



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.04.22.02

文章编号: 1674-5086(2024)05-0124-08

中图分类号: TE344

文献标志码: A

# 缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动表征方法探讨

郑松青<sup>1\*</sup>, 王 强<sup>1</sup>, 张世亮<sup>2</sup>, 袁飞宇<sup>2</sup>

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 昌平 102206; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011

**摘 要:** 塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间尺度差异大、流动复杂, 很多学者认为渗流理论不能解决其流动表征问题, 应该用管流理论解决。为厘清这一问题, 从管流与渗流的概念、单相流流动特征及数学表征方法、油水两相流流动特征及数学表征方法3方面, 研究了管流与渗流的关系, 在此基础上, 分析了管流方程描述缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动的可行性, 并对缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动的表征方法进行了探讨。结果表明, 从研究的角度, 渗流可视为小尺度复杂管道管流; 单相流时, 管流存在层流、紊流两种流态, 渗流也存在层流、紊流两种流态, 层流状态, 描述管流与渗流的方程是统一的, 紊流状态, 二者的描述方程不一致, 但都是考虑惯性力的影响; 两相流时, 管流存在多种流型, 渗流因尺度小、流型简单, 管流基于流型建立了不同的流动表征模型, 渗流利用相渗曲线解决两相流问题。说明, 管流与渗流并不“冲突”, 渗流即是小尺度复杂管道管流, 只是由于学科不同、研究对象不同, 对流体流动采用了不同的表征方法。缝洞型碳酸盐岩油藏描述不确定大, 受油藏描述精度和研究范围的制约, 现有管流的处理方法并不适用描述缝洞型碳酸盐岩油藏流体的流动。缝洞型碳酸盐岩油藏的流体流动表征问题应该在渗流力学的架构内, 部分借鉴管流的处理方法来解决。

**关键词:** 管流; 渗流; 连续性假设; 流体流动表征; 缝洞型油藏

## Description of Fluid Flow Characteristics for Fracture-cave Carbonate Reservoirs

ZHENG Songqing<sup>1\*</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Shiliang<sup>2</sup>, YUAN Feiyu<sup>2</sup>

1. Petroleum Exploration &amp; Production Research Institute, SINOPEC, Changping, Beijing 102206, China

2. Northwest Oilfield Branch, SINOPEC, Urumuqi, Xinjiang 830011, China

**Abstract:** Many scholars believe that the seepage theory can not describe the fluid flow in fracture-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin which have complex flow and are different in pore scale and pipe flow theory can solve the problem. In order to clarify this problem, the relationship between pipe flow and seepage is studied from three aspects: the concept of pipe flow and seepage, single-phase flow characteristics and mathematical characterization methods, oil-water two-phase flow characteristics and mathematical characterization methods. On this basis, the feasibility of using pipe flow equation to describe fluid flow in fracture-vuggy reservoirs is analyzed, and the characterization methods of fluid flow in fracture-vuggy reservoirs are discussed. The results show that, the seepage can be regarded as small-scale complex pipeline flow; In case of single-phase flow, there are two flow patterns in pipe flow: laminar flow and turbulent flow, and there are also two flow patterns in seepage flow: laminar flow and turbulent flow. The equations describing pipe flow and seepage flow are unified, while the equations describing turbulent flow are inconsistent, but both consider the influence of inertial force. In two-phase flow, there are many flow patterns in pipe flow. The seepage flow is small in scale and simple in flow pattern. Different characterization models are established for pipe flow according to flow patterns, and relative permeability curve is used to solve the two phase flow problem in seepage flow. It shows that there is no “conflict” between pipe flow and seepage flow. Seepage flow is small-scale complex pipe flow, but due to different disciplines and different research objects, different characterization methods are used for fluid flow. Restricted by the accuracy of reservoir description and the scope of research, the existing pipe flow description methods are not suitable for describing fluid flow in fracture-vuggy reservoirs. The characterization of fluid flow in fracture-vuggy reservoirs should be solved within the framework of seepage mechanics, with reference to the description method of pipe flow.

**Keywords:** pipe flow; seepage; continuum hypothesis; fluid flow characterization; fracture-vuggy reservoirs

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240927.1325.008>

郑松青, 王 强, 张世亮, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动表征方法探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 124-131.

ZHENG Songqing, WANG Qiang, ZHANG Shiliang, et al. Description of Fluid Flow Characteristics for Fracture-cave Carbonate Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(5): 124-131.

\* 收稿日期: 2022-04-22 网络出版时间: 2024-09-29

通信作者: 郑松青, E-mail: zhengsq.syky@sinopec.com

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05014); 国家科技重大专项示范工程(2016ZX05053)

## 引言

塔里木盆地深层、超深层缝洞型碳酸盐岩油藏是油气田开发面临的一种新类型油藏,受多期构造运动和岩溶作用控制,储集空间尺度差异大,地质和开发特征与碎屑岩油藏、裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏有很大不同<sup>[1-5]</sup>。其流体流动表征问题成为油气田开发研究人员关注的焦点问题之一。很多学者认为,缝洞型油藏大缝、大洞发育,流动以管流为主<sup>[6-8]</sup>,而碎屑岩油藏以渗流为主,管流与渗流的差异导致了二者开发特征的差异。实际工作中,甚至“逢渗必反”,一旦用渗流的相关方程描述缝洞型油藏流体流动,则认为是错误的。也有学者认为管流与渗流是统一的<sup>[9]</sup>。那么,管流与渗流究竟是什么关系,目前形成的管流理论能否用于描述缝洞型油藏流体的流动?一系列问题亟需厘清。对于缝洞型油藏开发及提高采收率理论的构建,特别是数值模拟技术的发展有非常重要的意义。

本文从管流与渗流的概念出发,通过对单相流、两相流流动特征及表征方法的对比,系统阐述二者的区别与联系,在此基础上,对管流方程描述缝洞型油藏流体流动的可行性和表征方法进行了探讨。

## 1 管流与渗流的概念

流体流动依据流动区域的不同,可分为内流与外流。内流是在物体内部的流动,外流则是绕物体的流动<sup>[10]</sup>。显而易见,管流和渗流同属内流的范畴。管流与渗流也是基于流动区域命名的。管流是在管道中的流动,渗流是在多孔介质内的流动。那么,多孔介质的流动空间(孔喉、孔隙)能否视作管道呢?

理论研究中,管道以单支圆柱形管道为主,但实际上管道有很多种。依据组成结构可分为简单管道与复杂管道;依据断面形状可分为圆形、矩形和不规则形状管道;依据管壁粗糙程度分为光滑管道与粗糙管道;依据过流断面变化特征可分为等截面管道与变截面管道<sup>[11]</sup>。按此分类,从微观尺度,多孔介质内的流动空间可视为微小尺度、复杂、不规则、变截面和粗糙管道。葛家理等也将多孔介质定义为由毛细管或微毛细管结构组成的介质<sup>[12]</sup>。从微观的角度,多孔介质内的流体流动空

间即可视作管道,这也是孔隙网络模型构建的理论基础之一<sup>[13-15]</sup>。

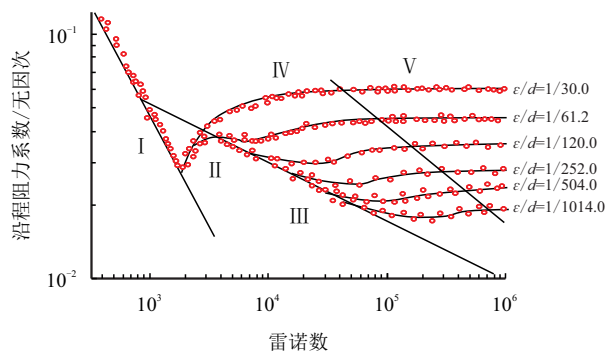
反之,将管道视作多孔介质则是不合适的,因为多孔介质的“孔”为毛细管或微毛细管,而管道既有小尺度管道,也有大尺度管道。因此,从二者概念上看,渗流属于管流,但管流并不属于渗流。为方便讨论,本文仍从学科角度,对管流、渗流分开讨论。

## 2 单相流流动特征及表征方法

黏性流体在自然界中有两种运动状态(简称流态),一种是所有流体质点作定向有规则运动,称为层流;另一种是流体质点作无规则、不定向的混杂运动,称为紊流(也称湍流)<sup>[16]</sup>。

### 2.1 流体流动特征

德国物理学家尼古拉兹为研究管流在不同流动状态(层流、紊流)下的流动特征,基于实验数据绘制了沿程阻力系数与雷诺数的关系曲线,称为尼古拉兹曲线(图1<sup>[16]</sup>)。尼古拉兹曲线可分为5个区,其中,I区为层流区、II区为过渡流区、III区为紊流光滑区、IV区为紊流过渡区、V区为紊流粗糙区(也称阻力平方区)。



注:  $e$ —绝对粗糙度, mm;  $d$ —管径, mm。

图1 管流沿程阻力系数与雷诺数关系曲线

Fig. 1 Relation curve between resistance coefficient and Reynolds number of pipe flow

葛家理等为了研究多孔介质内流体流动特征,通过类似实验绘制了沿程阻力系数与雷诺数的关系曲线(图2<sup>[12]</sup>)。实验曲线分为3个区:层流区、过渡区和紊流区。

通过对比可以发现,随着雷诺数的增大,尼古拉兹和葛家理绘制的沿程阻力系数与雷诺数关系曲线均可粗分为3个区:层流区、过渡区和完全紊流区。区别只是在于管流的过渡区又进行了细分。结

果表明,管流存在层流与紊流,渗流同样存在层流与紊流,二者的流动特征是一致的。

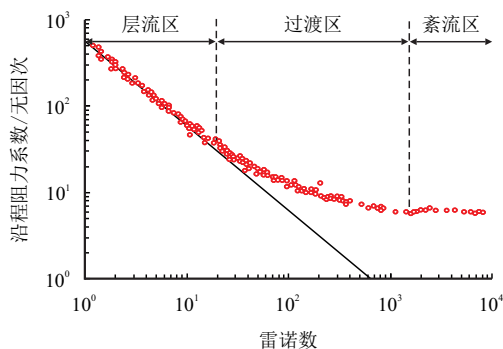


图2 渗流沿程阻力系数与雷诺数关系曲线

Fig. 2 Relation curve between resistance coefficient and Reynolds number of seepage

## 2.2 表征方法

流体流动的表征主要是表征力与速度的关系。黏性流体流动过程中,主要存在4个力:压力、质量力、黏滞力和惯性力。流态不同,主要作用力不同。描述单相黏性流体流动最基本的方程是N-S方程<sup>[10]</sup>,该方程既可用于描述层流,也可用于描述紊流,但因其求解困难,计算量大,在实际应用过程中,管流与渗流又各自发展了不同的公式。

### 2.2.1 层流表征方法

管流中,常用于描述黏性流体定常流的方程是达西-魏斯巴赫(Darcy-Weisbach)公式

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中:

$\Delta p$ —压差, Pa;

$\lambda$ —沿程阻力系数, 无因次;

$L$ —管长, m;

$\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$v$ —流速, m/s。

式(1)的关键是沿程阻力系数 $\lambda$ 的确定。流态不同,确定方法不同。

层流状态下,管流沿程阻力系数仅是雷诺数的函数

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

式中:

$Re$ —雷诺数, 无因次。

将式(2)代入式(1)即可得到层流状态下力与流速的关系式

$$v = \frac{d^2}{32\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (3)$$

式中:

$\mu$ —流体黏度, Pa·s。

式(3)也称为哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseuille)公式。

层流状态下,渗流运动方程亦即达西方程<sup>[17]</sup>

$$v = \frac{K \Delta p}{\mu L} \quad (4)$$

式中:

$K$ —渗透率, D。

对比式(3)、式(4),可以发现,层流阶段两式反映的都是流速与压力梯度呈线性关系。说明二者虽然形式不同,但表征的力与速度的关系是一致的。式(3)、式(4)反映的都是黏滞力与压力的平衡。随着流速增加,雷诺数变大,惯性力出现,紊流程度越高,惯性力作用越大,完全紊流阶段,则以惯性力为主<sup>[12, 16]</sup>。

### 2.2.2 紊流表征方法

紊流阶段,管流同样可以用达西-魏斯巴赫(Darcy-Weisbach)公式描述,区别在于沿程阻力系数的计算方法。沿程阻力系数的确定主要有两种方法,一种是用莫迪图版,莫迪图版同尼古拉兹曲线类似,是根据雷诺数和粗糙度在图版中读取沿程阻力系数值,另一种是利用半经验公式。

紊流光滑区,常用布拉修斯(Blasius)公式

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

紊流过渡区,常用柯列勃洛克公式-怀特(Colebrook-White)公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

紊流粗糙区(阻力平方区)常用尼古拉兹公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \left( \frac{d}{2\varepsilon} \right) + 1.74 \quad (7)$$

紊流阶段,渗流力学根据前述作用力的变化同样采用半经验公式描述。过渡区压力有两部分消耗,一是黏滞力,二是惯性力,用福希海默方程描述

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{K} v + \alpha \rho v^2 \quad (8)$$

式中:

$\alpha$ —非达西流动系数, 1/m。

式(8)反映了压力、黏滞力与惯性力的平衡。层流状态,惯性力忽略,式(8)即为达西方程;完全紊流区,压力完全消耗在惯性力上,黏滞力忽略,式(8)即可表示为

$$\frac{\Delta p}{L} = \alpha \rho v^2 \quad (9)$$

可以发现,紊流阶段,无论管流还是渗流,核心都是惯性力的描述,管流通过沿程阻力系数的变化反映惯性力的影响,渗流力学则通过在达西方程的基础上增加反映惯性力的速度平方项来描述。说明,紊流阶段二者要解决的问题是一致的,只是由于学科不同,目的不同,采用的处理方法不同。

### 3 两相流动特征及数学表征方法

两相流或者多相流存在于国民经济的各个领域,很多行业都开展了多相流研究。本文仅以油水两相流为例讨论管流与渗流的关系。

#### 3.1 两相流动特征

管流两相流动最典型的特征是流型(Flow Patterns)不同。流型也是两相流研究的基础。流型是指两相流中,不同的流量、压力及管道几何形状等会造成相界面的形状(分布)不同,会形成不同的流动结构模式<sup>[18]</sup>。流型的划分是研究的热点也是难点。不同研究人员的研究结果差异很大。Russell等<sup>[19]</sup>观察到水平管有分层流、分散流和混合流3种流型,Wang等<sup>[20]</sup>提出5种流型(图3),Trallero等<sup>[21]</sup>提出6种流型,Nädler等提出7种流型<sup>[22]</sup>,Flores等将垂直管内的油水两相流划分为水为连续相和油为连续相2大类6亚类<sup>[23]</sup>。

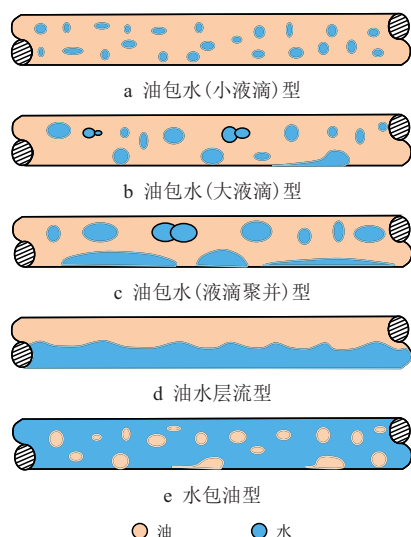


图3 油水两相流流型<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Oil-water two phase flow pattern in tubes

从微观看,多孔介质油水两相流动特征同孔隙形状、结构、润湿性和流体黏度等有关。以水驱油过程为例,随着注入水量的增多,油、水分布状态也会发生改变(图4),亲水岩石局部区域也会出现油

滴分散于水中的现象(图4b),但因其尺度小,边界层的影响更为明显,流型也更为简单。

从宏观看,由于孔隙非均质性、油水性质及毛管力的影响,不同位置水驱油推进速度、油水赋存状态等并不相同,导致宏观呈现非活塞式驱替的特点,存在油水过渡带。

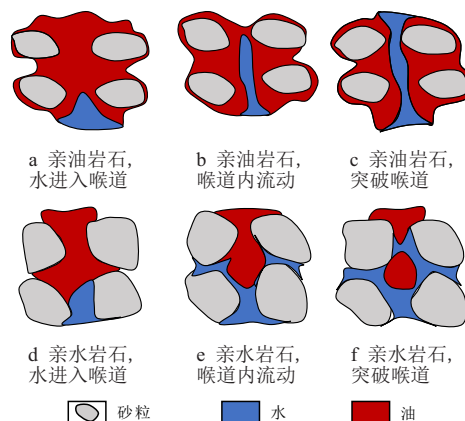


图4 多孔介质水驱油过程<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Water displacement process in porous media

可以发现,由于多孔介质孔隙尺度较小,油水两相流流型比大尺度管流简单,毛管束模型即将单一喉道内流体流动简化为活塞式驱替,但受到非均质性的影响,宏观呈现非活塞式驱替的特征。

#### 3.2 数学表征方法

##### 3.2.1 管流表征方法

工程流体力学压力降与流速的关系是基于流型建立的,流型不同二者关系不同。目前比较常见的是根据分层流和分散流建立的。

分层流常用模型是Taitel和Dukler提出的“双流体模型”,即将油相和水相视为单独连续介质,二者相界面存在剪切力<sup>[25]</sup>,表示为

$$\tau_o \frac{C_o}{A_o} - \tau_w \frac{C_w}{A_w} \mp \tau_i C_i \left( \frac{1}{A_o} + \frac{1}{A_w} \right) + (\rho_w - \rho_o) g \sin \beta = 0 \quad (10)$$

式中:

- $\tau_o$ —油相与壁面的剪切应力,  $N/m^2$ ;
- $\tau_w$ —水相与壁面的剪切应力,  $N/m^2$ ;
- $\tau_i$ —油水两相界面的剪切应力,  $N/m^2$ ;
- $C_o$ —油相的湿周,  $m$ ;
- $C_w$ —水相的湿周,  $m$ ;
- $C_i$ —油水的湿周,  $m$ ;
- $A_o$ —油相所占的流通面积,  $m^2$ ;
- $A_w$ —水相所占的流通面积,  $m^2$ ;



$\rho_o$ —油相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\rho_w$ —水相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $g$ —重力加速度,  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ;  
 $\beta$ —管路倾角,  $(^\circ)$ 。

其中, 剪切应力与油水两相的速度、密度和阻力系数等有关。与壁面的阻力系数相当于单相流的沿程阻力系数, 同流态、管壁粗糙度有关; 相界面的阻力系数不同研究者认识目前还存在差异<sup>[25]</sup>。

分散流一般采用均相流模型, 即将油水两相视作一种均匀连续介质, 以单相流压降公式计算两相流压降, 同样采用达西-魏斯巴赫公式描述, 只是将其中的速度、黏度换作混合液平均速度和黏度。密度可通过油水两相的体积占比加权平均计算。黏度的计算则较为复杂, 不同的学者都给出了不同的计算方法。

对于含水的问题, 工程流体力学中用持水率(截面含水率)表示, 持水率的计算模型有 Zuber 和 Findlay 的漂移模型, Nicholas-Witterholt 模型, Taitel 模型等。持水率与混合液流量、入口含水率、油水黏度比及管道倾角等有关。

除了均相流模型, 另一种处理两相流的方法是流体流动描述与界面追踪方程(Level Set 等)耦合解决问题。但无论哪种方法, 都需要精细刻画流动通道的形状。

### 3.2.2 渗流表征方法

渗流力学两相流的数学表征是通过相渗曲线解决的。相渗曲线反映的是油水两相同时流过多孔介质时, 流出多少油、多少水的问题。相渗曲线同岩石孔隙结构、尺度及润湿性等有关。同渗透率一样, 采用相渗曲线处理两相流动问题是一种“粗糙”但“高效”的处理方法。粗糙是因为它没有考虑具体每一个孔隙特征, 而是用岩芯测试结果代替一个区域的两相流动特征, 不够精确; “高效”则是因为用两条曲线代替了复杂的处理过程, 避免了考虑孔隙尺度、结构和润湿性等复杂问题, 极大地提高了计算效率。

可以发现, 由于管流和渗流研究的侧重点不同, 对两相流的表征采用了不同的方法。管流是以具体管道中的流体流动为研究对象, 流体流动的介质, 即管道的长度、形状、物性等是明确的, 所以通过对每一个作用力的刻画提高流动描述的精度, 是“化简为繁”, 通过精细逼近真实的研究思路。渗流

是以油藏中流体流动为研究对象, 具体到每一条裂缝、每一个孔隙都是不可知的, 所以只能对其宏观特征进行描述, 是“化繁为简”, 通过近似表征满足工程需求的研究思路。

## 4 管流描述油藏流体流动可行性

从哲学的角度, 管流、渗流既是对客观存在的描述, 也是一种方法论。同一流动, 从客观存在的角度, 可能既属于管流, 又属于渗流, 但从方法论的角度, 可以有两种不同的方法对其进行描述和表征。本文讨论的重点是, 管流的处理方法能否用于描述油藏内流体的流动。

管流是以具体管道内流体流动为研究对象的, 流动介质的属性是明确的。但目前油藏描述并不是以具体的孔隙、裂缝为描述对象的, 即便离散裂缝网络模型, 虽以单条裂缝为描述对象, 但是一种随机建模的方法, 建模的宏观表现(如裂缝发育密度等)同地下相似, 但具体到某一条裂缝, 与地下的实际情况并不相同, 至于粗糙度等更是难以刻画, 缝洞型油藏的描述精度远远达不到管流方程的要求。基于一个并不准确的油藏描述结果, 即使用精细的管流方程去描述地下流体的流动, 耗费巨大的计算成本, 得到的依然是一个并不准确的结果, 甚至是“精确的错误”。所以, 用流体力学的方程解决地下流体流动的问题, 目前仅限于理论研究, 要应用于油藏尺度的模拟, 尚不现实。

渗流在处理缝洞型油藏内流体流动问题时, 通常认为面临两个问题, 一个是非线性流动的问题, 另一个是连续性假设的问题, 即离散分布的大洞、大缝只有在特定的尺度上才满足连续性假设的条件。

对于非线性流动问题, 如前所述, 渗流理论体系内, 已经建立了高速非线性流动的描述方法(福希海默方程), 对于不同的流态及多相流动问题都形成了相对成熟的方法。

对于连续性假设问题, 本质上涉及两个问题。一个是宏观参数(孔隙度、渗透率)的等效取值问题, 也就是通过局部建立的物性参数取值方法不能扩展到全局。缝洞结构的差异导致不同区域孔隙度一样, 但渗透率可能完全不同(图 5)。另一个是等效到网格后的失真问题。如图 6a 所示储层发育两条不相交裂缝, 由于基质岩块基本不具备渗透能

力,两条裂缝并不连通,水平方向渗透率为0,但网格化后(图6b),两条裂缝连通了,水平方向渗透率不再是0。这个时候就需要借鉴管流的一些方程或处理方法,以某些关键缝洞为处理对象,进行单独处理,而不能采取简单等效处理的方法。不过,从严格意义来说,这并不属于渗流或管流流动方程的问题。

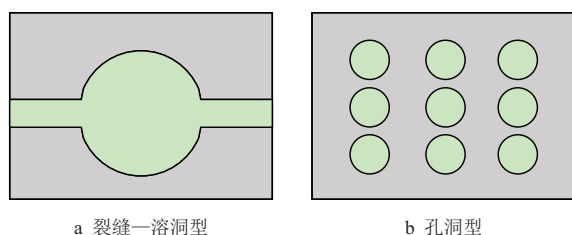


图5 不同缝洞结构示意图  
Fig. 5 Diagram of different fracture-vuggy structures

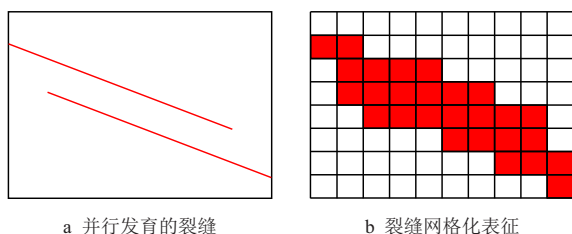


图6 裂缝及其网格化表征  
Fig. 6 Fractures and characterization in grid

可见,管流的处理方法不能用于油藏尺度的模拟,并不是方程本身不适用,而是油藏描述精度和计算成本的客观条件不允许。对于缝洞型碳酸盐岩油藏的流体流动问题,在渗流力学的架构内部分借鉴管流的处理方法加以解决更为可行。

## 5 缝洞型油藏流体流动表征解决方案

缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动模拟解决方案可从两个尺度探讨,一是微观尺度,二是宏观尺度。

微观尺度,并不是严格意义上的“微观”,而是指以几个洞、几条缝为研究对象,以机理研究为目的的尺度。这种情况下,缝洞空间分布及几何尺寸都明确,对计算时间的要求比较宽松,计算量相对较小,用流体力学、用管流的处理方法模拟缝洞内流体的流动是可行的。

宏观尺度,即油藏尺度的流动模拟需要解决两个问题,一是介质表征问题,二是流动表征问题。介质表征模型有3种:连续介质模型、离散介质模型和混合介质模型。混合介质模型更适用于缝洞

型油藏,即对刻画比较清楚、对流动影响比较大、井周离散分布的缝洞离散处理,其余部分等效为连续介质。内部的流动采用渗流力学方程即可,介质的物性参数也同常规数值模拟一致,所不同的,对裂缝的渗透率进行赋值的时候应该参考哈根-泊肃叶公式或者立方定律,这也是借鉴管流处理方法的地方。需要说明的是,这里要参考立方定律或哈根-泊肃叶,而不是直接利用其计算,从实际的应用情况看,直接利用其计算存在很大误差。

## 6 结 论

1) 从流动特征看,管流和渗流是相近的,渗流可视作小尺度复杂管道流。

2) 从流体流动的表征方法角度,管流和渗流处理问题的方法并不相同。管流关注单一管道,处理更为精细,但相同条件下,计算成本高;油气藏渗流力学采用了一种宏观等效的处理方法,相对粗糙但计算成本低。

3) 受到油藏描述精度和计算成本等客观条件的制约,目前管流方程并不适用描述地下流体的流动。缝洞型油藏流体流动模拟应该在渗流力学的架构内,借鉴管流的处理方法来解决。

## 参考文献

- [1] 李阳,康志江,薛兆杰,等.中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):669-678. doi: 10.11698/PED.2018.04.12
- LI Yang, KANG Zhijiang, XUE Zhaojie, et al. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669-678. doi: 10.11698/PED.2018.04.12
- [2] 李阳.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J].石油学报,2013,34(1):115-121. doi: 10.7623/syxb201301013
- LI Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121. doi: 10.7623/syxb201301013
- [3] 闵华军,陈利新,王连山,等.哈拉哈塘缝洞型油藏油井产水特征及机理分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(1):114-123. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2015.03.18.02

- MIN Huajun, CHEN Lixin, WANG Lianshan, et al. Characteristics and mechanism of water production for fractured vuggy carbonate reservoirs, Halahatang Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(1): 114–123. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2015.03.18.02
- [4] 龙旭, 李鹏, 康志宏, 等. 塔河缝洞型油藏单井含水变化类型定量评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 127–134. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2012.04.019
- LONG Xu, LI Peng, KANG Zhihong, et al. Quantitative evaluation of single well's water breakthrough types in the Tahe fractured-vuggy reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(4): 127–134. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2012.04.019
- [5] 谭柱, 李保柱, 李勇. 缝洞型油藏单元注水开发水淹风险评价方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(5): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2017.05.011
- TAN Zhu, LI Baozhu, LI Yong. A new method for water-flooded risk assessment of fractured-vuggy reservoir in unit water injection development[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2017, 32(5): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2017.05.011
- [6] 庞明越, 唐海, 吕栋梁. 缝洞型油藏水驱曲线研究综述[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(3): 48–50, 65. doi: 10.3969/j.issn.1673-1980.2017.03.012
- PANG Mingyue, TANG Hai, LÜ Dongliang. Research on water drive curve in fracture-vuggy reservoir[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 19(3): 48–50, 65. doi: 10.3969/j.issn.1673-1980.2017.03.012
- [7] 涂兴万, 陈朝晖. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏水动力学模拟新方法[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 53–56. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2006.05.015
- TU Xingwan, CHEN Zhaohui. A new hydrodynamic simulation of fracture-pore carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(5): 53–56. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2006.05.015
- [8] 修乃岭, 耿忠娟, 熊伟, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发特征和水动力学模拟[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 72–74. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2008.02.017
- XIU Nailing, GENG Zhongjuan, XIONG Wei, et al. Features and hydrodynamic simulation of fractured-vuggy reservoir development[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 72–74. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2008.02.017
- [9] 李传亮, 张学磊. 管流与渗流的统一[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 252–253. doi: 10.3969/j.issn.1001-3873.-2007.02.034
- LI Chuanliang, ZHANG Xuelei. Unification of flow equations in tubes and in porous media[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(2): 252–253. doi: 10.3969/j.issn.1001-3873.2007.02.034
- [10] HUGHES, WILLIAM F, BRIGHTON, et al. Schaum's outline of theory and problems of fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [11] MARTIN M. Civil engineering hydraulics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [12] 葛家理, 宁正福, 刘月田. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- GE Jiali, NING Zhengfu, LIU Yuetian. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [13] HE Meng, LIU Tangyan. Interpretation of the rock-electric and seepage characteristics using the pore network model[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2019, 180: 1–10. doi: 10.1016/j.petrol.2019.05.005
- [14] YANG Yongfei, WANG Ke, ZHANG Lei, et al. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model[J]. Fuel, 2019, 251: 683–692. doi: 10.1016/j.fuel.-2019.03.083
- [15] 雷健, 潘保芝, 张丽华. 基于数字岩心和孔隙网络模型的微观渗流模拟研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 653–660. doi: 10.6038/pg2018BB0108
- LEI Jian, PAN Baozhi, ZHANG Lihua. Advance of microscopic flow simulation based on digital cores and pore network[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 653–660. doi: 10.6038/pg2018BB0108
- [16] 陈卓如, 金朝铭, 王成敏, 等. 工程流体力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- CHEN Zhuoru, JIN Zhaoming, WANG Chengmin, et al. Engineering fluid mechanics[M]. 3rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [17] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2001.
- QIN Jishun, LI Aifen. Reservoir physics[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001.
- [18] 烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

- LIE Jin. Two-phase and multiphase flow dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [19] RUSSELL T W F, HODGSON G W, GOVIER G W. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1959, 37(1): 9–17. doi: 10.1002/cjce.5450370104
- [20] WANG Ziming, ZHANG Jian. Corrosion of multiphase flow pipelines: The impact of crude oil[J]. Corrosion Reviews, 2016, 34(1–2): 17–40. doi: 10.1515/corrrev-2015-0053
- [21] TRALLERO J L, SARICA C, BRILL J. A study of oil-water flow patterns in horizontal pipes[J]. SPE Production & Facilities, 1997, 12(3): 165–172. doi: 10.2118/36609-PA
- [22] NÄDLER M, MEWES D. Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1997, 23(1): 55–68.
- [23] JOSE G F, CHEN X T, BRILL J. Characterization of oil-water flow patterns in vertical and deviated wells[J]. SPE Production & Facilities, 2013, 14(2): 94–101. doi: 10.2118/38810-MS
- [24] 何更生. 油层物理[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
HE Gengsheng. Reservoir physics[M]. 2nd Ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [25] 徐广丽, 张国忠. 油水两相管流理论的研究进展[J]. 油气储运, 2010, 29(2): 81–85.  
XU Guangli, ZHANG Guozhong. Research progress in the theory of oil-water two-phase pipe flow[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(2): 81–85.

## 作者简介



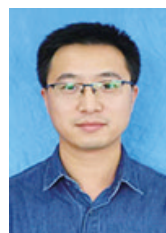
郑松青, 1982 年生, 男, 汉族, 山东寿光人, 研究员, 博士, 主要从事缝洞型碳酸盐岩油藏开发工作。  
E-mail: zhengsq.syky@sinopec.com



王 强, 1982 年生, 男, 汉族, 四川内江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气田开发及管理工作。E-mail: wangqiang2008.syky@sinopec.com



张世亮, 1986 年生, 男, 汉族, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩油气藏开发工作。E-mail: zhangshil.xbsj@sinopec.com



袁飞宇, 1986 年生, 男, 汉族, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事油气田开发工作。E-mail: yuanfy.xbsj@sinopec.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>