

DOI: 10.11779/CJGE201411014

# 堆浸铀矿堆水力学特征参数的试验与反演研究

叶勇军<sup>1,2</sup>, 丁德馨<sup>1\*</sup>, 赵娅利<sup>2</sup>, 李广悦<sup>1</sup>, 江湖一佳<sup>2</sup>, 范楠彬<sup>2</sup>, 王立恒<sup>2</sup>

(1. 铀矿冶生物技术国防重点学科试验室(南华大学), 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学环境工程与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 为了掌握堆浸铀矿堆非饱和区的水力学特性, 根据多孔介质的液体流动控制方程和描述水力学性质的 van Genuchten 模型, 阐述了堆浸铀矿堆水力学特征参数的数值反演模型。接着, 选用来自某铀矿山新堆浸场分形维数  $D=1.8$  的铀矿石样, 利用自制的一维液体非饱和渗流试验装置, 测定了不同喷淋强度下试验柱底部的累计排水量和 5 个不同高度矿样内的含水率。最后, 利用 HYDRUS-1D 软件获得了试验样本在注水期间和排水期间的水力学特征参数。结果表明: ①数值反演方法确定的水力学特征参数能很好地与实际情况相匹配, 参数估算结果可用于工程实际; ②注水期间和排水期间需要分别确定对应的水力学特征参数; ③注水期间反演估算获得的堆浸铀矿堆饱和渗透系数比排水期间的更接近饱和渗流试验获得的结果。

**关键词:** 堆浸; 铀矿石; 饱和-非饱和; 水力学特征参数; 数值反演方法

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2014)11-2078-08

**作者简介:** 叶勇军(1979-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事铀矿安全开采技术的研究。E-mail: yongjunye@163.com。

## Experiments and inverse methods for hydraulic characteristic parameters of uranium ore heaps using heap leaching technology

YE Yong-jun<sup>1,2</sup>, DING De-xin<sup>1</sup>, ZHAO Ya-li<sup>2</sup>, LI Guang-yue<sup>1</sup>, JIANG Hu-yi-jia<sup>2</sup>, FAN Nan-bin<sup>2</sup>, WANG Li-heng<sup>2</sup>

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

China, Hengyang 421001, China; 2. School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang  
421001, China)

**Abstract:** In order to understand the hydraulic characteristics of the unsaturated zone in uranium ore heaps using heap leaching technology, a numerical inverse model is established according to the fluid flow control equation for porous medium and van Genuchten model describing hydraulic properties. Then, the self-designed experimental devices consisting of a column for one-dimensional unsaturated flow of liquid are fabricated and used to measure the accumulative flux at the bottom of the column through the uranium ore with the fractal dimension of 1.8 from a uranium ore heap using heap leaching technology and the water moisture of ore samples at 5 different heights of the column. The hydraulic characteristic parameters in the water flooding period and the drainage period are obtained using HYDRUS-1D. The results show that the hydraulic characteristic parameters determined by the numerical inverse method are in good agreement with the actual situations, and the estimated parameters can be applied to the engineering practice. The hydraulic characteristic parameters in the water flooding period and the drainage period should be determined, respectively. The saturated permeability coefficient of the uranium ore heap for heap leaching obtained by inverse modeling in the water flooding period is more close to the result obtained by the saturated seepage experiments than that in drainage period.

**Key words:** heap leaching; uranium ore heap; saturated-unsaturated flow; hydraulic characteristic parameters; numerical inverse method

## 0 引言

中国面临着能源需求的急剧增长, 核能作为清洁能源已成为扩大发电量的最优之选。铀金属作为核电原料, 其需求量将会不断增加。堆浸技术作为提取低品位矿物的生产工艺已在铜、金、银和铀矿等得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>, 目前, 铀矿地表堆浸是中国天然铀生产的

主体技术<sup>[5]</sup>。铀矿堆浸的工艺过程是将配制好的溶浸液按照事先设定的喷淋强度喷洒到预先堆置好的铀矿石堆表面上, 溶浸液一边在矿堆内进行非饱和(或饱

基金项目: 国家自然科学基金项目(10975071)

收稿日期: 2013-12-13

\*通讯作者

和) 渗流流动, 一边选择性地浸出矿石颗粒表面或内的铀金属, 并使之以离子或络合物的形式转入溶液中, 它是一个典型的带有化学反应的流动过程。研究表明<sup>[2-3]</sup>, 矿堆的渗透特性对浸出效果有重要影响, 因此, 掌握堆浸铀矿堆内液体饱和-非饱和渗流规律对指导筑堆方式、矿石粒径级配等具有重要的意义。

由于堆浸铀矿堆是由经过机械破碎、粒径大小不一且分布区间较大的矿石经过人工堆积而成的, 堆内矿石的粒径分布和堆的孔隙结构分布具有空间变异性, 而且随着浸出反应的进行还存在时空变异性, 因此, 采用直接试验的方法确定堆浸铀矿堆的非饱和渗流特征参数是非常困难。目前国内外对多孔介质饱和-非饱和区的水力学参数的研究多集中在土壤、沙子及黏土等常见的细颗粒物堆积形成的多孔介质<sup>[6-11]</sup>, 对堆浸铀矿堆这种颗粒尺度较大、粒径分布不均匀的孔隙介质多集中在其饱和渗透特性的研究上, 而对其内液体非饱和渗透特性的研究较少。数值反演法能较好的解决试验测试点的误差以及空间的变异性, 其作为间接方法在土壤等孔隙介质的水力学参数确定方面已经得到了广泛应用<sup>[12-20]</sup>。为了掌握堆浸铀矿堆内非饱和区中的液体渗流规律, 本文设计并制作了堆浸铀矿堆水力学特征参数反演模拟试验装置, 采用 HYDRUS-1D 软件对 van Genuchten 函数<sup>[15]</sup>所描述的水力学特征参数进行了研究。

## 1 多孔介质水力学特征参数的数值反演理论

### 1.1 多孔介质的水运动方程

假设堆浸铀矿石为均质、各向同性的多孔介质。忽略矿石中气体和温度变化对水分运动的影响, 饱和-非饱和介质内的水分运动可用 Richards 方程描述。在一维垂直流的情况下, 如坐标向上为正, 则 Richards 方程可表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( 1 - \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

式中  $\theta$  为体积含水率;  $h$  为压力水头值 (cm);  $z$  为矿堆高度坐标 (cm), 以矿堆底面为参照面, 向上为正;  $K(\theta)$  为非饱和渗透系数 (cm/min)。

方程(1)中有 2 个变量, 当用一个变量  $\theta$  表示时, 则一维矿堆内的非饱和渗流方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

式中,  $D(\theta)$  为扩散系数或毛细管扩散系数 (m<sup>2</sup>/s)。

当喷淋强度为  $q$ , 矿石柱高为  $L$ , 则喷淋过程柱内水分运动的初始条件为

$$\begin{cases} \theta = \theta_0 & (t = 0; 0 < z \leq L) \\ -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = q & (t \geq 0; z = L) \end{cases} \quad (3)$$

或

$$\begin{cases} D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = q & (t \geq 0; z = L) \\ \theta = \theta_s & (t \geq 0; z = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $q$  为喷淋强度 (m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)),  $L$  为矿石柱高度 (m),  $\theta_0$  为堆内初始体积含水率,  $\theta_s$  为饱和体积含水率。

当喷淋时间足够长, 堆内体积含水率分布均匀且为  $\theta_1$ 。当停止喷淋时, 堆表面喷淋强度为 0, 则停止喷淋时柱内水分运动的初始条件为

$$\begin{cases} \theta = \theta_1 & (t = 0; 0 < z \leq L) \\ -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = q & (t \geq 0; z = L) \end{cases} \quad (5)$$

或

$$\begin{cases} D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = q & (t \geq 0; z = L) \\ \theta = \theta_s & (t \geq 0, z = 0) \end{cases} \quad (6)$$

为了在非饱和带接近饱和的区域构造的水力学参数模型保持函数连贯性和特征曲线具有光滑性, 在描述多孔介质的水力学性质一般采用 Van Genuchten 模型<sup>[15-18]</sup>。

(1) 压力水头与含水率之间的关系式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} + \theta_r & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $m$ ,  $\theta_r$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\alpha$  是多孔介质水分曲线参数, 其中  $\theta_r$  为残余体积含水率,  $m=1-1/n$  ( $n>1$ )。

(2) 非饱和渗透系数与压力水头之间的关系式为

$$K(h) = K_s \frac{\{1 - |\alpha h|^{n-1} [1 + |\alpha h|^n]^{-m}\}^2}{[1 + |\alpha h|^n]^{m/2}} \quad (8)$$

或非饱和渗透系数与饱和度之间的关系式为

$$K(\theta) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (9)$$

式中  $K(h)$ ,  $K(\theta)$  为非饱和渗透系数 (m/s);  $K_s$  为饱和渗透系数 (m/s);  $l$  为孔隙结构参数, 取 0.5;  $S_e$  为饱和度, 可按下式计算:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

因此, 为了能利用 Richards 方程描述液体在堆内的饱和-非饱和流动过程, 必须确定 Van Genuchten 模型中的水力学特征参数  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $m$ ,  $\alpha$  和数  $K_s$ 。

### 1.2 参数寻优估计模型的建立

数值反演法在估计孔隙介质水力学参数时, 首先,

给水分持留函数  $\theta(h)$  和渗透性函数  $K(\theta)$  (或  $K(h)$ ) 中含有的未知参数一个初值; 接着, 把赋予初值的  $\theta(h)$  和  $K(\theta)$  (或  $K(h)$ ) 代入表征瞬时流动的 Richards 方程, 并联合试验可控制的初始条件和边界条件, 形成完整描述出流状况的数学模型; 然后, 求解该数学模型, 用出流方程的解获得累积出流量, 并与试验监测值进行对比, 再改进参数; 重复上述步骤, 直到模拟值与实测值之间的误差达到最小, 此时的参数值便是最优化的。优化参数值是通过最小化目标函数来获得的, 参数寻优过程中的最小化目标函数  $\phi$  如下:

$$\phi(b, q, p) = \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} \left[ q_j^*(x, t) - q_i(x, t, b) \right]^2 + \sum_{j=1}^{m_p} \bar{v}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} \bar{w}_{i,j} \left[ p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b) \right]^2 + \sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j \left[ b_j^* - b_j \right]^2. \quad (11)$$

式中  $m_q$  为监测项目的数目;  $n_{qj}$  为同种监测项目中不同时间空间上的监测数目;  $q_j^*(x, t)$  为第  $j$  个观测点在  $x$  位置的具体监测值;  $q_i(x, t, b)$  为相应参数相量  $b$  (如  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$  和  $K_s$ ) 通过对应模型的预测值;  $v_j$  和  $w_{i,j}$  分别为各特定测量点的权重。右端第二项表述了监测值与通过对应模型预测的水力特性参数值 (如  $\theta(h)$  或者  $K(\theta)$  (或  $K(h)$ )) 之间的差异, 其中,  $m_p$ ,  $n_{pj}$ ,  $p_j^*(\theta_i)$ ,  $p_j(\theta_i, b)$ 、 $\bar{v}_j$  和  $\bar{w}_{i,j}$  的意义与第一项相似, 只是在这一项中代表的监测项目是孔隙介质水力特性参数。右端最后一项表述的是一个惩罚函数, 代表事先知道的水力特性参数  $b_j^*$  与估算值  $b_j$  之间的差异, 其中  $\hat{v}_j$  代表权重。

方程 (10) 的最小化目标函数  $\phi$  采用非线性的 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[14, 17]</sup>, 该方法运用了牛顿和最速下降法, 并产生优化参数的置信区间, 已被土壤和水文学者认为是非线性最小二乘拟合的标准<sup>[15]</sup>。

## 2 一维堆浸铀矿堆非饱和渗流试验

### 2.1 试验材料

选用中国南方某铀矿山新上堆浸场的铀矿石, 为了能和笔者先前进行的液体饱和渗流研究成果进行对比, 将矿石样按  $0\sim0.5$ ,  $0.5\sim1$ ,  $1\sim2$ ,  $2\sim3$ ,  $3\sim4$ ,  $4\sim5$ ,  $5\sim6$ ,  $6\sim7$ ,  $7\sim8$ ,  $8\sim9$  mm 的粒径进行筛分, 按最大粒径尺寸 9 mm, 根据

$$M(< R) = M \cdot \left( \frac{R}{R_L} \right)^{3-D} \quad (12)$$

配置了粒径分布分形维数为 1.8 的一组试验矿样<sup>[21-22]</sup>。

表 1 分形维数  $D=1.8$  时试样的粒径级配

Table 1 Particle-size distribution and porosity of samples with fractal dimension of 1.8

颗粒区间/mm	0~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9
质量分数/%	0.0312	0.0404	0.0929	0.1031	0.1103	0.1160	0.1208	0.1249	0.1285	0.1318

式 (12) 中,  $M$  表示颗粒集合体总质量,  $M(< R)$  表示粒径小于  $R$  的颗粒的总质量,  $R_L$  表示该颗粒集合体中最大粒径,  $D$  表示分维数。试样粒径级配见表 1, 试样孔隙率为 42.2%。

由于试验条件的限制及出于对试验人员和试验仪器的安全的考虑, 在能够达到试验目的的前提下, 最终选用水作为喷淋液体。

### 2.2 试验装置

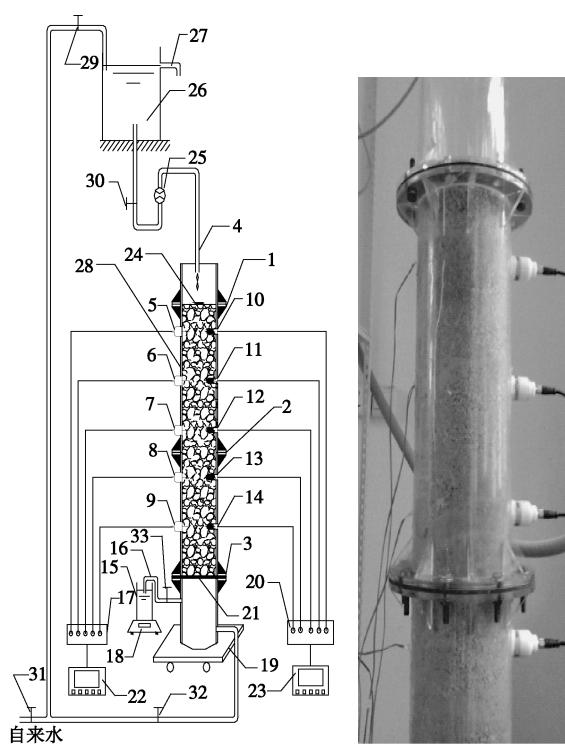
设计并自制的一维液体非饱和渗流试验装置如图 1 所示, 该装置由布液稳流装置、液体渗流装置和数据监测与采集装置构成。布液稳流装置主要由带溢流孔的高位水槽、L 型溢水管、流量计和布液滴管构成。液体渗流装置是由底部集水容器、2 节装矿筒体和顶部喷淋布液筒体等 4 节有机玻璃筒体通过夹有橡胶密封垫圈的法兰串联而成的, 在装矿筒体与底部集水容器之间的法兰之间夹有厚度为 1 cm 的孔板, 整个串联筒体放置在电子称上, 每节装矿筒体外直径为 22 cm, 内直径为 20 cm, 总高约为 163 cm, 其中中间两节装矿筒体的高度为 100 cm, 为了能让矿样表面的布液均匀, 在矿样表面放置一张直径为 20 cm 的滤纸, 并在滤纸正中央放有一扁平鹅卵石; 为了防止矿样经过孔板渗漏, 在孔板上放有孔径为 0.5 mm 的砂网。数据监测与采集装置主要由底部出流液体体积 (或质量) 监测系统、矿样体积含水率监测系统 (DL6-SM300) 和矿样基质吸力监测系统 (Watchdog2800-Watermark) 构成, 其中底部出流液体体积 (或质量) 监测系统主要由 U 型溢水管、量筒和电子称构成; 为了测量不同高度处的矿样的含水率和基质吸力, 在装矿筒体 10, 30, 50, 70, 90 cm 等 5 个不同高度的筒壁对称开安装孔, 一侧安装 SM300 水分仪探头, 一侧安装 Watermark 水势仪探头, 所有采集的数据经配套的计算机软件进行采集与处理。

### 2.3 试验过程

#### (1) 准备

首先, 按照粒径分布分维数的要求, 配好足够质量的矿石样, 然后将其放入烘干机中, 在 105℃温度下烘烤 24 h 后, 取出降至室温。接着, 将电子秤清零, 把底部集水容器置于电子秤上, 把中间装矿筒体上的 SM300 水分仪探头和 Watermark 水势仪探头安装好, 再将孔板、下部装矿筒体用夹有橡胶密封垫圈的法兰





1~3-法兰, 4-布液滴管, 5~9-SM300 水分仪探头, 10~14-Watermark 水势仪探头, 15-量杯, 16-U型溢流管, 17-DL6 水分采集器, 18-高精度电子称, 19-电子称, 20-Watchdog 2000 水势采集器, 21-铺有砂网的孔板, 22, 23-电脑, 24-放有鹅卵石的滤纸, 25-流量计, 26-高位水槽, 27-L型溢流管, 28-有机玻璃柱, 29~33-阀门

图 1 一维液体非饱和渗流试验装置

Fig. 1 Experimental devices for one-dimensional unsaturated flow of liquid

固定在底部集水容器上; 之后, 保持阀门 29、30 处于关闭状态, 打开阀门 31、32 和 33, 缓慢向底部集水容器内注水, 当阀门 33 的水平管有水溢出时, 停止注水, 当溢流停止后记录电子称示数  $m_1$ , 装上 U 型溢流管 16, 关闭阀门 33, 继续注水使水面与孔板水平, 记录电子称示数  $m_2$ 。

### (2) 装样

取配好的试样, 称重, 将试样分层装入下试验筒, 用木制击锤轻轻捣实。当试样面距下部装矿筒体顶边缘 50 mm 左右时, 用夹有橡胶密封垫圈的法兰将装矿筒体的上下部分相连, 并继续采用同样的方法装填试样, 直至试样面与上部装矿筒体上边缘齐平; 之后, 用夹有橡胶密封垫圈的法兰将顶部喷淋布液筒体与上部装矿筒体连接; 最后, 将准备好的鹅卵石和滤纸平放在水平矿样上。记录电子称示数  $m_3$ 。

### (3) 湿润

在开始湿润之前, 将所有的监测系统连接好, 设

定监测时间间隔为 3 min, 并使阀门 30 和 32 关闭, 将阀门 31 和 33 开启, 调整阀门 29 的开度使 L 型溢流管有水溢出, 开启阀门 30, 调节流量计 26 使通过流量为 10 mL/min, 同时开启体积含水率监测系统和矿样基质吸力监测系统, 此时, 湿润过程开始。在湿润期间, 每 30 min 测量浸润线长度, 当有水从 U 型溢流管溢出时, 每隔 1 min 测量溢流管中排出水的质量。当水势仪、水分仪以及电子称 19 的示数稳定, 湿润过程结束。

### (4) 定流量多步注水

调节流量计的流量为 20 mL/min, 每隔 1 min 测量 U 型溢流管排出水的质量。当水势仪、水分仪以及电子称 19 的示数稳定时, 即每 1 min 排出水量相同。则改变流量计的流量。流量为 40 mL/min 和 60 mL/min 的注水过程同流量为 20 mL/min。

### (5) 排水

用夹子夹住布液滴管, 关闭阀门 30, 停止喷淋, 在开始排水时, 每 1 min 测量 U 型溢流管排出水的质量, 直到高精度电子称数据变化缓慢, 排水试验结束。

### (6) 残余含水率的确定

取下 U 型溢流管, 让装矿筒体内的矿样静止排水 48 h 后, 记录电子称 19 的示数  $m_4$ 。计算试验柱矿样中残余水体积  $V_r = (m_4 + m_2 - m_1 - m_3) / \rho_{\text{水}}$ ; 矿样残余含水率  $\theta_r = V_r / V$ , 其中,  $V$  = 筒体内横截面积×矿柱高度。

### (7) 饱和含水率的确定

关闭阀门 29, 33, 打开阀门 32, 继续缓慢加水, 直至水面与试样顶面平齐, 此时, 应记下试验柱的总质量  $m_5$ ; 计算试验柱矿样中水体积  $V_s = (m_5 - m_3) / \rho_{\text{水}}$ ; 矿样饱和含水率  $\theta_s = V_s / V$ 。

在这里需要说明的是, 饱和含水率的测定使用的方法是烘干称重法, 这是测定多孔介质的饱和含水率时常用的一种方法。另外, 为验证试验测得的残余含水率的准确性, 将会对残余含水率进行反演, 将反演值与试验测得的值进行比较。

## 3 试验结果处理

### 3.1 喷淋强度与累计排水量的计算

喷淋强度按下式计算:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

式中,  $q$  为喷淋强度 ( $\text{cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ),  $Q$  为流量 ( $\text{mL/min}$ );  $A$  为试验筒体的横截面积,  $A = 100 \pi \text{ cm}^2$ 。

单位面积的累积排水量按下式计算:

$$q_{\text{bottom}} = -\frac{m}{\rho_{\text{水}} A} , \quad (14)$$

式中  $q_{\text{bottom}}$  为单位面积极累排水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ),  $m$  为喷淋期间累计排出水的质量 (g),  $\rho_{\text{水}}$  为水的密度, ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

### 3.2 单位面积极累排水量与喷淋时间的关系

注水时, 流量 20, 40, 60  $\text{mL}/\text{min}$  对应的喷淋强度分别为 0.0637, 0.1274, 0.1911  $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。图 2, 3 中的实心符号分别表示了不同喷淋强度下和排水过程中测得的单位面积极累排水量  $q_{\text{bottom}}$  的实测值。

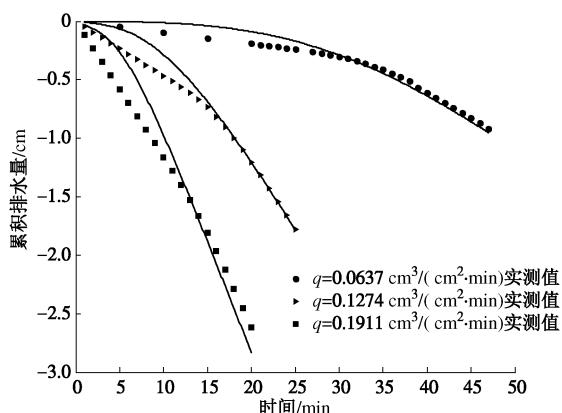


图 2 不同喷淋强度下  $q_{\text{bottom}}$  的实测值和估算曲线的比较

Fig. 2 Comparison between measured values and estimated curves of  $q_{\text{bottom}}$  under different spray intensities

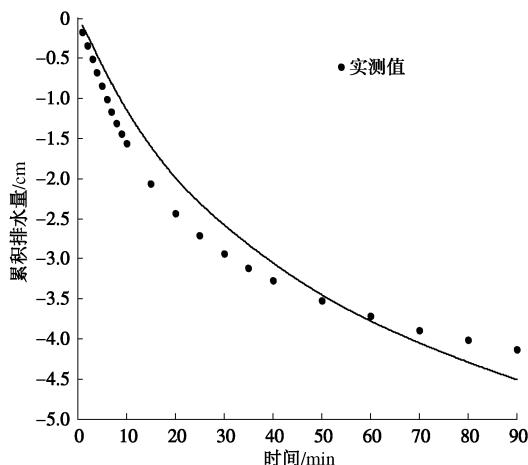


图 3 排水期间  $q_{\text{bottom}}$  的实测值和估算曲线的比较

Fig. 3 Comparison between measured values and estimated curve of  $q_{\text{bottom}}$  in drainage period

### 3.3 体积含水率和基质吸力实测值与喷淋时间的关系

在试验过程中, 水分仪和张力计对不同位置的体积含水率和基质吸力进行了监测, 图 4, 5 为不同高度  $H$  处的基质吸力的绝对值  $|h|$  和体积含水率  $\theta$  的实测值及估算值。

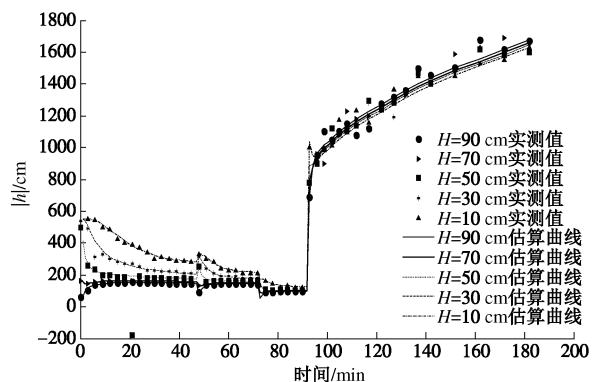


图 4 不同高度处基质吸力实测值和估算值随时间的变化

Fig. 4 Variation of measured and estimated values of matric suction at different heights of column with time

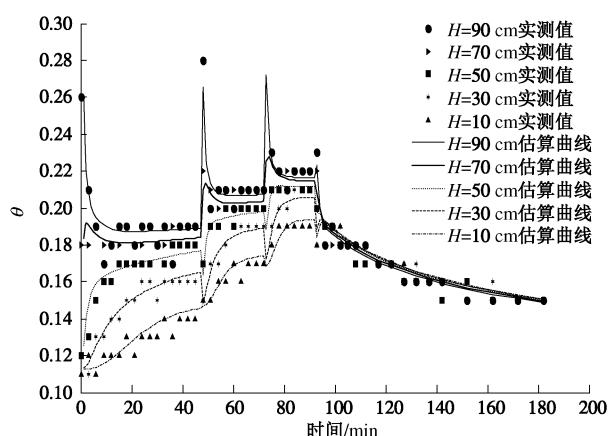


图 5 不同高度处体积含水率实测值和估算值与时间的关系

Fig. 5 Variation of measured and estimated values of moisture content at different heights with time

## 4 水力学特征参数的反演及讨论

### 4.1 水力学特征参数的反演

通过试验确定试验柱内试样的  $\theta_r = 0.0379$ ,  $\theta_s = 0.422$ 。为此, 以不同喷淋强度下试验柱底部单位面积极累排水量的实测值为反演数据, 5 个 SM300 水分仪探头的监测值为柱内含水率初始条件, 利用 HYDRUS-1D 软件对水力学特征参数  $\alpha$ ,  $n$  和  $K_s$  进行反演估算。水力学参数的初始值、取值区间以及是否反演情况见表 2。不同喷淋强度下水力学特征参数反演模拟估算结果见表 3。

利用数值反演法获得的水力学特征参数计算得到的不同喷淋强度和排水阶段累排水量估算曲线与实测值的比较分别见图 2, 3。由图 2, 3 和表 3 的相关系数  $R^2$  可知, 不同喷淋强度和排水阶段溢流管中累排水量的数值反演估算值和实测值吻合性较好, 表明反演模拟方法确定的水力学特征参数能很好地与实际情况相匹配, 估算结果可用于工程实际。

表 2 待反演水力学特征参数的初始值和取值区间

Table 2 Initial values and value ranges for hydraulic characteristic parameters to be inversed

参数	$\alpha$	$n$	$K_s$
初始值	0.036	1.56	120
最小值	0	1	0
最大值	1	3	200

表 3 不同喷淋强度下水力学特征参数估算值

Table 3 Estimated values of hydraulic characteristic parameters under different spray intensities

序号	$q$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\alpha$	$n$	$K_s$ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$R^2$
1	0.0637	0.0362	1.550	107.47	0.98746
2	0.1274	0.0354	1.557	123.36	0.99238
3	0.1911	0.0379	1.561	120.82	0.98736
4	0	0.0045	1.598	169.65	0.98009

为验证试验测得的残余含水率的准确性, 对残余含水率进行了反演, 反演结果见表 4。根据反演结果得出残余含水率平均值为 0.0371, 与试验测得的值基本一致, 说明试验测得的残余含水率值是可信的。

表 4 不同喷淋强度下残余含水率估算值

Table 4 Estimated values of residual moisture content under different spray intensities

序号	$q$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\theta_r$	$R^2$
1	0.0637	0.0470	0.98669
2	0.1274	0.0345	0.99193
3	0.1911	0.0329	0.99016
4	0	0.0340	0.98256

#### 4.2 反演结果的讨论

为了能将注水期间的水力学特征参数进行统一, 将三种喷淋强度下获得的各水力学特征参数进行均值处理, 获得 Van Genuchten 模型所描述的注水期间和排水期间的压力水头与含水率之间的数学关系以及非饱和渗透系数与饱和度之间的数学关系如下:

(1) 注水期间,  $\alpha=0.0365$ ,  $n=1.556$ ,  $m=0.3573$ ,  $K_s=117.22$ , 此时有

$$\theta(h)=\begin{cases} \frac{0.3841}{(1+|0.0365h|^{1.556})^{0.3573}}+0.0379 & (h<0) \\ 0.422 & (h\geq 0) \end{cases}, \quad (15)$$

$$K(\theta)=117.22S_e^{1/2}[1-(1-S_e^{1/0.0379})^{0.0379}]^2.$$

(2) 排水期间,  $\alpha=0.0045$ ,  $n=1.598$ ,  $m=0.3742$ ,  $K_s=169.65$ , 此时有

$$\theta(h)=\begin{cases} \frac{0.3841}{(1+|0.0045h|^{1.598})^{0.3742}}+0.0379 & (h<0) \\ 0.422 & (h\geq 0) \end{cases}, \quad (16)$$

$$K(\theta)=169.65S_e^{1/2}[1-(1-S_e^{1/0.3742})^{0.3742}]^2.$$

注水期间和排水期间的水土特征曲线, 即含水率与基质吸力(压力水头的绝对值)之间的关系曲线, 见图 6。图 6 表明随着矿堆含水率的增大, 基质吸力

逐渐减小; 在高含水率下, 基质吸力随含水率的变化幅度很小; 在低含水率下, 基质吸力随含水率的增大而迅速减小, 基质吸力的变化主要集中在低含水率区间, 这与土壤等小颗粒、粒径区间小且较均匀的孔隙介质的水土特征曲线<sup>[8-10]</sup>形状存在较明显的差异。注水期间, 不同喷淋强度和参数均值化处理后获得的 4 条基质吸力与含水率之间的关系曲线几乎相互重合, 并且参数均值化处理的曲线处于其他 3 个曲线中间, 对其他 3 条曲线都具有较高的置信度, 表明采用多次试验均值化处理后得到的水力学特征参数能表征整个注水期间的基质吸力与含水率之间的关系。同一堆浸铀矿堆, 注水期间和排水期间存在两个不同的基质吸力与含水率之间的关系曲线, 这种现象称为“滞后”现象, 而产生“滞后”现象的原因是: ①堆浸铀矿堆内孔隙尺寸不均匀而产生的瓶颈效应, 造成通过孔道瓶颈排水比注水所需的基质势更低; ②注水过程水和矿石表面的接触角比排水后退过程大, 从而使注水过程和排水过程的基质势不同; ③在注水过程中被封闭在孔隙介质中的空气将影响注水过程的含水率, 这一过程将使相同的基质势下注水过程含水率降低。

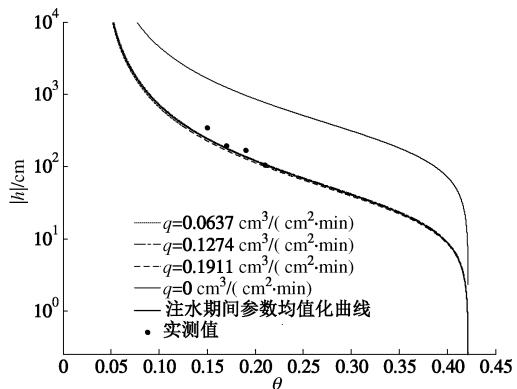


图 6 注水期间和排水期间的水土特征曲线和实测值

Fig. 6 Hydraulic characteristic curves and measured values in water flooding and drainage periods

注水期间和排水期间的非饱和渗透系数  $K$  与含水率  $\theta$  之间的关系曲线见图 7。图 7 表明随非饱和含水率的增大, 非饱和渗透系数连续增大; 在低含水率区间, 非饱和渗透系数随含水率的变化幅度很小, 近似于稳定状态; 在高含水率区间, 非饱和渗透系数随含水率的增大而迅速增大。注水期间, 不同喷淋强度和参数均值化处理后获得的 4 条非饱和渗透系数与含水率之间的关系曲线几乎相互重合, 并且参数均值化处理的曲线处于其他 3 条曲线中间, 对其他 3 条曲线都具有较高的置信度, 表明采用多次试验均值化处理后水力学特征参数能表征整个注水期间的非饱和渗透系数与含水率之间的关系。在含水率较低时, 注水和排水期间的非饱和渗透系数与含水率之间的关系曲线基本重合, 而随着含水率的增加, 排水期间的曲线高于

注水期间。

文献[23]通过液体饱和渗流试验确定了粒径范围为 0~9 mm, 粒径分布分形维数  $D=1.8$ , 孔隙率  $n=0.428$  的铀矿堆的饱和渗透系数为 117.48 cm/min; 除孔隙率存在较小差异外(本文孔隙率  $n=0.422$ ), 本文所用试验矿石的其他物理条件与文献[23]相同, 注水期间反演估算获得的饱和渗透系数为 117.42 cm/min, 与饱和试验确定值十分接近, 而排水期间饱和渗透系数的反演估算值为 169.65 cm/min, 明显高于饱和试验确定值, 表明采用注水期间的反演模型估算结果能获得较准确的饱和渗透系数。

由于本文开展反演模拟试验的喷淋强度范围为  $0.0637\sim0.1911\text{ cm}^3/(\text{cm}^2\cdot\text{min})$  之间, 对应的矿堆内体积含水率范围约为 0.08~0.22, 在此体积含水率范围参数反演结果具有较高的置信度, 若将文中的参数反演结果推广到其他体积含水率范围需要进一步验证。

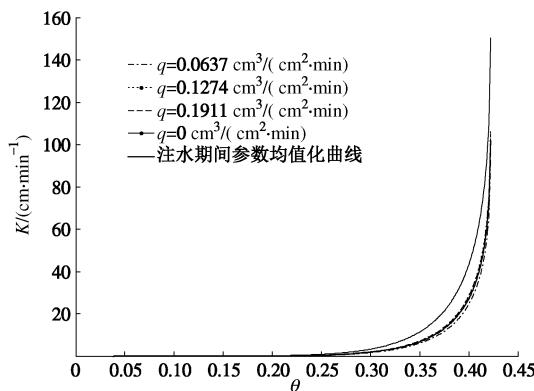


图 7 注水期间和排水期间非饱和渗透系数与含水率之间的关系曲线图

Fig. 7 Relationship between unsaturated permeability coefficient and moisture content in water flooding and drainage periods

另外, 利用反演得到的水力学特征参数反演了 5 个监测高度处基质吸力和体积含水率随时间的变化曲线, 见图 4, 5。由图 4, 5 可知估算曲线与实测数据变化规律是吻合。

## 5 结 论

(1) 通过自制的一维堆浸铀矿堆非饱和渗流试验装置测定注水和排水期间的累积排水量, 利用 HYDRUS-1D 软件对粒径范围为 0~9 mm, 粒径分布分形维数  $D=1.8$ , 孔隙率  $n=0.422$  的铀矿堆进行了注水和排水期间的水力学特征参数  $\alpha$ ,  $n$  和  $K_s$  进行了反演估算, 在文中试验条件下, 反演模拟方法确定的水力学特征参数能很好地与实际情况相匹配, 估算结果可用于工程实际。

(2) 注水期间, 不同喷淋强度和参数均值化处理

后获得的 4 条压力水头与含水率之间的关系曲线几乎相互重合, 参数均值化处理后的水力学特征参数能表征整个注水期间的压力水头与含水率之间的关系。

(3) 同一堆浸铀矿堆, 对于注水期间和排水期间土水特征曲线存在明显的“滞后”现象, 两种状态的压力水头与含水率之间的关系曲线和含水率与非饱和渗透率关系曲线不重合, 需要分别确定对应的水力学特征参数。

(4) 注水期间反演估算获得的堆浸铀矿堆饱和渗透系数与饱和渗流试验获得的结果十分接近, 而排水期间的反演估算值明显高于试验确定值, 表明采用注水期间的反演模型估算结果能获得较准确的饱和渗透系数。

(5) 在工程实际中, 铀矿堆浸时使用的溶浸剂一般为酸性溶液或碱性溶液。由于水的密度和动力黏滞系数与溶浸液之间存在差异, 在实际应用中可利用渗透系数的计算公式  $K=k\rho g/\eta$  (式中,  $k$  为孔隙介质的渗透率,  $\eta$  为流体介质的动力黏滞系数,  $\rho$  为流体介质的密度,  $g$  为重力加速度) 进行两者之间的换算。

## 参 考 文 献:

- [1] MELLADO M E, CISTERNAS L A. An analytical-numerical method for solving a heap leaching problem of one or more solid reactants from porous pellets[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, **32**(10): 2395~2402.
- [2] PADILLA G A, CISTERNAS L A, CUETO J Y. On the optimization of heap leaching[J]. Minerals Engineering, 2008, **21**(9): 673~678.
- [3] MOUSAVI S M, JAFARI A, YAGHMAEI S, et al. Computer simulation of fluid motion in a porous bed using a volume of fluid method: Application in heap leaching[J]. Minerals Engineering, 2006, **19**(10): 1077~1083.
- [4] 陈海辉, 曾莹莹. 铀矿堆浸过程的动力学模型及试验研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2013, **34**(2): 40~43. (CHEN Hai-hui, ZENG Ying-ying. Dynamic model and experiment study of uranium mine heap leaching process[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science), 2013, **34**(2): 40~43. (in Chinese))
- [5] 曾毅君, 牛玉清, 张飞凤, 等. 中国铀矿治生产技术进展综述[J]. 铀矿冶, 2003, **22**(1): 24~27. (ZENG Yi-jun, NIU Yu-qing, ZHANG Fei-feng, et al. Overview of technical progresses in uranium mining and metallurgical industry in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2003, **22**(1): 24~27. (in Chinese))
- [6] 卢 靖, 程 彬. 非饱和黄土土水特征曲线的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1591~1592. (LU Jing, CHENG

- Bin. Research on soil-water characteristic curve of unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(10): 1591 - 1592. (in Chinese))
- [7] 高凌霞, 栾茂田, 杨 庆, 等. 非饱和重塑黏土渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(8): 2267 - 2270. (GAO Ling-xia, LUAN Mao-tian, YANG Qing, et al. Experimental study of permeability of unsaturated remoulded clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(8): 2267 - 2270. (in Chinese))
- [8] MILLER C J, YESILLER N, YALDO K, et al. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, **128**(9): 733 - 742.
- [9] 刘 艳, 赵成刚. 土水特征曲线滞后模型的研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(3): 399 - 405. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang. Hysteresis model for soil-water characteristic curves[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(3): 399 - 405. (in Chinese))
- [10] 毛尚之. 非饱和膨胀土的土-水特征曲线研究[J]. 工程地质学报, 2002, **10**(2): 129 - 133. (MAO Shang-zhi. A study on soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(2): 129 - 133. (in Chinese))
- [11] 梅 岭, 姜朋明, 李 鹏, 等. 非饱和土的土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 124 - 128. (MEI Ling, JIANG Peng-ming, LI Peng, ZHOU Ai-zhao. Soil-water characteristic curve tests on unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(S1): 124 - 128. (in Chinese))
- [12] MAHBOD M, ZAND-PARSA S. Prediction of soil hydraulic parameters by inverse method using genetic algorithm optimization under field conditions[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2010, **56**(1): 13 - 28.
- [13] 程勤波, 陈 喜, 凌敏华, 等. 单环入渗试验与数值反演法结合推求土壤水力参数[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(1): 118 - 122. (CHENG Qin-bo, CHEN Xi, LING Min-hua, et al. Determination of soil hydraulic parameters based on experiment of single ring infiltration permeameter and numerical inverse method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, **37**(1): 118 - 122. (in Chinese))
- [14] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1963, **11**(2): 431 - 441.
- [15] KOOL J B, PARKER J C, VAN GENUCHTEN M Th. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models-A review[J]. *Journal of Hydrology*, 1987, **91**(3): 255 - 293.
- [16] REGALADO C M, MUÑOZ-CARPENA R. Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters: a stochastic Kozeny-Carman relation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, **77**(2): 189 - 202.
- [17] HOLLENBECK K J, JENSEN K H. Maximum-likelihood estimation of unsaturated hydraulic parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**(1): 192 - 205.
- [18] FINSTERLE S, FAYBISHENKO B. Inverse modeling of a radial multistep outflow experiment for determining unsaturated hydraulic properties[J]. *Advances in Water Resources*, 1999, **22**(5): 431 - 444.
- [19] MAIER U, DEBIASE C, BAEIDER-BEDERSKI O, et al. Calibration of hydraulic parameters for large-scale vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **369**(3): 260 - 273.
- [20] 李 峰, 缴锡云, 李盼盼, 等. 田间土壤水分特征曲线参数反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 373 - 377. (LI Feng, JIAO Xi-yun, LI Pan-pan, et al. Parametric inversion of soil water characteristic curves of farmland[J]. *Journal of Hohai University( Natural Sciences)*, 2009, **37**(4): 373 - 377. (in Chinese))
- [21] GUI Dong-wei, LEI Jia-jiang, ZENG Fan-jiang, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands-A case study of the Cele Oasis[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, **51**(11/12): 1306 - 1311.
- [22] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(2): 362 - 369.
- [23] 叶勇军, 丁德馨, 李广悦, 等. 堆浸铀矿堆液体饱和渗流规律的研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2243 - 2248. (YE Yong-jun, DING De-xin, LI Guang-yue, et al. Regularities for liquid saturated seepage in uranium ore heap for heap leaching[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(8): 2243 - 2248. (in Chinese))