

Numerical Experimental Research of Equivalent Seepage Characteristic for Fractured Porous Media*

Yaoyao He¹, Jianjun Liu²

¹Department of Urban Construction, Huazhong University of Technology Wuchang Branch, Wuhan

²School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu

Email: whgoodman@tom.com

Received: Sep. 25th, 2011; revised: Oct. 28th, 2011; accepted: Nov. 3rd, 2011.

Abstract: The influencing factors of effective permeability have been a difficult point in studying seepage characteristic of pore-fissure media. In order to investigate the seepage characteristic for pore-fissure media, considering the coupling of fluid mechanics and seepage mechanics, the numerical experimental was made and solved for Comsol Multiphysics with FEM (finite element). Based on the numerical experimental results, the paper discussed the relationship among the horizontal effective permeability of pore-fissure media, the width and angle of the fracture. The results shown: 1) The velocity in fissures was $10^4 - 10^7$ times faster than in pores. The width of the fracture played a leading role in horizontal effective permeability of pore-fissure media; 2) The angle between the fracture and the pressure gradient bigger, the horizontal effective permeability smaller. The decrease was the most obvious from 40° to 45° ; 3) The pressure gradient had little impact on the horizontal effective permeability.

Keywords: Pore-Fissure Media; Effective Permeability; Coupling Effect; Numerical Experiment

裂隙 - 孔隙介质等效渗透率的数值试验研究*

贺瑶瑶¹, 刘建军²

¹华中科技大学武昌分校城市建设系, 武汉

²西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都

Email: liujj0906@163.com

收稿日期: 2011年9月25日; 修回日期: 2011年10月28日; 录用日期: 2011年11月3日

摘要: 等效渗透率的影响因素一直是裂隙 - 孔隙双重介质渗透性研究中的难点。为了更好地研究裂隙 - 孔隙多孔介质的渗透特性, 基于流体力学、渗流力学耦合作用原理, 建立了裂隙 - 孔隙双重介质数学模型, 得到了双重介质等效渗透率的计算公式。利用 Comsol Multiphysics 计算方法, 研究了裂隙宽度、裂隙与压力梯度作用面角度及压力梯度对双重介质水平等效渗透率的影响规律。计算结果表明: 1) 裂隙中的流速是孔隙中流速的 $10^4 \sim 10^7$ 倍, 裂隙宽度对水平等效渗透率的影响最大, 起主导作用; 2) 水平等效渗透率随裂隙与压力梯度作用面角度的增大而减小, 从 40° 至 45° 之间减小的最为明显; 3) 水平等效渗透率随压力梯度的增大而略有减小, 压力梯度的大小对水平等效渗透率的影响不大。

关键词: 裂隙-孔隙介质; 等效渗透率; 耦合作用; 数值分析

1. 引言

裂隙-孔隙介质是广泛存在于自然界中的一类多孔介质, 在石油开采、大坝稳定、核废料泄漏中都有广泛的应用。由于多孔介质结构的复杂性, 在研究过程中, 往往需要利用多孔介质等效渗透率, 而裂隙-

孔隙介质等效渗透率大小不但与多孔介质和流体的性质有关, 还与裂隙宽度、裂隙与压力梯度作用面角度以及压力梯度等因素密切相关^[1,2]。为了更好地研究裂隙-孔隙多孔介质的渗透特性, 建立双重介质数学模型, 得到了等效渗透率的计算公式; 利用数值计算方法, 研究了裂隙宽度、裂隙与压力梯度作用面角度及

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (50874082) 资助。

压力梯度对水平等效渗透率的影响规律。计算结果可为石油开采、大坝稳定、核废料泄漏等问题的解决提供基本理论依据。

2. 裂隙 - 孔隙介质渗流数学模型

如图 1 所示的计算模型,为二维的裂隙-孔隙多孔介质,其中连通的区间表示裂隙,正方形的区间表示孔隙介质,裂隙和孔隙中的流体为不可压缩流体,由流体力学分析理论知,裂隙中的流动为层流,满足 N-S 方程,孔隙中的流动为微观渗流,满足达西定律^[3,4]。由于问题的微观性,忽略自重的影响,则 N-S 方程、连续性方程为:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} 为速度向量; ρ 为流体密度; p 为压力; \mathbf{I} 为单位矩阵; μ 为动力粘度。

假定流体宏观渗流仍遵守达西定律,其平均流速可用达西定律表示为:

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dl} \quad (3)$$

式中, K 为孔隙中的渗透率, dP/dl 为压力梯度。

计算所采用的边界条件为: 进出口边界上压力已知,且压力梯度为已知常数,单位是 Pa/m,水平方向; 两侧边界上为对称边界条件; 在固体颗粒表面上流速为 0。即:

$$\text{进口边界: } p = p_0, \quad \mathbf{n} \cdot \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) = 0$$

$$\text{出口边界: } p = p_1, \quad \mathbf{n} \cdot \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) = 0$$

计算参数为流体密度 $\rho = 1 \text{ e}^{-6} \mu\text{g}/\mu\text{m}^{-3}$, 动力粘度 $\mu = 1 \mu\text{g} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

采用有限元的方法利用 Comsol Multiphysics 非线性求解器解 N-S 方程^[5,6]。

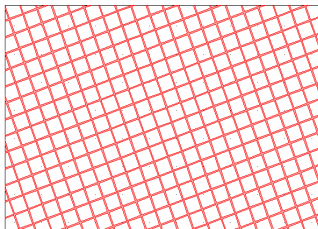


Figure 1. Mathematical model of fractured porous media
图 1. 裂隙 - 孔隙介质微观结构模型

图 2 为裂隙与压力梯度作用面的角度为 20°, 压力梯度为 1MPa 时,速度场的计算云图,讲流速对右侧出口边界积分可得单位厚度介质的流量 Q ,再由达西定律可计算出该模型的水平等效渗透率为:

$$K_e = \frac{Q\mu}{b \cdot \frac{dP}{dl}} \quad (4)$$

3. 裂缝宽度对水平等效渗透率的影响

裂隙宽度对水平等效渗透率的影响是三个影响因素中最为显著的一个。如图 3 所示为压力梯度分别为 0.5 MPa 与 0.05 MPa 时,等效渗透率与裂隙宽度的曲线图。当裂隙宽度为 10 μm 时,水平等效渗透率为 0.000564 μm^2 ; 裂隙宽度为 100 μm ,水平等效渗透率为 75.1 μm^2 ,呈指数关系增大的趋势。

4. 裂缝角度对水平等效渗透率的影响

裂隙与压力梯度作用面的角度对水平等效渗透率的影响如图 4 所示,当裂隙方向与压力梯度作用面一致(即裂隙与压力梯度作用面的角度为 0°)时,水平等效渗透率最大,此时压力梯度对水平等效渗透率的影响较小,当裂隙方向与压力梯度作用面方向从 40°变为 45°时,水平等效渗透率减少的最快,大约减少 30 μm^2 ,而从 0°变为 45°时共减少约 40 μm^2 。在本模型中,

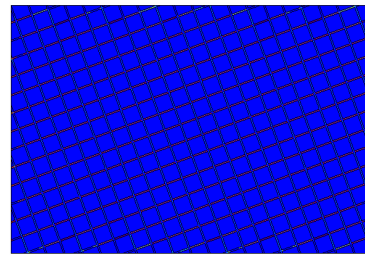


Figure 2. Nephogram of velocity field in fracture
图 2. 流速场云图

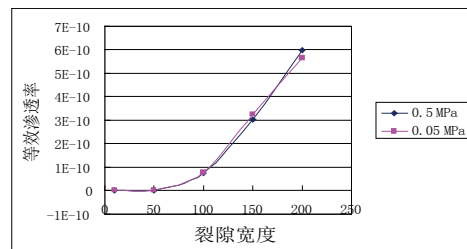


Figure 3. The relationship between effective permeability and the width of fracture
图 3. 等效渗透率和裂隙角度关系曲线

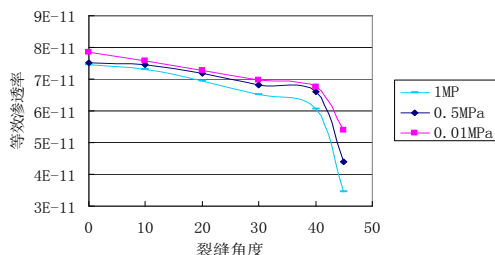


Figure 4. The relationship between effective permeability and angle
图 4. 等效渗透率和裂隙角度关系曲线

压力梯度是促使流体在多孔介质内流动的主要动力, 当裂隙与压力梯度作用方向一致时, 水平等效渗透率最大; 当裂隙与压力梯度作用面有一定角度时, 出现垂直等效渗透率, 根据能量守恒的原理, 垂直等效渗透率增大, 水平等效渗透率降低。另一个影响因素就是当裂隙与压力梯度作用面出现角度时, 由于启动速度较小, 在左边的孔隙介质的裂隙中出现滞留区(如图 5 所示), 使裂隙中流速减慢。当角度 $\leq 40^\circ$ 时(如图 2, 角度为 20°), 滞留区不明显, 对速度的影响也不明显, 但是到 45° 时变得较为明显。由此可见, 裂隙与压力梯度作用面的角度对水平等效渗透率的影响较大。

5. 压力梯度对水平等效渗透率的影响

图 6 是流体通过水平裂缝(裂隙与压力梯度作用面的角度为 0°), 裂缝宽度为 $100 \mu\text{m}$ 时, 不同压力梯度的多孔介质通过数值计算得出的结果。结果表明, 在不同压力梯度下, 水平等效渗透率呈指数关系降低, 但仅仅只是从 $78.37 \mu\text{m}^2$ 降至 $74.39 \mu\text{m}^2$, 减少值仅为 $4 \mu\text{m}^2$, 降低趋势不明显。主要原因是, 在裂隙宽度为微米级的情况下, 随着压力梯度的增大, 裂隙主流线两侧的孔隙成为滞留区, 反过来阻碍流体的流动, 导致多孔介质的水平等效渗透率的降低。压力梯度对水平等效渗透率的影响是外在的, 故在达到 0.8MPa 以后, 对水平等效渗透率的影响可以忽略不计。

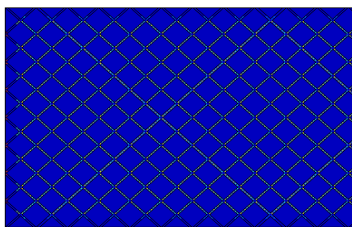


Figure 5. Nephogram of velocity field in fracture
图 5. 流速场云图

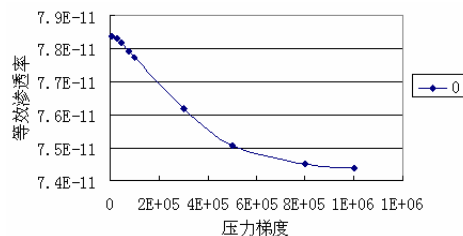


Figure 6. The relationship between effective permeability and pressure gradient
图 6. 等效渗透率和压力梯度关系曲线

6. 结论

1) 流体在连通裂隙中的流速远远大于孔隙中的流动, 裂隙中的流速是孔隙中流速的 104 倍~107 倍, 裂隙宽度对水平等效渗透率的影响最大, 起主导作用。

2) 由水平等效渗透率与裂隙角度、压力梯度的关系曲线可知, 水平等效渗透率随裂隙与压力梯度作用面角度的增大而明显增大, 裂隙与压力梯度作用面角度对双重介质等效渗透率影响次之; 水平等效渗透率随压力梯度的增大而略有减小, 压力梯度对水平等效渗透率的影响不大。

3) 本文仅选取了影响双重介质等效渗透率的三个主要因素进行比较, 忽略了其他因素的影响, 有必要做进一步的研究, 得出对水平等效渗透率影响的更合理规律, 从而为油田开采、大坝防渗、核废料泄漏等领域中等效渗透率参数的确定提供基本理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 刘建军, 刘先贵, 冯夏庭. 裂缝 - 孔隙介质油、水两相微观渗流物理模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1646-1650.
- [2] 向阳, 向丹, 黄大志. 裂缝 - 孔隙型双重介质应力敏感模拟试验研究[J]. 石油实验质, 2003, 25(5): 498-500.
- [3] Kuwahara Fujio, Takahiro Umemoto and Nakayama Akira. A macroscopic momentum equation for flow in porous media of dual Structure. Proceeding of Japan Chemical Society, 2000, 26(6): 837-841.
- [4] Jianjun Liu, Yoshihiko Sano and Akira Nakayama. A simple mathematical model for determining the equivalent permeability of fractured porous media. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(3): 220-224.
- [5] J. J. Liu, L. Q. Dai and S. T. Li. Numerical simulation of microcosmic flow in porous media. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(5): 680-682.
- [6] L. Y. Ye, J. J. Liu, Q. Xue, et al. Numerical simulation of microcosmic flow in fracture-cavity carbonate reservoir based on N-S equation. Journal of China University of Geosciences, 2007, 18(S1): 520-528.