

A New Method for the Study of Seepage Law

Wang Chang-yi

Penglai City Bureau of Land and Resources, Shandong, Penglai 265600, China

Email: 15963568068@126.com

Abstract

The seepage mechanics system was born in 1850s. Since 1920s, it has been applied in oil and gas development industry. After 1960s, the rapid development of seepage mechanics. However, in the current system of percolation mechanics, the theoretical formula can not find the correct description of the law of seepage. The new method of seepage law is derived according to the basic law of the evolution of nature. The most basic law of the evolution of natural development is the unity of function and the law of unity of opposites. According to the law of the unity of opposites, seepage flow operation and viscous flow operation exist different regularity.

Keywords

A New Method of Seepage Law; Theoretical Formula; the Law of Unity of Opposites; Seepage Flow Operation; Viscous Flow Operation

Subject Areas: Math & Physics

渗流规律研究新方法

王昌益

蓬莱市国土资源局, 山东, 蓬莱 265600

Email: 15963568068@126.com

收稿日期: 2016年5月3日; 发布日期: 2016年5月5日

摘要

渗流力学体系最初产生于19世纪50年代。从20世纪20年代起,又在石油,天然气开发工业中得到应用。20世纪60年代以后,渗流力学发展迅速。但是,在当代渗流力学体系中找不到能够正确描述渗流规律的理论公式。渗流规律研究新方法是根据自然发展演化最基本规律推导出来的。自然发展演化遵守的最基本规律是作用的统一与对立统一规律。根据作用对立统一规律,渗流运行和滞流运行存在不同规律。

关键词

渗流规律研究新方法; 理论公式; 作用的对立统一规律; 渗流运行; 滞流运行

引言

渗流理论从 19 世纪 50 年代产生, 经过 160 多年的发展到现在, 已经获取了许多重大进展, 然而, 由于科学历史原因, 关于控制渗流运动的作用和地层性质与渗流运动之间的关系问题, 一直没有得到完全解决。这主要决定于传统的一种科学研究方法——引入参数法经常产生与实际不符的公式和理论问题。在解决参数引入法给渗流研究带来的不科学性问题中产生了渗流规律研究的新理论和新方法。新方法将给水地质学、石油地质学和工程地质学研究带来新的进展。

1 渗流理论发展历史概述及传统渗流理论缺陷

渗流力学体系最初产生于 19 世纪 50 年代。1856 年, 法国工程师达西公布了他的著名实验与定律: 水通过均匀砂层渗流的线性定律——达西定律, 渗流理论从此开始产生与发展。经典渗流学阶段初期, 主要基于地下水开发、水利和水力工程建设的需要, 渗流力学开始发展。从 20 世纪 20 年代起, 又在石油, 天然气开发工业中得到应用。在这个阶段, 渗流力学考虑的因素比较简单: 均质的孔隙介质, 单相的牛顿流体、等温的渗流过程, 而不考虑流体运动中的复杂的物理过程和化学反应。这种简单条件下的渗流问题的数学模型是拉普拉斯方程, 傅里叶热传导方程和二阶非线性抛物型方程。这个阶段的研究方法主要是数学物理方法和比较简单的模拟实验方法。现代渗流力学阶段 从 20 世纪 30 年代起, 由于低于饱和压力开发油田、天然水力驱动、人工注水开发油田以及农田水利等工程技术的需要, 逐步发展了多相渗流理论, 开始了渗流学理论发展的新阶段。20 世纪 60 年代以后, 渗流力学发展迅速。由于研究内容和考虑因素方面的发展, 渗流理论不断深化, 大体沿着五个方向进行: ①考虑多孔介质的性质和特点, 发展非均质介质渗流、多重介质(裂缝—孔隙—孔洞)渗流和变形介质渗流; ②考虑流体的多相性, 继续发展多相渗流; ③考虑流体的流变性影响, 发展非牛顿流体渗流; ④考虑渗流的复杂物理过程和化学反应, 发展物理—化学渗流; ⑤考虑渗流过程的温度条件发展非等温渗流。随着渗流学的应用范围日益广泛, 除地下渗流学外, 还研究工程装置和工程材料中的渗流问题, 逐步形成工程渗流力学。

尽管渗流力学经历了长时期发展, 不断获取新进展, 但还是存在一定不足。无论是经典渗流学假说还是当代渗流学体系, 都存在着共同的缺陷: 对渗流运动与其控制因素之间的关系规律认识不足。控制渗流运动的主要因素有两个: 驱使渗流运动的驱动作用是控制渗流运动的主导因素, 渗流运行环境的特性是控制渗流运动的制约因素。经典渗流力学和当代渗流

力学体系都没有真正搞清楚这一点。所以，在当代渗流力学体系中找不到能够正确描述渗流规律的理论公式。这一状况形成的原因关键在于传统基础理论给出来的科学研究方法存在不足。参数引入法是一种普遍采用的应用科学研究方法。无论是在实验基础上，还是在思维认识与观测研究基础上，在解决各种实际问题时，人们总是在不明就里前提下，在自我感觉基础上在某两个量之间添加上一个参数，然后获得公式，进而应用这种公式来分析问题、解决问题。长期以来，人们总是采用参数引入法来建立公式，几乎没有人会根据自然规律建立理论公式，所以，理论公式在渗流学研究领域形成了世界空白。

达西定律是在实验基础上应用参数引入方法建立起来的，其数学表达式是

$$q = k \frac{H - h}{\Delta L} S \xrightarrow{\text{另一形式}} q = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p_r}{\Delta L} S .$$

式中， Q 表示通过砂层的渗流流量，量纲为 cm^3/s ； K 表示意识中的砂层渗透率，量纲为 μm^2 ； S 表示渗滤横截面积，量纲为 cm^2 ； $\Delta H = H - h$ 表示水位差； Δp_r 表示两渗流截面间的折算压力差，物理大气压（工程大气压）； μ 表示液体粘度，量纲为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； ΔL 表示两渗流截面间的距离，量纲为 cm 。达西定律与实际渗流规律基本上不符。

修正达西定律产生的指数式 $q = C(\Delta p)^n$ 和二项式 $\Delta p = aQ + bQ^2$ 也是应用参数引入法建立的，与实际规律也存在一定差距，也不能表达渗流普遍遵守的基本规律。

2 渗流规律研究新方法建立的理论基础

传统渗流理论的共同缺陷从一个侧面反映了自然科学基础理论对自然发展演化基本规律认识的不足。因此，要想改变这一现实，首先必须从认识自然发展演化最基本规律入手，全面认识控制自然发展演化的作用规律，进而深入认识自然的动态统一规律、获取科学研究的统一方法。

上个世纪 80 年代，在我国产生了作用学。作用学揭示了自然事物发展演化普遍遵守的统一规律，并建立了描述自然发展演化规律的最基本方程组，为渗流规律研究奠定了基础。自然事物发展演化普遍遵守的统一规律如下：

自然发展演化遵守的最基本规律是作用的统一与对立统一规律。作用的统一与对立统一规律是：控制事物发展变化的作用量产生两个作用量，分别叫实作用量和虚作用量。即实作用量加虚作用量等于作用量。控制实作用量和虚作用量分配比例的是受作用物体的客观性质特征指数，分别被叫做实度和虚度。即，实作用量等于实度与作用量之积；虚作用量等于虚

度与作用量之积。实度与虚度等于 1。这个基本规律的数学表达式为

$$\begin{cases} A_F + A_T = A, \\ A_F = EA, \\ A_T = TA, \\ E + T = 1. \end{cases}$$

式中，A 表示主动作用量；E 为虚度；T 为实度； A_F 表示虚作用量； A_T 表示实作用量。其中， $A = Ft$ ；F 表示作用力；t 表示作用时间。

渗流规律遵守上述自然事物发展演化普遍规律，所以，根据上述自然事物发展演化普遍规律构成了新渗流理论方法建立的理论基础。

3 渗流规律研究新方法

根据作用学关于“自然发展演化遵守的作用统一与对立统一规律方程组”，可以通过确定控制渗流运动的作用量、虚作用量或实作用量、虚度或实度及其相互关系规律，建立渗流体系中的渗流方程，直接研究渗流体系中的渗流规律。

这里通过实例来阐述该方法与步骤如下：

实例：如图 1 所示，单相流渗流体系中的渗流液体是水，水的补给流量是 Q ，滞流积水区域分布面积为 S_s ，滞流积水区水位高度是 H ，渗流断面面积是 S ，渗流量（排泄流量）是 q ，渗出区水位高度是 h （ S 断面下游的水位），请测量渗流量与其它量之间的定量统一关系规律。

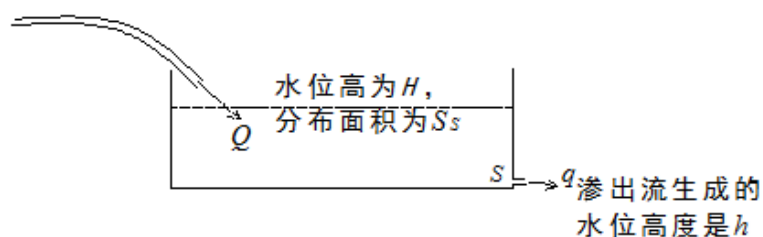


图 1 渗流体系动态统一规律示意图

Fig1. The law of the unity of seepage system dynamic sketch

解：根据作用对立统一规律方程组

$$\begin{cases} A_F + A_T = A, \\ A_F = EA, \\ A_T = TA, \\ E + T = 1, \end{cases}$$

首先确定控制体系内流体运行的作用量：

$$A = \int_0^t \rho \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt;$$

式中， $A = \int_0^t \frac{\rho Q^2}{ES} dt$ 是渗流量 Q 自身的动量，等于 Q 对 S 断面产生的冲击作用量；

$A = \int_0^t \rho Qgt dt$ 是重力对渗流量 Q 产生的作用量，也是断面 S 受作用的一个动力来源；

$A = \int_0^t \rho S_s(H-h)g dt$ 等于滞流水体对断面 S 产生的作用量。

同时，确定断面 S 接受的虚作用量：虚作用量等于通过断面 S 上孔隙运行、没有对 S 断面形成冲击作用的水流动量，即

$$A_F = \int_0^t \rho \frac{q^2 dt}{ES};$$

根据方程组中的 $A_F = EA$ 式，虚作用量还等于断面 S 的虚度 E 与作用量之积，即

$$A_F = EA = \int_0^t \rho E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt.$$

同时还要确定断面 S 接受的实作用量：实作用量等于滞流动量，即

$$A_T = \int_0^t \rho S_s(H-h)g dt;$$

根据是方程组中的 $A_T = TA$ 式，实作用量与作用量之间的关系式是

$$A_T = TA = \int_0^t \rho T \left[\frac{Q^2}{ES} + S_s(H-h)g \right] dt.$$

在实际问题解决中确定以上这种作用量是解决该实际问题的关键一步。

第二步，根据对立统一规律方程组中的方程确定虚作用平衡关系式，即

$$A_F = EA = \int_0^t \rho E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt = \int_0^t \rho \frac{q^2 dt}{ES},$$

由此，得

$$q = \sqrt{E[Q^2 + ESQgt + ESS_s(H-h)g]};$$

同时, 根据对立统一规律方程组中的方程确定实作用平衡方程, 即

$$A_T = \int_0^t \rho T \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt = \int_0^t \rho S_s(H-h)g dt,$$

由此, 得

$$\Delta H = H - h = \frac{T(Q^2 + ESQgt)}{E^2 S S_s g}.$$

可见, 供水流量被分成了渗流量和滞流量两个部分, 滞流量产生水头高度。方程组

$$\begin{cases} \Delta H = H - h = \frac{T(Q^2 + ESQgt)}{E^2 S S_s g} \\ q = \sqrt{E[Q^2 + ESQgt + ESS_s(H-h)g]} \end{cases}$$

叫做流体渗流运动动态平衡方程组。

第三步, 研究渗流物质运行规律和滞行规律:

流体在运行中被自然分成两个部分: 一部分运行 (穿过断面向前运动), 另一部分滞流 (滞留在断面之后活动)。其中, 滞流部分在断面之后生成势位 (如水头增量), 另一部分构成渗流量。这就规定了渗流存在两个绝然不同的运行方程: 渗流方程

$$L = \int_0^t \frac{EA}{\rho} dt = \int_0^t \left\{ \int_0^t E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt \right\} dt = \int_0^t \left(\int_0^t \frac{q^2}{ES} dt \right) dt;$$

滞流方程

$$L = \int_0^t \left[\int_0^t S_s(H-h)g dt \right] dt = \int_0^t \left\{ T \int_0^t \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt \right\} dt.$$

因此, 单相流体渗流运动的完整方程是

$$L = \begin{cases} \int_0^t \left[\int_0^t S_s(H-h)g dt \right] dt = \int_0^t \left\{ T \int_0^t \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt \right\} dt & \text{叫滞流运动方程;} \\ \int_0^t \left\{ \int_0^t E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s(H-h)g \right] dt \right\} dt = \int_0^t \left(\int_0^t \frac{q^2}{ES} dt \right) dt & \text{叫渗流运动方程。} \end{cases}$$

式中, L 表示渗流物质运行距离; Q 表示渗入流量; q 表示渗出流量 (从 S 断面渗出的渗流量); E 表示断面 S 的孔隙度 (虚度); t 表示渗流时间; S 表示渗流断面面积; H 和 h 分别表示 S 面前后的水位高度; S_s 表示 H 的分布面积 (水平面积); 流体的密度是 ρ; g 表示重力加

速度。

4 新方法的力学形式

为了便于理解，将上述新方法转化为力学表达形式如下：

将流体的运行方程

$$L = \begin{cases} \int_0^t \left[\int_0^t S_s (H-h) g dt \right] dt = \int_0^t \left\{ T \int_0^t \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] dt \right\} dt ; \\ \int_0^t \left\{ \int_0^t E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] dt \right\} dt = \int_0^t \left(\int_0^t \frac{q^2}{ES} dt \right) dt 。 \end{cases}$$

进行一次微分，可得渗流运动速度方程：

$$u = \begin{cases} \int_0^t S_s (H-h) g dt = \int_0^t T \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] dt ; & \text{滞流速度;} \\ \int_0^t E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] dt = \int_0^t \frac{q^2}{ES} dt ; & \text{渗流速度。} \end{cases}$$

再进行一次微分，可得渗流运动加速度方程：

$$a = \begin{cases} S_s (H-h) g = T \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] ; & \text{滞流加速度;} \\ E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] = \frac{q^2}{ES} ; & \text{渗流加速度。} \end{cases}$$

取

$$a = \begin{cases} = T \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] \\ E \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right] \end{cases}$$

作为描述渗流运行规律的基本方程，用 P 表示控制系统中渗流运行与变化的驱动力，

$$P = \rho \left[\frac{Q^2}{ES} + Qgt + S_s (H-h) g \right], \rho \text{ 表示渗流物质密度，则有渗流运行方程的力学形式：}$$

$$a = \begin{cases} \frac{TP}{\rho}; & \text{滞流;} \\ \frac{EP}{\rho}. & \text{渗流。} \end{cases} \Rightarrow P = \begin{cases} \frac{\rho a}{T}; & \text{滞流动力, 水头升高动力;} \\ \frac{\rho a}{E}. & \text{渗流动力。} \end{cases}$$

其中, $a = \frac{EP}{\rho}$ 是渗流运行方程; $a = \frac{TP}{\rho}$ 是滞流运行方程。将式

$$Q^2 + ESQgt + ESS_s(H-h)g = \frac{ESP}{\rho}$$

代入渗流动态平衡方程 $q = \sqrt{E[Q^2 + ESQgt + ESS_s(H-h)g]}$, 则有渗流量

$$q = E\sqrt{\frac{SP}{\rho}}.$$

这就是新渗流理论方程的力学形式。相应, 滞流理论方程为

$$\Delta Q = Q - q = T\sqrt{\frac{SP}{\rho}}.$$

根据这一规律得知, 在流体开采过程中, 决定产量(渗流量)的关键因素是开采断面面积、开采断面的性质、驱动压力(驱动条件)和流体的密度四个量的大小。

5 结论

通过以上讨论得知, 根据作用学理论建立的渗流运动规律研究新方法, 可以使人们更清楚认识控制渗流运动的各种物理量及其统一关系规律, 更方便、更有效地解决实际问题。新方法给出来的理论公式具有完美的科学化、理论化特征, 应用新方法可以避免问题研究过程走弯路, 能够节省研究工作量。

参考文献

- [1] 刘建军, 裴桂红. 我国渗流力学发展现状及展望[J]. 武汉工业学院学报, 2002(3):99-103.
(LIU Jian-jun, PEI Gui-hong. Development status and Prospect of seepage mechanics in China [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2002(3):99~103. (in Chinese))
- [2] 李家春. 现代流体力学发展的回顾与展望[J]. 力学进展, 1995(04):442-450
(LI Jia-chun. Review and Prospect of the development of modern fluid mechanics [J]. Advances in Mechanics, 1995(4):442~450. (in Chinese))
- [3] 代素梅. 基于网络的流体力学实验室关键技术研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2009.

- (DAI Su-mei. Research on Key Technologies of fluid mechanics laboratory based on Network [D]. China University of Mining and Technology (Beijing), 2009. (in Chinese))
- [4] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2006.
- (YAN Chao. Method and application of computational fluid dynamics [M]. Beihang University Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 周济福. 渗流力学研究的现状和发展趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(3):1-6.
- (ZHOU Ji-fu. Current situation and development trend of seepage mechanics [J]. Mechanics and Practice, 2007, 29 (3) :1~6. (in Chinese))
- [6] 王昌益, 贺可强. 作用的对立统一规律在滑坡研究中的应用[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(3):27-33.
- (WANG Chang-yi, HE Ke-qiang. The application of the law of the unity of opposites in the study of landslide [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009 30 (3) :27~33. (in Chinese))
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 清华大学出版社, 2004.
- (WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis [M]. Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [8] 王昌益, 孙洁. 滑坡预测的作用学原理[J]. 城乡建设, 2010(2):183-183.
- (WANG Chang-yi, SUN Jie. The principle of action of landslide prediction [J]. Urban and Rural Construction, 2010 (2) :183~183. (in Chinese))
- [9] 郑哲敏, 张涵信. 21 世纪初的力学发展趋势[J]. 学会, 1995, 25(4):433-441.
- (ZHENG Zhe-min, ZHANG Han-xin. Mechanical development trend at the beginning of twenty-first Century [J]. Xuehui, 1995 25 (4) :443~441. (in Chinese))
- [10]. 刘慈群, 郭尚平. 关于计算渗流力学问题[J]. 力学进展, 1983(1).
- (LIU Ci-qun, GUO Shang-ping. On computational fluid dynamics [J]. Advances in Mechanics, 1983 (1) . (in Chinese))