

# 松散破碎介质中液体饱和渗流规律研究

丁德馨<sup>1</sup>, 李广悦<sup>1,2</sup>, 徐文平<sup>1</sup>, 张志军<sup>1</sup>, 饶龙<sup>1,2</sup>

(1. 南华大学核资源与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 原地爆破浸出采场的铀矿堆, 是一种由凿岩爆破法构筑而成的矿堆, 是一种松散破碎介质, 其粒径服从 Rosin-Rammler 分布, 其特征粒径、粒径分布指数和孔隙率随所采用的爆破参数和爆破工艺的不同而不同。为了研究这类铀矿堆的特征粒径、粒径分布指数和孔隙率对其中液体饱和渗流的影响, 根据 Rosin-Rammler 分布, 选配了 7 组具有不同颗粒级配的试样, 采用自制的松散破碎介质液体饱和渗流试验装置, 对其中液体饱和渗流的规律进行了试验研究, 并利用试验结果, 采用自适应神经模糊推理系统 (ANFIS), 建立了根据特征粒径、粒径分布指数和孔隙率预测渗透率和流态指数的 ANFIS 模型。结果表明: 松散破碎介质中的液体饱和渗流满足非 Darcy 指数定律; 所建立的预测渗透率和流态指数的 ANFIS 模型, 能够给出具有足够精度的预测结果, 这为渗透率和流态指数的预测开辟了新的途径。

**关键词:** 松散破碎介质; 液体饱和渗流; 自适应神经模糊推理系统; 渗透率; 流态指数

中图分类号: O359 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)02-0180-05

**作者简介:** 丁德馨(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程灾害预测与控制研究。E-mail: dingdxzz@163.com。

## Regularities for saturated water seepage in loose fragmented medium

DING De-xin<sup>1</sup>, LI Guang-yue<sup>1,2</sup>, XU Wen-ping<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-jun<sup>1</sup>, RAO Long<sup>1,2</sup>

(1. School of Nuclear Resources and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** For in-situ leaching of fragmented uranium ore by blasting, the ore heap is constructed by drilling and blasting and is a loose fragmented medium. Its particle size distribution obeys the Rosin-Rammler distribution law, and its characteristic particle size, particle size distribution index and porous ratio vary with the employed blasting techniques and technical parameters. In order to study the regularities for saturated water seepage in the medium, a self-designed apparatus is used to perform tests on seven samples compounded by using the Rosin-Rammler distribution law. And the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is used to establish the ANFIS models for predicting the seepage ratio and flow state index on the basis of the test results. The research results show that the saturated water seepage in the medium is Non-Darcy flow, that the relationship between the seepage velocity and the hydraulic gradient can be described in an exponential function, and the ANFIS models can give highly accurate predictions. It will provide a new approach to the estimation of the seepage ratio and flow state index.

**Key words:** loose fragmented medium; saturated water seepage; ANFIS; seepage ratio; flow state index

## 0 前 言

为了适应我国采铀工业的发展, 铀矿开采科技工作者经过多年攻关, 研发出了原地爆破浸出采铀新工艺<sup>[1-3]</sup>。该项新工艺的工艺过程: 首先在铀矿体埋藏地开挖一定规模的爆破补偿空间, 构筑集液底部结构; 随后采用凿岩爆破技术将铀矿体原地爆破破碎到预定块度, 就地形成待浸矿堆; 接下来在矿堆顶部布置喷淋系统, 向矿堆喷淋溶浸液, 有选择地浸出矿石中的铀金属; 最后通过集液底部结构收集含有铀金属的浸

出液, 输送到地面加工厂, 回收其中的铀金属。

从上述工艺过程可以看出, 铀矿堆具有如下特点: ①由粒径大小不等、形状不规则的矿石颗粒组成; ②矿石颗粒的粒径较大; ③粒级分布不均匀; ④颗粒间不存在联结或只存在弱联结。根据这些特点, 可将铀矿堆抽象为松散破碎介质。

基金项目: 国家自然科学基金项目(10575048); 湖南省教育厅重点资助项目(07A061)

收稿日期: 2008-10-20

从上述工艺过程还可以看出, 矿堆中不仅有溶浸液在流动, 而且还伴随着氦的析出与运移。因此, 为了研究松散破碎介质中氦运移的多相多过程耦合作用, 就必须研究这种介质中液体渗流的规律。

对于破碎岩石中的液体饱和和渗流, 国内外学者已开展了大量的试验和理论研究<sup>[4]</sup>。但这些研究尚未同时考虑破碎岩石的特征粒径、粒径分布指数和孔隙率对液体渗流的影响。原地爆破浸出采场铀矿堆的粒径服从 Rosin-Rammler 分布<sup>[5]</sup>。其颗粒级配由特征粒径和粒径分布指数确定, 其孔隙特征由孔隙率确定。显然, 这些参数将同时影响其中的液体渗流。

原地爆破浸出采场铀矿堆的粒径服从 Rosin-Rammler 分布。但如果所采用的爆破参数和爆破工艺不同, 铀矿堆的级配也就不同, 亦即铀矿堆的特征粒径、粒径分布指数和孔隙率也就不同。

本文根据 Rosin-Rammler 分布, 选配了具有不同颗粒级配的 7 组试样; 采用自制的松散破碎介质液体饱和渗流试验装置<sup>[6]</sup>, 对这 7 组试样的特征粒径、粒径分布指数和孔隙率对其中液体渗流的影响进行了试验研究; 并采用自适应神经模糊推理系统 (ANFIS), 建立了根据特征粒径、粒径分布指数和孔隙率分别预测渗透率和流态指数的 ANFIS 模型。

## 1 试 验

### 1.1 试验材料

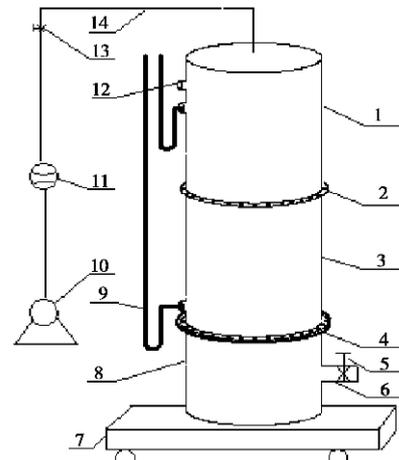
原地爆破浸出采场铀矿堆中最大颗粒的粒径为 150~200 mm。已有研究已证明, 这种大颗粒的松散破碎介质中的渗流为非线性渗流<sup>[7-11]</sup>。对于这种大颗粒松散破碎介质中的渗流, 国内外学者均采用按比例缩小粒径的办法, 在室内开展模拟试验研究, 且遵循如下准则: 所配制的试样的颗粒级配及孔隙率, 能使模拟试验的渗流流态与现场介质的渗流流态一致<sup>[12]</sup>。

本试验即根据上述准则配制试样。试验所用的花岗岩取自湖南衡山花岗岩采石场。花岗岩经破碎后按

0~1 cm、1~2 cm、2~3 cm、3~4 cm、4~5 cm、5~7 cm 的粒径规格进行筛分, 再用 Rosin-Rammler 粒径分布模型, 选配 7 组试样。这 7 组试样的颗粒级配及特征参数如表 1 所示。

### 1.2 试验装置

试验采用自制的松散破碎介质液体饱和渗流试验装置进行。装置的组成如图 1 所示。本试验试样的最大粒径为 7 cm, 根据试验装置的直径为试样最大粒径的 6~8 倍的原则, 将试验装置的直径确定为 0.5 m。为消除边壁效应, 对试验装置内壁做了增糙处理, 处理后装置的有效直径为 0.47 m。为保证试样的高径比大于 3, 装置的总高度确定为 2 m, 装样高 1.5 m。试验装置底部设有透水隔板, 隔板上覆盖一层滤网, 并使隔板的透水能力大于介质的渗流能力。试验的水头由测点的测压管测量, 流量由 LZB 系列转子流量计 11 测量。



1 上试验筒 2 法兰 3 下试验筒 4 隔板 5 排水孔 6 排水孔门 7 磅秤 8 试验筒底座 9 测压管 10 水泵 11 液体流量计 12 溢流孔 13 供水阀门 14 供水管

图 1 松散破碎介质液体饱和和渗流试验装置

Fig. 1 Test devices for water saturation seepage in loose fragmented medium

表 1 7 组试样的粒度级配及特征参数

Table 1 Particle size distribution and characteristic parameters for 7 samples of loose fragmented medium

试样	粒径规格						$d_c$ /cm	$i_d$ /cm	$n$
	0~1 cm	0~2 cm	0~3 cm	0~4 cm	0~5 cm	0~7 cm			
第 1 组	0.5744	0.7389	0.8339	0.8980	0.9453	1	1.3877	0.8092	0.3034
第 2 组	0.4936	0.6659	0.7765	0.8579	0.9224	1	1.8111	0.8915	0.2630
第 3 组	0.3522	0.6575	0.8382	0.9307	0.9738	1	1.9120	1.3410	0.3223
第 4 组	0.3913	0.5976	0.7354	0.8349	0.9105	1	1.9767	1.3923	0.2192
第 5 组	0.2268	0.4603	0.6457	0.7849	0.8866	1	2.8914	1.3908	0.3327
第 6 组	0.4108	0.7042	0.8632	0.9413	0.9774	1	1.7175	1.2424	0.2852
第 7 组	0.2544	0.5415	0.7496	0.8774	0.9480	1	2.3946	1.4662	0.3420

注: 表中  $d_c$  表示特征粒径,  $i_d$  表示粒径分布指数,  $n$  表示孔隙率。



1.3 试验过程

(1) 装样。将试验筒底座置于磅秤上，再将隔板和下试验筒放于底座上，并用法兰将其固定。取配好的试样，称重。将试样分层装入下试验筒，用木锤轻轻捣实。当试样顶面距下试验筒顶面 5 cm 左右时，用法兰将上试验筒与下试验筒相连。继续采用同样的方法装样，直至试样顶面高出上测压孔 10 cm 左右。

(2) 饱和试样。将供水管与排水孔连通，缓缓打开供水阀门，使水从装置底部流入，直至水面与试样面平齐，并让试样浸泡至饱和。

(3) 测定试样孔隙率。试样饱和之后，调节磅秤，读取装置重量。将供水管与排水孔分开，打开排水孔阀门，让水缓缓流出，直至水面达到隔板时，暂停排水，调节磅秤，读取装置重量。计算装置内介质的孔隙率。

(4) 检查装置的密封性能。关闭排水孔阀门，将供水管与排水孔分开，从装置上部注水直至水面与溢流孔平齐。检查测压管是否平齐，如不平齐，应检查装置是否漏水或有气泡存在，调整好后再进行试验。

(5) 液体饱和渗流试验及数据测量。慢慢打开排水孔阀门和供水阀门，使其固定某一流量，让水在试样中发生渗流，此时要保证溢流孔一直有水溢流。待测压管和磅秤读数稳定后，读取测压管的水位高度及流量计的流量，同时测量进水和出水的温度。再同时调节排水孔和进水孔阀门，变更水头差，重复测试工作。

(6) 重复上述步骤，进行下一组试样测试工作，并记录整理试验数据。

2 试验数据的处理

水力梯度  $J$  按下式计算：

$$J = \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

式中  $\Delta h$  为两测点之间的水头差 (m)； $L$  为两测点之间的距离，本装置  $L=1.06$  m。

渗透速度  $V$  按下式计算：

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

式中， $Q$  为渗流量(m<sup>3</sup>/s)， $A$  为装置的横截面积，本装置  $A=0.1735$  m<sup>2</sup>。

7 组试样液体饱和渗流的试验结果见表 2。

2.1 渗透速度与水力梯度的关系

将所获得的 7 组试样的  $V_i, J_i$  值，绘于以  $J$  为横坐标、 $V$  为纵坐标的直角坐标系中，得到图 2 所示的  $V$  随  $J$  而变化的散点图。

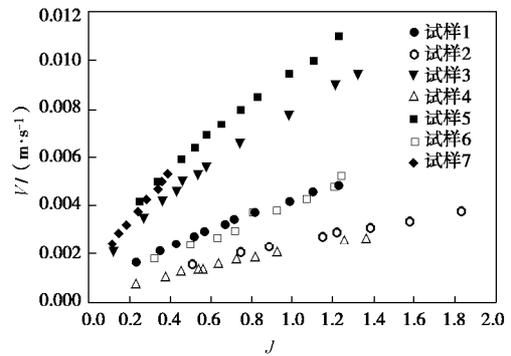


图 2  $V$  随  $J$  而变化的散点图

Fig. 2 Relationship between  $V$  and  $J$

由图 2 可以看出，发生在试验装置中的渗流为非 Darcy 渗流， $V$  与  $J$  呈指数关系<sup>[13-15]</sup>：

$$V = KJ^m \quad (3)$$

式中， $V$  为渗透速度， $K$  为渗透系数， $m$  为流态指数。

对表 2 所列试验数据用最小二乘法进行拟合，求

表 2 7 组试样液体饱和渗流试验结果

Table 2 Test results of water saturation seepage for seven samples

试样	1		2		3		4		5		6		7	
	$V$	$J$	$V$	$J$	$V$	$J$	$V$	$J$	$V$	$J$	$V$	$J$	$V$	$J$
1	0.0160	0.2330	0.0016	0.5110	0.0021	0.1210	0.0008	0.2280	0.0042	0.2490	0.0018	0.3208	0.0021	0.1151
2	0.0021	0.3460	0.0021	0.7470	0.0035	0.2790	0.0011	0.3730	0.0050	0.3350	0.0024	0.4972	0.0029	0.1509
3	0.0024	0.4290	0.0023	0.8890	0.0042	0.3600	0.0013	0.4530	0.0059	0.4520	0.0027	0.6330	0.0032	0.1840
4	0.0027	0.5190	0.0027	1.1470	0.0046	0.4330	0.00136	0.5390	0.0064	0.5150	0.0030	0.7179	0.0038	0.2462
5	0.0029	0.5660	0.0029	1.2180	0.0050	0.4640	0.0014	0.5590	0.0069	0.5820	0.0037	0.8066	0.0042	0.2849
6	0.0032	0.6640	0.0031	1.3820	0.0053	0.5360	0.0016	0.6280	0.0074	0.6520	0.0038	0.9311	0.0046	0.3368
7	0.0034	0.7140	0.0034	1.5750	0.0056	0.5790	0.0018	0.7220	0.0080	0.7500	0.0043	1.0660	0.0050	0.3557
8	0.0037	0.8200	0.0038	1.8280	0.0060	0.7430	0.0019	0.8200	0.0085	0.8270	0.0048	1.2000	0.0052	0.3793
9	0.0042	0.9870	—	—	0.0078	0.9850	0.0021	0.9220	0.0094	0.9900	0.0052	1.2462	0.0053	0.3896
10	0.0045	1.1040	—	—	0.0090	1.2160	0.0026	1.2490	0.0100	1.1060	—	—	—	—
11	0.0048	1.2260	—	—	0.0094	1.3210	0.0027	1.3650	0.0110	1.2270	—	—	—	—

得渗透系数  $K$  和流态指数  $m$ 。

$$k = \frac{Km}{g}, \quad (4)$$

式中,  $k$  为渗透率,  $m$  为水的动力粘度系数 (Pa·s),  $g$  为水的重度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$ ), 通过式 (4) [16] 计算渗透率列于表 3。

表 3 7 组试样的渗透系数、渗透率和流态指数

Table 3 Seepage coefficients, seepage ratios and flow state indices for 7 samples

试样号	$K/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$k/(10^{-10}\text{m}^2)$	$m$
1	0.0042	5.36	1.5074
2	0.0025	2.96	1.4928
3	0.0079	10.08	1.5886
4	0.0022	2.74	1.4399
5	0.0095	11.24	1.6858
6	0.0041	3.86	1.2887
7	0.0097	9.30	1.5366

### 2.2 预测渗透率的 ANFIS 模型

以松散破碎介质的颗粒级配特征参数  $d_c$ ,  $i_d$  及孔隙特征参数  $n$  为输入, 以渗透率  $k$  为输出, 构建数据对。采用 6 个数据对, 对自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 进行训练, 得到了预测渗透率的 ANFIS 模型, 如图 3 所示。

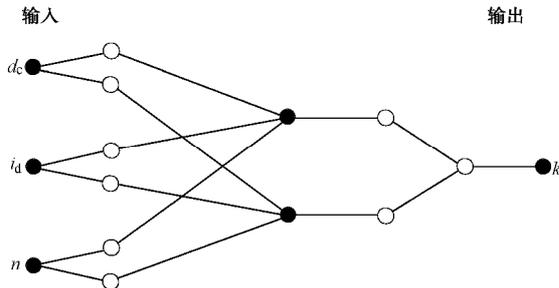


图 3 预测渗透率  $k$  的 ANFIS 模型

Fig. 3 ANFIS model for predicting seepage ratio  $k$

ANFIS 模型的训练误差的变化过程如图 4 所示。采用所建立的 ANFIS 模型对试验结果进行了预测, 预测值  $2.6840 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  与试验值  $2.96 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  的相对误差为 9.3227%。

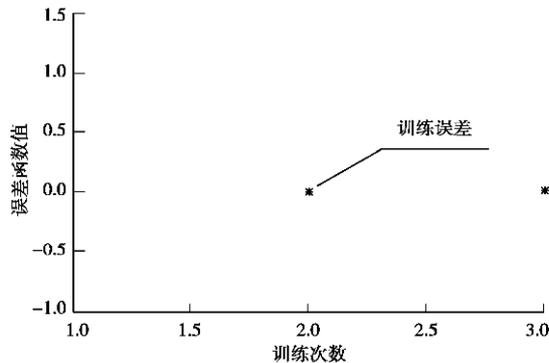


图 4 ANFIS 模型训练误差的变化

Fig. 4 Error variation of ANFIS model during training

### 2.3 预测流态指数的 ANFIS 模型

以松散破碎介质的颗粒级配特征参数  $d_c$ ,  $i_d$  及孔隙特征参数  $n$  为输入, 以流态指数  $m$  为输出, 构建数据对。采用 6 个数据对, 对自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 进行训练, 得到了预测渗透率的 ANFIS 模型, 如图 5 所示。

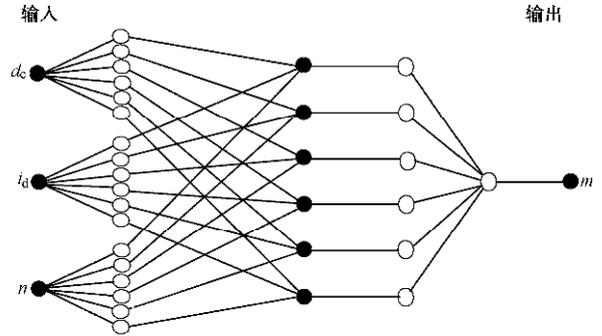


图 5 预测流态指数  $m$  的 ANFIS 模型

Fig. 5 ANFIS model for predicting flow state index  $m$

模型训练误差的变化情况如图 6 所示。

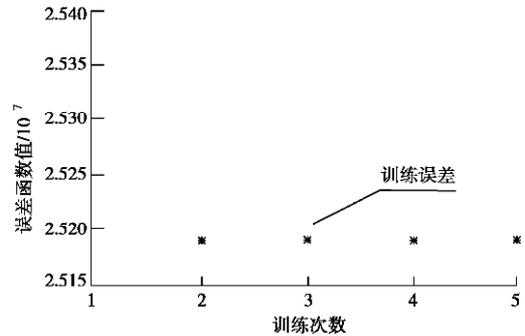


图 6 ANFIS 模型训练误差的变化

Fig. 6 Error variation of ANFIS model during training

采用训练后的模型对试验结果进行了预测, 试验值为 1.4928, 预测值为 1.6536, 相对误差为 10.7695%。

## 3 结 论

(1) 松散破碎介质中的液体饱和和渗流不再是 Darcy 流, 其渗流速度和水力梯度之间呈指数关系, 流态指数 1.2~1.7, 属过渡流。

(2) 松散破碎介质的渗透率与其特征粒径、粒径分布指数和孔隙率之间的关系, 以及流态指数与其特征粒径、粒径分布指数和孔隙率的关系, 为高度非线性关系, 难以采用传统的数学、力学方法描述。

(3) 采用自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 建立的根据松散破碎介质的特征粒径、粒径分布指数和孔隙率预测其渗透率和流态指数的 ANFIS 模型, 其预测精度高达 90%, 可以满足工程应用的要求, 这为渗透率和流态指数的预测开辟了新的途径。

## 参考文献:

- [1] 丁德馨, 邹国和. 低品位铀矿床留矿 - 原地浸出试验研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1998. (DING De-xin, ZOU Guo-he. A case study of shrinkage-in place leaching of low grade uranium ore deposit[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998. (in Chinese))
- [2] 丁德馨, 杨仕教, 李明. 745 矿原地爆破破碎浸铀矿块底部结构的设计与施工[M]. 北京: 原子能出版社, 1998. (DING De-xin, YANG Shi-jiao, LI Ming. The design and construction of the bottom working for in-situ leaching of fragmented uranium ore by blasting in No. 745 Mine[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998. (in Chinese))
- [3] 潘英杰. 浅谈原地爆破浸出矿井通风防护问题[J]. 铀矿冶, 2005, **24**(2): 99 - 103. (PAN Ying-jie. Discussion on ventilation and protection of uranium mines with stope leaching process[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, **24**(2): 99 - 103. (in Chinese))
- [4] 李顺才, 陈占清, 缪协兴, 等. 破碎岩体渗流的试验及理论研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, **27**(3): 37 - 43. (LI Shun-cai, CHEN Zhan-qing, MIAO Xie-xing, et al. Summarization on the experimental and theoretical researches of the vadose in broken lithosome[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, **27**(3): 37 - 43. (in Chinese))
- [5] 钟永明, 李秦, 谢国森, 等. 原地爆破浸出采铀矿石块度分布的优化[J]. 中国矿业, 2003, **12**(12): 47 - 48. (ZHONG Yong-ming, LI Qin, XIE Guo-sen, et al. Optimization of ore size distribution for stope in-place blasting and leaching of uranium[J]. China Mining Magazine, 2003, **12**(12): 47 - 48. (in Chinese))
- [6] 丁德馨, 李广悦, 饶龙, 等. 松散破碎介质多功能渗流试验装置: 中国, 200810143109.5[P]. 2008. (DING De-xin, LI Guang-yue, RAO Long, et al. A multifunctional testing device for seepage in loose fragmented medium: China, 200810143109.5[P]. 2008. (in Chinese))
- [7] 刘卫群. 破碎岩体渗流理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2002. (LIU Wei-qun. Studies on seepage theory in overbroken rock mass and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2002. (in Chinese))
- [8] 马占国. 采空区破碎岩体中水渗流特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003. (MA Zhan-guo. Studies on seepage theory in overbroken rock mass in goaf[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2002. (in Chinese))
- [9] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1385 - 1388. (HUANG Xian-wu, TANG Ping, MIAO Xie-xing, et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1385 - 1388. (in Chinese))
- [10] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, **23**(2): 11 - 13. (SUN Ming-gui, LI Tian-zhen, HUANG Xian-wu, et al. Penetrating properties of non-Darcy flow in fragmentized rocks[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2003, **23**(2): 11 - 13. (in Chinese))
- [11] 徐天有, 张晓宏, 孟向一. 堆石体渗透规律的试验研究[J]. 水利学报, 1998(增): 80 - 83. (XU Tian-you, ZHANG Xiao-hong, MENG Xiang-yi. Analysis on seepage property of rock fill mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(S): 80 - 83. (in Chinese))
- [12] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997. (ZHUANG Li-xian, YIN Xie-yuan, MA Hui-yang. Fluid mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997. (in Chinese))
- [13] JOHNSON H A. Flow through rockfill dam[J]. ASCE Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1971, **97**(SM2): 329 - 340.
- [14] WINKLINS J K. Flow of water through rockfill and its application to the design of dams[C]// Proc 2nd Austr Nz Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Zealand, 1956: 141 - 149.
- [15] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, **25**(6): 950 - 954. (QIU Xian-de, YAN Zong-ling, LIU Li. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rock fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(6): 950 - 954. (in Chinese))
- [16] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. (KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluid in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999. (in Chinese))