

低压致密气藏气井产能潜力的识别技术研究^{*}

付永强¹ 李鹭光¹ 何顺利²

(1. 中国石油西南油气田公司 2. 中国石油大学·北京)

付永强等. 低压致密气藏气井产能潜力的识别技术研究. 天然气工业, 2007, 27(1): 93-95.

摘要 四川盆地川南、川中过渡带荷包场—界石场地区的须家河组砂岩储层是一套典型的低压致密储集层。由于储层具有低压、低渗、高束缚水饱和度的特点,其渗流机理不同于常规储层。气井在低渗、低压力系数的储层开发过程中表现为低自然产能,有些井受到钻井污染,基本没有产量。通常水力加砂压裂是经济高效开发此类气藏的必要手段,但由于常规低渗透储层试井方法及油气测试手段对低产甚至无产量气井的测试、评价受到限制,使得压裂前储层物性和气井产能无法确定,无法对气井压裂效果做出客观正确地评价。为此,基于脉冲试井不稳定渗流原理,开展了低压致密气藏气井微型注入测试技术研究,提出了确定低压致密气藏储层物性和气井产能识别的新方法。应用该方法可以准确评估低渗透致密气藏储层渗流物性,确定气井生产潜力,并为低丰度、低压渗透致密气藏储层效益开发提供了理论依据。

关键词 低压 低渗透油气藏 储集层 试井 生产能力 四川盆地

一、引言

位于四川盆地川南、川中过渡带的荷包场—界石场的须家河组砂岩储集层属于低渗、高束缚水饱和度的致密岩性储层。该区块的勘探开发实践证明,对此类储层开发投入大、风险高,储层改造效果差。为了提高对低压致密储层物性及气井产能的识别,笔者基于脉冲试井不稳定渗流理论,提出了对此类储层物性和气井产能识别的新方法,并结合数值模拟对该方法的实用性和可行性进行了验证。

二、产能潜力识别的理论依据

1. 脉冲试井基本原理^[1]

脉冲试井是通过短时间的注入或产出,关井监测压力波对地层的干扰,获得地层物性参数。在定排量的生产下,地层压力的扩散方程可以由式(1)确定:

$$\Delta p(r, \Delta t) = \frac{V_o \mu}{4\pi K h \Delta t} e^{-\frac{q C_1 r^2}{4 K \Delta t}} \quad (1)$$

当注入或生产时间远低于关井的时间,式(1)可以近似为:

$$\Delta p(r, \Delta t) = \frac{V_o \mu}{4\pi K h} \frac{1}{\Delta t} \quad (2)$$

对于低渗透储层而言,较低的注入排量也会导致地层破裂。此时注入流体在裂缝闭合之前会沿裂缝面滤失。裂缝面上每一点滤失行为可以视为点源,则井筒压力可以表示为:

$$\Delta p = \frac{\mu}{4\pi K h} \int_{x_1}^{-x_1} \int_0^{\tau_0(x')} \frac{q(x', t')}{t-t'} e^{-\frac{q C_1 r^2}{4 K \Delta t}} dt' dx' \quad (3)$$

如果关井时间较长, $t-t'$ 的积分接近 Δt , 式(3)可以表示为:

$$\Delta p = \frac{\mu}{4\pi K h \Delta t} \int_{x_1}^{-x_1} \int_0^{\tau_0(x')} q(x', t') e^{-\frac{q C_1 r^2}{4 K \Delta t}} dt' dx' \quad (4)$$

等式右面的积分等于注入流体的滤失量总量,即在裂缝闭合后为注入流体的总量。所以,在地层破裂关井后期井底的压力水平仍可以用式(2)表示。

2. 低渗透致密储层物性识别

由式(2)可以得出,储层在径向流期间,压差和压力导数与 $1/\Delta t$ 的双对数图表现为斜率为1的直线。而径向流数据可以用于估算储层流动系数 (Kh/μ) 及地层的压力 (p_i) 。对于低渗透致密储层,即使少量液体注入也会在地下产生裂缝,导致关井后压力出现拟线性流、拟径向流的特征响应。因此,

^{*} 本文系中国石油西南油气田公司重点科技项目(20050305-16)的研究成果。

作者简介: 付永强, 1975年生, 在站博士后; 研究方向为油气田增产技术。地址: (618300) 四川省广汉市中山大道南二段采气工程研究院。电话: (0838) 5151340。E-mail: fuyq@petrochina.com.cn

对于低渗致密储层物性的识别,准确划分拟线性流、拟径向流至关重要。

(1) 拟线性流特征识别

根据 Carslaw and Jaegar 的推导^[2,3],注入流体垂直于裂缝面拟线性流的解析解为:

$$p(t) - p_i = m_L F_L(t, t_c) \quad (5)$$

其中线性流动函数为:

$$F_L(t, t_c) = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{t_c}{t}} \right) \quad (t > t_c) \quad (6)$$

(2) 拟径向流特征识别

注入流体拟径向流受到裂缝闭合、流体滤失、地层压力以及储层流动系数(Kh/μ)的影响,其压力响应为:

$$p(t) - p_i = m_{RF} F_R(t, t_c) \quad (7)$$

其中线性流动函数为:

$$F_R(t, t_c) = \frac{1}{4} \log \left(1 + \frac{xt_c}{t - t_c} \right) \quad \left(x = \frac{16}{\pi^2} \right) \quad (8)$$

储层的流动物性(Kh/μ)与径向流斜率(m_{RF})的关系可表示为:

$$\frac{Kh}{\mu} = \frac{\pi}{16} \frac{V_i}{m_{RF} t_c} \quad (9)$$

当时 $t - t_c > 3t_c$, 拟线性与拟径向流存在以下的近似关系:

$$p(t) - p_i = m_{RF} [F_L(t, t_c)]^2 \quad (10)$$

当储层的压力(p_i)和地层流动系数(Kh/μ)已知时,气井的产能可以通过拟稳定产能公式^[4]计算:

$$Q = \frac{2.714 \times 10^{-5} Kh T_{sc} [p_i^2 - p(t)^2]}{p_{sc} \mu Z T [\ln(r_c / r_w) - 0.75 + S]} \quad (11)$$

三、实例计算

采用 ECLIPSE 三维的黑油模型对本方法的实用性和可行性进行验证。模型基于 $110 \times 110 \text{ m}$ 的网格中心 1 口井。注入量取 $0.35 \text{ m}^3/\text{min}$, 注入 5 min, 关井测井底压力。由于注入量小,在注入过程压力未波及到模型的边界,边界视为等压。先期模拟显示,低渗透致密地层即使在很小的注入量下也会产生裂缝,因此模型在近井附近及裂缝面进行了非结构化网格加密(见图 1),从而考虑了注入过程中产生的裂缝以及停泵后裂缝的闭合。储层其他物性如下:埋藏深度为 2000 m,压力系数为 0.95,孔隙度

为 10%, 储层压力为 19.36 MPa, 渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压缩性为 $8.43 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$, 有效厚度为 10 m, 流体黏度为 $0.02 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

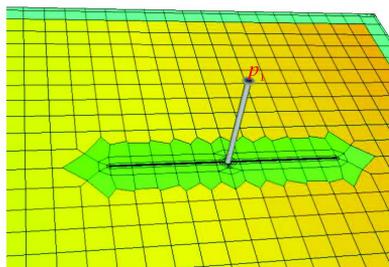


图 1 裂缝面非结构化网格加密图

采用本方法对数值模拟的单井关井压力分析,计算结果显示裂缝闭合以后,注入流体在地下产生的线性流和径向流特征(图 2)。由于注入量小,地层产生裂缝短,线性流特征不明显,但径向流特征显著。通过 $(p - p_i)/F_R(t)$ 及其压力导数与 $1/F_R(t)$ 的双对数关系(图 3)分析,径向流区域数据得到较好验证。通过计算径向流数据的斜率(m_{RF})为 110.6, 确定地层流动系数(Kh/μ)为 $53.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$, Honer 曲线外推获得的地层压力为 19.13 MPa。利用式(11)计算出气井无阻流量为 $0.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

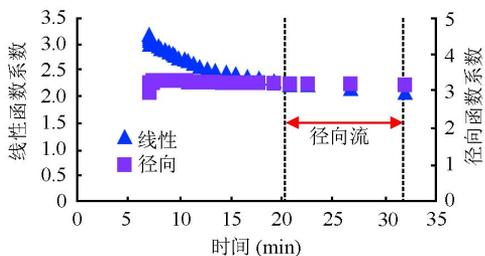


图 2 流动区域特征识别图

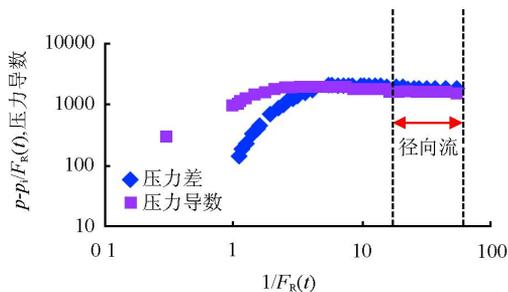


图 3 径向流动数据的核实图

采用三维网格模型设计参数与本方法预测参数对比见表 2。本方法计算的地层参数与气井的产能基本模型设计参数一致。

表2 参数对比表

参数类型	三维网格模型模拟	本方法预测	误差
地层流动系数 ($\frac{10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}}{\text{mPa} \cdot \text{s}}$)	50	53.0	6.0%
地层压力 (MPa)	19.36	19.13	1.2%
单井无阻流量 ($10^4 \text{m}^3/\text{d}$)	0.85	0.9	5.8%

四、结 论

低渗透致密气藏产能的预测一直是气藏开发中所关心的问题。气藏压力系数较低时,储层受到轻度伤害就会表现出低产或无产。此类储层的开发潜力仅靠测井、岩心分析等静态资料基础上的气井产能潜力分析,可靠性差。本方法基于脉冲试井原理,通过地层微型注入,施工过程中记录排量与压力的响应及停泵压降数据,就可以确定地层压力,流动物性及气井产能。与普通试井方法对比,该方法无需考虑井筒储集、低渗透的启动压力,用时短、成本低,更适用于低产或无产的低压致密储层物性及气井产能潜力的分析。

符 号 说 明

Q 为气井产量, $10^4 \text{m}^3/\text{d}$; T 、 T_{sc} 分别为气层温度、地面温度, K ; p_i 、 $p(t)$ 、 p_{sc} 分别为地层压力、井底压力、地面压力, MPa; K 为地层渗透率, μm^2 ; h 为储层有效厚度, m; Z 为气体偏差系数; μ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; r_e 、 r_w 分别为外边界半径、井筒半径, m; S 为表皮系数; t 、 t_c 分别为生产时间、裂缝闭合时间, h; V_0 为注入流体的总量, m^3 。

参 考 文 献

- [1] ECONOMIDES M J.油藏增产措施[M].3版.北京:石油工业出版社,2002.
- [2] NOLTE K G, MANIERE J, OWENS K A. After closure analysis of fracture calibration tests [C]. Paper SPE 38676 presented at the 1997 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, Oct. 1997: 5-8.
- [3] NOLTE K G. Background for after closure analysis of calibration tests [J]. Unsolicited SPE. paper 39407, July 1997.
- [4] 陈元千.油气藏工程计算方法[M].北京:石油工业出版社,1991.

(收稿日期 2006-09-08 编辑 韩晓渝)