

文章编号:1004 - 1338(2004)S0 - 0069 - 06

试井分析理论和应用的发展

刘曰武¹, 张奇斌², 孙 波²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司, 黑龙江 大庆 163412)

摘要: 从试井测试技术与方法、试井理论模型、试井理论模型求解技术、试井资料的分析解释方法以及试井分析成果的应用 5 个方面概述了试井分析理论和应用的发展状况。对试井分析模型和分析方法进行了归类, 给出了弱非均质油藏、规律性非均质油藏和任意非均质油藏的概念范畴, 指出了试井技术的发展趋势和方向。

关键词: 试井; 试井理论; 试井分析; 多孔介质; 发展趋势

中图分类号: TE353

文献标识码: A

Developments of Well Test Theory and Its Applications

LIU Yue-wu¹, ZHANG Qi-bin², SUN Bo²

(1. Mechanics Institute of China Science Academy, Beijing 100080, China; 2. Logging & Testing Services Co. of Daqing Oilfield Co. L TD., Daqing, Heilongjiang 163412, China)

Abstract: Outlines developments of well test analysis theory and its applications from the point of view of well test techniques, theory model and its numerical solutions, data analysis and interpretation as well as analytical results. Classifies the well test analytical model and its analytical methods; Gives the basic definitions about weak inhomogeneous, regular inhomogeneous and random reservoirs, and points out the developing trends of well test techniques.

Key words: well test; well test theory; well test analysis; multi-porous media; developing trend

1 试井测试技术与方法的发展

早在 20 世纪 20 年代, 美国已经开始研制并使用了测量井内最高压力的仪器。到了 1933 年, 大约已有 10 种不同类型的井下压力计付诸使用。在 1970 年以前, 矿场使用的几乎都是机械压力计。1975 年以后开始出现电子压力计。1980 年开始出现了地面直读式的电子压力计。高精度电子压力计的出现, 使得测试方法也相应发生了变化, 出现了干扰试井、脉冲试井、垂向脉冲试井技术等等。随着测试手段的提高测试分析方法也有了新的突破, 出现了压力导数分析方法、压力-压力导数整合图版分析方法以及自动拟合分析方法等。试井分析理论模型也有了长足的发展。

2 试井理论模型的发展

现已提出的试井解释储层模型, 有均质地层与各种

边界条件组合的多种边界均质储层油藏模型、均质径向复合油藏模型、多层均质油藏模型、双重介质油藏模型、三重介质油藏模型、以及分形介质油藏和变形介质油藏模型等(见表 1)。

2.1 试井理论模型

2.1.1 均质和弱非均质油藏

2.1.1.1 无限和有限的均质各向同性油藏

对于一些均质的油藏, 由于在形成过程中的地质成因不同, 因此受定压、断层、封闭等边界条件的影响而形成了平面上存在不同性质间断的非均质油藏, 称之为弱非均质油藏。弱非均质油藏的实质是从微观上看油藏是非均质的, 但在宏观上除去边界范围的限定之外, 整个油藏的物理性质是均一的。在实际工程应用中, 理想的无限大油藏是不存在的。只要在测试资料的特征反映中没有边界特征反映的出现, 就可以认为被测试油藏是无限大的, 根据测试时间和测试地层的特征就可以推算出探测范围的大小。

在研究油藏模型的早期, 由于对油藏非均质性的认

识很少,所以一般在假设油藏是均质的情况下,提出了各种边界油藏模型,如单一线性油藏模型、圆形边界油藏模型、矩形边界油藏模型、角形边界油藏模型和“U”形边界油藏模型等。对圆形油藏的最早研究是 Van Everdingen 和 Hurst^[2]给出的水入侵圆形油藏的 Laplace

空间的压力公式;1974年 Hahtush^[3]等人应用 Green 函数法解决了带型区域边水不稳定渗流问题;1967年 Earlougher^[4]等人第一次给出了矩形油藏的不稳定渗流公式以及矩形油藏中的压力分布;无限大油藏试井理论的半解析解最早是由 Van Everdingen 提出的,

表1 均质及非均质油藏模型综合列表

分类	试井模型	基本理论方程		提出年代/a
		控制方程	边界条件	
均质	均质无限大油藏模型	$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D}$	$\lim_{r_D \rightarrow \infty} [p_D(r_D, t_D)] = 0$	1936 1959
	均质圆形定压油藏模型	$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D}$	$\lim_{r_D \rightarrow R_{ad}} [p_D(r_D, t_D)] = 0$	1949
边界条件	均质圆形封闭油藏模型	$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D}$	$\lim_{r_D \rightarrow R_{ad}} \left[\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right] = 0$	1936 1959
	均质矩形封闭油藏模型	$\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial p_D}{\partial y_D} = \frac{1}{C_D e^{2s}} \frac{\partial p_D}{\partial t_D}$	$\lim_{r_D \rightarrow R_{ad}} \left[\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right] = 0$	1967
非均质	双重孔隙介质无限大油藏模型	$\frac{\partial^2 p_{mD}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{mD}}{\partial r_D} = (1 - \lambda) \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} + \lambda \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D}$ $(1 - \lambda) \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} = (p_{mD} - p_{MD})$	$p_{mD}(r_D, t_D) = p_{MD}(r_D, t_D) = 0$	20世纪 60年代初
	三重介质无限大油藏模型	$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{D3}}{\partial r_D} \right) - \lambda_1 \frac{\partial p_{D1}}{\partial t_D}$ $-\lambda_2 \frac{\partial p_{D2}}{\partial t_D} = (1 - \lambda_1 - \lambda_2) \frac{\partial p_{D3}}{\partial t_D}$	$\lambda_2 \frac{\partial p_{D2}}{\partial t_D} = \lambda_2 (p_{D3} - p_{D2})$ $\lambda_1 \frac{\partial p_{D1}}{\partial t_D} = \lambda_1 (p_{D3} - p_{D1})$	1975 1981
径向复合	复合介质径向不定常渗流油藏模型	$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_{1D}}{\partial t_D}, 1 < r_D < a$ $\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_{2D}}{\partial t_D}, a < r_D$ 界面连接条件: $p_{2D}(a, t_D) = p_{1D}(a, t_D)$ $\left[\frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \right]_{r=a} = \left[\frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \right]_{r=a}$	$p_{2D}(r_D, t_D) = 0$	1959
规律性非均质	均质多层油藏不渗透边界灌注试井数学模型	$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_i}{\partial r} \right) - \frac{1}{K_i} \frac{\partial p_i}{\partial t} = 0,$ $-\sum_{i=1}^n a_i r \frac{\partial p_i}{\partial r} \Big _{r=r_{wi}} = q(t) - C \left(\frac{dp_w}{dt} - \frac{dp_g}{dt} \right)$	$\frac{\partial p_i}{\partial r} \Big _{r=R_i} = 0$	1980
均质	分形油藏	裂缝分形油藏的数学模型	$\frac{\partial p_D}{\partial t} = \frac{\partial p_D}{\partial r_D} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2}$ $\left[C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} = 1$	1990
变形油藏	变形的数学模型	变形介质渗流运动方程为: $v = -\frac{K_{0-0}}{u_0} \frac{du_1}{dl}$ $= k + \mu u_1 = \frac{1}{2} \exp[-(p_0 - p)]$		1982 1991 2000
	变形的数学模型	变形介质渗流连续方程为: $\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$		
任意非均质油藏	单相单井非均质地层数学模型	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu(x, y)} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu(x, y)} \frac{\partial p}{\partial y} \right) =$ $\phi(x, y) C_t(x, y) h(x, y) \frac{\partial p}{\partial t}$	$p(x, y) = p_i$	2002

目前所广泛使用的理论曲线都是以 Gringarten^[5]和 Bourdet^[6]的 Laplace 空间解为基础的。2001 年和 2002 年刘曰武、周蓉^[7,8]利用数值方法研究了均质圆形、均质四边形、均质三角形、均质半无限等各种边界条件下,定压、封闭油藏的不稳定流动问题,得到了它们的井底压力理论曲线。

2.1.1.2 双重介质各向同性油藏

1960 年,原苏联的 Barenblatt^[9]首次针对裂隙油气藏提出了双重介质的概念,用以描述裂缝性储集层,建立了描述流体在这类储集层内渗流的双孔单渗以及双孔双渗渗流数学模型,而后 Pollard、Warren^[10]和 Odeh 等人相继研究了这种双重介质达西渗流模型。双重介质由 2 种孔隙结构组成:原生的粒间孔隙和由裂缝、节理和溶孔所组成的次生孔隙,通常情况下,裂缝的截面尺寸未能超过孔隙的尺寸,裂缝系统起着主要通道的作用,因此,裂缝系统的渗透率远大于岩块系统的渗透率;同时,由于裂缝系统所占的体积远小于岩块孔隙所占的体积,因而,岩块的孔隙度显著地大于裂缝系统的孔隙度。1980 年刘慈群^[11]对双重介质非线性渗流进行了系统的研究。1990 年、1991 年刘慈群^[12]、杨←、王晓冬对双重孔隙介质中垂直裂缝井和水平井试井分析方法进行了研究。

2.1.1.3 三重介质各向同性油藏

随着碳酸盐油气田的大规模开发,人们发现 1963 年 Warren 等提出的双重介质渗流模型与很多实际情况不相符合,Closmann、刘慈群等人提出了三重介质渗流模型的概念。三重孔隙介质模型是在双重介质基础上将基岩岩块孔隙系统按其孔隙度和渗透性的差异分为 2 类,一类与裂缝的连通性较好,另一类较差,即均匀分布具有相同性质的裂缝与 2 种渗透率和孔隙度明显不同的分类基岩相互作用所组成的系统。早期的研究证实了三重介质的压力曲线具有 2 个台阶的典型特征。1991 年刘曰武^[13]等给出了一类三重介质油藏试井物理模型描述,建立了考虑井筒存储和表皮效应的数学模型,通过 Laplace 变换方法求出了井底压力的拉式空间解以及早期、中期、晚期压力表达式,从理论上揭示了三重介质油藏压力导数曲线存在 2 个凹陷,这 2 个凹陷分别反应了第一类孔隙介质与裂缝、第二类孔隙介质与裂缝的窜流特征。1997 年程时清^[14]给出了一类三重介质油藏的有效井径数学模型,从而使模型的使用更方便了。

2.1.2 规律性非均质油藏

径向复合油藏。径向复合油藏是指径向上由 2 种或 2 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。在石油工程文献中,Albert, Jaisson 和 Marion(1959)应该是首先研究复合系统的。这方面的研究还有 Loucks 和 Guerrero (1961),他们提出了积分项形式的压力分布表达式。

多层油藏。近年来的油藏开采发现很多储层都是由 2 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。关于这方面理论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^[15]、Kuchuk、Larsen、Ehlig - Economides^[16]、Raghavan、Stewart、Bourdet 和 Olarewaju 等人在这方面的研究。

分形介质油藏。分形介质储层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 0 也可以是一个固定值,所以渗透率的分布是双峰的。分形介质储层模型的建立应用了分形几何学。1990 年 Chang 和 Yortsos^[17]首先研究了裂缝分形介质,并建立了分形油藏的数学模型。Acuna 等人 1992 年应用分形几何方法成功地研究了天然裂缝性储层的不稳定压力动态把裂缝网格看成分形介质系统。

变形介质油藏。目前所考虑的变形介质油藏都是按地层参数一定规律变化的油藏,因此也将此类油藏看成是一种有规律的非均质油藏。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,以致渗透率减低。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。2000 年宋付权、刘慈群在假定多孔介质渗透率随压差呈指数规律变化,用有限差分法求解得到了试井理论曲线,并在定压生产的情况下,计算和分析了油井产量变化。

2.1.3 任意非均质油藏

对任意非均质油藏建立普适的数学模型的研究还刚刚开始。Vela 和 McKinley^[18]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。Pecher 等人研究了具有非均匀厚度单层的层状系统对压力相应的影响。2000 年刘月田、葛家理对各向异性圆形油藏分析了渗流的解析解。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,数值试井将成为其关键手段。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。

2.1.4 流体非均质油藏

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,目前尚无公认可行的解决办法。这些方法中,从最初的衰竭式开采到现在的三次采油,很多方法都在多孔介质中形成两相、三相甚至多组份的复杂流动,依靠传统的达西定律,这些问题的解决就显得力不从心。这时就需要考虑研究与实际情况相符的油气储层在非均质条件下两相流及多相流的流体和压力分布规律就显得尤为重要。

对于均质的油水两相流,目前常用的分析方法是 Perrine 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量代替单相流方程中的相应系数。Martin^[19]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 1 口井的点汇解。Ragha-

van 提出了溶解气驱条件下的压力恢复和压力降落试井方法。

韩大匡等人^[20]在 1980 年研究了非均质亲油砂岩油层内油水运动规律的数值模拟研究。同年陈钟祥等人研究了双重孔隙介质中二相驱替理论。目前所研究的模型如表 2 所示。

2.2 试井理论模型求解技术的发展

早期有 Puchyr^[21]和 Levitan 等人开始用数值的方法来研究试井问题,称为数值试井模拟器,这个时期主要应用的是有限差分法。2001 年胡勇用交错网格建立气水两相数值试井模型。同年刘立明建立了等效的油水两相渗流压降数值差分试井模型。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。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。2001 年周蓉、刘曰武等人^[7]利用有限元技术成功地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 试井分析方法的发展

3.1 试井分析方法

3.1.1 常规分析方法

常规试井分析方法主要有 Horner 压降和压恢分析

表 2 流体非均质性模型列表

分类	试井模型	基本理论方程	提出年代/a
油水两相模型	忽略重力、毛管力的油水两相不稳定渗流数学模型	油相 $\nabla \left[\frac{K_o}{\mu_o B_o} \nabla p \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right)$	1942
		水相 $\nabla \left[\frac{K_w}{\mu_w B_w} \nabla p \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w}{B_w} \right)$	1965
		饱和度方程 $S_w + S_o = 1$	
油气两相模型	油气两相不稳定渗流数学模型	油相 $\nabla \left[\frac{K_o(S_o)}{\mu_o(p) B_o(p)} \nabla p \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right)$	1956
		气相 $\nabla \left[C(p) \frac{K_g(S_o)}{\mu_g(p)} \nabla p \right] + \nabla \left[\frac{p K_o(S_o)}{\mu_o(p) B_o(p)} \right] = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{B_g} \right)$	1959 1987 1990
气水两相模型	裂缝性气水两相渗流模型	控制方程 $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g S_g) = \text{div}(\rho_g a_g \text{grad} \phi_g) + [\rho_g (\phi_{gm} - \phi_g)] + Q_g$	1987
		$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w) = \text{div}(\rho_w a_w \text{grad} \phi_w) + [\rho_w (\phi_{wm} - \phi_w)] + Q_w$	1990
		$S_g + S_w = 1$	1997

方法;MDH分析法;MBH分析法;Y函数分析法;叠加时间分析法等。MDH法是由 Miller、Dyes 和 Hutchinson 等 3 个人提出来的,当 $t_{\max} \ll t_p$ 时,Horner 压力恢复分析公式即可转变为 MDH 公式。MBH 法是由 Matthews、Brone 和 Hazekroek 等 3 个人提出来的,是计算平均地层压力的基本方法,也是确定各种形状的有界储层平均地层压力的一种方法。Y 函数分析法也称为一阶压力导数方法,可用于压降资料的处理与分析。叠加时间函数法又称为广义的 Horner 法,是目前几乎所有试井解释软件中都采用的传统分析方法,适合分析多个流动期数据和变流量资料的数据,又能分析 2 个流动期的压力恢复和单个流动期的压力下降资料,所以这种方法可以代表整个不稳定压力分析的常规分析法。

3.1.2 现代试井分析方法

现代试井分析方法主要分为 4 类,即图版拟合法(包括压力图版拟合法和压力-压力导数图版拟合法)、自动拟合分析方法、特征点分析拟合法、自由理论曲线分析拟合法。自动化拟合方法是指选定模型后,计算机可以自动计算一条与实测曲线拟合较好的理论曲线。但并非每一个模型都有很好的自动拟合结果,完全靠计算机自动拟合会产生错误结果,同时又由于自动拟合方法的不完善性会得不到任何结果,因此,后来发展了特征点分析拟合法和自由理论曲线分析拟合法。特征点分析拟合法是指在计算机屏幕的理论曲线上标注模型的特征点,拖动特征点改变理论曲线形状,使之与实测曲线有一个好的拟合。其优点在于一定程度地提高了分析拟合的方便程度,缺点是对应参数表述不明确。自由理论曲线分析拟合法是指选定模型中的任意参数,则屏幕上即可显示该参数对理论曲线的影响方向,根据实测曲线的特征移动鼠标就可以实时改变曲线的形状并同时显示参数改变值的大小,极大提高了拟合的方便程度,增强了试井解释的直观化程度。

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”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 2 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。各种试井分析方法如表 3 所示。

3.2 试井分析成果的应用与发展

(1) 推算地层能量。对于探井,推算出地层的原始能量,即原始地层压力的大小;对于开发井,推算出目前地层的平均能量,即目前地层平均压力的大小。

(2) 确定地下流体的流动能力。即地层流动系数 Kh/u 、产能系数 Kh 、地层平均渗透率 K 的大小。

(3) 判断措施井的选井。通过试井资料分析,确定地层污染系数/表皮系数的大小,判断井的完善程度,根据污染系数的大小决定是否采取酸化、压裂等激励措施。

(4) 判断措施效果。通过措施前后的测试资料分析成果,确定措施是否有效。对于酸化井主要判断表皮系数是否减小。对于压裂井除了判断表皮系数的大小外,还要检查是否出现压裂井的特征,并通过产注量进行辅助识别。

(5) 判断完井效果。通过表皮系数的大小或堵塞系数的大小判断井的完善程度。

(6) 推算探测范围和估算单井控制储量。根据测试压力历史资料和分析所得的地层参数推算探测范围的大小,结合地质静态资料估算单井控制储量和生产能力。

(7) 判断边界性质、距离、形状和方位等。根据测试资料的特征反映判读边界性质,由曲线拟合分析得到各边界的距离,通过地质资料和其它井的测试分析资料得到边界的形状和方位。

(8) 判断井间连通情况。井间是否连通、连通厚度是多少、连通渗透率大小等。

(9) 判断地层的方向性发育情况。根据测试资料特征和地质资料,判定是否有地层的方向性发育情况,为注水方案的设计和调整提供可靠依据。

(10) 对于低渗油藏,可以确定启动压力梯度大小,确定合理生产制度。

(11) 对于稠油热采油藏,可以判定地下流体的非牛顿流幂律指数,判定热采有效范围的大小。对于聚合物驱油藏,可以判定聚合物驱替的区域变化。

(12) 更进一步发展的数值试井理论,将可能得到地层压力分布,地层流体的分布等有关油藏描述的更详细的信息。

总的来讲,试井理论的应用向这 2 个方向发展,一是油田开发的上游——地质方向发展,将成为油藏精细描述的辅助手段;二是向油田开发的下游——采油工程

表3 试井分析方法发展综合列表

分类	分析方法名称	该方法的主要理论	提出年代/a
常规试井分析方法	MDH方法	该方法是计算平均地层压力的基本方法 $p_{ave}(t_{DA}) = p_{ws} + \frac{m p_D(t_{DA})}{1.1513}$	1950
	Horner分析方法	生产了 t_p 时间后关井,关井时间为 t ,则在 t 时刻的压降 $p_i - p_{ws}$ 为等于以产量 Q 生产 $t_{p+1} + t$ 时间引起的压降加上以产量 $-Q$ 生产 t 时间引起的压降 $p_{ws} = p_i - m \log \left[\frac{t_p + t}{t} \right]$	1951
	MBH方法	该方法是计算平均地层压力的基本方法,也是确定各种形状的有界储层平均地层压力的一种方法 $p_{ave}(t_{DA}) = p^* - \frac{m p_D(t_{pDA})}{2.3026}$	1955
现代试井分析方法	压力拟合分析方法	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	1974
	压力-压力导数拟合方法	提出了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	1983
	自动拟合分析方法	解释过程是一个“边解释边检验”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	1991
	特征点分析拟合方法	在计算机屏幕的理论曲线上标注模型的特征点,拖动特征点改变理论曲线形状,使之与实测曲线有一个好的拟合	1995
	自由理论曲线分析拟合方法	选定模型中的任意参数,则屏幕上即可显示该参数对理论曲线的影响方向,根据实测曲线的特征移动鼠标就可以实时改变曲线的形状并同时显示参数改变值的大小	2002

方向发展,为油田开发的采油方案调整提供更详细的动态信息,辅助与开发方案的进一步调整。

4 结论

非均质试井分析方法研究的发展趋势是从单相流的研究向两相流、多相流的研究方向发展;对储层的描述也由假设储层是均质的向更切合实际的非均质性发展;在研究手段和方法上,也由最初的解析方法,发展到现在的数值试井。数值试井方法从最初的单纯的有限差分方法,发展到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;试井分析技术逐步从常规分析发展到自动拟合技术以及特征点方法和自由曲线拟合分析方法。对于

更接近实际的复杂形状的多相流试井问题,还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Raghavan R. Well Test Analysis [M]. PTR Rrentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [2] Van Everdingen A F and Hurst W. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problem in Reservoirs [J]. *Trans. AIME*, 1949, 186:305 - 324.
- [3] Hahtush, et al. Non-steady Green's Functions for an Infinite Strip of Leaky Aquifer [J]. *J. Trans. A.G.U.*, 1955, 36:101 - 104.
- [4] Earlougher R C, Ramey H J, et al. Pressure Distributions in Rectangular Reservoirs [Z]. 1967:56 - 89.

(下转第 89 页)

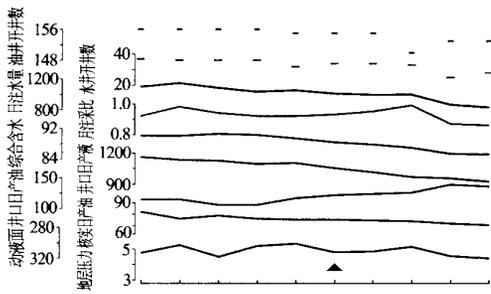


图 3 采油一队 2002 年开发综合曲线

3.3 压裂改造

应用监测资料补孔压裂 4 口井,累计增油 283 t。对于已动用的高饱和度层,配套应用采出剖面等监测资料进行再次压裂改造,应用监测资料普通压裂 5 口井,累计增油 305 t。

3.4 指导编制调剖方案

通过对东一区 4 口井的碳氧比、6 口井的产液剖面和 4 口井的注水剖面对比分析,总结出东一区 3 个小层平面水洗的特点,是孔隙度高、渗透性强、饱和度低;产

液剖面上表现为高产液、高含水。根据这一特点,该区针对 3 个小层发育的井采取了分调工艺,调剖后见到了明显地调剖效果,日产液下降,日产油上升,综合含水下降。

4 结 论

剩余油的分布受地质条件和开采井网等诸多因素的影响,而且不同储层中剩余油潜力的分布特点及富集程度不同,必须因井制宜、因层制宜确定调整挖潜措施。扶余油田在精细地质研究的基础上,以注水为中心,以储层改造为手段,通过地质与工艺的密切配合,可以探索出改善开发效果的工作方向。

参考文献:

- [1] 陆大卫,谢荣华. 油田开发测试技术新进展 [M]. 北京:石油工业出版社,2002.

(收稿日期:2003 - 07 - 28 本文编辑 李总南)

(上接第 74 页)

- [5] Gringarten A C, Bourdet D, Landel P A, et al. A Comparison Between Different Wellbore Storage and Skin Type Curves for Early-Time Transient Analysis [C]. SPE8205, 1979:23 - 26.
- [6] Bourdet D, Whittle T M, Douglas A A, et al. A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis [J]. *World Oil*, 1983, 5:95 - 106.
- [7] 周蓉,刘曰武,周富信. 均质圆形油藏不稳定渗流的数值解 [J]. *油气井测试*, 2001, 4(2):15 - 19.
- [8] 刘曰武,周蓉. 油气田开发中的数值试井分析 [J]. *力学与实践*, 2002, 24:45 - 50.
- [9] Barenblatt G E, Zheltov I P, Kochina I N. Basic Concepts in the Theory of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks [J]. *J. Appl. Math. Mech. USSR*, 1960, 24(5):1286 - 1303.
- [10] Warren J E, Root P J. Behavior of Naturally Fractured Reservoirs [J]. *Soc. Pet. Eng. J. Frans. AIME*, 228, 1963:245 - 255.
- [11] 刘慈群. 双重介质非线性渗流 [J]. *科学通报*, 1980, 17(1):1081 - 1085.
- [12] 刘慈群. 三重介质的渗流问题 [J]. *力学学报特刊*, 1981, 18:12 - 19.
- [13] 刘曰武,刘慈群. 三重介质油气藏数学模型的建立及其渗流机理的研究 [J]. *西南石油学院学报*, 1993(特刊):87 - 89.
- [14] 程时清,屈雪峰. 三重介质模型试井分析方法 [J]. *油气井测试*, 1997, 4(1):5 - 11.
- [15] 高承泰. 利用两层不稳定试井确立多层油藏的分布参数 [J]. *石油学报*, 1987, 2(2):33 - 37.
- [16] Ehlig-Economides C and Economides M J. Pressure Transient Analysis in an Elongated Linear Flow Systems [J]. *SPEJ* 1985:839 - 849.
- [17] Chang J, Yortsos Y C. Pressure Transient Analysis of Fractal Reservoirs [J]. *SPE F. E.*, 5(1):31 - 38.
- [18] Vela S, McKinley R M. How Aerial Heterogeneities Affect Pulse-Test Results [J]. *Soc. Pet. Eng. J.*, 1970, 6:181 - 191.
- [19] Martin J C. Simplified Equations of Flow in Gas Drive Reservoirs and the Theoretical Foundation of Multiphase Pressure Buildup Analysis [J]. *Trans. AIME*, 1959, 216:309 - 311.
- [20] 韩大匡,等. 非均质亲油砂岩油层层内油水运动规律的数值模拟研究 [A]. 中国力学学会第二届全国流体力学学术会议论文集 [C], 1983. 321 - 322.
- [21] Puchyr P J. A Numerical Well Test Model [C]. SPE 21815, presented at the Rocky Mountain Regional Meeting and Low-permeability Reservoirs Symposium. Denver, Colorado, Apr 15 - 16/17, 1991.

(收稿日期:2003 - 08 - 28 本文编辑 刘洪仕)

作 者 简 介

- 宋文明** 高级经济师,1956年生。1976年毕业于大庆石油学校钻井专业。从事固井技术、钻井液技术管理工作。(地址:大庆石油管理局钻探事业部 邮编:163453)
- 陶宏根** 高级工程师,1963年生。1983年毕业于大庆石油学院地质专业,现任测井公司副经理兼总工程师。(地址:黑龙江省大庆市大庆石油管理局测井公司 邮编:163412 电话:0459-5693312 E-mail:taohonggen@cj.dq.cnpc.com.cn)
- 朱世和** 教授级高级工程师。1982年毕业于华东石油学院测井专业。现任辽河石油勘探局测井公司副经理兼总工程师。(地址:辽宁省盘锦市兴隆台区辽河测井公司 邮编:124011 电话:0427-7811562)
- 刘爱平** 高级工程师,1963年生。1985年毕业于西北大学化学工程系,2002年获中国地质大学(北京)工程硕士学位。(地址:河北廊坊中国石油勘探开发研究院廊坊分院 邮编:065007)
- 强毓明** 高级工程师。1988年毕业于西北大学物理系。主要从事声波测井方法研究及仪器开发工作。(地址:西安市凤城四路142号 邮编:710021)
- 谢艳萍** 高级工程师,1963年生。1983年毕业于大港石油学校测井专业,1990年毕业于华东石油函授大计算机专业,一直从事测井资料解释与研究工作。(地址:大港油田集团测井公司资料评价中心 邮编:300280 电话:022-25962668)
- 李保民** 工程师。1992年毕业于江汉石油学院测井专业。现从事测井录井施工的工程技术及质量管理工作。(地址:陕西省西安市未央区长庆兴隆园小区长庆油田公司工程技术管理部 邮编:710021 电话:029-86595703)
- 李 强** 工程师。1968年生。西安石油大学在读研究生,现从事套管井测井解释。(地址:陕西西安市高陵泾河工业园泾渭东路方元大厦 邮编:710201 电话:029-86029717)
- 王金钟** 1982年毕业于华东石油学院测井专业,现任大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司总工程师。(地址:黑龙江大庆市红岗区红卫村 邮编:163412 电话:0459-4898038)
- 郑希科** 高级工程师,1963年生。1985年7月毕业于长春地质学院地质专业。现从事测井解释方法研究。(地址:黑龙江省大庆市让胡路区西柳街4号生产测井研究所 邮编:163453 电话:0459-5592202)
- 钟兴福** 高级工程师,1967年生。1988年毕业于大庆石油学院测井专业。从事生产测井研究。(地址:黑龙江省大庆市丰收村测试技术服务分公司计算站 邮编:163153 电话:0459-5821715)
- 张耀文** 工程师,1966年生。1992年毕业于大庆石油学院石油地质专业。现从事注入剖面测井的研究工作。(地址:黑龙江省大庆市让胡路区西柳街4号生产测井研究所 邮编:163453 电话:0459-5592495 电子邮件:zhangyw@cjs.dq.cnpc.com.cn)
- 胡金海** 高级工程师,1966年生。勘探地球物理专业。(地址:黑龙江省大庆市萨尔图区丰收三村测试技术服务分公司三采实验室 邮编:163153 电话:0459-5820716 E-mail:hujinhai0586@sina.com)
- 张同义** 高级工程师,1966年生,2000年5月石油大学(北京)博士毕业生,现在清华大学核物理研究院读博士后。(地址:黑龙江省大庆市让胡路区西柳街4号生产测井研究所 邮编:163453 电话:0459-5592302)
- 刘曰武** 中国科学院力学研究所副研究员,博士生。目前从事油藏测试评价和水文地质分析。(地址:北京市海淀区北四环西路15号 电话:010-62615528)
- 梁军彬** 工程师,1968年生。1991年毕业于石油大学(华东)勘探系矿场地球物理专业。长期从事油田动态监测技术应用及研究。现为青岛海洋大学在读硕士。(地址:山东省东营市胜利油田有限公司胜利采油厂 邮编:257051 电话:0546-8776641)
- 周恒涛** 经济师。吉林大学在读硕士研究生。现任中国石油股份有限公司吉林油田分公司采油三厂厂长。(地址:吉林省松原市吉林油田分公司采油三厂 邮编:138000)