#### DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39718

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, DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39718

LIU Yu-long, FU Hai-ying, YE Yong-jun. A convection-diffusion-reaction coupling dynamic model for uranium ore heap leaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39718



# 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,湖南 衡阳,421001;2.中广核铀业发展有限公司,北京,100029)

**摘要:**铀矿堆浸目的金属的浸出是溶质的对流、弥散以及化学反应耦合作用的结果。本文采 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,采用有限元 法对模型进行了解算,再采用铀矿柱浸试验对解算结果进行了验证。结果表明:建立的铀矿 堆浸对流-弥散-反应耦合动力学模型能反映柱浸中的主要物理、化学过程,能模拟柱浸过程 中硫酸和铀的浓度分布,能确定浸出柱不同深度处不同粒级铀矿石浸出率随时间的变化规律, 能预测铀的浸出率。因此,此对流-弥散-反应耦合动力学模型可以用于铀矿堆浸工艺参数的 优化调控。

关键词: 铀矿堆浸; 对流; 弥散; 反应; 耦合动力学模型; 柱浸

中图分类号: TD958 文献标识码: A 文章编号:

# A 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>

收稿日期:

**基金项目**:国家自然科学基金项目(10975071)

作者简介:刘玉龙(1983-),男,陕西延安人,高级工程师,博士研究生,主要从事铀矿采冶和生物冶金研究。

**通讯作者:** 丁德馨(1958-),男,湖南常德人,博士,教授,博士生导师,主要从事铀矿冶生物技术研究,电话: 0734-8282534; E-mail: <u>dingdxzzz@163.com</u>。

(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 target metal in uranium ore heap leaching is the result from the coupling of solute convection, dispersion and chemical reaction. This paper established a convection-diffusion-reaction coupling dynamic model for uranium ore heap leaching by using theoretical analysis and mathematical modeling, solved the model by using finite element method, and verified the modeled results by using uranium ore column leaching. The results showed that the model could reflect the main physical and chemical processes in the uranium ore column leaching, simulate sulfuric acid and uranium distributions within the column, determine the variation rules of the leaching rates of various size fractions of uranium ore at different depths within the column, and predict the leaching rate for the column. Therefore, the model can be used to adjust and control the process parameters for the uranium ore heap leaching.

Keyword: Uranium ore heap leaching; Convection: Diffusion; Reaction; Coupling dynamic model; Column leaching;

堆浸具有基建投资少、工艺简单、生产成本低等优点,被广泛用于我国低品 位铀矿资源的开发<sup>[1-3]</sup>。虽然近年来堆浸在天然铀生产中使用的比例随着南方部 分硬岩铀矿山的关停而有所下降,但它作为一种成熟、可靠的技术,在未来我国 硬岩铀矿资源的开发中仍然具有很大的应用潜力。因此,有必要根据发展数字化 堆浸技术的需要,对铀矿堆浸中的物理、化学过程进行深入研究,建立动力学模 型,开展铀矿堆浸行为的实时数值模拟,对铀矿堆浸工艺参数进行优化调控<sup>[4-6]</sup>。

关于堆浸动力学模型及数值模拟,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>。我们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,根据单元体溶质质量守恒建立的单一粒级铀矿石柱浸动力学模型,较好地模拟了单一粒级铀矿石柱浸不同深度处铀金属浸出的规律<sup>[19]</sup>。但这一模型既没有考虑堆浸铀矿石是由不同粒级矿石颗粒组成的集合体的实际情况,又没有考虑矿堆中溶质的对流、弥散、反应等物

理、化学过程。本文拟在单个铀矿石颗粒反应模型的基础上,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,以模拟铀 矿堆浸的行为、调控铀矿堆浸的工艺参数。

### 1 模型建立

#### 1.1 单个矿石颗粒反应模型

在先前的研究中,根据矿石颗粒反应速率与反应面的面积以及反应面上溶浸剂(硫酸)浓度呈正比的关系,建立了铀矿堆浸单个矿石颗粒的如下反应模型<sup>[19]</sup>:

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi\rho r^2 \frac{dr}{dt} = -k_1 A C_s = -4\pi k_1 r^2 C_s \tag{1}$$

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; *p*为 未反应矿石颗粒的密度; *k*<sub>1</sub>为浸出反应的速率常数; *A*为反应面面积; *C<sub>s</sub>*为反应 面上的硫酸浓度; 负号表示矿石未反应部分减小。

而反应面上的硫酸浓度Cs可表示为[19]:

$$C_s = C \left[ 1 + \frac{bk_1}{Df} \times \frac{r}{r_0} (r_0 - r) \right]^{-1}$$
(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*<sub>0</sub>为矿石初始半径。

将(2)式代入(1)式并进行简化,可得单个矿石颗粒的反应模型:

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

#### 1.2 粒级平均粒径

堆浸矿石一般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。因此,在模型计算时,可以采用多个粒级 以及各粒级的矿石重量占比来表示全部矿石,并采用一个中间数来表示一个粒级 内颗粒的平均粒径。假设将矿石筛分为I个粒级,用编号i表示粒级数,用r<sub>io</sub>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,即如式(4)所示:

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

简化得:

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

式中: r<sub>imin</sub>表示该粒级最小颗粒半径, r<sub>imax</sub>表示该粒级最大颗粒半径。

#### 1.3 矿石颗粒数

对于由若干粒级矿石颗粒组成的集合体,可设其空隙率为n,代表颗粒与颗粒之间的空隙,则有:

$$n = \frac{V_n}{V_s} \tag{6}$$

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

式中: *V<sub>n</sub>为矿堆空隙的体积*; *V<sub>s</sub>为矿堆总体积*; *I*表示粒级总数; *M<sub>i</sub>为第i粒级矿*石颗粒的总数; *V<sub>i0.m</sub>为第i粒级矿*石单个颗粒的平均体积。

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<sub>i</sub>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:

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

#### 1.4 酸耗与浸出

假设一种理想的情况:铀矿石中铀金属分布均匀,且单位质量矿石消耗硫酸的量相等,而铀矿石的反应全部是通过消耗硫酸来进行。因此,堆浸中硫酸的消耗速度与矿石的反应速度成正比<sup>[19]</sup>。可得:

$$\frac{d(V_S\theta C_{1i})}{dt} = k_2 M_i \frac{dQ_i}{dt} \tag{10}$$

式中: θ为矿堆含水率; C<sub>1i</sub>表示第*i* 粒级矿石消耗的硫酸浓度; k<sub>2</sub>为矿石酸耗比 (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:

$$\frac{dC_{1i}}{dt} = -\frac{k_1 k_2 M_i \cdot 4\pi r_i^2 \cdot C_s}{V_S \theta} \qquad (11)$$

反应消耗硫酸的同时会浸出铀, 且铀的浸出速度与矿石的反应速度成正比, 则有:

$$\frac{dC_{2i}}{dt} = \frac{k_1 G M_i \cdot 4\pi r_i^2 \cdot C_s}{V_S \theta}$$
(12)

式中: C2i表示第i粒级矿石反应生成的铀浓度; C2表示铀浓度; 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 $\alpha_i$ 可用下式表示:

$$\alpha_i = [1 - (\frac{r_i}{r_0})^3] \times 100\%$$
(13)

### 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、弥散等物理过程<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,建立铀矿堆浸中铀金属浸出的对流-弥散-反应耦合动力学模型。 模型如下:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_1}{\partial z} + \sum_{i=1}^{I} \frac{\partial C_{1i}}{\partial t}$$
(14)

初始条件:

$$C_1 = 0; (z \ge 0, t = 0)$$

边界条件:

$$C_{1} = C_{0}; (z = 0, t \ge 0)$$

$$\frac{\partial C_{1}}{\partial z} = 0; \quad (z = H, t \ge 0)$$

$$\frac{\partial C_{2}}{\partial t} = D_{1} \frac{\partial^{2} C_{2}}{\partial z^{2}} - v \frac{\partial C_{2}}{\partial z} + \sum_{i=1}^{I} \frac{d C_{2i}}{dt} \qquad (15)$$

初始条件:

$$C_2 = 0; (z \ge 0, t = 0)$$

边界条件:

$$C_{2} = 0; (z = 0, t \ge 0)$$

$$\frac{\partial C_{2}}{\partial z} = 0; (z = H, t \ge 0)$$

$$\frac{dr_{i}}{dt} = -\frac{k_{1}C_{1}}{\rho} \times [1 + \frac{bk_{1}}{D_{2}f} \times \frac{r_{i}}{r_{i_{0}}} (r_{i0} - r_{i})]^{-1}; (i = 1, 2 \dots ... I)$$
(16)

初始条件:

$$r_i = r_{i_0}; \ (z \ge 0, t = 0)$$

边界条件:

$$\frac{\partial r_i}{\partial z} = 0; (z = 0, t \ge 0)$$
$$\frac{\partial r_i}{\partial z} = 0; (z = H, t \ge 0)$$

式中: *C*<sub>1</sub>表示硫酸浓度; *C*<sub>0</sub>表示溶浸液中初始硫酸浓度; *C*<sub>2</sub>表示铀浓度; *r*<sub>i</sub>表示 第*i*粒级矿石未反应部分的半径; *D*<sub>1</sub>表示溶液中溶质弥散系数; *v*表示渗流速度; *z*表示矿堆深度,矿堆表面*z*为0,向下为正。

#### 2 铀矿柱浸试验

为检验对流-弥散-反应耦合动力学模型的适用性,采用我国某铀矿山的铀矿 石进行实验室柱浸试验。矿石首先通过颚式破碎机破碎至-9 mm,再分别用 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、8 mm 的筛子进行筛分,将矿 石筛分为9个粒级: -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。再采用 9 个粒级的矿石配制试验样品,本 试验考虑一种均匀分布的情况,矿石级配如表 1 所示,共计约 10 kg。将其混匀 后装柱进行柱浸试验,装柱高度为 1 m,柱管内径为 8.8 cm。矿石平均铀品位 0.177%。采用硫酸作为溶浸剂从顶部布液,溶浸液初始硫酸浓度为 20 g/L,再根 据浸出液 pH 值的变化调整硫酸浓度,使后期 pH 值保持在 1~2 之间。浸出共进 行 350 h,前 130 h 溶浸液硫酸浓度为 20 g/L,131~350 h 溶浸液硫酸浓度为 15 g/L。 每 10 小时取浸出液分析其 pH、Eh 和铀浓度。

表1 试验铀矿石的级配

粒级	-0.5	0.5~-1	1~-2	2~-3	3~-4	4~-5	5~-6	6~-8	8~-9	会计
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
重量, kg	0.556	0.556	1.111	1.111	1.111	1.111	1.111	2.222	1.111	10.000

Table 1 Size fraction composition of the uranium ore for experiment

#### 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)耦合模型进行数值解算,模型计算所用参数赋值如表 2 所示。

#### 表 2 模型参数赋值

#### Table 2 Values of model parameters

符号	参数名称	单位	取值
b	反应计量系数	-	1
$k_1$	反应常数	cm/h	3.9
D	矿石中溶质扩散系数	cm <sup>2</sup> /h	0.065
$D_1$	溶液中溶质弥散系数	cm <sup>2</sup> /h	25
v	渗流速度	cm/h	4.4
f	矿石孔隙度	-	0.024
n	矿堆空隙率	-	0.405
θ	矿堆含水率	-	0.350
G	矿石品位	-	0.177%
$k_2$	酸耗比	g/g	0.05
ρ	矿石密度	g/cm <sup>3</sup>	2.76

### 3.1 硫酸浓度与铀浓度

通过模型计算得到铀矿柱浸不同时间不同深度处的硫酸浓度如图1所示,通 过柱浸试验得到浸出液 pH 值和 Eh 值随时间的变化如图2所示。由图1可看出, 随着硫酸从顶部加入,柱子上部区域的硫酸浓度迅速升高,而随着深度增加,硫 酸与矿石发生反应逐渐消耗,柱子底部区域硫酸浓度很低,趋于0;随着时间增 加,加入的硫酸的量增多,而耗酸物质逐渐减少,底部区域硫酸浓度逐渐增加。 图2的试验数据反映了相同的规律,开始时浸出液 pH 为中性,然后随时间增加 逐渐降低,最后维持在1~2之间。此外,浸出液 Eh 值开始时较低,而后逐渐增 大至 450mV 左右,且 Eh 值的增加过程与 pH 值的降低过程基本同步。浸出液 Eh 值主要反应了溶液中 Fe<sup>3+</sup>含量<sup>[17]</sup>,试验前期浸出液 pH 值较高,Fe<sup>3+</sup>会发生水 解沉淀,因而 Eh 值低,待 pH 值降低后,Fe<sup>3+</sup>水解沉淀影响逐渐消除,Eh 值逐 渐升高。



图 1 不同时间不同深度处的计算硫酸浓度

Fig.1 Calculated sulfuric acid concentrations at different time and depth



图 2 试验中浸出液的 pH 值和 Eh 值随时间的变化

Fig.2 Variations of pH and Eh of leachate with time in the experiment

此外,通过模型计算可得铀矿柱浸试验中不同时间不同深度处的铀浓度如图 3 所示。由图可知,随着时间的增加,铀浓度先迅速增大后迅速减小,然后保持 较低浓度缓慢降低。这主要是因为前期矿石反应区面积大,且溶质在矿石中扩散 距离短,因此反应速度快,生成铀浓度高;而随着时间增加,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。 另一方面,在深度方向上,开始时上部区域铀浓度高,下部区域铀浓度低,这主 要是因为上部区域硫酸浓度高,铀矿石反应快。但很快铀浓度峰值向下部区域移 动,最终铀浓度峰值达到最底部,这是由于上部生成的铀通过对流、弥散作用向 下运移,最终浓度峰值运移至底部。取图 3 中底部位置处(深度z为 100cm)铀 浓度剖面曲线图与柱浸试验测得底部浸出液中铀浓度图进行比较,结果如图 4 所示。由图可看出,模型计算值与试验值铀浓度变化趋势相同,但具体数字有一 定的差别。在试验前期,计算值大于试验值,而试验中期试验值大于计算值。造 成这种差别的原因是溶液的 pH 值,由图 2 中可知前期浸出液 pH 值较高,趋于 中性,在较高 pH 值条件下,溶液中的部分铀离子会发生水解沉淀,因而试验值 会小于计算值,随着浸出液 pH 值降低,之前水解沉淀的铀会再次溶解释放,因 而导致中期试验值大于计算值<sup>[19]</sup>。后期浸出液 pH 值保持较低水平,铀离子水解 沉淀的影响消除后,试验值与计算值能很好地吻合。





Fig.3 Calculated uranium concentrations at different time and depth



图 4 浸出液中铀浓度的模型值与试验值的比较

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

#### 3.2 各粒级铀矿石浸出结果

对于本试验,采用模型计算出的柱子中部位置(深度z为 50cm)以及底部位 置(深度z为 100cm)各粒级铀矿石的浸出率如图 5 所示。由图可知,矿石粒级 越小反应越快,反之,矿石粒级越大反应越慢。且柱子中部位置和底部位置的各 粒级矿石中,当粒级为-0.5 mm、0.5~-1 mm、1~-2 mm 的铀矿石浸出基本完成时, 粒级为 6~-8 mm 和 8~-9 mm 的矿石浸出率还不足 50%。另一方面,矿堆深度越 大,矿石反应开始的时间越晚,且反应速率也越慢。在本次计算深度和时间范围 内,深度 50 cm 处的矿石在第 20 小时左右开始反应,而深度 100 cm 处的矿石在 第 80 小时左右才开始反应;且深度 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,如深度 50 cm 处的粒级为 8~-9 cm 的矿石达到 20%的浸出 率所用时间约为 100 h,而深度 100 cm 处的同样粒级的矿石达到 20%的浸出率所 用时间约为 150 h。

通过进一步计算得到深度 100 cm 处各粒级矿石的浸出率达到 90%所需时间 如表 3 所示;得到的不同深度处粒级为 8~-9 cm 的矿石达到 90%的浸出率所需时 间如表 4 所示。由表 3 可知同一深度矿石中,随着粒级增大,达到 90%的浸出率 所需时间迅速增加;由表 4 可知随着深度增加,粒级为 8~-9 cm 的矿石达到 90%

的浸出率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,否则根据平均浸出率卸堆易造成铀资源的浪费。图6为不 同时间不同深度处各粒级铀矿石未反应部分粒径(平均直径)的计算图,可直观 地反映不同时间、不同深度、不同粒级铀矿石的反应情况。因此,通过模型计算 可实时了解铀矿堆浸矿堆中矿石颗粒的整体反应情况。



图 5 柱子中部(A, *z* = 50 *cm*)和底部(B, *z* = 100 *cm*)各粒级铀矿石的计算浸出率 Fig.5 Calculated uranium leach rates for different size fractions of uranium ore at the central position (A, *z* = 50 *cm*) and the bottom position (B, *z* = 100 *cm*) within the column

表3 柱子底部(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 the leaching rates of various size fractions of uranium ore at the bottom

position(2 - 100  cm) to reach yo/0										
粒级	-0.5	0.5~-1	1~-2	2~-3	3~-4	4~-5	5~-6	6~-8	8~-9	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
时间,h	121	159	246	390	593	854	1145	1695	2304	

position (z = 100 cm) to reach 90%

表 4 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 the leaching rates of 8~-9 mm size fraction of uranium ore at different

depths to reach 90%

深度, cm	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm	350 cm	400 cm

时间, h	2130	2304	2478	2681	2855	3037	3257	3414
-------	------	------	------	------	------	------	------	------



图 6 不同时间不同深度处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 time and depth

#### 3.3 平均浸出率

本次试验条件下铀矿石平均浸出率的模型值与试验值的比较如图 7 所示。由 图可知,在试验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基本体现实际浸出中的各种物理化学反应过程。但试 验前期计算数据与试验数据存在一定的偏差,前期浸出率试验值小于计算值,如 前所述,这主要是由试验前期浸出液 pH 值过高导致铀离子发生水解沉淀而引起。 要消除这种差异,可在计算模型中加入体现铀的水解沉淀和再溶解过程的数学表 达式,这是今后进行模型改进研究的重点。



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

## 4、结论

(1)根据各粒级铀矿石的重量分数和矿堆的空隙率建立了全粒级铀矿堆浸 矿堆的颗粒数计算模型,结合之前建立的单个矿石颗粒反应模型以及酸耗与浸出 关系模型,再考虑矿堆多孔介质中溶质的对流、弥散作用,建立了铀矿堆浸对流 -弥散-反应耦合动力学模型,并采用铀矿柱浸试验对模型计算结果进行验证,结 果表明模型具有较好的可靠性和适用性。

(2) 矿堆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 提高浸出的均匀性,避免造成铀矿资源的浪费,应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最大粒度进行优化。

(3)模型计算结果与试验结果相比,在试验前期存在一定偏差,要解决这一问题,须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 堆浸中的对流、弥散、反应相耦合,这也是下一步需要继续研究的问题。

#### 参考文献

[1] 刘辉, 孟运生, 程浩, 张静敏, 郑英. 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(01): 21-26.

LIU Hui, MENG Yun-sheng, CHENG Hao, ZHANG Jing-min, ZHENG Ying. Cause analysis and countermeasures for long heap leaching period of uranium ore[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(01):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(04): 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(04):1-5+40.
- [3] 吴爱祥,刘金枝,唐玲艳. 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(03): 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(03):297-304.

- [4] WANG X G, LIU Y J, SUN Z X, LI J, CHAI L Y, MIN X B, GUO Y D, LI P, ZHOU Z K. 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,赵声贵,吴程赟,盛汝国. 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(06): 82-88.
  ZHANG Li-chuan, LIU Lin-hong, LIANG Xin-xing, ZHAO Sheng-gui, WU Cheng-yun, SHENG Ru-guo. Application of unmanned aerial vehicle image acquisition and DSM/DEM model on copper dump leaching[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(06):82-88.
- [7] MELLADO M E, LUCAY F A, CISTERNAS L A, GÁLVEZ E D, SEPÚLVEDA F D. 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, VILLEGAS Á, CASTILLO J, QUEZADA G, TORO N. 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, CROSS M. Heap leaching: modelling and forecasting using CFD technology[J]. Minerals, 2018, 8(1): 9-28.
- [11] ORDÓÑEZ J I, CONDORI A, MORENO L, CISTERNAS L A. 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, WANG Y M. Mathematical model for coupled reactive flow and solute transport during heap bioleaching of copper sulfide[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1434-1440.
- [13] 尹升华,吴爱祥,胡凯建,王洪江. 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(04): 1092-1098.
  YIN Sheng-hua, WU Ai-xiang, HU Kai-jian, WANG Hong-jiang. Solute transportation mechanism of heap leaching and its influencing factors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011,42(04):1092-1098.
- [14] 吴爱祥,刘金枝,尹升华,王洪江. 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, WANG Hong-jiang. 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, 王有团. 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(05): 538-542.
  DING De-xin, LIU Yu-long, LI Guang-yue, WANG You-tuan. Dynamic characteristics and model for centralization reaction of acidic tailings from heap leaching of uranium ore[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(05):538-542.

- [16] 刘玉龙,李广悦,王有团,胡南,喻清,马亮,丁德馨. 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(02): 227-234.
  LIU Yu-long, LI Guang-yue, WANG You-tuan, HU Nan, YU Qing, MA Liang, DING De-xin. Kinetic analysis of uranium ore in acidification and bacteria column leaching[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(02):227-234.
- [17] DING D X, FU H Y, YE Y J, HU N, LI G Y, SONG J B, WANG Y D. 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, LI G Y, FU H Y, HU N, WANG Y D. 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,李广悦,宋键斌,胡南,王永东.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(06): 1766-1771.

FU Hai-ying, DING De-xin, YE Yong-jun, LI Guang-yue, SONG Jian-bin, HU Nan, WANG Yong-dong. 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(06):1766-1771.

[20] 宋键斌,丁德馨,叶勇军,李广悦,扶海鹰,胡南,王永东. 铀矿堆浸分形动力学模型[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(04): 598-603.
SONG Jian-bin, DING De-xin, YE Yong-jun, LI Guang-yue, FU Hai-ying, HU Nan, WANG Yong-dong. Fractal kinetic model for heap leaching of uranium ore[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(04):598-603.