

移动床吸附塔中铀提取过程的数值模拟与实验验证

杨一鸣¹, 邓健¹, 雷林², 雷泽勇¹, 陈建堂³

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

3. 湖南中核金原新材料有限责任公司, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 为了提高移动床吸附塔提取铀的效率, 运用 Fluent、Edem 软件对移动床吸附塔提取铀的过程进行了仿真模拟。通过调整入口流量, 观察移动床吸附塔内树脂颗粒的运动情况、分布状态及饱和树脂的沉降情况, 分析得到最佳入口流量。通过搭建实验平台, 验证仿真结果的准确性; 将实验数据与数值模拟结果进行对比分析, 证实了两者结论的一致性, 从而验证了仿真模型的准确性和适用性。结果表明, 当入口流量为 4 m³/h 时, 铀酰离子的提取效率最大。研究结果可为移动床吸附塔的设计提供重要参数。

关键词: 移动床; 吸附塔; 铀; 仿真模拟; 入口流量; 室内实验平台

中图分类号: TL212.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0049-12

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.08.08

离子交换技术是一种颇具特色且高效的化学分离技术, 被广泛应用于铀的回收、分离以及纯化领域。移动床吸附塔是该工艺的关键设备, 它主要被用于处理堆浸和原地爆破浸出工艺所产生的浸出液^[1], 移动床吸附塔的设计和直接操作影响离子交换的效率和效果。

为提高铀酰离子的提取效率, 离子交换设备的创新与优化成为研究焦点。目前, 中国主要从以下三方面对其进行研究: 一是吸附塔不同工作环境的应用与设计^[2-7]; 二是吸附塔结构的改进与优化^[8-13]; 三是通过对流化床进行数值模拟, 深入探讨流化床内颗粒流动特性, 进行设计优化。有关数值模拟和设计优化, 刘兵等^[14]利用 CFD 软件对固定床离子交换塔的内部流场进行了模拟仿真, 通过研究不同筛板开孔率下的参数变化规律, 为解决铀水冶固定床出液装置的问题提供了科学依据; 李宗哲等^[15]分析了单旋流和双旋流结构流化床的内部流场, 认为双旋流结构流化程度好、颗粒分布均匀稳定; 谢磊等^[16]用液固两相欧拉-多流体模型和多相质点网格法(MP-PIC), 结合不同

曳力模型, 对液固流化床内不同密度二元颗粒流动特性进行了数值模拟研究; 刘国栋等^[17]用欧拉-欧拉双流体模型、 $k-\epsilon$ 湍流模型, 考虑液固耦合作用, 模拟液固流化床内液固两相流动, 研究液体密度和黏度的影响; 黎明等^[18]采用基于颗粒轨道模型的欧拉-拉格朗日数值模拟方法对二维流化床进行了数值模拟; 张博伦^[19]对移动床内颗粒流动特性进行 DEM 模拟研究, 探讨了移动床厚度以及换热翅片的引入对颗粒流动特性的影响; 胡海滨^[20]针对某企业正在研发的液固移动床装置, 围绕装置的设计、优化需求, 对装置内部颗粒物料的流动特性展开数值模拟研究。

以上研究极大丰富了铀提取工艺的理论基础与技术支持, 但仍需面对吸附塔内部流场复杂性及树脂颗粒运动不确定性等挑战。移动床吸附塔内部流场、树脂颗粒运动情况复杂, 提高铀提取效率一直是个难题。为此, 采用 Fluent、Edem 软件对移动床吸附塔提取铀的过程进行仿真模拟, 旨在得到吸附塔最佳入口流量, 为吸附塔的设计提供关键参数。

收稿日期: 2024-08-23

基金项目: 2022 年铀业自主科研项目(优溶渣中铀钍高效提取技术研究)。

第一作者简介: 杨一鸣(1999—), 男, 湖南常德人, 在读硕士, 主要研究方向为铀矿冶装备与核动力机械。

通信作者简介: 雷泽勇(1962—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为铀矿溶浸采冶设备及工艺的研究开发。

1 模型模拟

1.1 网格划分

根据现场调研,浸出液从吸附塔底部侧面进入,饱和树脂从吸附塔底部抽出,进液口高度离吸附塔底部 900 mm。实际过程中,进液管伸入塔体;但在实验时,将其简化,进液管接在吸附塔底部侧面,没有伸入塔内。

基于以上数据,采用 SpaceClaim 软件构建简化的仿真模型,该模型塔体高度为 10 000 mm,直径为 1 000 mm,进口管道长度设定为 300 mm,轴向进口管道内径为 100 mm,见图 1(a)。将构建好的模型导入 Ansys 软件中,设定精细的边界条件。将进水口设为 inlet,吸附塔顶部设为 outlet,其余部分均设为 wall。在此基础上,对其进行六面体网格划分,单元尺寸设为 15 mm,无加密区,边缘正常划分,确保模型的每个区域均被网格化,以提升数值模拟的精度。移动床吸附塔网格划分示意图见图 1(b)。

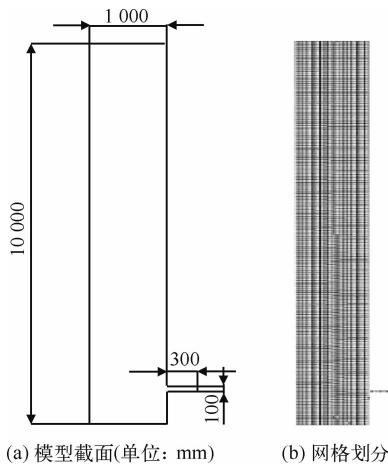


图 1 吸附塔模型截面及网络划分示意图
Fig. 1 Schematic of cross-section dimensions and grid partition of adsorption tower model

为探究不同网格数量对数值模拟精度的影响,网格数量选取了 25 155、44 961 和 69 735,同时确保所有网格的最小正交质量指标均高于 0.2,以维持模型的几何精度。在进水管入口处设置流体流速,根据现场工业试验条件要求,入口流量在 2~6 m³/h 范围内选择。随机选取吸附塔某一高度的平面,此处选择位于吸附塔高度 400 mm 的平面,并监测经过该面的速度分布,经 100 次迭代

计算,导出数据,得到该平面流体速度分布(图 2)。可以看出,当网格数量分别为 25 155、44 961 和 69 735 时,所获得的 3 条速度分布曲线呈现高度一致性;这说明在选定的网格密度范围内,模拟结果的准确性不受网格数量变化的影响。鉴于上述分析,最终采用网格数量为 44 961 的模型进行后续数值模拟,以平衡计算效率与结果精度。

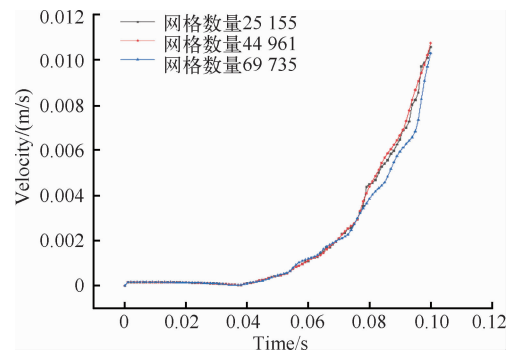


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid-independent verification

1.2 欧拉双流体模型

为了深入研究移动床吸附塔内部树脂颗粒的运动状态,采用欧拉双流体模型对流体与固体两相的作用进行模拟与分析。对于欧拉双流体模型,流体相和颗粒相均被看作连续性介质,即“拟流体”,但用来描述其动力学特性的守恒方程不同。对于液体相,通常考虑质量守恒方程、动量守恒方程,以及能量守恒方程等;而对于固体相,其主要考虑的是应力应变关系。固体在受力作用下会发生变形,描述固体动力学特性的方程通常包括平衡方程、几何方程,以及本构方程等。固体的变形相对较为缓慢,且通常不具有像液体那样的流动性。

1.2.1 动力学特性守恒方程

1) 质量守恒方程^{[21]14}

液相质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_l \rho_l) + \nabla \cdot (\epsilon_l \rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (1)$$

固相质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0, \quad (2)$$

2) 液相动量守恒方程^{[21]14}

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_l \rho_l \mathbf{v}_l) + \nabla \cdot (\epsilon_l \rho_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l) = \epsilon_l \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_l + \epsilon_l \rho_l \mathbf{g} - \epsilon_l \nabla p_l + \beta(\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_l), \quad (3)$$

液体的应力张量 τ_l 为

$$\tau_l = \mu_l [\nabla \mathbf{v}_l + (\nabla \mathbf{v}_l)^T] - \frac{2}{3} \mu_l (\nabla \cdot \mathbf{v}_l) \mathbf{I}, \quad (4)$$

3) 颗粒相动量守恒方程^{[21]15}

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) = \epsilon_s \nabla \cdot \tau_s + \epsilon_s \rho_s g - \nabla p_s - \epsilon_s \nabla p_l + \beta (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s), \quad (5)$$

颗粒相应力张量 τ_s 为

$$\tau_s = (-p_s + \xi_s \nabla \cdot \mathbf{v}_s) \mathbf{I} + \mu_s \left\{ [\nabla \mathbf{v}_s + (\nabla \mathbf{v}_s)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}_s) \mathbf{I} \right\}, \quad (6)$$

4) 颗粒相压力^{[21]16}

$$p_s = \epsilon_s \rho_s \theta + 2 g_0 \epsilon_s^2 (1 + e) \rho_s \theta, \quad (7)$$

5) 颗粒相剪切黏度^{[21]16}

$$\mu_s = \frac{4}{5} \epsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10 \rho_s d_p \sqrt{\pi \theta}}{96 (1 + e) \epsilon_s g_0} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \epsilon_s (1 + e) \right]^2, \quad (8)$$

6) Gidaspow^[22]曳力模型

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_{\text{Gidaspow}} &= 150 \frac{\epsilon_s (1 - \epsilon_1) \mu_l}{\epsilon_1 d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_l \epsilon_s}{d_s} |\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s|, \\ \epsilon_1 &< 0.8; \\ \beta_{\text{Gidaspow}} &= \frac{3 C_d \epsilon_1 \epsilon_s \rho_l |\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s|}{4 d_p} \epsilon_1^{-2.65}, \epsilon_1 \geq 0.8 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} C_d &= \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}), \text{Re} < 1000; \\ C_d &= 0.44, \text{Re} \geq 1000 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\text{Re} = \frac{|\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s| d_p \epsilon_1 \rho_l}{\mu_l} \quad (11)$$

1.2.2 模拟所需条件和参数

在模拟过程中,移动床吸附塔的壁面采用无滑移边界条件。采用软件默认设定颗粒的动力黏度系数,简化模型的复杂度,保证模拟的稳定性。溶液的入口采用速度入口,确保溶液以预定速度进入吸附塔;而出口则设置为压力出口,以模拟真实工况下的压力释放过程。为了捕捉瞬态行为,时间步长设定为 0.01 s,整个模拟过程持续了 150 s。通过这一系列的参数设定与方法选择,能够更准确地模拟和分析移动床吸附塔内复杂流固相互作用的现象。其他模拟所需参数见表 1。

1.3 离散相模型

当移动床吸附塔内充满溶液后,溶液中的金属离子与树脂颗粒将发生一系列复杂的化学交互,最终导致树脂颗粒吸附金属离子达到饱和状态,形成饱和树脂,并从吸附塔相对较高的位置向吸附塔较低位置移动,并在移动过程中逐渐形成较为紧密排列的状态,饱和树脂颗粒模型见图 3,树脂颗粒为均匀的球状颗粒,图中亮点为软件反光效果。采用离散元软件 Edem 对这一过程进行高精度仿真,模拟 1 min 内饱和树脂颗粒沉降情况。其中,塔体高度 10 000 mm、直径 1 000 mm,进液管长度设定为 300 mm,轴向进液管内径为 100 mm。将设计的模型导入 Ansys 中进行四面体网格划分,单元尺寸为 15 mm,移动床吸附塔的三维网格模型见图 4,图中深色区域为进液管区域。在 Edem 中设置饱和树脂颗粒的密度为 1 300 kg/m³,饱和树脂颗粒直径为 1 mm,根据斯托克斯公式计算得到饱和树脂颗粒的生成速率为 0.045 kg/s。

表 1 模拟所需参数

Table 1 Parameters required for simulation

树脂颗粒密度/ (kg/m ³)	树脂颗粒直径/ mm	树脂颗粒初始 堆积高度/mm	液体密度/ (kg/m ³)	塔高/ mm	塔直径/ mm	进液口孔径/ mm
700	0.6	8 000	1 200	10 000	1 000	100

2 计算与分析

2.1 移动床吸附塔内树脂颗粒的运动情况模拟

根据现场调研,其流量范围在 2~6 m³/h 内,折合空塔线速度为 2.55~7.64 m/h。在移动床吸附塔塔高、塔径、进出管管径,及树脂层高等结构参数不变的情况下,改变入口流量(Q=2 m³/h、

4 m³/h 和 6 m³/h),观察吸附塔内部树脂颗粒的运动情况。

2.1.1 树脂颗粒浓度分析

当 Q=2 m³/h、Q=4 m³/h、Q=6 m³/h 时,移动床吸附塔内树脂颗粒浓度瞬时分布见图 5~图 7。可以看出,溶液以较高的速度从一侧的进液口涌入塔内,由于树脂颗粒密度小于液体密度,

在溶液的推动下树脂颗粒逐渐向上浮动,最终在移动床吸附塔上部区域形成了稳定的树脂床层结构。与 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 相比,当 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 时,在 $t=150\text{ s}$ 时,树脂颗粒并没有在上部区域形成稳定的树脂床层结构,说明其形成稳定结构需要的时间更长,在实际工业生产中,这样的速率会影响吸附效率。当 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 时,由于入口流量太大,导致吸附塔内树脂颗粒的移

动速度较快,树脂颗粒在塔内分布不均,减少了其与待吸附物质的接触时间。当 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,树脂颗粒分布均匀,且在上部区域形成了一个稳定的树脂床层结构,有利于提高吸附效率。

2.1.2 树脂颗粒速度分析

当 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 时,移动床吸附塔内树脂颗粒瞬时速度分布见图 8~图 10。

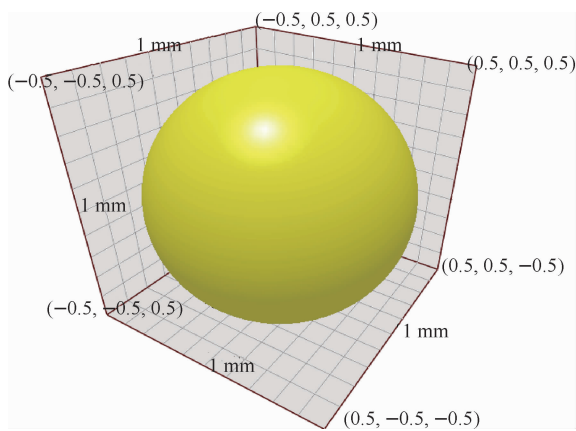


图 3 饱和树脂颗粒模型创建

Fig. 3 Saturated resin particle modeling



图 4 移动床吸附塔三维网格模型

Fig. 4 3D mesh model of moving bed adsorption tower

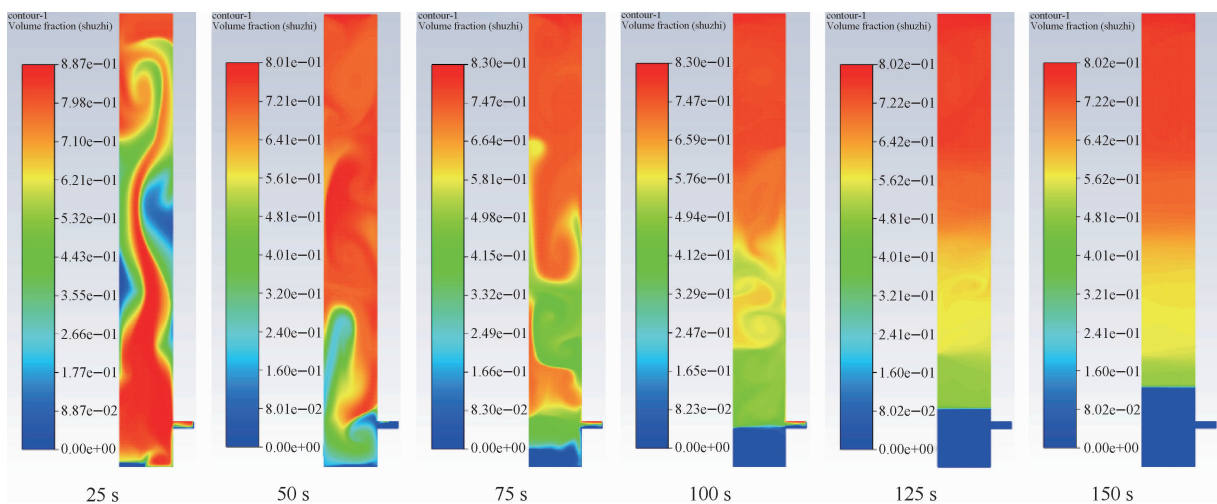


图 5 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒浓度瞬时分布

Fig. 5 Instantaneous distribution of resin particle concentration in the adsorption tower at $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$

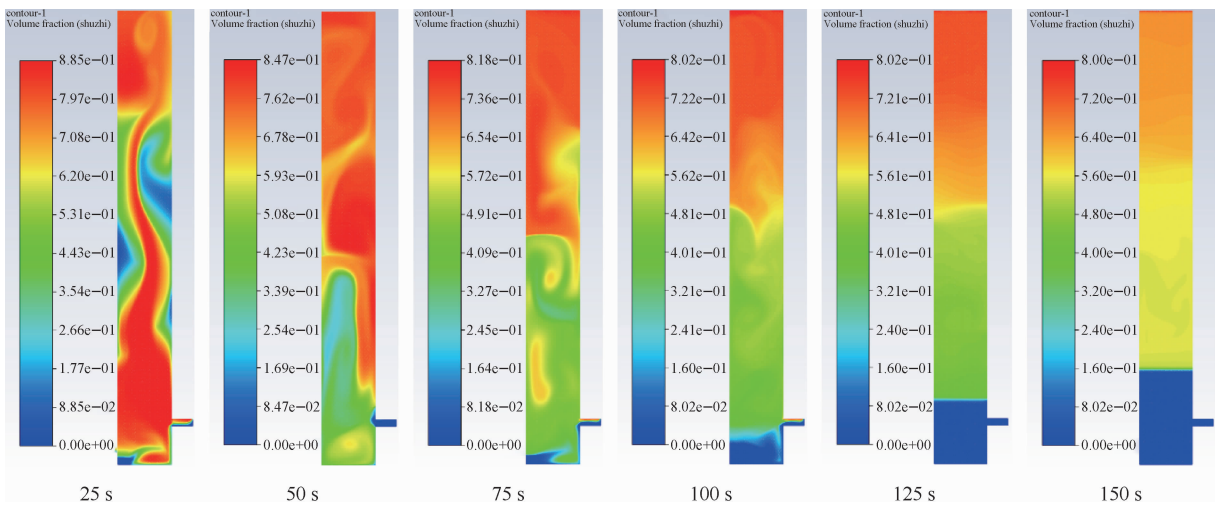


图 6 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒浓度瞬时分布

Fig. 6 Instantaneous distribution of resin particle concentration in the adsorption tower at $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$

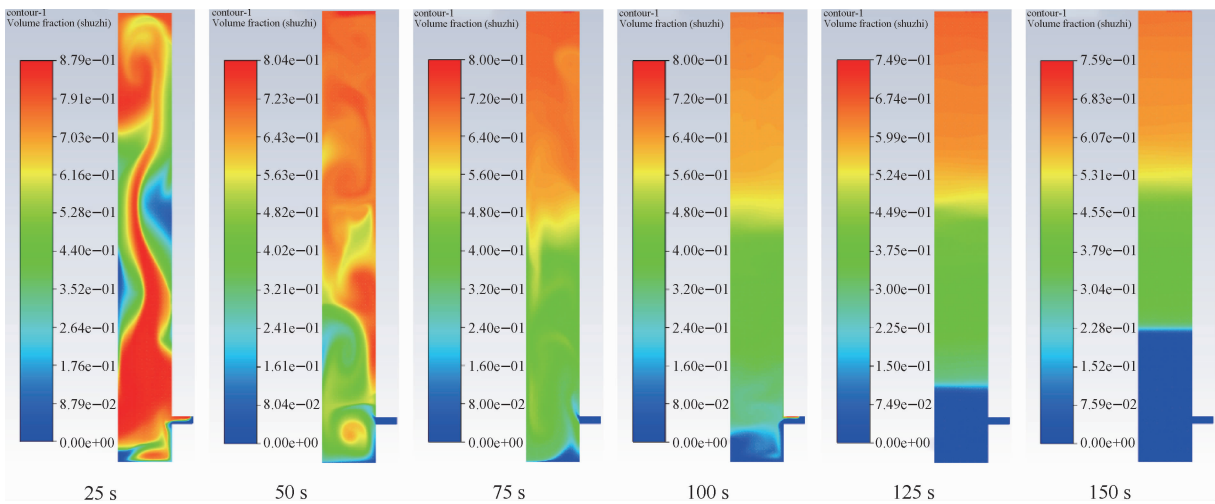


图 7 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒浓度瞬时分布

Fig. 7 Instantaneous distribution of resin particle concentration in the adsorption tower at $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$

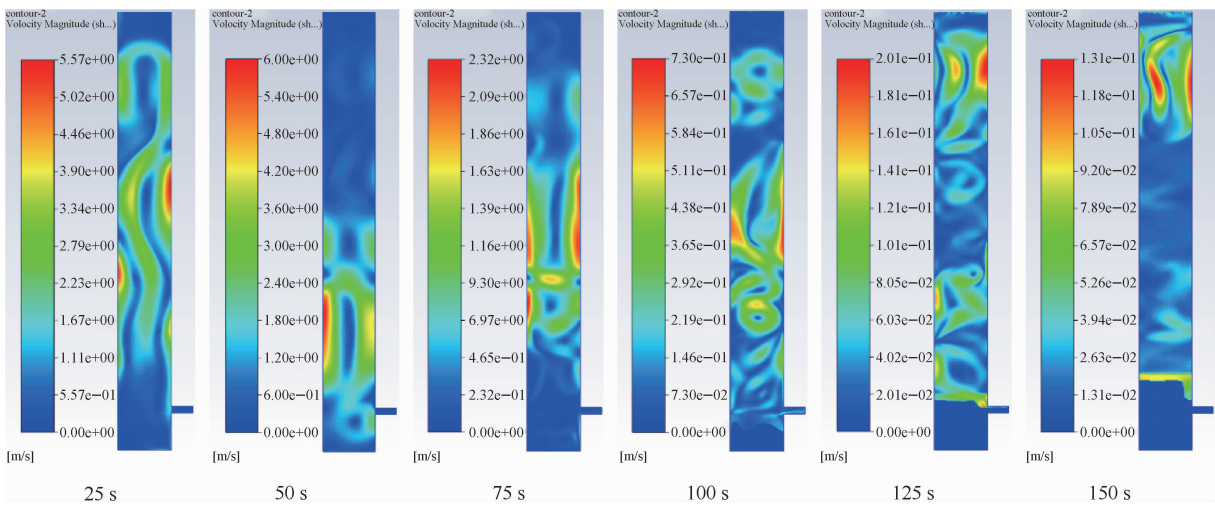


图 8 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒速度瞬时分布

Fig. 8 Instantaneous resin particle velocity distribution in the adsorption tower at $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$

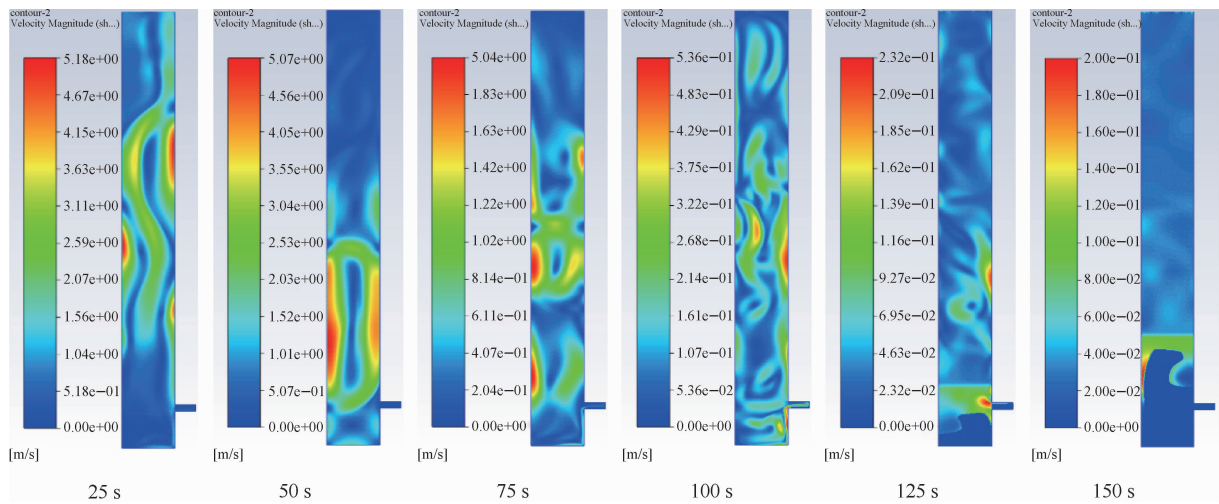


图9 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒速度瞬时分布

Fig. 9 Instantaneous resin particle velocity distribution in the adsorption tower at $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$

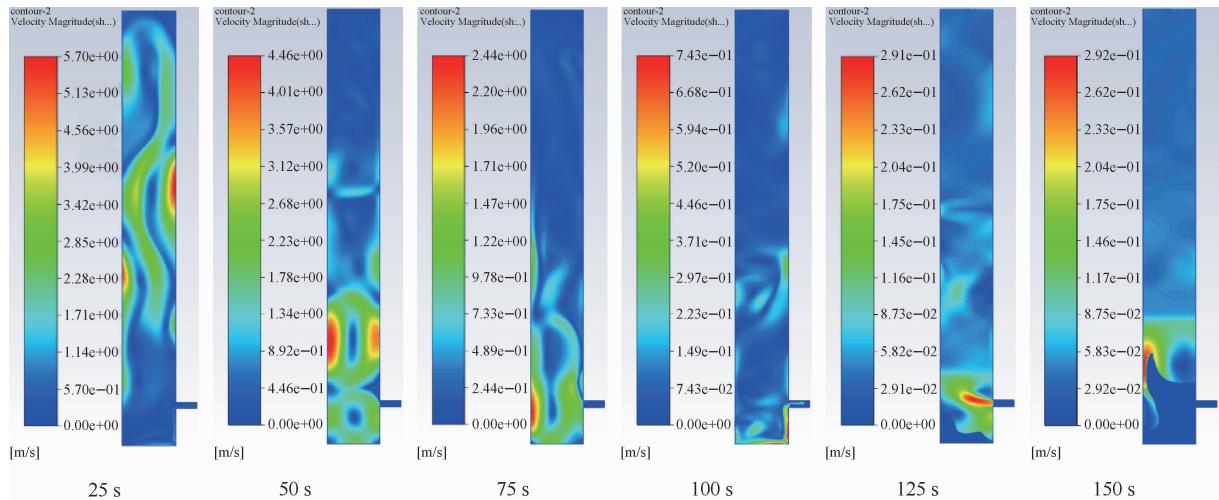


图10 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒速度瞬时分布图

Fig. 10 Instantaneous resin particle velocity distribution in the adsorption tower at $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$

由图8~图10可看出,随着液体从塔侧的进液管迅速涌入,使树脂床层最上面(上部分)的树脂颗粒和进液口处的树脂颗粒获得了较大的加速度,随着溶液的进入,树脂颗粒在重力和曳力的共同作用下,逐渐向上运动,当上部分的树脂颗粒碰到顶部的过滤网时,树脂颗粒又随着溶液向下回流,形成了在吸附塔中心区域树脂颗粒向上运动,而在壁面附近向下回流运动的循环流动状态。最后,当树脂颗粒在移动床吸附塔的上部区域形成稳定的树脂床层结构时,它们的速度逐渐趋于稳定。

观察不同入口流量对树脂颗粒运动情况的影响,发现 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 时,吸附塔内树脂颗粒的速

度并不稳定,影响树脂颗粒的吸附效率。而对比 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$, 可以发现 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,吸附塔内树脂颗粒的运动状态达到一种动态平衡,即在流体的持续推动下,颗粒的速度不再发生显著变化,而是维持在一个相对稳定的水平。这种稳定状态的形成,对于优化吸附过程和提高吸附效率具有重要意义,因为它确保了树脂颗粒在塔内的均匀分布,从而促进了树脂颗粒与溶液之间的充分接触和反应。

2.1.3 树脂颗粒压力分析

当 $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q=6\text{ m}^3/\text{h}$ 时,移动床吸附塔内树脂颗粒压力瞬时分布见图11~图13。

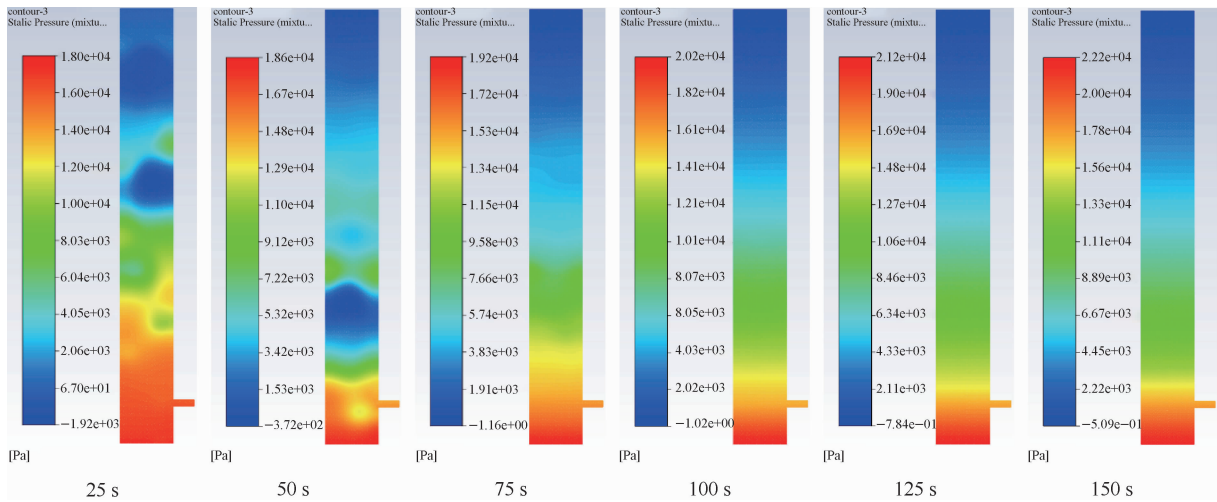


图 11 $Q=2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒压力瞬时分布

Fig. 11 Pressure instantaneous distribution of resin particles in the adsorption tower at $Q=2 \text{ m}^3/\text{h}$

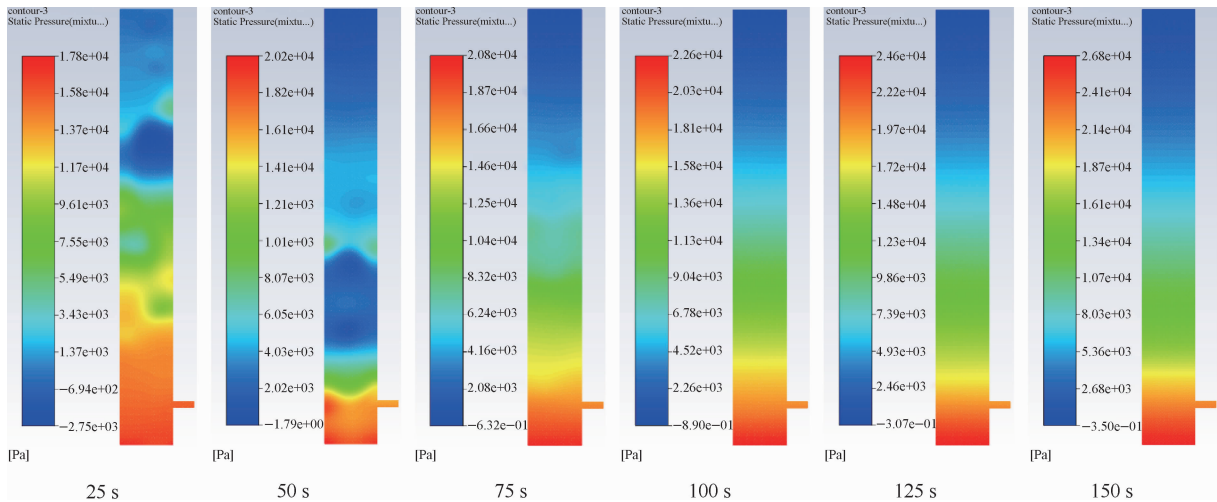


图 12 $Q=4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒压力瞬时分布

Fig. 12 Pressure instantaneous distribution of resin particles in the adsorption tower at $Q=4 \text{ m}^3/\text{h}$

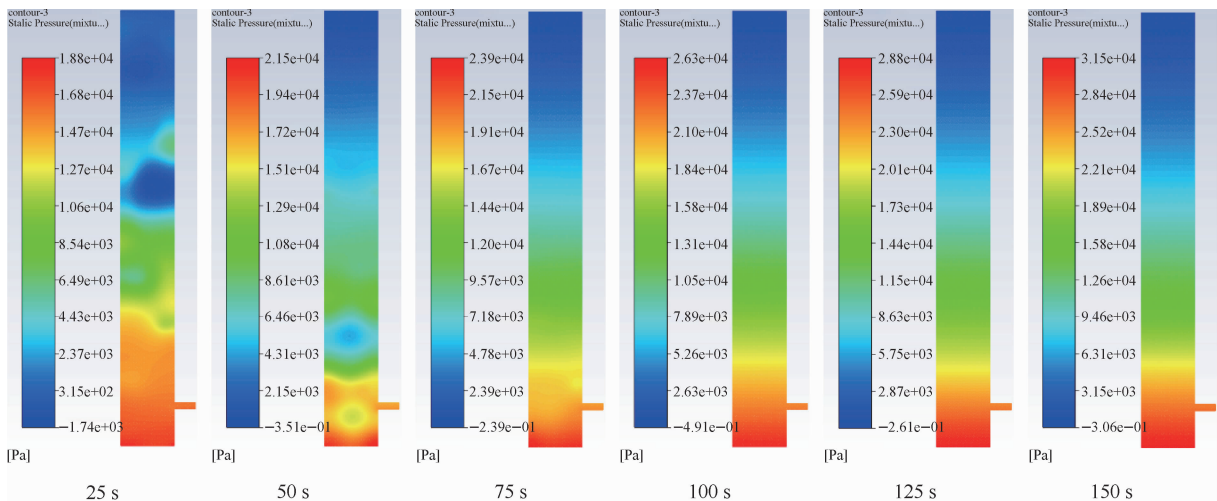


图 13 $Q=6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时吸附塔内树脂颗粒压力瞬时分布图

Fig. 13 Pressure instantaneous distribution of resin particles in the adsorption tower at $Q=6 \text{ m}^3/\text{h}$

由图 11~图 13 可看出,在初始阶段,移动床吸附塔底部堆积着树脂颗粒,移动床吸附塔的压力呈现底部压力高、顶部压力低的情况。随着含铀溶液从一侧的进液管持续注入吸附塔,树脂颗粒在溶液的推动下逐渐上浮,底部压力显著增加,例如: $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,底部压力从 $1.78\times 10^4\text{ Pa}$

增加到 $2.68\times 10^4\text{ Pa}$ 。对比不同入口流量对树脂颗粒运动情况的影响,发现入口流量越大,移动床吸附塔的底部压力越大。

2.2 饱和树脂颗粒的沉降模拟

在进口流量为 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$,且持续进液 8 h 后,塔底区域饱和树脂颗粒沉降情况见图 14。

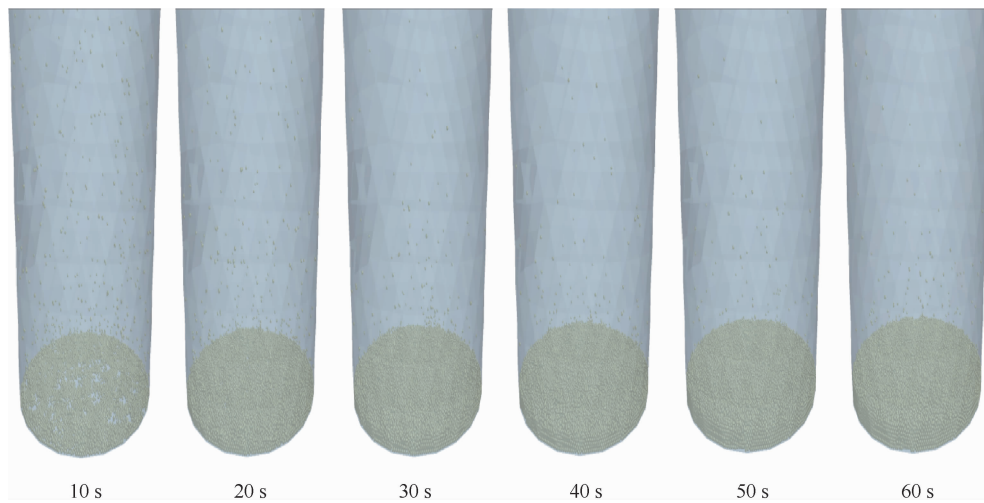


图 14 塔底区域饱和树脂颗粒沉降情况

Fig. 14 Settlement of saturated resin particles in the tower bottom area

由图 14 可知,经过一定时间的化学反应后,原树脂颗粒逐渐饱和,在重力的作用下开始向下运动。由于饱和树脂颗粒的密度大于溶液的密度,重力成为促使饱和树脂沉降的主要驱动力。此时,饱和树脂颗粒在液体中相对较为分散,彼此之间的间距较大,运动较为自由。随着沉降的进行,饱和树脂颗粒逐渐靠近,形成较为紧密的结构。在这个阶段,颗粒之间的空隙逐渐减小,整个体系变得更加密实。随着时间的推移,树脂密实移动至塔底,底部堆积的饱和树脂颗粒数量逐渐增多。通过对模型底部进行切片计算饱和树脂颗粒的沉降体积,可以得到 1 min 内饱和树脂的沉降体积约为 $2.083\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。

3 实验验证

3.1 主要的工艺流程

确定的密实移动床主要工艺流程见图 15。

含铀溶液通过溶解槽及浓密机进入原液槽,然后从移动床吸附塔底部侧边进入吸附塔;当树脂颗粒吸附饱和后,停止进液,将饱和树脂转移到转移槽中,并用稀酸洗液洗掉饱和树脂上附带的其他杂质离子;然后将饱和树脂转移到淋洗塔,加入淋洗剂进行淋洗铀,得到淋洗合格液。淋洗后的贫树脂转移到吸附塔,重复以上操作。

3.2 实验平台的搭建

移动床吸附塔内部的流场、树脂颗粒的运动以及溶液与树脂颗粒间的相互作用十分复杂,为了得到最佳入口流量,搭建实验平台。移动床吸附塔直径 1 000 mm、高 10 000 mm,进液管长 300 mm、直径 100 mm,实验中持续进液 8 h。

3.3 201×7 特种树脂的相关参数

实验中选用的树脂为 201×7 特种树脂,相关参数见表 2。

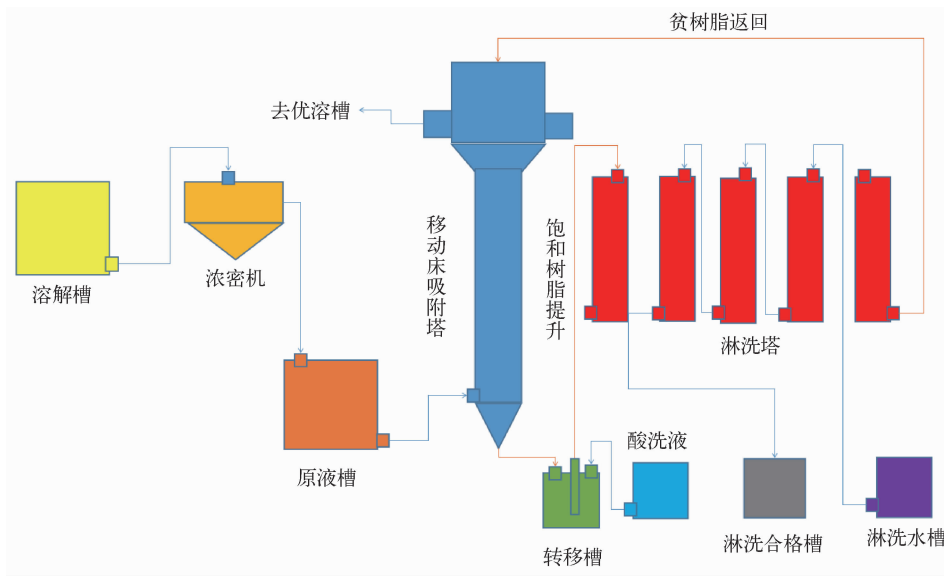


图 15 密实移动床主要工艺流程图

Fig. 15 Main process flow diagram of dense moving bed

表 2 210×7 树脂的相关参数

Table 2 Related parameters of 210×7 resin

参数	参数值
质量全交换容量/(mmol/g)	≥3.5
体积全交换容量/(mmol/mL)	≥1.3
含水率/%	42~48
湿视密度/(g/mL)	0.67~0.75
湿真密度/(g/mL)	1.07~1.15
有效粒径/mm	0.63~1.0
均一系数	≤1.4
粒度	0.6~1.2 mm ≥95%
磨后圆球率	≥90%
测定形态	氯型

3.4 实验方案

为了研究不同入口流量对移动床吸附塔内部树脂颗粒瞬态运动情况及饱和树脂颗粒的沉降情况,分别在不同入口流量下($Q=2\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $6\text{ m}^3/\text{h}$)进行实验。

3.5 实验结果与分析

不同入口流量下饱和树脂的沉降体积见图 16。可以看出,当入口流量不同时,饱和树脂的沉降体积不同。在本实验条件下,在入口流量为

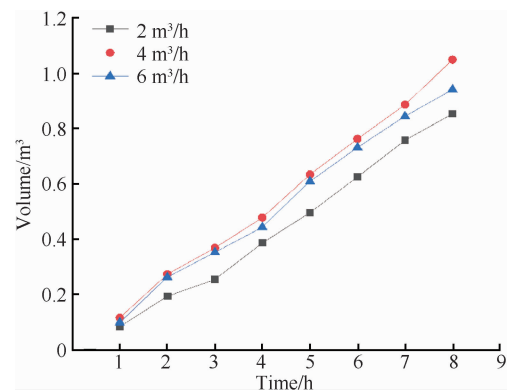


图 16 不同入口流量下饱和树脂的沉降体积

Fig. 16 Settling volume of saturated resin at different inlet flow rates

$4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,单位时间内饱和树脂的沉降体积最大。在此流量下,移动床吸附塔内树脂颗粒均匀分布且树脂颗粒床层保持动态稳定,流体中的离子能与树脂颗粒充分接触反应,吸附效率较高。根据现场测量,1 h 内约沉降 0.115 m^3 饱和树脂。本实验原液中铀质量浓度为 1 g/L ,尾液中铀平均质量浓度为 28 mg/L ,吸附效率在 95% 以上,达到了工艺设计要求。通过实验结果与仿真结果对比分析,发现两者之间具有较高的一致性,证明了所构建模型的可靠性与实用性。

4 结论

树脂颗粒在移动床吸附塔中受力复杂,其运动情况及饱和树脂的沉降情况复杂,运用欧拉双流体模型和 Edem 可以较为准确地模拟其运动轨迹。通过仿真及实验对其过程进行模拟,得到以下结论:

1)当 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,树脂颗粒在塔内分布均匀,能在移动床吸附塔上部区域形成相对稳定的树脂床层结构,有利于提高树脂颗粒的吸附效率。1 min内饱和树脂的沉降体积约为 $2.083\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。

2)当 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 时,饱和树脂的沉降体积最大。实验结果与仿真结果具有较高的一致性,确认了模型的可靠性和实用性。

参考文献:

- [1] 阳翔. LZX-1600A 型离子交换设备的设计和研发[D]. 衡阳:南华大学,2010.
- [2] 于湘浩,刘正镛,刘素贤,等. 密实移动床吸附塔吸附及多塔串联淋洗的研究[J]. 铀矿冶,1997,16(3):167-174.
YU Xianghao, LIU Zhengyong, LIU Suxian, et al. Adsorption with packed moving resin bed and elution with multi-stage tandem columns[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1997, 16(3):167-174(in Chinese).
- [3] 赵伯毅. 反向流化床连续逆流离子交换技术(一)[J]. 铀矿冶,2001,20(2):85-92.
ZHAO Boyi. The reverse flow fluidized bed technology for continuous counter-current ion exchange[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2001, 20(2):85-92(in Chinese).
- [4] 宫传文. 离子交换设备在我国铀提取工艺中的应用(待续)[J]. 铀矿冶,2004,23(1):31-34.
GONG Chuanwen. Application of ion-exchange unit in uranium extraction process in China(to be continued)[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(1):31-34(in Chinese).
- [5] 宫传文. 离子交换设备在我国铀提取工艺中的应用(续完)[J]. 铀矿冶,2004,23(2):78-83.
GONG Chuanwen. Application of ion-exchange unit in uranium extraction process in China (the end)[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(2):78-83(in Chinese).
- [6] 周根茂,王廷学,王致远,等. 铀水冶离子交换塔中树脂床层状态的研究[J]. 铀矿冶,2006,25(3):133-136.
ZHOU Genmao, WANG Tingxue, WANG Zhiyuan, et al. State of resin bed in ion exchange columns in uranium hydrometallurgy[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(3):133-136(in Chinese).
- [7] 宫传文. 密实移动床离子交换提铀设备的结构特点及选型计算[J]. 铀矿冶,2007,26(3):135-141.
GONG Chuanwen. Structural features of packed moving-bed ion-exchange equipment and calculation of lectotype for uranium extraction process[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2007, 26(3):135-141(in Chinese).
- [8] 钟平汝,雷泽勇,曾毅君. ZLX-1600 型离子交换设备的研制[J]. 铀矿冶,2006,25(3):144-147.
ZHONG Pingru, LEI Zeyong, ZENG Yijun. Design and application of ZLX-1600 ion exchange column for uranium recovery[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(3):144-147(in Chinese).
- [9] 韩青涛,赵良仁,张春雷,等. 我国铀矿冶领域应用的离子交换塔[J]. 湿法冶金,2008,27(3):176-180.
HAN Qingtao, ZHAO Liangren, ZHANG Chunlei, et al. Ion-exchange tower using in uranium hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy of China, 2008, 27(3):176-180(in Chinese).
- [10] 许艳玲,张保. 吸附塔的疲劳分析[J]. 现代制造技术与装备,2012(1):70-71.
XU Yanling, ZHANG Bao. Fatigue analysis of the adsorption tower[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2012(1):70-71(in Chinese).
- [11] 赵宏伟,赵文清,王宏斌. 某水冶厂密实移动床吸附塔结构改进设计[J]. 铀矿冶,2023,42(1):23-29.
ZHAO Hongwei, ZHAO Wenqing, WANG Hongbin. Improvement structure design of moving bed adsorption tower in a uranium mill[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(1):23-29(in Chinese).
- [12] 肖微. 密实移动床吸附塔的改进设计[J]. 铀矿冶,2014,33(2):99-101+110.
XIAO Wei. Improvement for the design of packed moving bed adsorption column[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(2):99-101+110(in Chinese).
- [13] 张兆光. 某水冶厂密实移动床吸附塔溢流液塔盘密封装置的研制总结[J]. 中国矿业,2020,29(S2):390-393+397.
ZHANG Zhaoguang. Study on the sealing device of packing moving bed adsorption towers overflow tray in the uranium mine[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2):390-393+397(in Chinese).
- [14] 刘兵,雷泽勇,雷林,等. 基于 Fluent 的离子交换塔出液装置的仿真模拟与研究[J]. 机械工程师,2016

- (1):98-101.
- LIU Bing, LEI Zeyong, LEI Lin, et al. Simulation and research on filtering device of ion-exchange tower based on fluent software[J]. Mechanical Engineer, 2016(1):98-101(in Chinese).
- [15] 李宗哲,王黎望,陈逸文,等.旋流流化床数值模拟及颗粒运动分析[J].华东理工大学学报(自然科学版),2022,48(4):556-564.
- LI Zongzhe, WANG Liwang, CHEN Erwen, et al. Numerical simulation and motion analysis of particles in cyclone fluidized bed[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2022, 48(4):556-564(in Chinese).
- [16] 谢磊,贾雨彬,陈曦,等.液固流化床内二元颗粒流动特性数值模拟研究[J].工程热物理学报,2023,44(8):2144-2152.
- XIE Lei, JIA Yubin, CHEN Xi, et al. Simulations on flow behaviors of binary particles in a liquid-solid fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(8):2144-2152(in Chinese).
- [17] 刘国栋,沈志恒,王帅,等.液固流化床中颗粒流动特性的数值模拟[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(7):1108-1111.
- LIU Guodong, SHEN Zhiheng, WANG Shuai, et al. Simulation of hydrodynamics of particles in a liquid-solid fluidized bed[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(7):1108-1111(in Chinese).
- [18] 黎明,谢灼利,张政.应用离散单元法对二维流化床内流态进行数值模拟研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2002(2):6-10.
- LI Ming, XIE Zhuoli, ZHANG Zheng. Numerical study of 2D fluidized bed with the distinct element method[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2002(2):6-10(in Chinese).
- [19] 张博伦.移动床内颗粒流动特性的 DEM 模拟研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
- [20] 胡海滨.液固移动床卸料特性的 CFD-DEM 模拟研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
- [21] 袁子涵.液固流化床内非牛顿流体-颗粒两相流动数值模拟研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
- [22] GIDASPOW D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory description[M]. San Diego: Academic Press, 1994.

Numerical Simulation and Experimental Verification of Uranium Extraction Process in Moving Bed Adsorption Tower

YANG Yiming¹, DENG Jian¹, LEI Lin², LEI Zeyong¹, CHEN Jiantang³

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. Hunan CNC Jinyuan New Material Co., Ltd., Hengyang 421002, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of uranium extraction by the moving bed adsorption tower, Fluent and Edem software were used to simulate the process of uranium extraction by the moving bed adsorption tower. By adjusting the inlet flow rate, and observing the movement of resin particles, the distribution state and the settling of saturated resin in the moving bed adsorption tower, the optimal inlet flow rate was analyzed and obtained. The accuracy of the simulation results was verified by building an experimental platform, and the comparative analysis of the experimental data with the numerical simulation results confirmed the consistency of the two conclusions, thus verifying the accuracy and applicability of the model. The results show that the optimal inlet flow rate is 4 m³/h. At this flow rate, the extraction efficiency of uranium ions is maximized, which provides an important design parameter for the future design of moving bed adsorption tower.

Key words: moving bed; adsorption tower; uranium; simulation; inlet flow rate; experimental platform

附录部分:物理量名称及符号表

ϵ_l — 液相体积分数	β — 液固相间曳力系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
ρ_l — 液体密度, kg/m^3	ξ_s — 颗粒相动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
\mathbf{v}_s — 液体速度矢量, m/s	g — 重力加速度, m/s^2
ϵ_s — 颗粒相体积分数	θ — 颗粒拟温度, m^2/s^2
ρ_s — 颗粒密度, kg/m^3	g_0 — 颗粒径向分布函数
\mathbf{v}_s — 颗粒速度矢量, m/s	μ_s — 颗粒相剪切黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
p_l — 液相压力, Pa	d_p — 颗粒直径, m
$\boldsymbol{\tau}_l$ — 液相应力张量, Pa	e — 干颗粒法向恢复系数
μ_l — 液相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	β_{Gidaspow} — 液固相间曳力系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
\mathbf{I} — 单位矢量	C_d — 单颗粒曳力系数
p_s — 颗粒相压力, Pa	Re — 雷诺数
$\boldsymbol{\tau}_s$ — 颗粒相应力张量, Pa	