

固液分离旋流器压力降量纲分析与数值模拟

曹鸣谦^{1,2}, 王亚安^{1,2}, 杜志明^{1,2}, 原 渊^{1,2}

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 在地浸采铀工艺中, 旋流器受压降、能耗限制, 推广难度较大。为此, 基于相似模化方法, 综合分析影响地浸采铀旋流器压力降的结构参数、操作参数和物性参数, 结合旋流器试验数据和相关引文数据, 建立了描述旋流器性能与其影响因素关系的相似准数模型。该模型计算值与实验值的误差在15%以内, 可用于预测铀矿山浸出工艺中旋流器的压力降。利用Fluent模拟了旋流器内部流场, 分析了压降产生机制, 研究结果可为地浸采铀的旋流器结构优化、工况优化提供理论依据。

关键词: 地浸采铀; 旋流器; 量纲分析; 压力降; 相似模型; Fluent模拟

中图分类号: TL212.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0071-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.04.02

受地下岩矿、流场、钻孔结构、工艺条件等影响, 地浸采铀浸出液中常携带黏土、泥砂等杂质。浸出液经过滤、吸附等处理后, 用于配制浸出剂; 其中残留的固相颗粒会随溶液进入钻孔和矿层, 造成机械堵塞, 使抽注液量降低^[1-4], 对吸附、淋洗等水冶工序也会产生不利影响。因此, 液相脱固是保证水冶工序正常进行的关键步骤之一^[5-8]。

目前, 地浸铀矿山常用的液相脱固方法主要有袋式过滤和砂滤。袋式过滤器滤袋更换频繁, 人力支出和物料成本高; 砂滤塔设备重、占地面积大、价格高、反冲洗操作频繁。因此, 亟需对当前地表固液分离工艺进行改造和优化。旋流器利用离心力进行固液分离, 具有结构简单、性能优越、成本低等特点, 被广泛应用于矿物加工、石油化工, 及环境保护等领域^[9-11], 将旋流器引至地浸采铀地表固液分离流程具有可行性。研究旋流器性能优化方式, 对于提升地浸铀矿山工业生产效率、降低设备运行成本具有较大意义。

旋流器性能优化的核心目标之一是降低运行压力。前人在旋流器性能优化方面进行了大量研究, 通过调节给料压力、流速及浓度等操作参数, 实现了提效降阻的优化目标^[12]; 采用数值模拟和

实验相结合的方法, 探究了旋流器并联排布方式和压降的关系, 为优化设备排布、降低系统压降提供了科学依据^[13]; 通过溢流管开缝, 可降低26%的压降^[14]; 通过人工神经网络算法, 得到了旋流器的压降预测模型, 为旋流器的设计提供了新思路^[15]。但对旋流器性能优化的理论依据仍缺乏深入研究。

由于旋流器内部具有三相、三维、强旋流运动的复杂特性, 直接求解其分离性能十分困难。为此, 基于相似理论, 通过构建实验数据与相似准数间的函数关系, 定量揭示分离现象中各物理量之间的相互作用机制, 并通过Fluent数值模拟, 揭示旋流器内部流场分布, 为地浸采铀旋流器的节能、性能优化及工业应用提供理论依据。

1 实验装置和方法

实验装置主要由动力系统、旋流器和袋式过滤器组成(图1)。立式泵为动力系统提供流体动力, 驱动含砂流体进入旋流器进行分离, 固体颗粒(沙砾)被分离并收集于料斗中; 经过旋流器过滤的流体进入袋式过滤器进行二次过滤; 洁净的流体通过涡轮流量计进入离子交换设备, 进行后续

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 中核集团青年英才项目(地浸采铀新型地表固液分离系统研发及应用)。

第一作者简介: 曹鸣谦(1996—), 男, 浙江永康人, 博士, 高级工程师, 主要从事地浸采铀和化工机械科研工作。

通信作者简介: 杜志明(1980—), 男, 河北邯郸人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地浸采铀科研和管理工作。

处理。主要实验参数:进液流量(Q_{in})为 $8.1 \sim 12.9 \text{ m}^3/\text{h}$,入口流速(V_{in})为 $0.16 \sim 1.08 \text{ m/s}$ 。旋流器结构尺寸及结构示意图见表 1、图 2。

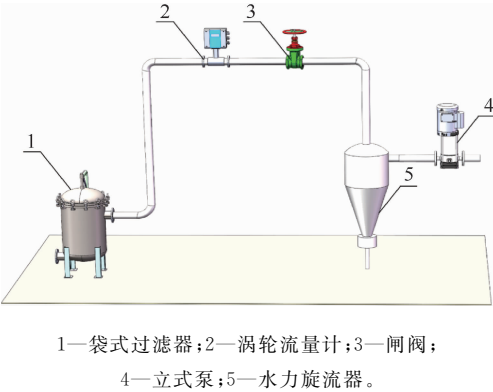


图 1 实验装置图

Fig. 1 Picture of the experimental system

表 1 旋流器结构尺寸

Table 1 Structure parameters of the hydro-cyclone			
参数	数值/mm	参数	数值/mm
D_1	65	H_1	200
D_o	65	H_2	90
D_1	369	H_3	90
D_2	80	H_4	305
D_3	159	H_5	500
D_4	32	H_6	100
H_7	200		

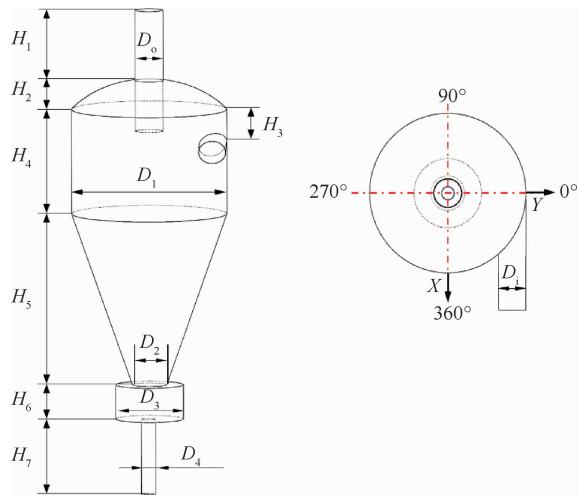


图 2 旋流器结构示意图

Fig. 2 Structure schematic of the hydro-cyclone

采用马尔文激光粒度仪,测量某试验采区 C0101^[16]抽液井浸出液中的粒度分布,结果见图 3。浸出液中的颗粒中位粒径(d_{50})为 $26.1 \text{ }\mu\text{m}$,最大粒径(d_{max})为 $174 \text{ }\mu\text{m}$,最小粒径(d_{min})为 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$,粉料粒度服从对数正态概率分布。

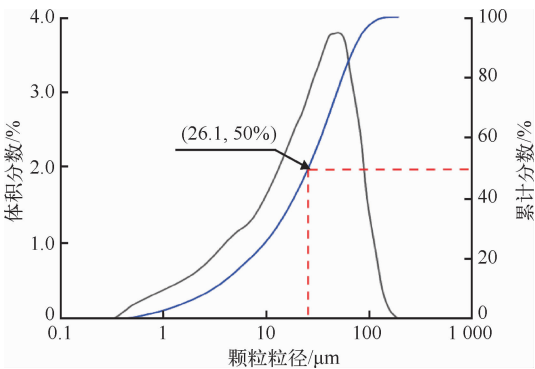


图 3 C0101 抽液井浸出液中颗粒粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution from C0101 pumping well

2 数值模拟方法

2.1 网格划分与计算模型

采用 Fluent 软件对水力旋流器的液相流场进行计算,网格划分见图 4。网格由结构化六面体单元构成,通过 ICEM CFD 进行分区加密处理,其中入口管段、溢流口区域及底流口附近采用局部加密策略,最小网格尺寸达 0.5 mm ,整体平均网格尺寸为 2.8 mm ,点数为 4.1×10^5 个。针对旋流器内三维强旋流场的仿真需求,采用雷诺应力模型(RSM)表征各向异性湍流特征。选择 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合计算,压力梯度项通过 PRESTO! 格式进行离散化处理。在结构化网格体系下,为提高计算精度,对流项采用 QUICK 差分格式。边界条件设置:液相入口设为速度进口条件(参数与实验工况匹配),出口采用自由流出边界,固壁面应用无滑移约束并配合标准壁面函数。求解过程采用瞬态耦合计算策略,设置 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时间步长迭代至残差收敛。模拟工况选取本地浸采铀旋流器最常用的入口流速($V_{in}=1 \text{ m/s}$)进行求解。

2.2 数值模拟可靠性验证

为确保计算精度不受网格划分的影响,进行

了网格无关性验证(图5)。可以看出,在采用 4.1×10^5 网格时,液相压降模拟值 (6.75×10^4 Pa) 与实验值 (6.43×10^4 Pa) 的偏差为 5.4%;继续增加网格数量后,结果的变化幅度小于 1%,证明该网格密度已达到收敛标准。基于此,最终选定 4.1×10^5 网格数量进行后续模拟,所获得的压力场分布与实验数据高度一致,验证了模型的合理性和计算结果的可靠性。

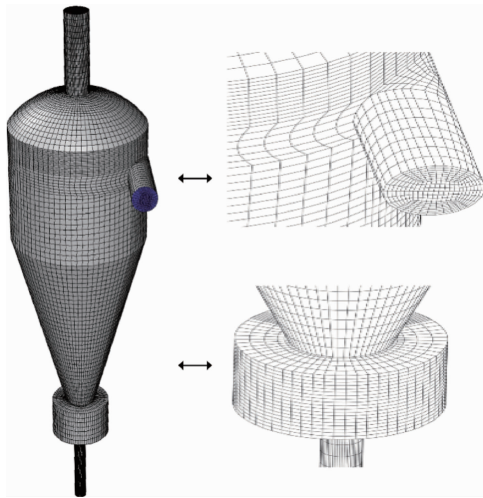


图4 旋流器网格划分

Fig. 4 Mesh division of the hydro-cyclone

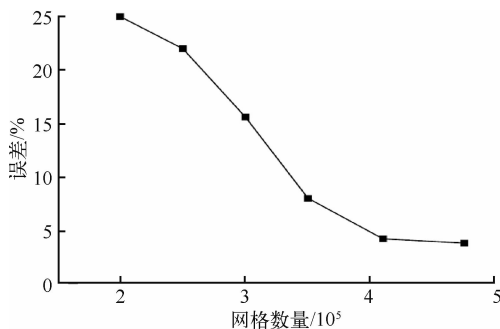


图5 网格无关性验证结果

Fig. 5 Verification results of grid independence

3 旋流器相似模化与量纲分析

3.1 旋流器实验数据

图6是旋流器实测压力降值。可以看出,随着入口流速的增大,旋流器压力降增大。这是由于当入口流速增大时,流体通过旋流器的速度增加,导致流体与旋流器壁面以及流体内部的摩擦

和碰撞加剧。这种加剧的摩擦和碰撞会产生更大的阻力,从而导致出入口之间的压降增大。因此,入口流速与设备压力降正相关。

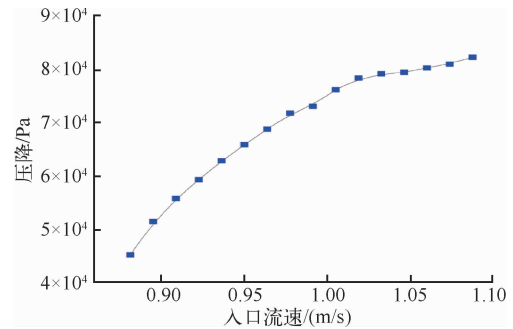


图6 旋流器压降实验值

Fig. 6 Experimental value of hydro-cyclone pressure drop

3.2 旋流器内固液两相运动方程

3.2.1 旋流器内液相运动方程

旋流器内液固两相运动方程可分别由 Navier-Stokes 方程和颗粒运动方程描述,并且采用因次分析法或方程分析法导出有关的相似准数。假设在旋流器内,颗粒的存在不影响液相运动,液相为不可压缩流体,质量力只有重力,则液相矢量形式的 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_l} \nabla p + \mu \Delta \mathbf{V}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为流体速度, m/s; ρ_l 为流体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s。

3.2.2 旋流器内颗粒运动方程

假设颗粒是球形的,大小用直径(δ)表征,颗粒运动速度为 $\mathbf{u}$,则在忽略颗粒间相互作用条件下,旋流器内单颗粒运动方程的一般形式为

$$\frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_p \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{am} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_{ex}, \quad (2)$$

式中: δ 为颗粒粒径, m; ρ_p 为颗粒密度, kg/m³; $\mathbf{u}$ 为颗粒速度, m/s; $\mathbf{F}_D$ 、 $\mathbf{F}_p$ 、 $\mathbf{F}_{am}$ 、 $\mathbf{F}_B$ 、 $\mathbf{F}_L$ 、 $\mathbf{F}_T$ 、 $\mathbf{F}_{ex}$ 分别为曳力、压力梯度力、附加质量力、Basset 力、升力、热泳力、外场力, N。

对单个球形颗粒在旋流器旋流场中的受力情况逐一分析:

1) 曳力

曳力是由于颗粒与流体间摩擦产生的力,它

是作用在颗粒上的主要外力之一。

$$\mathbf{F}_D = C_D A_p \frac{1}{2} \rho_l (\mathbf{V} - \mathbf{u}) \cdot |\mathbf{V} - \mathbf{u}|, \quad (3)$$

式中: A_p 为颗粒来流面积, m^2 ; C_D 为曳力系数, 取决于颗粒雷诺数 Re_{pl} , 计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re_{pl}} (1 + 0.15 Re_{pl}^{0.687}), Re_{pl} \leq 1\,000 \\ C_D &= 0.44, 1\,000 < Re_{pl} \leq 3 \times 10^5 \\ C_D &= 0.1, Re_{pl} > 3 \times 10^5 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

2) 压力梯度力

压力梯度力是指在流体中某一点的压力梯度对颗粒所施加的力。当流体中存在压力梯度时, 流体颗粒会朝压力较低的方向运动。

$$\mathbf{F}_p = -\frac{\pi}{6} \pi \delta^3 \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial P}{\partial r}$ 为压力梯度, 负号表示力的方向与压力梯度方向相反。

3) 附加质量力

颗粒在流体中运动时, 会带动颗粒周围流体运动。这部分由于带动流体运动产生的阻力, 可以等效为颗粒质量的增加。附加质量力会影响颗粒的速度和轨迹, 受颗粒与流体的相对速度、颗粒的特性参数和流体性质参数影响。

$$\mathbf{F}_{am} = 0.5 \frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_l \frac{d}{dt} (\mathbf{V} - \mathbf{u}), \quad (6)$$

4) Basset 力

Basset 力 ($\mathbf{F}_B$) 是一种非定常力, 当颗粒作加速运动时, 流体会给颗粒施加一个附加的与运动历史有关的作用力。该力因流体的非定常性质而产生, 一般这项作用力均很小, 可忽略不计。

$$\mathbf{F}_B = \frac{6A_p \sqrt{\rho_l \mu}}{\sqrt{\pi}} \int_{t_0}^t \frac{d\mathbf{V}}{d\tau} - \frac{d\mathbf{u}}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \quad (7)$$

式中: t 为当前时刻; τ 为积分变量 (范围从初始时刻到当前时刻), T 。

5) 升力

绕流引起的升力 ($\mathbf{F}_L$), 有 Magnus 力和 Saffman 力。其中 Magnus 力是由于颗粒旋转, 使得颗粒两侧绕流速度不同, 致使颗粒两侧压力不对称而引起的; 而 Saffman 力是由于横向速度梯度使流体对圆球绕流不对称而引起的。这两项作用力一般很小, 与重力同量级, 可忽略不计。

6) 热泳力

当流场内存在温度梯度时, 颗粒会从高温区向低温区迁移, 但在均温场内, 热泳力 ($\mathbf{F}_T$) 为零。一般旋流器内流场都是均温场, 故不必考虑。

7) 外场力

$\mathbf{F}_{ex}$ 是外场力, 如重力、静电力、磁力等。除采用特殊的静电增强技术外, 作用在颗粒上的外场力一般只有重力, 且因重力远小于离心力, 所以一般也可忽略。

因此, 式(2)可简化为

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_p \frac{d\mathbf{u}}{dt} &= C_D A_p \frac{1}{2} \rho_g (\mathbf{V} - \mathbf{u}) \cdot |\mathbf{V} - \mathbf{u}| - \\ &\frac{\pi}{6} \pi \delta^3 \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} + 0.5 \frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_l \frac{d}{dt} (\mathbf{V} - \mathbf{u}), \quad (8) \end{aligned}$$

式中, 颗粒雷诺数 (Re_{pl}) 计算式为

$$Re_{pl} = \rho_l |\mathbf{V} - \mathbf{u}| \delta / \mu_o. \quad (9)$$

假设颗粒为球体, 并且颗粒与流体之间的相对运动处于层流状态, 推荐用式(10)来计算阻力系数。

$$C_D = \frac{24}{Re_{pl}}, \quad (10)$$

因此, 球形颗粒的运动方程可简化为:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{18\mu(\mathbf{V} - \mathbf{u})}{\rho_l \delta^2 \rho_p} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} + \frac{\rho_l}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (\mathbf{V} - \mathbf{u}). \quad (11)$$

3.3 基于量纲分析的压降预测

根据式(11)和式(1), 压降 (Δp) 主要与流动参数有关, 如流体速度 (V)、动力黏度 (μ)、重力 (g); 还与旋流器结构参数如筒体半径 (r)、入口面积比 ($K_A = \pi D_i^2 / D_1^2$)、溢流管直径比 ($\tilde{d}_r = d_r / D$)、溢流管插入深度 ($\tilde{S} = S / D$)、锥段倾斜角 (β) 等有关。其中, K_A 、 $\tilde{d}_r$ 为无量纲参数, 间接影响旋流场强度, 入口流速 (V_{in}) 直接影响分离能力。结合液-固相参数和结构参数, 无因次准数群可表示为

$$\pi = P^{c_1} \mu^{c_2} g^{c_3} V^{c_4} l^{c_5} \rho^{c_6} K_A^{c_7} \tilde{d}_r^{c_8} \tilde{S}^{c_9} \beta^{c_{10}}, \quad (12)$$

式中: $c_1, c_2, \dots, c_{10}$ 代表待拟合的指数幂次, 方程中只有质量 [M]、长度 [L] 和时间 [T] 的量纲, 所以因次关系为

$$\begin{aligned} [\pi] &= [ML^{-1}T^{-2}]^{c_1} [ML^{-1}T^{-1}]^{c_2} [LT^{-2}]^{c_3} \\ &[LT^{-1}]^{c_4} [L]^{c_5} [ML^{-3}]^{c_6} K_A^{c_7} \tilde{d}_r^{c_8} \tilde{S}^{c_9} \beta^{c_{10}}. \quad (13) \end{aligned}$$

为了得到各系数,可以采用因次分析法。为此,首先建立因次矩阵:

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
M	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
L	-1	-1	1	1	1	-3	0	0	0	0
T	-2	-1	-2	-1	0	0	0	0	0	0

然后,求得该因次矩阵的秩等于3。由巴金汉定理,无因次准数的数量等于物理量的数量减去矩阵的秩,可知相似准数的个数应等于7。

因 π 是无因次准数,它的因次为零,故可由因次矩阵得到以下3个方程

$$\left. \begin{aligned} c_1 + c_2 + c_6 &= 0 \\ -c_1 - c_2 + c_3 + c_4 + c_5 - 3c_6 &= 0 \\ -2c_1 - c_2 - 2c_3 - c_4 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将不为零的行列式对应的指数用其余的指数表示,则方程可改写为

$$\left. \begin{aligned} c_4 &= -2c_1 - c_2 - 2c_3 \\ c_5 &= -c_2 + c_3 \\ c_6 &= -c_1 - c_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将式(15)中非基变量(如 $c_4 \sim c_6$)对应的系数按列填入矩阵的非对角块,式(13)中的基变量($c_1 \sim c_3$)和独立变量($c_7 \sim c_{10}$)则构成单位矩阵部分,最终构造出完整的矩阵:

	c_1	c_2	c_3	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_4	c_5	c_6
π_1	1	0	0	0	0	0	0	-2	0	1
π_2	0	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1
π_3	0	0	1	0	0	0	0	-2	1	0
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

由该矩阵,可得7个无因次准数:

$$\pi_1 = \frac{p}{\rho V_{in}^2} = Eu, \pi_2 = \frac{\rho V_{in} \delta}{\mu} = Re, \pi_3 = \frac{gD}{V_{in}^2} = Fr, \pi_4 = K_A, \pi_5 = \tilde{d}_r, \pi_6 = \tilde{S}, \pi_7 = \beta,$$

式中: π_1 为压降与动能之间的比值,是旋流器的入口欧拉数,代表流动过程中动量损失相对大小; π_2 为惯性力与黏性力的比值,是旋流器入口雷诺数; π_3 为惯性力和重力的比值; K_A 为入口面积比; $\tilde{d}_r$

为溢流管直径比; $\tilde{S}$ 为溢流管插入深度; β 为锥段倾斜角。

选用上述7个无因次准数构建函数:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0, \quad (16)$$

表2中统计了引文文献中不同工况、不同结构的旋流器对应的33个无量纲数。基于(式16)的7个无因次准数,根据表2的数据,通过多元非线性回归分析建立压降(Δp)预测函数关系式:

$$\Delta p = Re^{0.008} Fr^{-1.06} K_A^{-2.93} \tilde{d}_r^{-1.24} \tilde{S}^{-1.26} \beta^{0.62} \rho V_{in}^2. \quad (17)$$

表3为某地浸矿山现场实测的旋流器工艺参数值,为验证函数预测式的准确性,将表2和表3中的工艺参数分别代入式(17)进行验算。结果见图7。不论是引文文献中的压降值,还是现场实验压降值,与计算值的误差均在15%以内,该结果表明预测函数式具有一定的普适性。

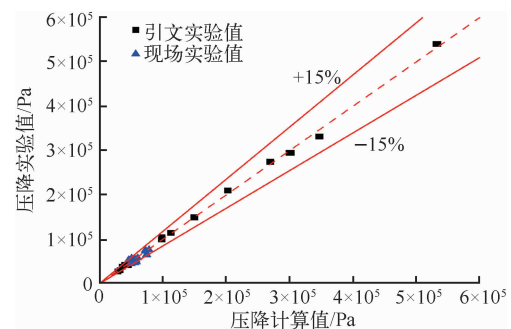


图7 旋流器分离效率压降 Δp 计算值与实验值对比

Fig. 7 Comparison between the calculated and experimental values of pressure drop for cyclone

4 旋流器流场数值模拟

旋流器X轴截面流线见图8(a)。除轴向向下的外旋流和轴向向上的内旋流外,还存在因局部压力梯度作用而叠加于主流上的二次涡流。二次涡流影响颗粒运动轨迹,不利于高效分离,进而导致能耗增加。此外,二次涡流还会导致颗粒在分离器内部呈现不均匀分布,使颗粒在涡旋内持续打转。例如,造旋腔顶部的二次涡旋可能导致颗粒局部集中,加剧颗粒与壁面的磨损;圆筒和锥段壁面附近的二次流动会改变器壁表面下行颗粒的输送模式,形成螺旋下行的灰带,并引发器壁附

近颗粒向中心迁移,从而导致颗粒逃逸;灰斗处的二次涡流则可能使已被分离的颗粒发生返混,降低整体分离效率。因此,后续研究可着重于增加内构件或优化结构设计,以有效减小二次涡流的影响。例如,通过在造旋腔顶部增加导流构件,可抑制二次涡流的形成;优化圆筒和锥段的过渡设计,能够减少壁面附近的二次流动,为旋流器的工业应用提供更优的性能表现。

表 2 不同文献工艺参数汇总
Table 2 Summary of different literature process parameters

序号	Eu	Re	Fr	K_A	$\tilde{d}_r$	$\tilde{S}$	β	$\Delta p/\text{Pa}$	文献
1	4.4	129.5	0.1	25.0	0.3	1.2	20.0	4.25×10^4	文献[17]
2	4.3	105.5	0.2	25.0	0.3	1.2	20.0	2.80×10^4	
3	4.3	110.9	0.1	25.0	0.3	1.2	20.0	3.09×10^4	
4	5.4	116.3	0.1	25.0	0.3	1.2	20.0	4.25×10^4	
5	5.0	121.7	0.1	25.0	0.3	1.2	20.0	4.25×10^4	
6	6.0	50.0	0.1	25.0	0.2	0.7	15.0	1.50×10^5	文献[18]
7	6.0	100.0	0.1	25.0	0.2	0.7	15.0	1.50×10^5	
8	6.0	150.0	0.1	25.0	0.2	0.7	15.0	1.50×10^5	
9	6.0	200.0	0.1	25.0	0.2	0.7	15.0	1.50×10^5	
10	4.6	50.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.15×10^5	
11	4.6	100.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.15×10^5	
12	4.6	150.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.15×10^5	
13	4.6	200.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.15×10^5	
14	4.0	50.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.00×10^5	
15	4.0	100.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.00×10^5	
16	4.0	150.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.00×10^5	文献[19]
17	4.0	200.0	0.1	25.0	0.3	0.7	15.0	1.00×10^5	
18	4.3	140.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	2.10×10^5	
19	4.3	210.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	2.10×10^5	
20	4.3	280.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	2.10×10^5	
21	4.1	180.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	3.32×10^5	
22	4.1	270.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	3.32×10^5	
23	4.1	360.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	3.32×10^5	
24	4.5	220.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	5.40×10^5	
25	4.5	330.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	5.40×10^5	
26	4.5	440.0	0	25.0	0.3	0.7	15.0	5.40×10^5	文献[20]
27	3.6	90.0	0	25.0	0.3	0.7	12.0	2.95×10^5	
28	3.6	180.0	0	25.0	0.3	0.7	12.0	2.95×10^5	
29	3.6	270.0	0	25.0	0.3	0.7	12.0	2.95×10^5	
30	3.6	360.0	0	25.0	0.3	0.7	12.0	2.95×10^5	
31	3.4	180.0	0	25.0	0.3	0.7	10.0	2.75×10^5	
32	3.4	270.0	0	25.0	0.3	0.7	10.0	2.75×10^5	
33	3.4	360.0	0	25.0	0.3	0.7	10.0	2.75×10^5	

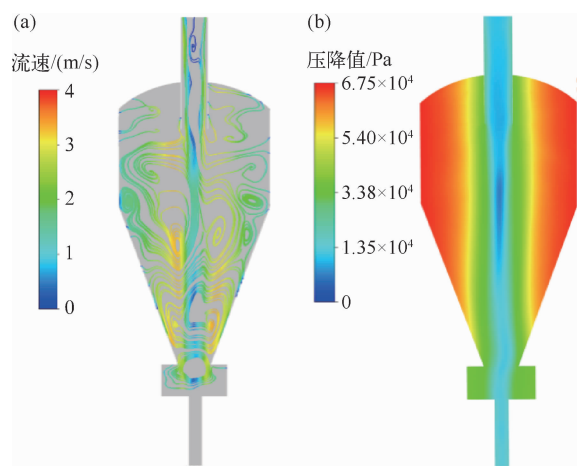
表 3 某地浸矿山现场旋流器工艺参数实测值

Table 3 Measured values of hydro-cyclone process parameters at a mine site

入口流量/(m ³ /h)	Re	Fr	K_A	$\tilde{d}_r$	$\tilde{S}$	β	$\Delta p/\text{Pa}$
8.10	67.81	7.89	32.40	0.18	0.54	10	7.66×10^4
9.10	76.18	6.25	32.40	0.18	0.54	10	7.42×10^4
9.89	82.79	5.30	32.40	0.18	0.54	10	6.72×10^4
10.16	85.05	5.02	32.40	0.18	0.54	10	6.43×10^4
10.40	87.06	4.79	32.40	0.18	0.54	10	5.40×10^4
10.53	88.15	4.67	32.40	0.18	0.54	10	4.52×10^4
10.57	88.48	4.64	32.40	0.18	0.54	10	4.80×10^4
10.61	88.82	4.60	32.40	0.18	0.54	10	5.80×10^4
11.07	92.67	4.23	32.40	0.18	0.54	10	5.63×10^4
11.08	92.75	4.22	32.40	0.18	0.54	10	4.74×10^4
11.12	93.09	4.19	32.40	0.18	0.54	10	5.20×10^4
11.17	93.51	4.15	32.40	0.18	0.54	10	5.48×10^4
11.23	94.01	4.11	32.40	0.18	0.54	10	5.51×10^4
11.24	94.09	4.10	32.40	0.18	0.54	10	5.31×10^4
11.34	94.93	4.03	32.40	0.18	0.54	10	3.92×10^4
11.50	96.27	3.92	32.40	0.18	0.54	10	5.84×10^4
12.55	105.06	3.29	32.40	0.18	0.54	10	7.63×10^4
12.67	106.06	3.23	32.40	0.18	0.54	10	5.50×10^4
12.70	106.32	3.21	32.40	0.18	0.54	10	6.63×10^4
12.99	108.74	3.07	32.40	0.18	0.54	10	7.72×10^4

旋流器的压降分布见图 8(b)。压力值在旋流器壁面附近达到最高,并从壁面向中心逐渐减小。轴心处的低压带从溢流口延伸到底流口。当旋转半径减小时,离心力作用减弱,静压逐渐降低,形成低压带,甚至可能接近真空状态。这种压差驱动颗粒向壁面运动,从而实现分离。从顶部溢流口到底部底流口,轴心区域始终维持低压。这是由于旋转流体在向下运动时,部分气流反向上升形成涡核(气柱),导致低压带沿轴向延伸。在锥体段,由于截面缩小,切向速度增大,进一步降低了轴心静压,同时壁面压力可能因流动阻力略有下降。

旋流器切向速度分布见图 9(a)。最大切向速度轨迹面集中在旋流器轴心附近,从溢流管内延伸至料腿入口处。从该轨迹面至轴心,切向速度急剧下降;而从轨迹面至壁面,切向速度则呈缓坡式递减。这一轨迹面处的离心力达到峰值,反映了旋流器的最大分离效能。



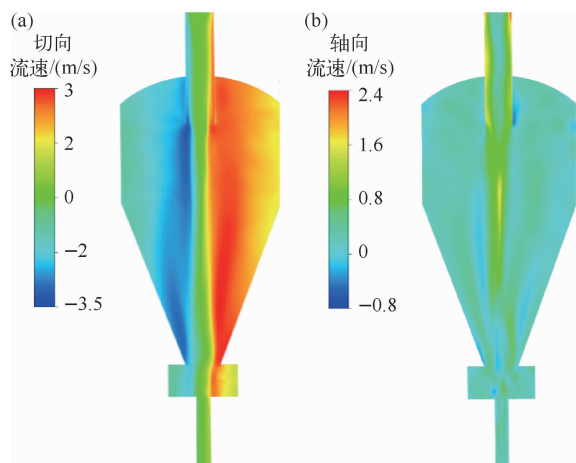
(a)速度迹线;(b)压降分布。

图 8 旋流器流线及压力降模拟云图

Fig. 8 Simulated diagram of hydro-cyclone pressure drop and streamline

旋流器轴向速度分布见图 9(b)。受溢流管影响,旋流器轴心处形成高轴向速度区,其值从溢

流管至底流口呈梯度衰减。从旋流器入口至底流口,壁面附近出现左右交替的负轴向速度区,这种对称性破缺的流动模式体现了外旋流螺旋向下、内旋流螺旋向上的双螺旋流动特征。



(a)切向速度;(b)轴向速度。

图9 旋流器切向速度及轴向速度模拟云图

Fig. 9 Simulated diagram of tangential and axial velocities of hydro-cyclone

5 结论

1)利用相似分析法建立了反映旋流器结构参数、操作参数和物性参数的相似准数模型,模型计算值和实验值的误差在15%以内。该模型准数的建立,为地浸采铀旋流器的结构优化、运行优化提供了技术基础,可指导后续工业应用。

2)从数学角度看,旋流器的优化设计是一个多目标非线性约束规划问题。本研究通过构建包含欧拉数、雷诺数及几何相似准数的无量纲方程组,实现了目标参数对能耗与性能的协同寻优。

3)从数值模拟结果看,二次涡流导致颗粒分布不均、能耗增加及分离效率降低,尤其在造旋腔顶部、圆筒与锥段壁面附近及灰斗区域。对于地浸采铀工艺,可尝试在造旋腔顶部增设导流构件、优化圆筒与锥段过渡设计,以抑制二次涡流,提高分离效率并降低能耗。

参考文献:

[1] 牛玉清,闻振乾,姚益轩,等.国家高技术研究发展计划(863计划)课题验收报告[R].北京:中国人民

共和国科学技术部,2016:119-157.

- [2] 贾生来,晋少东,王琳,等.地浸采铀开窗式切割钻孔施工技术[J].钻探工程,2023,50(S1):371-374.
JIA Shenglai, JIN Shaodong, WANG Lin, et al. Open-cut drilling technology for in-situ leaching uranium mining [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (S1): 371-374 (in Chinese).
- [3] 姚益轩,王亚安,胥国龙,等.地浸采铀钻孔过滤器建造与过滤机理研究[J].铀矿冶,2023,42(3):17-23.
YAO Yixuan, WANG Ya'an, XU Guolong, et al. Construction and filtration mechanism of borehole filters for in-situ leaching uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42 (3): 17-23 (in Chinese).
- [4] 王如意,王菁,李鹏,等.CO₂+O₂浸出工艺溶浸通道堵塞控制措施探究[J].有色金属(矿山部分),2022,74(3):59-64.
WANG Ruyi, WANG Jing, LI Peng, et al. Control measures for channel blockage in CO₂+O₂ leaching process [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74 (3): 59-64 (in Chinese).
- [5] 高尚,廖文胜,王立民,等.颗粒计数器在地浸采铀中的应用研究[J].铀矿冶,2022,41(2):132-136.
GAO Shang, LIAO Wensheng, WANG Limin, et al. Application of particle counters in in-situ leaching uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41 (2): 132-136 (in Chinese).
- [6] 廖文胜,王立民.地浸采铀过程中抽注液量影响因素分析[J].铀矿冶,2022,41(2):104-110.
LIAO Wensheng, WANG Limin. Analysis of influencing factors on liquid extraction and injection in in-situ leaching uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41 (2): 104-110 (in Chinese).
- [7] 原渊,江国平,廖天伟,等.地浸采铀碳酸钙结垢主要影响因素研究[J].中国矿业,2019,28(11):128-130.
YUAN Yuan, JIANG Guoping, LIAO Tianwei, et al. Study on main influencing factors of calcium carbonate scaling in in-situ leaching uranium mining [J]. China Mining Magazine, 2019, 28 (11): 128-130 (in Chinese).
- [8] 杜志明,廖文胜,赵树山,等.地浸铀矿大功率超声波解堵增渗技术的应用研究[J].中国矿业,2020,29(2):344-347.
DU Zhiming, LIAO Wensheng, ZHAO Shushan, et al. Application research of high-power ultrasonic de-

- blocking and permeability enhancement technology in in-situ leaching uranium mines[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(2):344-347(in Chinese).
- [9] ZHOU Y H, CHEN J Y, WANG Y A, et al. Experimental and numerical performance study of a downward dual-inlet gas-liquid cylindrical cyclone (GL-CC) based on flow pattern conditioning[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 238:116595.
- [10] 张丹, 陈晔. 锥角对固-液水力旋流器流场及其分离性能的影响[J]. 流体机械, 2009, 37(8):11-16.
ZHANG Dan, CHEN Ye. Influence of cone angle on flow field and separation performance of solid-liquid hydro-cyclones[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8):11-16(in Chinese).
- [11] 刘鸿雁, 王亚, 韩天龙, 等. 水力旋流器溢流管结构对微细颗粒分离的影响[J]. 化工学报, 2017, 68(5):1921-1931.
LIU Hongyan, WANG Ya, HAN Tianlong, et al. Influence of overflow pipe structure on fine particle separation in hydrocyclones[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5):1921-1931(in Chinese).
- [12] 刘仁恒, 王金花, 谢知峻, 等. 组合式水力旋流器操作参数对其分离性能的影响研究[J]. 化工机械, 2014, 41(4):414-417.
LIU Renhuan, WANG Jinhua, XIE Zhijun, et al. Research on the influence of operating parameters on separation performance of combined hydrocyclones[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2014, 41(4):414-417(in Chinese).
- [13] 刘秀林, 陈建义, 张宏斌, 等. 水力旋流器并联公共液斗对压降的影响研究[J]. 过程工程学报, 2024, 24(6):705-715.
LIU Xiulin, CHEN Jianyi, ZHANG Hongbin, et al. Study on the influence of parallel common liquid hopper on pressure drop in hydrocyclones[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(6):705-715(in Chinese).
- [14] 张文华, 李东来, 刘秀林, 等. 溢流管开缝对旋流器分离性能影响研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(6):857-865.
ZHANG Wenhua, LI Donglai, LIU Xiulin, et al. Study on the influence of slotted overflow pipes on the separation performance of hydrocyclones[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(6):857-865(in Chinese).
- [15] 王亚安, 陈建义, 贾中会, 等. 基于相似分析和人工神经网络的管柱式气液旋流分离器压降预测模型[J]. 中国海洋平台, 2019, 34(4):78-86.
WANG Ya'an, CHEN Jianyi, JIA Zhonghui, et al. Prediction model for pressure drop in tubular gas-liquid cyclone separators based on similarity analysis and artificial neural networks[J]. China Offshore Platform, 2019, 34(4):78-86(in Chinese).
- [16] 王亚安, 李星浩, 姚益轩, 等. CO₂+O₂地浸采铀含矿层防堵技术研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(3):17-24.
WANG Ya'an, LI Xinghao, YAO Yixuan, et al. Research on anti-clogging technology for ore-bearing layers in CO₂+O₂ in-situ leaching uranium mining[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):17-24(in Chinese).
- [17] 张陈新. 深海沉积物旋流分离器结构优化设计及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2024.
- [18] 张文华, 李东来, 徐京明, 等. 锥形溢流管开缝水力旋流器流场特性与分离性能研究[J]. 流体机械, 2023, 51(8):64-72.
ZHANG Wenhua, LI Donglai, XU Jingming, et al. Study on flow field characteristics and separation performance of hydrocyclones with slotted conical overflow pipes[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(8):64-72(in Chinese).
- [19] 石景元. 切流式固液旋流器结构优化及分离性能计算模型建立[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- [20] 王晓静, 张靖媛. 高海拔地区水力旋流器旋液分离过程CFD模拟与结构优化[J]. 化工机械, 2023, 50(5):676-684.
WANG Xiaojing, ZHANG Jingyuan. CFD simulation and structural optimization of liquid-liquid separation process in hydrocyclones at high altitudes[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2023, 50(5):676-684(in Chinese).

