



基于 Green-Ampt 模型离子型 稀土柱浸试验入渗水头的确定

尹升华^{1,2}, 谢芳芳^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在离子型稀土原地浸矿过程中, 溶浸液入渗水头的合理确定有利于减少入渗时间和提高浸出率。基于 Green-Ampt 土壤入渗模型, 通过离子型稀土变水头入渗试验, 建立入渗率与入渗水头和湿润峰深度以及渗流时间与累积入渗量和入渗水头之间的关系, 并对两关系式进行分析。结果表明: 离子型稀土原地浸出注液并积水入渗时, 入渗水头并非越高越好, 随着入渗水头的增加, 入渗率呈先增大后减小的趋势, 存在最优入渗水头; 对赣南某离子型稀土进行柱浸试验, 得到的最优入渗水头为 26.69 cm; 入渗界面的入渗率一定程度上决定溶液在矿体内的渗透效果。

关键词: 离子型稀土; 柱浸; Green-Ampt 模型; 入渗

中图分类号: TD865

文献标志码: A

离子型稀土矿是世界罕见、我国特有的中重稀土矿^[1-2]。其主要吸附于粘土矿物, 具有特殊的粘土矿物性质^[3]。离子型稀土开采始于 20 世纪 70 年代, 先后经历了池浸、堆浸和原地浸矿 3 种不同的工艺技术^[4-6]。目前, 主要采用原地溶浸的采矿方法^[7]。原地浸矿工艺中计算孔网参数的关键环节是确定潜水非完整孔的单孔注液强度, 增加孔深和孔中液面高度可以提高单孔注液强度, 但孔深过大, 易造成浸矿盲区; 单孔注液强度太小, 则增加注液孔的钻孔工程量^[8]。溶浸液在矿体内渗流时, 细小颗粒发生迁移导致矿体结构变化, 从而影响矿体的渗透性^[9-13]。范严伟等^[14]研究发现入渗水头对吸渗率、稳渗率有一定影响, 吸渗率和稳渗率与入渗水头都符合线性关系, 随入渗水头的增大而增大。因此, 合理确定溶浸液的入渗水头对于提高离子型稀土矿的浸出率具有重要意义。

原地浸矿注液并溶浸液的渗流规律类似于蓄水坑灌条件下土壤水的渗流。关于土壤水渗流研究, 早在 20 世纪初期, 国外学者就建立了经典的 Green-Ampt 土壤入渗模型^[15]。Green-Ampt 模型在土壤入渗、产流以及土壤侵蚀过程等研究中应用广泛^[16]。范严伟等^[17]将 Green-Ampt 模型应用于夹砂层土壤, 并对其进行

了改正与验证。张杰等^[18]在 Green-Ampt 模型的基础上提出了分层假设模型并对黄土边坡稳定性进行了分析。MOHAMMADZADEH-HABILI 等^[19]基于 Green-Ampt 模型提出了一个层状土渗流过程中水力参数估算的理论方法。

基于上述研究, 利用 Green-Ampt 模型, 取赣南某离子型稀土矿采用室内柱浸试验, 研究不同入渗水头下入渗率的变化规律。

1 模型建立

Green-Ampt 模型假设土壤初始含水率分布均匀, 入渗过程为积水入渗, 整个入渗过程存在明显的湿润峰, 湿润峰面水平, 湿润峰处吸力固定不变^[20]。如图 1 所示, 把 z 坐标原点设在水土交界面, 向下为正, 交界面和湿润峰面处总水势分别为 h 和 $(z_f + s_f)$, 其总水势梯度为 $(z_f + s_f + h)/z_f$, 由达西定律可求出地表处的入渗率 i ^[21]:

$$i = K_s \frac{z_f + s_f + h}{z_f} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374035, 51304011); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0669); 国家重点研发计划项目(2016YFC0600704)

收稿日期: 2015-11-24; **修订日期:** 2016-06-20

通信作者: 尹升华, 教授, 博士; 电话: 010-62334680; E-mail: csuysh@126.com

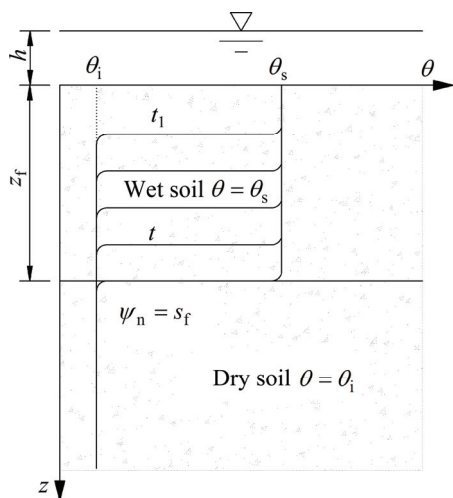


图 1 Green-Ampt 入渗模型

Fig. 1 Green-Ampt infiltration model

式中: i 为土壤入渗率, cm/min; K_s 为土壤饱和导水率, cm/min; z_f 为湿润峰深度, cm; h 为地表处的总水势, cm; s_f 为湿润峰处平均基质吸力, cm。

根据水量平衡原理, 土壤累积入渗量与湿润峰深度的关系为

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量, cm; θ_s 为土壤饱和含水率, %; θ_i 为土壤初始含水率, %。

由上述模型可知, 土壤入渗率 i 会随着湿润峰深度 z_f 的增大而减小, 而随着地表处总水势 h 的增大而增大。但马娟娟等^[22]通过观测入渗前后入渗界面在不同水头作用下土壤微结构变化, 结果表明入渗界面表层土壤体积质量随着入渗水头的增加而不断增大。毕远杰^[23]研究证明, 入渗水头对入渗界面的土壤有压实作用, 土壤表层孔隙随水头增加而变小; 此外, 土壤表层结构也随之变化, 导致饱和导水率减小。因此, 在较大的入渗水头作用下会导致土体入渗的上边界条件及形状发生变化, 主要表现为表层土孔隙度减少, 导水能力下降。离子型稀土原地浸过程中, 溶浸液的入渗水头并非越大越好, 入渗水头应存在一个临界值, 低于临界值入渗率随入渗水头的增大而增大, 超过临界值入渗率随入渗水头的增大而减小。

2 模型优化

郭向红等^[24]将原 Green-Ampt 模型中的 K_s 用不同水头作用下的 $K_s(h)$ 代替, 得到不同水头作用下的入渗

公式:

$$i = K_s(h) + K_s(h) \frac{s_f + h}{z_f} \quad (3)$$

式中: $K_s(h)$ 为入渗水头为 h 时饱和区的导水率。

该式表示在特定的入渗水头下 $K_s(h)$, h 和 s_f 为定值, 不同入渗水头下的入渗率 i 与湿润峰倒数 $1/z_f$ 呈线性关系。试验过程中, 通过测定湿润峰深度 z_f 时刻的入渗率 i , 便可将 i 与 $1/z_f$ 拟合成本下形式:

$$i = kx + b \quad (4)$$

式中: k 、 b 为拟合参数; $x = 1/z_f$ 。

对比式(3)和式(4)可得

$$K_s(h) = b \quad (5)$$

定义参数 $S_f(h)$ 表示 $s_f + h$, 则

$$S_f(h) = \frac{k}{K_s(h)} \quad (6)$$

由此, 通过试验数据拟合的 i 与 $1/z_f$ 的关系式(4), 并对比式(3), 便可求出不同水头下的参数 $K_s(h)$ 及 $S_f(h)$ 。

3 模型验证及完善

3.1 试验材料与方法

试验装置由 4 个主要部分组成, 分别为变水头装置、装样装置、供水装置和集水装置, 如图 2 所示。变水头装置有 6 个溢流阀, 每个阀之间相隔 5 cm, 即入渗水头设置为 5、10、15、20、25、30 cm 6 个水平。装样装置为内径 10 cm、高 30 cm 的透明有机玻璃圆筒, 圆筒外壁上贴有刻度, 用以观测矿样高度以及湿润峰深度。变水头装置与装样装置通过嵌套, 可以紧密咬合且不漏水。供水装置由一个大烧杯改造而成, 在烧杯侧壁靠近杯底设置一注水龙头。集水装置由量筒和固定夹持器组成, 量筒可上下移动, 以便收集维持不同水头时排出的水。通过观测注水装置以及集水装置中的水量, 根据变水头装置底面面积以及水头高度计算变水头装置中的水量, 便可求出试样中水的入渗量。

试样取自赣南某稀土矿, 将试样充分烘干, 捣碎, 过 2mm 颗粒筛后测得试样的基本物理参数如表 1 所列。

试验通过一维积水入渗确定不同入渗水头对 Green-Ampt 模型参数的影响。入渗水头分别设置为 5、

10、15、20、25、30 cm，试验过程中从低到高依次控制入渗水头高度。试验前在装样圆筒底部垫好滤纸，将试样分层装入圆筒。每装入一层试样后，用捣棒将其均匀捣实，将捣实后的层面抓毛再装下一层。试验开始时迅速将液面加到预设水头，调节该水头处出水阀门与注水龙头，使排水速率与注水速率保持一致，维持水头恒定。试验过程中计算湿润峰分别处于 1、2、5、10、16、20、25 cm 时刻的入渗率。为了保证实验数据的准确性，减小试验误差，每个入渗水头重复试验 3 次，最后取 3 组数据的平均值，试验数据记录如表 2 所列。

3.2 试验结果分析

由表 2 可知，不同入渗水头下的入渗率平均值在 $6 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$ cm/min 的范围内，符合粘壤土入渗率的变化规律。对试验数据进行线性拟合(见图 3)。由图 3 可知，不同水头的入渗率与湿润峰倒数呈显著的线性关系，线性拟合相关系数 R^2 都达到 0.98 以上。将不同水头下拟合得到的入渗率与湿润峰倒数的关系对应式(4)，可分别得到 k 、 b 所对应的值，进而可分别求出 $K_s(h)$ 及 $S_f(h)$ 的值(见表 3)。对 $K_s(h)$ 与入渗水头 h 进行拟合得到图 4，拟合如式(7)所示，拟合相关系数 R^2 为 0.988。由图 4 可知， $K_s(h)$ 与 h 呈线性关系且二

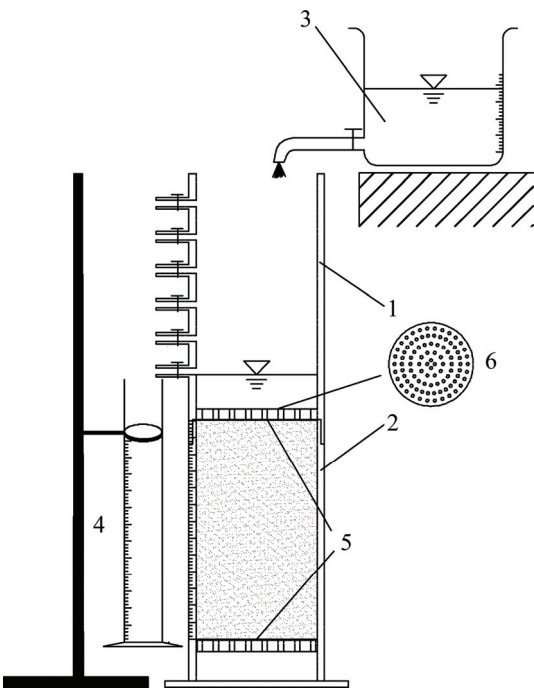


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up: 1—Variable head device; 2—Loading device; 3—Water supply device; 4—Water collecting device; 5—Filter paper; 6—Flow-guiding bore plate

表 1 离子型稀土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of ion-absorbed rare earth

Granule density, $\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_i/\%$	$\theta_s/\%$	Soil particle mass fraction at all levels/%			Soil texture
			2-0.02	0.02-0.002	<0.002	
2.574	1.1	58.3	54.815	27.628	17.557	Clay loam

表 2 不同入渗水头下不同湿润峰处的入渗率

Table 2 Infiltration rate of different wetting front under different infiltration heads

z_f^{-1}/cm^{-1}	$i/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$					
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
0.04	0.0045	0.0039	0.0041	0.0044	0.0049	0.0045
0.05	0.0048	0.0047	0.0047	0.0048	0.0057	0.0063
0.0625	0.0051	0.0055	0.0056	0.0061	0.0067	0.0069
0.1	0.0059	0.0069	0.0076	0.0081	0.0092	0.0087
0.2	0.0086	0.0096	0.0107	0.0144	0.0152	0.0174
0.5	0.0209	0.0266	0.0289	0.0298	0.0315	0.0347
1	0.0397	0.0474	0.0546	0.0646	0.0743	0.0803

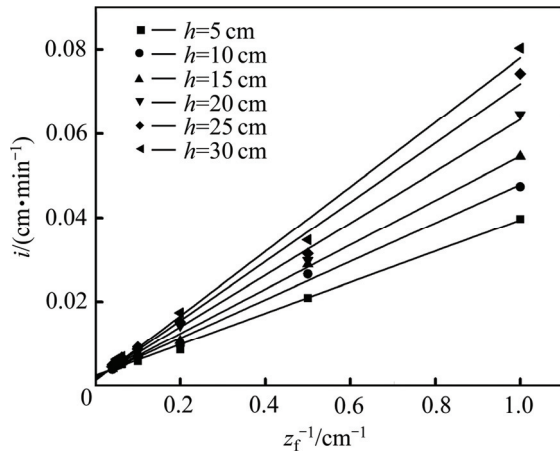


图 3 不同水头入渗条件下入渗率与湿润峰倒数之间的关系

Fig. 3 Relationship between infiltration rate and wetting front reciprocal at different infiltration heads

表 3 不同入渗水头下拟合曲线的 k 、 K_s 及 $S_f(h)$ 值Table 3 k , K_s and S_f values at different infiltration heads

h/cm	k	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	$S_f(h)/\text{cm}$	R^2
5	0.03699	0.00247	14.98	0.99727
10	0.04568	0.0022	20.76	0.99553
15	0.05277	0.00188	28.07	0.99784
20	0.06171	0.00167	36.95	0.99608
25	0.07043	0.00143	49.25	0.98908
30	0.0768	0.00126	60.95	0.99141

者成反比, 即随着入渗水头 h 的不断增大饱和导水率逐渐减小, 这与郭向红等^[24]试验所得结论一致。对 $S_f(h)$ 与入渗水头 h 进行拟合得到图 5, 拟合如式(8)所示, 拟合相关系数 R^2 达 0.975。从图 5 可见, $S_f(h)$ 与 h 亦呈线性关系且二者成正比, 即随着入渗水头 h 的不断增大, 湿润峰处平均基质吸力 s_f 逐渐增大。姚海林^[25]研究发现, 对于多孔材料最小孔径愈小, 毛细水中可容许存在的基质吸力也愈大。当入渗水头不断增大时, 水头压力也不断增大导致试样被压实, 试样孔隙逐渐变小, 从而基质吸力不断变大。

$$K_s(h) = 2.68 \times 10^{-3} - 4.9 \times 10^{-5} h \quad (7)$$

$$S_f(h) = 2.74 + 1.85 h \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(3)可得到入渗率 i 和湿润峰深度 z_f 、入渗水头 h 的关系式, 如式(9):

$$i = \frac{2.68 \times 10^{-3} - 4.9 \times 10^{-5} h + 7.34 \times 10^{-3} + 4.83 \times 10^{-3} h - 9.07 \times 10^{-5} h^2}{z_f} \quad (9)$$

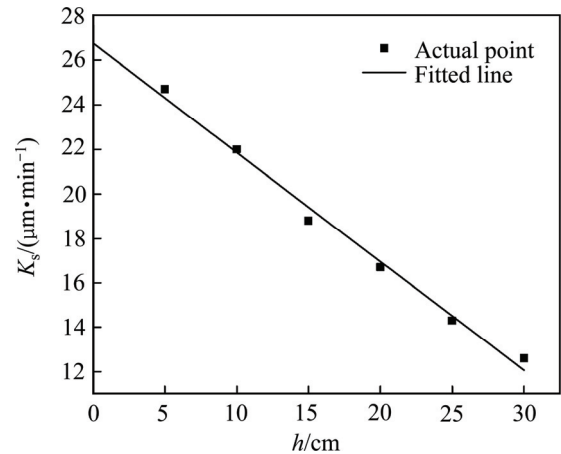
图 4 饱和导水率(K_s)与入渗水头(h)的线性拟合

Fig. 4 Linear fitting of saturated hydraulic conductivity (K_s) and infiltration head (h)

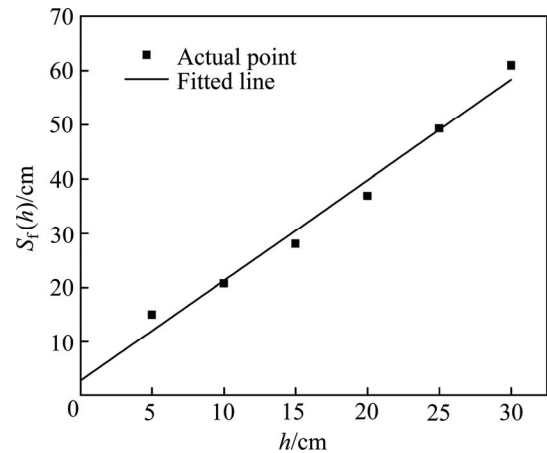
图 5 $S_f(h)$ 与入渗水头的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of $S_f(h)$ and infiltration head (h)

对 i 求关于 h 的导数, i 取得最大值, $h = 26.69 - 0.27 z_f$, 当 z_f 为 0 时, h 取得最大值 26.69。假设 h 的变化范围为(0, 50), z_f 的变化范围为(0, 30), 利用 MATLAB 软件编程作出 i 、 h 和 z_f 的三维曲面(见图 6), 同时得出 i 、 h 和 z_f 的数据变化表。从图中直观得, z_f 接近 0 时, 即入渗界面处的入渗率随入渗水头的变化最明显, 查生成的表格数据得入渗水头高度在 26.69 cm 处时, 入渗率最大。

将式(2)整理成 $z_f = I / [(\theta_s - \theta_i)]$, 代入式(3), 再由入渗率 $i = dI / dt$, 分离变量 I 和 t 后等式两边分别求积分得式(10)。

$$t = \frac{I - S_f(h)(\theta_s - \theta_i) \ln[I + S_f(h)(\theta_s - \theta_i)]}{K_s(h)} + n \quad (10)$$

式中: n 为常数。

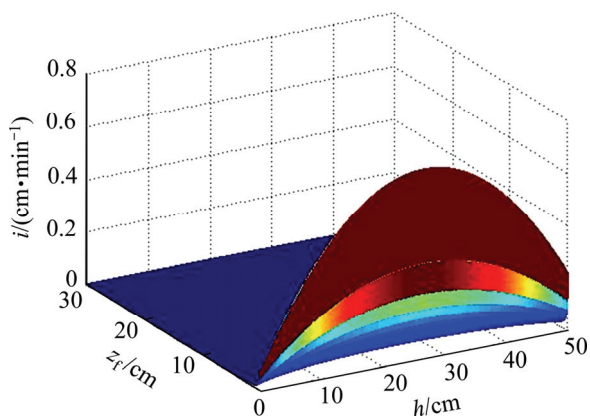


图6 入渗率、水头高度和湿润峰深度的三维曲面

Fig. 6 Three-dimension curved surface of infiltration rate, infiltration heads and wetting front

当 $t = 0$ 时, $I = 0$, 从而

$$n = \frac{S_f(h)(\theta_s - \theta_i) \ln[S_f(h)(\theta_s - \theta_i)]}{K_s} \quad (11)$$

将式(7)与(8)代入式(10)便可得到时间、入渗量与入渗水头三者之间的关系。设置入渗水头的变化范围为(0, 40), 累积入渗水量变化范围为(0, 20), 利用 MATLAB 软件作出时间、累积入渗水量和入渗水头的三维曲面, 如图7所示。从图7中可以看出, 渗流时间与累积渗流量成正比, 而随着入渗水头的增加渗流一定水量所需时间先减少后增加, 通过查看 MATLAB 软件得出的数据表格发现当入渗水头为 26.69 cm 时, 渗流已知水量所需的时间最短, 即矿体渗透性最佳。

由分析结果可知, 积水入渗的入渗水头对交界面入渗率和整个渗流过程有重要影响。在交界面入渗率最大的入渗水头条件下, 整个渗流过程的渗透效果也

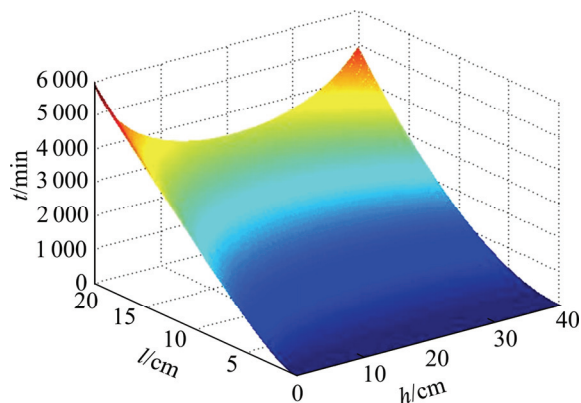


图7 时间、累积渗流量与入渗水头的三维曲面图

Fig. 7 Three-dimension curved surface of time, cumulative infiltration and infiltration heads

最好。由此可知, 积水入渗过程, 入渗水头主要影响交界面入渗率从而影响整个渗流过程。这是由于当入渗达到一定深度后, 地面处和最大入渗深度间的驱动势能变为零, 此时入渗不能再继续进行, 而是维持在这一深度^[26]。

3.3 试验结果验证

对上述实验结果进行验证, 利用如图8所示实验装置, 该装置与前述实验装置相类似, 不同之处在于: 多两个测压水头和一个底部出水口, 变水头装置溢流阀之间相差 10 cm, 装样装置高 50 cm。通过柱浸试验, 分别研究入渗水头为 10、20、30、40、50 cm 时, 矿体渗透系数的变化规律。装样过程与前述实验一致, 试验过程中, 待渗流稳定(底部出水口水流稳定)后, 分别记录不同入渗水头条件下, 水头损失 Δh 和单位时间渗流量 q 。为保证试验准确性, 每个水头处重复试验 3 次, 试验结果取平均值, 数据记录如表4所列。

根据达西定律公式:

表4 渗透系数各计算参数

Table 4 Calculation parameters of permeability coefficient

h/cm	$\Delta h/\text{cm}$	$q/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	$K/(\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
10	23.6	0.286	46.3
20	18.7	0.296	60.5
30	14.1	0.303	82.1
40	16.5	0.308	71.3
50	20.4	0.302	56.6

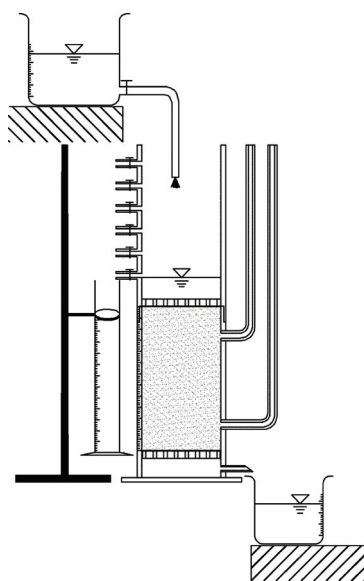


图8 验证试验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of verification experimental set-up

$$q = KA \frac{\Delta h}{l} \quad (12)$$

得渗透系数:

$$K = \frac{ql}{A\Delta h} \quad (13)$$

式中: q 为单位时间渗流量, mL/min; K 为渗透系数, cm/min; A 为矿样横截面积, $A=78.5 \text{ cm}^2$; l 为两个测压水头间高度, $l=30 \text{ cm}$; Δh 为水头损失, cm。

验证结果表明: 单位时间渗流量随着入渗水头的增大先增大后减小, 当入渗水头处接近 30 cm 时, 单位时间渗流量达到最大; 矿体渗透系数随入渗水头的变化规律与单位时间渗流量表现一致。这与前述实验结论相对应, 证明前述所建模型所得最优入渗水头具有一定的可靠性, 所建模型具有一定的可行性。同时也证明, 在渗流过程中, 矿体的结构会发生一定的变化, 入渗水头过大时, 易将矿体表层压实, 减小矿体表层孔裂隙影响溶液入渗, 且大颗粒在较大的水压下, 随水流运移易堵塞矿体中的水流通道, 也影响矿体渗透性。

4 结论

1) 离子型稀土原地浸矿注液井中溶浸液的入渗过程类似于蓄水坑灌。入渗水头并非越高越好, 入渗水头在一定范围的增大能够促进入渗率, 但入渗水头过大将导致入渗界面表层矿体的体积质量增大, 压实入渗界面土矿体, 矿体表层孔隙减小, 影响入渗效果; 且入渗水头过大易改变矿体结构, 堵塞矿体内的水流通道, 影响矿体渗透性。

2) 通过不同入渗水头某离子型稀土柱浸试验发现, 当入渗水头高度为 26.69 cm 时, 入渗界面的入渗率最大。入渗界面以下的入渗过程受入渗水头的影响较小, 要保持较大的入渗率, 随着湿润峰的推进应适当减小入渗水头高度。

3) 分析时间与累积渗流量和入渗水头三者之间的关系得出: 积水入渗存在最优入渗水头, 在该水头作用下矿体渗透效果最好; 矿体表层的入渗效果对于整个渗流过程具有重要影响, 入渗界面的入渗率一定程度决定了溶液在矿体内的渗透效果。

REFERENCES

[1] 周晓文, 温德新, 罗仙平. 南方离子型稀土矿提取技术研究

现状及展望[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(6): 81-85.

ZHOU Xiao-wen, WEN De-xin, LUO Xian-ping. The status quo and development trend of the extraction technology of ion-absorbed rare earth in southern China[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(6): 81-85.

[2] QIU T S, FANG X H, WU H Q, ZENG Q H, ZHU D M. Leaching behaviors of iron and aluminum elements of ion-absorbed-rare-earth ore with a new impurity depressant[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2986-2990.

[3] 吴爱祥, 尹升华, 李建锋. 离子型稀土矿原地溶浸溶液渗流规律的影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 3(3): 506-510.

WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LI Jian-feng. Influential factors of permeability rule of leaching solution in ion-absorbed rare earth deposits with in-situ leaching[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, 3(3): 506-510.

[4] 汤洵忠, 李茂楠, 杨 殿. 我国离子型稀土矿开发的科技进步[J]. 矿冶工程, 1999, 19(2): 14-16.

TANG Xun-zhong, LI Mao-nan, YANG Dian. Scientific and technological progress in the development of the ion-absorbed rare earth deposits in China[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1999, 19(2): 14-16.

[5] 苏文清. 中国稀土产业经济分析与政策研究[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2009: 170.

SU Wen-qing. Evaluation and analysis on the competitiveness of rare earth[M]. Beijing: China financial and Economic Publishing House, 2009: 170.

[6] 黄小卫, 张永奇, 李红卫. 我国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J]. 中国科学基金, 2011(3): 134-137.

HUANG Xiao-wei, ZHANG Yong-qí, LI Hong-wei. Current situation and development trend of rare earth resources in China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2011(3): 134-137.

[7] 王华生, 刘祖文, 朱 强, 肖子捷, 张 念. 南方离子型稀土原地浸矿土壤中氮化物垂直分布特征[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(6): 132-136.

WANG Hua-sheng, LIU Zu-wen, ZHU Qiang, XIAO Zi-jie, ZHANG Nian. Characteristics of nitrides spatial distribution in the in-situ leaching mining of ion-adsorption rare earth[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(6): 132-136.

[8] 王观石, 邓 旭, 胡世丽, 洪本根, 罗嗣海. 非达西渗流条件下的单孔注液强度计算模型[J]. 矿冶工程, 2015(3): 4-8.

WANG Guan-shi, DENG Xu, HU Shi-li, HONG Ben-gen, LUO Si-hai. A calculation model for intensity of single-hole liquid injection under non-darcy flow condition[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015(3): 4-8.

[9] 罗嗣海, 袁 磊, 王观石. 浸矿对离子型稀土矿强度影响的

- 试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(3): 11-14.
- LUO Si-hai, YUAN Lei, WANG Guan-shi, HU Shi-li, WANG Xiao-ling. The effect of leaching on the strength of ion-adsorption rare-earth ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013, 4(3): 11-14.
- [10] 罗嗣海, 黄群群, 王观石, 胡世丽, 洪本根. 离子型稀土浸矿过程中渗透性变化规律的试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(3): 58-61.
- LUO Si-hai, HUANG Qun-qun, WANG Guan-shi, HU Shi-li, HONG Ben-gen. Permeability change rule of ion-adsorption rare-earth in ore leaching process[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013, 4(3): 58-61.
- [11] 吴爱祥, 王少勇, 杨保华. 堆浸散体颗粒结构对溶浸液渗流规律的影响[J]. 矿业研究与开发, 2011, 1(5): 22-26.
- WU Ai-xiang, WANG Shao-yong, YANG Bao-hua. Effect of particle structure on permeability of leaching dump[J]. Mining Research and Development, 2011, 1(5): 22-26.
- [12] 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(4): 1092-1098.
- YING 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(4): 1092-1098.
- [13] 王观石, 王小玲, 胡世丽, 洪本根. 颗粒运移对离子型稀土矿体结构影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2015(10): 37-42.
- WANG Guan-shi, WANG Xiao-ling, HU Shi-li, HONG Ben-gen. Experimental study on the effect of particle migration on the structure of ionic rare earth ore body[J]. Mining Research and Development, 2015(10): 37-42.
- [14] 范严伟, 赵文举, 王 昱. 入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(1): 65-70.
- FAN Yan-wei, ZHAO Wen-ju, WANG Yu. Influence of infiltration heads on parameters of Philip model of vertical one-dimensional infiltration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(1): 65-70.
- [15] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24.
- [16] 毛丽丽, 雷廷武. 用修正的 Green-Ampt 模型确定土壤入渗性能的速算方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 53-57.
- MAO Li-li, LEI Ting-wu. Fast method for soil infiltrability estimation with modified Green-Ampt model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 53-57.
- [17] 范严伟, 赵文举, 王 昱, 毕贵权. 夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 农业工程学报, 2015(5): 93-99.
- FAN Yan-wei, ZHAO Wen-ju, WANG Yu, BI Gui-quan. Improvement and verification of the Green-Ampt model for sand-layered soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(5): 93-99.
- [18] 张 杰, 韩同春, 豆红强, 马世国. 基于降雨入渗分层假定的黄土边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(12): 4355-4361.
- ZHANG Jie, HAN Tong-chun, DOU Hong-qiang, MA Shi-guo. Stability of loess slope considering infiltration zonation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014(12): 4355-4361.
- [19] MOHAMMADZADEH-HABILI J, HEIDARPOUR M. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 824-832.
- [20] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 129-132.
- SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu, HUANG Ming-bin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 129-132.
- [21] 李援农, 费良军. 土壤空气压力影响下的非饱和入渗格林-安姆特模型[J]. 水利学报, 2005, 6(6): 733-736.
- LI Yuan-nong, FEI Liang-jun. The Green-Ampt model of unsaturated infiltration under the influence of soil air pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 6(6): 733-736.
- [22] 马娟娟. 蓄水坑灌条件下土壤水分运动特性的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005: 42-54.
- MA Juan-juan. Experimental studies on the characteristics of soil moisture movement under water storage pit irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005: 42-54.
- [23] 毕远杰. 蓄水坑灌条件下土壤饱和和导水率的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006: 15-29.
- BI Yuan-jie. The experimental investigation of saturated hydraulic conductivity on the condition of water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006: 15-29.
- [24] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 毕远杰. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报, 2010, 3(3): 64-68.
- GUO Xiang-hong, SUN Xi-huan, MA Juan-juan, BI Yuan-jie. Green-Ampt model of different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 3(3): 64-68.
- [25] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的一些思考[J]. 岩土力学, 2005, 1(1): 67-70.
- YAO Hai-lin. Some considerations about the concept of matric suction and questions related to matric suction[J]. Rock and soil Mechanics, 2005, 1(1): 67-70.
- [26] 陈 伟, 莫海鸿, 陈乐求. 非饱和土边坡降雨入渗过程及最大入渗深度研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(6): 13-16.
- CHEN Wei, MO Hai-hong, CHEN Le-qiu. Study on rainfall infiltration process and the biggest infiltration depth for unsaturated soil slope[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(6): 13-16.

Infiltration head of ion-absorbed rare earth with column leaching experiment determined based on Green-Ampt model

YIN Sheng-hua^{1,2}, XIE Fang-fang^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: During the in-situ leaching process of ion-absorbed rare earth, the rational determination of infiltration head is helpful for reducing infiltration time and enhancing leaching efficiency. With Green-Ampt soil infiltration model and infiltration experiment on variation of water head of ion-absorbed rare earth, the relationships between infiltration rate, infiltration head and depth of wetting front, and the relationships between infiltration time, cumulative infiltrated water volume and infiltration head were established. The results show that infiltration head of leaching solution is not the higher the better. With the increasing of infiltration head, the infiltrate rate presents a tendency of increasing and then decreasing. There is an optimized infiltration head. Conducting a column leaching experiment on the ion-adsorption type rare earth source from Gan Nan, its optimized infiltration head is 26.69 cm. The infiltrate rate of interface determines the infiltration effect of the solution in a certain range.

Key words: ion-absorbed rare earth; column leaching; Green-Ampt model; infiltration

Foundation item: Projects(51374035, 51304011) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(NCET-13-0669) supported by Program for New Century Excellent Talents in University, China; Project(2016YFC0600704) supported by the State Key Research Development Program of China

Received date: 2015-11-24; **Accepted date:** 2016-06-20

Corresponding author: YIN Sheng-hua; Tel: +86-10-62334680; E-mail: csuysh@126.com

(编辑 王 超)