



渗流力学的回顾与展望

刘俊丽^{*1)} 刘曰武^{*} 黄延章[†]

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100080) [†](中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007)

摘要 简要回顾了渗流力学的发展过程, 总结了渗流力学 3 个不同阶段的发展. 对渗流力学的应用进行了分类分析, 并对渗流力学的下一步需要重点研究的工作进行了说明.

关键词 渗流力学, 发展, 应用

引言

渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学, 渗流力学既是流体力学的一个独立的分支学科, 又是一个与岩石力学、多孔介质物理、表面物理、物理化学、热力学等相互交叉的独立学科.

渗流一词在我国出现于 20 世纪 60 年代初期. 在此之前, 人们将渗流称之为“滤流”、“渗滤”等. 例如在阿列文的渗滤理论一书译文中称渗流理论为“渗滤理论”^[1]. 在卡佳霍夫的“油层物理基础”一书译文中也称渗流理论为“渗滤理论”^[2].

20 世纪 60 年代初中国科学院拟在兰州组建渗流力学方面的研究机构, 初期设立在兰州地质所, 曾称为“地下水动力学研究室”. 1963 年该室科研人员经过讨论建议改为“渗流力学室”, 这样“渗流力学”一词就逐渐被国人所接受.

渗流的英文对应词是 flow through porous media, 就是通过多孔介质的流动, 有时简称为 porous flow, 渗流的俄文对应词为 фильтрация, 表示经过滤器的流动, 但是它区别于 фильтрование, 即区别于“过滤”. “过滤”则为含有杂质的流体经过滤器, 滤去杂质使之净化的过程. 因此, 渗流的定义为: 流体通过多孔介质的流动称为渗流. 渗流的这一定义是比较科学的.

1 渗流力学的发展

渗流力学的发展已经历了一个半世纪, 由于几代科学家的辛勤耕耘, 渗流力学走过了创立阶段、发展阶段、现代渗流力学形成的辉煌道路.

1.1 渗流力学创立阶段

1856 年 Darcy 在解决法国第戎城的城市供水问题过程中, 通过大量试验研究得出砂土类孔隙介质的渗流能量损失与渗流速度之间线性正比关系, 总结出了著名的 Darcy 定律. 达西渗流的形式通常表示为一条过原点的直线, 即流速与压力梯度为线性关系. 多年来基于 Darcy 定律建立的经典渗流理论逐步发展完善. 人们一直沿用这一著名的公式作为水力渗流的基本规律, 它被广泛地运用于多项工程技术领域如水利工程、油气田开发工程、土木工程等. 在此期间所解

决的问题主要为单相均匀流体在刚性多孔介质中的流动, 因此一般将这一阶段称之为达西渗流力学阶段或渗流力学创立阶段.

1.2 渗流力学的发展阶段

渗流力学的发展主要表现在两个方面: 其一是渗流力学的研究向非达西(非线性)方向扩展, 其二渗流力学在众多领域的应用有了更大的发展.

人们在渗流研究的实践中, 发现达西定律有一定的适用范围, 超过了这些范围, 渗流规律就会变为非线性的. 主要研究了两大类非达西渗流过程, 即低速流动条件下的非达西渗流和高速流动条件下的非达西渗流.

1.2.1 低速流动条件下的非达西渗流

对于单相流体低速非达西渗流问题, 国内外许多学者对其进行了大量的研究^[1~14]. 我们将低速下的非达西渗流规律分为两类: 一是单相液体的非达西渗流, 一是单相气体的非达西渗流.

对于单相液体的非达西渗流是由苏联学者帕弗洛夫斯基在 1922 年首先提出的^[3]. 在某些情况下, 只有当外加压力梯度超过某一起始压力梯度时液体才开始流动. 在石油渗流的研究中, 特列宾首先提出破坏达西线性渗流规律的问题. 卡佳霍夫等^[2]研究了达西定律的适用范围, 刘慈群^[15]研究了有起始比降固结问题的近似解. 阎庆来^[4]进行了大量的渗流实验研究, 探讨了多孔介质中低速渗流的机理. 冯文光等^[17,18]研究了单一介质双重介质中低速非达西渗流问题求得压力动态.

单相低速非达西渗流的基本特征为^[6]:

(1) 当压力梯度在比较低的某一范围时, 渗流速度的增加呈下凹型非达西渗流曲线.

(2) 当压力梯度大于某一值时, 渗流速度与压力梯度呈直线性增加.

(3) 直线段的延伸与压力梯度轴相交于原点.

(4) 渗流特征与介质和液体性质有关, 渗透率越低或者液体黏度越大, 非达西部分下凹型曲线延伸越大.

对于单相气体的非达西渗流, 早在 20 世纪 40 年代初, Klinkenberg 等研究了气体在微毛细管中的流动, 提出了气体渗流产生的滑脱效应理论. Liu 等^[20]用 Lattice Boltzmann 方法模拟了气体渗流产生的滑脱效应, 得到了较好的物理解释.

2007-11-25 收到第 1 稿, 2007-12-20 收到修改稿.

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

气体低速非达西渗流和液体低速非达西流的差别，主要在于前者主要考虑流体性质在低速渗流时的影响，后者则主要考虑流固相互作用在低速渗流时的影响。

1.2.2 高速非达西渗流模型

一般来说高速非达西渗流产生在高产油气井井筒周围附近区域内，前人建立了很多的数学模型来表达其特点。И. А. 卡尔内在 1950 年就提出了在高速渗流时，流动已为非线性的了，出现了速度平方项，后来明斯基又进一步发展了高速气体渗流的二项式方程。在试井方面也发展了非达西理论，在假定非达西系数为常数的条件下，认为非达西系数与表皮系数相似，给出了气体试井考虑非达西流动的井筒储存系数的计算方法。但事实上，只有在稳定流下高速非达西流的非达西系数才与表皮系数相似。随着数学理论不断进步，高速非达西流的计算越来越精确，考虑的因素也越来越周全。紊流系统由定值考虑时只适合于地层晚期流动。随着理论的发展紊流系数为一变量，使结果适用的范围更广，从而使地层中不稳定渗流发展更完善。

1.2.3 渗流理论在众多工程技术领域都有了更大发展

随着大型水利工程的建设，大型复杂油气田的开发和各类地下储气库的建立，渗流理论也得到更大的发展。Л. С. 列依宾荪、П. Я. 科钦娜、М. 马斯凯特、И. А. 卡尔内、阿列文、贝尔等一大批科学巨匠们的工作极大地发展了渗流力学理论并在各工程技术领域得到了广泛的应用，解决了一大批水利工程、油气田开发、地下储气库等方面的问题。

1.3 现代渗流力学形成和发展

现代渗流力学的形成有以下几个方面的标志：

- (1) 非牛顿流体渗流规律的研究：研究非牛顿流体在多孔介质中的流动规律；
- (2) 非等温渗流研究：研究多孔介质中温度场对渗流规律的影响；
- (3) 物理化学渗流研究：研究存在物理化学变化对多孔介质中渗流规律的影响；
- (4) 低渗透多孔介质中的渗流研究；
- (5) 微观渗流研究：采用先进仪器设备和计算方法进行渗流微观、细观机理研究；
- (6) 流固耦合的渗流研究：研究介质变形对渗流过程的影响；
- (7) 输运过程的研究：研究渗流过程中的传质现象和输运过程。

1.3.1 现代渗流力学计算方法的发展

引入新的理论和新的方法进行渗流力学的研究^[14]。如微观渗流力学的计算，包括分子动力学方法、Lattice Boltzmann 理论、分形理论等。1982 年由美国数学家 Mandelbrot 提出的分形理论并已被广泛地应用于物理、化学、地学、生物、冶金、材料以及经济等学术领域。在经典渗流力学的基础上，运用分形几何来描述多孔介质的几何特征，建立分形渗流力学是积极可行的，并且已经取得了一定的成果。

1.3.2 非牛顿流体渗流理论研究

人们对拟塑性流体、膨胀性流体的流变特性研究得最多，幂律模型应用最广，聚合物溶液在多孔介质中流动时，黏度大大高于在地面用黏度计所测的黏度。除了稳定流以外，人们已在非牛顿幂律流体的不稳定渗流、双重介质中幂律流体渗流以及分形介质中黏弹性流体渗流方面都取得了很大进展。

1.3.3 非等温渗流的研究

传统的渗流力学都把渗流看作等温过程^[8]。非等温是指除了考虑压力场和速度场以外还要考虑温度场。在三次采油地热开发以及某些工程渗流中必须考虑流场中的温度分布以及流体和固体的热膨胀系数和热交换系数。到 20 世纪 80 年代稠油热采的技术指标和经济指标均已成熟，中国克拉玛依油田、胜利油田和辽河油田等已进行了多年的热采工作。

1.3.4 物理化学渗流的研究

物理化学渗流是指含有复杂物理变化和化学反应过程的渗流^[12]，这些物理变化和化学反应过程有对流、扩散、弥散、吸附、解吸、浓缩、分离、互溶、相变以及乳化等等。在研究三次采油铀矿地下沥取、土壤盐碱化防治和盐水淡化诸技术中都需要考虑物理化学渗流。

1.3.5 低渗透多孔介质中的非线性渗流研究

水利工程的建设 and 低渗透油气田的开发促进了该领域渗流理论的发展，人们进行了大量的实验研究和理论研究^[13,16]，提出了渗流流体的新概念，低渗透多孔介质中非线性渗流的基本特征是具有启动压力梯度的非线性渗流规律：

阎庆来等^[16]进行了大量的低渗透岩心渗流实验研究，探讨了低渗透多孔介质中渗流的机理。刘曰武等^[19]提出了确定启动压力梯度的 3 种方法，指出确定方法的实用价值，并对 3 种方法进行了评价分析。黄延章^[13]对低渗透非达西渗流作了较为全面的总结，并在单相流的基础上对低渗透非达西多相流问题进行进一步的研究，并给出了低渗透油田相对渗透率曲线的计算方法。

单相低渗非达西渗流的基本特征为：

- (1) 启动压力梯度的存在，使岩石在小于某一压力梯度时不产生渗流流动。
- (2) 当压力梯度在比较低的某一范围时，渗流速度的增加呈下凹型非达西渗流曲线。
- (3) 当压力梯度大于某一值时，渗流速度与压力梯度呈直线性增加。
- (4) 直线段的延伸与压力梯度轴不相交于原点，该交点称为拟启动压力梯度。

(5) 渗流特征与介质和液体性质有关，渗透率越低或者液体黏度越大启动压力越大，非达西部分下凹型曲线延伸越大。

1.3.6 微观渗流的研究

微观渗流是指在孔隙尺度上微米量级尺度上研究流体在多孔介质中的渗流的性状^[10]。传统的渗流是研究宏观特性即统计平均特性，而不能确切了解多孔介质内部的物理化学过程及渗流机理。微观与宏观研究相互补充，可使对渗流的认识更加透彻，微观渗流研究的内容包括多孔介质本身的特

性如介质的拓扑结构、孔隙和裂隙的分布情况、孔隙表面的粗糙度等。多孔介质与流体之间的关系如表面润湿性、饱和度分布和各相之间的分布细节等。微观渗流实验力学及其应用是目前研究的热点和重要的发展方向^[11]。

1.3.7 流固耦合的研究

流固耦合的研究通常是将渗流力学与岩石力学结合起来^[9]。所涉及的内容包括：振动采油、水库诱发地震、地面沉降和煤层气渗流等。振动采油是利用外力作用来提高石油采收率，研究表明在交变载荷作用下多孔介质和流体处于膨胀收缩的交替过程，应力应变关系是瞬间状态。水库大量蓄水会造成局部岩体应力积累，地面沉降及恢复过程也涉及流固耦合问题。煤层甲烷气渗流与煤体力学的耦合是采煤业和煤层甲烷气开发中必须研究的重要课题。

1.3.8 输运过程的研究

输运过程是当代渗流力学中的重要课题^[8,12]，它涉及地下水污染的防治、土壤的盐碱化以及三次采油等领域。地下水污染的原因有垃圾处理不当，其滤液渗入地表并进入含水层。工业废水和生活污水排入江湖后渗入地下含水层，化肥和农药渗入地表并进入含水层，沿海地区的海水入侵以及内陆海相沉积层中咸水入侵淡水等等。溶质的输运造成地下水含有各种有机质和无机化合物使地下水恶化，给人民生活工业用水和农业灌溉带来严重影响。三次采油中向地层注入表面活性剂等驱油溶液，也涉及溶质运移的研究。

2 渗流力学的应用

2.1 地下渗流

渗流力学是地下流体资源（石油、天然气、地下水、地下盐水和地热等）开发的理论基础。不可压缩和可压缩单相流体在地层中的渗流问题是 20 世纪三四十年代已经解决，可归结为求解拉普拉斯方程和傅立叶热传导方程；单相气体在均质孔隙介质中的渗流方程在 20 世纪 20 年代即已建立，其定常流的问题实质上也是求解拉普拉斯方程，而不定常流的数学模型则是二阶非线性抛物方程^[9]。

低于饱和压力下开发油田以及注水开发油田的生产需要，促进了多相渗流的发展。多相渗流的研究自 20 世纪 30 年代开始，而 20 世纪 40 年代大规模推广的二次采油和 20 世纪 50 年代开始广泛应用的一次注水开发促进了多相渗流的急剧发展。巴克利-莱弗利特两相一维数学模型，揭示了两相渗流的不可忽略的非活塞性驱替的影响。这些重要的进展为工程计算奠定了进一步的理论基础，并可以推广应用到三相渗流。对于多相流数学模型，除简单条件下可以获得解析解和相似性解外，一般都需要数值求解。

地下水渗流是渗流力学的一个重要方面，国民经济的需要有力地促进了地下水渗流的研究和应用。由于工农业生产用水和生活用水对地下水资源开发利用的需要越来越多，促进了地下水渗流的发展。在多水层的含水层开发过程中，相邻各层的水通过弱渗透夹层窜流入开发层。对这种渗流问题的研究有助于确定含水层的参数，了解含水层的性质，查明

含水层的潜力，并合理开发地下水^[12]。

与水工建筑有关的渗流力学问题从来都是受到重视的。例如，渗流过程对水工建筑有破坏作用，对渗流过程进行预测并据此采取必要的措施，就有可能延长水工建筑的有效使用年限甚至避免可能出现事故。在土壤改良和排灌工程中，需要考虑降低地下水位等问题，水库附近地下水位升高引起下游地区沼泽化，因而在下游地区布置减压井以降低地下水压力等问题，对渗流力学提出了越来越多的任务。与排灌和水工相关的动边界问题实质上是有自由面的多维问题，用经典的力学手段难以解决这类问题，但用有限元数值解法等新的手段可能满意地解决这类问题。

不仅如此，像地热开发、热水层开发、地下储气库工程、城市地面沉降、污水地下处理、地下核爆炸、地震预报、地震控制、海水入侵以及岩盐地区工程稳定性等问题，都要求加速发展渗流力学的理论研究和应用研究。

2.2 工程渗流

化学工业中存在许多渗流过程，如过滤、洗涤、浓缩、分离以及充填床内的具有复杂化学反应的流体流动等其中有些是利用多孔介质作为流体进行充分反应的场所，有些是将多孔介质作为滤流的填料。与过滤有关的流动主要是固-液或液-液的单相及多相渗流问题，由于这类渗流涉及工业生产的许多重要部门，国外进行了大量的研究。在滤块形成的研究方面，结合土壤力学的固结理论而应用了范宁方程。在滤块内压力分布、滤块的各向异性及非正常渗流等方面也有一定进展。考虑到吸附、扩散和离散过程的渗流问题已经受到重视。通过研究弹性变形孔隙介质，得到饱和液体的多孔弹性体的平衡解，提出了非牛顿流体通过充填床的指数流动规律^[5]。

硅酸盐工业和冶金工业的发展也促进了渗流力学的研究应用领域的扩展。像耐火材料、陶瓷和金属陶瓷等人造多孔介质材料的性能及用途，都与其物理化学性质及多孔介质中的渗流过程有关。已经进行了大量的渗流研究工作，但毕竟开始较迟，目前的注意力还主要是研究介质的物理性质方面，例如渗透性质、孔隙结构、比面测定、热传导效率等。

细菌炼铜新工艺的硫酸铜浸出效率及铜铁置换效率与滤液渗流过程有直接关系。混凝土、砖石、木材和黏土等多孔体内的水分、湿度情况会影响应力状态。在介质变形方程中引入液体有效势，导出了多孔弹性体的湿度传导方程和平衡方程。

渗流力学与环保技术有密切关系。利用薄膜及滤器的污水处理技术以及原子能工业中用多孔体清除放射性颗粒及气体裂变产物等技术都给渗流力学提出了新的课题。国外发表的渗流文章中有关过滤分离时压力分布问题，考虑扩散和吸附的渗流问题，另外还涉及湍流渗透性系数和层流渗透性系数与多孔介质材料物理性能的关系等。

工程渗流的问题一般都是相当复杂的渗流问题，包括多相渗流、非牛顿流体渗流、化学过程相当复杂的物理化学渗

流、分子渗流以及超微孔隙度渗流问题。这些问题的研究解决，不但有助于国民经济的发展，而且有利于促进渗流力学学科的发展。

3 结束语

根据渗流理论本身发展的要求和各种工程实际问题的需要，以及目前国内外研究的热点问题^[21~23]，在今后较长一段时间内，渗流力学应对以下几方面进行重点研究工作：

- (1) 深入的考虑固体介质的性质和特点；
- (2) 深入的考虑流体性质的影响；
- (3) 考虑温度因素的影响；
- (4) 深入的考虑复杂的物理过程和化学过程；
- (5) 从微观的角度研究渗流力学，即微观渗流力学。

参 考 文 献

- 1 阿列文等著. 王仁东译. 渗滤理论. 北京: 高等教育出版社, 1958
- 2 卡佳霍夫. 油层物理基础. 北京: 石油工业出版社, 1958
- 3 B.A 弗洛林. 同济大学土力学及地基基础教研室译. 土力学原理. 北京: 中国工业出版社, 1964
- 4 阎庆来. 单相液体低速渗流特征的实验研究. 第 1 届流体力学大会论文集, 1983
- 5 Bear J, et al. Modeling and Application of Transport Phenomena in Porous Media. Dordrecht, Kluwer, 1991
- 6 杰弗里卡莫夫. 异常石油. 北京: 石油工业出版社, 1983
- 7 贝尔著. 李竞生等译. 多孔介质流体动力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 8 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- 9 葛家理等编. 现代油藏渗流力学原理. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 10 郭尚平等. 物理化学渗流微观机理. 北京: 科学出版社, 1990
- 11 黄延章, 于大森. 微观渗流实验力学及其应用. 北京: 石油工业出版社, 2001
- 12 顾慰慈编著. 渗流计算原理及应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2000
- 13 黄延章著. 低渗透油层渗流机理. 北京: 石油工业出版社, 1998
- 14 李允等著. 特殊渗流过程理论及应用. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 15 刘慧群. 有起始比降固结问题的近似解. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 107~109
- 16 阎庆来, 何秋轩. 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
- 17 冯文光, 葛家理. 单一介质、双重介质中非定常非达西低速渗流问题. 石油勘探与开发, 1985, 12(1): 56~62
- 18 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与进展. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76~80
- 19 刘曰武, 丁振华等. 确定低渗透油启动压力梯度的 3 种方法. 油气井测试, 2002, 11(4): 1~4
- 20 Liu Yuewu, et al. Lattice Boltzmann simulation of Klinkenberg effect in porous media. *Chinese J Comp Phys*, 2003, 20(3): 157~160
- 21 Wu Jinsui, Yu Boming. A fractal resistance model for flow through porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(19-20): 3925~3932
- 22 Arunn Narasimhan, K. Sumithra Raju. Effect of variable permeability porous medium inter-connectors on the thermo-hydraulics of heat exchanger modelled as porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(19-20): 4052~4062
- 23 Chandresris M, Jamet D. Boundary conditions at a fluid-porous interface: An a priori estimation of the stress jump coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(17-18): 3422~3436

第 5 届江苏省大学生力学竞赛颁奖大会在南京理工大学举行

2007 年 11 月 25 日，在南京理工大学隆重举行第 5 届江苏省大学生力学竞赛颁奖大会，来自全省 48 所高校的 200 余位获奖单位领导及获奖学生代表出席会议。

下午 2:00 颁奖大会在热烈而喜庆的气氛下开始，会议由中国力学学会教育工作委员会秘书长、江苏省力学学会教育科普工作委员会主任、本届竞赛组委会副主任、南京航空航天大学吴文龙教授主持；本届竞赛组委会副主任、南京理工大学副校长汪信教授致欢迎词；江苏省力学学会教育科普工作委员会副主任、东南大学郭应征教授汇报本届竞赛情况；本届竞赛全省共有 51 所高校的 2504 名选手报名参赛。经竞赛组委会评选，共评出 22 所学校获团体奖，12 所学校获优秀组织奖，644 人次获个人奖。之后获奖学校和获奖学生分 16 批上台领奖；南京航空航天大学丁力同学、南京理工大学王兴久老师分别代表获奖学生和指导教师发言；江苏省力学学会副理事长尹晓春教授讲话；最后本届全国周培源大学生

力学竞赛评奖主任、北京大学武际可教授作了重要讲话，他首先盛赞了本届江苏省大学生力学竞赛取得的丰硕成绩，对获奖学校和获奖学生表示热烈祝贺。同时他满怀深情地回顾了周培源先生的治学精神和严谨的科学作风，最后以周培源先生的“独立思考、实事求是、锲而不舍、以勤补拙”座右铭与大家共勉！

参加颁奖大会，不仅仅是领奖，更重要的是让所有参会者受到教育和启发。竞赛组委会指出：开展力学竞赛，不仅检验了基础课的教学效果，而且也有利于改进和提高教师的教学工作。希望各校认真总结经验，进一步深化力学课程的教学改革，加强相关课程的建设，不断提高教学质量，努力培养更多的优秀人才。

江苏省大学生力学竞赛组委会

2007 年 12 月 4 日