle on the structure of mining dump truck carriage[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2099–2104.

Coupling Simulation Method and Experiment of Vertical Stirring Mill Based on DEM-CFD

QU Tie¹, MA Lifeng², SONG Xianzhou^{1,3}, WANG Zhaohua^{1,2,3}, ZHANG Shengqi¹, ZHAO Yanlong², JI Haonan²

1. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China;

2. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. Luoyang Mining Machinery Engineering Design Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China

Abstract: A coupling simulation method and experiment based on DEM-CFD were investigated to address the complex multi-phase coupling motion of spiral agitators, grinding media, and slurry inside the cylinder of a vertical stirring mill. Firstly, based on the working principle, the Discrete Element Method (DEM) was used to simulate the particle phase and Computational Fluid Dynamics (CFD) to simulate the fluid phase, respectively. A theoretical model of fluid-solid coupling inside the cylinder was constructed. Secondly, a simplified model of the experimental prototype was established, and the construction methods and parameters of the grinding sphere (DEM), slurry (CFD), and DEM-CFD coupling model were investigated, respectively. Then, the accuracy of different simulation models was verified by experiments. The results showed that the DEM-CFD simulation results were closer to the experimental values than DEM, there was a deviation of 5.43% between the torque obtained from DEM-CFD model and the experimental torque, while the DEM model had a deviation of 8.14%. By comparing the velocity, collision frequency, and agitator torque of the grinding spheres inside the cylinder, it was found that the slurry as a fluid domain had a significant impact on the movement of the grinding spheres. Its buoyancy and viscosity characteristics reduced the velocity and collision frequency, whereas it increased the torque of the spiral agitator.

Keywords: vertical stirred mill; DEM-CFD; discrete element analysis; fluid-solid coupling; velocity of grinding sphere; collision frequency

引用格式: 瞿铁, 马立峰, 宋现洲, 王朝华, 张升奇, 赵炎龙, 纪昊男. 基于 DEM-CFD 的立式搅拌磨机耦合仿真方法及实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(1): 15-22.

QU Tie, MA Lifeng, SONG Xianzhou, WANG Zhaohua, ZHANG Shengqi, ZHAO Yanlong, JI Haonan. Coupling simulation method and experiment of vertical stirring mill based on dem-cfd[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(1): 15-22.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn