细粒煤螺旋分选流体−颗粒空间分布特征的 CFD-DEM 模拟研究

刘鹏辉[1]，叶贵川[1,2]，樊玉萍[1]，董宪姝[1]，马晓敏[1,2]

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原　030024; 2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京　100044)

摘　要: 螺旋分选是细粒煤高效绿色分选的核心技术之一，探明细粒煤螺旋分选全过程流体−颗粒空间分布特征有利于深入理解螺旋分选行为。以螺旋分选全过程为研究对象，研究了流场、颗粒在螺旋分选全过程的空间分布规律。通过建立颗粒螺旋分选动力学方程并基于螺旋分选流场的多流态特性，构建了复合流态下流体曳力计算模型；结合颗粒堆积实验采用响应面法对颗粒间接触参数进行标定，优化了 CFD-DEM 耦合模拟方案。结果表明：① 依据流场分布和颗粒运动行为，细粒煤螺旋分选全过程可分为初始阶段 (0～1/3 圈)、过渡阶段 (1/3～2 圈) 和亚稳定阶段 (2 圈以后)。在初始阶段，不同密度、不同粒度颗粒在螺旋槽中的分布基本一致：沿螺旋槽倾斜方向分布并逐渐向槽外缘聚集；② 过渡阶段内高密度颗粒随着粒度的增大颗粒逐渐向内缘聚集，低密度颗粒逐渐聚集在槽外缘；③ 在亚稳定阶段，高密度颗粒随着粒度的增大越来越多的颗粒聚集在螺旋槽内缘，不同粒度的低密度颗粒均主要聚集在槽外缘。此外，粒度对高密度颗粒空间分布有显著影响，而对于低密度颗粒分选行为影响不大，颗粒粒度低于 0.1 mm 时，颗粒间按密度差异分选的趋势降低，高密度细颗粒难以依靠密度差沉降到槽底参与二次环流的径向输送，导致其主要聚集在螺旋槽外缘，与低密度颗粒混杂，不利于细粒煤的分选。

关键词: 细粒煤; 螺旋分选; 流体−颗粒; 空间分布; CFD-DEM

中图分类号: TD94　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−9993(2023)12−4595−12

CFD-DEM simulation of fluid particle spatial distribution characteristics in the whole process of fine coal spiral separation

LIU Penghui[1], YE Guichuan[1,2], FAN Yuping[1], DONG Xianshu[1], MA Xiaomin[1,2]

(1. *College of Mining Engineering*, *Taiyuan University of Technology*, *Taiyuan*　030024, *China*; 2. *State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology*, *Beijing*　100044, *China*)

Abstract: Spiral separation is one of the core technologies for the efficient green separation of fine coals, and the investigation of fluid-particle spatial distribution characteristics in the whole process of spiral separation of fine coals is beneficial to the in-depth understanding of spiral separation behavior. Taking the whole process of spiral separation as the research object, the spatial distribution law of flow field and particles in the whole process of spiral separation is studied. By estab-

收稿日期: 2023−01−10　　**修回日期:** 2023−04−04　　**责任编辑:** 钱小静　　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0045

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52104260); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2022-060); 国家自然科学基金面上资助项目 (52074189)

作者简介: 刘鹏辉 (1996—), 男, 山西朔州人, 硕士研究生。E-mail: liupenghui452@163.com

通讯作者: 樊玉萍 (1988—), 女, 山西临汾人, 副教授, 博士。E-mail: 19880628fyp@163.com

引用格式: 刘鹏辉, 叶贵川, 樊玉萍, 等. 细粒煤螺旋分选流体−颗粒空间分布特征的 CFD-DEM 模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4595−4606.

LIU Penghui, YE Guichuan, FAN Yuping, et al. CFD-DEM simulation of fluid particle spatial distribution characteristics in the whole process of fine coal spiral separation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4595−4606.

移动阅读

lishing the particle spiral separation kinetic equations and based on the multi-flow characteristics of the spiral separation flow field, a computational model of fluid drag force in the composite flow state is constructed. The results show that: ① According to the flow field distribution and particle motion behavior, the whole process of fine coal spiral separation can be divided into initial stage (0−1/3 turns), transition stage (1/3−2 turns) and sub-stable stage (after 2 turns). In the initial stage, the distribution of different density and particle size in the spiral trough is basically the same: distribution along the spiral trough inclination direction and gradually gathering to the outer edge of the spiral trough. ② In the transition stage, high-density particles gradually gather to the inner edge as the particle size increases, and low-density particles gradually gather at the outer edge of the trough. ③ In the sub-stable stage, more high-density particles gather at the inner edge of the spiral trough as the particle size increases, and low-density particles with different particle sizes are mainly gathered at the outer edge of the spiral trough. In addition, particle size has a significant effect on the spatial distribution of high-density particles but has little effect on the separation behavior of low-density particles. When the particle size is less than 0.1 mm, the tendency of separation between particles according to density difference is decreased. Therefore, it is difficult for high-density fine particles to sink to the bottom of the spiral trough to participate in the radial transport of secondary circulation by density difference, causing them to mainly gather at the outer edge of the spiral trough and mix with low-density particles, which is unfavorable to the separation of fine coals.

Key words: fine coal; spiral separation; fluid-particle; spatial distribution; CFD-DEM

螺旋分选机是一种利用离心力场和重力场进行分选的高效流膜分选设备，具有结构简单、分选效率高、无噪声、无动力部件、维修费用少、使用期限长等优点[1-2]。在煤炭分选过程中，螺旋分选是细粒煤高效绿色分选的核心技术之一，常用于动力煤选煤厂及可选性较好的炼焦煤选煤厂。当前，采用数值模拟的方法研究螺旋流场分布特性及颗粒运动行为是螺旋分选理论研究的热点和难点。

目前，采用多相流模型 (VOF, Volume of Fluid) 研究螺旋分选机中的流场分布特性已成为学界共识。DOHEIM M A[3]、MATTHEWS B W[4]、高淑玲[5]、刘祚时[6]、YE[7]等通过实验测定和数值模拟的手段研究了主流的分布特征，得到了相似的分布规律：① 流膜厚度沿螺旋槽径向由内至外逐渐增大，越靠近螺旋槽外缘，流膜厚度增加越明显；② 纵向速度沿螺旋槽径向由内至外逐渐增大，越靠近螺旋槽外缘，纵向速度增加越明显；③ 螺旋槽由内至外流体紊动程度逐渐增大，具体表现为：螺旋槽内缘为层流，中间为过度流，外缘为紊流。YE[7-8]、MENG[9]等通过数值模拟技术进一步明确了螺距和槽面形状对螺旋槽外缘的流膜速度、厚度分布有显著影响，并着重探究了初始阶段流场分布规律。

在颗粒螺旋分选运动行为的实验研究方面，赵一飞等[10]通过自制取样器在螺旋分选机排料口对物料截取并对不同粒度组成的物料进行分选实验，探讨了不同粒度颗粒在螺旋槽面上的分层、分带情况。刘鑫等[11]通过螺旋分选实验研究了颗粒在螺旋槽的分带。张一敏和刘惠中使用自行研制的超极限 h/D(其中，h 为螺距；D 为螺旋槽外径) 螺旋溜槽并进行工业对比试验，发现该螺旋槽上尾泥与粗颗粒分带明显、过程稳定[12]。

颗粒螺旋分选运动行为的数值模拟研究目前尚无统一的耦合方案，欧拉模型 (Eulerian Model)、离散颗粒模型 (DPM, Discrete Particle Model)、离散元法 (DEM, Discrete Element Method)、光滑粒子流体动力学法 (SPH, Smoothed Particle Hydrodynamics) 等均较好地应用于预测颗粒螺旋分选行为。DOHEIM M A 等[3]把颗粒视为拟流体，基于欧拉−欧拉模型和 RNG k-ε 湍流模型模拟了颗粒在 LD-9 型螺旋分选机中的位置分布、速度、质量浓度等流动特征，发现模拟值与实验值具有良好一致性。刘祚时、李华梁、高淑玲等[5-6, 13]利于 Fluent 软件研究矿粒在螺旋溜槽分选流场中的运动轨迹，固相颗粒采用基于拉格朗日法的离散相模型，定性分析了高密度−低密度颗粒螺旋分选行为，所得结论与实验结果相近。MISHRA B K 等[14]采用离散元法初步研究了颗粒在螺旋槽的运动行为，并认为提前排出高密度矿物颗粒对分选效果有益。KWON J 等[15]利用多相流的扩展光滑颗粒流体力学模型，成功地模拟了 Humphrey 螺旋分选机的多相流动，并进一步探讨了螺旋槽横向倾角和分选长度对分选效果的影响规律。

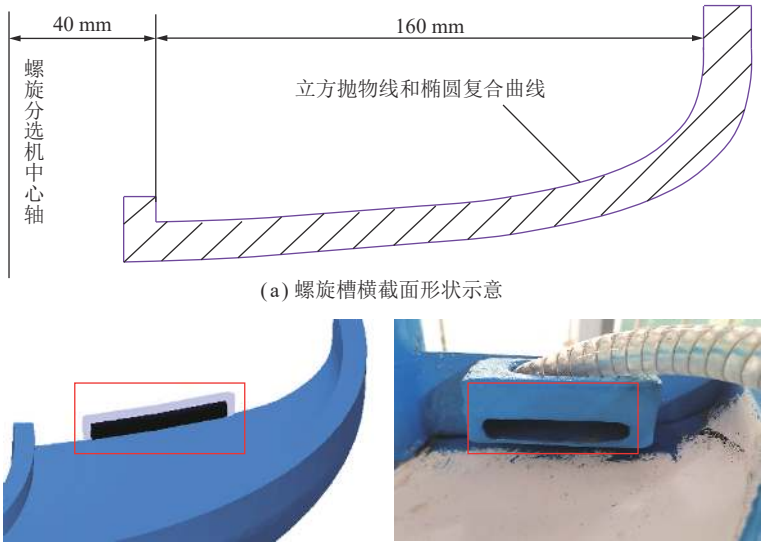
总体而言，借助数值模拟手段，研究者已较为准

确地描述了螺旋分选流场分布特性及颗粒运动行为。然而, 相关研究主要聚焦于稳定状态下颗粒的运动行为。近年来, YE G C[7]、MENG L[9]等着重探究了初始阶段流场分布规律。然而, 螺旋分选是一个动态发展的过程, 每一圈都可视为一个分选单元, 流场和颗粒在螺旋分选过程中具有显著的空间分布规律。笔者以细粒煤螺旋分选全过程为研究对象, 通过优化 CFD-DEM 耦合模拟方案, 研究螺旋分选全过程流体−颗粒运动行为的空间分布特征。可以为螺旋分选机理或螺旋分选设备优化提供参考。

1　几何模型及计算域网格划分

1.1　螺旋槽几何模型

以实验室现有螺旋分选机进行建模和验证实验。螺旋分选机主体部分共 5 圈, 高 800 mm, 螺旋槽横截面直径 400 mm, 槽宽 160 mm, 横向倾角 15°。螺旋槽面曲线为立方抛物线和椭圆复合曲线, 如图 1(a) 所示。为尽可能使模拟条件与实际工况条件相似, 数值计算时依据实物模型构建了虚拟的入料口, 如图 1(b)、(c) 所示。



(a) 螺旋槽横截面形状示意

(b) 仿真设置虚拟入料口　　(c) 实际工况的入料口

图 1　螺旋槽横截面形状及入料口模型

Fig.1　Cross section shape of spiral trough and inlet model

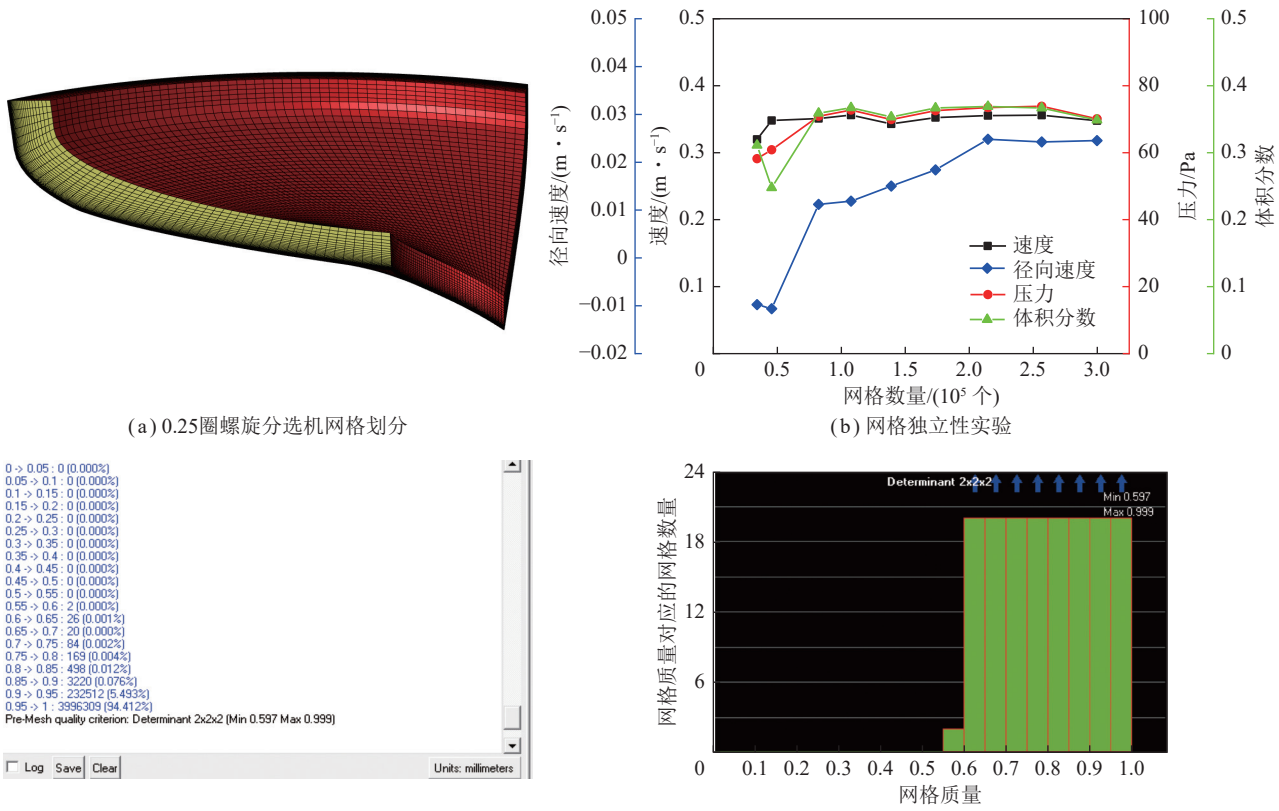
1.2　计算域网格划分

由于螺旋流膜较薄, 槽底对近壁面流场分布有较大影响。因此, 近壁面网格需要进行加密, 近壁面网格 $y+<5$(其中, $y+$为第 1 层网格质心到壁面的无量纲距离, 与速度、黏度、剪应力等有关系, 可以用来评价近壁面网格质量), 符合 ANSYS Fluent Theory Guide 的建议值[16]。考虑螺旋槽结构单元的相似性, 采用 0.25 圈螺旋槽进行网格独立性实验。实验时, 采用 ICEM CFD 19.2 对螺旋槽进行六面体结构化网格的划分, 并对近壁面网格进行加密, 如图 2(a) 所示。网格独立性实验如图 2(b) 所示, 当控制流体域网格数量为 214 650 时, 出口总压、速度、体积分数、径向速度均趋于稳定, 此时流膜厚度、径向、螺旋线方向的网格分别为 30、83、90, 5 圈螺旋槽中的网格数量为 4 232 840 (去除入料口网格)。5 圈螺旋槽网格质量分布如图 2(c) 所示, 质量小于 0.55 的占比为 0, 质量在 0.55～0.90 的网格数量占比不到 0.1, 0.99 以上的网格质量在 0.9～1.0 间, 网格质量良好。

2　CFD-DEM 数值模拟方案

采用 VOF 多相流模型捕捉螺旋计算域的气液交界面, 从而模拟螺旋分选机中的流场分布特征[17]。为了提高对高速流动及旋涡流动的模拟精度, 采用 RNG k-ε 模型模拟计算分选过程中的湍流状态。螺旋槽的入口采用速度入口边界条件, 体积流量设定为 0.8 m^3/h, 速度为体积流量与入口截流面积的比值, 出口采用压力出口边界条件。流场模拟的多相流控制方程及其他详细参数可参考文献[7-8, 18-19]。

采用 EDEM2020 商用软件 (DEM Solution, Edinburgh, UK) 模拟颗粒运动行为。论文主要探讨稀疏颗粒流的螺旋分选行为, 因而颗粒对流体的影响可以忽略[18-20]。采用 CFD-DEM 场耦合模拟方案进行数值计算, 将计算好的流场数据 (密度场、速度场、压力梯度场、黏度场) 导入 EDEM2020 中, 进而采用应用程序编程接口 (API, Application Programming Interface) 编译体积力, 计算流体对颗粒的作用力。在 EDEM2020



(a) 0.25圈螺旋分选机网格划分

(b) 网格独立性实验

(c) 不同质量网格的数量统计

图 2 网格划分及网格独立性实验

Fig.2 Grid mesh and grid independence experiment

中设置颗粒形状为单球形，密度为 1.25、1.65、2.45 g/cm^3，粒度范围为在 0～1.5 mm 内随机分布，颗粒初始速度为 0.322 m/s。颗粒生成速度设置为 600 个/s，设置重力加速度为 9.81 m/s^2。

2.1 CFD-DEM 控制方程及颗粒曳力公式优化

采用 CFD-DEM 模拟稀疏颗粒流在螺旋分选过程中的运动行为时，颗粒为离散相，在螺旋分选机槽面主要为平动和转动 2 种运动方式，在时间 t 时，颗粒 i 的控制方程为

$$m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{p-f},i}+m_i\boldsymbol{g}+\sum_{j=1}^{k_i}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{c},ij}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{d},ij}) \tag{1}$$

$$I_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{k_i}(\boldsymbol{T}_{\mathrm{t},ij}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{r},ij}) \tag{2}$$

其中，m_i为颗粒 i 的质量，kg；v_i为颗粒 i 的速度，m/s；k_i为与颗粒 i 接触的颗粒数量；I_i为颗粒 i 的转动惯量，kg · m；ω_i为颗粒 i 的角速度，rad/s；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{p-f},i}$为颗粒 i 所受的颗粒–流体相互作用力，N，包括流体曳力F_{d}、附加质量力F_{A}、压强梯度力F_{p}、马格努斯升力F_{M}、萨夫曼升力F_{S}、巴塞特力F_{B}；$m_i\boldsymbol{g}$为颗粒 i 的重力；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{c},ij}$为颗粒 i 与颗粒 j 之间的接触力，N；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{d},ij}$为颗粒 i 与颗粒 j 之间的非接触力，N；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{t},ij}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{r},ij}$分别为作用在颗粒 i 上的因平动和转动产生的力矩，N/m。本文模拟低质量浓度下颗粒在螺旋分选机中的运动行为，颗粒质量较小，认为颗粒的运动不足以带动流体运动，对流场的分布影响较小，可以忽略附加质量力[19, 21]。此外，刘小兵等[22]认为求解固体颗粒在液体中运动时，当颗粒尺寸适当小时，可以不计巴塞特力的影响。孙铭阳等[23]对比了粗煤泥分选过程中颗粒萨夫曼力、马格努斯力与流体阻力的力量级，认为萨夫曼力和马格努斯力也可以忽略。

如何在 EDEM 软件中计算流体对颗粒的作用力是 CFD-DEM 场耦合模拟的关键。在颗粒离散元模拟时，单颗粒流体曳力公式[24]为

$$F_{\mathrm{d}}=\frac{1}{2}C_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{l}}\left[\left|u_{\mathrm{p}}-u\right|\left(u_{\mathrm{p}}-u\right)\right]\frac{\pi D^2}{4}\zeta \tag{3}$$

颗粒群流体曳力公式进一步修正为

$$F_{\mathrm{d}}=\frac{3}{4}\frac{\rho_{\mathrm{l}}\varepsilon_{\mathrm{p}}\left[\left|u_{\mathrm{p}}-u\right|\left(u_{\mathrm{p}}-u\right)\right]}{D}C_{\mathrm{f}}\zeta \tag{4}$$

其中，C_{f}为流体体积分数ε_{f}相关的函数；ρ_{l}为流体密度；u_{p}为颗粒运动速度，m/s；u为流体运动速度，m/s；D为颗粒直径，m；ζ为与雷诺数有关的流体曳力系数；ε_{p}为

固体颗粒的体积分数。ε_f 可表示为

$$\varepsilon_f = 1 - \sum_{j=1}^{K_c} V_i / V_c \tag{5}$$

式中, V_i 为第 i 个颗粒的体积, m^3; V_c 为控制体总体积, m^3; K_c 为控制体内颗粒的总数量。

需要注意的是, 螺旋槽面流场分布复杂, 由内至外可依次分为层流区、过渡区和弱紊流区[7]。为尽可能的反映颗粒真实的运动规律, 计算体积力时依据雷诺数的不同采用不同的曳力系数, 如式 (6) 所示:

$$\zeta = \begin{cases} \dfrac{24}{Re}, Re \leqslant 0.5 \\ \left(\dfrac{4.8}{\sqrt{Re}} + 0.63\right)^2 \varepsilon_f^{-\left[3.7-0.65\exp\left(\frac{-1.5-\lg Re}{2}\right)^2\right]}, 0.5 < Re \leqslant 1\,000 \\ 0.63 + \dfrac{4.8}{\sqrt{\dfrac{Re}{0.5\varepsilon_f^{4.14} - 0.06Re + \sqrt{(0.06Re)^2 + 0.12Re\left(2\varepsilon_f^{2.65} - \varepsilon_f^{4.14}\right) + (\varepsilon_f^{4.14})^2}}}}, Re > 1\,000 \end{cases} \tag{6}$$

CFD-DEM 耦合时控制方程见表 1。其中, E 为弹性模量, Pa; $\boldsymbol{v}$ 为颗粒的速度矢量, m/s; $\boldsymbol{R}_i$ 为颗粒 i 的半径矢量 (从颗粒中心到接触点), m; $\boldsymbol{\delta}_n$ 为法线方向上颗粒与颗粒或者颗粒与壁面重叠的向量, m; $\boldsymbol{n}$ 为法线方向; $V_{n,ij}$ 为颗粒 i 和颗粒 j 在法线方向上的速度, m/s; μ_p 为颗粒滑动摩擦因数; μ_r 为滚动摩擦因数; $\boldsymbol{\delta}_t$ 为切线方向上颗粒与颗粒或者颗粒与壁面重叠的向量, m; C_t 为切线方向上的阻尼系数; C_n 为法线方向上的阻尼系数; $V_{t,ij}$ 为颗粒 i 和颗粒 j 在切线方向上的速度, m/s; $\widehat{\boldsymbol{\omega}}$ 为单位角速度; ε 为经验系数。

表 1　CFD-DEM 耦合控制方程

Table 1　CFD-DEM coupled governing equations

力和力矩		符号	公式
法向力	接触力	$f_{cn,ij}$	$-\dfrac{E}{3(1-\boldsymbol{v}^2)}\sqrt{2R_i}\boldsymbol{\delta}_n^{1.5}\boldsymbol{n}$
	非接触力	$f_{dn,ij}$	$-C_n\left(\dfrac{3m_iE}{\sqrt{2}(1-\boldsymbol{v}^2)}\sqrt{\boldsymbol{R}\boldsymbol{\delta}_n}\right)^{0.5}\boldsymbol{V}_{n,ij}$
切向力	接触力	$f_{ct,ij}$	$-\left\{\mu_p \boldsymbol{f}_{cn,ij}/\lvert\boldsymbol{\delta}_t\rvert\right\}\left[1-(1-\min\{\lvert\boldsymbol{\delta}_t\rvert, \boldsymbol{\delta}_{t,\max}\}/\boldsymbol{\delta}_{t,\max})^{1.5}\right]\boldsymbol{\delta}_t$
	非接触力	$f_{dt,ij}$	$-C_t\left(6m_i\mu_s\lvert\boldsymbol{f}_{cn,ij}\rvert\dfrac{\sqrt{1-\boldsymbol{\delta}_t/\boldsymbol{\delta}_{t,\max}}}{\boldsymbol{\delta}_{t,\max}}\right)^{0.5}\boldsymbol{V}_{t,ij}$
力矩	平动	$T_{t,ij}$	$\boldsymbol{R}_i\left(\boldsymbol{f}_{ct,ij}+\boldsymbol{f}_{dt,ij}\right)$
	转动	$T_{r,ij}$	$-\mu_r\lvert\boldsymbol{f}_{cn,ij}\rvert\widehat{\omega}$
体积力	重力	G_{ij}	$m_i\boldsymbol{g}$
颗粒−流体相互作用力		$f_{p-f,i}$	$\dfrac{3}{4}\left(0.63+\dfrac{4.8}{Re^{0.5}}\right)^2\dfrac{\rho_f\varepsilon_p\lvert u_p-u\rvert}{d_p}\varepsilon_f^{-\varepsilon}\lvert u_p-u\rvert$ $\varepsilon = 3.7-0.65\exp\left(-\dfrac{(1.5-\lg Re)^2}{2}\right)$
压强梯度力		F_p	$F_p = -V_{p,i}\nabla P$

注: $\boldsymbol{n}=\dfrac{\boldsymbol{R}_i}{R_i}$, $\boldsymbol{V}_{ij}=\boldsymbol{V}_i-\boldsymbol{V}_j+\omega_j\boldsymbol{R}_j-\omega_i\boldsymbol{R}_i$, $\boldsymbol{V}_{n,ij}=\left(\boldsymbol{V}_{ij}\boldsymbol{n}\right)\boldsymbol{n}$, $\widehat{\boldsymbol{\omega}}_i=\dfrac{\boldsymbol{\omega}_i}{\boldsymbol{\omega}_i}$; $\widehat{\boldsymbol{\omega}}_i$ 为颗粒i的单位角速度; $\boldsymbol{\omega}_i$ 为颗粒i的角速度, rad/s; ∇P 为压力梯度。

2.2　颗粒物性参数标定

颗粒接触参数的设定对模拟精度有显著影响, 合理选择颗粒接触参数有利于提高数值模拟精度。一些学者以实验法来标定离散颗粒接触参数[25-31], 但受颗粒尺寸限制, 直接通过实验的方法测定细粒煤 (−1.5 mm) 颗粒的恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数手段繁琐、误差较大。论文结合颗粒堆积实验采用响应面法对颗粒间接触参数的选择进行优化, 以较易测得的细粒煤颗粒宏观堆积角为响应值, 以颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数以及恢复系数为响应因素, 建立颗粒离散元模型接触参数与堆积角的响应关系, 预测颗粒离散元模型接触参数的最优值。优化时, 首

先依据图 3 所示的细粒煤堆积角测定系统对细粒煤粉的堆积角进行测定，结合相关文献[19,32-35]，参考 EDEM 颗粒材料数据库 (Generic EDEM Material Model Database) 确定响应因素范围，通过 EDEM 软件进行数值响应面实验，得出较佳的物性参数组合。最终采用的物性参数见表 2。

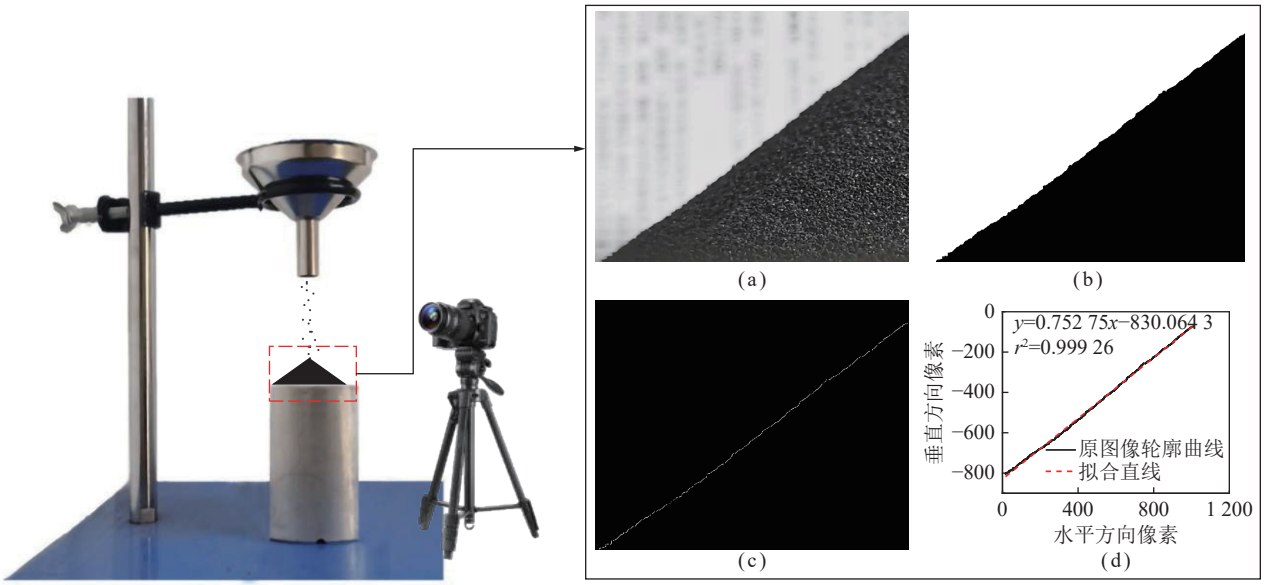


图 3 堆积角测定过程示意

Fig.3 Measuring process of stack angle

表 2 EDEM 中材料物性参数

Table 2 Material property parameter in EDEM

种类	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
低密度颗粒–低密度颗粒	0.13	0.44	0.10
低密度颗粒–高密度颗粒	0.15	0.45	0.17
低密度颗粒–玻璃钢(螺旋槽材料)	0.20	0.50	0.10
低密度颗粒–中间密度颗粒	0.14	0.44	0.15
中间密度颗粒–中间密度颗粒	0.15	0.45	0.15
中间密度颗粒–高密度颗粒	0.20	0.45	0.18
中间密度颗粒–玻璃钢	0.20	0.50	0.10
高密度颗粒–高密度颗粒	0.20	0.50	0.20
高密度颗粒–玻璃钢	0.25	0.50	0.10

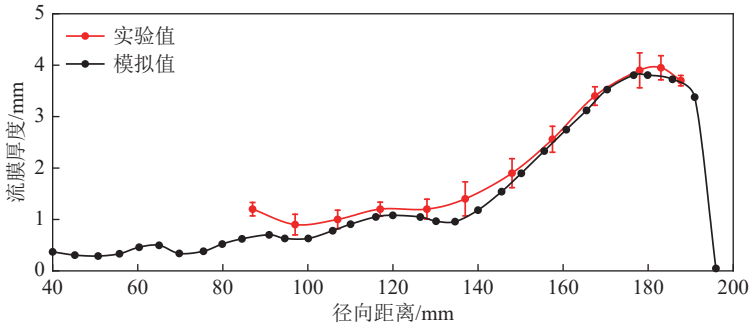
3 模拟结果验证及分析

3.1 模型验证

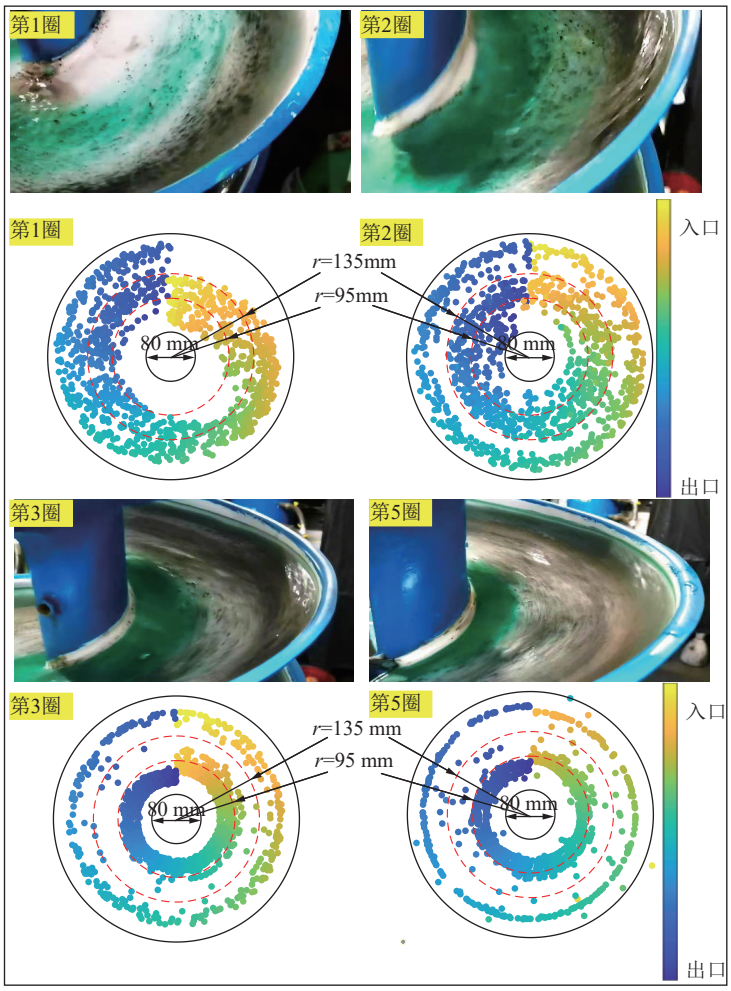
图 4(a) 为 0.8 m^3/h 流量、1 kg/m^3 质量浓度下，螺旋分选机出口处流膜厚度沿径向分布的模拟值和实验值。图 4(b) 为 0.8 m^3/h 流量、1 kg/m^3 质量浓度下，−0.25 mm 的绿色玻璃微珠 (高密度颗粒，2.45 g/cm^3) 在螺旋槽中运动轨迹的模拟结果和实验结果。粒子颜色变化表示粒子位置的差异。黄色表示粒子位于螺旋入口处，而螺旋出口处的粒子为蓝色。由图 4(a) 可知，在螺旋槽中间及外缘区域，流膜厚度沿径向的变化趋势一致，说明论文采用的流场模拟方法可以较为准确地反映螺旋分选机中的流场分布特性。此外，由图 4(b) 可以看出，第 1 圈分选时示踪颗粒主要在槽中间区域分布，第 2 圈时则逐渐向内缘聚集。第 3～5 圈分选后细粒的示踪颗粒主要分布在螺旋槽内缘，观察发现在螺旋槽最外缘也有一定分布。模拟结果所展示的颗粒分布趋势与示踪实验结果较为一致，说明使用 CFD-DEM 耦合方法模拟结果可以定性反映颗粒在螺旋槽中的运动规律。

3.2 流场空间分布规律

螺旋分选过程每一圈的速度分布如图 5 所示。



(a) 出口处流膜厚度测量值与模拟值对比



(b) 示踪颗粒在螺旋槽中的分布实验与模拟对比

图 4　模型验证实验

Fig.4　Model validation experiment

由图 5 可知, 水进入螺旋槽后沿螺旋槽倾斜方向向下流动, 迅速向外缘扩散。在约 120°角位移时, 水开始沿着螺旋曲线流动。从水流速度和螺旋截面的几何结构推断, 水流与螺旋槽外缘的碰撞是水流方向变化的主要原因。碰撞使水流的速度方向发生急剧转化, 此后水流的运动主要沿着螺旋线方向铺展, 流速沿径向具有由内至外逐渐增加的趋势。受离心力影响, 螺旋槽外缘的速度迅速增加。总体而言, 螺旋分选机中水流的速度分布大概在第 1 圈结束后趋于稳定, 外缘速度可达 1.3 m/s, 显著高于螺旋槽内缘及中间区域速度。进一步对比螺旋槽中心轴附近的速度分布可知, 随着分选圈数的进行, 螺旋槽内缘的速度波动增大。

流膜厚度和径向环流是螺旋分选机的重要流场参数, 流膜厚度创造了颗粒分层的环境, 径向环流则是颗粒径向迁移的关键推动力。为了更加清楚的了解螺旋截面上的水流流膜厚度分布及径向速度分布, 按图 5 标线处截取螺旋槽截面, 由于第 1 圈水流分布情况较为复杂, 每隔 45°截取截面, 之后每隔 180°截取

截面。截面上水流的厚度及径向速度分布如图 6 所示。由图 6 可知，水进入螺旋槽后一开始主要聚集在中间及内缘，此后，随着水流速度的增大，水流进一步向螺旋槽外缘铺展。在 135°时，螺旋槽外缘水流厚度较厚，此时槽面中间及内缘区域流膜厚度很薄。此外，0～135°内，水流径向速度指向螺旋槽外缘，这是由于水流在刚进入螺旋槽时受槽面限制较小，此时水流主要沿螺旋槽外缘运动，造成内缘水流很薄。水流运动至 180°角位移之后，流膜厚度总体变化趋于稳定，但水流的铺展宽度仍然随着分选距离的增大而有微弱的增大。从图 6 中径向速度分布还可以发现，尽管在 180°～540°角位移间螺旋槽外缘上层水流速度指向外缘，下层水流速度指向内缘，存在径向环流现象，但此刻径向环流波动较大，不够稳定。直到 720°之后，螺旋槽外缘才出现了较为稳定的径向环流。

3.3 颗粒螺旋分选空间分布规律

设置低密度 (1.25 g/cm^3)、中密度 (1.65 g/cm^3)、高密度 (2.45 g/cm^3) 颗粒粒度均在 0～1.5 mm，不同颗粒在螺旋槽空间分布规律如图 7 所示。由图 7 可知，经过前 2 圈的分选，颗粒在螺旋槽上的分布基本稳定，0～1.5 mm 高密度颗粒主要分布在槽内缘而低密度颗粒主要分布在槽外缘，不同物料需要的分选长度不同，

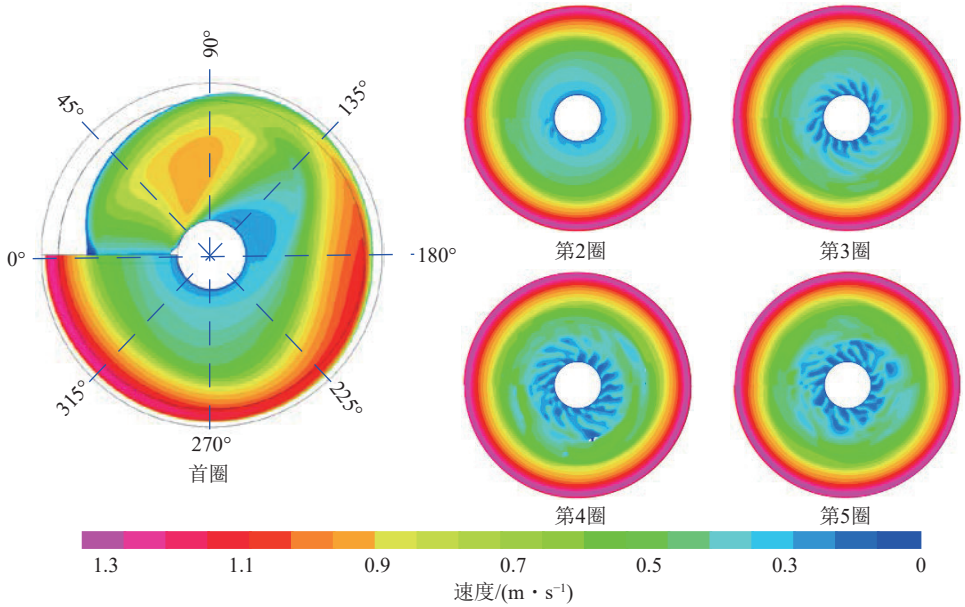


图 5 螺旋分选过程每一圈的速度分布 (俯视图)

Fig.5 Velocity distribution in each turn in the process of spiral separation (Top view)

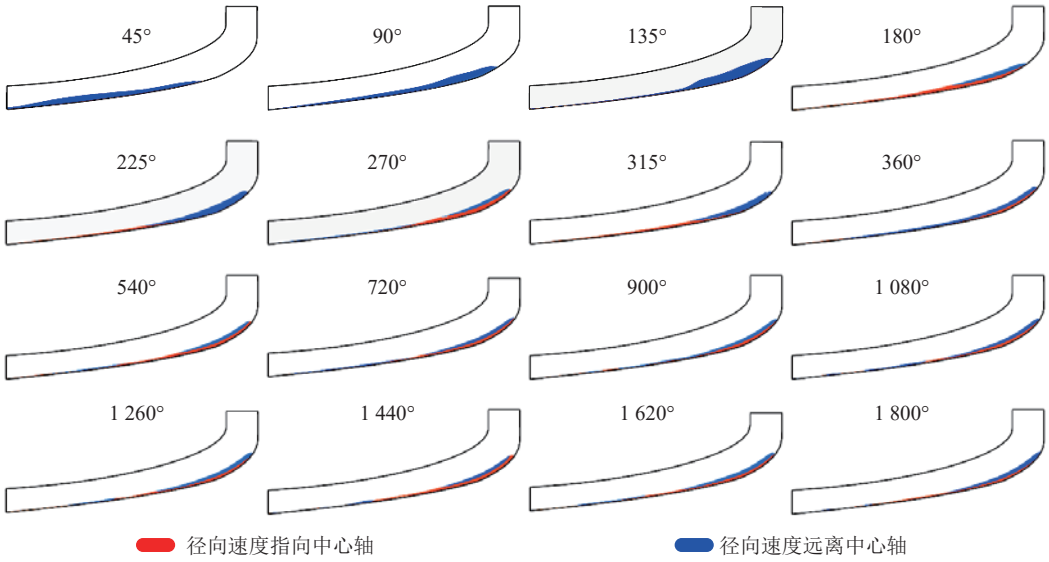


图 6 截面上水流的流膜厚度及径向速度分布

Fig.6 Water flow depth and radial velocity distribution of cross section

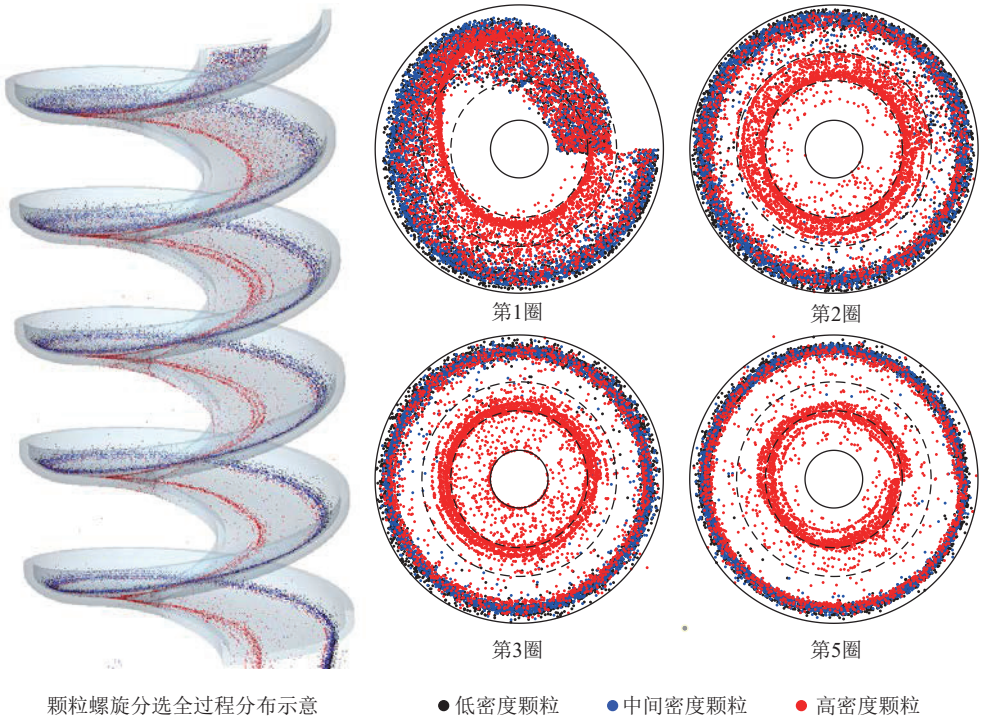


图 7　颗粒在螺旋槽空间分布规律

Fig.7　Spatial distribution of particles in spiral trough

高密度颗粒在 120°角位移时开始与中/低密度分离而靠近内缘, 随着分选的进行不断向最内缘聚集; 低/中密度颗粒在一圈之后聚集在螺旋槽外缘, 随着分选的进行逐渐在最外缘聚集。分析不同螺旋分选圈数的分选趋势可知: 颗粒在第 1 圈的分选趋势变化最明显, 第 2 圈次之, 第 2 圈之后颗粒运动行为变为不明显, 趋于稳定; 结合图 5、6 所示的流场分布情况, 螺旋分选过程可大致分为: 初始阶段 (前 1/3 圈)、过渡阶段 (1/3～2 圈)、亚稳定阶段 (2 圈以后)。高密度颗粒和中/低密度颗粒分带明显, 中/低密度颗粒分带不明显, 但中间密度颗粒径向距离略低于低密度颗粒; 在最外缘, 除了聚集有中/低密度颗粒外, 还有一定量的高密度颗粒, 说明在分选过程存在高密度颗粒污染低密度颗粒的错配现象。

为进一步研究细粒煤颗粒螺旋分选空间演变规律, 对 0.10、0.25、0.50 mm 的颗粒在达到压稳定状态前 (取前 3 圈) 在螺旋槽的分布进一步分析。由于模拟的中/低密度颗粒在螺旋槽的位置分布差异不大, 故仅展示高密度和低密度颗粒 0.10、0.25、0.50 mm 时的颗粒分布, 如图 8、9 所示。粒子颜色变化表示粒子位置的差异。黄色表示粒子位于螺旋入口处, 而螺旋出口处的粒子为蓝色。由图 8 可知, 对于高密度颗粒, 在实验范围内, 粒度对颗粒空间分布有显著影响。在初始阶段不同粒度颗粒在螺旋槽中的分布基本一致: 颗粒进入螺旋槽后沿螺旋槽倾斜方向运动并逐渐向螺旋槽外缘运动; 过渡阶段内随着粒度的增大, 颗粒逐渐向内缘聚集; 在亚稳定阶段, 粒度为 0.10 mm 的颗粒主要分布在螺旋槽外缘, 在螺旋槽中间及内缘区域也有一定分布; 粒度为 0.25 mm 时, 颗粒在螺旋槽内缘和外缘均分布较多; 对于 0.50 mm 颗粒, 高密度颗粒主要聚集在螺旋槽内缘, 但在螺旋槽外缘也有少量分布。由图 9 可知, 对于低密度颗粒, 0.10、0.25、0.50 mm 颗粒前 3 圈空间分布类似, 在实验范围内, 粒度对低密度颗粒螺旋分选行为影响不大。颗粒进入螺旋槽后, 在初始阶段颗粒分布情况基本与高密度颗粒类似; 在过渡阶段颗粒逐渐聚集在槽外缘; 亚稳定阶段不同粒度颗粒均聚集在槽外缘。

根据模拟结果, 粒度低于 0.25 mm, 尤其是低于 0.10 mm 时, 高密颗粒和低密度颗粒均分布在螺旋槽外缘。这主要是由于粒度过细, 导致颗粒间按密度差异分选的趋势降低, 此时高密度的细颗粒难以依靠密度差沉降到槽底参与二次环流的径向输送, 导致其主要聚集在螺旋槽外缘, 与低密度颗粒混杂。因此, 细粒煤螺旋分选时控制入料粒度下限不低于 0.25 mm, 尤其是要减少−0.1 mm 粒级的入选, 可以显著降低微细高密度颗粒对低密度颗粒的混杂, 提升分选精度, 这与国内外学者通过实验得出的结论一致[36-39], 也间接说明了论文采用的模拟方法可以用来定性分析颗粒螺旋分选运动行为。

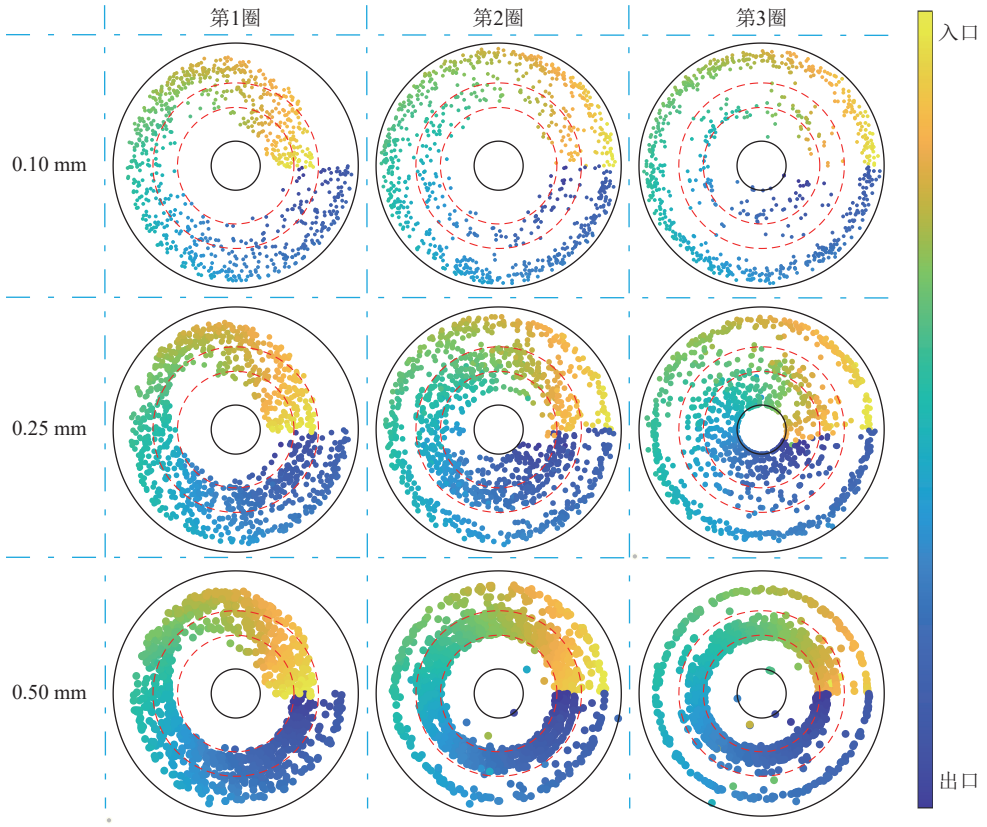


图 8 不同粒度高密度颗粒分布情况

Fig.8 Distribution of high density particles with different particle sizes

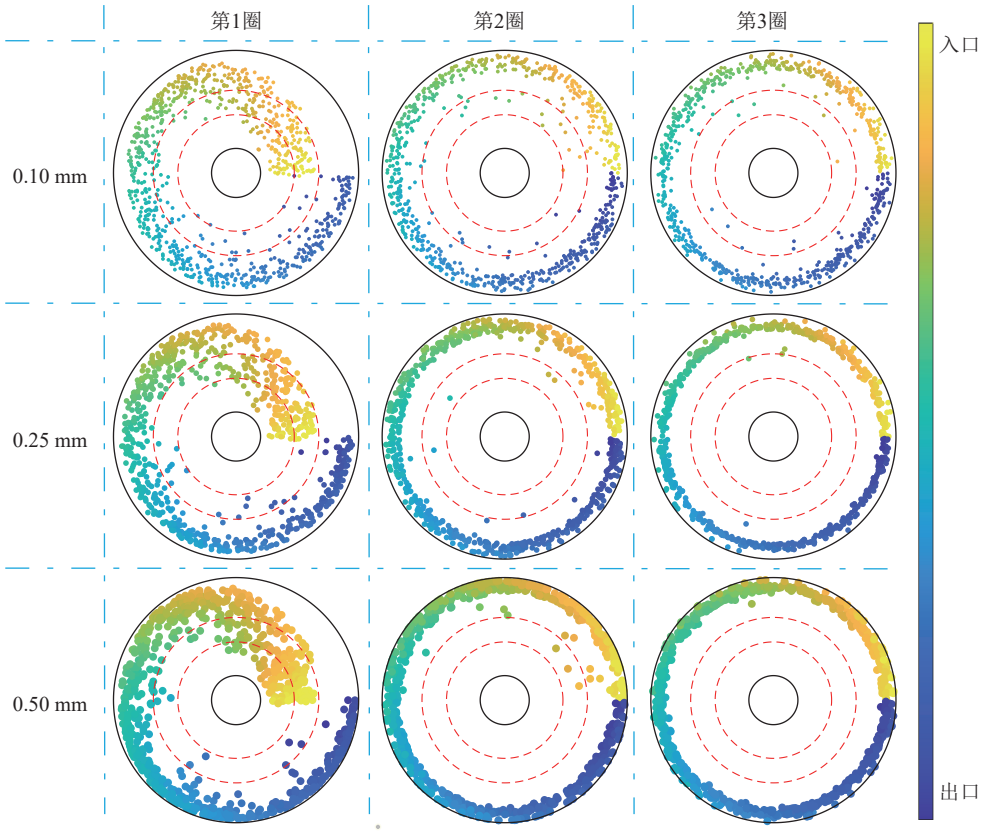


图 9 不同粒度低密度颗粒分布情况

Fig.9 Distribution of low density particles with different particle sizes

4 结　　论

(1) 螺旋分选过程中流场、颗粒在空间的分布是动态发展的过程, 依据流场分布及颗粒运动特性, 可将细粒煤螺旋分选全过程分为初始阶段 (前 1/3 圈)、过渡阶段 (1/3～2 圈) 以及亚稳定阶段 (2 圈以后)。

(2) 水流进入螺旋槽逐渐向槽外缘延伸, 在 135° 角位移时大量地聚集在靠近外缘处, 之后水流分布相对稳定, 水流深度沿径向由内至外增加, 直至 180°后流膜厚度总体变化趋于稳定, 720°之后螺旋槽外缘出现较为稳定的径向环流。

(3) 在初始阶段, 颗粒主要受水流向螺旋槽外缘的推动力影响, 沿螺旋槽倾斜方向运动并逐渐向槽外缘聚集; 在过渡阶段, 高密度颗粒和低密度颗粒因密度差异实现分选, 高密度颗粒逐渐向螺旋槽内缘移动, 低密度颗粒逐渐聚集在螺旋槽外缘; 在亚稳定阶段, 高密度颗粒进一步向螺旋槽内缘靠近, 且适当增大粒度有利于高密度颗粒向内缘的聚集, 低密度颗粒主要聚集在螺旋槽外缘, 粒度对低密度颗粒的运动行为影响不大。

(4) 粒度对高密度颗粒空间分布有显著影响, 而对于低密度颗粒分选行为影响不大, 颗粒粒度低于 0.1 mm 时, 高密度颗粒大量聚集在螺旋槽外缘, 与低密度颗粒混杂, 不利于高–低密度颗粒的分选。

参考文献(References):

[1] 叶贵川, 马力强, 徐鹏, 等. 螺旋分选机应用现状研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(4): 132−135.
YE Guichuan, MA Liqiang, XU Peng, et al. Analysis on application status of spiral separator[J]. Coal Engineering, 2017, 49(4): 132−135.

[2] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.

[3] DOHEIM M A, ABDEL GAWAD A F, MAHRAN G M A, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators: Part I. Low solids concentration(0.3% & 3% solids)[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(1-2): 198−215.

[4] MATTHEWS B W, FLETCHER CAJ, PARTRIDGE A C. Computational simulation of fluid and dilute particulate flows on spiral concentrators[J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22(12): 965−979.

[5] 高淑玲, 魏德洲, 崔宝玉, 等. 基于 CFD 的螺旋溜槽流场及颗粒运动行为数值模拟[J]. 金属矿山, 2014(11): 121−126.
GAO Shuling, WEI Dezhou, CUI Baoyu, et al. CFD-based numerical simulation of flow field of and particles motion behavior in spiral[J]. Metal Mine, 2014(11): 121−126.

[6] 刘祚时, 赵南琪, 刘惠中, 等. 螺旋溜槽分选流场中矿粒运动轨迹研究[J]. 中国钨业, 2016, 31(5): 66−71.
LIU Zuoshi, ZHAO Nanqi, LIU Huizhong, et al. Mineral particles trajectory of spiral concentrator separating flow field[J]. China Tungsten Industry, 2016, 31(5): 66−71.

[7] YE G C, LIU Q X, MA L Q, et al. CFD–DEM investigation of fluid and particle motion behaviors in initial stage of spiral separation process at low solids concentration[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 44(7): 1−6.

[8] YE G C, MA L Q, ALBERINI F, et al. Numerical studies of the effects of design parameters on flow fields in spiral concentrators[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2022, 42(1): 67−81.

[9] MENG L, GAO S, WEI D, et al. Investigation on the evolution of flow field stability in a spiral separator[J]. Minerals Engineering, 2021, 174: 107224.

[10] 赵一飞, 李振, 陶亚东, 等. 螺旋分选机槽面颗粒分布特征研究[J]. 选煤技术, 2020(1): 12−17.
ZHAO Yifei, LI Zhen, TAO Yadong, et al. Study of characteristics of particle distribution on trough surface of spiral[J]. Coal Preparation Technology, 2020(1): 12−17.

[11] 刘鑫, 张一敏, 刘涛, 等. 微细粒螺旋溜槽在含钒石煤选矿中的分选特性研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2017, 15(3): 70−77.
LIU Xin, ZHANG Yimin, LIU Tao, et al. Separation characteristics of vanadium pre-concentrating from stone coal using fine mineral spiral[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2017, 15(3): 70−77.

[12] 张一敏, 刘惠中. 超极限 *h/D* 螺旋溜槽的研究及应用[J]. 矿产综合利用, 2000(5): 43−46.
ZHANG Yimin, LIU Huizhong. Development and application of outlimited *h/D* helical chute[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2000(5): 43−46.

[13] 李华梁. CFD 技术应用于螺旋选矿机结构优化的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016: 10–24.
LI Hualiang. The application study of CFD technology on spiral concentrator structure optimization[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016: 10–24.

[14] MISHRA B K, TRIPATHY Alok. A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 94(3-4): 192−195.

[15] KWON J, KIM H, LEE S, et al. Simulation of particle-laden flow in a Humphrey spiral concentrator using dust-liquid smoothed particle hydrodynamics[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(10): 2694−2705.

[16] Fluent ANSYS. Ansys fluent theory guide[Z]. Ansys Inc. , USA, 2011, 390(1): 724−746.

[17] ABHILASH, USHA Y, SEETHARAMAN K, et al. Application of hydrodynamics using cfd in evaluating efficacy of external loop airlift reactor biochemical leaching of sea nodules[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(7): 892−898.

[18] 黄波, 许秋石, 徐宏祥, 等. 螺旋分选机流场及颗粒运动的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 655−661.
HUANG Bo, XU Qiushi, XU Hongxiang, et al. Numerical simulation of flow field and particle motion behavior in spiral separator[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 655−661.

[19] 叶贵川. 螺旋分选机流场特征及分选密度调控研究[D]. 北京: 中

国矿业大学 (北京), 2019: 56–60.
YE Guichuan. Study on flow field characteristics and control mechanism of separation density in coal spiral separator[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019: 56–60.

[20] 韦鲁滨, 李大虎, 陈赞歌, 等. 颗粒在脉动气流场中受力和分选的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 162−168, 176.
WEI Lubin, LI Dahu, CHEN Zange, et al. Numerical simulation of force and separation on particles in pulsing airflow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 162−168,176.

[21] 雷中云, 邓荣东, 姜克冰, 等. 低雷诺数下不规则颗粒沉降阻力公式的改进和验证[J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2022, 50(2): 271−277.
LEI Zhongyun, DENG Rongdong, JIANG Kebing, et al. Improvement and verification of the formula of settling resistance of irregular particles at low Reynolds number[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2022, 50(2): 271−277.

[22] 刘小兵, 程良骏. BASSET 力对颗粒运动的影响[J]. 四川工业学院学报, 1996, 15(2): 55−63.
LIU Xiaobing, CHENG Liangjun. Effects of BASSET history force on the motion in a flow field[J]. Journal of Sichuan Institute of Technology, 1996, 15(2): 55−63.

[23] 孙铭阳, 韦鲁滨, 朱学帅, 等. 液固分选流化床内颗粒动力学方程的简化及应用[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018, 49(6): 1307−1314.
SUN Mingyang, WEI Lubin, ZHU Xueshuai, et al. Simplification and application of particles kinetic equation for liquid-solid fluidized bed separator[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(6): 1307−1314.

[24] AGRAWAL V, SHINDE Y, SHAH M T, et al. Effect of drag models on CFD–DEM predictions of bubbling fluidized beds with Geldart D particles[J]. Advanced Powder Technology: The International Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 2018, 29(11): 2658–2669.

[25] BARRIOS Gabriel K P, DE Carvalho Rodrigo M, KWADE Arno, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248: 84−93.

[26] SUZZI D, TOSCHKOFF G, RADL S, et al. DEM simulation of continuous tablet coating: Effects of tablet shape and fill level on inter-tablet coating variability[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 69(1): 107−121.

[27] JUST S, TOSCHKOFF G, FUNKE A, et al. Experimental analysis of tablet properties for discrete element modeling of an active coating process[J]. Aaps Pharmscitech, 2013, 14(1): 402−411.

[28] ARYAEI A, HASHEMNIA K, JAFARPUR K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(10): 1037−1044.

[29] 周韦. 基于散粒体动力学的水田侧深施肥装置的分析方法和试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 7–55.
ZHOU Wei. The experiment and analysis of paddy field deep fertilizing device based on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015: 7–55.

[30] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦因数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 173−179.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physical Sinica, 2014, 63(17): 173−179.

[31] 周文秀. 玉米籽粒的物理力学特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 15–34.
ZHOU Wenxiu. The physical and mechanical properties research of corn grain [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015: 15–34.

[32] 李铁军, 王学文, 李博, 等. 基于离散元法的煤颗粒模型参数优化[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(5): 6−12.
LI Tiejun, WANG Xuewen, LI Bo, et al. Optimization method for coal particle model parameters based on discrete element method[J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(5): 6−12.

[33] 问小江, 方飞飞, 刘应科, 等. 基于煤粉堆积角的 EDEM 颗粒接触参数标定[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 114−119.
WEN Xiaojiang, FANG Feifei, LIU Yingke, et al. Research on stacking angle of coal particles and parameter calibration on EDEM[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 114−119.

[34] 李铁军. 煤颗粒离散元模型宏细观参数标定及其关系[D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 31–43.
LI Tiejun. Calibration of DEM model parameters for coal particles and research on relationships between macro and micro parameters[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 31–43.

[35] 吕凯. 微细煤泥分级沉降动力学特性模拟与试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021: 36–38.
LÜ Kai. Simulation and experimental study on dynamic characteristics of fine slime classification sedimentation[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021: 36–38.

[36] DIXIT P, TIWARI R, MUKHERJEE A K, et al. Application of response surface methodology for modeling and optimization of spiral separator for processing of iron ore slime[J]. Powder Technology, 2015, 275: 105−112.

[37] TRIPATHY S K, MURTHY Y R. Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite[J]. Powder Technology, 2012, 221: 387−394.

[38] 于进喜, 刘文礼, 姚嘉胤, 等. 粗煤泥分选设备及其特点对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 114−117.
YU Jinxi, LIU Wenli, YAO Jiayin, et al. Comparison analysis on coarse slime preparation equipment and features[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 114−117.

[39] 符福存, 周伟, 闫钦运, 等. 煤泥分选技术现状分析及展望[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 28−31.
FU Fucun, ZHOU Wei, YAN Qinyun, et al. Status analysis and prospect of slime separation technologies[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 28−31.