

文章编号:1674-9669(2019)02-0006-07 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2019.02.002

引文格式:陈尚,刘青,赵世强,等.树脂吸附铜锌离子的数值模拟[J].有色金属科学与工程,2019,10(2):6-12.

树脂吸附铜锌离子的数值模拟

陈尚¹, 刘青¹, 赵世强¹, 郑其²

(1. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2. 北京有色金属研究总院稀有金属冶金材料研究所,北京 100088)

摘要:镀金原料氰化亚金钾的生产过程含氰废液中锌(Ⅱ)离子和铜离子(Ⅱ)浓度较高,为探究树脂吸附铜、锌离子的规律,运用 Aspen Adsorption 数值模拟软件对 $\Phi 10\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的树脂固定床吸附过程进行数值模拟,采用一阶迎风差分法作为偏微分方程的离散方法,研究不同条件下的吸附穿透曲线和吸附负荷分布曲线.结果表明:增加进料流量和进料浓度均可提高吸附效率,传质系数(K_s)大于临界值时,吸附穿透曲线不再受其影响, $K_s(\text{Zn}^{2+})=4.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, $K_s(\text{Cu}^{2+})=1.00\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$.

关键词:树脂;吸附柱;锌离子;铜离子;穿透曲线

中图分类号:TF803.2 **文献标志码:**A

Mathematical simulation on adsorption of zinc ion and copper ion with resin

CHEN Shang¹, LIU Qing¹, ZHAO Shiqiang¹, ZHENG Qi²

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Rare Metals and Metallurgy Materials Research Institute, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Zinc (Ⅱ) ion and Copper (Ⅱ) ion come from the process of producing potassium aurocyanide, gold-plated material. Adsorption process of zinc ion and Copper ion resin in a $\phi 10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ adsorption column was simulated and studied with the aid of Aspen Adsorption. Ion concentration at exit of adsorption column vs time curve and bed axial loading distribution of ion were obtained from simulation results with discrete partial differential equations of first order upwind difference method. The time of breakthrough was shortened, as feed flow rate and feed concentration increase respectively. The adsorption breakthrough curves did not change with mass transferring coefficient any more. When the mass transfer coefficient is greater than the critical value, $K_s(\text{Zn}^{2+})=4.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, $K_s(\text{Cu}^{2+})=1.00\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$. The modeling study provides reference data for scale-up experiment and industrial application.

Keywords: resin; adsorption column; zinc ion; copper ion; breakthrough curve

氰化亚金钾是集成线路板或工艺品的主要镀金原料,制备过程产生的废液经活性炭吸附回收氰化亚金离子后,废液中的有价金属锌的含量高达 0.310 g/L、铜的含量高达 0.006 g/L.树脂对提金氰化废液进行综

合处理是主流方法之一,具有重复使用率高、处理容量大、能够处理多种重金属离子和酸根等优势^[1-7].实验中的静态吸附与动态实验结合研究的方法不便考察传质系数对吸附回收效率的作用,而数值模拟的方

法可以不受此限制,模拟吸附过程,从而节约成本,提高效率^[8-14]。

彭松水^[15]建立 CO₂ 待净化体系的双塔变温吸附模型,借助 Aspen Adsorption 软件动态模拟各组分的吸附、热再生、冷再生过程,对不同类型的吸附剂做出有效评价,同时对吸附剂制定较优的时序组合。李建伟等^[16]运用 Aspen Adsorption 模拟煤层气的吸附非等温过程,研究床层温度、甲烷和氮气的吸附量以及气速等参数的分布规律。杨中山等^[17]建立 $\Phi 0.2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的吸附柱模型,运用 Aspen Adsorption 考察不同条件下氰化亚金离子的吸附柱穿透曲线。刘金昌等^[18]依靠 Aspen Adsorption 软件对单塔活性炭吸附锌离子过程,研究浓度、流量和传质系数对吸附过程的影响。杨金垚等^[19]运用 Aspen Adsorption 模拟烟气中 CO₂ 在固定床中的动态变温吸附过程,探究温度、时间对 CO₂ 捕捉率、产品纯度和分离耗散能的影响。薛才红等^[20]以乙醇蒸汽为原料,运用 Aspen Adsorption,探究了吸附压力、吸附剂体积对乙醇变压吸附过程的影响。竹涛等^[21]运用 Aspen Adsorption 探究煤层气的变压吸附分离过程中原料气浓度、吸附压力对解吸气体甲烷浓度的影响。

文中运用 Aspen Adsorption 软件,以国内某金盐生产企业的提金氰化废液处理装置为研究对象,建立实验室规模的吸附柱,并对吸附过程进行数学建模,比较树脂吸附柱出口处锌离子的动态浓度数据与 Aspen Adsorption 模拟数据,验证了模型的可靠性。在此基础上,对树脂吸附铜、锌离子过程,分别从进料流量、进料浓度、传质系数及吸附柱的轴向负载等方面对吸附规律进行研究。

1 吸附数学模型的建立

为建立吸附过程的数学模型,首先应对实际吸附过程进行假设以简化问题,然后再对传质过程建立数学方程,选择合理的数学模型,最后借助 Aspen Adsorption 软件并给出初始化条件,最终对树脂吸附铜、锌离子的过程进行数值解析。

1.1 模型假设

针对树脂吸附铜、锌离子的物理过程,对固定床吸附铜、锌离子进行如下假设^[17]:①液相均没有黏性且为不可压缩流体;②无温度变化,吸附过程属于绝热状态;③各吸附床层内的液相流动均为扩散活塞流;④不考虑轴向的物质扩散和压力降。

1.2 数学模型

1.2.1 物料平衡方程

采用离散方法求解吸附过程,将吸附柱离散化,分割成无数个单元微元体,对于任意微元体,吸附质的输入速率与输出速率的差值应与吸附质组分在利用微元体内的积累速率相等,利用吸附质浓度的变化关系可得到整个吸附柱的物料平衡方程:

$$\frac{D_L}{\Delta x} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{x+\Delta x,t} - \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{x,t} \right) = \frac{v}{\Delta x} (C|_{x+\Delta x,t} - C|_{x,t}) + \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q}{\partial t} \right) \quad (1)$$

整理得:

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

由模型假设可知,此流动为理想活塞流模型,即可忽略轴向扩散的影响,式(2)中的等号右侧等于零,物料平衡方程简化^[17]为:

$$\frac{\partial (vC)}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

式(3)中, v 是流体的线速度(m/s), C 是组分浓度(kmol/m³), x 是轴向距离(m), ε 是孔隙率, t 是吸附时间(s), ρ_p 是堆积密度(kg/m³), q 为吸附量(kmol/kg)。

初始条件:

$$t=0 \rightarrow C(x,t)=0, q(x,t)=0 \quad (4)$$

$$x=0 \rightarrow C(x,0)=0, C(0,t>0)=C_0 \quad (5)$$

$$x=H \rightarrow \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

1.2.2 吸附速率方程

固体床吸附采用线性推动力模型(LDF)描述,其吸附速率方程^[22]为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_e (q^0 - q) \quad (7)$$

式(7)中, k_e 是集成扩散系数(s⁻¹), q^0 是饱和吸附量(kmol/kg)。

当表面扩散为内扩散的限制环节时,

$$k_e = \frac{15D_s}{R_p^2} \quad (8)$$

式(8)中, D_s 是表面扩散系数(m²/s); R_p 是吸附剂颗粒半径(m)。

1.2.3 数值方法

固体床吸附过程的离散方法采用快速、稳定、易收敛的一阶上风差分法(USD1, Upwind Differencing Scheme 1),其基于泰勒的一节展开式的推导方程^[15]为:

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial x} = \frac{\Gamma_i - \Gamma_{i-1}}{\Delta x} \quad (9)$$

2 参数设置

2.1 参数确定

Langmuir 方程和 Freundlich 方程均可用来描述吸附剂和吸附质间的吸附行为,其中

$$\text{Langmuir 方程: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{k_L q_m} \quad (10)$$

$$\text{Freundlich 方程: } \ln q_e = \ln q_m + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (11)$$

式(10)、式(11)中: C_e 为平衡浓度(mg/L); q_e 为平衡吸附量(mg/g); q_m 为饱和吸附容量(mg/g); K_L 为 Langmuir 吸附平衡常数 (L/mg); K_F 为 Freundlich 吸附平衡常数 ($\text{L}^{1/n} \cdot \text{mg}^{n-1/n} \cdot \text{g}^{-1}$).

使用树脂对不同浓度的锌离子溶液进行静态吸附实验, 获得平衡浓度和平衡吸附量, 然后分别用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程对静态吸附数据进行线性拟合, $R^2_F(0.998) > R^2_L(0.912)$, 如图 1、图 2 所

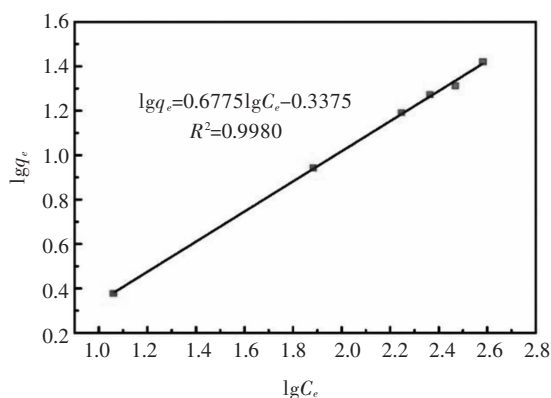


图 1 Freundlich 方程拟合吸附等温线

Fig. 1 Adsorption isotherm of Freundlich equation

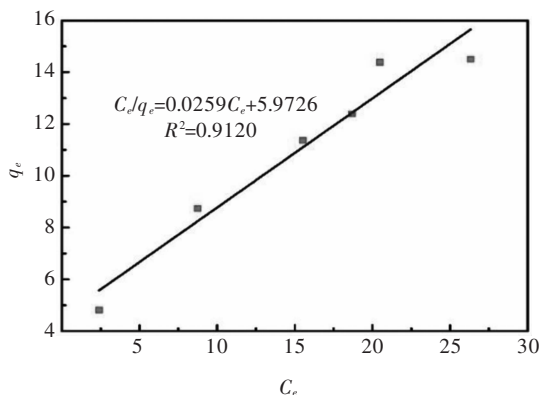


图 2 Langmuir 方程拟合吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherm of Langmuir equation

示. 因此, 本研究吸附等温线测定实验的有限实验数据说明了与树脂吸附锌离子过程较为吻合的是 Freundlich 吸附等温模型, 而 Freundlich 吸附等温模型主要拟合物理吸附过程, 可知树脂吸附锌离子过程可能主要依靠物理吸附进行, 其吸附等温方程为:

$$\lg q_e = 0.6775 \lg C_e - 0.3378 \quad (12)$$

同理, 将树脂对铜离子的静态吸附数据用 2 种吸附模型进行拟合. Langmuir 方程的拟合系数 $R^2_L = 0.9871$, Freundlich 方程的拟合系数 $R^2_F = 0.9705$. 因此选择 Langmuir 模型, 树脂对铜离子的吸附为单分子层吸附^[23]. 而 Langmuir 模型主要拟合化学吸附或氢键物理吸附, 树脂吸附铜离子时可能发生了离子交换的化学吸附.

2.2 吸附柱相关参数的确定

进料口中参数主要包括进料流量、进料浓度、温度和压强, 等. 表 1 列出了树脂吸附铜、锌离子时的进料口参数值.

表 1 铜、锌离子进料参数

Table 1 Feeding parameters of zinc ion and copper ion

变量	数值(Zn^{2+})	数值(Cu^{2+})
进料流速 $I/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	4.60×10^{-5}	4.6×10^{-5}
进料浓度 $I/(\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3})$	4.73×10^{-3}	9.44×10^{-5}
温度 /K	298.75	298.75
压力 $I/(\times 1.013 \times 10^5 \text{ Pa})$	1.00	1.00

吸附床层的参数主要包括吸附床层的高度、直径, 吸附剂的堆积密度、空隙率, 吸附等温参数, 等. 如表 2 所列.

表 2 树脂吸附铜、锌离子时吸附床层主要参数

Table 2 Parameters of adsorbent bed filled with resin for adsorption of zinc ion and copper ion

变量	数值(Zn^{2+})	数值(Cu^{2+})
吸附柱高度 H_b/mm	200	200
吸附柱内径 D_b/mm	10	10
内部颗粒孔隙率 E_i	0.4	0.4
固体密度 $d_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	480	480
传质系数 K_s/s^{-1}	4.3×10^{-4}	1.0×10^{-3}
等温参量 IP_1	0.459 4	0.021 1
等温参量 IP_2	0.677 5	85.100

3 模拟结果与讨论

本研究通过数值模拟数据与已有的实验数据相对比,来验证模型的准确性.然后,利用 Aspen Adsorption 软件分别从进料流量、进料浓度、传质系数方面研究树脂吸附铜、锌离子的规律.

3.1 模型验证

运用 Aspen Adsorption 软件进行计算,并与实验数据对比,如图 3 所示.当模型对进料锌离子浓度为 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$,进料流量为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$,模拟结果能够正确预报吸附柱出料处锌离子浓度变化趋势,与实验结果比较吻合,验证了树脂吸附模型的可靠性.因此,可以用来模拟预测树脂吸附铜、锌离子的情况.

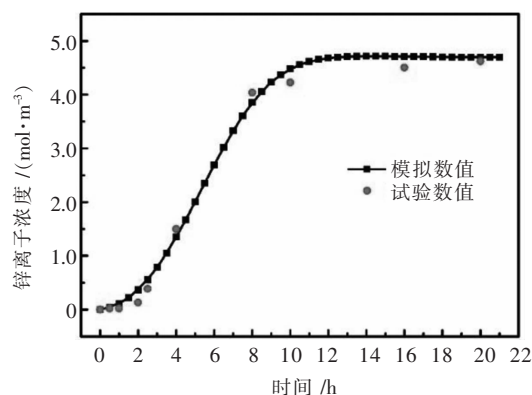


图 3 数值模拟结果与实验结果的吸附穿透曲线的对比

Fig. 3 Comparison of adsorption breakthrough curves between numerical simulation results and experimental results

3.2 进料浓度对吸附过程的影响

固定床进料流量为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,锌离子含量分别为 $1.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 、 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 、 $7.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 时的吸附穿透曲线如图 4 所示.

进料中锌离子的浓度从 $1.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 增至 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 时,吸附床层开始穿透的时间从 1.06 h 缩短至 1.00 h;当进料浓度从 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 增加到 $7.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$,吸附床层开始穿透的时间从 1.00 h 缩短至 0.98 h.因此,固定床层的开始穿透时间缩短幅度随着浓度的升高而降低.锌离子进料浓度从 $1.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 增至 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 时,完全穿透的时间由 13.11 h 缩短至 12.50 h;进料浓度从 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 增至 $7.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$,吸附床层完全穿透的时间从 12.5 h 缩短至 12.28 h.

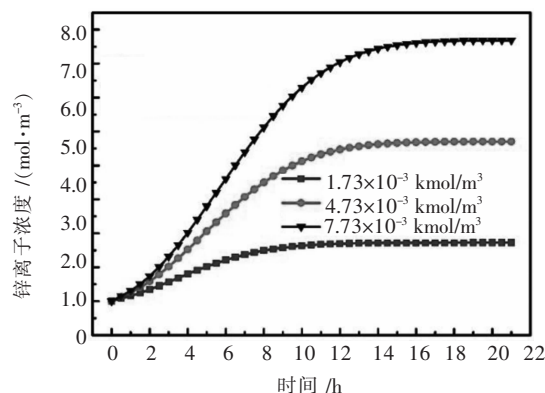


图 4 不同进料浓度下的锌离子吸附穿透曲线

Fig. 4 Breakthrough curves of zinc ion at different feed concentrations

当铜离子进料流量为 $4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,取进料中离子的浓度分别取 $2.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $4.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $6.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $8.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $1.08 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$ 时,吸附穿透曲线如图 5 所示.

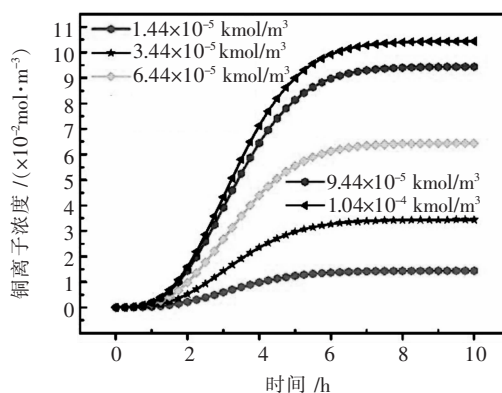


图 5 不同进料浓度下铜离子吸附穿透曲线

Fig. 5 Breakthrough curves of copper ion at different feed concentrations

随着进料中铜离子浓度的增加,吸附开始穿透的时间缩短.以 $2.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $6.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 、 $1.08 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$ 为例进行分析,当进料浓度由 $2.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 增至 $6.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 时,开始穿透的时间从 2.00 h 缩至 1.72 h;当进料浓度由 $6.82 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$ 增至 $1.08 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$ 时,开始穿透的时间从 1.72 h 缩至 1.58 h.

因此,进料浓度的增加会缩短完全穿透的时间.随着浓度的增加,吸附穿透曲线的斜率和吸附床层被完全穿透的速率均会增大,原因是:随着进料中锌离子的浓度的提高,单位时间进入床层的离子增大,而吸附床层饱和和吸附量增大的幅度不够吸附增加的吸附质.部分锌、铜离子未被吸附而进入下一阶段床

层,传质区迅速向床层底部移动,床层被穿透的速度增大。

3.3 进料流量对吸附过程的影响

进料中锌离子的含量为 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$, 进料流量分别为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,绘制吸附穿透曲线,如图 6 所示。

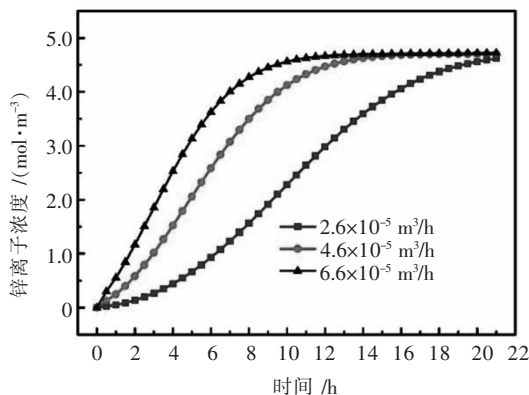


图 6 不同进料流量下锌离子的吸附穿透曲线

Fig. 6 Breakthrough curves of zinc ion at different feeding flow rates

当进料流量由 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,吸附床层开始穿透时间从 2.83 h 缩短至 1.00 h. 完全穿透时间从 19.5 h 缩短至 12.5 h;当进料流量由 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,吸附床层开始穿透时间从 1.00 h 缩短至 0.36 h. 完全穿透时间从 12.50 h 缩短至 9.50 h.

铜离子进料浓度是 $9.44 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$, 进料流量分别为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $8.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时的吸附穿透曲线,如图 7 所示.当进料流量由 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,吸附床

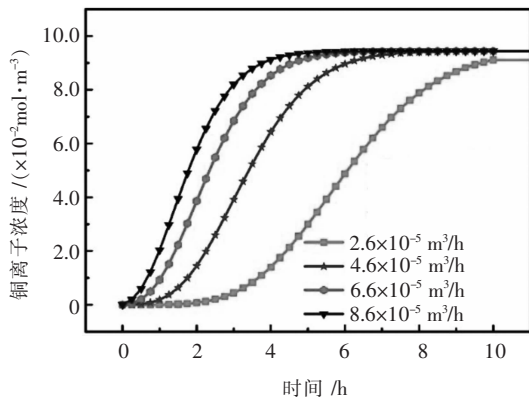


图 7 不同流量下铜离子吸附穿透曲线

Fig. 7 Breakthrough curves of copper ion at different feeding flow rates

层开始穿透的时间从 3.08 h 缩短到 1.39 h; 完全穿透时间从 9.50 h 缩短至 6.00 h; 当进料流量从 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$ 时,开始穿透时间由 1.39 h 缩短到 0.75 h,完全穿透时间从 6.00 h 缩短至 4.50 h.

数据表明:在其他条件不变的情况下,随着进料流量的增加,开始、完全穿透时间均提前.原因是,随着进料流量的增加,部分锌离子未被树脂吸附就进入下一床层,吸附质与吸附剂接触的时间在减少,传质时间缩短,传质区移动到床层底部的速度增加。

3.4 传质系数对吸附过程的影响

当锌离子的进料流量为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$, 进料浓度为 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3$ 时,研究传质系数对吸附穿透曲线的影响,如图 8 所示。

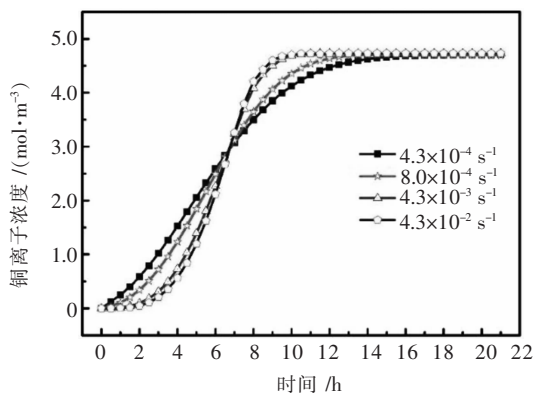


图 8 不同传质系数下锌离子吸附穿透曲线

Fig. 8 Breakthrough curves of zinc ion at different mass transfer coefficient values

当传质系数 K_s 从 $4.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 增加至 $8.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时,开始穿透的时间从 0.98 h 增加到 1.00 h,但传质系数 K_s 为 $4.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $4.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 穿透曲线几乎重合.数据表明,随着传质系数的增加,吸附床层穿透所需时间增加,但当传质系数 $K_s \geq 4.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,穿透曲线基本不改变。

当铜离子的进料流量为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$, 进料浓度为 $9.44 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$ 时,研究传质系数对铜离子吸附的穿透曲线的影响,如图 9 所示。

当传质系数 K_s 从 $5.00 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $1.00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,两者曲线相近.当传质系数 K_s 从 $1.00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $5.00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,开始穿透时间从 1.36 h 延迟到 1.61 h. 但传质系数 K_s 分别为 0.01 s^{-1} 、 0.10 s^{-1} 、 1.00 s^{-1} 时,穿透曲线基本重合.这些表明,传质系数 $K_s \leq 0.01 \text{ s}^{-1}$ 时,穿透时间随着传质系数的减小而增加.但当传质系数 $K_s \geq 0.01 \text{ s}^{-1}$ 时,穿透曲线基本保持改变。

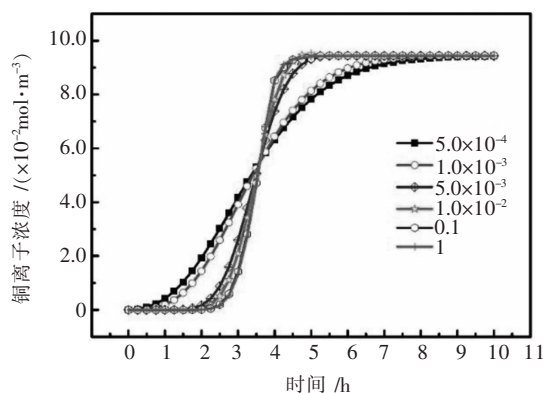


图 9 不同传质系数下铜离子吸附穿透曲线

Fig. 9 Breakthrough curves of copper ion at different mass transfer coefficient values

3.5 吸附柱的轴向荷载分布

当固体床进料流量为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$, 进料锌离子浓度为 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kmol}/\text{m}^3$ 时, 进料锌离子浓度为 $9.44 \times 10^{-3} \text{ kmol}/\text{m}^3$ 时, 以吸附床层高度为横坐标, 以与床层高度对应的溶液浓度为纵坐标, 绘制出不同时间点的溶液浓度与床层高度的变化关系曲线图, 得到吸附柱轴向荷载分布曲线, 如图 10、图 11 所示。

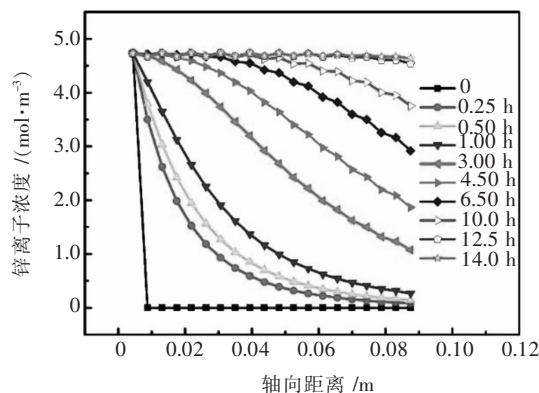


图 10 锌离子吸附荷载轴向分布

Fig. 10 Axial distributions of zinc ion adsorption capacity

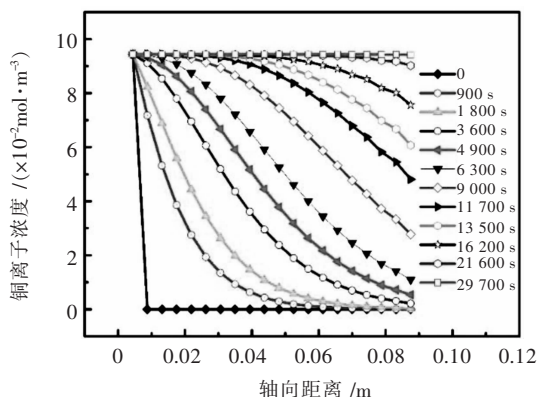


图 11 铜离子吸附荷载轴向分布

Fig. 11 Axial distributions of copper ion adsorption capacity

吸附初期, 吸附床层中离子被吸附, 随着吸附时间的增加, 吸附床层的进料口端开始形成传质区, 并向床层出料口端移动. 当吸附持续时间达 $t(\text{Zn}^{2+})$ 为 1.00 h、 $t(\text{Cu}^{2+})$ 为 1.36 h 时, 传质区的下表面到达床层底部, 此时吸附床层开始被穿透; 当吸附持续时间达 $t(\text{Zn}^{2+})$ 为 12.5 h、 $t(\text{Cu}^{2+})$ 为 6.00 h 时, 传质区的上表面到达床层底部, 此时床层已被完全穿透, 吸附柱丧失了吸附能力, 床层出料口离子浓度与进料口浓度相等. 此外, 传质区在吸附过程沿轴向床层底部移动的过程中, 传质区的长度并没有发生变化。

4 结 论

本研究在液相吸附基本理论的基础上, 对树脂固定吸附柱床层的吸附过程做出假设: 无轴向扩散、无温度变化、液相为扩散活塞流等, 建立物料平衡方程、吸附速率方程和吸附等温方程. 以一阶迎风差分法为离散方法, Aspen Adsorption 软件作为计算工具, 研究进料浓度、流量和传质系数对吸附过程的影响, 结论如下:

1) 运用 Aspen Adsorption 软件对树脂吸附锌离子过程进行数值模拟, 并将模拟数据与实验数据相对比, 验证了所建数学模型的可靠性;

2) 在吸附初期, 吸附柱出料口中含有少量铜、锌离子, 随着吸附的进行, 由于树脂量是固定的, 吸附床层逐渐接近饱和, 吸附能力逐渐降低;

3) 在进料流量、进料铜、锌离子浓度增加时, 穿透曲线均左移, 但进料流量的作用更为突出. 建议通过提高进料流量以提高树脂吸附铜、锌离子效率;

4) 在传质系数大于临界值时, 吸附穿透曲线基本重合, 其对吸附性能并没有显著的影响. 临界 $K_s(\text{Zn}^{2+}) = 4.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $K_s(\text{Cu}^{2+}) = 1.00 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 邱廷省, 郝志伟, 成先雄. 含氰废水处理技术评述与展望[J]. 江西冶金, 2002, 22(3): 25-29.
- [2] 兰新哲, 宋永辉, 廖赞, 等. 含氰尾液综合回收研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(4): 493-497.
- [3] XIE F, DREISINGER D, DOYLE F. A review on recovery of copper and cyanide from waste cyanide solutions [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, 2013, 34(6): 387-411.
- [4] ZHANG Y L, FANG T, YU X J. Adsorption of zinc and cyanide from cyanide effluents on anionic ion-exchange resin[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2013, 29(1): 144-149.
- [5] 刘畅, 刘静欣, 江晓健, 等. 废弃电路板中非金属组分的回收利用[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(2): 1-7.
- [6] 何敏, 兰新哲, 朱国才, 等. 离子交换树脂处理含氰废水进展[J]. 黄金,

- 2006,27(1):45–48.
- [7] 黄爱华. 提金含氰废水处理工艺研究现状及发展趋势分析[J]. 黄金科学技术,2014,22(2):83–89.
- [8] 王碧侠,兰新哲,宋永辉,等. 用离子交换树脂从含氰溶液中回收有价成分的研究[J]. 有色金属工程,2002,54(7):124–127.
- [9] 吴永胜. 金置换率下降原因分析及对策[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5):36–40.
- [10] 何敏,兰新哲,朱国才. D296 树脂对氧化物的吸附和解吸性能研究[J]. 金属矿山,2005(10):56–59.
- [11] 张笠,李慕玲,迟杰,等.树脂循环复用处理镀金废液的研究[J]. 离子交换与吸附,1997,13(6):583–589.
- [12] SHU Z N, XIONG C H, WANG X. Adsorption behavior and mechanism of amino methylene phosphonic acid resin for Ag(I) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2006,16(3): 700–704.
- [13] TORRE M, BACHILLER D, RENDUELES M. Cyanide recovery from gold extraction process waste effluents by ion exchange I. Equilibrium and kinetics[J]. Solvent Extraction & Ion Exchange, 2006,24(24):99–117.
- [14] DASH R R, DASH R R, BALOMAJUMDAR C. Treatment of cyanide bearing effluents by adsorption, biodegradation and combined processes: effect of process parameters [J]. Desalination & Water Treatment, 2014,52(16/17/18): 3355–3366.
- [15] 彭松水.基于 Aspen Adsorption 的 CO₂ 净化工艺动态模拟[J]. 石化技术,2015,22(5):13–16.
- [16] 李建伟,张三莉,宣自润,等. 煤层气单塔吸附过程的模拟[J]. 天然气化工:c1 化学与化工,2016,41(1):54–57.
- [17] 杨中山,刘庭耀,王宝,等. 活性炭吸附提取氧化亚金离子的数学模拟[J]. 过程工程学报,2015,15(4):594–598.
- [18] 刘金昌,曹俊雅,刘娟,等. 基于 Aspen Adsorption 的活性炭吸附溶液中镍离子的模拟研究[J].计算机与应用化学, 2013, 30(4):439–442.
- [19] 杨金垚,方梦祥,岑旗钢,等.活性炭捕集燃煤烟气中二氧化碳的模拟分析[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(11):2142–2149.
- [20] 薛才红,郑尧,赵鹏翔,等.基于 Aspen Adsorption 的乙醇变压吸附脱水工艺模拟[J].石油化工,2016,45(9):1107–1111.
- [21] 竹涛,刘恩彤,王艳霞,等.煤矿乏风瓦斯变压吸附技术操作条件优化试验研究[J].矿业科学学报,2016,1(2):196–202.
- [22] 李立清,孙政,邢俊冬,等. 固体床吸附过程传热传质耦合影响数值模拟[J]. 化工学报,2010,61(11):2810–2816.
- [23] 马立成. 铜离子印迹磁性壳聚糖微球的制备和选择吸附性能研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院,2015:40–65.