

低渗透微尺度孔隙气体渗流规律及运动定律¹⁾

邓英尔^{*,**} 谢和平^{*} 黄润秋^{**} 刘慈群[†]

^{*}(四川大学工程科学与灾害力学研究所, 成都 610064)

^{**}(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059)

[†](中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065000)

摘要 微尺度条件下气体流动特性的研究是现代渗流力学前沿领域之一。分析了低渗透岩石饱和气体渗流实验结果, 探索了微尺度孔隙气体渗流规律, 探讨了气体非线性渗流力学机理, 发现了低渗透岩石微尺度孔隙气体与液体渗流遵循同一形式的运动定律, 建立了气体与液体非线性运动定律统一模型。结果表明: 新模型与实验结果吻合很好, 为微尺度孔隙气体微流动特性研究提供了新的理论依据, 对工程地质环境保护及地下流体资源开发有重要指导意义。

关键词 低渗透介质, 微尺度, 流动机理, 非线性渗流, 运动定律

微尺度条件下液体流动特性已作为国家 973 项目的专题进行了研究。近年来, 针对微尺度条件下气体流动特性也开展了相关研究^[1,2], 但未建立起新的渗流运动定律。因多孔介质孔隙结构及流固耦合作用复杂, 虽对微观渗流机理进行了分析, 但需描述微观流动非常困难^[3]。因此, 渗流力学研究微观结构对流动的影响时, 常通过宏观流动反映出来。即使较高渗透介质线性渗流运动方程也从未通过微观结构分析得出^[4~6], 更不用说低渗透微尺度孔隙气体非线性渗流运动方程的建立。所以, 本文主要目的是探索在微尺度条件下的孔隙气体渗流所表现出的力学规律, 建立起新的渗流运动定律及其数学模型, 而不是重点刻画微尺度的特点。因此, 分析低渗透岩石材料介质微尺度孔隙饱和气体渗流实验测试结果, 初步探讨低渗透岩石微尺度孔隙气体渗流力学机理, 建立低渗透岩石微尺度孔隙气体渗流新的运动定律数学模型, 为低渗透岩石介质微尺度孔隙气体微流动特性的研究提供新的基础理论依据, 对地下储气工程与包气带污染等工程地质环境评价与保护、岩石工程建设及地下流体资源开发具有重要的指导意义^[7~9]。

1 微尺度孔隙气体渗透率

采用 MTS 岩石物性参数自动测试系统, 通过改进的实验技术与方案可进行低渗透岩石介质微尺度孔隙液体渗流渗透率实验测试, 例如 MTS 非稳态液

体渗透率测试方法, 并且可进行温度与压力条件下的实验测试研究。但对微尺度孔隙气体渗流渗透率实验测试, 因存在气体滑流效应^[9,10]的影响, 需对测试的渗透率进行校正。根据阎庆来等^[10]研究结果, 可绘制岩石饱和气体渗流渗透率测试结果校正关系曲线, 如图 1 所示。从而, 可以获得低渗透岩石材料介质微尺度孔隙饱和气体渗流渗透率参数的准确结果。

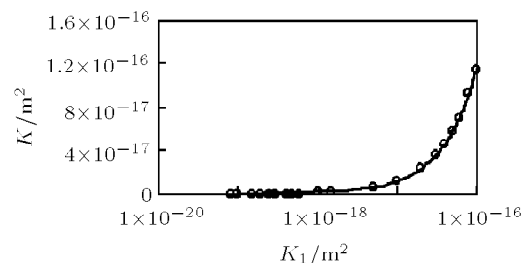


图 1 有效渗透率 K 与克氏渗透率 K_1 关系

2 微尺度孔隙气体渗流规律

多孔材料介质基本的渗流运动定律——Darcy 渗流定律, 揭示了黏性流体层流条件下的线性渗流运动规律。为了研究微尺度孔隙气体渗流规律, 将低渗透岩石材料介质饱和气体渗流流量与压力平方差的关系^[10]做于图 2。由图 2 可知: 低渗透介质饱和气体渗流流量与压力平方差的关系曲线特征为凸形曲线至直线。阎庆来等通过实验研究^[10], 给出了大量的这种曲线, 但未给出气体渗流速度与压力

2004-04-08 收到第 1 稿, 2004-07-29 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (40202036), 国家 973 项目 (2002CB412700, 2002CB211700), 地质灾害防治与工程地质环境保护国家专业实验室自然科学基金项目资助。

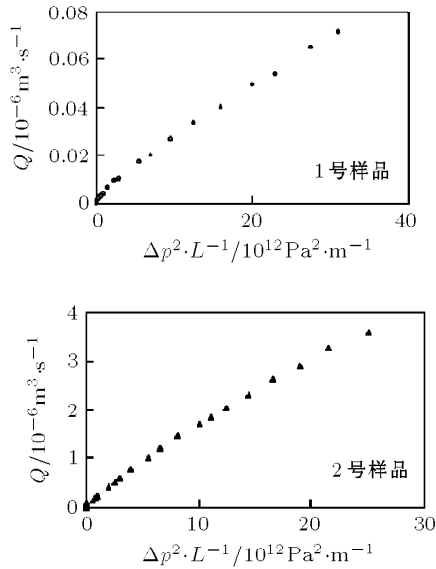


图 2 流量与压差的关系

梯度的关系曲线。

为了分析微尺度孔隙气体渗流所遵循的渗流运动定律，建立其数学模型，需要将图 2 气体渗流流量与压差的关系曲线转换成渗流速度与压力梯度的关系曲线，如图 3 所示。

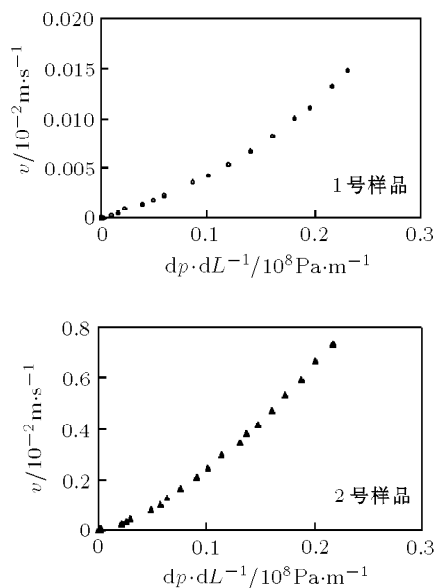


图 3 渗流速度与压力梯度的关系

根据图 3，发现了一个重要的新现象：低渗透微尺度孔隙气体渗流速度与压力梯度的关系曲线特征为凹形曲线至直线，和流量与压力平方差的关系曲线特征有较大差别，二者凹凸特征刚好相反。同时，我们注意到：低渗透微尺度孔隙气体渗流速度与压力梯度的关系曲线特征与低渗透岩石介质液体渗流^[11]的刚好相同。该现象的发现是非常有意义的。因

为根据此结果可以揭示出一个重要的规律：低渗透岩石介质气体与液体非线性渗流^[10]运动定律，从数学上能遵循统一形式的运动方程。

但是，需要注意：虽然从数学上可构建起二者统一的模型，但气体与液体非线性渗流的物理机制是有差别的。初步分析其渗流机理可知，对低渗透岩石介质液体非线性渗流而言，液体渗流阻力由两部分组成，一部分为黏性阻力，它与渗流速度的一次方成正比，另一部分为岩石固体与渗流液体相互作用阻力，它与微尺度孔隙的半径大小成反比^[12]，当岩石材料孔隙半径足够大时，固体与流体相互作用的影响可忽略，此时渗流规律转变成线性渗流。而对低渗透岩石介质气体非线性渗流而言，气体渗流阻力由两部分组成，一部分为黏性阻力，另一部分为气体渗流过程中存在的滑流效应的阻力，岩石固体微尺度孔隙半径越小，这种滑流效应的影响越强，并且当岩石固体孔隙半径足够大时，气体滑流作用力的影响可忽略，此时渗流规律可转变成线性渗流。

3 运动定律新模型的建立与验证

阎庆来等^[10]按照流量与压力平方差的关系曲线特征即凸形曲线至直线，给出了用分段函数表示的运动方程，这种方法值得改进，并且其模型需要确定 5 个参数（临界压力 p_c ，临界流量 Q_c 或临界流速 v_c ，系数 c_1 ，系数 c_2 ，指数 n ）。显然，将包含 5 个参数的分段函数形式表示的运动方程运用于实际当中时，还需要做大量工作。

总结低渗透岩石材料气体渗流规律实验测试结果，分析渗流运动规律曲线特征——凹形曲线至直线，并结合函数一、二阶导数的几何意义，提出低渗透介质气体非线性渗流运动定律的新模型

$$v \left(a_1 + \frac{a_2}{1 + b \cdot v} \right) = -\nabla p \quad (1)$$

式中， v 为渗流速度，m/s； ∇p 为压力梯度，Pa/m； a_1, a_2, b 分别为由实验确定的参数，其量纲分别为 $ML^{-3}T, ML^{-3}T, L^{-1}T$ 。上述模型只含 3 个参数，并且参数物理意义明确，量纲清楚， a_1, a_2 具有流度倒数的量纲， b 具有渗流速度倒数的量纲。该模型的物理意义可参见上节的机理分析，它反映了低渗透岩石介质微尺度孔隙气体非线性渗流阻力的构成。当 $a_2 = 0, a_1 = \mu/K$ ；或当 $b = 0, a_1 + a_2 = \mu/K$ ；或当 $a_1 = 0, b = 0, a_2 = \mu/K$ 时，该模型都转变成 Darcy 渗流定律。非线性渗流运动定律新模型的参

数可根据低渗透介质气体渗流实验结果, 运用数值逼近的方法求得. 根据上述模型计算的结果与实验结果的比较如图 4 所示.

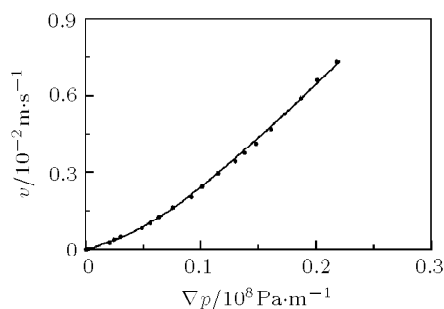


图 4 微尺度孔隙气体渗流规律模型的实验验证

由图 4 可知, 所提出的模型计算的曲线与实验曲线吻合很好, 能统一地描述低渗透介质气体非线性渗流从较低压力梯度下的凹形曲线至较高压力梯度下的直线连续变化的全部过程及曲线特征, 能很好地描述低渗透介质气体非线性渗流规律.

4 结 论

初步分析了岩石微尺度孔隙气体非线性渗流力学机理, 发现了低渗透岩石微尺度孔隙气体与液体非线性渗流遵循同一形式的运动定律, 建立了气体与液体非线性渗流运动定律的统一模型, 并与实验结果吻合很好. 上述结果为低渗透介质微尺度孔隙气体微流动特性的研究提供了新的基础理论依据, 对工程地质环境评价与保护及地下流体资源开发具有重要的指导意义.

致谢 马宝岐教授、胡远来教授等给予了大力支持与帮助, 作者在此致以衷心的感谢!

参 考 文 献

- 李铁军, 李允. 低渗透储层气体渗流数学模型及其方法研究. 天然气工业, 2000, 20(9): 70~72 (Li Tiejun, Li Yun. Study on mathematical model and method of gas flow in low-permeability reservoir. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(9): 70~72 (in Chinese))
- 周克明, 李宁, 袁小玲. 残余水状态下低渗储层气体低速渗流机理. 天然气工业, 2003, 23(6): 103~105 (Zhou Keming, Li Ning, Yuan Xiaoling. Mechanism of gas flow in low-permeability reservoir with residuary water. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(6): 103~105)
- 郭尚平, 黄延章, 周娟等. 物理化学渗流微观机理. 北京: 科学出版社, 1990. 1~5 (Guo Shangping, Huang Yanzhang, Zhou Juan, et al. *Microscopic Mechanism of Physico-Chemical Flow*. Beijing: Science Press, 1990. 1~5 (in Chinese))

- 薛定谔 AE 著. 多孔介质中的渗流物理. 王鸿勋译. 北京: 石油工业出版社, 1982: 38~39, 145~173 (Scheidtger AE ed. *The Physics of Flow Through Porous Media*. Wang Hongxun, tran. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 38~39, 145~173 (in Chinese))
- 科林斯 R E 著. 流体通过多孔材料的流动. 陈钟祥, 吴望一译. 北京: 石油工业出版社, 1984. 10~20 (Collins RE ed. *Flow of Fluids Through Porous Materials*. Chen Zhongxiang, Wu Wangyi, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984. 10~20 (in Chinese))
- 谢和平. 分形 - 岩石力学导论. 北京: 科学出版社, 1996. 93~128 (Xie Heping. *Introduction of Fractal-rock Mechanics*. Beijing: Science Press, 1996. 93~128 (in Chinese))
- 郭尚平, 张盛宗, 桓冠仁等. 渗流研究和应用的一些动态. 见: 渗流所主编. 渗流力学进展. 北京: 石油工业出版社, 1996. 1~12 (Guo Shangping, Zhang Shengzong, Hua Guanren, et al. Trends of study on flow in porous media and application. In: Institute of porous flow, ed. *Advances in Mechanics of Fluids in Porous Media*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 1~12 (in Chinese))
- 黄润秋, 许强, 陶连金等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究. 北京: 科学出版社, 2002. 1~11 (Huang Runqiu, Xu Qiang, Tao Lianjin, et al. *Study on Simulation and Control of Geological Hazards Process*. Beijing: Science Press, 2002. 1~11 (in Chinese))
- 邓英尔, 刘慈群, 黄润秋等. 高等渗流理论与方法. 北京: 科学出版社, 2004. 1~15 (Deng Ying-er, Liu Ciqun, Huang Runqiu, et al. *Advanced Theory and Method of Fluid Flow in Porous Media*. Beijing: Science Press, 2004. 1~15 (in Chinese))
- 中国油气总公司. 低渗透油层开发技术. 北京: 石油工业出版社, 1994. 353~358 (China national petroleum corporation. *Development Technology of Low-permeability Reservoir*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. 353~358 (in Chinese))
- 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用. 石油学报, 2001, 22(4): 72~77 (Deng Ying-er, Liu Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow in low-permeability reservoir and application. *Acta Petrlei Sinica*, 2001, 22(4): 72~77 (in Chinese))
- 邓英尔, 阎庆来, 马宝岐. 表面分子力对低渗多孔介质中液体渗流特征的影响. 见: 渗流所主编. 渗流力学进展. 北京: 石油工业出版社, 1996. 359~366 (Deng Ying-er, Yan Qinglai, Ma Baoqi. Influences of interfacial molecular interaction on liquid flow in low-permeability media. In: Institute of porous flow, ed. *Advances in Mechanics of Fluids in Porous Media*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 359~366 (in Chinese))

MEDIA

DENG Yinger^{*,**} XIE Heping^{*} HUANG Runqiu^{**} LIU Ciqun[†]^{*}(Institute of Engineering Science and Hazard Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)^{**}(National Professional Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)[†](Porous Flow and Fluid Mechanics, Academia Sinica, Langfang 065007, China)

Abstract The study on characteristics of gas micro-flow in micro-scale pores is one of important fields of modern mechanics of fluids in porous media. Results of experiments on saturated gas flow in pores of low-permeability rock were analysed. Laws of gas flow in micro-scale pores were explored. A mechanism of gas nonlinear flow in the low-permeability rock pores was discussed. It was found that both gas and liquid nonlinear flow in micro-scale pores of the low-permeability rock follow the same flow law. A united model for gas and liquid nonlinear flow in micro-scale pores of low-permeability rock was established. Results show that there is a good agreement between data of the model and experiments. The above results can serve a basis for new theoretical explorations on characteristics of gas micro-flow in micro-scale pores. And they can also serve as a reference for geological environment preservation and development of underground fluids sources.

Key words low permeability media, micro-scale, flow mechanism, nonlinear flow, flow law