

低渗透多孔介质和微管液体流动尺度效应^{*}

宋付权 (上海大学,上海市应用数学和力学研究所;中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室)

^{*}国家自然科学基金(No. 10302018)、上海市重点学科建设项目、上海市高等学校青年科学基金项目(No. 02AQ82)资助

关键词 微管道 尺度效应 低渗透多孔介质 启动压力梯度

常规多孔介质和圆管中液体的流动都遵循 Hagen-Poiseuille 定理,即液体流速和压力梯度成正比.而对于低渗透多孔介质中液体渗流,存在拟启动压力梯度,即存在微尺度效应.那么对于微圆管,由于流动的通道具有较小的空间尺度,因此在物理本质上,也应该存在微尺度效应,但由于目前实验手段的局限,还未能证明这一点.本文通过对比和分析低渗透多孔介质和微管中液体流动规律,预测了微管中液体流动出现微尺度效应的尺度约为 1 微米.

一、前言

多孔介质渗流和微管道流动的拥有共同特点:流动通道均具有较小的空间尺度,那么液体在其中的流动也应该有类似的特征.对于低渗透多孔介质中液体渗流,存在拟启动压力梯度,其流动特征描述如下:在压力梯度较小时,液体流量随压力增大近似呈抛物线型增大,只有当压力梯度大于某一特定数值时,液体的流量才随压力的增大而线性增大,如图 1 所示,而将图中线性段延长交于流量为 0 的压力梯度坐标轴上,此交点处的数值称为拟启动压力梯度(简称 TPG).为了研究方便忽略压力梯度较小的曲线部分,称为含启动压力梯度的渗流.这种现象是由多孔介质流动通道的微尺度引起的(固体介质比表面大,固壁和液体的作用不可忽略),在微管流动中同样存在固壁和液体接触面大的事实,固液

作用强,因此一定存在不同于宏观微管流动的流动尺度现象.本文将用对比的方法,分析液体在低渗透多孔介质和微管中流动的微尺度效应.本研究有利于发现和了解液体的微尺度效应的现象和机理,进一步丰富流体力学的内容,并为微机械系统、生物工程和低渗透油藏等工程设计和应用提供液体流动的理论基础.

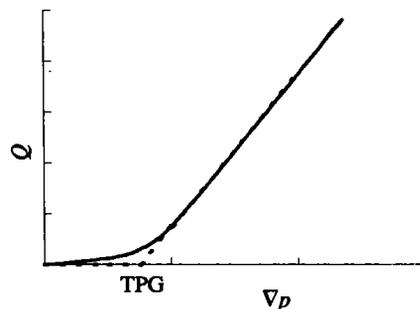


图 1 低渗透多孔介质中典型的渗流曲线形态

(上接第 127 页)

- 1 王新玲,李月彩,侯颖春. 自由基、细胞凋亡与衰老关系的研究进展. 中国老年学杂志,1999;(7):253
- 2 李静. 病毒感染与细胞凋亡. 山西师范大学学报(自然科学版),2003;(1):82-86
- 3 刘菲菲,何士勤. 抗流感病毒药物与细胞凋亡. 医药导报,2002;(4):213
- 4 Elovaara I., et al. Acta Neuropathol (Berl), 1999; 98(4): 355-362
- 5 Gomezdel M. M., et al. J. Virol, 1999; 73(3): 2173-2180
- 6 赵明才,唐恩洁,朱道银. 与病毒感染相关的细胞凋亡分子. 国外医学病毒学分册,2001; 8(1): 25
- 7 Sahara S., et al. Nature, 1999; 401: 168-173
- 8 O'donnell D. R., et al. Virology, 1999; 257(1): 198-207
- 9 Stepp S. E., et al. Immunology Today, 2000; 21(6): 254-256
- 10 Dockrell D. H., et al. J. Clin Invest, 1998; 101(11): 2394-2405
- 11 Server-Delprat C., Vidalain P. O., Bausinger H., et al. Measles virus induces abnormal of CD40 ligand-activated human dendritic cells. Im-

munol. 2000; 164(4): 1753-60

- 12 Lesauskaite V., Ivanoviene L., Valanciute A. Programmed cellular death and atherogenesis: from molecular mechanisms to clinical aspects. Medicina (Kaunas). 2003; 39(6): 529-34
- 13 Qian H., Atherton S. Apoptosis and increased expression of Fas ligand after unocular anterior chamber (AC) inoculation of HSV - 1. Cnee Eye Res. 2003; 26(3~4): 195-203
- 14 张庆玲,丁彦青,贺莉等. SARS 病变组织细胞凋亡检测及其意义. 第一军医大学学报,2003; 23(8): 770-773
- 15 刘小方,邹声泉. 丙肝病毒感染与细胞凋亡. 国外医学外科学分册,2001; 28(4): 193-194

Virus and Cell Apoptosis

Wang Ai-ling, Li Jian

Associate Professor, Department of Inspection, Medical College, Beihua University, Jilin 132001

Key words virus, cell apoptosis

二、低渗透多孔介质中拟启动压力梯度现象的研究现状

目前,世界各国趋向于把渗透率小于 $0.05 \mu\text{m}^2$ 的油藏称为低渗透油气藏^[1,2]。室内实验和油田生产均表明:液体在低渗透多孔介质中流动时存在启动压力梯度。启动压力梯度的存在对低渗透油藏的开发产生极大的影响,首先,由于启动压力梯度的存在,造成一部分原油无法采出,即可采储量降低,这将直接影响到可采储量预测(不考虑启动压力梯度时的预测值大)、开发方案的设计、注水开发时压力的选择等。如注水压力(一般为 $10 \sim 25 \text{MPa}$)的选择,由于启动压力梯度的存在,同样的注水量需要更大的压力,同时注水压力的上限受到油层破裂压力的限制,因此启动压力梯度极大地影响着原油的开采。投入生产急需理论的指导。

在国外,只有前苏联对低渗透油藏做过深入的研究。1951年B. A. 弗洛林^[3]在研究水在致密泥岩和硬粘土流动时提出了含启动压力梯度的渗流公式,马尔哈辛^[4]对多孔介质中的边界层理论进行研究,试图解释低渗透多孔介质渗流时的启动压力梯度现象。在国内,由于大量的低渗透油藏投入开发,相应的研究也较多。闫庆来等^[5]自20世纪80年代起一直致力于低渗透储层渗流机理的研究;黄延章^[6]从边界层理论角度,研究低渗透油气藏中的渗流;刘慈群^[7]用非稳态方法成功测量了低渗透岩心的启动压力梯度;姚约东、葛家理^[8]用实验数据拟合出了阻力系数和雷诺数的关系曲线,指出开始达西线性渗流的临界雷诺数为0.000 085。在微观实验方面,研究表明:平均孔隙直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的介质(细粉砂岩)^[9]一般是低渗透介质。微观多孔介质模型分为三类:填沙玻璃薄片、仿真模型和真实岩芯薄片。郭尚平、黄延章^[10]等用微观渗流仿真模拟技术,研究了多相渗流、碱驱、微乳液驱、表面活性剂等多孔介质中的微观驱油机理,研究的孔隙尺度一般为毫米到微米级的。在刘卫东等^[11]所做的微观模型尺寸 $40 \text{mm} \times 40 \text{mm}$,模型孔隙直径 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$;胜利的孤岛油田^[12]通过取芯实验,测得部分生产油层中,小于 $1 \mu\text{m}$ 的孔隙体积占孔隙总体的 $15\% \sim 55\%$;结论是这部分孔隙中的油不易被驱替出来。

在理论研究方面,考虑启动压力梯度的影响,刘慈群^[13]提出动边界的模型,冯文光^[14]、程时清^[15]、李凡华^[16]、宋付权^[17]、冯曦^[18]等对低渗透油藏中的不定常渗流和试井分析进行了研究。

尽管进行了大量的研究,但是对于低渗透多孔介质

渗流中启动压力梯度产生的机理仍然不很清楚,主要原因就在于:对低渗透多孔介质渗流特征的实验研究多数基于宏观和细观的角度,这需要在微米尺度进行更多的实验研究,从固液作用的边界层理论和从分子动力学的角度进行理论分析。

三、液体在微管尺度结构中的流动研究现状

随着微机械系统(MEMS)研究的深入发展,微尺度下的流动问题已日益受到研究人员的重视。目前的主要应用在液体换热方面,这是因为微尺度结构具有更大的比表面,更利于热量交换。流体在微结构中的流动研究开始于20世纪80年代,Ho and Tai^[19]及 Gal-el-Hak^[20]详细介绍了实验中已观察到的流动微尺度效应。现有关于微器件中液体流动的实验结果经常是矛盾的^[21]。在微尺度管道中观察到符合N-S方程的实验有:Makihara等^[22]用不同黏度的硅油在 $11.8 \sim 50 \mu\text{m}$ 的圆管中进行类似的实验,实验雷诺数 $Re < 10$,流动符合N-S方程;Jiang等^[23]用去离子水在 $8 \sim 40 \mu\text{m}$ 直径的圆管作实验,测量了流动损失系数随 Re 数的变化,实验表明流动符合N-S方程;Flockhart & Dhariwal^[24]用蒸馏水在梯形硅槽中作实验,雷诺数范围 $Re < 600$;梯形槽宽 1mm 、深 $27 \mu\text{m}$ 、长 $63 \mu\text{m}$,实验结果表明流量和压降的关系符合N-S方程;Xu B.等^[25]用纯水在 $30 \sim 344 \mu\text{m}$ 的圆管中进行流动实验,结果与N-S方程预测值一致;李战华等^[26]在实验中,选用相对分子质量为 $18 \sim 160$ 的一些非极性小分子有机液体,实验圆管内径 $25 \mu\text{m}$,实验雷诺数范围为 $Re < 8$,实验结果符合N-S方程。

不符合Hagen-Poiseuille液体运动定理的实验有:Pfahler等^[27]用异丙醇液体,在宽为 $100 \mu\text{m}$ 、深度 $40 \mu\text{m}$ 的槽道内进行实验,发现液体的黏性系数减小了;Mala & Li D.等^[28]用水在氧化硅和不锈钢材料制成的圆管内进行流动实验,实验表明:当管直径 $D < 150 \mu\text{m}$ 时,单位管长的压降与 Re 数的关系偏离理论值;Qu Weilin等^[29]用水在 $51 \sim 169 \mu\text{m}$ 的梯形微管中进行实验,表明当 $Re > 500$ 时,流动偏离N-S方程理论值;Li Qingren等^[30]在高为 $14.1 \mu\text{m}$ 、 $28.2 \mu\text{m}$ 、 $40.5 \mu\text{m}$ 的硅槽中进行水和KCl水溶液的流动实验,研究表明,水的极性是产生微尺度下流动偏离N-S方程的原因,相同的流量下,预测值小于实际值。这些实验说明液体的微尺度流动需要进一步的研究,寻找液体微尺度效应的判断参数和临界值。

在理论模型方面,产生了几种基于分子运动的微尺

度流动的研究方法.如 Boltzmann 格子气方法^[19,31]、直接的 Monte-Carlo 方法^[32,33]、分子动力学方法^[34]、量子力学方法^[35].由于气体运动的理论十分成熟,因此关于气体的微尺度流动、渗流的研究有大量的文献,研究成果也较多.遗憾的是:由于目前仍然缺乏基于分子的液体理论,因此分子动力学模型可以说是最接近第一原理的研究途径^[19].

四、低渗透多孔介质和微管液体流动的对比研究方法

在渗流力学的基本方程中,流体的运动方程是达西定律,主要来源于实验的结果.而对它的理论推导最早源于毛管束(微管)流动的 Hagen-Poiseuille 定理.这就是本文将低渗透多孔介质和微管液体流动一起进行研究的原因.它对我们的启示是:既然微管和多孔介质的流动遵循相同的基本定理,在低渗透多孔介质流动中存在微尺度效应的启动压力梯度现象,那么微管流动中是否也存在相同或者类似的微尺度效应呢?下面来分析和对比两者的情况.

1. 用 Hagen-Poiseuille 定理推导达西定律

由于多孔介质中流动通道形状复杂,无法进行精细的描述,因此最初多孔介质中的运动方程是由实验得到的 Darcy 定律,即

$$v = - \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度 (m/s); K 为渗透率 (m^2); p 为压力 (Pa); L 为岩芯长度 (m); μ 为黏度 (Pa·s).

后来人们通过毛管(即微管)束模型^[36],验证了 Darcy 定律,并推导出了孔隙度和渗透率的公式.假设毛细管埋嵌在横截面积为 A 的固体中,假设半径 r_i 的毛细管个数为 $N_i (i = 1, 2, \dots, N)$,微管中流动符合 Hagen-Poiseuille 定理,即

$$Q_i = - \frac{r_i^4}{8\mu} \frac{dp}{dL} \quad (2)$$

式中: Q 为产量 (m^3/s); r 为毛管半径 (m); 下标 i 为不同直径的毛管.

多孔介质的总流量为

$$Q = - \sum_{i=1}^N N_i \frac{r_i^4}{8\mu} \frac{dp}{dL} \quad (3)$$

多孔介质的孔隙度为

$$\phi = - \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N N_i r_i^2 \quad (4)$$

式中, A 为截面积 (m^2). 则流速公式为

$$v = - \left(\frac{\phi}{8} \sum_{i=1}^N \frac{N_i r_i^4}{N_i r_i^2} \right) \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (5)$$

令渗透率为

$$K = \frac{\phi}{8} \sum_{i=1}^N N_i r_i^4 / \sum_{i=1}^N N_i r_i^2 \quad (6)$$

即可得到形如式(1)的 Darcy 公式.

2. 非牛顿幂律型流体运动方程的推导

同样,对于非牛顿幂律型流体,微管中液体流量公式

$$Q_i = - \left(\frac{1}{2C} \frac{dp}{dL} \right)^{1/n} \left(\frac{n}{1+3n} \right) r^{1+3n/n} \quad (7)$$

式中, n 为幂律流体指数,小数; C 为常数.

用类似的毛细管束方法,得到幂律型流体渗流运动方程和视渗透率公式分别为

$$V = - \left(\frac{K_c}{\mu_e} \right)^{1/n} \left(\frac{dp}{dL} \right)^{1/n} \quad (8)$$

$$K_c = \frac{\phi n}{2(1+3n)} \sum_{i=1}^N N_i r_i^{1+3n/n} / \left[\sum_{i=1}^N N_i r_i^2 \left(\sum_{i=1}^N N_i r_i^{1/n} \right)^{1-n} \right] \quad (9)$$

式中, K_c 为视渗透率 (m^2); μ_e 为视黏度 (Pa·s).

上述两种多孔介质渗流运动方程均可以由微管流动来推导,那么反过来多孔介质渗流运动的规律也可以指导微管流动的研究,只是一般情况下,由于多孔介质流动远复杂于微管流动,因此只能用简单的微管流动研究复杂的渗流.因此可以预测:在低渗透多孔介质渗流中存在的拟启动压力梯度现象,在微管的液体流动中也应该存在,即微管液体流动的微尺度效应.

五、微管液体流动微尺度效应本质、预测及研究方法

微管道中之所以存在微尺度效应,主要原因是:由于流动空间很小,液体和固体的作用已不能忽略.目前普遍认同的低渗透多孔介质尺度为 $0.05 \mu m^2$,用等直径的微管束模型描述多孔介质,由式(6)得渗透率公式为

$$K = \frac{\phi}{8} r^2 \quad (10)$$

一般地取 $\phi = 0.3$, 可得平均微管半径

$$r = \sqrt{8K/\phi} = \sqrt{8 \times 0.05 \times 10^{-12} / 0.3} = 1.3 (\mu m) \quad (11)$$

即微管中液体流动出现微尺度效应的尺度约为 $1 \mu m$ 的量级,目前的实验手段和材料尚不能达到,但是以目前的科技发展速度,可以判断在未来几年内就可以达到.

研究微管道中液体流动尺度效应的方法分为实验

和理论研究. 实验方法是:寻找微米级的光滑微管道,用不同的液体在其中进行流动实验. 理论方法是:考虑液体和固体边界的相互作用,建立基于分子动力学的微管道中液体流动模型,从而进行数值模拟. 另外还可以结合低渗透多孔介质中液体的流动进行研究,两种流动理论相互借鉴,相互补充.

六、结 论

低渗透多孔介质和微管的共同特点是:流体流动的空间尺度都很小,因此都应该具有微尺度效应,从低渗透多孔介质中流体流动所具有的启动压力梯度现象,以 Hagen-Poiseuille 定理为基础,预测了微管中液体出现微尺度效应的尺度约为 $1 \mu\text{m}$. 随着微系统加工技术的进步,这一点将很快会见分晓.

(2003年12月10日收到)

宋付权 博士,副教授. 上海大学,上海市应用数学和力学研究所,上海 200072;中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

- 1 李道品等. 低渗透砂岩油田开发. 北京:石油工业出版社,1997
- 2 罗平亚等. 我国低渗透油气资源勘探和开发中的若干问题. 世界石油工业,1998;5(10):39-43
- 3 A. T. 戈尔布诺夫. 异常油田开发. 北京:石油工业出版社,1987:181
- 4 . 马尔哈辛(俄译本). 油层物理化学机理. 北京:石油工业出版社,1997
- 5 闫庆来,何秋轩等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究. 西安石油学院学报,1990;5(2):1-6
- 6 黄延章等. 低渗透油层渗流机理. 北京:石油工业出版社,1998
- 7 宋付权,刘慈群. 启动压力梯度的不稳定快速测量方法. 石油学报,2001;22(3):67-70
- 8 姚约东,葛家理. 低渗透油层非达西渗流规律的研究. 新疆石油地质,2000;21(3):213-215
- 9 李茂林,黎文清. 油气田开发地质基础. 北京:石油工业出版社,1988:72
- 10 郭尚平,黄延章. 物理化学渗流微观机理. 北京:科学出版社,1990
- 11 刘卫东,李立众等. 大庆油田 ASP 符合驱油体系微观渗流机理. 重庆大学学报(自然科学版),2000;23(增刊):119-121
- 12 李继红,陈清华. 孤岛油田储层微观结构特征及其影响因素. 西北大学学报(自然科学版),2001;31(3):241-224
- 13 刘慈群. 有起始比降固结问题的近似解. 岩土工程学报,1982;4(3):107-109
- 14 冯文光. 非达西低渗透流的研究现状与进展. 石油勘探与开发,1986;13(4):76-80
- 15 程时清,徐论勋. 低速非达西渗流试井典型曲线拟合法. 石油勘探与开发,1996;23(4):50-53
- 16 李凡华,刘慈群. 含启动压力梯度的不定常渗流的压力动态分析. 油气井测试,1997;6(1):1-4
- 17 宋付权,刘慈群等. 低渗透介质含启动压力梯度一维瞬时压力分析. 应用数学与力学,1999;20(1):25-32
- 18 冯曦,钟孚勋. 低速非达西渗流试井模型的一种新的求解方法. 油气井测试,1997;6(3):16-21
- 19 Hb Chih-Ming, Tai Yu-Chong. Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1998;30:579-612
- 20 Gad-el-Hak. The Fluid mechanics of microdevices—the freeman scholar lecture. *J. of Fluids Engineering*, 1999;121:5-33
- 21 刘静. 微米/纳米尺度传热学. 北京:科学出版社,2001
- 22 Makihara M., Sasakura K., Nagayama A. Flow of liquids in micro-capillary tube consideration to application of the Navier-Stokes equations. *J. of the Japan Society of Precision Engineering/ Seimitsu Kogaku Kaishi*, 1993;59(3):399-404
- 23 Jiang X.N., Zhou Z. Y., Yao J., Li Y., Ye X. Y. Micro-fluid flow in microchannel, *Transducers '95, Eurosensors IX, Sweden*, 1995:317-320
- 24 Flockhart S.M., Dhariwal R.S. Experimental and numerical investigation into the flow characteristics of channels etched in silicon. *J. of Fluids Engineering*, 1998;120:291-295
- 25 Xu B., Ooi K.T., Wong N.T. Experiment investigation of flow friction for liquid flow in microchannels. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2000;27(8):1165-176
- 26 李战华,周兴贝等. 非极性小分子有机液体在微流道中的流量特征. 力学学报,2002;(3)
- 27 Prahler J., Harley J., Bau H., et al Gas and liquid flow in small channels. *DSC*, 1991;32:49-59
- 28 Mara G. M., Li Dongqing. Flow Characteristics of water in microtubes. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 1999;20:142-148
- 29 Qu Weilin, Mara G. M., Li Dongqing. Pressure-driven flows in trapezoidal silicon microchannels. *Int. J. of Heat and Transfer*, 2000;43:353-364
- 30 Li Qingren, Qu Weilin, Li Dongqing. Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels. *Int. J. of Heat and Transfer*, 2001;44:3125-3134
- 31 刘慕仁等. 二维对流扩散方程的格子 Boltzmann 方法. 物理学报,1999;48(10):1080-1083
- 32 Bird G. A. Recent advances and current challenges for DSMC. *Computers Math. Appl.* 1998;35:1-14
- 33 吉庆丰等. 计算复杂边界渗流的蒙特卡罗方法. 计算力学学报,2000;17(4):390-393
- 34 Eyes D. M. *The Liquid State Applications of Molecular Simulation*. New York:John Wiley & Sons, 1998
- 35 Shibahara M., Kotake S. Quantum molecular dynamics study on light-to-light absorption mechanism in atomic system. *Int. J. Heat and Transfer*, 1998;41:839-849
- 36 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999:37-38,401-403

Research of the Size Effect of Liquid Flow in Low Permeability Porous Media and Microchannels

Song Fu-quan

Ph. D., Associate Professor, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072; LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

Key words microchannels, size effect, low permeability porous media, threshold pressure gradient