

气井试井产能分析新方法与新模型应用

田婉玲^{1,2} 齐二坡² 吴茂富² 高宏兴² 王亚玲² 苗润金²

1.西安石油大学石油工程学院,陕西 西安 710065

2.长庆油田第一采气厂测试中心,陕西 靖边 718500

摘要:

在实际气井压力恢复测试资料中,一方面使用传统产能分析会出现指数式方程中的指数 n 大于 1,二项式产能方程中 B 小于 0 的情况,无法正常计算气井产能;另一方面使用常规试井模型进行储层评价时得不到理想的拟合曲线。因此需对产能分析方法进行改进,同时应用新的试井模型来进行试井解释,以获取合理的单井产能和准确的储层参数。针对某井利用叠加修正法和引进压力平方校正因子 C_j 这两种方法,从理论分析到实际应用得出,对于传统产能计算方法不能处理的资料,这两种方法都具有很好的处理能力,计算结果精度更高。同时对于某井在试井解释过程中所出现的问题,采用新型模型进行解释,最终获得了合理的结果。

关键词:

产能;二项式;指数式;压力;试井解释

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)04-0046-04

0 前言

修正等时试井方法是进行产能评价和储层评价的重要方法,但在实测资料中出现:a)气井初开井时井底没有得到充分冲刷,具有较大的表皮系数,使最初的低产量生产条件下流压偏低,显示较大的生产压差;b)测试井井底积水,而压力计又未能下到气层部位,造成生产压差不准;c)因气井的单井控制储量低,地层能量不足,供给能力较差等多因素影响,一方面出现在使用传统产能分析的过程中,指数式方程中的指数 n 大于 1,二项式产能方程中 B 小于 0 的情况,无法正常计算气井产能;另一方面使用常规试井模型进行储层评价时得不到理想的拟合曲线。因此在实际工作中,需要认真分析试井资料,从试井理论入手,对产能分析方法进行改进和引入符合实际情况的试井模型来进行试井解释,以获取测试气井的合理单井产能和

准确储层参数,达到指导区块合理开发的目的^[1-3]。

1 产能分析方法改进

常规产能分析中会出现指数 n 大于 1,二项式产能方程中 B 小于 0 的情况,针对这种异常资料,从试井理论入手推导,可应用两种改进的产能分析方法来处理:一是根据气井早期不稳定渗流理论和渗流叠加原理,推导出确定不稳定及稳定二项式产能方程的校正公式;二是在产能二项式方程中引进压力平方校正因子 C_j 后建立新的修正等时试井资料处理方法。

1.1 叠加修正法

均质无限大地层中气井早期不稳定流阶段的压力动态为:

$$P_i^2 - P_{wf}^2 = m(\lg t + s^*)Q + BQ^2 \quad (1)$$

其中 $m = 1.486 \times 10^{-3} T \bar{\mu} \bar{Z} / (Kh)$

收稿日期:

2012-03-20

作者简介:

田婉玲(1979-),女,陕西大荔人,工程师,学士,毕业于西安石油大学石油工程专业,主要从事试井解释工作。

$$s^* = \lg[K/(\phi\mu\bar{C}_g r_w^2)] - 2.098 + 0.869s$$

$$B = 0.869mD$$

式中 P_i ——原始地层压力, MPa;

P_{wf} ——井底流动压力, MPa;

t ——生产时间, h;

Q ——气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;

T ——地层温度, K;

$\bar{\mu}$ ——天然气粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

\bar{Z} ——偏差因子;

K ——有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

h ——气层有效厚度, m;

ϕ ——孔隙度, f;

\bar{C}_g ——气体等温压缩率, MPa^{-1} ;

r_w ——井眼半径, m;

s ——表皮系数;

D ——惯性系数, $(10^4 \text{ m}^3/\text{d})^{-1}$ 。

设修正等时试井的等时时距为 t_0 , 4 个工作制度的产量分别为 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 延时产量为 Q_5 。每个生产制度均在 Δt 时刻取点, 构成一组不稳定等时点, 并令 $\alpha = \Delta t/t_0$, 根据气井多流量叠加原理和式(1), 每一生产制度在生产 Δt 时间的压力动态为:

第一个工作制度:

$$[P_i^2 - P_{wf1}^2(\Delta t)]/Q_1 = m(\lg\Delta t + s^*) + BQ_1 \quad (2)$$

第二个工作制度:

$$P_i^2 - P_{wf2}^2(\Delta t) = m[\lg(2t_0 + \Delta t) + s^*]Q_1 - m[\lg(t_0 + \Delta t) + s^*]Q_1 + m(\lg\Delta t + s^*) + BQ_2^2 \quad (3)$$

代入 α 得:

$$\frac{P_i^2 - P_{wf2}^2(\Delta t)}{Q_2} - m \frac{Q_1}{Q_2} \lg \frac{2+\alpha}{1+\alpha} = m(\lg\Delta t + s^*) + BQ_2^2 \quad (4)$$

同理得第 n 个工作制度为:

$$\frac{P_i^2 - P_{wfn}^2(\Delta t)}{Q_n} - \Delta p_n^* = m(\lg\Delta t + s^*) + BQ_n \quad (5)$$

$$\text{当 } n > 1 \text{ 时, } \Delta p_n^* = \frac{m}{Q_n} \sum_{i=2}^n Q_{n-i+1} \lg \frac{2(i-1)+\alpha}{2i-3+\alpha}$$

$$\text{当 } n=1 \text{ 时, } \Delta p_n^* = 0$$

式(5)右边即是不稳定二项式产能方程的标准形式, 以 Q_n 为横坐标, 以式(5)左边为纵坐标, 在直角坐标系中可得到一条直线, 其斜率即为二项式系数 B , 截距为二项式系数 $A_i = m(\lg\Delta t + s^*)$, m 可由多流量试井叠加图获得。

早期不稳定流阶段, 二项式产能方程系数 A_i 是时间函数, 随生产时间延长, 其值逐渐增大, 当渗流达到拟稳态时变成固定的 A 值, 此时, 可确定稳定产能方程, 由此计算的无阻流量真正反映气井的实际生产能

力, 因此对稳定点的计算应以流动刚刚进入拟稳态时的生产数据为准。设延时段生产达到拟稳态的时间为 Δt_p , 并令 $\alpha_p = \Delta t_p/t_0$, 同样根据叠加原理, 得生产刚刚达到拟稳态的压力动态为:

$$\frac{P_i^2 - P_{wf5}^2(\Delta t_p)}{Q_5} - \Delta p_5^* = m(\lg\Delta t_p + s^*) + BQ_5 \quad (6)$$

$$\text{其中 } \Delta p_5^* = \frac{m}{Q_5} \sum_{i=2}^5 Q_{5-i+1} \lg \frac{2(i-1)+\alpha_p}{2i-3+\alpha_p}$$

以 Q_5 为横坐标, 式(6)的左边为纵坐标, 得到的点即为稳定点坐标。气井生产达到拟稳态时压力的平方与时间呈线性关系, 采用延时生产时间段的压力数据作 P_{wf}^2 与 t 关系图, 可确定达到拟稳态的时间 Δt_p 。

1.2 存在井底积液 的试井资料解释方法

1.2.1 理论分析

存在井底积液的气井关井测试压力 P'_{us} 与井底流压 P'_{wf} 均比实际的压力值 P_{us} 、 P_{wf} 偏小, 其偏差为:

$$\delta_j = P_{wf} - P'_{wf} = P_{usj} - P'_{usj} \quad (7)$$

在采用二项式方程进行分析时, 需要实际的关井压力和井底流压值, 此时有:

$$(P'_{usj} + \delta_j)^2 - (P'_{wfj} + \delta_j)^2 = Aq_g + Bq_g^2 \quad (8)$$

简化式(7)后, 得:

$$P_{usj}^2 - P_{wfj}^2 = Aq_g + Bq_g^2 + C_j \quad (9)$$

其中

$$C_j = 2(P'_{wfj} - P'_{usj})\delta_j \quad (10)$$

式中 P'_{us} ——测试关井压力, MPa;

P'_{wf} ——测试井底流压, MPa;

P_{us} ——实际关井压力, MPa;

P_{wf} ——实际井底流压, MPa;

δ_j ——实际关井压力与测试关井压力的偏差或实际井底流压与测试井底流压的偏差;

C_j ——压力平方校正因子;

A ——二项式的二次项系数;

B ——二项式的一次项系数;

q_g ——产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;

C_{j0} —— $q_g=0$ 时压力平方校正因子;

ΔP^2 ——压力平方差。

严格说, 对于不同工作制度, 井底的积液高度是不同的, 因而在式(9)中, C_j 值在每一测试点也是不同的, 但是, 由于修正等时试井施工时间短, 井底积液量变化不大, 因而 C_j 值变化很小, 即可以假设在不同工作制度下 C_j 为常数^[4]。

为了计算 A 、 B 之值, 将式(9)整理成:

$$\frac{P_{usj}^2 - P_{wfj}^2 - C_j}{q_g} = A + Bq_g \quad (11)$$

显然, $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g$ 与 q_g 之间成直线关系。

1.2.2 C_j 、 A 、 B 值的确定方法

根据式(11)在利用实际井的修正等时试井测试资料确定 C_j 、 A 、 B 值时,可以假设不同的 C_j 值,并作不同 C_j 值对应的 $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g$ 与 q_g 曲线,当 $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g$ 与 q_g 呈直线关系(即相关系数为1)时,对应的 C_j 即为所求,而直线的截距为 A ,斜率值为 B ^[5]。

分析式(11)可知, C_j 的单位为 MPa^2 ,因此,在处理实际资料时,为更快确定 C_j 值,可先作 $(P'_{usj}-P'_{ufj})$ 与 q_g 的关系曲线,根据曲线趋势外推得出 $q_g=0$ 处的 C_{j0} 值,再以 C_{j0} 做为初值,作 $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_{j0})/q_g \sim q_g$ 的关系曲线,如果曲线往上凹,说明 C 值偏大,如果往下凹,说明 C 值偏小^[5]。

1.2.3 井底积液的判断方法

当存在井底积液时,实际修正等时指示曲线 $\Delta p^2/q \sim q$ 是一条斜率为负的上凹曲线,而指示曲线 $\lg \Delta p^2 \sim \lg q$ 是一条斜率为正的上凹曲线。因此,在处理实际修正等时试井资料时,可依据实际修正等时试井资料作出这两条指示曲线,并根据指示曲线形态判断井筒中是否存在井底积液。

2 应用实例

某井于2008年10月5日14:00开始进行试采,开井前油套压分别为21.24、21.44 MPa,4个等时制度分别为 2.0×10^4 、 4.0×10^4 、 8.0×10^4 、 $16.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.1 产能分析

对某井试采资料进行产能分析时发现,该井的压力平方法指数式方程的指数 n 出现大于1,而二项式方程的 B 出现小于0的情况。鉴于这种异常资料,使用叠加修正法对其产能进行重新分析。

叠加修正法所获得的二项式方程的相关系数较低,为获得更准确的产能方程,使用第二种方法进行产能分析。

根据井底积液的判断方法^[5],显然该井在修正等时试井测试过程中存在井底积液。利用建立的存在井底积液的修正等时试井资料处理方法处理某井测试资料,不同 C_j 值 ($C_j=8 \sim 23$ 对应的) $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g \sim q_g$ 关系曲线见图1,当 C_j 为16时, $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g \sim q_g$ 关系曲线为一条相关系数为0.922 134 6的直线。根据该直线的截距和斜率可确定出某井的二项式系数 $A=84.148 26$, $B=0.320 175$, $q_g=8.343 5$,获得的产能结果见表1,二项式拟合见图2。

2.2 试井解释

在对某井进行试井解释时,根据实测压力恢复曲

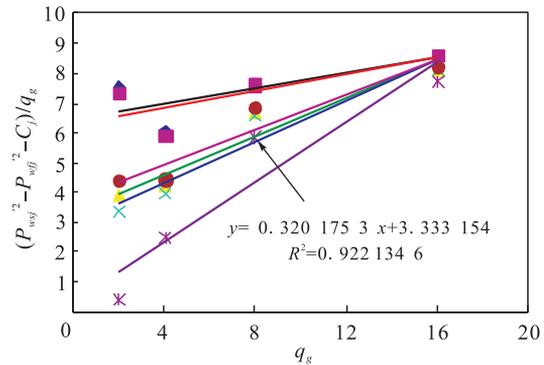


图1 某井不同 C_j 值对应的 $(P'_{usj}-P'_{ufj}-C_j)/q_g \sim q_g$

表1 某井修正等时试井结果表

方法	稳定产能方程	绝对无阻流量 / $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	相关系数	备注
压力平方法	二项式 $\Delta P^2=84.148 26q_g + 0.320 175q_g^2$	8.343 5	0.922 134 6	C_j 修正法

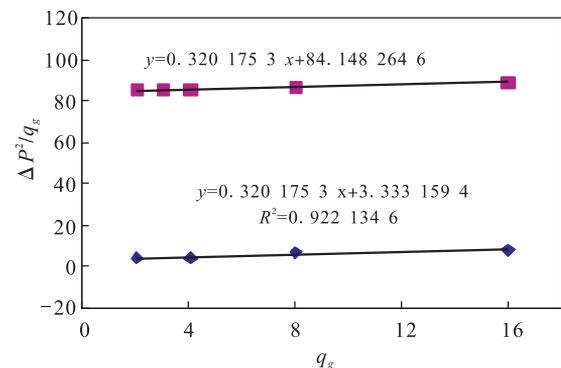


图2 某井修正等时试井二项式关系曲线拟合 (C_j 修正)

线双对数图和压力历史图的特征选择矩形边界模型使用 Saphir 软件对其进行拟合,见图3、4。

从图3、4可以看出双对数拟合图虽然得到了很好的拟合,但是压力历史拟合图4个制度和延续流量压力曲线拟合很差。为得到更合理的解释结果,尝试了多种模型对该井进行解释,均未得到较好的拟合。最后使用 Pansystem 试井软件,选用无限导流垂直裂

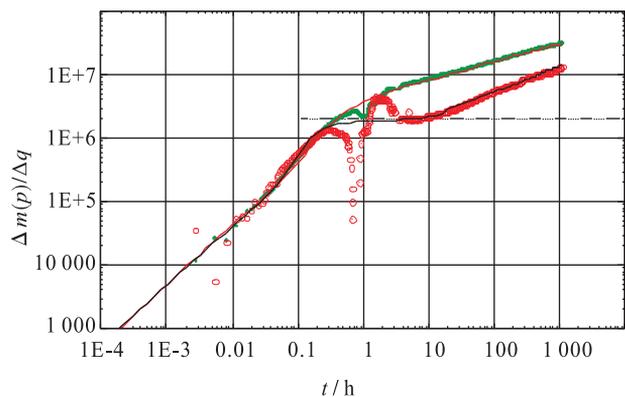


图3 某井双对数拟合

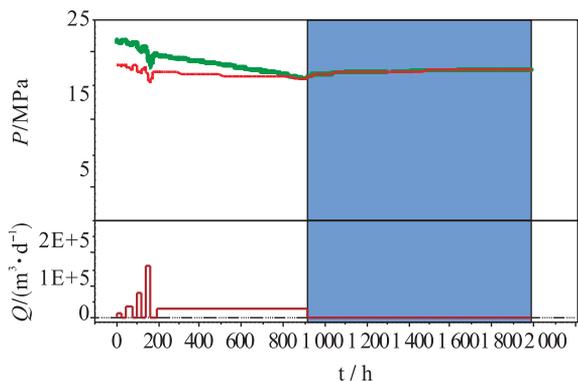


图 4 某井压力历史拟合

缝双区分隔系统矩形边界模型进行解释。

双单元系统矩形边界见图 5, 两个封闭的单元系统由一条泄漏的边界隔开, 用传导能力指数来描述泄漏边界的导流能力。传导能力指数 T 定义为:

$$q_{12} = T(P_2 - P_1) \quad (12)$$

式中 q_{12} ——由 2 单元流向 1 单元的流量, m^3/d ;

P_2, P_1 ——2 单元、1 单元的压力, MPa ;

T ——传导能力指数, $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})/\text{MPa}$ 。

在定产量生产条件下, 分隔系统的压降特征出现

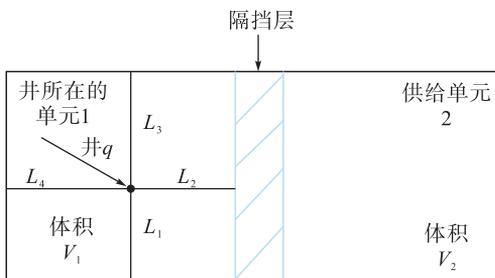


图 5 双单元系统矩形边界模型

两个拟稳态阶段^[2], 见图 6、7。在直角坐标图中呈现两条直线段, 在导数诊断图中径向流动阶段之后具有两条单位斜率直线, 直角坐标图上第一条直线的斜率用于计算井所在单元的储层孔隙体积, 即:

$$V_1 = q_g B_{gi} / (C_i \cdot m_1) \quad (13)$$

式中 B_{gi} ——天然气体积系数, m^3/m^3 ;

V_1 ——井所在单元的储层孔隙体积, m^3 ;

C_i ——总压缩系数, MPa^{-1} ;

q_g ——天然气流量, m^3/d 。

使用此模型对该井进行试井解释, 其双对数和压力历史拟合, 见图 8、9。

模型为无限导流裂缝双区分隔系统矩形边界模型; 井筒储集系数 $C = 26.1 \text{ m}^3/\text{MPa}$; 裂缝表皮系数 $S_f = 0.0106$; 裂缝半长 $X_f = 125 \text{ m}$; 渗透率 $k = 0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 边界距离 $L_1 = 86 \text{ m}, L_2 = 130 \text{ m}, L_3 = 60 \text{ m}, L_4 = 265 \text{ m}$; 补给砂体体积 $200\,000 \text{ m}^3$; 补给系数 $T_{\text{eff}} = 0.5 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{MPa}$; 非达西流动系数 $9.938 \times 10^{-7} \text{ 1}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$; 拟合压力: 26.91 MPa 。

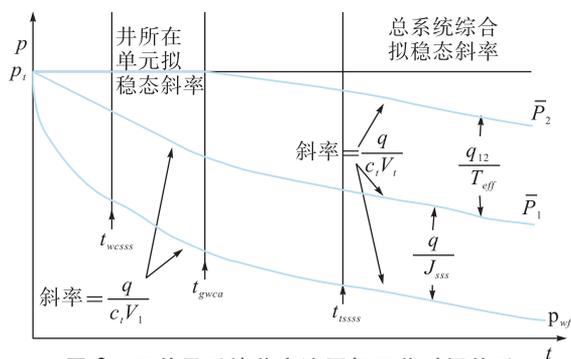


图 6 双单元系统井底流压与开井时间关系

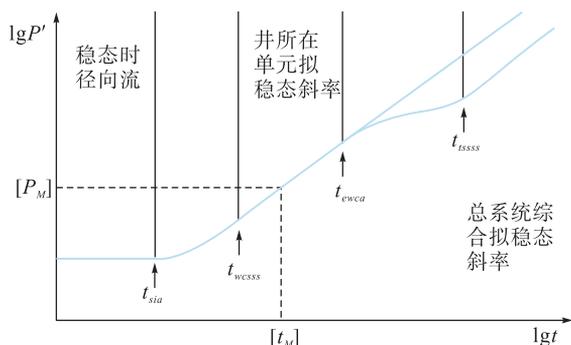


图 7 双单元系统压力导数曲线

从图 8、9 可看到, 双对数图和压力历史拟合图都得到了较好的拟合, 证实解释结果可靠。

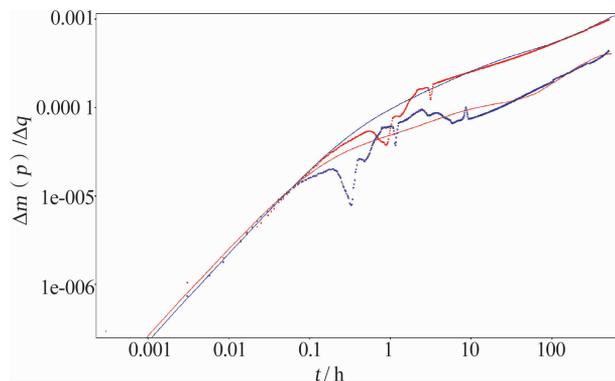


图 8 某井双对数拟合图

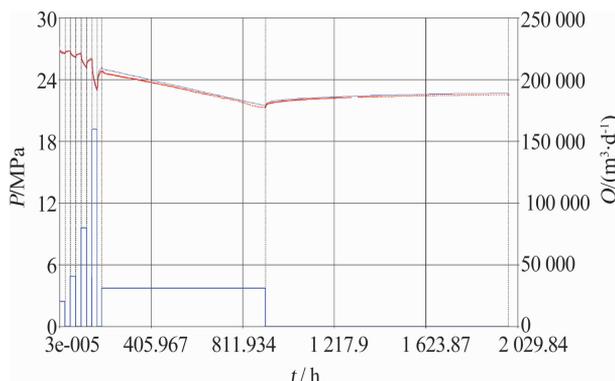


图 9 某井压力历史拟合图

(下转第 72 页)

(上接第 49 页)

3 结论

a) 通过对某井使用叠加修正法, 得到了较为准确的产能方程, 计算结果精度更高。

b) 通过对某井使用产能二项式方程中引进压力平方校正因子 C_f 后, 建立新的修正等时试井资料处理方法, 二项式方程的相关系数较高, 产能结果更准确。

c) 采用新型模型无限导流垂直裂缝双区分隔系统矩形边界对某井的试井解释符合实际情况。

参考文献:

- [1] 唐俊伟, 陈彩虹. 修正等时试井资料分析新方法[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 97-99.
- [2] 熊健, 李凌峰. 变形介质低渗透气藏水平井产能分析[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5): 50-52.
- [3] 杨蕾, 刘宁, 刘辉等. 气井井筒携液模型研究与应用[J]. 天然气与石油, 2011, 29(2): 48-49.
- [4] 唐雪清, 宋雪莲. 应用分隔系统模型描述断块气藏的压力特征[J]. 油气井测试, 2000, 9(4): 25-27.
- [5] 唐海, 伍勇, 徐学成等. 存在井底积液的修正等时试井资料解释方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 64-65.