



## 铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型

刘玉龙<sup>1,2</sup>, 扶海鹰<sup>1</sup>, 叶勇军<sup>1</sup>, 胡南<sup>1</sup>, 李广悦<sup>1</sup>, 丁德馨<sup>1</sup>

(1. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 衡阳 421001;  
2. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100029)

**摘要:** 铀矿堆浸过程中铀的浸出是溶浸液在多孔介质中对流、弥散以及反应耦合作用的结果。首先采用理论分析和数学建模的方法建立了铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型, 然后采用有限元法对该动力学模型进行解算, 最后采用铀矿柱浸试验对解算结果进行了验证。结果表明: 所建立的铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型能反映浸出柱中主要特征变量的变化, 同时可以表征浸出柱不同深度处溶浸液和铀的浓度、各粒级铀矿石的浸出率、各粒级铀矿石缩核随时间的分布, 因而能准确预测浸出柱铀矿石的浸出率。因此, 该对流-弥散-反应耦合动力学模型可用于铀矿堆浸铀浸出率的预测及工艺参数的调控。

**关键词:** 铀矿堆浸; 对流; 弥散; 反应; 耦合动力学模型; 柱浸

文章编号: 1004-0609(2022)-04-1142-10

中图分类号: TD958

文献标志码: A

引文格式: 刘玉龙, 扶海鹰, 叶勇军, 等. 铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 1142-1151. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-39718

LIU Yu-long, FU Hai-ying, YE Yong-jun, et al. Convection-diffusion-reaction coupling dynamic model for uranium ore heap leaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 1142 - 1151. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-39718

堆浸工艺具有基建投资少、工艺简单、生产成本低等优点, 是我国铀矿山生产铀金属的主体工艺, 被广泛用于从低品位铀矿石中提取金属铀<sup>[1-3]</sup>。铀矿堆是由大量粒径和性质不同的铀矿石颗粒堆积在一起的多孔介质, 堆浸过程中溶浸液在矿堆中存在对流、弥散和反应等物理、化学耦合作用, 呈现出复杂的动态变化过程。掌握堆浸铀矿堆内溶浸液浓度变化规律和金属铀浸出动力学规律, 对优化铀矿山堆浸工艺参数具有重要的意义。因此, 有必要对铀矿堆浸中溶浸液与铀矿石相互作用的物理化学过程进行深入研究, 建立动力学模型, 实时模拟堆浸特征变量的变化规律, 优化调控铀矿堆浸主要工

艺参数<sup>[4-6]</sup>。

关于堆浸动力学模型, 国内外学者已开展了较多研究, 取得了一些有重要意义的研究成果<sup>[7-14]</sup>。南华大学铀矿冶生物技术国防重点学科实验室在这方面也进行了较多研究, 提出了一些能够反映铀矿堆浸行为的动力学模型<sup>[15-20]</sup>。特别是在建立的单个铀矿石颗粒反应模型的基础上, 根据单元体溶体质量守恒, 建立了单一粒级铀矿石柱浸动力学模型, 该模型很好反映了浸出柱不同深度金属铀随浸出时间的变化规律<sup>[19]</sup>。但这一模型没有考虑铀矿堆是由不同粒级矿石颗粒组成的复杂集合体实际情况, 也没有考虑溶浸液在铀矿堆中存在对流、弥散、反应等物理化学反应。本文作者拟在单个铀矿石颗粒反

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975071)

收稿日期: 2021-05-26; 修订日期: 2022-05-11

通信作者: 丁德馨, 教授, 博士; 电话: 0734-8282534; E-mail: dingdxzzz@163.com

应模型的基础上, 针对这些问题进行理论分析和数学建模, 建立铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型, 使动力学模型更加符合生产实际, 有效指导堆浸生产中工艺参数的调控。

## 1 模型建立

### 1.1 单个矿石颗粒反应模型

根据矿石颗粒反应速率与反应面面积以及反应面上溶浸液中硫酸浓度呈正比的关系, 建立了铀矿堆浸单个矿石颗粒反应模型<sup>[19]</sup>:

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi\rho r^2 \frac{dr}{dt} = -k_1 A c_s = -4\pi k_1 r^2 c_s \quad (1)$$

式中:  $Q$  为未反应部分的矿石质量;  $t$  为时间;  $r$  为未反应部分矿石的半径;  $\rho$  为未反应矿石颗粒的密度;  $k_1$  为浸出反应的速率常数;  $A$  为反应面面积;  $c_s$  为反应面上的硫酸浓度; 负号表示矿石未反应部分减小。

反应面上的硫酸浓度  $c_s$  可表示为<sup>[19]</sup>

$$c_s = c \left[ 1 + \frac{bk_1}{Df} \times \frac{r}{r_0} (r_0 - r) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中:  $c$  为溶液中硫酸浓度;  $b$  为反应计量系数;  $D$  为硫酸在矿石颗粒已反应区内的有效扩散系数;  $f$  为矿石的孔隙度;  $r_0$  为矿石初始半径。

将式(2)代入式(1)并进行简化, 可得单个矿石颗粒的反应模型:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{k_1 c}{\rho} \times \left[ 1 + \frac{bk_1}{Df} \times \frac{r}{r_0} (r_0 - r) \right]^{-1} \quad (3)$$

### 1.2 粒级平均粒径

堆浸铀矿堆是由大小不同的矿石颗粒组成的集合体, 其粒度分布特征可通过将矿石筛分为若干个粒级进行表征。在模型计算时, 采用多个粒级以及各粒级矿石质量的占比来表示全部矿石, 以每个粒级平均粒径来表示该粒级矿石的粒径。假设将矿石筛分为  $I$  个粒级, 用编号  $i$  表示粒级数, 用  $r_{i0}$  表示第  $i$  粒级矿石的平均粒径。由式(1)可知, 粒径通过影响颗粒反应面积而影响反应速率, 因此对于某个粒级的矿石, 可用最小反应面积和最大反应面积的平均数表示该粒级矿石的平均反应面积, 如式(4)所示:

$$4\pi r_{i0}^2 = \frac{4\pi r_{i,\min}^2 + 4\pi r_{i,\max}^2}{2} \quad (4)$$

式中:  $r_{i,\min}$  为第  $i$  粒级矿石的最小粒径,  $r_{i,\max}$  为第  $i$  粒级矿石的最大粒径。

简化式(4)得:

$$r_{i0} = \sqrt{\frac{r_{i,\min}^2 + r_{i,\max}^2}{2}} \quad (5)$$

### 1.3 矿石颗粒数

对于由若干粒级矿石颗粒组成的集合体, 可设其孔隙率为  $n$ , 代表颗粒与颗粒之间以及颗粒内部贯通的孔隙, 则有:

$$n = \frac{V_n}{V_s} \quad (6)$$

式中:  $V_n$  为矿堆有效孔隙的体积;  $V_s$  为矿堆总体积。

$$V_s = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{M_i} V_{i0,m} + V_n \quad (7)$$

式中:  $I$  表示粒级总数;  $M_i$  为第  $i$  粒级矿石颗粒的总数;  $V_{i0,m}$  为第  $i$  粒级矿石颗粒的平均体积。

假设不同粒级矿石密度相等, 则可得:

$$\sum_{m=1}^{M_i} V_{i0,m} = M_i \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_{i0}^3 = w_i \cdot V_s \cdot (1-n) \quad (8)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  粒级矿石占总矿石质量分数。

由式(8)可得出第  $i$  粒级矿石颗粒总数:

$$M_i = \frac{3w_i \cdot (1-n) \cdot V_s}{4\pi r_{i0}^2} \quad (9)$$

### 1.4 矿石酸耗与铀浸出

假设铀矿石中金属铀分布均匀, 单位质量矿石消耗硫酸的量相等, 铀矿石的反应全部通过消耗硫酸来进行。则矿石堆浸中硫酸的消耗速度与矿石的反应速度成正比<sup>[19]</sup>:

$$\frac{d(V_s \theta c_{1i})}{dt} = k_2 M_i \frac{dQ_i}{dt} \quad (10)$$

式中:  $\theta$  为矿堆含水率;  $c_{1i}$  表示第  $i$  粒级矿石消耗的硫酸浓度;  $k_2$  为矿石酸耗比, 即浸出单位质量铀矿石消耗的硫酸质量。

将式(10)代入式(1)中可得:

$$\frac{dc_{1i}}{dt} = -\frac{k_1 k_2 M_i \cdot 4\pi r_i^2 \cdot c_s}{V_s \theta} \quad (11)$$

反应消耗硫酸的同时会浸出铀, 铀的浸出速度

与矿石的反应速度成正比，则有：

$$\frac{dc_{2i}}{dt} = \frac{k_1 GM_i \cdot 4\pi r_i^2 \cdot c_s}{V_s \theta} \quad (12)$$

式中： $c_{2i}$  表示第  $i$  粒级矿石反应生成的铀浓度； $G$  为铀矿石品位。

由于铀矿石中铀金属分布均匀，第  $i$  粒级铀矿石的浸出率  $\alpha_i$  可表示为：

$$\alpha_i = [1 - (r_i/r_0)^3] \times 100\% \quad (13)$$

式中： $r_i$  为第  $i$  粒级铀矿石未反应部分粒径。

### 1.5 对流-弥散-反应耦合动力学模型

在堆浸矿堆中，溶质(硫酸和铀)随着溶浸液向下运移，同时存在对流、弥散、反应等物理化学作用<sup>[10]</sup>。在一维情况下，考虑溶质在矿堆多孔介质中对流、弥散、反应的耦合作用，可建立铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型：

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} - v \frac{\partial c_1}{\partial z} + \sum_{i=1}^l \frac{dc_{1i}}{dt} \quad (14)$$

式中： $c_1$  为硫酸浓度； $c_0$  为溶浸液中初始硫酸浓度； $D_1$  为溶浸液中溶质弥散系数； $v$  为渗流速度； $z$  为矿堆深度，矿堆表面  $z$  为 0，向下  $z$  为正。

初始条件：

$$c_1 = 0 \quad (z \geq 0, t=0)$$

边界条件：

$$c_1 = c_0 \quad (z=0, t \geq 0)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial z} = 0 \quad (z=H, t \geq 0)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} - v \frac{\partial c_2}{\partial z} + \sum_{i=1}^l \frac{dc_{2i}}{dt} \quad (15)$$

式中： $c_2$  为铀浓度。

初始条件：

$$c_2 = 0 \quad (z \geq 0, t=0)$$

边界条件：

$$c_2 = 0 \quad (z=0, t \geq 0)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial z} = 0 \quad (z=H, t \geq 0)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = -\frac{k_1 c_1}{\rho} \times \left[ 1 + \frac{bk_1}{D_2 f} \times \frac{r_i}{r_{i0}} (r_{i0} - r_i) \right]^{-1} \quad (i=1, 2, \dots, l)$$

初始条件：

$$r_i = r_{i0} \quad (z \geq 0, t=0),$$

边界条件：

$$\frac{\partial r_i}{\partial z} = 0 \quad (z=0, t \geq 0)$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial z} = 0 \quad (z=H, t \geq 0)$$

## 2 铀矿柱浸试验

为检验铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型的准确性和适用性，采用我国某铀矿山的铀矿石进行柱浸试验。先把矿石破碎至 9 mm，再用筛子将矿石筛分为 0.5 mm、+0.5~1 mm、+1~2 mm、+2~3 mm、+3~4 mm、+4~5 mm、+5~6 mm、+6~8 mm、+8~9 mm 共计 9 个粒级。考虑到耦合动力学模型推导过程中假设矿石粒级与品位分布均匀，为了保证柱浸矿石的均匀性，矿石级配如表 1 所示。将不同粒级的铀矿石混匀后装柱浸出，装柱高度为 1 m，浸出柱内径为 8.8 cm。铀矿石平均品位为 0.177%。

表 1 柱浸试验铀矿石的级配

Table 1 Size fraction composition of uranium ore for experiment

Size/mm	Mass/kg
-0.5	0.556
+0.5~1	0.556
+1~2	1.111
+2~3	1.111
+3~4	1.111
+4~5	1.111
+5~6	1.111
+6~8	2.222
+8~9	1.111
Total	10.000

采用硫酸配制溶浸液，溶浸液通过布液装置均匀喷洒在浸出柱表面矿石上，溶浸液自上而下渗流，并与矿石发生化学反应，反应形成的浸出液汇集于集液槽。累计浸出时间为 350 h，在 0~130 h 阶段，因矿石耗酸较大，溶浸液中硫酸浓度为 20 g/L，在 131~350 h 阶段，溶浸液硫酸浓度降低至 15 g/L。每隔 10 h 取浸出液分析其 pH、 $\varphi$  和铀浓度。

### 3 模型计算与试验结果

采用 MATLAB 编程, 应用有限元法对式(14)、(15)、(16)耦合模型进行数值计算。首先以实测矿石孔隙率、铀品位、酸耗比、密度<sup>[19]</sup>和经典数据作为模型参数; 其次根据模型计算结果和试验结果对部分非实测参数进行校准。迭代优化后模型参数赋值如表2所示。表2中,  $b$ 为反应计量系数;  $k_1$ 为反应常数;  $D$ 为矿石中溶质扩散系数;  $D_1$ 为溶液中溶质弥散系数;  $v$ 为渗流速度;  $f$ 为矿石孔隙度;  $N$ 为矿堆孔隙率;  $\theta$ 为矿堆含水率;  $G$ 为矿石品位;  $k_2$ 为酸耗比;  $\rho$ 为矿石密度。

表2 模型参数赋值

Table 2 Values of model parameters

Parameter	Value
$b$	1
$k_1/(cm \cdot h^{-1})$	3.9
$D/(cm^2 \cdot h^{-1})$	0.065
$D_1/(cm^2 \cdot h^{-1})$	25
$v/(cm \cdot h^{-1})$	4.4
$f$	0.024
$N$	0.405
$\theta$	0.350
$G/\%$	0.177
$k_2/(g \cdot g^{-1})$	0.05
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	2.76

#### 3.1 硫酸浓度与铀浓度变化规律

采用耦合模型计算得到的浸出柱不同深度与不同浸出时间的硫酸浓度如图1所示。由图1可知, 硫酸配制的溶浸液加入浸出柱后, 浸出柱上部区域硫酸浓度迅速升高, 随着浸出时间推移, 溶浸液逐渐向浸出柱底部渗流, 渗流过程中硫酸与铀矿石发生化学反应, 浸出柱底部区域硫酸浓度降低, 趋于0; 随着浸出持续进行, 浸出柱中加入硫酸的量逐渐增多, 而矿石中耗酸物质逐渐减少, 浸出柱内硫酸浓度由上到下呈现逐渐增加的趋势。

柱浸试验得到的浸出液pH值和 $\varphi$ 值随时间的变化如图2所示。图2(a)、(b)中的试验数据反映了浸出柱中硫酸浓度变化的相同规律, 浸出初期的0~100 h内, 浸出液的pH值随着浸出时间增加逐渐

降低,  $\varphi$ 值随时间的增加而逐渐增大; 浸出中后期的100~350 h内, pH值维持在1~2之间,  $\varphi$ 值稳定在450 mV左右。 $\varphi$ 值的增加过程与pH值的降低过程基本同步。浸出液 $\varphi$ 值主要反应了溶液中 $Fe^{3+}$ 的含量<sup>[17]</sup>, 试验前期浸出液的pH值较高,  $Fe^{3+}$ 会发生水解沉淀, 因而 $\varphi$ 值低, 待pH值降低后,  $Fe^{3+}$ 水解沉淀影响逐渐消除,  $\varphi$ 值逐渐升高。

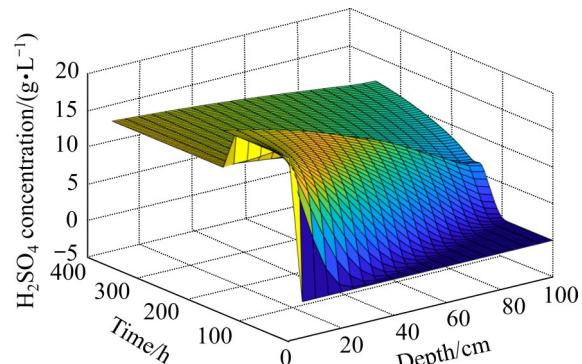


图1 浸出柱不同深度与不同时间硫酸浓度计算值

Fig. 1 Calculated sulfuric acid concentrations at different depths and time of leaching column

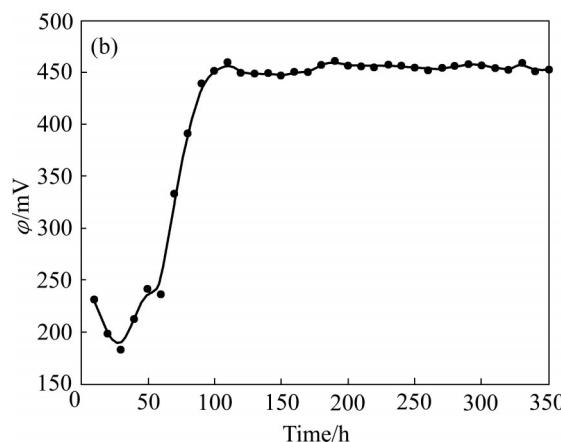
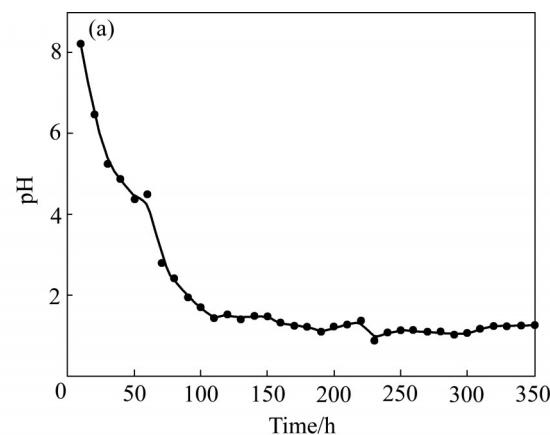


图2 柱浸试验中浸出液的pH值和 $\varphi$ 值随时间的变化

Fig. 2 Variations of pH and  $\varphi$  of leachate with time in experiment

模型计算得出的浸出柱不同深度与不同浸出时间的铀浓度如图3所示。由图3可知，随着浸出时间的增加，浸出液中铀浓度迅速出现峰值，随后浓度逐渐降低，出现较长的“拖尾”现象。这主要是因为前期铀矿石反应区比表面积大，溶浸液在铀矿石中扩散距离短，溶浸液与铀矿石反应速度快，单位时间内溶解的金属铀多，生成的铀浓度高；随着浸出时间延长，反应面逐渐向矿石颗粒内部移动，反应区面积逐渐减小且扩散距离逐渐增大，反应速度逐渐降低，单位时间内溶解的金属铀减少，生成的铀浓度持续降低。在浸出柱深度方向上，浸出初期，上部区域铀浓度高，下部区域铀浓度低，主要因为上部区域硫酸浓度高，铀矿石反应速度快；浸出中后期，随着溶浸液向下渗流，化学反应生成的铀浓度的峰值向下部区域移动，同时上部生成的铀溶液通过对流、弥散作用向下运移，二者叠加使浸出液中铀浓度峰值由浸出柱顶部向底部逐渐移动。

浸出柱深100 cm处浸出液铀浓度的计算值与试验值如图4所示。由图4可知，浸出液中铀浓度的模型计算值与试验值变化趋势相同，但具体数据有一定的差别。浸出前期，计算值大于试验值；浸出中期，试验值大于计算值；浸出后期，二者吻合较好。出现这种差异的主要原因是溶浸液pH值的变化。由图2可知，浸出前期，溶浸液pH值较高，溶液中部分铀离子发生水解沉淀，试验值小于计算值；浸出中期，随着溶浸液pH值降低，之前水解沉淀的铀会再次溶解释放，试验值大于计算值<sup>[19]</sup>；浸出后期，溶浸液pH值保持较低水平，铀离子水解沉淀的影响消除后，试验值与计算值吻合良好。

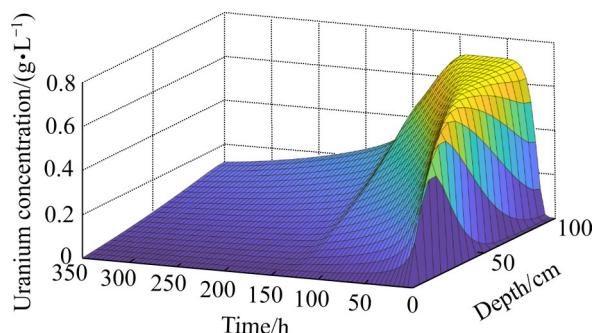


图3 浸出柱不同深度与不同时间铀浓度的计算值  
Fig. 3 Calculated uranium concentrations at different depths and time

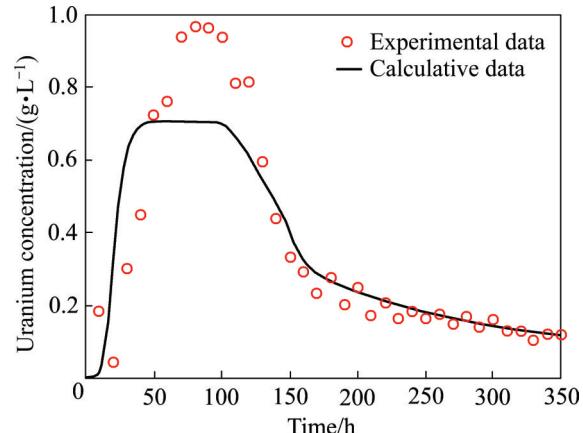


图4 浸出液中铀浓度的计算值与试验值的比较

Fig. 4 Comparison of calculated uranium concentrations with experimental ones in leachate

### 3.2 各粒级铀矿石浸出结果

浸出柱深50 cm和100 cm处各粒级铀矿石浸出率的模型计算结果如图5(a)、(b)所示。由图可知，矿石粒级越小反应越快，浸出周期越短，粒级越大反应越慢，浸出周期越长。当浸出柱中部和底部粒级为-0.5 mm、+0.5-1 mm和+1-2 mm的铀矿石浸出基本完成时，粒级为+6-8 mm和+8-9 mm的矿石的浸出率还不足50%。浸出柱深度越大，矿石反应开始的时间越晚，反应速率也越慢。浸出柱深50 cm处的矿石发生化学反应时间为第20 h，深100 cm处的矿石发生化学反应的时间为第80 h；浸出柱深100 cm处的矿石的浸出速率小于深度50 cm处的矿石的浸出速率，深50 cm处粒级为+8-9 cm的矿石的浸出率达到20%所需的时间为100 h，而深100 cm处同样粒级的矿石浸出率达到20%所需的时间为150 h。

浸出柱深100 cm处各粒级矿石的浸出率达到90%所需的时间的计算结果如表3所示。由表3可知，同一深度的矿石中，随着粒级的增大，达到90%的浸出率所需时间迅速增加。不同深度处粒级为+8-9 cm的矿石的浸出率达到90%所需时间的计算结果如表4所示。由表4可知，随着浸出柱深度的增加，粒级为+8-9 cm的矿石的浸出率达到90%所需的时间也逐渐增加。由此可见，在铀矿堆浸中，应合理控制破碎矿石的粒度及矿堆高度，同时应考虑浸出柱不同高度的矿石的浸出率，避免根据平均浸出率卸堆而造成铀资源的浪费。

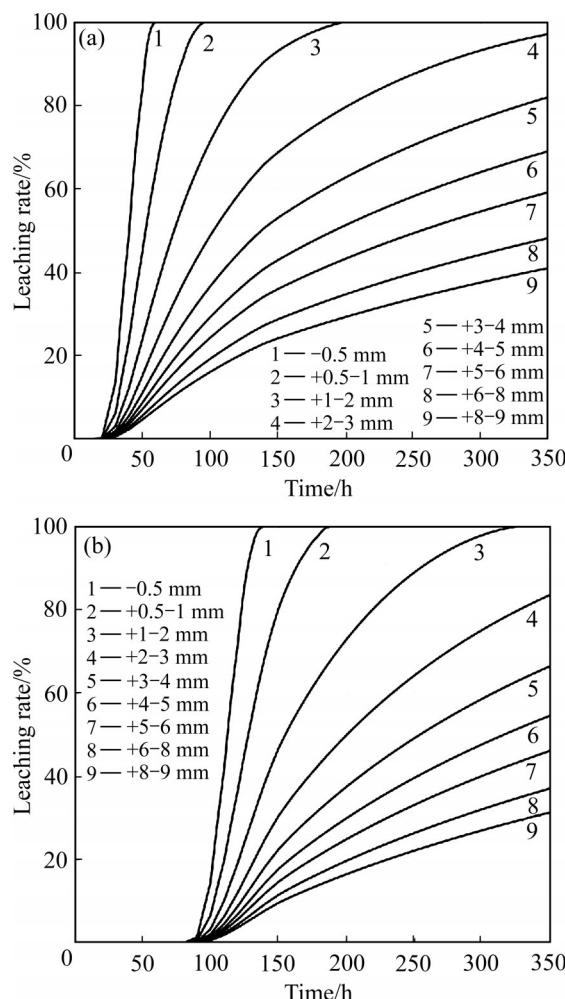


图5 浸出柱中部和底部各粒级铀矿石的计算浸出率

**Fig. 5** Calculated leaching rates of uranium for different size fractions of uranium ore at central position ( $z=50$  cm, (a)) and bottom position ( $z=100$  cm, (b)) within column

表3 浸出柱底部( $z=100$  cm)各粒级矿石的浸出率达到90%所需的时间

**Table 3** Time required for leaching rates reaching to 90% for uranium ore with various size fractions at bottom position ( $z=100$  cm)

Size/mm	Time/h
-0.5	121
+0.5-1	159
+1-2	246
+2-3	390
+3-4	593
+4-5	854
+5-6	1145
+6-8	1695
+8-9	2304

表4 浸出柱不同深度处粒级为+8-9 mm的铀矿石浸出率达到90%所需的时间

**Table 4** Time required for leaching rates reaching to 90% for uranium ore with +8-9 mm size fraction at different depths

Depth/cm	Time/h
50	2130
100	2304
150	2478
200	2681
250	2855
300	3037
350	3257
400	3414

浸出柱不同深度与不同浸出时间各粒级铀矿石未反应部分的粒径(平均直径)的计算结果如图6所示。由图6可知, 铀矿石浸出符合缩核反应模型, 即矿石浸出过程中, 溶浸液由外向内逐步推进, 在矿石内部形成一个不断缩小的岩核, 直到浸出结束。当浸出柱深度与浸出时间一定时, 随着被浸矿石粒级的增大, 溶浸液在矿石孔隙内扩散的效率降低, 未反应岩核的直径逐渐增大; 当浸出时间和矿石粒级一定时, 随着浸出柱深度的增加, 溶浸液浓度会降低, 与矿石反应的强度和速率减小, 未反应岩核的直径逐渐增大; 当矿石粒级和浸出柱深度一定时, 随着浸出时间的增加, 溶浸液逐渐被消耗, 硫酸浓度降低, 与矿石反应的速率减小, 未反应岩核的直径逐渐增大。由此可见, 浸出时间、矿石粒级和浸出柱深度是影响矿石未反应岩核大小的主要因素, 且各因素之间相互耦合, 共同决定浸出效果。

### 3.3 平均浸出率

铀矿石平均浸出率的计算值与试验值的比较如图7所示。由图7可知, 在浸出中后期, 整体浸出率的模型计算值与试验值基本吻合, 说明对流-弥散-反应耦合动力学模型能较好描述实际浸出过程中的各种物理化学反应。但浸出前期, 浸出率试验值小于计算值, 计算值与试验值的偏差主要是由前期溶浸液pH值过高导致铀离子发生水解沉淀而引起的。要消除这种差异, 可在计算模型中加入体现

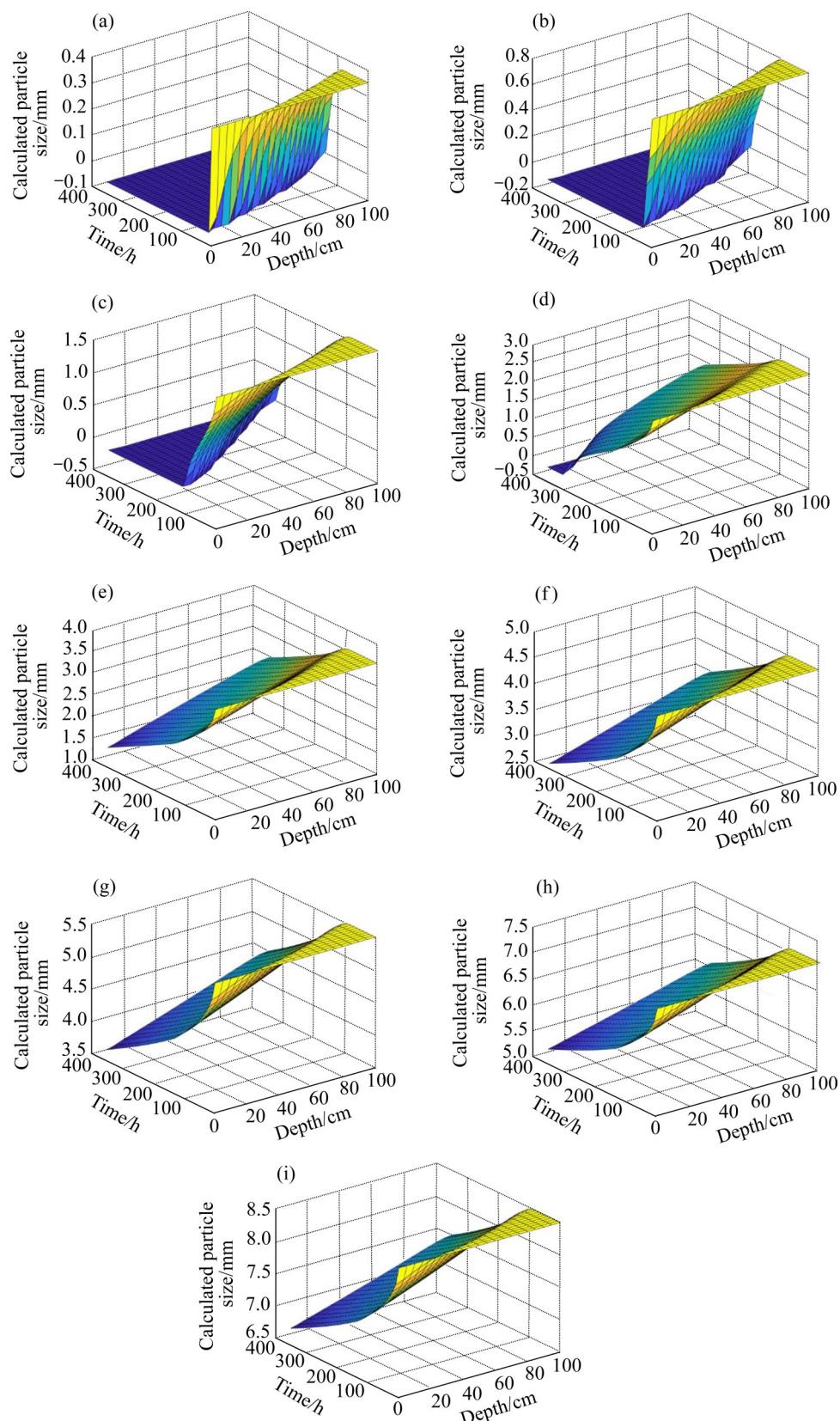


图6 浸出柱不同深度与不同时间各粒级铀矿石未反应部分粒径(平均直径)计算值

**Fig. 6** Calculated particle sizes (mean diameters) for unreacted portions of various particle size fractions of uranium ore at different depths and time: (a) -0.5 mm; (b) +0.5-1 mm; (c) +1-2 mm; (d) +2-3 mm; (e) +3-4 mm; (f) +4-5 mm; (g) +5-6 mm; (h) +6-8 mm; (i) +8-9 mm

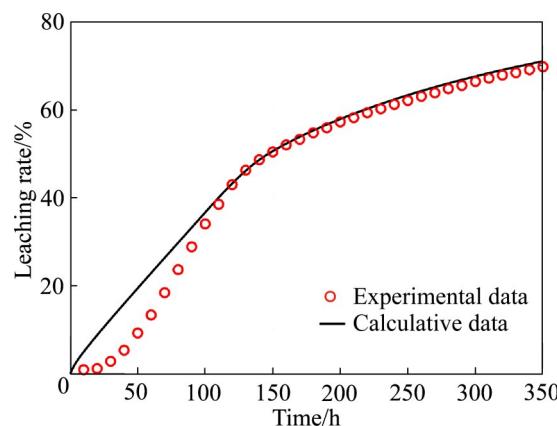


图7 平均浸出率的计算值与试验值比较

Fig. 7 Comparison of calculated average leaching rates with experimental ones

铀的水解沉淀和再溶解的数学表达式, 这是今后进行模型改进的重点。

## 4 结论

1) 根据矿堆各粒级铀矿石质量分数和孔隙率建立了全粒级铀矿堆浸的颗粒数计算模型, 结合单个矿石颗粒反应模型以及酸耗与浸出关系模型, 同时考虑矿堆多孔介质中溶质的对流、弥散和反应, 建立了铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型, 采用有限元法对该动力学模型进行解算, 并采用铀矿柱浸试验对解算结果进行了校验, 证明了该模型的可靠性和适用性。

2) 浸出柱不同深度及不同粒级的铀矿石的浸出具有不均匀性, 矿堆上部的矿石反应快, 下部的矿石反应慢, 小粒级矿石反应快, 大粒级矿石反应慢; 为了提高矿石浸出的均匀性和浸出率, 避免造成铀矿资源的浪费, 在实际生产中可采用所建立的铀矿堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型对矿堆高度及矿石粒度进行优化, 确定合理的工艺参数。

3) 浸出率计算值与试验值相比, 浸出中后期, 二者吻合度较高, 而浸出前期存在一定偏差, 要解决这一问题, 需深入研究溶液中铀离子的水解沉淀及再溶解与硫酸浓度的关系, 并将其与堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型进行耦合, 进一步提高模型的精确度。

## REFERENCES

- [1] 刘辉, 孟运生, 程浩, 等. 某铀矿石堆浸周期长的原因分析与应对措施[J]. 铀矿冶, 2020, 39(1): 21–26.  
LIU Hui, MENG Yun-sheng, CHENG Hao, et al. Cause analysis and countermeasures for long heap leaching period of uranium ore[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(1): 21–26.
- [2] 姚高辉, 吴爱祥, 王洪江. 堆浸体系中的多尺度效应与多过程耦合作用研究[J]. 金属矿山, 2010(4): 1–5, 40.  
YAO Gao-hui, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang. Investigation of multi-scale effect and multiple processes coupling in leaching system[J]. Metal Mine, 2010(4): 1–5, 40.
- [3] 吴爱祥, 刘金枝, 唐玲艳, 等. 堆浸工艺中流动-反应-变形-传质耦合过程数值模拟及应用[J]. 应用数学和力学, 2007, 28(3): 297–304.  
WU Ai-xiang, LIU Jin-zhi, TANG Ling-yan. Simulation of coupled flowing-reaction-deformation with mass transfer in heap leaching processes[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007(3): 297–304.
- [4] WANG X G, LIU Y J, SUN Z X, et al. Heap bioleaching of uranium from low-grade granite-type ore by mixed acidophilic microbes[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017, 314(1): 251–258.
- [5] 阙为民. 中国铀矿采冶技术新方向[J]. 中国核工业, 2017(11): 35–37.  
QUE Wei-min. New development direction of uranium mining and metallurgy technology in China[J]. China Nuclear Industry, 2017(11): 35–37.
- [6] 张立川, 刘林红, 梁新星, 等. 无人机影像采集与DSM/DEM模型在铜堆浸场的应用[J]. 云南冶金, 2019, 48(6): 82–88.  
ZHANG Li-chuan, LIU Lin-hong, LIANG Xin-xing, et al. Application of unmanned aerial vehicle image acquisition and DSM/DEM model on copper dump leaching[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(6): 82–88.
- [7] MELLADO M E, CISTERNAS L A, LUCAY F A, et al. A posteriori analysis of analytical models for heap leaching using uncertainty and global sensitivity analyses[J]. Minerals, 2018, 8(2): 44–59.
- [8] SALDAÑA M, GONZÁLEZ J, JELDRES R I, et al. A stochastic model approach for copper heap leaching through bayesian networks[J]. Metals, 2019, 9(11): 1198–1212.
- [9] VAN STADEN P J, PETERSEN J. First-order exchange and

- spherical diffusion models of heap leaching in PhreeqC[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118(7): 681–694.
- [10] MCBRIDE D, GEBHARDT J, CROFT N, et al. Heap leaching: Modelling and forecasting using CFD technology[J]. Minerals, 2018, 8(1): 9–28.
- [11] ORDÓÑEZ J, CONDORI A, MORENO L, et al. Heap leaching of caliche ore. modeling of a multicomponent system with particle size distribution[J]. Minerals, 2017, 7(10): 180–196.
- [12] YIN S H, WU A X, LI X W, et al. Mathematical model for coupled reactive flow and solute transport during heap bioleaching of copper sulfide[J]. Journal of Central South University, 2011, 18(5): 1434–1440.
- [13] 尹升华, 吴爱祥, 胡凯建, 等. 堆浸过程中溶质运移机制及影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 1092–1098.  
YIN Sheng-hua, WU Ai-xiang, HU Kai-jian, et al. Solute transportation mechanism of heap leaching and its influencing factors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(4): 1092–1098.
- [14] 吴爱祥, 刘金枝, 尹升华, 等. 细菌堆浸中流动-反应-传热耦合过程数值模拟分析[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(12): 1393–1400.  
WU Ai-xiang, LIU Jin-zhi, YIN Sheng-hua, et al. Analysis of coupled flow-reaction with heat transfer in heap bioleaching processes[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(12): 1393–1400.
- [15] 丁德馨, 刘玉龙, 李广悦, 等. 铀矿堆浸酸性尾渣中和的动力学特征及模型[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(5): 538–542.
- DING De-xin, LIU Yu-long, LI Guang-yue, et al. Dynamic characteristics and model for centralization reaction of acidic tailings from heap leaching of uranium ore[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(5): 538–542.
- [16] 刘玉龙, 李广悦, 王有团, 等. 铀矿石酸化-细菌柱浸的动力学分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 227–234.  
LIU Yu-long, LI Guang-yue, WANG You-tuan, et al. Kinetic analysis of uranium ore in acidification and bacteria column leaching[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(2): 227–234.
- [17] DING D X, FU H Y, YE Y J, et al. A fractal kinetic model for heap leaching of uranium ore with fractal dimension of varied particle size distribution[J]. Hydrometallurgy, 2013, 136: 85–92.
- [18] DING D X, SONG J B, YE Y J, et al. A kinetic model for heap leaching of uranium ore considering variation of model parameters with depth of heap[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 298(3): 1477–1482.
- [19] 扶海鹰, 丁德馨, 叶勇军, 等. 铀矿浸出试验柱不同高度上铀金属浸出的规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1766–1771.  
FU Hai-ying, DING De-xin, YE Yong-jun, et al. Regularities for uranium leaching rate at different heights of column for leaching uranium from uranium ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 1766–1771.
- [20] 宋健斌, 丁德馨, 叶勇军, 等. 铀矿堆浸分形动力学模型[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(4): 598–603.  
SONG Jian-bin, DING De-xin, YE Yong-jun, et al. Fractal kinetic model for heap leaching of uranium ore[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(4): 598–603.

## Convection-diffusion-reaction coupling dynamic model for uranium ore heap leaching

LIU Yu-long<sup>1,2</sup>, FU Hai-ying<sup>1</sup>, YE Yong-jun<sup>1</sup>, HU Nan<sup>1</sup>, LI Guang-yue<sup>1</sup>, DING De-xin<sup>1</sup>

(1. Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy,  
University of South China, Hengyang 421001, China;

2. China General Nuclear Power Group (CGN)Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China)

**Abstract:** The leaching of uranium in the process of uranium ore heap leaching is the result of the coupling of convection, diffusion and chemical reaction of leaching solution in porous media. In this paper, the convection, dispersion and reaction coupling dynamic model for uranium heap leaching was firstly established by theoretical analysis and mathematical modeling, the dynamic model was then solved by finite element method, and the solution results were finally verified by uranium heap leaching test. The results show that the established convection-diffusion-reaction coupling kinetic model for uranium ore heap leaching can reflect the changes of the main characteristic variables in the column leaching, characterize the concentrations of leaching solution and metal uranium at different depths of the leach column, the leaching rate of each fraction of uranium ore particle size, and the distribution of shrinkage nucleation for each fraction of uranium ore particle size at different time, and it can accurately predict the leaching rate of uranium in the ore column. It is concluded that the convection-diffusion-reaction coupling kinetic model for uranium ore heap leaching can be used to predict the leaching rate of uranium and regulate the process parameters for heap leaching.

**Key words:** uranium ore heap leaching; convection; diffusion; reaction; coupling dynamic model; column leaching

---

**Foundation item:** Project(10975071) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2021-05-26; **Accepted date:** 2021-05-11

**Corresponding author:** DING De-xin; Tel: +86-734-8282534; E-mail: dingdxzzz@163.com

(编辑 龙怀中)