

# 缝洞型凝析气藏试井解释方法初探

徐燕东

中石化西北油田分公司石油工程技术研究院 新疆乌鲁木齐 830011

通讯作者: Email: tonnyxu2001@126.com

项目支持: 中石化重大科技攻关“特深层油气钻完井关键技术与装备”课题6“塔里木盆地特深层钻完井工程技术示范”(P21081-6)

引用: 徐燕东. 缝洞型凝析气藏试井解释方法初探[J]. 油气井测试, 2023, 32(3): 62-68.

Cite: XU Yandong. Production prediction model of coalbed methane wells in low water production period [J]. Well Testing, 2023, 32(3): 62-68.

**摘要** 缝洞型储层的主要存储空间是裂缝和洞穴,凝析气相态变化复杂,使得缝洞型凝析气藏试井解释方法一直没有被深入研究。根据力学三大守恒定律,定义了凝析气质量流量拟压力,提出缝洞中不仅存在管渗耦合流动,而且压力以波的形式传播。建立了井筒与洞穴相连通情况下的流动方程,并给出了井筒和洞穴之间的流动压差表达式,以此作为地层流动方程的内边界条件以形成完备的流动方程组。在此基础上,建立了缝洞型储层凝析气藏井-洞-缝试井解释模型。经塔里木盆地某井实例应用,试井解释结果洞穴空间体积  $75.66 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,裂缝空间体积  $551 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,解释凝析气动态储量  $21.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,与后期物质平衡法计算动态储量  $22.3 \times 10^8 \text{ m}^3$  仅相差 3.5%,解释结果与生产实际相符合。新的建模方法首次利用试井资料解释出凝析气藏的洞穴和裂缝体积,是对缝洞型凝析气藏流动方式的一个有益探索。

**关键词** 塔里木盆地;缝洞型凝析气藏;压恢试井;守恒定律;缝体积;洞体积;管渗耦合;动态储量;敏感性分析

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.03.012

## Production prediction model of coalbed methane wells in low water production period

XU Yandong

Petroleum Engineering Technology Research Institute of Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi, Xinjiang 830011, China

**Abstract:** The main storage space of fracture-cavity reservoirs is fractures and caves, the phase change of condensate gas is complex. Due to these factors, the interpretation methods of the well testing have not been thoroughly studied in fracture-cavity condensate gas reservoirs. According to the three conservation laws of mechanics, and defined the mass flow rate pseudo pressure of condensate gas, it is proposed that there is not only pipe-seepage coupled flow in the fracture-cavity, but also the formation pressure propagates in the form of waves. The flow equation of wellbore-cave has is established, and the flow pressure is provided between the wellbore and the cave. Using this as the inner boundary condition, the complete set of flow equations are established. On this basis, the well testing interpretation model of the well-cavity-fracture is established in the fracture-cavity reservoir condensate gas reservoirs. Applied to a well in Tarim Basin, The interpretation results: the volume of cave is  $75.66 \times 10^4 \text{ m}^3$ , and fracture is  $551 \times 10^4 \text{ m}^3$ , the dynamic reserves of condensate gas is  $21.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , the result of material balance method calculation is  $22.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , the difference between they is only 3.5%. It is the first time to use well testing to interpretation the volume of caves and fractures, which is a beneficial exploration of the flow mode of fractured-cavity condensate gas reservoirs.

**Keywords:** Tarim basin; fracture-cavity condensate gas reservoirs; pressure build-up testing; conservation law; fracture volume; cave volume; pipe-seepage coupled; dynamic reserves; sensitivity analysis

在缝洞型凝析气藏中,缝洞的发育模式和分布规律<sup>[1]</sup>、裂缝和大尺度溶洞并存<sup>[2]</sup>、裂缝和溶洞类型的多样性<sup>[3]</sup>以及溶洞中的充填类型、充填特征的复杂性<sup>[4]</sup>导致此类凝析气藏的开发过程存在巨大困难。目前在研究该问题的过程中主要存在两个问题:一方面还没有任何测量手段可探测地层中缝

洞分布及体积大小;另一方面当地层中同时存在缝、洞及基质时采用三重介质理论得到的结果与生产测试中结果存在较大误差<sup>[5]</sup>。因此,提出一个符合缝洞型凝析气藏流动规律的数学模型,对正确评价地质储量、制定开发方案及预测未来产能都具有重要意义。

试井是油气藏评价的重要手段,自20世纪60年代以来国内外众多学者在试井分析方面开展了大量的研究,针对缝洞型多重介质也提出了许多试井模型<sup>[6-7]</sup>。将缝、洞及基质视作不同的介质,并采用二重或多重介质模型进行缝洞型凝析气藏试井分析是普遍的方法<sup>[8-9]</sup>。1963年 Warren 和 Root<sup>[10]</sup>提出了双重介质模型,后人做的三重或多重介质模型均是在此基础上进行的。

随着在新疆中石油的满深和中石化的顺北发现大规模的缝洞型凝析气藏,近年来国内学者在这方面的研究也十分活跃。姚军等<sup>[11]</sup>就曾在此基础上建立了缝洞型油藏三重介质解释模型。张福祥等<sup>[12]</sup>建立了井打在大尺度溶洞内的试井解释物理数学模型;常宝华等<sup>[13]</sup>进行了大尺度多洞缝型油藏试井分析,建立了多洞缝型碳酸盐岩凝析气藏单相流动时的数学模型;陈方方等<sup>[14]</sup>也通过研究建立了并未钻遇溶洞的缝洞型碳酸盐岩凝析气藏数值试井物理数学模型。

在当前的所有研究中,多数学者处理井筒时仅考虑井储常数  $C_D$ ,也有学者考虑了溶洞的储存常数  $C_v$ <sup>[15]</sup>。同时当井洞相连时,所有的研究都假设溶洞中的压力与井底流压相等。这些假设的本质是在井筒的处理过程中只考虑连续性方程,而没有考虑动量守恒和能量守恒方程。而新疆满深和顺北地区的井深达8 000 m,如果洞与井相连,当地面进行开井生产的时候,井口压力会发生变化,井口压力传导至溶洞中需要一定时间,在此过程中井壁的摩擦阻力和重力等因素对其传导过程产生影响,这一过程中必须考虑动量守恒方程;另外,由于凝析气的可压缩性,溶洞中的流体需要一定时间才能到达井筒,且井筒尺寸远小于溶洞的尺寸,导致流体在流动过程中的速度会有变化,所以流体从洞流入井筒的过程中必须考虑能量守恒方程。

本文基于质量守恒、动量守恒及能量守恒力学三大定律,建立了流体在井筒及溶洞中流动新模型,并与地层渗流模相结合进行试井分析研究,以此来获得更加准确的结果,方便应用于生产实际分析。

## 1 数学物理模型

在理想模型的基础上,基于力学三大守恒定律,建立了适合缝洞型凝析气藏流动规律的物理数

学模型。

### 1.1 假设

为获得缝洞型凝析气藏流动规律,本文采用以下假设:

- (1) 地层为各向同性圆形凝析气藏,圆心处有一定产量生产的凝析气井;
- (2) 假设地层外部为单一均匀介质;
- (3) 考虑凝析气有很强的压缩性,在地层流动过程中流体的速度也很小;
- (4) 假设洞为圆柱,并且与井筒同心,仅考虑竖直方向的流动。

### 1.2 基于力学三大守恒定律建立的物理数学模型

#### 1.2.1 物理模型

基于上述假设,可将建立的物理模型简化为图1所示的理想模型。

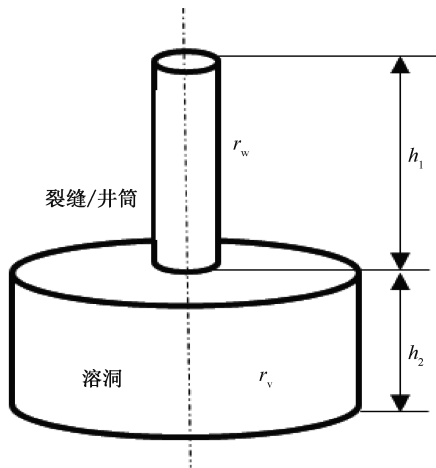


图1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic of physical model

图中与井筒及溶洞相沟通的地层为均匀介质且地层厚度分别为  $h_1$  和  $h_2$ , m; 井筒和溶洞半径分别为  $r_w$  和  $r_v$ , m; 介质的渗透率为  $k$ ,  $m^2$ ; 孔隙度均为  $\phi$ ; 压缩系数均为  $C_i$ ,  $Pa^{-1}$ 。

#### 1.2.2 数学模型

流体从溶洞流入井筒,再由井筒流出地面,这一过程的流体流动要满足连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v^2) + \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g - \frac{\rho f v^2}{2D} = 0 \quad (2)$$

$$p_v = p_{wf} + \frac{1}{2} \rho v_{wf}^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $v$  为流体流动速度,

m/s;  $x$  轴为由井筒圆心向下建立的一维坐标轴;  $p$  为压力, Pa;  $f$  为流体受到的摩擦系数;  $D$  为井筒的直径, m;  $p_{wf}$  和  $p_v$  分别为井筒和溶洞中的压力, Pa;  $v_{wf}$  为井筒和溶洞连接处流体的速度, m/s。

井筒与溶洞联通组成了一个巨大的流体储集空间, 当开井生产时, 由于压力很高, 早期的流量由储集空间的压缩性提供, 井筒及溶洞中流体存在两种类型的运动, 一种是流体的运动, 其速度为  $v$ , 它是由流量  $Q$  来决定; 另一种是流体流出后的压力泄压速度, 它是以波的形式传播, 速度为  $C$ , 以井筒中的流动流动为例, 建立相应的方程。

根据文献[16]可以推导出

$$\begin{aligned} p_{wf} &= p_v - \frac{1}{2} \rho v_{wf}^2 \\ &= p_v - \frac{1}{2} \rho \left( \frac{4r_v^2}{D^2} v_0 \right)^2 \exp\left(-\frac{2\pi r_v^2 t}{\rho C C_v}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $r_v$  为溶洞半径, m;  $v_0$  为气体初始速度, m/s;  $C$  为压力波传播的速度, m/s;  $C_v$  为溶洞存储常数,  $m^3/\text{Pa}$ ;  $t$  为时间, s。

在缝洞型凝析气藏试井模型中, 流动方程是由井筒、洞及地层三部分组成, 对于外部地层仍然采用渗流方程。其方程可表示为

$$k \nabla^2 p_1 = \mu C_1 \phi \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (5)$$

$$k \nabla^2 p_2 = \mu C_2 \phi \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (6)$$

通过定义井筒及溶洞的表皮, 可以将介质的压力  $p_1$  与井筒和溶洞中的压力  $p_{wf}$  和  $p_v$  联系起来

$$p_{wf} = \left( p - s_w r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} \quad (7)$$

$$p_v = \left( p - s_v r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_v} \quad (8)$$

由井筒、溶洞储存常数及定产量, 则井筒内边界条件可表示为

$$\begin{aligned} -BQ &= C_w \frac{\partial p_{wf}}{\partial t} + C_v \frac{\partial p_v}{\partial t} - 2\pi r_w h_1 \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r_w} \\ &\quad - 2\pi r_v h_2 \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r_v} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\mu$  为流体的黏度, Pa·s;  $C_w$  为井筒存储常数,  $m^3/\text{Pa}$ ;  $s_w$  和  $s_v$  分布为井筒和溶洞的表皮系数;  $Q$  为

产量,  $m^3/\text{s}$ ;  $B$  为流体体积系数。

采用如下的无量纲定义

$$t_D = \frac{k}{\mu \phi C_1 r_w^2} t; p_{1D} = \frac{2\pi k (h_1 + h_2) (p_1 - p_i)}{QB\mu}$$

$$p_{2D} = \frac{2\pi k (h_1 + h_2) (p_2 - p_i)}{QB\mu}$$

$$p_{wD} = \frac{2\pi k (h_1 + h_2) (p_{wf} - p_i)}{QB\mu}$$

$$p_{vD} = \frac{2\pi k (h_1 + h_2) (p_v - p_i)}{QB\mu}; r_D = \frac{r}{r_w}$$

$$C_{wD} = \frac{C_w r_w}{2\pi \phi C_1 (r_w h_1 + r_v h_2) r_w^2}$$

$$C_{vD} = \frac{C_v r_w}{2\pi \phi C_1 (r_w h_1 + r_v h_2) r_w^2}$$

$$\lambda = \frac{r_w h_1}{r_w h_1 + r_v h_2}; C_{pD} = \frac{16\pi \rho k r_w^4 (h_1 + h_2)}{D^4 QB\mu} v_0^2$$

$$C_{aD} = \frac{2\pi r_w^2 \mu \phi C_1 r_w^2}{\rho C C_v k}$$

式中,  $p_i$  是原始地层压力, Pa; 下标: D 代表无量纲化。

据此可以得到无量纲方程组

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_{1D}}{\partial t_D} \\ \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_{2D}}{\partial t_D} \\ p_{wD} = \left( p_{1D} - s_w r_D \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \right) \Big|_{r_D=1} \\ p_{vD} = \left( p_{2D} - s_v r_D \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \right) \Big|_{r_{vD}} \\ 1 = C_{wD} \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} + C_{vD} \frac{\partial p_{vD}}{\partial t_D} - \\ \left[ \lambda \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} + (1 - \lambda) r_{vD} \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \Big|_{r_{vD}} \right] \end{cases} \quad (10)$$

结合前面的无量纲定义, 同时考虑  $\rho$  是压力的函数, 并考虑重力、摩擦力及洞为非圆柱体等, 无量纲井筒压力及溶洞压力之间关系为

$$\bar{p}_{wD} = \bar{p}_{vD} - C_{pD} t_D^{\theta-1} \exp(-C_{aD} t_D) \quad (11)$$

式中: 上标“ $\bar{\cdot}$ ”代表 Laplace 变换。

对地层渗流方程、井筒及溶洞方程进行 Laplace 变换, Laplace 空间上的方程及边界条件为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{r_D} \frac{d}{dr_D} \left( r_D \frac{d\bar{p}_{1D}}{dr_D} \right) &= u\bar{p}_{1D} \\ \frac{1}{r_D} \frac{d}{dr_D} \left( r_D \frac{d\bar{p}_{2D}}{dr_D} \right) &= u\bar{p}_{2D} \\ \bar{p}_{wFD} &= \bar{p}_{1D} - s_w r_D \left. \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} \\ \bar{p}_{vD} &= \left( \bar{p}_{2D} - s_v r_D \left. \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial r_D} \right|_{r_{vD}} \right) \\ \frac{1}{u} &= uC_{wD}\bar{p}_{wFD} + uC_{vD}\bar{p}_{vD} - \\ &\quad \left[ \lambda \left. \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} + (1-\lambda)r_{vD} \left. \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial r_D} \right|_{r_{vD}} \right] \\ \bar{p}_{wFD} &= \bar{p}_{vD} - \Gamma(\theta) \frac{C_{pD}}{(C_{ad} + u)^\theta} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中:  $u$  是 Laplace 算子。

### 1.2.3 基于质量流量的拟压力定义

缝洞型凝析气藏,井筒中可能会存在气液混相,不同位置的压力、温度、密度、成分均不同,难以处理。由于混相密度受到井筒内压力与井筒内温度的影响,常规气体拟压力定义不适用,需要定义新的拟压力定义。

根据质量守恒定律,不论井筒内发生何种变化,不同井筒截面处单位时间内通过的质量应该是相同的,因此定义质量流量的概念

$$\frac{M}{t} = Q \cdot \rho \quad (13)$$

式中:  $M$  为  $t$  时刻的质量流量,  $\text{kg/s}$ 。

从质量流量的角度出发,定义考虑密度变化的拟压力

$$m(p) = \frac{\mu_i}{\rho_i} \int \frac{\rho(p)}{\mu(p)} dp \quad (14)$$

地层中,根据流量计算方程与气体状态方程如下

$$\begin{cases} BQ = \frac{kh}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \cdot 2\pi rh \\ pV = z \cdot nRT \end{cases} \quad (15)$$

可以得到密度随压力变化的关系,但井筒中的混相液体密度与压力关系需要进行数值迭代计算,这里不再详述。

### 1.2.4 数学模型求解

根据拟压力及标准压力的定义,将缝洞型凝析气藏地层流动过程转换为拟压力方程

$$\frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial z_D^2} + M_D \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial z_D} = u\bar{m}_D \quad (16)$$

$$\bar{m}_{vD} = \bar{m}_D \Big|_{z_D=h} \quad (17)$$

$$\bar{m}_{wFD} = \bar{m}_{vD} - \Gamma(\nu) \frac{C_{pD}}{(C_{ad} + u)^\nu} \quad (18)$$

$$1 = uC_{vD}\bar{m}_{vD} + \left. \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial z_D} \right|_{z_D=1} \quad (19)$$

方程(19)的通解为

$$\bar{m}_D = c_1 e^{r_1 z_D} + c_2 e^{r_2 z_D} \quad (20)$$

$$r_1 = \frac{-M_D + \sqrt{M_D^2 + 4s}}{2}, r_2 = \frac{-M_D - \sqrt{M_D^2 + 4s}}{2} \quad (21)$$

对无限大地层, Laplace 空间上的外边界条件可表示为:  $\bar{m}_D(z_D \rightarrow \infty, s) = 0, c_1 = 0$ 。所以

$$\bar{m}_D = c_2 e^{r_2 z_D} \quad (22)$$

$$\bar{m}_{vD} = c_2 e^{r_2} \quad (23)$$

$$\bar{m}_{wFD} = c_2 e^{r_2} + T \quad (24)$$

其中  $T = -\Gamma(\nu) \frac{C_{pD}}{(C_{ad} + u)^\nu}$

解得

$$c_2 = \frac{1}{C_{vD} e^{r_2} + r_2 e^{r_2}} \quad (25)$$

代入式(20)即可得到  $\bar{m}_D$  的表达式。

## 2 典型曲线特征分析

本文的重点是研究缝洞型凝析气藏井底压力的计算,为突出缝洞型凝析气藏的典型特点,同时受文章篇幅所限,计算实例认为上下两层地层参数性质完全相同,地层也只考虑无限大。

### 2.1 曲线特征分析

取参数  $C_{pD} = 0.5, C_{ad} = 0.01, \alpha = 1$  可得井底压力和及其导数与时间的双对数曲线如图 2 所示。图 2 中压力及导数双对数曲线由四个部分组成:

(1) 1 区:早期流动段。此时井口产量主要由井筒部分供给,是典型的井筒存储段,所以压力及导数双对数曲线均为斜率为 1 的直线段。

(2) 2 区:流动前中期。随着流体的采出,井筒存储逐渐向溶洞存储过渡,由于溶洞与井筒间流动通道突然变小,产生附加压降(类似于表皮效应),所以压力导数开始下降。

(3) 3 区:流动中期。此时井筒存储完全结束,

进入溶洞存储阶段,在压力导数图中出现一条斜率微1的直线段,随着流体不断流出,地层中的流体开始向溶洞补充流量,表皮效应开始显现。

(4)4区:流动后期。溶洞存储结束后,渗流作用占主导,压力及压力导数逐渐向径向流过渡,当流动到达径向流后,压力导数曲线为一条值为0.5的水平线段。

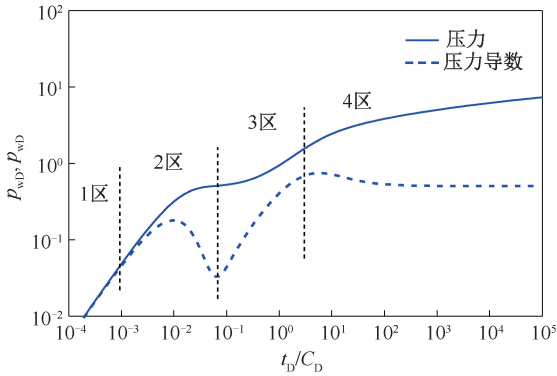


图2 井底压力与压力导数双对数曲线图

Fig.2 Log-log graph of bottom-hole pressure and pressure derivative

## 2.2 敏感性分析

为了更好的分析缝洞型典型曲线的特征,下面就各个参数对曲线的影响进行分析。

### 2.2.1 $C_{pd}$ 对曲线的影响分析

选取参数:  $C_{ad} = 0.01, \alpha = 1, C_{pd}$  分别取 0.5, 0.7, 0.9 和 1.0 时压力及导数双对数曲线图如图 3 所示。

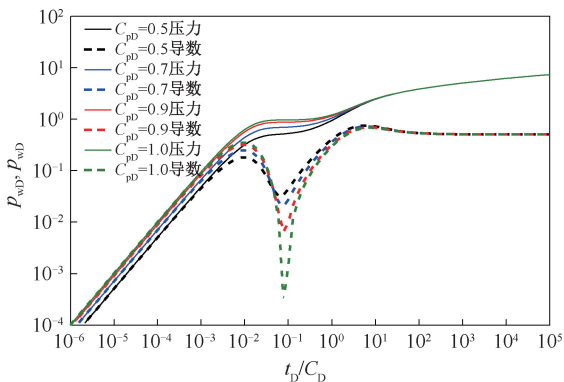


图3  $C_{pd}$  取不同值时井底压力与压力导数双对数曲线图

Fig.3 Log-log graph of bottom-hole pressure and pressure derivative when  $C_{pd}$  takes different values

从图中可以发现:

(1)  $C_{pd}$  对曲线的 1、2、3 区产生影响,对 4 区无影响。 $C_{pd}$  取不同值时,压力导数开始下降的时间一致,但压力导数下降的幅度不同, $C_{pd}$  越大,导数

曲线下降的幅度也越大。压力和压力导数在流动后期也是重合的。

(2) 对 1 区的影响体现在起始时间上,  $C_{pd}$  越大,起始时间越晚,但是影响很小。对 2 区的影响体现在压力导数开始下降时的值不同,  $C_{pd}$  越大,压力导数开始下降时的值越大。

(3) 对 3 区的影响体现在压力导数下降的最低值上,  $C_{pd}$  越大,压力导数的最低值越小。这是因为  $C_{pd}$  越大,溶洞中的流体进入井筒的过程越艰难,所以就会导致压力导数的最低值越小。但是  $C_{pd}$  对压力导数到达最低点的时间并没有影响,取不同值时压力导数到达最低点的时间比较一致。

### 2.2.2 $C_{ad}$ 系数对曲线的影响分析

取参数  $C_{pd} = 0.8, \alpha = 1, C_{ad}$  分别取 0.01, 0.05, 0.1 和 0.15 时压力及导数与时间的双对数曲线如图 4 所示。

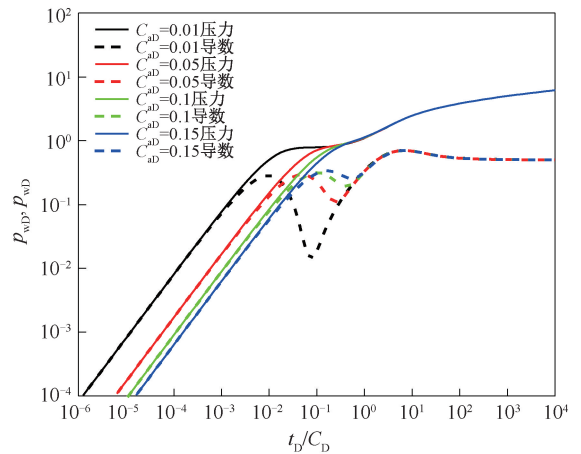


图4  $C_{ad}$  取不同值时井底压力与压力导数随时间变化曲线图

Fig.4 Log-log graph of bottom-hole pressure and pressure derivative when  $C_{ad}$  takes different values

从图中可以发现:

(1)  $C_{ad}$  对流动的 1、2、3 区均有影响,对 4 区无影响。当流动到达后期的时候,  $C_{ad}$  取不同值,压力和压力导数重合。

(2)  $C_{ad}$  对 1 区的影响体现在起始时间上,  $C_{ad}$  越大,整个流动过程起始时间越晚。

(3)  $C_{ad}$  对 2 区的影响体现在压力导数开始下降的时间上。  $M_D$  越大,压力导数开始下降的时间越晚。

(4)  $C_{ad}$  对 3 区的影响不仅仅体现在到达最低值的时间上,也体现在最低值的大小上。  $C_{ad}$  越大,

越晚到达最低值,最低值也越大。这是由于  $C_{ad}$  对压力导数开始下降的时间会有影响,所以其到达最低值的时间也就会受到影响。同时我们发现,不同  $C_{ad}$  值的曲线进入流动后期的时间是一致的,由于  $C_{ad}$  越大越晚进入2区,所以在2区的时间也就越短,所以压力的最低值也就会越大。

### 3 实例应用

为验证本文方法的正确性,对塔里木盆地某凝析气井进行了分析。该井位于塔里木盆地塔中一号构造带东北方向、北东分布的一条主干断裂带上,该条带由南到北气油比逐渐下降,呈现出南气北油特征,是典型的断控成藏。该井在目的层垂直断裂方向横穿断裂,149.2 mm 钻头钻至垂深 7 882.55 m 完钻,斜深 8 261.69 m,裸眼完井。在 8 250.03 m 钻遇放空 2.66 m,并伴随泥浆失返,钻完井期间累计漏失各类工作液 3 467 m<sup>3</sup>。

采用 114.3 mm 和 88.9 mm 油管组合完井,注入 710 m<sup>3</sup> 酸解除近井污染,因为漏失泥浆导致的近井堵塞,投产初期 12 mm 油嘴油压 47 MPa,折算日产气 44.2 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>、日产油 889 m<sup>3</sup>,气油比 497 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。投产 253 h 后井口关井测压力恢复。压恢数据出现了典型“驼峰”效应,关井前 7 mm 油嘴生产压差仅 0.053 MPa。

放大关井初期的数据,第一次发现了压力在洞穴型储层中“波动”传播的特征(见图 5)。利用本文的方法对其进行解释(见图 6),解释结果为:储层地层系数高达 72 700 mD·m,洞穴空间体积 75.66 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,裂缝空间体积 551 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,计算凝析气动态储量 21.5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。投产接近一年半后利用物质平衡法计算动态储量 22.3 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

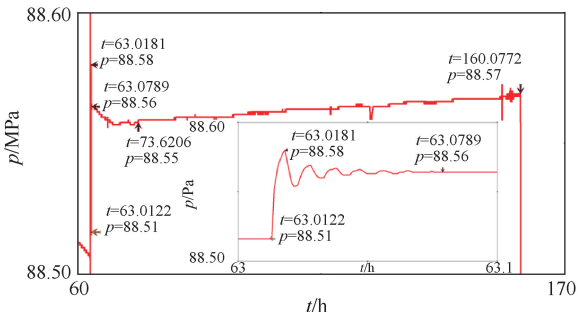
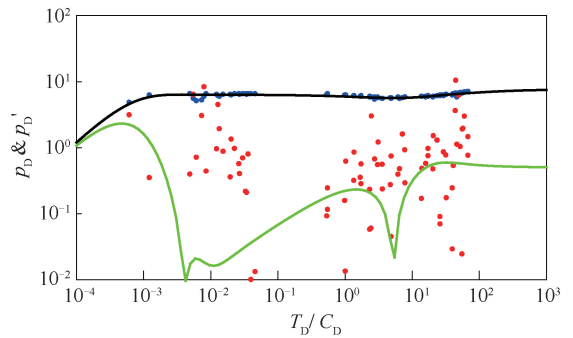
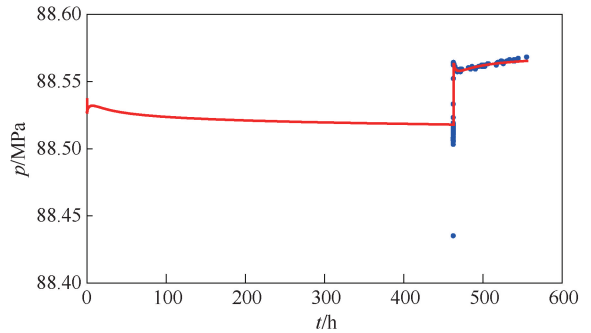


图5 新疆某井实测压力出现波动特征

Fig. 5 Fluctuation characteristics of measured pressure in a well in Xinjiang



a. 双对数曲线拟合图



b. 压力历史拟合图

图6 井底压力和压力导数拟合图

Fig. 6 Typing curve of bottom-hole pressure and pressure derivative of example well

### 4 结论

(1) 利用力学三大定律,建立了井底压力与溶洞压力之间的关系,结合地层渗流方程形成了缝洞型试井的数学模型,通过定义无量纲参数, Laplace 变换及数值反变换技术,得到试井分析所需的图版,分析了各参数对典型曲线的影响。

(2) 井筒与溶洞相连的典型曲线由四部分组成,早期为井筒存储段,第二阶段为井筒存储向溶洞存储过渡段,第三阶段为溶洞存储段,第四阶段地层渗流段,对于均质无限大地层,压力导数趋近于 0.5 水平线段。

(3) 本文为缝洞型凝析气藏试井提供了一个新的建模方法,在原试井参数基础上增加了  $C_{pD}$ 、 $C_{ad}$  两个参数,其中  $C_{pD}$  是与初始速度、溶洞体积及密度相关的参数; $C_{ad}$  是与溶洞体积及波速相关的参数。

(4) 井筒与溶洞相连只是缝洞型凝析气藏中的一种情况,如果溶洞不与井筒相连可用同样的方法处理溶洞中的流动,在实际试井解释过程中,尚需进一步研究。

致谢:感谢中石化西北油田分公司石油工程技术研究院同意本文公开发表。

## 参考文献

- [1] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101-106.  
LI Yang, FAN Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of fracture-cavity system of ordovician carbonate reservoirs in the Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [2] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 1-7.  
LI Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1): 1-7.
- [3] 潘建国, 卫平生, 蔡忠贤, 等. 塔中地区中-下奥陶统碳酸盐岩孔洞-裂缝储集系统划分及其特征[J]. 地球科学, 2012, 37(4): 751-762.  
PAN Jianguo, WEI Pingsheng, CAI Zhongxian, et al. Reservoir architectural system in the middle-lower ordovician carbonate rock of Tazhong areas in Tarim[J]. Earth Science, 2012, 37(4): 751-762.
- [4] 胡向阳, 权莲顺, 齐得山, 等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏溶洞充填特征[J]. 特种油气藏, 2014, 21(1): 18-21.  
HU Xiangyang, QUAN Lianshun, QI Deshan, et al. Features of cavern filling in fracture/vuggy carbonate oil reservoirs, Tahe oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 18-21.
- [5] 万义钊, 刘曰武. 缝洞型油藏三维离散缝洞数值试井模型[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1000-1008.  
WAN Yizhao, LIU Yuewu. Three dimensional discrete-fracture-cavity numerical well test model for fractured-cavity reservoir[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 1000-1008.
- [6] DEGHANI K, HARRIS P M, EDWARDS K A, et al. Modeling a vuggy carbonate reservoir, McElroy field, West Texas[J]. AAPG bulletin, 1999, 83(1): 19-42.
- [7] WU Y S, EHLIG-ECONOMIDES C, QIN G, et al. A triple-continuum pressure-transient model for a naturally fractured vuggy reservoir[J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [8] ABDASSAH D, ERSHAGHI I. Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs[J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2): 113-127.
- [9] 邢承林, 严娟. 三重介质油藏模型及其 Laplace 空间解[J]. 数学理论与应用, 2009(2): 14-18.  
XING Chenglin, YAN Juan. Triple medium reservoir model and laplace space solution[J]. Mathematical Theory and Applications, 2009(2): 14-18.
- [10] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(03): 245-255.
- [11] 姚军, 戴卫华, 王子胜. 变井筒储存的三重介质油藏试井解释方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(1): 46-51.  
YAO Jun, DAI Weihua, WANG Zisheng. Well test interpretation method for triple medium reservoir with variable wellbore storage[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2004, 28(1): 46-51.
- [12] 张福祥, 陈方方, 彭建新, 等. 井打在大尺度溶洞内的缝洞型油藏试井模型[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 912-915.  
ZHANG Fuxiang, CHEN Fangfang, PENG Jianxin, et al. A well test model for wells drilled in big-size cavity of naturally fractured vuggy carbonate reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 912-915.
- [13] 常宝华, 刘华勋, 熊伟, 等. 大尺度多洞缝型油藏试井分析方法[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(4): 14-16.  
CHANG Baohua, LIU Huaxun, XIONG Wei, et al. Well test analysis of large-scale multi-fractured-vuggy reservoir[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(4): 14-16.
- [14] 陈方方, 张福祥, 邓兴梁, 等. 井打在溶洞外的缝洞型油藏数值试井模型[J]. 科技导报, 2015, 33(9): 46-49.  
CHEN Fangfang, ZHANG Fuxiang, DENG Xingliang, et al. A numerical well test model for wells drilled out of big-size cavity of fractured carbonate reservoirs[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(9): 46-49.
- [15] 蔡明金, 张福祥, 杨向同, 等. 碳酸盐岩洞穴型储层试井解释新模型[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 98-101.  
CAI Mingjin, ZHANG Fuxiang, YANG Xiangtong, et al. A new model for well test interpretation of carbonate cave reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 98-101.
- [16] 徐燕东. 考虑重力因素的断溶体储层“井-洞-缝”模型试井解释方法[J]. 计算物理, 2020, 37(2): 189-197.  
XU Yandong. An interpretation method with “well-cave-crack” model of dissolves reservoir considering gravity factors[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2020, 37(2): 189-197.

编辑 穆立婷

第一作者简介:徐燕东,男,1975年出生,高级工程师,硕士,2005年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业,现主要从事试油测试资料解释工作。电话:0991-3160090,18999831713,Email:tonnyxu2001@126.com。通信地址:新疆乌鲁木齐市长春南路中国石化西北油气生产科研园区石油工程技术研究院,邮政编码:830011。