



# 谈谈渗流

刘俊丽<sup>1)</sup>

(中国力学学会, 中国科学院力学研究所《力学学报》期刊社, 北京 100190)

**摘要** 渗流是流体在多孔介质中的流动, 渗流现象广泛地存在于自然界、工程材料、动物、植物中。多孔介质种类繁多, 包括岩石 (含各类矿藏)、土壤、生物材料和人工多孔介质材料等。渗流理论已经成为人类开发地下水、地热、石油、天然气、煤炭与煤层气等诸多地下资源的重要理论基础。本文从渗流的基本概念、渗流的分类、渗流的影响因素、渗流的特征以及渗流的研究意义等方面进行了阐述。

**关键词** 渗流, 工程渗流, 生物渗流, 地下渗流, 多孔介质

中图分类号: O357.3 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-19-051

## ON FLOW IN POROUS MEDIA

LIU Junli<sup>1)</sup>

(Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics Publishing House, The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

**Abstract** Flow in porous media (or porous flow) is the manner in which fluids behave when flowing through a porous media. There are many types of porous media, such as rocks (including various types of minerals), soils, biological materials, and artificial porous media materials. The porous flow phenomena widely exist in the natural world, engineering materials and inside the body of plant and animals. The porous flow theory is fundamentally important in exploiting underground resources, such as underground water, geothermal resource, petroleum, natural gas and coal. This article explains the basic concepts, classifications, influencing factors and key characteristics associated with porous flow. The research significance of porous flow is also discussed.

**Key words** flow in porous media, engineering porous flow, biological porous flow, underground porous flow, porous media

### 1 渗流的基本概念

渗流是什么? 渗流是流体在多孔介质中的流动。它是物质运动状况的表述, 它既有渗的特性, 又有流的量度, 还处于复杂的时空环境中。所以, 渗流学科涉及数学、地学、物理学、化学、生物学等众多学科。在英文文献中, 渗流相当于 flow in porous media, flow through porous media 或 porous flow。

中国科学院渗流流体力学研究所的英文名称翻译为 Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, CAS。

何为多孔介质? 多孔介质的孔径大小又是多少? 在渗流力学中没有描述, 在某种程度上, 渗流力学中所描述的多孔介质在尺度上没有定义, 只是将结构复杂的、几何结构无法精确描述的大量孔隙定义为多孔介质。孔祥言<sup>[1]</sup>先生将多孔介质定义为符合 3 个特征的介质: 由孔隙和骨架等多相组成;

2019-01-30 收到第 1 稿, 2019-03-22 收到修改稿。

1) E-mail: liujunli@cstam.org.cn

引用格式: 刘俊丽. 谈谈渗流. 力学与实践, 2019, 41(2): 249-252

Liu Junli. On flow in porous media. *Mechanics in Engineering*, 2019, 41(2): 249-252

孔隙是连通的,流体可以在其中流动;符合连续介质力学模型。

在中国知网 (<http://www.cnki.net/>) 上检索到,渗流一词在中国最早出现,是在《人民水利》1952年第1期上发表的程瑞谿的文章《不用基桩的水工结构基础应如何设计》上<sup>[2]</sup>。但是那段时间,人们还是习惯将渗流称为“滤流”“渗滤”等<sup>[3]</sup>。直到20世纪60年代初,中国科学院拟在兰州组建渗流学科的专门研究机构,初期设在中国科学院兰州地质所,曾称为“地下水动力学研究室”。1963年经过该室科研人员的讨论,建议改为“渗流力学室”。这样“渗流”一词逐渐被国人所接受<sup>[4]</sup>。

渗流现象广泛地存在于自然界、工程材料、动物、植物中,它在现代生活以及水文地质工程、水利工程、环境工程、航天材料、化工流化床、铀矿开采、石油天然气开采、地热资源开发、材料印刷、微机械工程等多方面的应用也越来越广泛<sup>[1]</sup>。

渗流学科理论的发展与社会生产的发展密切相关。1856年法国工程师亨利·达西(H. Darcy, 1803年6月—1858年1月2日)(图1)在解决城市供水问题过程中,试验得出孔隙介质的渗流能量损失与渗流速度之间呈线性正比关系,即达西定律(Darcy's law)。

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p$$

式中, $v$ 为渗流速度, $k$ 为渗透率, $\mu$ 为流体的黏度, $\nabla p$ 为压力梯度,负号代表流动的方向为压力下降的方向。这一定律发表在《第戎市的公共喷泉》一书中<sup>[5]</sup>。



图1 亨利·达西像<sup>[5]</sup>

1863年法国水力学家J. 裘布依(J. Dupuit)将达西定律推广到径向稳态渗流方面,导出了位于

圆形储水层中心的一口完善井的稳定流动产水量公式。1901年法国科学家P. 福希海默(P. Forchheimer)通过研究非线性渗流问题,给出了压力梯度和流量之间的非线性公式,即著名的福希海默二项式。人们又相继应用多种数学方法,使水力学得到快速发展。20世纪30—40年代,石油工业的兴起,M. 麦斯凯特(M. Muskat)、S.E. 贝克莱(S.E. Buckley)和M.C. 列维莱特(M.C. Leverett)等一批科学家又推动了油水两相渗流理论的发展。

随着油气开采工业的发展以及各种数学方法的应用,人们又发展了非牛顿流体渗流、非等温渗流、多相多组分渗流、物理化学渗流、多重介质渗流等等,油藏数值模拟方法也得到了很大发展。

二十世纪八九十年代,我国大批低渗透油田的开发,促进我国学者又发展了低渗透非线性渗流理论。1990年,西安石油学院闫庆来等<sup>[6]</sup>通过室内实验证明了启动压力梯度的存在。之后,中国科学院渗流流体力学研究所黄延章<sup>[7]</sup>建立了新的综合毛管模型和边界层理论的多孔介质渗流模型,它包含毛管模型和附于管壁的流体边界层,提出了渗流流体的概念,推导了多孔介质中流体的黏度公式;推导了低渗透多孔介质的非线性渗流方程,论证了在此范围内的非线性渗流仍属于层流范畴,表明应用于层流的数学方法均可继续适用,这为此后数值模拟方法的应用提供了理论依据。继而人们又研发了低渗透油藏非线性渗流数值模拟计算方法、井网设计及调整的计算方法和低渗透油田开发储层评价方法。这些方法已在低渗透油田开发实践中得到广泛应用。

目前,根据国民经济发展的需要,主要研究热点有:(1)石油天然气能源、地热能源等地下资源开发相关的地下渗流;(2)与重大水利工程及环境工程等有关的地下水渗流;(3)与农田水利和滑坡地质灾害等有关的地表渗流等方面。

## 2 渗流的分类

根据渗流载体多孔介质的特定属性,渗流主要可以分为地下渗流、工程渗流、生物渗流与新材料中的渗流等四方面。

### 2.1 地下渗流

地下渗流,是指土壤、岩石和地表堆积物中流体的渗流,主要包括应用于地下流体资源(石油,天然气、地下水、地热、地下盐水以及二氧化碳)开发的渗流、地球物理中的渗流以及地下工程中渗流。地

下资源开发渗流中油气渗流和地下水渗流的研究和应用最为广泛。地球物理渗流是指流体力学和地球物理学交叉结合而出现的渗流问题,包括雪层中的渗流和雪崩的形成、地表图案的形成、海底永冻层的溶化、岩浆的流动和成岩作用过程以及海洋地壳中的渗流,该方向的研究目前正处于高速发展阶段。相关于地下工程中渗流则是应用研究多于基础理论研究。

## 2.2 工程渗流 (或工业渗流)

工程渗流 (或工业渗流),是指这种人造多孔材料和工程装置中的流体渗流。工程渗流涉及化学工业、冶金工业、机械工业、建筑业、环境保护、原子能工业以及轻工业食品等领域。化学工业中涉及很多渗流过程,如过滤、洗涤、浓缩和分离等等。工程渗流是相当复杂的渗流问题,包括多相流、非牛顿流体渗流、非等温渗流和物理化学渗流等。

## 2.3 生物渗流

生物渗流,是与动物体内的血液循环、淋巴液循环和呼吸系统的气体运动以及植物体内的水分、糖分输送等有关的渗流问题。从广义上讲,生物渗流是人体和动植物体内的生物流体以及非生物多孔介质内的含有微生物的流体的渗流。研究生物渗流,对医学科学的发展,尤其是对心脑血管疾病的诊断与防治技术的进步,对农林业及畜牧业的发展,都有非常重要的意义。

## 2.4 新材料中渗流

在人工材料应用越来越多的今天,许多人造材料和结构中都有渗流的存在和影响,如微电子器件中渗流和传热,纺织材料中的气、液,燃料电池电极中的气、液和离子的渗流等。在航天、纺织、生物新材料和燃料电池等领域均有渗流存在的影子,或多或少地影响着材料的性质和应用效能。可以预见,随着人工新材料的发展,渗流力学的应用领域将不断拓宽。

## 3 渗流的影响因素

决定渗流过程的有三大因素,即多孔介质的性质、流体的性质和渗流的环境条件 (如压力、温度等)。其中任何一种因素的改变都会引起渗流过程的变化,所以,存在各种各样的渗流规律。

### 3.1 多孔介质的性质

多孔介质的性质包括: (1) 流动通道尺寸细小,

形状复杂、阻力大,对单相流体存在启动压力,对多相流体则毛细管力作用明显; (2) 比表面大,表面作用明显; (3) 多孔介质的孔隙结构有单一的,但更多的是由多种孔隙结构组成的,即双重介质、三重介质,甚至四重介质; (4) 多孔介质中流体的流变性影响渗流规律; (5) 多孔介质中流体通过的能力,以渗透率表示; (6) 多孔介质有储存流体的能力,以孔隙度表征; (7) 多孔介质由不同的岩石矿物组成,因而其表面润性呈现为混合润湿,并不是均一的。

### 3.2 流体的性质

(1) 流体的多样性: 流体有牛顿流体,也有各种不同类型的非牛顿流体,还有多相多组分流体及复杂的物理化学流体; (2) 多孔介质中流体的黏度大小分布是不均匀的; (3) 不同流体有各自的压缩性。

### 3.3 流动环境

(1) 流动环境中温度的变化将导致非等温渗流; (2) 结垢的环境将改变多孔介质的渗透性质; (3) 压力的变化引起压敏效应导致渗透率的变化,从而产生非线性渗流; (4) 低压环境下,气体的渗流将伴随分子效应而产生滑脱流; (5) 震动的环境将改变渗流的特征。

### 3.4 流体与多孔介质的相互作用

气体在固体表面的吸附,溶质在固体表面的吸附,固体表面的润湿性,毛管凝析,渗吸,边界层的形成,启动压力的产生等,这些物理现象都将影响渗流过程。

## 4 渗流的特征

基于渗流影响因素的变化,不同条件下的渗流表现出各种不同的特征。对于牛顿流体,在一定的速度范围内渗流呈现线性的达西渗流。当渗流速度过大时将出现高速非线性的渗流,反之,速度很小时又将呈现低速非线性渗流。

在特定条件下可能出现拟线性渗流 (如宾汉流体渗流)。对于低渗透多孔介质将呈现具有启动压力梯度的非线性渗流。当有温度变化时为非等温渗流。多孔介质变化引起变形介质渗流。当有混相和扩散作用时,会有物理化学渗流、多相多组分流体的多相多组分渗流。当压力和 (或) 流速随时间变化时,又有不稳定渗流。当渗流的维度不同时又有一维渗流和多维渗流,还有其他不同渗流条件约束的具有某种特征的渗流。

这种广泛存在的多种多样特征的渗流过程需要各种各样的数学方程去描述,需要各种不同的实验设备和仪器去模拟具体的渗流过程,研究其变化规律及控制这些规律的参数。

## 5 渗流的研究方法和意义

渗流的研究主要是通过物理模拟实验和(或)数学方法,建立渗流过程的拟合方程和(或)数学理论方程,利用解析解、近似解和数值解,得到相应的物理量,解决渗流工程中的问题。

实验力学在渗流学科的发展上占有重要位置。人们通过实验对原型流动进行系统的观察和测定。从原始数据中寻求流动规律,是渗流学科研究最可靠的方法。如果原型流动的实验无法进行,即可根据相似原理,找出影响渗流过程的主要作用力,在缩小比例尺的模型上进行实验,评估原型流动的状态和各种参数,得到研究的结果。

先进精密的实验设备和仪器,可以使人们更详细地了解多孔介质和流体的特性,了解它们之间的相互作用,发现新的现象,催生新的渗流理论,推动渗流学科技术的发展。

数学方法是研究渗流学科的另一重要手段。许多实验的成果也是经过数学的归纳推广的,随着渗流过程的复杂化,其渗流规律往往需要方程组来描述。在这种条件下,得到解析解非常困难,这就常常需要借助于数值解。数值模拟是计算机问世以来发展起来的计算技术。当研究对象非常复杂、控制方程非线性、边界条件不规则、利用一般数学方法难以解决时,可以建立数值模型方程组,编制计算程序。通过计算机运算,得出数值结果,解决渗流工程

的问题。数值模拟可以帮助人们制订更科学的实验规划,而实验结果可以验证数值模拟的结论。

渗流研究的意义在于渗流理论已经成为人类开发地下水、地热、石油、天然气、煤炭与煤层气等诸多地下资源的重要理论基础,在环境保护、地震预报、生物医疗、燃料电池能源等科学技术领域中,在防止与治理地面沉降、海水入侵,兴建大型水利水电工程、农林工程、冻土工程等工程技术中,已成为必不可少的理论。目前,我国在非正规油气资源的开发方面,渗流研究正处在探索研究方法和积累基础知识阶段,预计会有较大的发展。

**致谢** 感谢黄延章教授在本文的成文过程中给予的指导、宋付权教授对文章的疏漏给予的补充。

## 参考文献

- 1 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- 2 程瑞谿. 不用基桩的水工结构基础应如何设计. 人民水利, 1952(1): 41-46
- 3 王仁东. 水工结构流床底下有压滤流(渗流)的片段解法的基础公式. 浙江大学学报(工学版), 1957(3): 1-8
- 4 刘俊丽, 刘曰武, 黄延章. 渗流力学的回顾与展望. 力学与实践, 2008, 30(1): 94-97  
Liu Junli, Liu Yuewu, Huang Yanzhang. A review of mechanics of fluid in porous media. *Mechanics in Engineering*, 2008, 30(1): 94-97 (in Chinese)
- 5 顶述基. 达西及达西定律. 水文地质工程地质, 1986(3): 33-35
- 6 闫庆来, 何秋轩, 尉立岗等. 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): 1-62  
Yan Qinglai, He Qiuxuan, Wei Ligang, et al. A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs. *Journal of Xi'an Petroleum Institute*, 1990, 5(2): 1-62 (in Chinese)
- 7 黄延章. 低渗透油层渗流机理. 北京: 石油工业出版社, 1998

(责任编辑: 胡漫)