

苏里格气田椭圆状孤立砂体产能方程的建立^{*}

李乐忠¹ 李相方¹ 何东博² 石军太¹ 李根¹

1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 2. 中国石油勘探开发研究院

李乐忠等. 苏里格气田椭圆状孤立砂体产能方程的建立. 天然气工业, 2009, 29(4): 71-73.

摘要 目前二项式产能方程的建立是基于一种圆形水平、等厚和均质的气层, 气体径向流入井底的模型。而苏里格气田有效砂体则以孤立状分布为主, 砂体规模较小, 形态呈椭圆或长椭圆状, 当压力传播至砂体宽度边界之后, 将不再满足纯径向流的渗流规律, 目前推导的产能方程存在较大误差。根据该气田实际的砂体特征, 将整个渗流过程分为两段, 即在投产初期比较短的时间内, 当压力未传播至砂体宽度边界之前, 表现为近井区径向流; 当压力传播到砂体宽度边界之后则表现为远井区单向流。由此建立了新的渗流物理模型, 并推导出了远井区单向流的产能方程, 然后根据物质守恒原理与近井区径向流的产能方程合并, 得出了苏里格气田孤立砂体新的产能方程。现场应用表明该方程具有较高的计算精度。

关键词 苏里格气田 砂岩体 生产能力 渗流 数学模型

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.04.021

0 引言

目前二项式产能方程的建立是基于圆形水平、等厚和均质的气层, 气体径向流入井底^[1-3]。而苏里格气田砂体主要以孤立状分布, 且砂体的形态呈椭圆或长椭圆状, 根据理想的径向流模型推导的产能方程误差较大。笔者根据苏里格气田实际的砂体特征, 将整个渗流过程分为两段, 即远井区单向流与近井区径向流, 以此推导出了比较适用的产能方程, 对于苏里格气田产能评价具有一定的指导意义。

1 砂体形态特征及渗流模式

1.1 砂体形态特征

从图1平行物源方向可以看出, 有效砂体以孤立状为主, 叠置连通有效砂体只占20%~25%。

综合露头 and 沉积模拟实验成果及动态资料的反映两方面分析结果, 有效砂体延伸范围主要在800~1200 m, 少数可超过1200 m, 长宽比在2~3, 呈椭圆或长椭圆状。

1.2 渗流模式

由于苏里格气田椭圆状砂体规模较小, 当压力

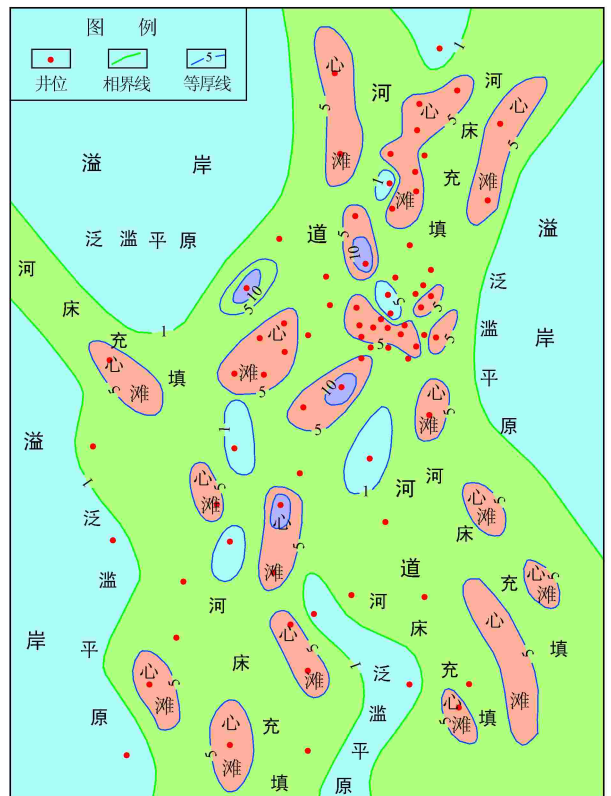


图1 平行物源方向沉积相图

^{*} 本文受到国家重点基础研究发展计划(973计划)(编号:2007CB209506)的资助。

作者简介: 李乐忠, 1982年生, 博士研究生, 主要从事油气田开发方面研究工作。地址: (102249)北京市昌平区府学路18号。电话: 13488758175。E-mail: lilezhongjiaail@yahoo.com.cn

传播至砂体宽度边界之后,将不再满足纯径向流的渗流规律。如图2所示,椭圆状砂体中的渗流过程可以分为两段:

1)在投产初期较短的时间内,当压力未传播至砂体宽度边界之前,表现为近井区径向流。

2)当压力传播到砂体宽度边界之后则表现为远井区单向流。

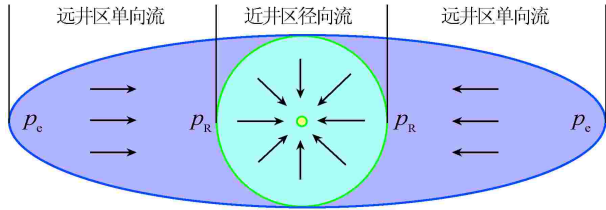


图2 椭圆状砂体渗流模式示意图

2 产能方程的建立

2.1 远井区单向渗流模型

简化了的带状水平均质等厚地层模型如图3所示^[4-6]。地层的一端是供给边缘,压力为 p_c ;另一端为近井区的排液坑道,设定压力为 p_R ,已知地层几何尺寸,长为 L_e ,宽为 B ,地层厚度为 h ,故渗流断面 $A = Bh$,流体黏度为 μ ,渗透率为 K 。

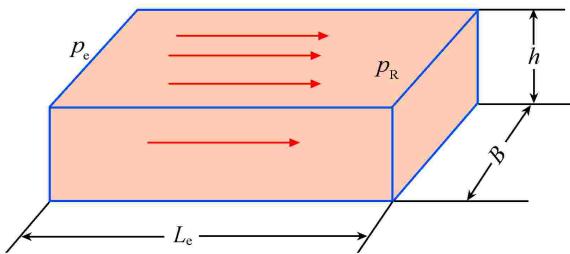


图3 平面单向渗流模型图

2.2 远井区单向流产能方程

考虑气井非达西流动的二次方程^[1-3]为:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{\mu}{K} v + \beta \rho v^2 \quad (1)$$

将渗流速度转换为地面标准状况下为:

$$\begin{cases} v = \frac{q'}{2\pi rh} = \frac{q_{sc}'}{Bh} \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{ZT}{p} \\ \rho = \frac{p M r_g}{ZRT} \end{cases} \quad (2)$$

二次方程(1)可变为:

$$-\frac{dp}{dl} = \frac{\mu}{K} \frac{q_{sc}'}{Bh} \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{ZT}{p} + \beta \frac{p r_g M}{ZRT} \left(\frac{q_{sc}'}{Bh} \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{ZT}{p} \right)^2 = \left(\frac{p_{sc} q_{sc}'}{Z_{sc} T_{sc}} \right) \frac{\mu ZT}{BK h} \frac{1}{p} + \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{q_{sc}'}{Bh Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 \frac{1}{p} \quad (3)$$

将式(3)两边进行积分变换:

$$\int_{p_R}^{p_e} p dp = \left(\frac{p_{sc} q_{sc}'}{Z_{sc} T_{sc}} \right) \frac{\mu ZT}{BK h} \int_0^{L_e} dl + \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{q_{sc}'}{Bh Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 \int_0^{L_e} dl \quad (4)$$

对式(4)两边积分得:

$$p_e^2 - p_R^2 = \left(\frac{p_{sc} q_{sc}'}{Z_{sc} T_{sc}} \right) \frac{\mu ZT}{BK h} L_e + \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{q_{sc}'}{Bh Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 L_e \quad (5)$$

$$\text{令} \begin{cases} A' = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{\mu ZT}{BK h} L_e \\ B' = \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{p_{sc}}{Bh Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 L_e \end{cases} \quad (6)$$

则式(5)可变为:

$$p_e^2 - p_R^2 = A q_{sc}' + B q_{sc}'^2 \quad (7)$$

2.3 椭圆状砂体产能方程

假设近井区为圆形水平、等厚均质的储层,气体径向流入井底,根据文献[1]、[2]所述,近井区径向流产能方程可以表示为:

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \left(\frac{p_{sc} q_{sc}'}{Z_{sc} T_{sc}} \right) \frac{\mu ZT}{2\pi K h} \ln \left(\frac{B}{2r_w} \right) + \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{q_{sc}'}{2\pi h Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 \frac{1}{r_w} \quad (8)$$

根据物质守恒原理,可以得出远井区单向流与近井区径向流之间的流量关系为:

$$q_{sc} = 2q_{sc}' \quad (9)$$

因此,将式(7)与式(8)进行联立得椭圆状孤立砂体的产能方程为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A' q_{sc} + B' q_{sc}^2 \quad (10)$$

其中: $A = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{\mu ZT}{K h} \left[\frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{B}{2r_w} \right) + \frac{L_e}{B} \right]$

$$B = \frac{M r_g \beta ZT}{R} \left(\frac{p_{sc}}{h Z_{sc} T_{sc}} \right)^2 \left(\frac{1}{4\pi^2 r_w} + \frac{L_e}{B^2} \right)$$

3 应用实例

已知某一气井修正等时试井的数据如下:开井前实测静压力为 27.51 MPa,对该井进行了 7×10^4 m^3/d 、 12×10^4 m^3/d 、 20×10^4 m^3/d 、 30×10^4 m^3/d 等4个测试流量的修正等时试井,其试井数据见表1。

表1 修正等时试井数据表

工作制度	p_{ws} (MPa)	p_{wf} (MPa)	q_g ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)
1	27.51	26.43	7
2	27.09	25.26	12
3	26.53	22.89	20
4	25.70	18.61	30
延续流量	27.51	15.64	15

该井的数据如下： $h=9.14 \text{ m}$ ， $T=395.6 \text{ K}$ ， $K=0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ， $\mu=0.027 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ， $Z=0.89$ ，砂体长度 $L=824.72 \text{ m}$ ，砂体宽度 $B=335.28 \text{ m}$ ， $r_w=0.1015 \text{ m}$ 。

分别将以上参数带入新方程与原方程，计算结果如下。

原产能方程为：

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = 28.035 q_{sc} + 0.0206 q_{sc}^2$$

新产能方程为：

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = 30.503 q_{sc} + 0.1126 q_{sc}^2$$

根据修正等时试井数据得出的产能方程为：

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = 31.503 q_{sc} + 0.1062 q_{sc}^2$$

将两种产能方程绘制 $q-\Delta p^2/q$ 产能曲线，与根据修正等时试井测试数据所得到的产能曲线进行对比分析(见图4)。

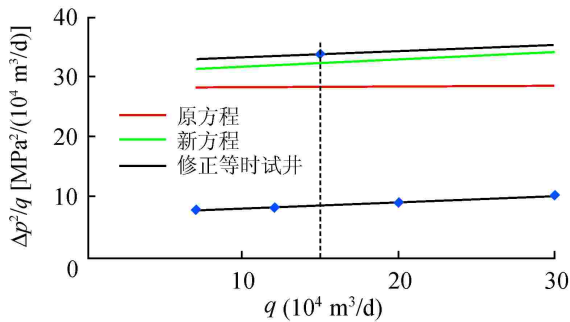


图4 新方程与原方程的产能曲线对比图

根据修正等时试井所计算的无阻流量(q_{AOF})为 $22.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表2为两种产能方程计算的无阻流量与修正等时试井计算结果的对比,通过对比可以看出,新产能

方程与根据修正等时试井所得到的结果更为接近。因此,新的产能方程更适合苏里格孤立砂体的产能评价。

表2 两种产能方程无阻流量误差对比表

产能方程	无阻流量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	误差 (%)
新方程	23.59	6.87
原方程	26.69	20.93

4 结论

1)苏里格气田孤立砂体形态呈椭圆或长椭圆状,且砂体规模较小,当压力传播到宽度边界以后不再满足纯径向渗流的模式,采用无限大纯径向流的理论模型推导产能方程不再适用。

2)通过引入单向渗流,将苏里格气田椭圆状孤立砂体中的渗流过程分为远井区单向流与近井区径向流两个过程,从气体稳定渗流微分方程出发,推导出了苏里格气田椭圆状孤立砂体的产能方程,实际应用表明,新产能方程比原方程更接近于修正等时试井所得结果。

参考文献

- [1] 李士伦,孙雷,刘建仪,等.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000:125-128.
- [2] JELMERT T A, SELSENG H. Permeability function describes core permeability in stress-sensitive rocks[J]. Oil & Gas Journal, 1998, 60(12):23-25.
- [3] 陈元千.确定气井绝对无阻流量的简单方法[J].天然气工业,1987,7(1):18-19.
- [4] 葛家理,宁正福.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001.
- [5] FUSSELL D D. Single well performance for gas condensate reservoir[J]. JPT, 1973:860-876.
- [6] 延吉生,葛家理.现代油藏渗流力学的新发展[J].西南石油学院学报,2003,25(1):29-32.

(修改回稿日期 2009-02-09 编辑 韩晓渝)