

非均质油藏试井分析理论的研究进展

陈慧新 刘曰武[†]

中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080

摘要 在明确了试井分析所用的油藏分类标准的基础上, 从油藏多孔介质的非均质性、油藏流体的非均质性、以及数学模型的解法和试井解释方法 4 个方面, 对非均质油藏的研究成果进行了概述, 归纳出了规则的非均质油藏和随机的非均质油藏的概念, 并分析了非均质油藏试井理论研究的发展趋势, 指出结合油田地质资料和油藏开发动态资料进行综合试井资料分析是试井理论发展的必然趋势, 数值试井方法是试井未来发展的方向。

关键词 非均质油藏, 试井, 分析方法, 数学模型, 数值模拟

1 引言

试井是了解油藏开发动态特性的主要手段之一, 它可以为油气田开发提供大量的基础数据。这些数据包括地层原始压力、地层渗透率、目前地层平均压力、井间地层的连通性(连通厚度、连通渗透率)、近井地层的污染或改造程度(表皮系数)、单井控制范围和储量、措施前后地层参数的变化、油气田开发不同阶段的地层参数的变化、不同开采条件下地层中的流体分布等等。这些数据是油田开发方案的部署以及油田开发方案调整的重要依据, 是合理经济地开发油气田的重要保障^[1~5]。

试井是以多孔介质渗流力学理论为基础, 通过获得有代表性油藏流体样品、测试同期产量以及相应的井底压力资料来进行油藏评价的技术。试井技术包括两方面的内容: 一是硬件技术, 指测试仪器的原理、性能和使用以及测试工艺等; 二是软件技术, 一般包括试井分析方法和测试方法等。试井方法分为稳定试井方法和不稳定试井方法, 其中不稳定试井方法是描述油藏动态研究最多、理论深奥、内容丰富的领域。不稳定试井测试方法主要有压力降落、压力恢复、变流量测试、注入试井、中途测试、干扰试井、脉冲试井、垂向脉冲试井和重复电缆测试等。人们根据不同的测试目的选择不同的测试方法。然而, 对于非均质油藏, 无论选择何种测试方法, 试井测试资料的分析评价都会面临重重的困难。为了掌握试井分析过程中非均质性所产生的影响, 人们通过不同的途径对它进

行了研究。本文主要介绍非均质试井分析理论的研究进展。

非均质油藏是各种各样的。从储层非均质性上看, 既有储层物性分布方面的非均质性, 又有储层流体分布方面的非均质性^[6]。从成因上看, 主要分为两大类: 一类是天然的非均质油藏, 另一类是由于油田的开发而形成的非均质油藏。天然的非均质油藏主要是由于油气储层在形成过程中受沉积环境、成岩作用和构造作用的影响, 在空间分布及内部各种属性上都存在不均匀的变化, 这种变化被称为储层广义上的非均质性。储层的这种非均质性是影响地下油、气、水运动及油气采收率的主要因素。油田开发形成的非均质油藏, 主要是由于开发方式和地下流体性质的物理化学变化而形成的。如注水开发的油气田, 由于水的注入使得地下流体分布发生变化, 从而形成非均质油藏。注气(氮气、二氧化碳气或烃气体等)开发油气田与此类似。对注入聚合物或胶体或凝胶进行开发的油气田, 还要考虑非牛顿流体的问题。因此油田开发形成的非均质油藏, 主要是流体分布类型的非均质油藏。

石油工业近百年的发展, 其开采方式也有了很大的变化, 如图 1 所示^[7]。这些方法中, 从最初的衰竭式开采到现在的三次采油, 很多方法都是在多孔介质中形成两相、三相甚至多组分的复杂流动, 依靠传统的达西定律, 这些问题的解决就显得力不从心。这时就需要考虑与实际情况相符的油气储层在非均质条

件下的两相流，甚至多相流的压力和分布规律就显得尤为重要。在假设储层为均质的情况下研究两相流成功的例子很多，如我国的大庆油田、胜利油田等都成功地采用了该方法，另外，前苏联的杜尔玛兹油

田也成功地采用了该方法。对上述情况如果考虑不同井网的影响问题，会使得对油层中油水的压力及分布规律的研究更加复杂化。

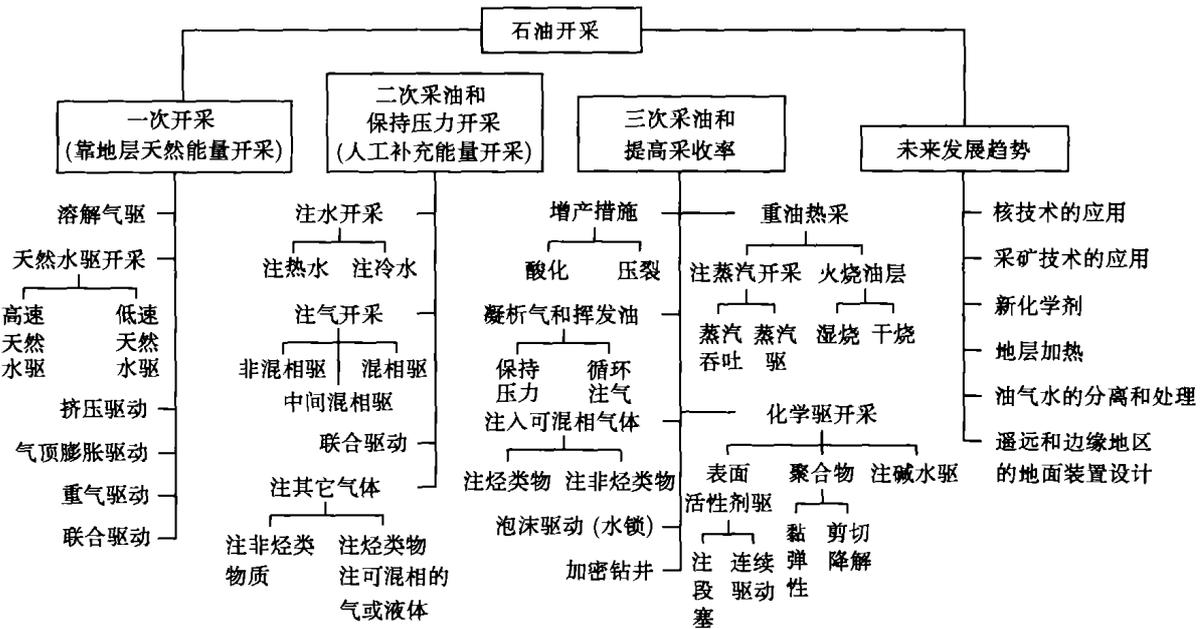


图 1 石油开采方法

综上所述，在现有的单相流研究的基础上，研究非均质的单相流，以及非均质的两相流，了解更符合实际的非均质条件下两相流中的压力分布问题和流体的分布问题，为油田作下一步调整，如压力的调整、流体流动方向的调整、注剂的调整做好理论依据是一项势在必行的工作。

2 非均质油藏划分的理论基础

要弄清非均质油藏试井分析理论的发展，首先要规定均质油藏和非均质油藏的划分标准。从微观角度上讲，油藏都是非均质的。因为油藏是由不同类型、不同大小、不同形状的孔隙与不同类型的岩石骨架组成的，其孔隙中充满烃类流体。孔隙的大小形状是千变万化的，岩石的骨架性质也是千差万别的，因此具体描述流体质点在孔隙中的运动几乎是不可能的。只有利用等效连续介质理论将油藏等效为连续体，才能用流体力学的知识来描述多孔介质中流体的流动，这就是目前所用的渗流力学的理论基础。根据渗流力学的知识，利用连续介质的假设就可以对非均质油藏进行划分了。

如果油藏中孔隙的大小形态相近或固体骨架的结构具有一致的相似性，那么在用数学模型进行油藏描述时，就将等效介质的任意空间点上描述为既有孔

隙又有骨架，孔隙所占的份额用孔隙度描述，由于所有空间点上的性质都是一致的，而且只有一个孔隙度和渗透率，因此称这种介质为单一孔隙介质油藏。这类油藏一般为纯孔隙型多孔介质或纯裂缝型多孔介质，其构造示意图如图 2(a)，图 2(b) 所示。

如果油藏中存在两种孔隙空间，而且孔隙的大小形态相差较大，由于其中一种孔隙较小渗透性较差，因此只能是流体的存储空间且渗透性可以忽略不计，那么在用数学模型进行油藏描述时，就将等效介质的任意空间点描述为既有骨架又有两种孔隙，但只有一个渗透率，因此称这种介质为双重孔隙介质油藏，简称为双孔介质油藏或双孔油藏。其构造示意图如图 2(c) 所示。

如果油藏中存在两种孔隙空间，而且孔隙的大小形态相差较大，但渗透性相差不大，两种孔隙都是流体的存储空间和流动空间，那么在用数学模型进行油藏描述时，就将等效介质的任意空间点描述为既有骨架又有两种孔隙，而且有两个渗透率，因此称这种介质为双重渗透介质油藏，简称为双渗介质油藏或双渗油藏。其构造示意图如图 2(d) 所示。

如果油藏中存在 3 种孔隙空间，而且孔隙的大小形态相差较大(如孔隙、裂缝和洞穴)，但渗透性相差不大，3 种孔隙都是流体的存储空间和流动空间，那么在用数学模型进行油藏描述时，就将等效介质的

任意空间点描述为既有骨架又有 3 种孔隙, 而且有 3 个渗透率, 因此称这种介质为三重孔隙介质油藏, 简

称为三重介质油藏. 其构造示意图如图 2(e) 所示.
如果油藏中存在 3 种以上孔隙空间, 而且孔隙

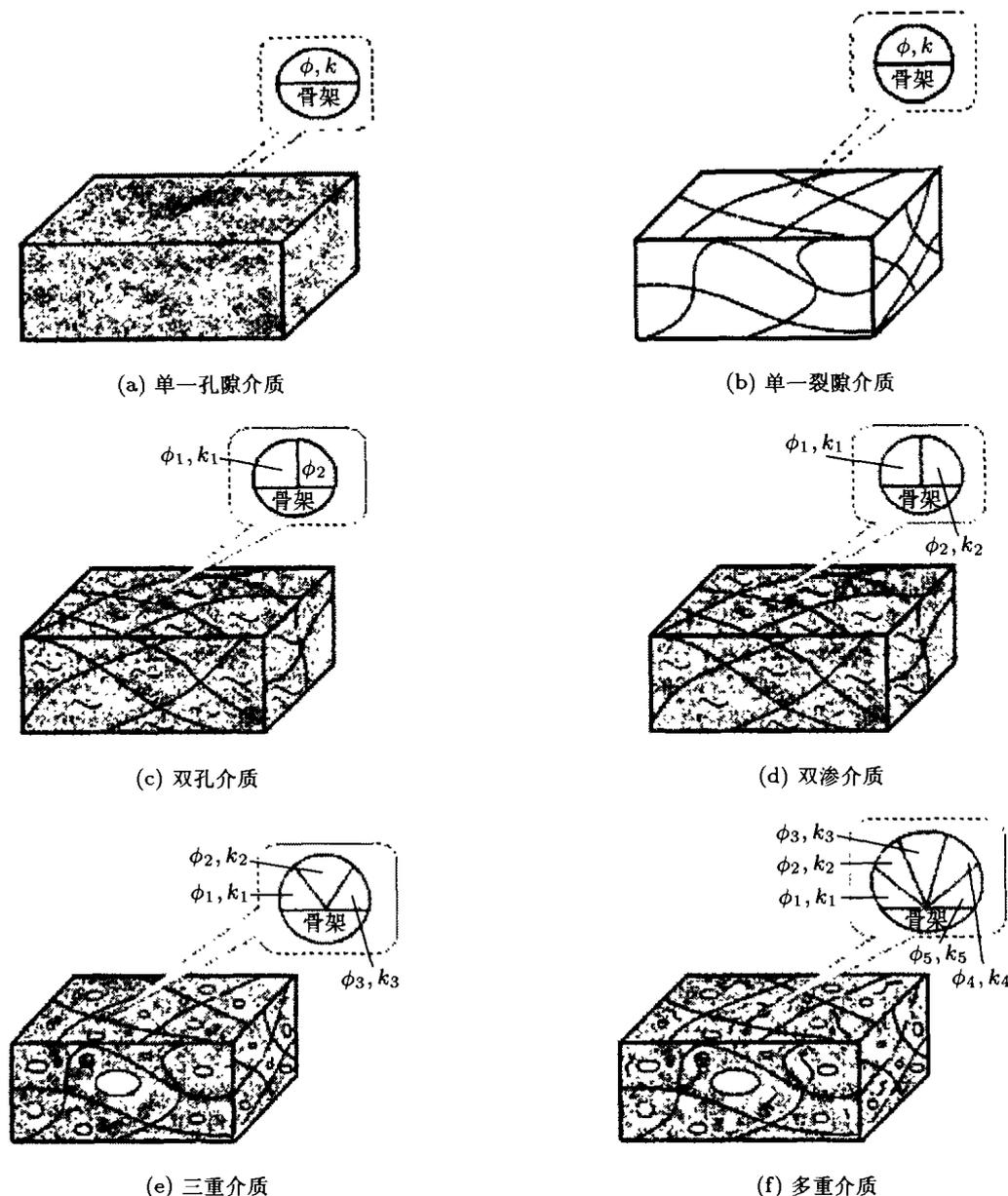


图 2 不同孔隙介质油藏的结构示意图

的大小形态相差较大(如孔隙、大裂缝、微裂缝、毛细裂缝和洞穴等), 但渗透性相差不大, 这些孔隙都是流体的存储空间和流动空间, 那么在用数学模型进行油藏描述时, 就将等效介质的任意空间点描述为既有骨架又有多种孔隙, 而且有多个渗透率, 因此称这种介质为多重孔隙介质油藏, 简称为多重介质油藏. 其构造示意图如图 2(f) 所示.

目前所研究油藏的多孔介质的性质基本属于以上 5 种类型. 如果多孔介质性质在油藏的任意空间点上都是相同的, 流体的分布是均匀的, 而且压力在油藏中的传播规律是线性的, 那么称这类油藏为均质油藏. 但是, 如果多孔介质性质在油藏的任意空间点上不都是相同的, 或流体的分布不都是均匀的, 或压

力在油藏中的传播规律不都是线性的, 那么称这类油藏为非均质油藏. 均质油藏和非均质油藏是从宏观唯向的方式判断和区分的, 判别的标准是对于完全的等效介质油藏中任意空间点上多孔介质性质、流体分布是否相同, 更重要的是压力在油藏中的传播规律是否是线性的. 根据这一标准我们对油藏进行分类, 并以此为基础研究了非均质油藏试井分析理论的发展.

3 非均质油藏试井分析理论的研究历史

既然试井是以多孔介质渗流力学理论为基础, 通过有代表性油藏流体样品、测试同期产量及相应的井底压力资料进行油藏评价的技术, 那么试井分析方法

不可避免地与多孔介质的性质、油藏流体和数学的分析方法等紧密相关。我们对试井分析理论进行总结，就从多孔介质，油藏流体和数学方法等方面入手，对它的发展史和发展趋势进行研究。

3.1 多孔介质性质的非均质

从多孔介质的性质方面看，在试井分析理论的发展中，是逐步从简单的均质向普适化非均质发展的。现已提出的均质油藏试井解释储层模型，有均质地层与各种边界条件组合的多种边界均质油藏模型，包括单一线性油藏、圆形边界油藏、矩形边界油藏、角形边界油藏和“U”形边界油藏模型等，边界性质可以是定压的、封闭的也可以是混合的；有介质性质复杂形成的均质油藏，包括双重介质油藏模型、三重介质油藏模型等；有介质特征特殊的均质油藏，包括低渗透油藏等；还有流体性质特殊的均质油藏，包括衰竭式开采的稠油油藏等。对于已经提出和应用的非均质油藏试井解释储层模型，主要集中在规则的非均质油藏方面，包括径向复合油藏模型、多层均质油藏模型、以及分形介质油藏和变形介质油藏模型。对于任意的非均质油藏的研究还刚刚起步，这方面的应用还很少见到。

3.1.1 均质油藏概述

任何油藏从微观上看都是非均质的。但是在宏观上，如果除去边界范围的限定，或在测试时间内探测不到外边界，且整个油藏的物理性质是均一的，即油藏的多孔介质性质是均匀的而且流体分布也是均匀的，那么我们称这类油藏为均质油藏。在此意义下，研究完全均质的无限大油藏具有理论上的意义。无限大油藏试井理论的半解析解最早是由 Van Everdingen^[8] 提出的，目前所广泛使用的理论曲线都是以 Gringarten 和 Bourdet^[9,10] 的 Laplace 空间解为基础的，均质无限大的井底压力理论曲线如图 3 所示。除了均质无限大油藏外，均质油藏还有许多其它特定的模式，如存在空间限制的均质油藏、双重介质油藏、双渗介质油藏、三重介质油藏和多重介质油藏、低渗透油藏和稠油油藏等。Closmann^[11] 等人提出了三重介质渗流模型的概念，Wu Y S^[12] 等人研究了油藏中三重介质的近似模拟。Liu Y W^[13] 在 2004 年研究了低渗油藏中的不稳定流问题，提出的低渗油藏模型中的控制方程为

$$\frac{\partial^2 P_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial P_D}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{PD}}{r_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial P_D}{\partial T_D}$$

式中， $P_D = \frac{hk(P_i - P)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}$ ，为无量纲压力； P_i 为地层原始压力； B 为原油体积系数； $r_D =$

$\frac{r}{r_w}$ ，为无量纲距离； r_w 为井筒半径； $\lambda_{PD} = \frac{kh r_w \lambda_P}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}$ ，为无量纲启动压力梯度； S 为表皮系数； $C_D = \frac{1.592C}{\phi h C_t r_w}$ ，为无量纲井筒存储系数； C 为井筒存储系数； C_t 为总压缩系数； ϕ 为油藏孔隙度系数； h 为地层有效厚度； q 为井的产量； $T_D = \frac{t_D}{C_D}$ ，为无量纲时间； $t_D = \frac{3.6kt}{\phi \mu c_t r_w^2}$ ，为无量纲时间；在裂缝方向性发育地层中 $t_D = \frac{3.6\sqrt{k_x k_y t}}{\phi \mu c_t r_w^2}$ ； t 为测试时间； μ 为地层中流体的黏度。

2003 年周蓉等人^[14] 作了这方面的研究，推导出稠油油藏模型中的控制方程为

$$\frac{\partial^2 P_D}{\partial r_D^2} + \frac{n}{r_D} \frac{\partial P_D}{\partial r_D} = \frac{r_D^{1-n}}{C_D e^{2S}} \frac{\partial P_D}{\partial T_D}$$

式中， n 为非牛顿流体幂律指数。并做了双重介质方面的研究，得到双重介质无限大油藏的双对数理论曲线图，如图 4 所示，该图给出了双重介质油藏拟稳态窜流的井底压力理论曲线。

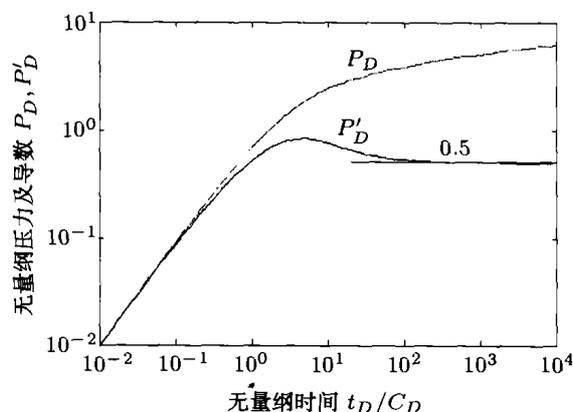


图 3 均质无限大油藏双对数理论曲线图

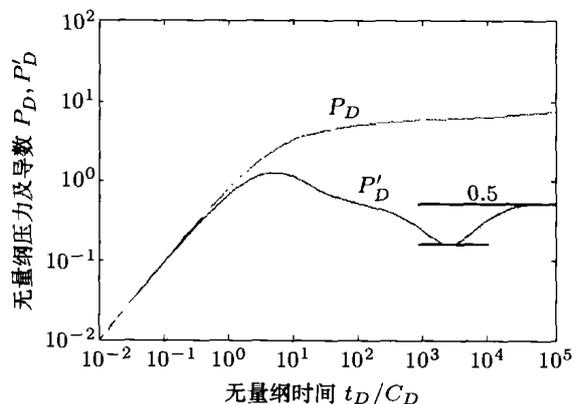


图 4 双重介质无限大油藏双对数理论曲线图

这些油藏的共同特征是：在油藏范围内，油藏内的固体介质性质是均匀的而且流体性质也是均匀的。

3.1.2 规则的非均质油藏

根据不断发现的油田需要, 又开始研究一些规则的非均质油藏. 所谓规则的非均质油藏是指油藏的非均质特性在一定的空间范围内是可以通过数学手段进行描述的, 这些油藏主要包括: 线性复合油藏、径向复合油藏、多层油藏、分形油藏和变形介质油藏等.

(1) 线性复合油藏

线性复合油藏是指油藏的多孔介质性质或流体性质在整个油藏中是呈阶跃式变化的, 变化的区域是线性分隔的. 这方面的研究目前尚少. 但对于河道沉积油藏的试井测试资料的分析是非常适合的.

(2) 径向复合油藏

径向复合油藏是一种规则的非均质油藏, 它是指径向上由两种或两种以上岩石或流体物性不同的区域复合而成的储层, 但每一区域里的储层物性是均一的, 各种性质的变化可以是阶跃函数, 也可以是线性函数. 在石油工程文献中, 这类问题讨论的最早的工作是由 Jaeger^[14] 进行的. Ramey^[15] 在 1980 年的工作激发了人们在此问题上的更大的兴趣. 2002 年周蓉^[16] 做了这方面的研究并得到了它的双对数理论曲线图, 如图 5 所示.

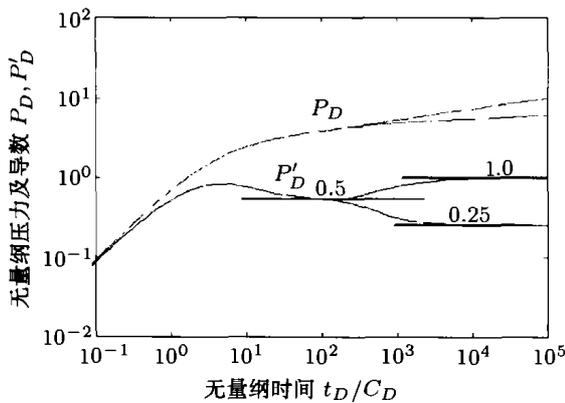


图 5 径向复合油藏双对数理论曲线图

(3) 变形介质油藏

变形介质油藏又是一种规则的非均质油藏. 当地层中的液体压力降低时, 岩石会发生变形而使孔隙空间减小, 以致渗透率降低. 这种孔隙空间会发生变形的多孔介质称作变形介质. 变形介质的渗透率往往不是常数, 而是压力的函数. V. Fernando Samaniego 等人^[17] 在 2003 年研究了变形介质油藏中渗透率和孔隙度随压力的变化. 2000 年宋付权、刘慈群^[18] 在假定多孔介质渗透率随压差呈指数规律变化, 弱压缩流体流过变形介质的不定常径向渗流时, 用有限差分法求解非线性热传导的压力动态及试井曲线, 并在

定压生产的情况下, 计算和分析了油井产量变化, 研究了变形介质油藏中压力产量. 图 6 和图 7 给出了单一孔隙介质和双重孔隙介质情况下的理论曲线图.

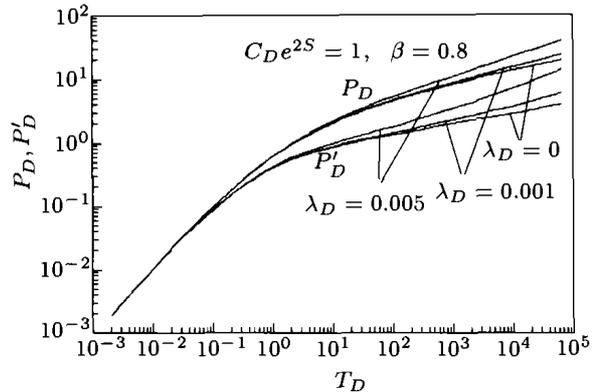


图 6 单一孔隙变形介质油藏双对数理论曲线图

(4) 多层油藏

多层油藏也是一种规则的非均质油藏. 近年来的油藏开采发现很多储层都是由两层或多层储层组成, 层间常被低渗透或不渗透的岩层隔开, 这样的油层叫做多层油藏. 关于试井理论在这方面的研究近年来很活跃, 20 世纪 80 年代以后的代表人物有高承泰和 Olarewaju 等人. 孙贺东, 高承泰等人^[19] 2003 年建立了一个新的具有层间越流的双层定压边界油气藏井底压力的动态模型.

其控制方程为

$$\gamma \nabla^2 P_{1D} = \frac{\omega}{C_D e^{2S}} \frac{\partial P_{1D}}{\partial r(t_D/C_D)} - \lambda e^{-2S} (P_{2D} - P_{1D})$$

式中, P_{1D}, P_{2D} 分别为 1 层和 2 层的压力, 并且假设由 2 层向 1 层纵向拟稳定窜流.

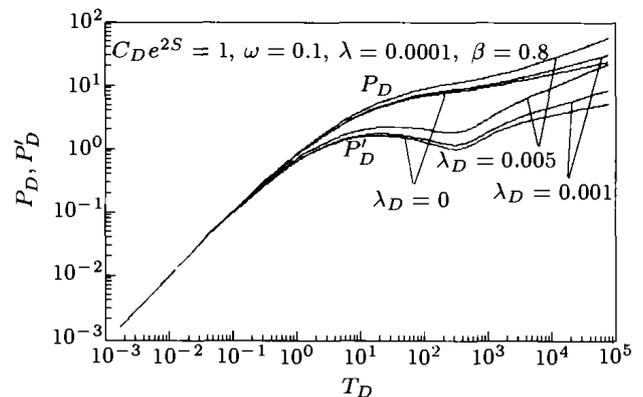


图 7 双重孔隙变形介质油藏双对数理论曲线图

(5) 分形油藏

分形介质油藏模型是近年来才提出的概念, 常规的压力不稳定试井模型假定储层是均质的, 大量

的测井和岩心资料表明在许多情况下这种假设不能满足。分形介质储层模型把储层考虑成同时含有可渗透和不可渗透岩块的非均质系统，并假定所形成的可渗透裂缝网具有分形结构，分形结构在任何长度的比例内都可展示出非均质性。由于在任何位置，渗透率可以是零也可以是一个固定值，所以渗透率的分布是双峰的。1990年 Chang, Yortsos^[20] 首先研究了裂缝分形介质，并建立了分形油藏的数学模型。

分形介质中的控制方程为

$$r_D^\theta \frac{\partial P_D}{\partial t} = \frac{\beta}{r_D} \frac{\partial P_D}{\partial r_D} + \frac{\partial^2 P_D}{\partial r_D^2}$$

式中， θ 为反常扩散指数，它与裂缝网的拓扑有关。

$\beta = d_f - \theta - 1$ ， d_f 为分形裂缝网的质量分形维数。

Acuna 等人^[21]1992年把裂缝网格看成分形介质系统，成功地研究了天然裂缝性储层的不稳定压力动态。

3.1.3 随机的非均质油藏

在研究的早期都是把油藏处理成均质、弱非均质或规则的非均质油藏，实际介质往往是随机的非均质油藏，即随机介质。随机介质定义为这样一种介质，它的特性参数随空间位置的变化呈随机分布。从宏观上，油藏储层非均质性包括了从层内、平面到层间的各个级别的非均质性。层间非均质性是指砂体之间的差异，包括层系的旋回性、砂层间的渗透率非均质程度、隔层分布及层间裂缝特征等。研究层间的非均质性是划分开发层系、决定开采工艺的依据，同时，层间非均质性是注水开发过程中层间干扰和水驱差异的重要原因。平面非均质性指单一油层砂体的几何形态、各向连续性、连通性以及砂体内渗透率和孔隙度的平面变化及方向性。一定程度上，砂体内渗透率、孔隙度、厚度在平面上的变化决定了平面上油水运动的规律。层内非均质性是砂层内部垂向上渗透率韵律、最高渗透层所处位置、非均质程度、单砂层规模宏观的垂直渗透率与水平渗透率的比值以及层内夹层的分布。

对于随机的非均质油藏的研究，出现了不少求解非均质地层包括各向异性地层的渗流问题的解，但这些文献著作中对于非均质的分布仍给予相当的理想化。解决非均质地层渗流问题的一种方法，就是运用概率统计方法来计算数学期望值，即求概率平均渗透率，然后用这个平均渗透率当成均质地层，来进行各种渗流模型的计算。另外还有一种方法，把实际的多孔介质看作是一个随机场，把其中的流动作为一个随机过程，它具有自身的各种随机的统计函数和特征，然后运用与之相关的经典的和现代统计力学方

法来识别油气层和求解渗流问题。然而，这两种方法都只考虑了多孔介质随机性的方面，却忽略了多孔介质由于成因和地质结构影响而实际存在的结构性的因素。在充分了解储层非均质性的基础上，把储层地质、地震、测井、试井资料加以筛选，对油藏的格架、储层属性及其内部的流体性质空间分布等进行全面性的综合研究，最终建立描述随机的非均质油藏的普适化数学模型是一项势在必行的工作。

对随机的非均质油藏进行的研究工作不如均质油藏那么多。在一些特殊储集层中，因为非均质性比较强，不同程度地影响水平井产能，以至不能准确地预测产能^[22]；Muskat^[23]首次通过修正垂直轴的方法，将平面与垂向渗透率的几何平均值作为油层平均渗透率；Joshi^[24]推导了典型的非均质储集层水平井稳态产能公式。试图发展非均质油藏分析方法的各种努力，几乎都是将所研究的系统假定为几个均质系统，或者是特殊的有规律的非均质系统，从而得出其解析解或经验解，但是，使用这些方法是有限的，因此发展非均质油藏分析方法将是试井发展的一个重要方向。只有将测试资料与地质静态资料和油田动态资料相结合，才能更深入了解油田开发动态，指导油田合理开发，为试井理论的发展找到一个新的途径。

3.1.4 非均质油藏井底压力曲线和压力导数曲线特征分析

多孔介质的非均质性对油藏流体流动规律的影响可从井底压力曲线 $P_D \sim t_D$ 和压力导数曲线 $dP_D/dt_D \sim t_D$ 的变化上看出。观察图3~图7，无论是均质还是非均质油藏在曲线的早期段，压力和压力导数曲线都合并到一条斜率为1的直线上，反映的是纯井筒储存效应。对于均质油藏，如果没有边界的影响，在井底压力理论曲线的晚期，压力曲线增长均匀，而压力导数曲线趋于水平，无量纲压力导数为0.5的一段稳定段，表现出了均匀介质的性质。

但是对于非均质油藏其井底压力曲线的特征存在明显不同。在径向复合油藏双对数理论曲线图中，首先在无量纲压力为0.5时达到了一个稳定状态，反映了一种介质向另一种介质的过渡，在其后根据不同的流度比（在地层中流量 Q 与 K/μ 有关，故把 K/μ 定义为流度，在两种介质或两相流体中，定义 $M = (K_1/\mu_1)/(K_2/\mu_2)$ 为流度比）达到了无量纲压力不同的两种稳定状态，当流度比是0.5时达到的无量纲压力等于1.0，流度比是2.0时达到的无量纲压力等于0.25，整个过程中的变化过程反映了介质的非均质性。对比最为明显应该是单一孔隙的均匀介质和

变形介质, 由图 3 和图 6 的对比明显可以看出, 井底压力的变化早期是完全一致的, 而在晚期特征是完全不同的, 图 6 的压力导数表现出明显的变形介质的非均质特征。

3.2 流体性质的非均质

流体的非均质是指油藏开发过程中形成的流体中油、气、水和烃类物质的分布的不均匀而致的流体参数如渗透率、流体黏度、流体温度和流体浓度等在空间上的随机变化, 流体的非均质性是多相流的更精细的描述。上述试井理论模型的研究, 都是基于单相流体假设基础之上, 而实际油藏中的流体几乎都是非均质的, 如两相或多相的。为了提高采收率, 技术上要求将油藏描述的更为准确, 这就要求对含有两相和多相流体的非均质油藏进行研究。试井分析技术发展到现在阶段, 对于单相渗流范畴的试井分析已经较为容易实现, 但对于复杂、多相的非均质油藏的试井问题, 前人虽然作了很多的探索, 但目前尚无公认可行的解决办法。

对于均质的油水两相流, 目前常用的分析方法是 Perrine^[25] 于 1956 年基于经验观察提出的压力方法, 即用总压缩系数和按饱和度加权的各相总流度代替单相流方程中的相应系数, 用常规半对数法分析。Martin^[26] 在 1959 年从理论上证明了 Perrine 的方法, 前提条件是压力、饱和度梯度可以忽略。Al-Khalifa 等人^[27] 利用压力平方法推导了油水两相流动情况下的无穷大地层中一口井的点汇解。Raghavan^[28] 提出了溶解气驱条件下的压力恢复和压力降落试井方法。刘慈群、宋付权等人^[29,30] 研究了低渗油藏和双重介质油藏的两相渗流。

对于非均质的两相流, 还没有看到从普遍的角度研究的文献, 所看到的研究大都局限于非均质的某种特殊情形或管流中的非均质两相流。目前研究的试井模型一般为油水两相模型、油气两相模型和气油水两相模型, 对于三相模型研究很少。根据本文图 1 所示的油田开发方式, 将流体非均质油藏在不同开发方式和成因上进行以下分类。

3.2.1 开发过程中流体物性或分布自然变化形成的流体非均质油藏

(1) 溶解气驱油藏和低饱和压力开发的油藏: 在油田开发过程中, 依靠原油中溶解气作为驱动力的油藏和低饱和压力开发的油藏, 由于溶解气的析出在油藏中含油饱和度和含气饱和度分布随着油田开发而变化, 导致油气饱和度非均匀性, 因此形成油气两相流动, 应该用油气两相试井模型进行分析。

油气两相模型的控制方程:

油相

$$\nabla \cdot \left[\frac{K_{ro}(S_o)}{\mu_o(P)B_o(P)} \nabla P \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right)$$

气相

$$\nabla \cdot \left[C(P) \frac{K_{rg}(S_o)}{\mu_g(P)} \nabla P \right] + \nabla \cdot \left[\frac{\gamma_P K_{ro}(S_o)}{\mu_o(P)B_o(P)} \nabla P \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{B_g} \right)$$

式中, K_r 为相对渗透率, S 为饱和度, μ 为流体黏度, B 为地层体积系数, ϕ 为孔隙度, $C(P)$ 为气体的压缩系数, γ_P 为相同压力下该气体的密度与干燥空气密度之比。

(2) 气顶驱油藏和底水驱油藏: 在气顶驱油藏中, 由于气顶中的气体入侵到油藏中, 从而导致油藏中油气饱和度非均匀性, 因此应该用油气两相试井模型进行分析。而在底水驱油藏中, 由于底水入侵到油藏中, 从而导致油水饱和度非均匀性, 因此应该用油水两相试井模型进行分析。

油水两相模型的控制方程:

油相

$$\nabla \cdot \left[\frac{K_o}{\mu_o B_o} \nabla P \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right)$$

水相

$$\nabla \cdot \left[\frac{K_w}{\mu_w B_w} \nabla P \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w}{B_w} \right)$$

3.2.2 二次采油过程中形成的流体非均质油藏

(1) 注水开发油藏: 为了保持地层能量, 注水开发是国内外各大油田采用的主要开采手段之一。随着注水开发的进行, 油藏中的流体饱和度分布发生了较大的变化。其主要变化形式一般有两种: 一是纵向上油藏各小层之间含水饱和度的不同, 一是横向上油藏中由于注水模式不同导致的含水饱和度分布的不同。这类地层中的测试资料应该使用上面的油水两相试井模型进行分析。

(2) 注气开发油藏: 注入烃类或非烃类气体, 都会改变油藏中含油饱和度和含气饱和度的变化, 从而形成流体非均质油藏, 因此这类地层中的测试资料应该使用油气两相试井模型进行分析, 并要求充分考虑注入气体的性质。

3.2.3 三次采油过程中形成的流体非均质油藏

(1) 热采稠油油藏: 稠油是一种特殊的流体, 它的黏度特别大, 稠油油藏在开采过程中以多相流形式存在。稠油油藏注蒸汽吞吐采油过程中试井是指导、监控稠油开发的重要手段, 由于注入井内和油层中介

质超高温,使得试井仪器和解释方法受极大限制。稠油油藏热采试井是在诸如蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层等热采过程中对井进行的不稳定压力测试。目前,热采井试井分析广泛应用的是双区性的复合储层模型。利用复合区的直线段斜率和复合模型典型曲线拟合法,可计算出波及区的体积、半径及外区的流动系数,能够估算出注入地层的热损失及加热效率。周蓉^[16]对均质稠油油藏、双重介质稠油油藏和双重介质复合稠油油藏的不稳定试井分析也进行了研究,还没有广泛的推广应用。G. Michael Shook^[31]于2001年用示踪剂方法研究了稠油热采的问题。这类油藏的非均质性主要是由流体性质变化和饱和度分布所引起的。

(2) 化学驱油藏及复合驱油藏:目前采用的化学驱和复合驱的注剂一般是非牛顿流体。非牛顿流体是一种特殊的流体,它分为3类:①具有拟塑性的幂律型非牛顿流体,如聚合物溶液、稠化水和泡沫液等,其流变特性是视黏度随剪切速率的增加而减小。研究表明,在幂律型非牛顿流的不稳定压力相应曲线上,见不到象牛顿流所呈现的半对数直线段,其早期压力动态为线性流,晚期为拟径向流。②黏弹性非牛顿流体,如具有松弛特性的重质、高黏原油和某些具有黏弹性的聚合物溶液等,其特性为视黏度随剪切速率的增加而增加。研究表明,在一定的条件下早期压力可出现线性流。③屈服拟塑型非牛顿流体,当压差达到某个临界值以后流体才开始流动,并表现出拟塑性。周蓉等人^[16]研究了稠油、均质复合油藏及双重介质油藏中的非牛顿流。

目前,对于流体非均质油藏的试井分型模型研究尚不深入,其成因归结为在开发过程中流体性质的变化、其它流体的注入和流体饱和度分布的变化。对该问题的深入研究将有助于寻找油田开发中后期剩余油的分布。

3.3 试井理论数学模型的求解方法

在油气渗流发展的早期,主要研究单相不可压缩和微可压缩流体在均质地层中的渗流问题,这个时期由于计算机的发展也才刚刚开始,从而在试井分析理论的发展中,主要以解析方法为主,最常用的求解方法主要有分离变量法, Fourier 变换方法, Laplace 变换方法和 Green 函数方法等。这些方法都是用来求解渗流偏微分方程的方法,但根据方程和边界条件的特点选择的方法也不同。分离变量法对于求解区域是矩形、柱体和球体的情形使用更为普遍, Fourier 变换方法则对于求解部分打开井、不完善井的间断解情形更为实用,而 Laplace 变换方法主要用来求解边

界问题,特别是规则边界问题, Green 函数方法也普遍地用来解决边界问题,但主要解决内边界问题,点源函数的叠加及裂缝井问题。

随着现代科技的发展,特别是进入20世纪80年代以来,计算机技术的发展,以及有效的试井分析新方法的提出,对过去很难实现的复杂形状、多变的油藏,以及多相流试井问题,发展了很多种数值解的方法。早期主要应用的是有限差分法。由于试井问题对解的精度要求很高,而在井眼附近,压力梯度很大,要想真实地逼近这个压力分布,网格需高度的细化;在远离井眼的地方,要让网格变粗,以保持有较高的计算效率。出于上面的需要,非结构化网格应运而生,有限元方法、边界元方法就是一种典型的非结构化网格方法。由于非结构化网格特别是在逼近复杂边界方面具有优异的性能,并能消除网格的取向效应,在油藏数值模拟界引起了广泛的关注。2003年 Zhou Rong 等利用这种非结构化网格解决了圆形油藏中偏心井测试资料的数值试井分析问题。

3.4 试井分析方法

不稳定试井的研究是从20世纪30年代开始的,发展到现在已经有70多年的历史,其分析方法经过了从半对数直线分析到双对数拟合分析,又到自动拟合分析的发展过程。主要理论依据是达西渗流理论^[33]和1935年 Theis^[34]提出的点源函数理论以及1949年的 Laplace 变换理论^[8]。不稳定试井分析方法又分为常规试井分析方法和现代试井分析方法。常规试井分析方法主要有 Homer 分析方法, MDH 分析方法和 MBH 分析方法,其中 Homer 分析方法就是1951年 Horner 提出的半对数直线分析理论^[35],主要思想是生产了 t_P 时间后关井,关井时间为 Δt ,则在 Δt 时刻的压降 $P_i - P_{ws}$ 为以产量 Q 生产 $t_P + \Delta t$ 时间引起的压降加上以产量 $-Q$ 生产 Δt 时间引起的压降,即 $P_{ws} = P_i - m \log_{10} \left(\frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} \right)$ 。另外还有 Miller, Dyes 和 Hutchinson 提出来的 MDH 法^[37],及 Matthews, Brone 和 Hazekroek 提出来的 MBH 法^[38],这两种方法都是计算平均地层压力的基本方法。MDH 法的压力计算公式是

$$P_{ave}(\Delta t_{DA}) = P_{ws} + \frac{mP_D(\Delta t_{DA})}{1.1513}$$

式中, m 是直线段斜率, P_{ws} 是关井时刻的流压, P_{ave} 为井底压力, Δt_{DA} 为关井时间, P_D 为泄油面积内的无量纲压力。MBH 法的压力计算公式是

$$P_{ave}(\Delta t_{DA}) = P^* - \frac{mP_D(\Delta t_{pDA})}{2.3026}$$

P^* 为油藏的外推压力。

现代试井分析方法主要有：压力拟合分析方法^[36]，压力-压力导数拟合方法^[10]和自动拟合分析方法^[39]。压力拟合方法是指1974年Ramey^[36]提出的双对数压力曲线拟合理论，其主要特点是通过实测压力数据曲线和理论图版中的无因次压力和无因次时间曲线的拟合，可以对油藏参数进行局部或全面的定量分析，并能获取常规分析方法中无法获取的一些参数值。压力-压力导数拟合方法是1983年由Gringarten和Bourdet^[9,10]在前人的基础上发展起来的，该方法可以利用导数曲线识别不同的油藏模型，对有目的的分析提供了依据，同时也提高了精度，并且首次提出了做不稳定试井研究时应该考虑地质静态资料和动态资料相结合的思想，但没有给出如何考虑的方法。1991年Horne^[39]首次在试井分析理论中使用了自动拟合方法，解释过程是一个“边解释边检验”相结合的过程，几乎对每一个流动阶段的识别以及每个参数的计算，都可以从两种不同的途径来获取。自动拟合分析方法利用非线性最小二乘原理，提高了解释分析的自动化程度和精度，使试井分析方法有了较大的发展——形成为目前广泛使用的现代试井分析方法，而且对于非均质油藏的试井资料解释是非常有效的。

现代试井分析方法的特点是：由于考虑了井筒存储和井壁污染对压力动态的影响，确立了早期资料的解释方法，在过去认为不能利用的早期数据中获得了很多有用的信息；完善了常规试井分析方法，给出了半对数直线段开始的大致时间，提高了半对数曲线分析的可靠性；通过实测压力数据曲线和理论图版中的无因次压力和无因次时间曲线的拟合，可以对油藏参数进行局部或全面的定量的分析，并能获取常规分析方法中无法获取的一些参数值；利用导数曲线可以识别不同的油藏模型，对有目的的分析提供了依据，同时也提高了分析精度；整个解释过程是一个“边解释边检验”相结合的过程，几乎对每一个流动阶段的识别以及每个参数的计算，都可以从两种不同的途径来获取，然后进行结果比较；对最后的解释结果进行模拟检验和历史拟合，因此，提高了解释结果的可靠性和正确性。

上述的试井分析方法，最初都是建立在油藏是均质的假设基础上的，发展到现在，对各种形式的弱非均质油藏和规则的非均质油藏都建立了相应的试井解释储层模型，且已经很成熟，而对于随机的非均质油藏，研究的很少。Oliver^[40,41]研究了渗透率随井距任意变化的非均质油藏定产量时的定解问题，同时假设渗透率相对于参考渗透率有微小变化，利用扰动

理论和拉氏变换，给出了不稳定井底压力及压力导数的解析解。Vela和Mckinley^[42]研究了平面非均质对于脉冲试井结果的影响，发展了有关脉冲测试井影响范围的概念，在这样的范围内，其非均质性对脉冲试井结果的影响是很大的。由于油藏的非均质性非常复杂，既是随机的，又有一定的规律性，所以用一般的统计方法描述油藏建立的试井解释模型，就没有考虑到油藏的规律性，只有找一种既能描述油藏的随机性，又考虑到规律性的油藏描述方法，建立复杂实际边界条件下的试井解释模型，才能准确的描述实际油藏。在这方面，地质统计学的各种Kriging方法及数值模拟不失为一个好办法。

4 结论

试井分析理论发展到现阶段，对于均质、单相渗流范畴的试井设计和分析已经较为容易实现，但是对于更接近实际的非均质油藏、多相流体、多井干扰及有生产历史等试井解释模型还需要进一步研究。根据研究手段和求解方法的发展，数值试井将是试井技术发展的重要技术手段，针对具体的模型和边界条件，选择不同的数值模拟方法，如有限元法、有限体积方法、离散元方法等进行小尺度的模拟即可得到油藏特征参数，但由于方法的限制，对实际油藏的描述有片面性，所以还要和理论分析结果，测井数据等综合起来，才能得出正确的结论。

在用一些新的试井分析技术，如人工神经网络、智能专家系统等进行非均质性描述的同时，可考虑找一种既能描述油藏的随机性，同时又能考虑油藏在形成过程中所存在的固有的结构性的方法，对油藏非均质性进行定量的描述，地质统计学方法就是这样的一种方法。地质统计学中的Kriging方法，可以根据油田上已有的特征参数数据，预测出整个油藏中该参数的分布，另外，针对油藏中实测数据较少的特点，地质统计学中还有协同Kriging法，指数Kriging法，概率Kriging法等方法，可以同时考虑有一定相关的其它特征参数的分布，而得到所需参数的分布，还可以考虑到地震资料等较易得到的资料。面对当今石油能源需求的迅速增长和有限的储量，加紧研究任意非均质多相流问题，为油田作下一步调整如压力的调整、流体流动方向的调整、注剂的调整做好理论依据，已经成为紧迫的课题摆在了石油工作者前面。

本文在明确了试井分析所用的油藏分类标准的基础上，定义了规则的非均质油藏和随机的非均质油藏的概念，并把现有的油藏分为均质油藏、规则的非均质油藏和随机的非均质油藏。概述了试井分析理

论在不同种类型油藏中的应用和发展. 指出了油田地质和油藏开发相结合、发展任意非均质油藏分析方法将是试井发展的一个重要方向。

参 考 文 献

- 1 Streltsova T D. Well Testing in Heterogeneous Formation. An Exxon Monograph. New York: John Wiley & Sons, 1988
- 2 Earlougher R C. Advances in well test analysis. In: Society of Petroleum Engineers Monograph 5, Society of Petroleum Engineers, Dallas, USA, 1977
- 3 Sabet M A. Well test analysis. In: Contribution in Petroleum Geology and Engineering 8. Houston, Texas, USA: Gulf Publishing Company, 1991
- 4 Raghavan R. Well test analysis. In: Prentice Hall Petroleum Engineering Series, PTR Rrentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993
- 5 Horne R N. Modern Well Test Analysis—A Computer-aided Approach. Second ed. USA: Petroway Inc, Palo Alto, 1995
- 6 沈平平. 油水在多孔介质中的运动理论和实践. 北京: 石油工业出版社, 2000. 87~94
- 7 Archer J S, Wall C G. Petroleum Engineering and Practice. England: Granham & Trotman, 1992. 1~5
- 8 van Everdingen A F, Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problem in reservoirs. *Trans AIME*, 1949, 186: 305~324
- 9 Gringarten A C, Bourdet D, Landel P A, et al. A comparison between different well bore storage and skin type curves for early-time transient analysis. SPE 8205, 1979. 23~26
- 10 Bourdet D, Whittle T M, Douglas A A, et al. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, 1983, 5: 95~106
- 11 Closmann P J. The aquifer model for fissured reservoir. *SPEJ*, 1975: 385~398
- 12 Wu Yu-Shu, Liu H H, Bodvarsson G S. A triple-continuum approach for modeling flow and transport processes in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 73(4): 145~179
- 13 Liu Yuewu, Chen Huixin, et al. Proceedings of the Fourth International Conference on Fluid Mechanics, Dalian, 2004-7-20-23. Beijing: Tsinghua University Press & Springer-Verlag, 2004
- 14 周蓉. 复杂渗流条件下的不稳定试井分析及应用: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所. 2002. 56~84
- 15 Jaeger J C. Heat conduction in composite circular cylinders. *Philosophical Maga zine*, 1941, 32(7): 324~335
- 16 Ramey Jr H J, Horne R N, Miller F G, Brigham W E. Well test analysis research. In: Proceedings 6th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, Dec, 1980
- 17 Fernando Samaniego V, Hiram Villalobos L. Transient pressure analysis of pressure-dependent naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, 39: 45~56
- 18 宋付权, 刘慈群. 变形介质油藏压力产量分析方法. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 57~59
- 19 孙贺东, 高承泰等. 具有越流的双层定压边界油气藏井底压力的精确解及典型曲线. 应用力学学报, 2003, 20(2): 41~44
- 20 Chang J, Yortsos Y C. Pressure Transient Analysis of Fractal Reservoirs. SPE F E, 1990, 5(1): 31~38
- 21 Acuna J A Ershaghi, Yortsos Y C. Practical application of fractal pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs. SPE 24705, 1992
- 22 Aziz K, Arbabi S, Deutsch C V. Why is it so difficult to predict the performance of horizontal wells. *JCPT*, 1999, 38(10): 37~45
- 23 Muskat M. The flow of homogeneous fluids through a porous media. In: International Human Resources Development Corp, Boston, 1982. 225~227
- 24 Joshi S D. Horizontal and multi-lateral wells: performance analysis an art or a science. *JPT*, 2000
- 25 Perrine R L. Analysis of Pressure Buildup Curve. Drill and Prod Prac, *API*, 1956
- 26 Martin J C. Simplified equations of flow in gas drive reservoirs and the theoretical foundation of multiphase pressure buildup analysis. *Trans AIME*, 1959, 216: 309~311
- 27 Al-Khalifa A J, et al. Multiphase well test analysis. Pressure and Pressure-Squared Methods, SPE18803
- 28 Raghavan R. Well test analysis: wells producing by solution gas drive, *SPE* 11788
- 29 宋付权, 刘慈群. 含启动压力梯度油藏的两相渗流分析. 石油大学学报 (自然科学版), 1999, 3: 47~52
- 30 刘慈群, 邓英尔. 各向异性双重介质垂直裂缝井两相流体渗流. 力学学报, 2000, 32(6): 698~706
- 31 Michael Shook G. Predicting thermal breakthrough in heterogeneous media from tracer tests. *Geothermics*, 2001, 30(6): 573~589
- 32 Zhou Rong, Liu Yuewu, et al. Numerical solutions for the transient flow in the homogeneous closed circle reservoirs. *ACTA Mechanica Sinica*, 2003, 19(1): 40~45
- 33 Darcy H. Les Fortunes Purlieus de la Ville de Dijon. Paris: Delmont, 1856
- 34 Theis C V. The relation between the lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans AGU*, 1935. 519~564
- 35 Horner D R. Pressure build-up in wells. In: Proc Third World Pet Cong, The Hague Sec. II, 1951. 503~563
- 36 Ramey Jr, Grigarten A C, Raghavan R. Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single
- 37 Miller C C, Dyes A B, Hutchinson jr C A. Estimation permeability and reservoir pressure from bottom hole pressure buildup characteristics. *Trans AIME*, 1950, (189): 91~104
- 38 Matthews C C, Brone F, Hazekroek P. A method for determination of average pressure in a bounded reservoir. *Trans AIME*, 1955, (201): 182~191
- 39 Horne R N. Advances in computer-aided well test interpretation. SPE24731

- 40 Oliver D S. The averaging process in permeability estimation from well-test data. *SPE Formation Evaluation*, Sept, 1990. 319~324
- 41 Oliver D S. Estimation of radial permeability distribution from well-test data. *SPE Formation Evaluation*, 1992. 290~296
- 42 Vela S, McKinley R M. How arial heterogeneities affect pulse-test results. *AIME*, 1970, 234(6): 181~191

ADVANCE OF WELL TEST ANALYSIS FOR HETEROGENOUS RESERVOIRS

CHEN Huixin LIU Yuewu[†]

DES, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Based on the definition of the reservoir types used in the well test analysis, this review focuses on four points: the formation heterogeneity, the fluid distribution, the mathematical model and the test data interpretation method. The concepts, such as the partially regular heterogeneous reservoir and arbitrarily heterogeneous reservoir, are expatiated in this paper. The present state and future trend of research are pointed out. It is best to combine the geological data and the dynamic data of the reservoir development to interpret the well test data. Numerical well test analysis method is the new trend for the future test analysis.

Keywords Heterogeneous reservoir, well test, analysis method, mathematical model, numerical simulation

[†] E-mail: lywu@imech.ac.cn