

# 混合破碎岩样渗透特性试验研究

张天军<sup>1</sup>,任金虎<sup>1</sup>,陈占清<sup>2,3</sup>,于胜红<sup>1</sup>,张磊<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**为研究混合破碎岩体内流体渗透规律,利用一套由液压泵、渗透仪以及DDL 600电子万能试验机等构成的破碎岩样渗透试验系统进行了混合破碎岩样渗透特性测定,分析了混合破碎岩样与单种破碎岩样渗透特性的差异.研究表明:混合破碎岩样较单种破碎岩样的非Darcy流特性更显著;随着孔隙度的增加,单种岩样较混合岩样渗透率的变化幅度大,且相同粒径不同岩性岩样的渗透率变化程度和变化趋势呈现较大差异;随着孔隙度的增加,混合岩样的非Darcy流 $\beta$ 因子显现减小趋势,且混合岩样较其单种岩样非Darcy流 $\beta$ 因子的大小因粒径不同而不同.

**关键词:**混合破碎岩样;渗透特性;渗流速度;孔隙度;压力梯度

**中图分类号:**TU 452      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2014)03-0001-05

## Experimental study on the permeability characteristics of mixed broken rock sample

ZHANG Tianjun<sup>1</sup>, REN Jinhui<sup>1</sup>, CHEN Zhanqing<sup>2,3</sup>, YU Shenghong<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** For the seepage law research of fluid in a mixed broken rock mass, a broken rock penetration test system composed of a hydraulic pump, a permeameter and a DDL 600 electronic universal testing machine was used to test mix broken rock permeability properties, and the difference infiltration characteristics were analyzed between a mixed broken rock sample and a single sample. Research shows that the non Darcy flow characteristics of Mixed broken rock sample is more obvious than single broken rock sample, with the increase of porosity, variations in the permeability of single samples are bigger than mixed samples, and the same particle size of different lithology rock permeability variation degree and the change trend appear bigger difference, with the increase of porosity, mixed sample of non Darcy  $\beta$  flow factor show decreasing trend, and on the basis of different particle size, the mixed sample of non Darcy  $\beta$  flow factor is not necessarily greater than the single sample.

**Key words:** mixed broken rock sample; permeability characteristics; seepage velocity; porosity; pressure gradient

破碎岩体分为原位破碎岩体和堆积破碎岩体两类<sup>[1]</sup>,其中,深部堆积破碎岩体往往承受较高的

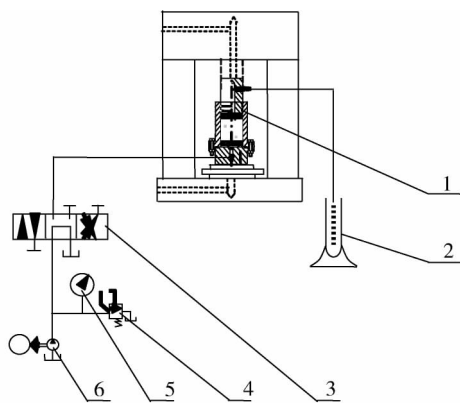
轴压、围压以及孔隙水压力,且这些具有残余强度的破碎岩体在压实过程中孔隙率减少的同时,固体

颗粒存在进一步的破碎现象<sup>[2]</sup>. 为研究深部堆积破碎岩体的流固耦合渗透规律, 众多学者针对破碎岩样开展了实验室试验研究工作.

孙明贵<sup>[3]</sup>得到了破碎岩石压实过程中载荷、颗粒直径与非 Darcy 流渗透特性的回归关系; 马占国<sup>[4-6]</sup>利用载荷控制法, 从有效应力随渗透压力波动, 孔隙度随时间变化的角度测试了破碎岩石的渗透特性; 李顺才<sup>[7-9]</sup>利用孔隙度控制法, 从岩样轴向总应力和有效应力均随时间变化的角度测试了破碎岩石的渗透特性. 以上文献, 尚未考虑混合破碎岩样的渗透特性及其与单岩样渗透特性的差异. 在实际工程中, 堆积岩体往往是多种岩性岩样的混合物, 因此混合破碎岩样渗透特性的研究具有重要意义.

## 1 试验原理及方法

岩样的渗透试验通常有 2 种方法: 瞬态渗透法和稳态渗透法<sup>[10]</sup>. 图 1 为由液压泵、渗透仪以及 DDL 600 电子万能试验机等构成的破碎岩样渗透试验系统, 本文利用该装置, 运用稳态渗透法研究混合破碎岩样的渗透特性.



1. 渗透仪; 2. 量杯; 3. 换向阀; 4. 溢流阀; 5. 压力表;

6. 液压泵

图 1 破碎岩样渗透试验系统

试验采用砂岩、泥岩和砾石等 3 种岩样. 岩样破碎后, 用网孔直径分别为 2.5, 5, 10 和 13 mm 的筛子进行不同粒径区间分离. 将同一岩性不同粒径区间的破碎岩样分别编号, 如砂岩 1: 粒径 0~2.5 mm, 砂岩 2: 粒径 2.5~5 mm, 砂岩 3: 粒径 5~10 mm, 砂岩 4: 粒径 10~13 mm, 砂岩 5: 粒径 0~13 mm (砂岩 1, 2, 3, 4 按 1:1:1:1 的质量比混合), 再

取同一粒径不同岩性的破碎岩样依据 1:1 的质量比两两混合编号, 如砂泥混 1: 粒径 0~2.5 mm (粒径为 0~2.5 mm 的破碎砂岩和泥岩以 1:1 的质量比混合), 然后取同一粒径的 3 种岩性破碎岩样依据 1:1:1 的质量比混合编号, 如三岩混 1: 粒径 0~2.5 mm (粒径为 0~2.5 mm 的 3 种破碎岩样以 1:1:1 的质量比混合).

试验时, 称取质量  $m$  的样品, 用渗透液冲洗使其初步饱和, 再将样品装入渗透仪内, 按图 1 连接好测试系统. 为了使加载压头与活塞接触, 先加较小的初始载荷<sup>[11]</sup>, 测量此时活塞露出缸筒的部分和缸筒的总高度  $H_1$ , 然后开启渗透液循环系统, 使岩样充分饱和. 依据岩心密度  $\rho$ 、样品质量  $m$ 、总高度  $H_1$  和渗透仪的固定尺寸可得样品的孔隙度:

$$\varphi_0 = \frac{V_g^0 - V_r}{V_g^0} \quad (1)$$

式中,  $V_g^0$  为岩样破碎后的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_r$  为岩样破碎前的体积,  $\text{m}^3$ .

调节活塞向下轴向位移  $S$  到设定值 (本文设定 5 级, 分别为 4, 8, 10, 12, 14 mm), 分别调节孔隙压力  $p_1$  到设定的 4 级压力 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa), 测定每级压力所对应的流量  $Q$  和岩样所受压力  $F$ , 然后将压头加压到设定的下一个位移, 直到完成 5 级轴向位移后, 换样品, 进行下一样品的渗透试验.

渗流速度可以通过流量  $Q$  得到:

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d_p^2} \quad (2)$$

式中,  $d_p$  为活塞直径, m.

由孔隙压力  $p_1$ , 可得压力梯度:

$$G_p = \frac{p_2 - p_1}{h} \quad (3)$$

式中,  $p_2$  为渗透仪上端的压力, Pa;  $h$  为岩样高度, m. 因渗透仪上端连通大气, 故  $p_2 = 0$ .

以渗流速度  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 和对应的压力梯度  $G_p^i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为横纵坐标绘图. 用二次多项式拟合的趋势线方程一次项系数为  $-\frac{\mu}{k}$ , 二次项系数为  $-\rho\beta$ <sup>[7]</sup>, 其中,  $\mu$  为动力粘度,  $k$  为破碎岩样渗透率,  $\rho$  为液体质量密度,  $\beta$  为非 Darcy 流因子.

实验中, 渗透岩样的重力和孔隙压力呈线性分布, 由奥地利太沙基有效应力原理可得:

$$\sigma_e = \frac{F}{A} + \frac{mgz}{AH} - \frac{p_1 z}{H} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_e$  为岩样的有效应力, Pa;  $F$  为活塞所施压力, N;  $A$  为渗透岩石的横截面积,  $m^2$ ;  $m$  为渗透岩样的质量, kg;  $z$  为截面至渗透岩样上端面距离, m;  $H$  为渗透岩样高度, m;  $p_1$  为渗透岩样下端压力, Pa.

## 2 试验结果与现象分析

### 2.1 同一粒径岩样之间的渗透性

以粒径为 2.5~5.0 mm 的岩样为例, 用二次多项式拟合其渗流速度 - 压力梯度, 相关系数  $R^2$  见表 1.

表 1 粒径为 2.5~5.0 mm 的岩样相关系数

轴向位 移/mm	相关系数 $R^2$						
	砂岩	泥岩	矸石	砂泥混	砂矸混	泥矸混	三岩混
4	0.951	0.955	0.970	0.898	0.875	0.874	0.998
8	0.911	0.734	0.888	0.989	0.978	0.943	0.976
10	0.931	0.970	0.991	0.983	0.977	0.995	0.988
12	0.872	0.998	0.945	0.967	0.984	0.995	0.983
14	0.778	0.991	0.973	0.986	0.968	0.999	0.959
平均值	0.889	0.930	0.953	0.965	0.956	0.961	0.981

### 2.2 单种岩样和混合岩样的渗透参量

对每种粒径的岩样进行渗透试验, 得到图 2 和图 3 所示的各粒径区间岩样渗透率 - 孔隙度曲线和非 Darcy 流  $\beta$  因子 - 孔隙度曲线.

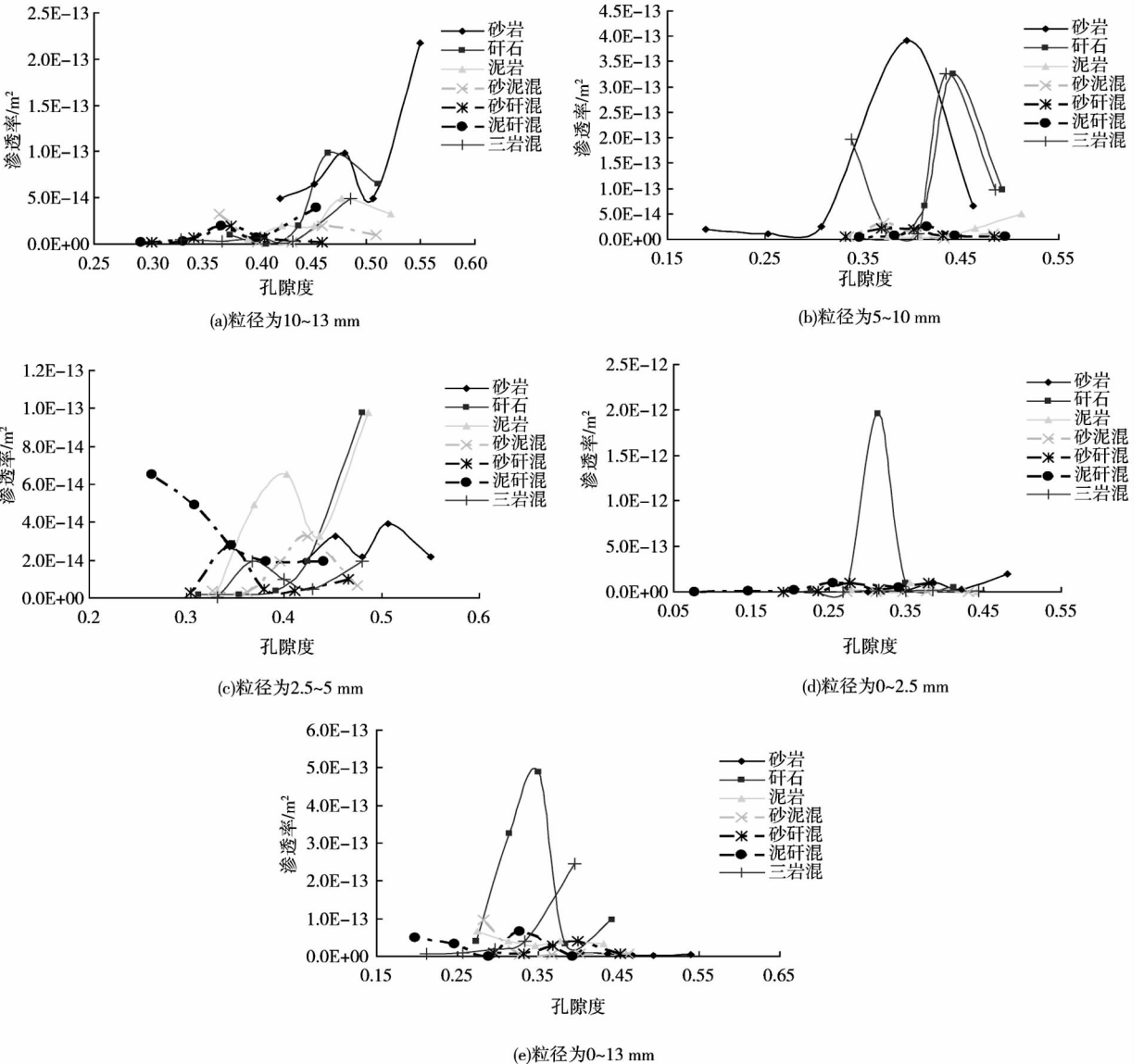


图 2 不同粒径的渗透率 - 孔隙度曲线

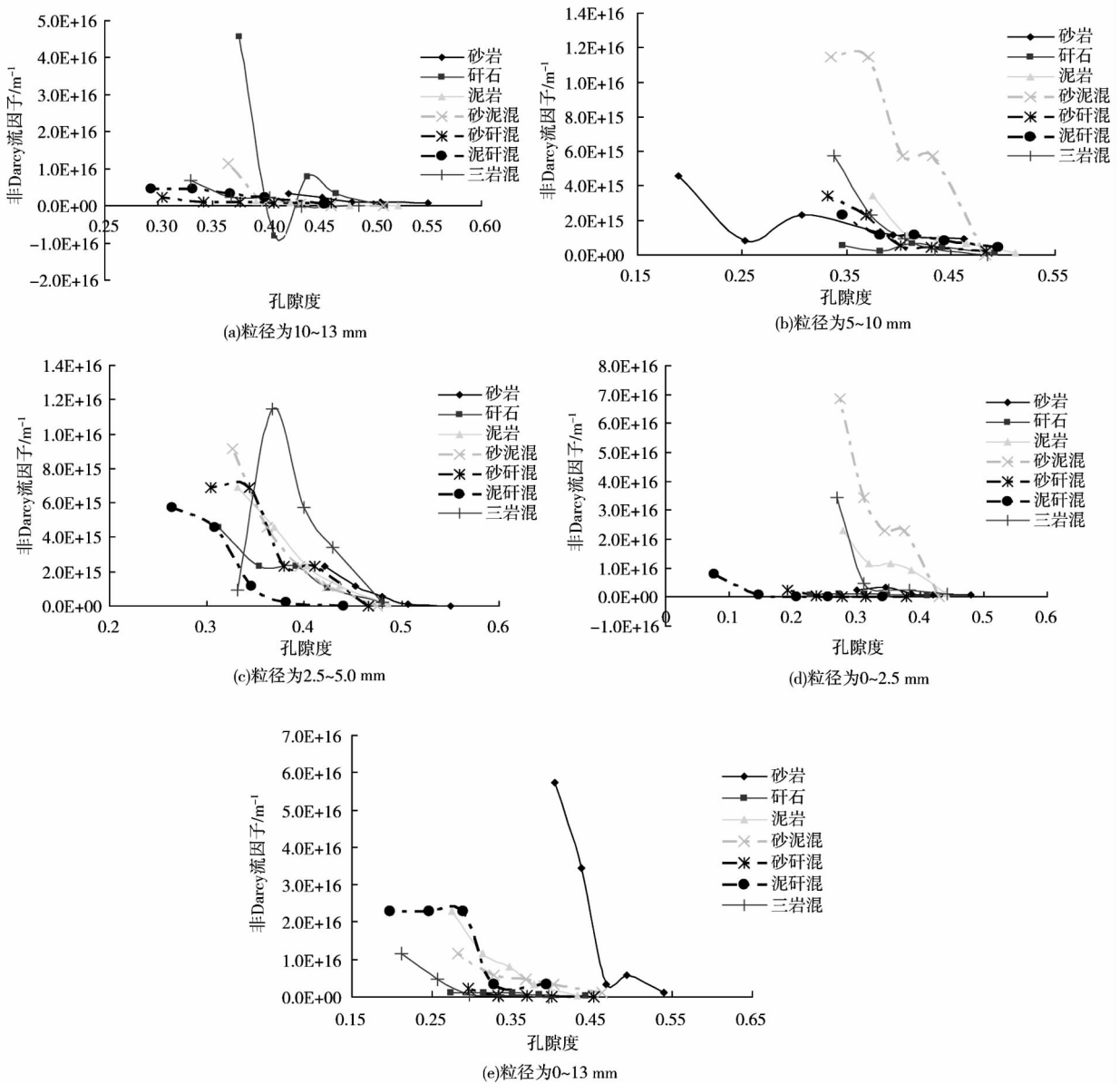


图3 不同粒径的非Darcy流因子-孔隙度曲线

### 2.3 试验现象与分析

由试验过程及结果可观察到如下现象:

1) 由表1发现,同种粒径破碎岩样混合后较单种破碎岩样的相关系数  $R^2$  平均值大,即混合破碎岩样较单种破碎岩样的非Darcy流特性更显著。

2) 如图2所示,破碎岩样处于同种粒径时(即图2的每个分图中),两两岩样混合的渗透率-孔隙度曲线呈现较为平缓的变化趋势,且3种岩样混合较两两岩样混合的渗透率-孔隙度曲线波动剧烈。

3) 随着孔隙度的增加,3种单岩样的渗透率值较混合岩样渗透率值大,且随着孔隙度的增加,单种岩样较混合岩样渗透率变化幅度较大。例如图2

中砂岩和矽石的孔隙度-渗透率曲线均较高,且波动较大,但砂岩和矽石混合后的孔隙度-渗透率曲线较低,且变化较为平缓。

4) 相同粒径的不同岩样,随着孔隙度的增加,不同岩性岩样的渗透率变化程度和变化趋势呈现较大差异。在图2中,当粒径较大(粒径为10~13 mm)时,随着孔隙度的增加,砂岩和矽石的渗透率呈现增长趋势,而其它岩性岩样的渗透率变化较为平缓,且大小相差不大;当粒径处于5.0~10 mm时,随着孔隙度的增加,砂岩、矽石和3种岩样混合的渗透率变化很大,而其它岩性岩样趋于平缓;当粒径处于2.5~5.0 mm时,7种岩性岩样的孔隙度-渗透率曲线均有较大波动;当岩样处于0~2.5

mm 和级配时,随着孔隙度的增加,砾石的渗透率变化很大,而其它岩性岩样的渗透率变化平缓。

5)随着孔隙度的增加,单岩样和混合岩样的非 Darcy 流  $\beta$  因子虽变化幅度相差较大,但均显现减小趋势。如图 3,不同粒径不同岩性单岩样和混合岩样的孔隙度 - 非 Darcy 流  $\beta$  因子曲线整体呈现下降趋势。

6)由图 3(a)可得,同种粒径下(粒径为 10 ~ 13 mm),非 Darcy 流  $\beta$  因子出现负值的单岩样与其它岩性岩样混合后负值现象<sup>[7]</sup>可能消失;在图 3(d)中,同种粒径下(粒径为 0 ~ 2.5 mm),不出现非 Darcy 流  $\beta$  因子为负值的单岩样与其它岩性岩样混合后负值现象可能显现。

7)混合岩样非 Darcy 流  $\beta$  因子较其单种岩样非 Darcy 流  $\beta$  因子大小因粒径不同而不同。当粒径处于 10 ~ 13 mm 时,砂岩和泥岩混合后的非 Darcy 流  $\beta$  因子处于砂岩和泥岩各自的非 Darcy 流  $\beta$  因子之间(如图 3(a));当粒径处于 5 ~ 10 mm 时,砂岩和泥岩混合后的非 Darcy 流  $\beta$  因子大于砂岩和泥岩各自的非 Darcy 流  $\beta$  因子(如图 3(b));当粒径处于 0 ~ 13 mm 时,砂岩和泥岩混合后的非 Darcy 流  $\beta$  因子小于砂岩和泥岩各自的非 Darcy 流  $\beta$  因子(如图 3(e))。

### 3 结论

1)混合破碎岩样较单种破碎岩样的非 Darcy 流特性更显著。

2)随着孔隙度的增加,单种岩样较混合岩样渗透率的变化幅度大。

3)相同粒径的不同岩样,随着孔隙度的增加,不同岩性岩样的渗透率变化程度和变化趋势呈现较大差异。

4)随着孔隙度的增加,混合岩样的非 Darcy 流  $\beta$  因子显现减小趋势,且混合岩样较其单种岩样非 Darcy 流  $\beta$  因子大小因粒径不同而不同。

### 参考文献:

- [1] 刘卫群. 破碎岩体的渗流理论及其应用研究[D]. 北京:中国矿业大学,2002.
- [2] 陈占清,李顺才,浦海,等. 采动岩体蠕变与渗流耦合动力学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 孙明贵,李天珍,黄先伍,等. 破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报,2003,23(2):11-13.
- [4] 李天珍,李玉寿,马占国. 破裂岩石非达西渗流的试验研究[J]. 工程力学,2003,20(4):132-135.
- [5] Ma Z G, Miao X X, Zhang F, et al. Experimental study into permeability of broken mudstone [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,17(2):147-151.
- [6] 马占国,缪协兴,陈占清,等. 破碎煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(4):985-988.
- [7] 李顺才,缪协兴,陈占清,等. 承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 工程力学,2008,25(4):85-92.
- [8] 李顺才,陈占清,缪协兴,等. 破碎岩体流固耦合渗流的分岔[J]. 煤炭学报,2008,33(7):754-759.
- [9] 李顺才,陈占清,缪协兴,等. 饱和破碎砂岩随时间变形 - 渗流特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):542-547.
- [10] 缪协兴,刘卫群,陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [11] 李树刚,张天军,陈占清,等. 高瓦斯矿煤样非 Darcy 流的 MTS 渗透性试验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2008,23(3):1-4.