

多孔介质汽-水相对渗透率研究进展

刘彦广¹, 王潇媛¹, 陆川¹, 王贵玲¹, 李洪磊²

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
2. 中国电建吉林省电力勘测设计院, 长春 130022

摘要 汽-水相对渗透率常用于解决高温地热(高温水热型地热、干热岩)储层系统中汽-水两相流渗流问题,是地热开发资源量计算、动态分析、地热储层数值模拟等方面不可或缺的参数。在阐述地热系统汽-水相对渗透率产生机制及其重要性的基础上,总结了该研究领域的最新研究进展,并从实验测定、数值模拟等方面提出了进一步开展研究的相关建议。

关键词 地热系统; 多孔介质; 汽-水两相流; 相对渗透率; 多孔网络模型

中图分类号 O357.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.012

Relative permeability of the steam-water system of porous media

LIU Yanguang¹, WANG Xiaoyuan¹, LU Chuan¹, WANG Guiling¹, LI Honglei²

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
2. Jilin Electric Power Design Institute, Power China, Changchun 130022, China

Abstract The relative permeability of the two-phase steam-water system is an essential property in resource evaluation, dynamic analysis and numerical simulations of high-temperature geothermal systems. This paper introduces the mechanism of steam-water relative permeability in geothermal systems, reviews the latest research progress in this field, and proposes future directions for experimental measurement and numerical simulation.

Keywords geothermal system; porous media; steam-water; relative permeability; poreouse network model

地热储层中的流体流动规律通常概化为多孔介质的中流动,用达西定律来表征。虽然地热储层大多是由不同渗透率的裂隙介质构成的地质体,但从宏观尺度来看,多孔介质的假定似乎是适当的^[1-3]。目前仅有 TOUGH2 等少数储层建模工具允许双孔隙度和双渗透率定义储层结构,大多数模型都是基于这个假定建立^[4]。

1 多孔介质汽-水相对渗透率产生机制

通常,以液体为主的储层,地热流体为单相水或汽、水混合的形式存在^[5,6]。在模拟时,通常忽略地热流体中的溶解性气体和固体,把地热流体假定为纯的水或蒸汽流体^[7,8]。水和蒸汽的两相流的形成有多种情形,最常见的有两种。一是当液相控制储层时,沸腾发生时会形成汽-水两相流^[5]。这种形成机制,最早是由 White 提出,并建立了概念模型(图 1^[9])。在

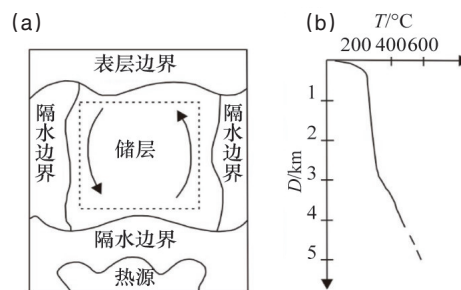


图 1 地热系统中两相转化的概念模型(a)及地热系统中地层测温曲线(b)

Fig. 1 A conceptual representation of a two phase convective geothermal system (a) and temperature profile for the different layers of the system (b)

收稿日期:2015-06-30;修回日期:2015-07-31

基金项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所基金项目(SK201408)

作者简介:刘彦广,助理研究员,研究方向为环境地质、地热地质,电子邮箱:gaoyuanzhixing@163.com

引用格式:刘彦广,王潇媛,陆川,等. 多孔介质汽-水相对渗透率研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 74-77.

图1中热源被认为是一种岩浆侵入到距地面几公里深度处,热通过不渗透岩层向上传导到多孔介质和裂隙介质层。

另一种机制是发生在地热流体通过生产井被开采过程中。储层中流体从生产井流出,是个减压过程,高焓流体发生闪蒸,会有蒸汽生产,形成汽-水两相流。这种闪蒸可能会发生在井中,也可能发生在井底周围的储层^[9,10]。地热储层和井的原理如图2所示。

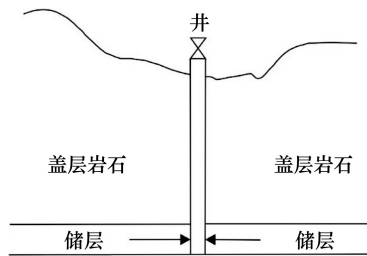


图2 地热储层和生产井的原理

Fig. 2 A geothermal well is drilled into a reservoir, causing fluid to flow through the fractured reservoir into the well

当两相流发生在多孔介质层中,雷诺系数较低,形成达西流,满足达西定律^[11]:

$$q = \frac{k}{\mu} A \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \quad (1)$$

式中, $q, k, \mu, A, L, \Delta p$ 分别为体积流量、渗透率、流体黏度系数、流体横截面积、流动路径直线长度、沿流动方向的压力差。

当汽-水两相同时存在时,每一相流体被一个相对独立的方程所控制:

$$k_i = k k_{ri} = \frac{q_i \mu_i L}{A \Delta p_i} \quad i=\text{蒸汽, 水} \quad (2)$$

式中, k_i 为*i*相流体的有效渗透率, i 为蒸汽或水; q_i 是*i*相流体的体积流量; μ_i 是*i*相流体的黏度系数。 k_{ri} 为相对渗透率,即 $k_{ri}=k_i/k$ 。相对渗透率通常表示为润湿相饱和度的函数(通常是水在蒸汽-水流体中)。

汽-水相对渗透率常用于解决高温地热(高温水热型地热、干热岩)储层系统中汽-水两相流渗流问题,是地热开发资源量计算、动态分析以及地热储层数值模拟等方面不可或缺的参数。

2 汽-水相对渗透率研究方法

目前,汽-水相对渗透率的研究方法有实验方法、经验公式法、现场试验数据或者生产数据计算3种^[12,12~22]。

利用生产井实测的热焓瞬态变化数据推测还不能得到有效的相对渗透率^[23~27]。有研究指出,这种生产数据计算无法消除变化的且频繁变化的原位流体饱和度,也无法消除全部的渗透结构(例如,岩体模型、裂隙)情况,从而掩饰了地热储层结构的差异,导致这些方法获得的每个地热田的相对渗透率曲线十分相似,与实际不相符^[28~30]。

实验室测量相对渗透率的难点在于很难直接测得岩心中含水的饱和度,尤其是在有相变的情况下,相对渗透率的测定更加困难^[31]。因为在流动系统中的相变会改变两相的饱和度,导致饱和度分布很难确定,几乎无法获得。

早期的一些研究对孔隙介质汽-水两相流相对渗透率进行了测试^[2,3,32~35]。然而,由于当时测量技术的局限性,所获得的结果并不可靠,例如对于饱和度的测量要么没有进行,要么是通过电阻的方法推测而来。有研究表明电阻的方法受岩石属性、流体饱和度的影响较大,可靠性差。后来,Verma^[13]进行了汽-水两相流人工填砂模型试验。该试验用伽马射线测量密度的方法计算蒸汽和水的饱和度,提高了水相饱和度测量的精度,并与无相变的两相流的试验观测结果进行了对比,结果显示汽-水相对渗透率明显较大,认为相变效应提高了蒸汽的有效渗透率,减少了沿流动通道的压降,并提出了由于蒸汽相渗透率增强的两种机制:1)具有亲水性面的渐缩-渐扩流动通道里相变能够引起蒸汽相相对渗透率增大;2)沿着停滞相及其周围流动的另一相的界面,相变控制着停滞相的不可约饱和度。Verma^[13]同时指出 Hassler^[36]、Osoba等^[37]进行的室内实验室研究存在明显的错误,没有消除毛细管的末端效应对相对渗透率的影响。末端效应会产生压力梯度,引发饱和度渐变,最终表现为岩心中饱和度分布不均匀,在流体流速较低时更明显^[38]。忽略这种效应会低估润湿相相对渗透率、增大非润湿相渗透率值,从而得到错误的饱和度。

近年来,随着先进的层析成像技术的发展,X光CT扫描被用于测量汽-水两相流在多孔介质的饱和度分布^[39,40]。Home等总结了 Satik 和 Mahiya 的试验结果并与空气-水两相流试验结果进行了对比,定性分析了这两个试验,得到的气-水两相相对渗透率高于空气相的相对渗透率的结果,与 Verma 的试验结果一致^[16,17,41]。Gudjonsdottir^[12]又用绝热的方法测定温度、压力等参数并计算了气-水相对渗透率,对此进行了肯定。但是, Sanchez 等、Piquemal 得到了相反的试验结果,提出了相反的意见^[14,15]。Sanchez 等估计了完整的未固结的多孔介质中水相饱和度的平均值,忽略了饱和度的空间变化研究,方法结果表明,汽-水相对渗透率表现出与空气-水两相流一样的行为。Piquemal 用未固结多孔介质材料装入内径 5 cm,长 25 cm 的管,保温 180℃进行了气-水相对渗透率试验。试验期间,沿着岩样夹持器以 5 cm 间隔共布设 4 组压力和温度传感器。该试验结果也提出汽-水与空气-水流动特性相似。

理论上,汽-水 and 气-水系统在多孔介质中的流动方式应该存在差异,首先两系统中毛细压力不同,这样会导致两相之间的分布特征不同,从而影响两相之间的相互摩擦力,进而影响相的渗透率^[42]。汽-水理论上因为存在相变,而没有残余饱和度,这是汽-水相对渗透率区别于气-水相对渗透率鲜明的特征。同样地汽-水系统也没有束缚饱和度与残余饱和度。

为了更直观地观察这两种流动系统中两相分布的特点,Chen用录像的方法测量汽-水饱和度,进行了裂隙介质汽-水相对渗透率研究,结果发现空气-水系统和蒸汽-水系统,两相流空间分布特征不同,空气-水系统非润湿相(空气)可以形成稳定的较规整的流动通道,而蒸汽-水系统中,蒸汽不能形成稳定的流动通道且流动通道非常不规则,这可能是相变导致的结果^[2]。类似的针对无相变系统的试验有很多,如Satic等于1996年研究多孔介质多相流时使用类似的试验技术观察了空气-水的驱替过程,发现了当气相饱和度足够低时,气相形成非连续相,存在“夹断”、连串等行为,但此类行为在汽-水系统中没有观察到^[39]。因玻璃、空气、水与岩石、空气、水的接触角不同,即润湿程度不同,所以在多孔介质系统中的行为还有待进一步研究。

Satic等使用多孔网络模型从微观尺度上研究了多孔介质中的沸腾和干燥问题,发现了相变条件下特有的许多特点,如两相流体中存在着不均匀分布的气泡,气泡体积随着热量的传入而不断地增长,因为相平衡的存在,相应位置的温度不会上升,当该处的液相流体被汽相流体完全驱替后,温度才能变化等^[39]。Figus同时使用连续介质模型和多孔网络模型研究了水泥蒸发器中的干燥过程,结果显示,由多孔网络模型预测的蒸发速度和温度与实验的吻合程度要好于传统的连续介质模型^[43]。在比较的过程中也显示了可以由微观的多孔网格模型为连续介质模型提供必要参数,包括相对渗透率。多孔网络模型也被广泛地应用于有关油气藏开采、有机污染物处理、蒸发干燥等过程的模拟计算中,为相关领域的理论研究做出了贡献。

3 结论

前人的研究对多孔介质中汽-水相对渗透率的试验观测结果虽然存在很大差异,但他们在试验方法技术和理论上为多孔介质汽-水相对渗透率研究提供了的基础。汽-水相对渗透率的不同受到很多因素的影响,每个因素的重要性随试验条件的不同而不同。不同试验条件和系统下获得的相对渗透率结果的可比性不大。特定系统在特定条件下的相对渗透率还应依靠实测。CT试验测定法对技术人员要求比较高,不同的技术人员分析获得的饱和度会有所不同,影响了试验精度。并且CT机器昂贵,仅少数资金充足的实验室能够配备该设备,目前关于汽-水相对渗透率的文献大多是斯坦福大学科研人员发表的。

鉴于此,今后研究工作中,应重视改进试验装置,测定岩心中汽、水饱和度与相对渗透率;应用TOUGH2进行数值模拟,通过回归计算筛选相对渗透率函数的参数,并校正相变、可压缩性和毛细压力的试验误差;使用多孔网络模型进行数值模拟,从微观尺度上揭示相变对汽-水相对渗透率的影响机理,为进一步研究高温、高压条件下多孔介质汽-水相对渗透率奠定基础。

参考文献(References)

- [1] Grant M. Geothermal reservoir engineering[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [2] Chen Z. Liquid-gas relative permeabilities in fractures: Effects of flow structures, phase transformation and surface roughness[M]. California: Stanford University, 2005.
- [3] Chen C Y, Li K, Horne R N. Experimental study of phase transformation effects on relative permeabilities in fractures[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, September 26-29, 2004.
- [4] Pruess K, Oldenburg C, Moridis G. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 [R/OL]. [2015-03-31]. <http://escholarship.org/uc/item/4df6700h#page=3>.
- [5] Axelsson G. Production capacity of geothermal systems[C/OL]. [2015-03-31]. http://www.researchgate.net/profile/Gudni_Axelsson/publication/228871976_Production_capacity_of_geothermal_systems/links/0046352ef5774764c2000000.pdf.
- [6] White D E. Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada[J]. American Journal of Science, 1967, 265(8): 641-684.
- [7] Arnórsson S, Stefúnsson A, Bjarnason J Ö. Fluid-fluid interactions in geothermal systems[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2007, 65(1): 259-312.
- [8] O'Sullivan M J, Pruess K, Lippmann M J. State of the art of geothermal reservoir simulation[J]. Geothermics, 2001, 30(4): 395-429.
- [9] DiPippo R. Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [10] Fatt I, Klikoff Jr W A. Effect of fractional wettability on multiphase flow through porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1959, 11(10): 71-76.
- [11] Council J R. Steam-Water relative permeability[D]. California: Stanford University, 1979.
- [12] Gudjonsdottir M, Pálsson H, Eliasson J, et al. Calculation of relative permeabilities of water and steam from laboratory measurements[J]. Geothermics, 2015, 53: 396-405.
- [13] Verma A K. Effects of phase transformation of steam-water relative permeabilities[R]. Lawrence Berkeley Lab, CA (USA), 1986.
- [14] Sanchez J M, Schechter R S. Comparison of two-phase flow of steam/water through an unconsolidated permeable medium[J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(3): 293-300.
- [15] Piquemal J. Saturated steam relative permeabilities of unconsolidated porous media[J]. Transport in Porous Media, 1994, 17(2): 105-120.
- [16] Satik C, Horne R N. A measurement of steam-water relative permeability [C]//Proceedings of 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California: Stanford University, 1998.
- [17] O'Connor P A. Constant-pressure measurement of steam-water relative permeability[R/OL]. [2015-03-31]. <https://pangea.stanford.edu/ERE/research/geoth/publications/techreports/SGP-TR-169.pdf>.
- [18] Dastan A. Direct measurement of in-situ water saturation in geothermal rocks[R/OL]. [2015-03-31]. <https://gondwana.stanford.edu/ERE/research/geoth/publications/techreports/SGP-TR-180.pdf>.
- [19] Lenhard R J, Parker J C. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, permeability-saturation relations[J]. Water Resource Research, 1987, 23(12): 2197-2206.
- [20] Parker J C, Lenhard R J. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, saturation-pressure relations[J]. Water

- Resource Research, 1987, 23(12): 2197-2206.
- [21] Rathfelder K, Abriola L M. The influence of capillarity in numerical modeling of organic liquid redistribution in two-phase systems[J]. Advances in Water Resources, 1998, 21(2): 159-170.
- [22] Gudjonsdottir M, Palsson H, Eliasson J, et al. Calculation of relative permeabilities from field data and comparison to laboratory measurements[J]. Geothermics, 2015(b), 54: 1-9.
- [23] Grant M A. Permeability reduction factors at Wairakei[C]//Mechanical Engineering. 345 E 47TH ST, New York NY 10017: ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG, 1977, 99(10): 105-105.
- [24] Sorey M L, Grant M A, Bradford E. Nonlinear effects in two-phase flow to wells in geothermal reservoirs[J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 767-777.
- [25] Horne R N, Ramey H J. Steam/water relative permeabilities from production data[J]. GRC Trans, 1978, 2: 291.
- [26] Satik C, Horne R N. A measurement of steam-water relative permeability[C]//Proceedings of 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California: Stanford University, 1998.
- [27] Reyes J, Chen C Y, Li K, et al. Calculation of steam and water relative permeabilities using field production data, with laboratory verification[J]. GRC Trans, 2004, 28: 609-615.
- [28] Horne R N, Satik C, Mahiya G, et al. Steam-water relative permeability[J/OL]. [2015-03-31]. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2013/Horne.pdf>.
- [29] Scott S, Gunnarsson I, Arnórsson S, et al. Gas chemistry, boiling and phase segregation in a geothermal system, Hellisheidi, Iceland[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 124: 170-189.
- [30] 俞平, 张加迅, 王维城. 毛细抽吸两相环系统稳定性的实验研究[J]. 清华大学学报, 1999, 39(6): 86-89.
Yu Ping, Zhang Jiaxun, Wang Weicheng. Experimental study on stability of capillary pumped loop system[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(6): 86-89.
- [31] Neuzil C E, Tracy J V. Flow through fractures[J]. Water Resources Research, 1981, 17(1): 191-199.
- [32] Miller F G. Steady flow of two-phase single-component fluids through porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1951, 3(7): 205-216.
- [33] Arihara N. A study of non-isothermal single and two-phase flow through consolidated sandstones[R]. California: Stanford University, 1976.
- [34] Chen H K, Council J R, Ramey Jr H J. Experimental steam-water permeability curves[J]. GRC Trans, 1978, 2: 102-104.
- [35] Council J R. Steam-water relative permeability[D]. California: Stanford University, 1979.
- [36] Hassler G L. Method and apparatus for permeability measurements. US Patent 2345935[P]. 1944-04-04.
- [37] Osoba J S, Richardson J G, Kerver J K, et al. Laboratory measurements of relative permeability[J]. Journal of Petroleum Technology, 1951, 3(2): 47-56.
- [38] 李友荣, 曾丹苓, 吴双应. 对流干燥时水分蒸发扩散过程的热力学条件[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(4): 103-105.
Li Yourong, Zeng Danling, Wu Shuangying. Thermodynamic condition of water evaporation and diffusion in the convective drying process[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(4): 103-105.
- [39] Satik C, Yortsos Y C. A pore-network study of bubble growth in porous media driven by heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1996, 118(2): 455-462.
- [40] 查传钰, 吕钢. 多孔介质中流体的扩散系数及其测量方法[J]. 地球物理学进展, 1998, 13(2): 60-72.
Zha Chuanyu, Lü Gang. Diffusion coefficient and measurement method of fluid in the porous media[J]. Progress in Geophysics, 1998, 13(2): 60-72.
- [41] Mahiya G F. Experimental measurement of steam-water relative permeability[D]. California: Stanford University, 1999.
- [42] 王建省. 非对称热渗流域多孔介质中的关键问题及研究方法[J]. 北方工业大学学报, 2002, 14(1): 85-92.
Wang Jianxing. Key problems of porous media in asymmetric heat seepage domain and its study[J]. Journal of North China University of Technology, 2002, 14(1): 85-92.
- [43] Yamaguchi N. Variety of steam turbines in svartsengi and reykjanes geothermal power plants[C]//Proceedings, World geothermal Congress, Bali: Indonesia. 2010: 25-29.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



中国科学技术协会

第41次中国科技论坛在新疆石河子市召开

2015年9月12日,由中国科协主办,新疆生产建设兵团科协、中国植物营养与肥料学会、中国棉花学会承办,主题为“新疆棉花高产高效与水肥一体化学术研讨”的第41期“中国科技论坛”在新疆石河子市召开。来自大专院校、科研院所等机构从事棉花栽培育种、节水灌溉、植物营养等研究工作的165名代表参加会议。

中国工程院院士康绍忠、中国工程院院士陈学庚、农业部农村经济研究中心农村发展室主任杜珉、中国植物营养与肥料学会理事长白自由路、华中农业大学副校长张献龙分别围绕“节水高效农业发展应关注的几个问题”、“新疆棉花生产机械化现状与发展趋势”、“新常态下我国棉花市场与政策”、“我国肥料发展中存在的问题与展望”、“调控棉花纤维发育的基因发掘”作大会学术报告。与会代表重点就新疆棉花产业可持续发展、水肥一体化等进行了讨论和交流。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/16656238.html>。