

多层合采气藏井底压力响应模型通解

李成勇¹ 蒋裕强² 伍勇³ 龚伟⁴ 刘永良⁵

1.成都理工大学“地质资源与地质工程”博士后工作站 2.西南石油大学 3.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院
4.中国石油西南油气田公司重庆气矿 5.中国石油西南油气田公司川东北气矿

李成勇等.多层合采气藏井底压力响应模型通解.天然气工业,2010,30(9):39-41.

摘 要 为了提高单井产能和降低生产成本,许多生产井都是按多层合采方式进行生产的。多层气藏的开采规律有别于常规气藏,研究其井底压力变化规律对开发此类气藏具有重要的意义。为此,在分析研究多层气藏渗流机理的基础上,建立了以单井为研究对象的多层气藏渗流数学模型;然后通过拉氏变换对该数学模型进行求解,获得多层合采气井拉氏空间井底压力动态响应数学模型;通过 Stepest 数值反演技术获得真实空间下的井底压力响应解,通过编制计算机程序,获得了井底压力动态响应曲线,从而分析了响应特征及其影响因素,进而研究了分层流量剖面的变化规律。该研究成果对合理、高效开发多层气藏具有指导意义。

关键词 多层合采 气藏 压力 渗流 流量剖面 试井 数学模型

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.09.010

我国所发现的大部分气田都属于陆相沉积的非均质多层气藏,气层的物性变化大,分布很不均匀。如果对各个单油层用一套独立的井网开发,则难以保证其工业性开采价值。因此把一些性质相近、特征相似的小气层组合在一起,以合采的方式进行开发。在气藏开发过程中,多层气藏会表现出一些与单层气藏不同的特性^[1],因而需要研究多层气藏井底压力变化规律,这对合理、高效开发此类气藏具有重要的意义。

1 多层合采气藏渗流微分方程

多层合采气藏渗流物理模型如图 1 所示。若考虑地层中的流体为单相,忽略地层中孔隙度、渗透率和其他物性的变化,则利用运动方程、状态方程和物质平衡方程就可以建立复杂外边界气藏渗流微分方程^[2-3]:

$$k_j \nabla^2 p^{jD} = w_j \frac{\partial p^{jD}}{\partial t_D} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\text{无限大边界为: } p^{jD}(\infty, t_D) = 0 \quad (2)$$

$$\text{内边界条件为: } p^{wD} = p^{jD} - S_j \left. \frac{\partial p^{jD}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} \quad (3)$$

$$C_D \frac{d p^{wD}}{d t_D} - \sum_{j=1}^n k_j \frac{\partial p^{jD}}{\partial r_D} = 1 \quad (4)$$

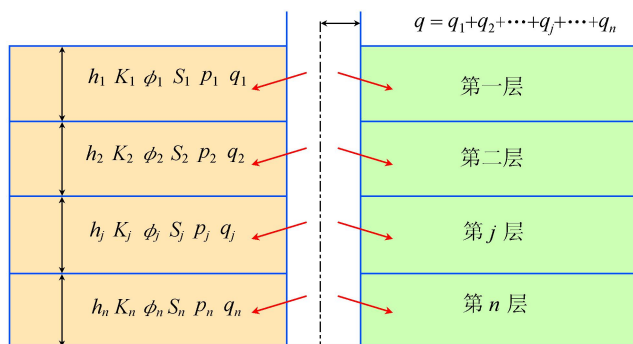


图 1 N 层合采气藏渗流物理模型图

其中

$$p^{jD} = \frac{(Kh)_r (\phi_j - \phi_{kfj})}{0.01273 (q_{sc} T)_r}$$

$$t_D = \frac{3.6 (Kh)_r t}{(\varphi C_i h)_r r_w^2}$$

$$C_D = \frac{0.159 C}{\sum_{j=1}^n (\varphi C_i h)_j r_w^2}$$

$$r_D = r / r_w$$

$$R_{jD} = R_j / r_w$$

$$w_j = \varphi \mu C_{ij} h_j / (\varphi C_i h)_r$$

基金项目:教育部博士学科点新教师类基金(编号:20095122120012)资助。

作者简介:李成勇,1981年生,讲师,博士,出站博士后;主要从事特殊油气藏渗流、复杂油气田开发及油气藏数值模拟方面的教学和科研工作。地址:(610059)四川省成都市成华区二仙桥东三路1号。电话:13541352541。E-mail:lichengyong1981@126.com

$$k_j = K_j h_j / (Kh)$$

式中 S_j 为 j 层表皮系数; R 为边界半径, m ; r_w 为半径, m ; C 为井储常数, m^3/MPa ; h 地层厚度, m ; K_j 为渗透率, mD ; T 为地层温度, K ; φ 为孔隙度, 小数; q_{sc} 为气井产量, $10^4 m^3/d$; t 为时间, h ; μ 为气体黏度, $mPa \cdot s$; C_i 为综合压缩系数, $1/MPa$; ψ 为拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$ 。

2 多层合采气藏渗流数学模型求解

在拉普拉斯空间中进行转换后,其渗流方程为:

$$k_j \nabla^2 \overline{p_{jD}} = w_j s \overline{p_{jD}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{内边界条件: } \overline{p_{jD}} = \overline{p_{jD}} - S_j \frac{\partial \overline{p_{jD}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} \quad (6)$$

$$\frac{1}{s} = C_D s \overline{p_{wD}} - \sum_{j=1}^n k_j \frac{\partial \overline{p_{jD}}}{\partial r_D} \quad (7)$$

$$\text{外边界条件: } \lim_{r_D \rightarrow \infty} \overline{p_{jD}}(r_D, s) = 0 \quad (8)$$

结合改进的 Bessel 函数得式(5)通解为^[4]:

$$\overline{p_{jD}} = A_j K_0(\sigma_j r_D) + B_j I_0(\sigma_j r_D) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中 K_0 、 I_0 分别为虚综量零阶贝塞尔函数; s 为拉氏变量; A_j 、 B_j 分别为方程待定系数。

由外边界条件可得,系数 B_j 等于 0。因此 j 层的压力变为:

$$\overline{p_{jD}} = A_j K_0(\sigma_j r_D) \quad (10)$$

将式(10)代入式(5)中为:

$$k_j \sigma_j^2 K_0(\sigma_j r_D) = w_j K_0(\sigma_j r_D) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

第 j 层的井筒压力变为^[5]:

$$\overline{p_{wD}} = \overline{p_{jD}} - S_j \frac{\partial \overline{p_{jD}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = A_j [K_0(\sigma_j) + S_j \sigma_j K_1(\sigma_j)] \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

可以通过式(12)确定 A_j 。即

$$A_j = \frac{\overline{p_{wD}}}{K_0(\sigma_j) + S_j \sigma_j K_1(\sigma_j)} \quad (13)$$

将式(13)代入式(7)得:

$$\frac{1}{s} = C_D s \overline{p_{wD}} + \sum_{j=1}^n A_j k_j \sigma_j K_1(\sigma_j) = C_D s \overline{p_{wD}} + \sum_{j=1}^n \frac{k_j \sigma_j K_1(\sigma_j) \overline{p_{wD}}}{K_0(\sigma_j) + S_j \sigma_j K_1(\sigma_j)} \quad (14)$$

由以上公式可得在无穷大的 N 层系统中的井底压力表示为^[6-7]:

$$\overline{p_{wD}} = \frac{1}{s \left[C_D s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j \sigma_j K_1(\sigma_j)}{K_0(\sigma_j) + S_j \sigma_j K_1(\sigma_j)} \right]} \quad (15)$$

3 合采井压力历史曲线影响因素分析

图 2 是井筒储存系数对井底压力动态的影响关系图。从图 2 中可以看出,井筒储存系数对井底压力动态的影响体现在储集阶段,主要表现在井筒储存系数越大,储集阶段无因次压力曲线位置越低,井筒储集的时间越长^[8]。图 3 是表皮系数对井底压力动态特征的影响,表皮系数越大,无因次压力曲线的位置越高,无因次压力曲线与无因次压力导数曲线之间的距离越大,表示井所受的污染越严重;在压力导数曲线上表皮系数越大,过渡段的驼峰越高。图 4、5 分别是地层系

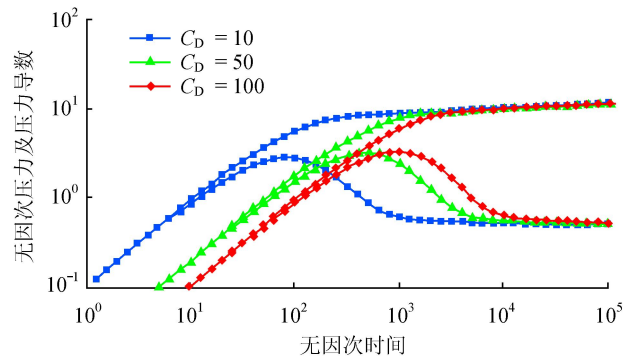


图 2 储存系数对无限大气藏井底压力动态的影响图

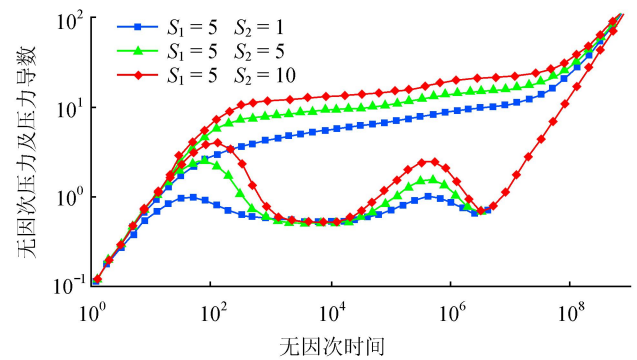


图 3 表皮系数对两层封闭气藏井底压力的影响图

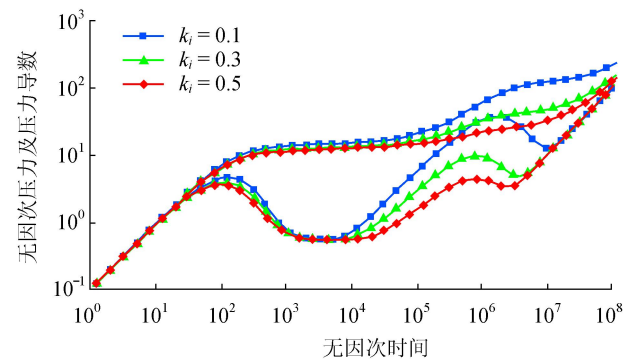


图 4 地层系数对两层封闭气藏井底压力的影响图

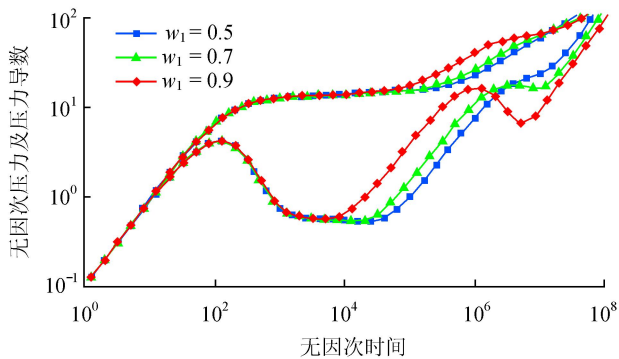


图5 储容比对N层封闭气藏井底压力的影响图

数和储容系数对井底压力动态特征的影响,从曲线上很难从压力曲线特征分辨出储层的非均质性^[9]。

4 合采井产气剖面规律研究

图6描述的是储容比对产气剖面的影响。开采初期储容比越大,各产气剖面差异较大;随着开采时间的增加,各层产气剖面逐渐降低;当压力波传播到气藏边界后,储量小的一层流量贡献率迅速降低。图7描述的是地层系数对产气剖面的影响。开采初期储容比越大,各层产气剖面受地层系数的影响较大,随着生产时

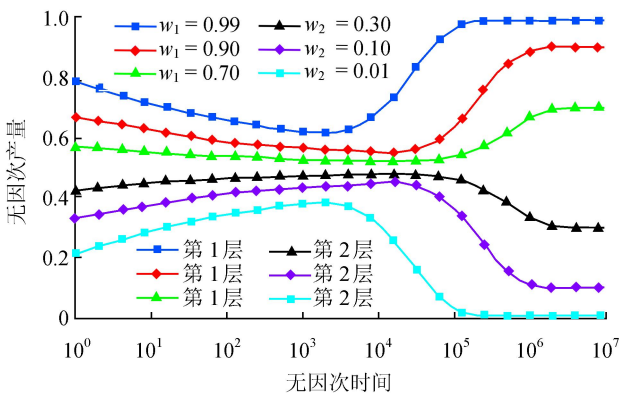


图6 储容比对产气剖面的影响图

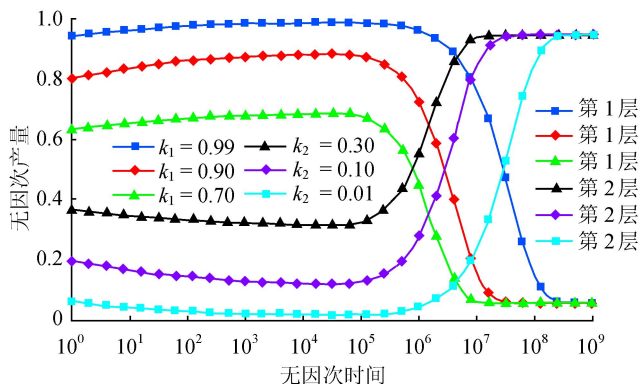


图7 地层系数对产气剖面的影响图

间的延长,渗透性好的一层气体流量有增加的趋势。图8描述的是地层压力对产气剖面的影响。地层压力主要影响初期产量大小,第1层的原始地层压力越低,初期产量的比值就越低,随着开采时间的延长,该层产量比重有所增加。

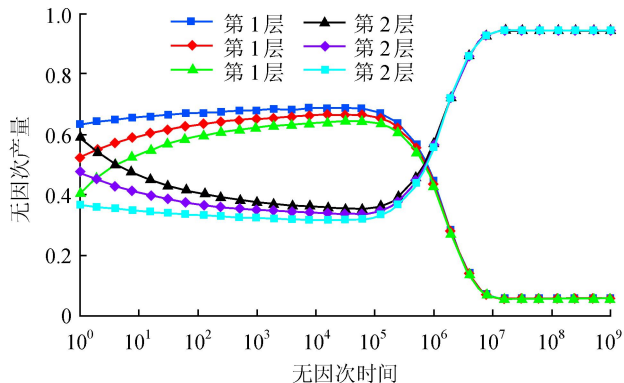


图8 无因次地层压力对产气剖面的影响图

5 结束语

1)笔者建立了多层合采气井井底压力动态响应数学模型,并绘制理论曲线,分析了影响其动态响应特征的具体因素。

2)分层流量剖面数据比压力资料更容易分辨出地层系数、储容比等层间非均质参数。

参 考 文 献

[1] 钟兵,杨雅和,夏崇双,等.砂岩多层气藏多层合采合理配产方法研究[J].天然气工业,2005,25(增刊1):104-106.

[2] 霍进,贾永禄,王海涛,等.多层窜流油气藏模型及井底压力动态[J].油气井测试,2006,15(2):1-4.

[3] 张望明,韩大匡,连淇祥,等.多层油藏试井分析[J].石油勘探与开发,2001,28(3):63-66.

[4] 伊晓东,李凤兰.均质多层油藏定压封闭边界灌注试井模型精确解及其计算[J].油气井测试,1998,7(3):10-14.

[5] 罗银富,黄炳光,依呷,等.高速非达西流动定压生产气井试井分析方法[J].西南石油大学学报,2008,30(2):91-93.

[6] 李顺初,张普斋,黄炳光,等.多层油藏压力分布的一般解[J].西南石油学院学报,2002,24(4):28-29.

[7] 徐献芝,况国华,陈峰磊,等.多层合采试井分析方法[J].石油学报,1999,20(5):43-47.

[8] 孙贺东,钟世敏,万玉金,等.涩北气田多层合采优化配产及动态预测[J].天然气工业,2008,28(12):86-88.

[9] 万玉金,孙贺东,黄伟岗,等.涩北气田多层气藏储量动用程度分析[J].天然气工业,2009,29(7):58-60.