基于 CFD 的铀矿石重介质旋流器流场特性及分选效果研究

候鲜名,刘志超,李　广,田宇晖,张　晨,李春风,马　嘉,张守逊

(核工业北京化工冶金研究院,北京　101149)

摘要:针对重介质旋流器在铀矿分选过程中效率影响因素不明、参数设定缺乏理论依据的现实问题,以 FX250 型重介质旋流器为对象,采用 CFD-DEM 耦合方法构建多相流数值模拟体系,设置 7 组不同入料压力与重介质密度的对比工况,从流场分布、相态结构、颗粒运动三个维度探究了参数对旋流器特性及铀矿分选的影响,并结合江西火山岩型铀矿开展试验验证。结果表明:入料压力提升可优化流场与气芯结构,促进颗粒分层;重介质密度对流场影响弱,但能显著提高分离精度;验证试验结果证实,升高入料压力或增大重介质密度可提升精矿品位,但也会降低产率和回收率;根据试验结果确定入料压力 0.13～0.14 MPa、重介质密度 2.60～2.65 g/cm^3 为适合铀矿重介质旋流器分选的最优参数区间。

关键词:低品位硬岩铀矿;重选;重介质旋流器;CFD 模拟;流场特性;参数优化

中图分类号:TD958　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)05-0773-10

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.017

重介质旋流器作为重选核心设备,其原理是以重介质悬浮液为分选介质,利用目标矿物(高密度)与脉石(低密度)的密度差异,在高速旋转流场产生的离心力作用下,实现二者的快速分层与分离,最终完成目标矿物的富集和废石的抛除[1]。目前,重介质旋流器已在铁矿、煤矿,以及锂铍矿、锂辉石等有色金属矿分选中得到成功应用[2-6]。此外,重介质旋流器作为铀矿重选设备,依托离心力场强化密度分选,具有处理量大、分选速度快等优点,可有效分离细粒级铀矿颗粒,解决细粒级铀矿回收难题,能与摇床、螺旋溜槽等组成联合分选流程,也可单独使用实现铀矿石的预富集。然而,旋流器内部流场属于复杂的三维强旋转湍流流场,操作参数(给矿压力、给矿浓度、给矿速度等)对其影响显著[7-9],流场分布的合理性直接决定铀矿重选的分选精度、富集比及回收率。

旋流器重力分选机制复杂,涉及气-液-固多相湍流、颗粒间相互作用等多种物理现象,传统的试验方法难以完全揭示其内部规律[10]。目前基于 CFD 的重介质旋流器内部流场模拟已从早期单一液相流场的速度、压力场基础解析,逐步发展为结合 VOF 模型精准捕捉气芯结构、耦合 DEM 实现气-液-固三相流协同仿真的阶段,可同步解析流场分布与颗粒运动、分层规律。我国铀矿重选过程中,FX250 型重介质旋流器是当前铀矿重选领域的常用标准机型,其结构参数(如旋流器直径、锥角、入料口及溢流口尺寸等)已通过工程实践验证,能够适配铀矿石的粒度特性和现场工况条件,具备良好的适用性。但目前有关重介质旋流器在铀矿石分选领域的研究与应用仍存在诸多短板:一是对内部流场分布与颗粒运动规律认识不足,无法精准把握铀矿颗粒在流场中的运动轨迹,导致分选效率偏低;二是旋流器参数多依靠经验设定,缺乏理论支撑,参数匹配不合理,分选效果不理想,造成铀资源浪费。

针对上述问题,以 FX250 型重介质旋流器为对象,采用 CFD-DEM 耦合方法[11-13]构建多

收稿日期:2026-03-23;**修订日期**:2026-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(U2341266);核技术研发科研项目资助(HNKF202206(48))。

第一作者简介:候鲜名(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为铀及共伴生多金属矿选矿技术。

通信作者简介:刘志超(1983—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为放射性多金属矿综合回收技术。

相流数值模型，从流场分布、相态结构、颗粒运动三个维度研究了操作参数对旋流器分选铀矿效果的影响，优化了旋流器参数，并结合江西火山岩型铀矿开展了试验验证，以期提升铀矿重选效率、降低能耗、推动低品位铀矿资源的高效利用。

1 物理模型及数学模型

1.1 几何模型

图 1 为重介质旋流器几何结构示意图，旋流器直径、锥角等结构参数见表 1。

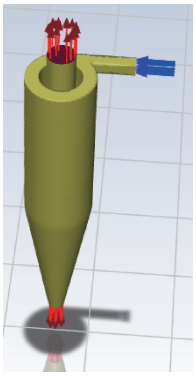


图 1 重介质旋流器几何结构示意

Fig. 1 Geometric structure schematic diagram of heavy medium cyclone

表 1 重介质旋流器结构参数

Table 1 Structural parameters of heavy medium cyclone

名称	性能参数
旋流器直径	DN 250 mm
旋流器柱体高度	640 mm
旋流器锥体高度	570 mm
锥角	20°
进料口口径	DN 50 mm
底流口口径	DN 60 mm
溢流口口径	DN 100 mm
溢流管插入深度	300 mm
溢流管壁厚	26 mm
设备布局方式	竖直方向

1.2 计算原理

本模拟将水与硅铁粉的混合物视为一个性质均一的流体相，采用 CFD-DEM 耦合方法进行求解。

1）多相流模型：采用 VOF（Volume of Fluid）两相流模型。

第一相：重介质悬浮液（Heavy Medium Suspension）。是一个等效的“伪液体”相，其物理性质（密度与黏度）根据不同工况预先计算并设定。

第二相：空气（Air）。用于精确捕捉旋流器中心的气芯（Air Core）结构。

2）湍流模型：选用雷诺应力模型（RSM），以精确求解强旋转流场[13]。

颗粒相（DEM-EDEM 2022）基本原理：采用离散元方法（DEM），将每一种矿石颗粒视为独立的计算单元，通过求解牛顿第二定律来追踪其在复杂流场中的运动轨迹[14]。

3）接触模型：颗粒间及颗粒-壁面间的接触力采用 Hertz-Mindlin（no slip）接触模型。

耦合原理（Fluent-EDEM Interface）：采用单向耦合方法，在每个时间步内，Fluent 向 EDEM 进行数据传递：Fluent 计算的流场（重介质悬浮液的流动）为 EDEM 中的矿石颗粒提供流体作用力（如曳力、压力梯度力、虚拟质量力、升力）。

1.3 数学模型

1.3.1 DEM 模型

为追踪计算多相流系统中的固体颗粒相，采用 DEM 模型描述颗粒在系统中的运动过程。DEM 模型是基于拉格朗日观点下的模型[15]，对所有颗粒的平移和旋转运动过程使用牛顿第二定律描述，方程的左边是加速度，右边是受力[14]。

$$m_i \frac{d_{v_i}}{d_t} = \sum F_{c,ij} + \sum_k F_{lr,ik} + F_{pf,i} + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d_{v_i}}{d_t} = \sum (M_{t,ij} + M_{r,ij}) \quad (2)$$

式中：m_i —颗粒 i 质量，g；I_i —颗粒 i 转动惯量，kg·m^2；v_i —速度，m/s；$F_{c,ij}$ 、$F_{lr,ik}$ —颗粒间的接触力、非接触力，N；$F_{pf,i}$ —颗粒与流体间的相互作用力，N；$m_i g$ —颗粒所受重力，N；$M_{t,ij}$ 、$M_{r,ij}$ —颗粒间切向、滚动摩擦力矩，N·m。

其中接触力 $\boldsymbol{F}_{c,ij}$ 由法向和切向接触力组成，表达式为：

$$\boldsymbol{F}_{c,ij} = \boldsymbol{F}_{cn,ij} + \boldsymbol{F}_{ct,ij} = -k_{n,ij}\delta_{n,ij} - \gamma_{n,ij}\dot{\delta}_{n,ij} - k_{t,ij}\delta_{t,ij} - \gamma_{t,ij}\dot{\delta}_{t,ij} \quad (3)$$

式中：$k_{n,ij}$ 、$k_{t,ij}$ —法向、切向刚度系数，N/m；$\delta_{n,ij}$ 、$\delta_{t,ij}$ —颗粒的法向和切向的重叠量；$\gamma_{n,ij}$ 、$\gamma_{t,ij}$ —法向、切向阻尼系数，N·s/m。

1.3.2　VOF 模型

本研究系统由气液固三相构成，其中气体和液体之间存在显著的空气柱。VOF 模型是建立在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法，通过在网格中引入体积分数变量 α。α 介于 0～1 之间，代表主流体相与次流体相在网格中所占空间比例，如当某一个网格的主流体相体积分数等于 1 时，说明该网格中充满主流体相。VOF 方法通过追踪计算网格中体积分数变化，精确捕捉不同相之间的自由液面[16]。

用连续方程可描述自由液面变化过程，相应的方程如下：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_f \cdot \nabla \alpha = 0 \tag{4}$$

在网格控制单元当中，计算求解流体的密度和黏度，使用线性插值的方法实现：

$$p_f = p_1 \alpha + p_g (1-\alpha) \tag{5}$$

$$\mu_f = \mu_1 \alpha + \mu_g (1-\alpha) \tag{6}$$

VOF 模型中质量守恒方程可以表达为：

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \boldsymbol{u}_q)\right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \tag{7}$$

式中：q—气相和液相；ρ—流体密度，kg/m^3；$\dot{m}_{pq}$—p 相向 q 相的质量传递速率，kg/s；$\dot{m}_{qp}$—q 相向 p 相的质量传递速率，kg/s；α_q—q 相的体积分数，无量纲。

基于守恒性可知：

$$\alpha_p + \alpha_q = 1 \tag{8}$$

对于动量守恒方程，有如下表达式：

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho \boldsymbol{u}) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}\,\boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T)] + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{u}$—速度矢量，m/s；ρ—流体密度，kg/m^3；p—压力，Pa。

1.4　基本模拟条件及边界条件

1）固体矿石参数：矿物颗粒大小为－8 mm，原矿平均密度约为 2.58 g/cm^3。

2）液体物性参数：流体工质为水，常温 20 ℃；液体密度为 998.2 kg/m^3；液体动力黏度为 1.003×10^{-3} Pa·s。

3）重介质物性参数：重介质悬浮材料为硅铁粉微粒，常温为 20 ℃；颗粒密度为 7 000 kg/m^3；微粒粒径为 20 μm。不同重介质密度对应的计算有效黏度见表 2。

表 2　不同重介质密度对应的计算有效黏度

Table 2　Calculated effective viscosity corresponding to different heavy medium densities

介质密度/(g·cm^{-3})	计算有效黏度/(Pa·s)
2.50	2.79×10^{-3}
2.55	2.96×10^{-3}
2.60	3.14×10^{-3}
2.65	3.34×10^{-3}

4）压力边界条件：混合浆液在设备进口处总压力为 0.15 MPa；混合浆液在设备上、下出口处静压力为 0 MPa。

1.5　对照模拟条件

本次模拟共分 7 个不同工况，各工况的对照模拟条件见表 3。

表 3　各工况的对照模拟条件

Table 3　Simulation variation conditions for each operating case

工况	入料压力/MPa	重介质密度/(g·cm^{-3})
1	0.12	2.60
2	0.13	2.60
3	0.14	2.60
4	0.14	2.50
5	0.14	2.55
6(同 3)	0.14	2.60
7	0.14	2.65

2　模拟结果与讨论

本次模拟从流场分布、相态结构、颗粒运动三个维度，通过垂直方向流速、水平方向流速、垂直方向相体积分数、水平方向相体积分数、流线、颗粒散点六类可视化图，分析入料压力、重介质密度两大参数对旋流器分选过程的影响。

2.1　流场分布

垂直方向流速图主要用于表征纵剖面流速分布，直观反映参数对旋流场强度的影响。水平方向流速图可以用于表征柱段、锥体段的流速大小分布与不同高度断面流场，依托径向流速梯度，分析离心力场均匀性及颗粒径向分层特性[17]。

2.1.1　入料压力对流场分布影响

不同入料压力下垂直方向流速分布如图 2 所示。可知，入料压力与流速呈正相关关系：入料压力为 0.12 MPa 时，最大流速为 3.67 m/s；入料压

力为 0.13 MPa 时，最大流速为 3.99 m/s；入料压力为 0.14 MPa 时，最大流速为 4.31 m/s。这是因为随入料压力增大，高流速区（红色区域）从进料口向锥体段逐步延伸，柱段上部至锥体下部的流速梯度更显著，旋流场离心力强度随之提升。

不同入料压力下水平方向流速分布如图 3 所示。可知：随入料压力升高，横剖面径向流速梯度更显著，离心力场更均匀；入料压力为 0.12 MPa 时，横剖面壁面与轴心的流速差较小，径向梯度模糊，局部区域流速分布不均；入料压力为 0.14 MPa时，横剖面壁面流速最大，向轴心逐步递减，流速梯度平滑且均匀。

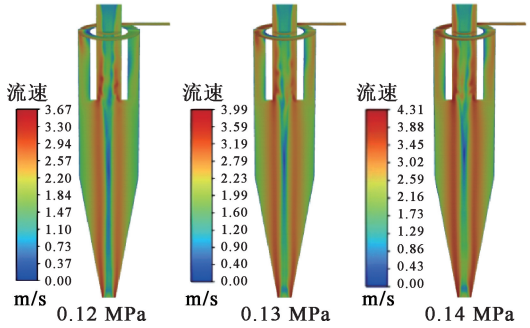


图 2 不同入料压力下垂直方向流速分布

Fig. 2 Vertical velocity distribution diagram under different feed pressures

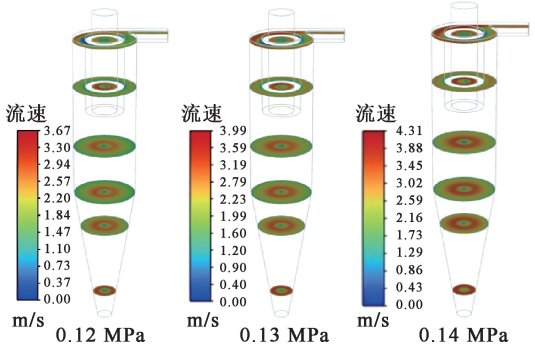


图 3 不同入料压力下水平方向流速分布

Fig. 3 Horizontal velocity distribution diagram under different feed pressures

2.1.2 重介质密度对流场分布影响

不同重介质密度垂直方向流速分布如图 4 所示。可知：重介质密度与流速呈弱负相关，在固定入料压力为 0.14 MPa 条件下，随重介质密度增大，流速数值呈小幅下降趋势，高流速区面积略有收缩，但流速分布的规整性未改变，柱锥段的流速梯度保持稳定。

不同重介质密度水平方向流速分布如图 5 所示。可知：密度变化对径向流速梯度无明显影响，在不同重介质密度下，旋流器水平流速分布图的横剖面流速分布一致，壁面至轴心的流速梯度保持稳定，离心力场均匀性未改变。

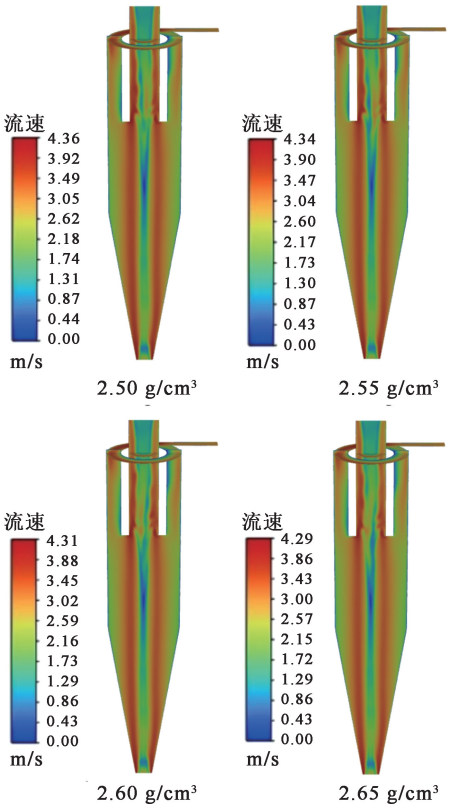


图 4 不同重介质密度下垂直方向流速分布

Fig. 4 Vertical velocity distribution diagram under different heavy medium densities

2.2 相态结构

垂直方向下相体积分数分布图可用于表征纵剖面相态分布，反映气液两相的空间填充特征，主要展示旋流器纵剖面水相（重介质悬浮液）/空气相的体积占比，数值 1 为纯水相，0 为纯空气相，可直观判断气芯在纵剖面的形态、大小，以及重介质在柱锥段的填充范围，用于分析气液两相耦合状态；水平方向下相体积分数分布图可用于表征不同高度横剖面相态分布，精准反映气芯的径向结构特征，从俯视角度展示旋流器不同高度横剖面的水相/空气相体积占比，精准判断各高度气芯的直径大小、圆形度及中心度，弥补垂直方向图对气芯径向结构表征的不足，适用于分析气芯稳定性。

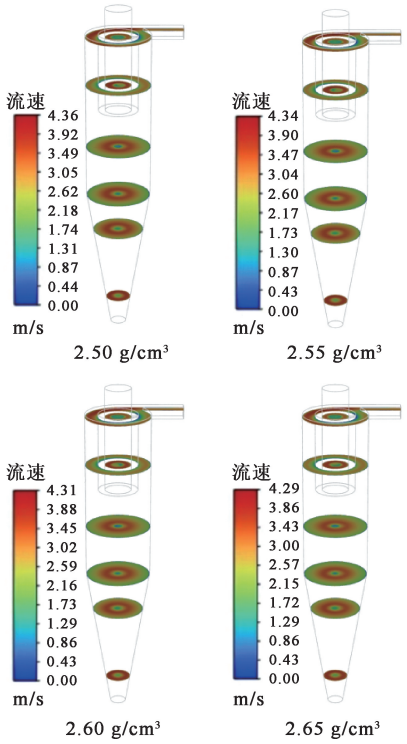


图 5　不同重介质密度下水平方向流速分布

Fig. 5　Horizontal velocity distribution diagram under different heavy medium density levels

2.2.1　入料压力对相态分布影响

不同入料压力下垂直方向相体积分数分布如图 6 所示。可知：随入料压力升高，气芯形态更规整，重介质填充度显著提升；入料压力为0.12 MPa时，气芯呈“粗细不均”的条状，柱段上部存在空气相渗透（水相体积分数＜90%），重介质未充满分选空间；入料压力为 0.14 MPa 时，气芯为“上细下粗”的标准柱锥状，空气相仅集中在轴心，水相体积分数约为 100% 覆盖整个柱锥段壁面，重介质完全充满有效分选空间。

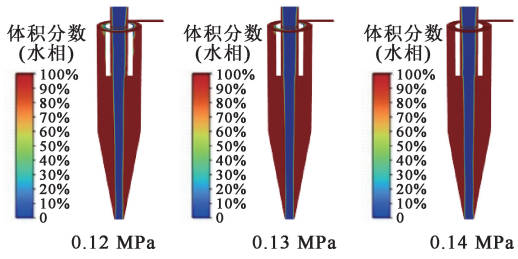


图 6　不同入料压力下垂直方向相体积分数分布

Fig. 6　Vertical phase volume fraction distribution diagram under different feed pressures

不同入料压力下水平方向相体积分数分布如图 7 所示。可知：随入料压力升高，各高度气芯的圆形度、中心度显著提升，直径更均匀；入料压力为 0.12 MPa时，水平方向相体积分布图在柱段中部、锥体上部的气芯呈不规则椭圆形，且偏离轴心，局部气芯直径突变；入料压力为 0.14 MPa 时，从溢流管至锥体下部，各高度气芯均为标准圆形，中心与旋流器轴心重合，直径自上而下均匀增大，无突变。

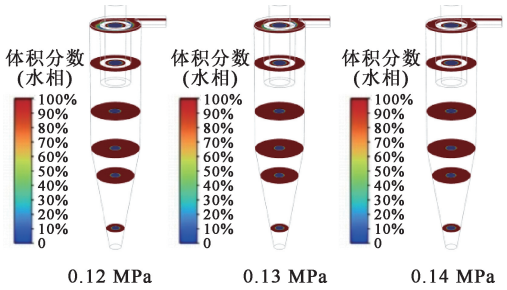


图 7　不同入料压力下水平方向相体积分数分布

Fig. 7　Horizontal phase volume fraction distribution diagram under different feed pressures

2.2.2　重介质密度对相态分布影响

不同重介质密度下垂直方向相体积分数分布如图 8 所示，水平方向相体积分数分布如图 9 所示。可知：重介质密度的变化对气芯的径向结构无明显影响，不同重介质密度下各高度气芯的圆形度、中心度、直径变化规律一致，仅介质密度增大使气芯直径略有减小；重介质密度变化对气芯形态和重介质填充度无明显影响，气芯均为规整柱锥状，水相填充范围一致，仅因介质黏度小幅变化，气芯直径略有收缩，可忽略。

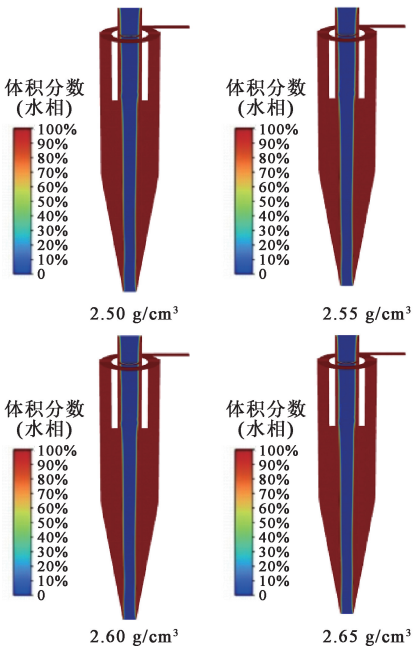


图 8　不同重介质密度下垂直方向相体积分数分布

Fig. 8　Vertical phase volume fraction distribution diagram under different heavy medium densities

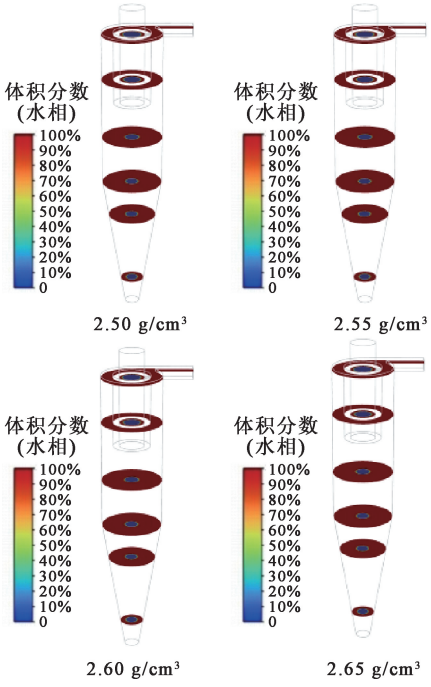


图 9　不同重介质密度下水平方向相体积分数分布

Fig. 9　Horizontal phase volume fraction distribution diagram under different heavy medium densities

2.3　颗粒运动

流线图可用于表征流体质点运动轨迹，反映参数对旋流场流动形态的影响，以线条形式描绘旋流器内流体质点的运动轨迹，能够直观判断旋流场的流动形态，包括内旋流和外旋流的划分、轨迹规整性、是否存在涡流或死区，以及流体质点的输运方向等，可用于直观分析流体动力学过程[18]；颗粒散点图可用于表征矿石颗粒空间位置，直接反映参数对分离效果的最终影响。该图展示了某一时刻（本次为 3 s）所有矿石颗粒在旋流器内的空间分布位置，不同颜色/数值可对应颗粒质量/密度，能用于直接判断分离效果。

2.3.1　入料压力对颗粒运动影响

不同入料压力下流线如图 10 所示。可知：随入料压力升高，流线更规整，内外旋流划分清晰，无涡流和死区；入料压力为 0.12 MPa 时，流线存在局部扭曲，锥体下部出现小范围涡流，内旋流（向溢流口）和外旋流（向底流口）的轨迹交叉；入料压力为 0.14 MPa 时，流线呈“螺旋状”均匀分布，外旋流沿壁面自上而下至底流口，内旋流沿轴心自下而上至溢流口，二者划分清晰，全流场无涡流、死区，流体质点输运方向明确。

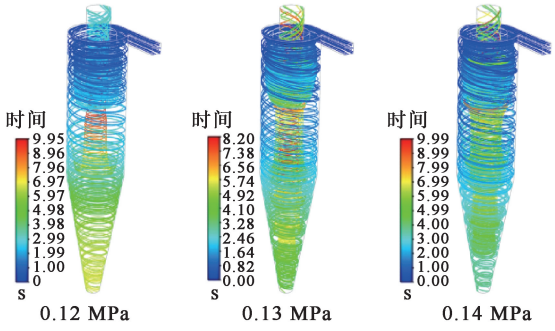


图 10　不同入料压力下流线

Fig. 10　Streamline diagram under different feed pressures

不同入料压力下颗粒散点如图 11 所示。可知：随入料压力升高，颗粒分层逐步清晰，混叠区域持续缩小；入料压力为 0.12 MPa 时，轻、中、重颗粒在柱段中部至锥体上部严重混叠，无明显分层；入料压力为 0.13 MPa 时，混叠区域缩小，重颗粒开始向锥体下部沉降，但仍有少量中颗粒随轻颗粒向溢流口偏移；入料压力为 0.14 MPa 时，三类颗粒完全分层，轻/中颗粒集中于柱段上部至溢流口区域，重颗粒全部沉降至锥体下部至底流口区域，无混叠。

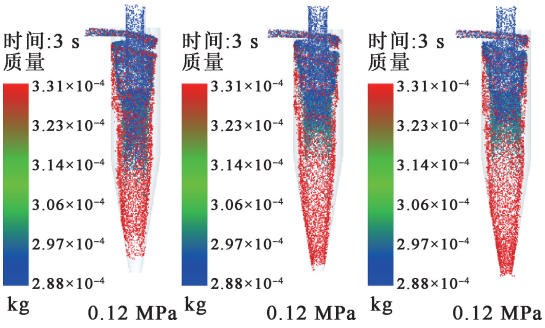


图 11　不同入料压力下颗粒散点

Fig. 11　Scatter plot of particles under different feeding pressures

2.3.2　重介质密度对颗粒运动影响

不同重介质密度下流线如图 12 所示。可知：重介质密度变化对流线形态无明显影响，流线均为规整螺旋状，内外旋流划分清晰，仅介质黏度增大使流线的螺旋密度略有提升。不同重介质密度下颗粒散点如图 13 所示。可知：随重介质密度增大，颗粒分离精度及分选效果均得以提升；重介质密度为 2.50 g/cm³ 时，大量中/重颗粒随轻颗粒

至溢流口，未得到有效分离；重介质密度为 2.65 g/cm³时，轻/中颗粒完全驱离至溢流口，重颗粒完全沉降至底流口，三类颗粒空间分布无任何交叉，分离精度达到最优。

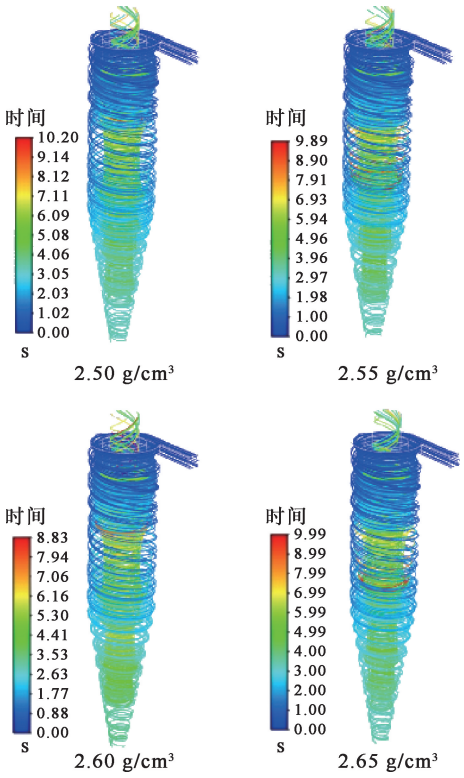


图 12　不同重介质密度下流线

Fig. 12　Streamline diagram under different heavy medium densities

综上可知，入料压力升高可提升旋流场流速与离心力强度，优化气芯规整性、消除涡流死区，使径向流速梯度更均匀、重介质充满分选空间，为密度分选提供稳定力场；压力不足则易造成流场紊乱、气芯畸形、分层不清，导致铀矿物与脉石混选、精矿品位降低。因此，铀矿分选的入料压力宜采用 0.13～0.14 MPa。在此压力区间内，可形成稳定气芯与均匀流场，在避免过度抛尾的同时能强化颗粒按密度分离，适用于低品位、细粒级火山岩型铀矿的预富集与抛尾。

改变重介质密度不会破坏流场稳定性，可精准调控分选精度。以提升品位为目标时，可适当增大重介质密度；以确保回收率为目标时，可适当减小重介质密度。重介质密度在 2.60～2.65 g/cm³ 区间时，流场稳定、气芯规整，能够兼顾流场稳定性与分离精度。

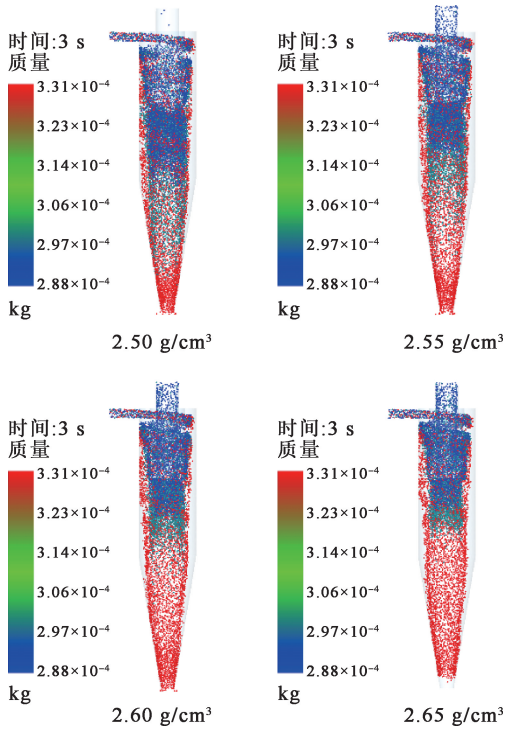


图 13　不同重介质密度下颗粒散点

Fig. 13　Scatter plot of particles under different heavy medium densities

3　试验验证

验证试验用矿石样品取自江西火山岩型铀矿，原矿铀品位为 0.162%。将样品破碎至 −8 mm后，开展重介质旋流器分选试验，设备参数与模拟参数一致。通过调节给矿压力和重介质密度控制尾矿产率，其中入料压力变化范围为 0.12～0.15 MPa，相应试验结果如图 14 所示；重介质的密度变化范围为 2.50～2.70 g/cm³，相应试验结果如图 15 所示。

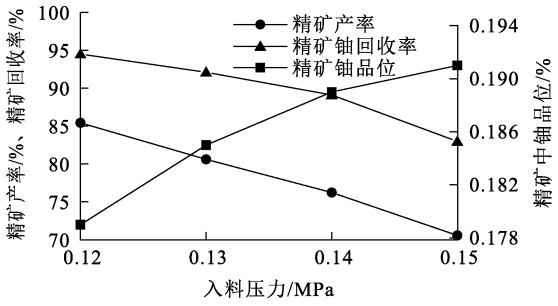


图 14　不同入料压力对重介质分选精矿的影响

Fig. 14　Effect of different feed pressures on concentrate obtained by heavy medium separation

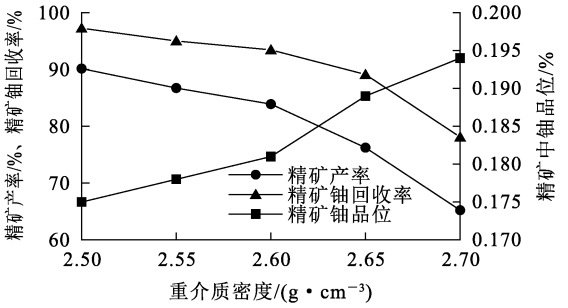


图 15 不同重介质密度对重介质分选精矿的影响

Fig. 15 Effect of different heavy medium densities on concentrate obtained from heavy medium separation

由图 14 可知：入料压力从 0.12 MPa 升至 0.15 MPa 时，精矿产率持续下降，由 85.43%降至 70.58%。入料压力升高能够使更多矿物进入尾矿产品，导致精矿产率降低；入料压力从 0.12 MPa升至 0.15 MPa 时，精矿回收率降低，从 94.51%降至 82.48%，说明升高入料压力在提升抛尾率的同时也会造成有用矿物流失，使铀回收率降低；入料压力从 0.12 MPa 升至 0.15 MPa时，精矿中铀品位持续提升，由0.179%升至 0.191%，说明提高入料压力有助于富集有用矿物，实现精矿铀品位的提升。

由图 15 可知：重介质密度从 2.50 g/cm^3 升至 2.70 g/cm^3 时，精矿产率持续降低，由 90.16%降至 65.23%，精矿中铀回收率逐步降低，由 97.27%降至 78.11%，说明增大重介质密度可提高分选精度，但同时因受矿物粒度存在差异，以及受流体力学作用影响，也会导致部分细粒级有用矿物被重介质流夹带而进入尾矿，造成铀回收率下降；重介质密度从 2.50 g/cm^3 升至 2.70 g/cm^3 时，精矿中铀品位显著提升，由 0.175%升至 0.194%，说明高密度重介质能将低密度脉石与高密度有用矿物有效分离，实现精矿富集。

综上可知，升高入料压力或增大重介质密度均可显著提升精矿品位，但也都会导致精矿产率与铀回收率同步降低，这是重介质旋流器分选过程中普遍存在的规律。在实际生产中，需根据产品质量要求或资源回收目标进行参数设置：若以获得高品位精矿为目标，可适当提高入料压力或介质密度；若优先考虑回收率，则应选择较低的参数。本试验条件下，综合考虑分选效率、精矿品位及回收率，确定入料压力 0.13～0.14 MPa、重介质密度 2.60～2.65 g/cm^3 为最优参数区间。

4 结论

针对重介质旋流器在铀矿分选过程中效率影响因素不明、参数设定缺乏理论依据的现实问题，以 FX250 型重介质旋流器为对象，采用 CFD-DEM 耦合模拟方法，从流场分布、相态结构、颗粒运动三个维度，通过六类可视化图，分析了入料压力与重介质密度两大参数对旋流器分选铀矿石过程的影响，并结合试验对模拟结果进行验证，探讨了重介质旋流器内部分选机制。研究结论如下：

1）入料压力是旋流器流场特性的关键影响因素，升高入料压力可显著增强旋流场强度、优化气芯结构，消除流场涡流与死区，实现矿石颗粒精准分层分离。

2）重介质密度对旋流器流场分布、气芯结构无明显影响，仅小幅改变流速与流线形态，但密度增大能显著提高颗粒分离精度，重介质密度为 2.65 g/cm^3 时分离效果最优。

3）江西火山岩型铀矿重介质旋流器分选试验与数值模拟结果一致，升高入料压力或增大重介质密度均能提升铀精矿品位，但也会同步降低精矿产率与铀回收率，存在品位与回收率的平衡关系。铀矿石重介质旋流器分选的最优参数区间为入料压力 0.13～0.14 MPa、重介质密度 2.60～2.65 g/cm^3，此时能兼顾分选精度、精矿品位与资源回收率。

后续可围绕给矿速度、角锥比、矿石粒度等参数开展铀矿重介质旋流器耦合模拟与试验验证，探究各参数对流场特性、颗粒运动的影响机制，通过正交试验验证模拟结果，建立多参数耦合优化模型，为设备参数优化提供理论支撑。

参考文献：

[1] 汤优优，喻连香，陈雄. 重介质选矿技术在处理有色金属矿和非金属矿的研究现状及展望[J]. 矿产综合利用，2021，42(4)：118-124.
Tang Youyou，Yu Lianxiang，Chen Xiong. Research status and prospects of dense medium beneficiation technology in treating non-ferrous and non-metallic ores[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2021，42(4)：118-124.

[2] 胡振涛，陆占国，孙长胜，等. 齐大山铁矿粗细分级旋流器数值优化试验研究[J]. 金属矿山，2021(5)：160-166.

Hu Zhentao，Lu Zhanguo，Sun Changsheng，et al. Research on numerical optimization of hydrocyclone of coarse and fine fractions classification in Qidashan Iron Mine[J]. Metal Mine，2021(5)：160-166.

[3] 杨茂青. 重介质旋流器选煤技术在我国的创新发展与应用[J]. 选煤技术，2022，50(3)：7-13.
Yang Maoqing. Innovative development and application of China′s heavy medium cyclone coal washing technology[J]. Coal Preparation Technology，2022，50(3)：7-13.

[4] 宋紫欣，谢海云，张培，等. 选煤用重介质旋流器的研究进展[J]. 选煤技术，2023，51(1)：1-8.
Song Zixin，Xie Haiyun，Zhang Pei，et al. Research progress of heavy medium coal washing cyclone[J]. Coal Preparation Technology，2023，51(1)：1-8.

[5] 桂鹏. 重介质旋流器在新疆某锂铍矿分选中的应用[J]. 中国矿山工程，2024，53(4)：56-61.
Gui Peng. Application of heavy medium cyclone in separation of a lithium beryllium ore in Xinjiang[J]. China Mine Engineering，2024，53(4)：56-61.

[6] 王建国，周丽君，欧阳超. 重介质旋流器在锂辉石选矿中的应用[J]. 世界有色金属，2023(24)：68-70.
Wang Jianguo，Zhou Lijun，Ouyang Chao. Application of dense medium cyclone in spodumene beneficiation[J]. World Nonferrous Metals，2023(24)：68-70.

[7] 孟亚丽. 重介旋流器结构参数对分离性能影响的数值研究[D]. 兰州：兰州大学，2016.

[8] 王振华. 基于 CFD 数值模拟的高精度三产品重介质旋流器结构优化设计[J]. 选煤技术，2024，52(5)：40-50.
Wang Zhenhua. Optimum structural design of high-precision three-product heavy medium cyclone based on CFD numerical simulation[J]. Coal Preparation Technology，2024，52(5)：40-50.

[9] 孙娜. 重介质旋流器结构优化与流场模拟的研究[D]. 北京：煤炭科学研究总院，2019.

[10] 帖志国. 重介质旋流器分选工艺研究[J]. 机械管理开发，2022，37(8)：148-150.
Tie Zhiguo. Research on heavy media cyclone sorting process[J]. Mechanical Management and Development，2022，37(8)：148-150.

[11] 胡自强，周贤武，吴强波. 基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器性能预测分析[J]. 矿山机械，2022，50(4)：39-44.
Hu Ziqiang，Zhou Xianwu，Wu Qiangbo. Prediction and analysis on performance of hydrocyclone based on CFD-DEM coupling[J]. Mining & Processing Equipment，2022，50(4)：39-44.

[12] 解宏智. 重介质旋流器的 CFD 数值模拟研究[J]. 机械管理开发，2022，37(12)：96-97.
Xie Hongzhi. CFD Numerical simulation study of heavy media cyclone[J]. Mechanical Management and Development，2022，37(12)：96-97.

[13] 方建新. 重选过程中重介质旋流器工艺过程模拟分析[J]. 机械管理开发，2023，38(10)：46-47.
Fang Jianxin. Simulation analysis of heavy media cyclone process in reelection process[J]. Mechanical Management and Development，2023，38(10)：46-47.

[14] 赵建章. 基于 CFD 三产品重介质旋流器内介质颗粒分布的数值模拟[D]. 徐州：中国矿业大学，2020.

[15] 黄波，徐宏祥，陈晶晶，等. 重介质旋流器分选过程的离散分析与数值模拟[J]. 煤炭学报，2019，44(4)：1216-1223.
Huang Bo，Xu Hongxiang，Chen Jingjing，et al. Discrete analysis and numerical simulation for separation process of dense medium cyclone[J]. Journal of China Coal Society，2019，44(4)：1216-1223.

[16] 高睿. 重介质旋流器分选特性与数值模拟研究[J]. 机械管理开发，2022，37(5)：23-24.
Gao Rui. Numerical simulation study on the sorting characteristics of heavy media cyclone[J]. Mechanical Management and Development，2022，37(5)：23-24.

[17] 张鹏. 重介质旋流器流场的数值模拟[J]. 科技与创新，2014(11)：64.
Zhang Peng. Numerical simulation of heavy medium cyclone flow field[J]. Science and Technology & Innovation，2014(11)：64.

[18] 黄波，陈晶晶. 重介质旋流器颗粒运动特性分析及数值模拟[J]. 煤炭工程，2015，47(5)：115-117.
Huang Bo，Chen Jingjing. Characteristic analysis and numerical simulation of particle motion in dense medium cyclone[J]. Coal Engineering，2015，47(5)：115-117.

Flow Field Characteristics and Separation Effect of Heavy Medium Cyclone for Uranium Ore Based on CFD

HOU Xianming，LIU Zhichao，LI Guang，TIAN Yuhui，ZHANG Chen，
LI Chunfeng，MA Jia，ZHANG Shouxun

(*Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy，CNNC，Beijing* 101149，*China*)

Abstract：In response to the current situation where the influencing factors of the efficiency of heavy

medium cyclones in uranium ore separation are unclear and the parameter settings lack theoretical basis, taking the FX250 type heavy medium cyclone as the object, a multi-phase flow numerical simulation system was constructed using the CFD-DEM coupling method. Seven sets of different feed pressure and heavy medium density comparison conditions were set up. The effects of parameters on the characteristics of the cyclone and uranium ore separation were explored from three dimensions: flow field distribution, phase structure, and particle movement. Experimental verification was carried out in conjunction with the Jiangxi volcanic rock-type uranium ore. The results show that increasing the feed pressure can optimize the flow field and the gas core structure, promoting particle stratification; the influence of heavy medium density on the flow field is weak, but it can significantly improve the separation accuracy. The test results confirm that increasing the feed pressure or the heavy medium density can improve the grade of the concentrate, but it will reduce the yield and recovery rate. Based on the experimental results, the optimal parameter range for uranium ore separation using the heavy medium cyclone is determined as a feed pressure of 0.13-0.14 MPa and a dense medium density of 2.60-2.65 g/cm^3.

Key words: low-grade hard rock uranium ore; heavy separation; heavy medium cyclone; CFD simulation; flow field characteristics; parameter optimization