

双重介质地层变井筒储集效应 典型曲线特征分析

程先琼 冯文光

(成都理工学院,成都 610059)

【摘要】 本文在文献[1]对均质地层分析结果的基础上,用拉氏变换及 stehfest 数值反演方法研究了针对双重介质地层井筒储集系数呈线形变化,指数变化等情形下有效井径数学模型的近似解,绘制相应的典型曲线,并对影响曲线形态的参数进行探讨,这对于用实际资料进行试井解释时合理使用其早期数据有很好的参考作用。

【关键词】 双重介质;变井筒储集效应;拉氏变换;试井;典型曲线
中图分类号:TE319 /文献标识码:A

0 引言

各种样板曲线的出现使试井工作跃上一个新台阶,特别是格林伽顿采用了坐标变换和参数组合的方法制作了数十年来倍受青睐的格林伽顿图版,但这些经典图版的制作基于定井筒储集效应原理,即把井筒储集系数 c_D 视为常数,这虽简化了图版的制作,但使实际试井解释中出现的变井筒储集效应情况束手无策。

经前人研究发现,影响井筒储集系数变化的情况主要有:关井前井筒中存在自由气,双重介质油藏与井筒连通的裂缝影响有效井筒容积,井筒内相态再分布,多相流同时存在,气井试井等都会影起井筒储集系数的改变。

本文根据双重介质试井分析的有效井径模型,研究了当井储系数呈线形变化,指数变化时,该模型经过拉氏变换和 stehfest 数值反演后的近似解,绘制出典型曲线获得一些规律性的认识。

双重介质无限大地层无因次有效井径数学模型:

$$\begin{cases} \mathcal{L} p_D / \partial r_D^2 + (1/r_D) \partial p_D / \partial r_D + \\ \lambda(p_D - p_w) = \omega \partial p_D / \partial t_D \\ (1 - \omega) \partial p_D / \partial r_D + \lambda(p_D - p_w) = 0 \\ p_D(r_D, 0) = 0 \\ p_D(r_D \rightarrow \infty, 0) = 0 \\ p_D(r_D, 0) = 0 \\ -(\partial p_D / \partial r_D)|_{r_D=1} = 1 - c_D(t_D) d p_w / dt_D \\ p_w = [p_D - s'(\partial p_D / \partial r_D)]|_{r_D=1} \end{cases} \quad (1)$$

1 井筒储集系数的变化

1.1 井筒储集系数呈线性变化

$$c_D(t_D) = b(1 + at_D/b) \quad (I)$$

b 为初始井筒储集系数, a 为表征井筒储集系数变化快慢的常数。

则①式变为:

$$\begin{cases} -(\partial p_m / \partial r_D)|_{r_D=1} = 1 - b(1 + at_D/b) dp_{WD}/dt_D \\ (t_D/c_D) > (t_D/c_D)_r \\ -(\partial p_m / \partial r_D)|_{r_D=1} = 1 - b(1 + at_D/b) dp_{WD}/dt_D \\ (t_D/c_D) \leq (t_D/c_D)_r \end{cases}$$

得拉氏空间井底压力: 当 $(t_D/c_D) \leq (t_D/c_D)_r$ 时

$$\begin{aligned} \bar{p}_{WD}(s) = & (1/s)[-c' - \ln(\sqrt{sf(s)}/2) + s'] / \{1 + \\ & (bs - a)[-c' - \ln(\sqrt{sf(s)}/2) + s'] + \\ & sa[\sqrt{f(s)}/s/2 + f'(s)\sqrt{s/f(s)}/2][1/\sqrt{sf(s)} + \\ & s'\sqrt{sf(s)}(-c' - \ln(\sqrt{sf(s)}/2))]\} \end{aligned}$$

用 stehfest 数值反演法求得其真实空间的近似解, 并作出图 1A(c_D 线形变化时的半对数曲线-初始井筒储集系数 b 不变), 图 1B(c_D 线形变化时的半对数曲线-变化速率 a 不变), 图 2A(c_D 线形变化时的导数及双对数曲线-初始井筒储集系数 b 不变), 图 2B(c_D 线形变化时的导数及双对数曲线-变化速率 a 不变)。假设 c_D 在 $(t_D/c_D) \leq (t_D/c_D)_r$ 时满足 I 式的线形变化规律, 在这以后 c_D 为常数, 其值为 $c_{D0}(1 + at_{Dr}/c_{D0})$ 。

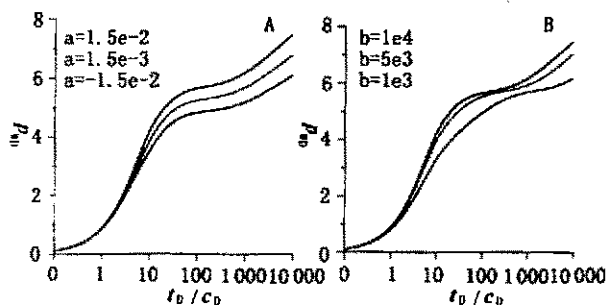


图1 半对数曲线图

c_D 线性变化: A. 初始井筒储集系数不高; B. 变化速率不高

Fig. 1 The typical curves of semilog undermilog under c_D under conditions of c_D linear variations; A. initial wellbore storage coefficient are not high; B. velocity of variations is not high

反映 c_D 变化速率的常数 a 和初始井筒储集系数 b 对曲线形态有很大影响, 当 $a > 0$ 时井筒储集系数增加, 当 $a < 0$ 时井筒储集系数减小。并且当 $|a| < 1e-3$ 时, 井

筒系数接近常数, 即曲线与常井筒储典型曲线重合。

半对数曲线 $p_{WD}-\lg(t_D/c_D)$ 呈典型 S 形, 在开始时参数 a, b 对曲线几乎无影响, 以后逐渐分支, c_D 变化速率越慢, 曲线越偏向 t_D/c_D 轴, 过渡段窜流早中期的水平线越长(如图 1A), 而初始井筒储集系数越大, 曲线的 S 形越开阔, 越早进入早期直线段(如图 1B)。

双对数曲线 c_D 呈线形变化阶段的曲线偏离 45° 直线, 整条曲线呈厂字形, 压力导数曲线开始时与双对数曲线重合, 然后逐渐脱离双对数曲线, c_D 变化减速率越快, 驼峰越高, 形成的“凹子”越浅, 最后进入 0.5 水平线(如图 2A)。初始井筒储集系数减小, 驼峰降低, “凹子”变浅并向右移, 最后进入 0.5 水平线(如图 2B)。

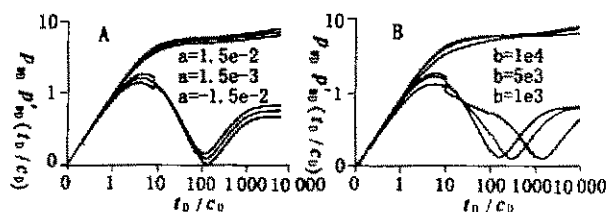


图2 双对数及导数曲线图

c_D 线性变化: A. 初始井筒储集系数不高; B. 变化速率不高

Fig. 2 Storage coefficient and invariance of initial wellbore storage coefficient

c_D under conditions of c_D linear variations; A. initial wellbore storage coefficient are not high; B. velocity of variations is not high

1.2 井筒储集系数呈指数变化

$$c_D(t_D) = b(1 + e^{at_D/b}) \quad (II)$$

b 为初始井筒储集系数, a 为表征井筒储集系数变化快慢的常数。则①式变为:

$$\begin{cases} -(\partial p_m / \partial r_D)|_{r_D=1} = 1 - b(1 + e^{at_D/b}) dp_{WD}/dt_D \\ (t_D/c_D) > (t_D/c_D)_r \\ -(\partial p_m / \partial r_D)|_{r_D=1} = 1 - c_{D0}(1 + e^{at_D/b}) dp_{WD}/dt_D \\ QD/c_D > (t_D/c_D)_r \end{cases}$$

得到拉氏空间井底压力为: 当 $(t_D/c_D) \leq (t_D/c_D)_r$ 时

$$\begin{aligned} \bar{p}_{WD}(s) = & (1/s)[c' - \ln(\sqrt{(sf(s)-a/b)/2}) + s'] / \{1 + \\ & (bs - a)[-c' - \ln(\sqrt{(sf(s)-a/b)/2}) + s'] + \\ & bs[-c' - \ln(\sqrt{sf(s)}/2) + s']\} \end{aligned}$$

假设 c_D 在 $(t_D/c_D) \leq (t_D/c_D)_r$ 时满足 II 式的指数变化规律, 则以后 c_D 为常数, 其值为 $c_D(t_D) = c_{D0}(1 + \exp(at_{Dr}/b))$, 用 stehfest 数值反演法求得其真实空

间解的近似值,作出图 3A(c_D 指数变化时的半对数曲线-初始井筒储集系数 b 不变),图 3B(c_D 指数变化时的半对数曲线-变化速率 a 不变),图 4A(c_D 指数变化时的导数及双对数曲线-初始井筒储集系数 b 不变),图 4B(c_D 指数变化时的导数及双对数曲线-变化速率 a 不变)。

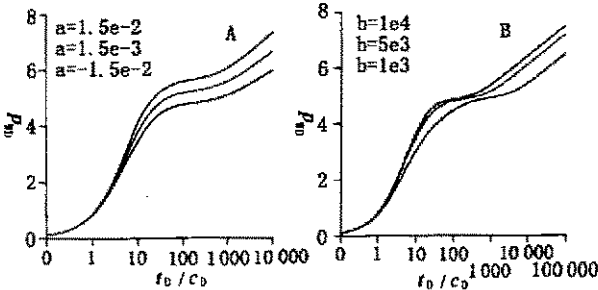


图 3 半对数曲线图

c_D 指数变化; A. 初始井储系数不高; B. 变化速率不高
Fig. 3 The typical curves of semilog under
see Fig. 1 for explanation of symbols

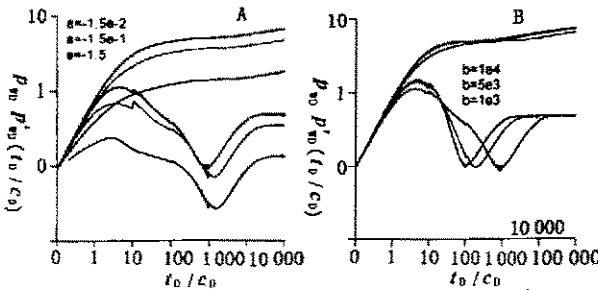


图 4 双对数及导数曲线图

c_D 指数变化; A. 初始井储系数不高; B. 变化速率不高
Fig. 4 The typical curves of loglog and derivative
see Fig. 1 for explanation of symbols

半对数曲线 $p_{WD}-\lg(t_D/c_D)$ 仍呈典型 S 形,随 c_D 变化速率增大,曲线偏向 t_D/c_D 轴,S 形越不明显(如图 3A),初始井筒储集系数越小,进入过渡段窜流越晚,表现在曲线上是 S 的水平线右移(如图 3B)。

导数曲线在早期逐渐偏离双对数曲线,位于双对数曲线下方。随 c_D 变化速率减小,驼峰越不明显,又可形成隐性驼峰,而对应的“凹子”凹得越浅,最后进入低于 0.5 的水平线,这种典型曲线特征与井筒相再分布的典型特征非常相似(如图 4A)。初始井筒储集系数越小,驼峰越低,“凹子”右移,越晚进入 0.5 水平线(如图 4B)。

据以上分析,当井筒储集系数以不同形式变化

时,特征曲线有不同的特点,因此在不需引入新压力函数的情况下,可以定性判断井筒储集系数变化规律。

2 实例分析

2.1 中原油田某气井的试井资料(图 5A)^[2],双对数曲线微凸,导数曲线的驼峰较高而形成的“凹子”很浅,初步判断井筒储集系数呈变化率较慢的指数递增变化。

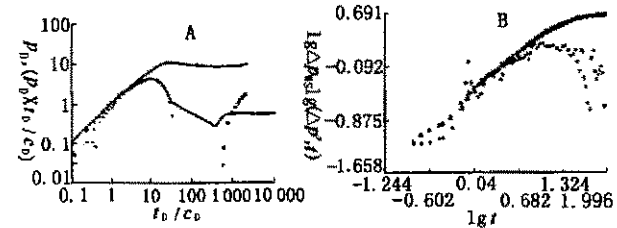


图 5 双对数及导数试井曲线图

Fig. 5 The well testing curves of loglog

2.2 Z6 井为一口抽油井,日产液 27 m^3 ,含水 96%,作出压力双对数图和压力导数图(图 5B)^[1]。

压力导数曲线与双对数曲线相分离,双对数曲线呈开阔的 S 形,压力导数曲线在早期段小于 45° 并位于双对数直线下方,初步判断井筒储集系数呈递减率较快的线形变化,曲线无明显跳跃,续流时间较长。

3 几点认识

3.1 井储系数的变化在压力双对数和导数图及压力单对数图上有所反映,井储系数两种形式的变化各有特点,容易辨认。

3.2 一般说来,压力导数曲线比双对数曲线更容易识别井储系数的变化。

3.3 由于变井储问题比较复杂,井储系数的变化千差万别,但根据实测资料和上述两种情况下的典型曲线形态可大致判断井储系数的变化规律。

3.4 在试井设计和施工过程中,应尽量减小井筒储集效应的影响。

注:文中 s' 表皮系数; $(t_D/c_D)_r=10$

$$f(s) = \frac{\omega(1-\omega)s + \lambda}{(1-\omega)s + \lambda}; \quad c' = 0.5772$$

$$f'(s) = \frac{df(s)}{ds}$$

参考文献

- 1 程时清等. 变井筒储集效应的典型曲线特征及实例分析[J]. 油气井测试, 1992, (4): 11~19.
- 2 贾永禄等. 试井分析中的变井筒问题的研究[J]. 新疆石油地质, 1998, (8).
- 3 Fair W Jr. Pressure Buildup Analysis with Wellbore Phase Redistribution [J]. SPE 1981, April, 259~270.
- 4 刘能强主编. 实用现代试井解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.

ANALYSIS OF TYPICAL CURVES FOR VARIABLE WELLBORE STORAGE OF DOUBLE POROSITY SYSTEM

CHENG Xian-qiong FENG Wen-guang

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Based on the analytic result of homogeneous strata and utilized the Laplace transform and stehfest numerical inversion, the approximate solution of a mathematical model for well diameter under the condition of linear and potential variations of wellbore storage coefficient of the double porosity system is studied. Accordingly, typical curves are created and the parameter affecting the shape of curves is discussed. The results studied are proved to be useful in the rational application of data of the early stage to the interpretation of well testing.

Key words double-porosity system; variable wellbore storage; Laplace transform; well testing; typical curve

ISSN 1001-6872(2000)01-0066-69; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author Cheng Xianqiong, female, 25 years old. Now she is a M Sc Candidate Specializing in Petroleum Geology (reservoir description) in Chengdu University of Technology.