

# 低渗气井压力恢复资料解释新方法

郭康良 周丽娟

(江汉石油学院地质系, 湖北荆州 434102)

低渗气藏早期压力恢复资料由于受相态变化和非达西效应等因素的影响, 无法进行可靠的解释。利用 Duhamel 原理推导出利用早期资料求地层压力的公式, 再利用该压力作为匹配控制点, 用早期资料在理论图版上进行匹配, 从而求出地层参数。用此方法可有效地利用气井压力恢复早期的测试资料, 缩短关井时间。由于用地层压力作为统一控制条件, 因此, 用该方法求得的地层参数可信度高, 这一点在实际应用中得到证实。

**关键词** 早期 控制点 曲线匹配 相态

**第一作者简介** 郭康良 男 32岁 讲师(硕士) 试井及开发地质

目前的试井分析方法<sup>[1]\*</sup>, 都是以压力恢复曲线出现径向流动段为基础, 否则无法进行可靠的解释。大量资料表明, 陕甘宁中部气田是一个低孔低渗气田, 有相当一部分气井产量低, 压力恢复慢, 即使关井很长时间亦不出现可靠径向流动段, 无法进行资料解释。

由于气体不同于液体, 它的压缩性特别大, 流速也特别快, 在进行气井资料分析时, 须进行扩散方程线性化处理, 并简相态变化和非达西效应的计算。所以气井资料解释比油井困难, 目前的方法都未充分考虑气体的特点, 不易区分压力恢复曲线的早期段、过渡段、径向流动段和晚期段, 常常给解释工作带来错误的结果。为此, 一定要用压力导数曲线, 在无因次双对数图上出现 0.5 的水平线, 和早期直线段偏离 45° 直线段 1~ 1.5 周期之后的压力数据点才是径向流动段的压力数据, 这些数据才能用传统方法和现代的双对数方法进行气井资料解释, 否则解释的结果是不可靠的。为了解决上述问题, 本文研究出气井早期资料的解释方法, 并获得了很好的效果, 对提高气井资料解释率和气层改造效果都有重要的实用价值。

本次提出的早期资料解释方法是先求出本井地层压力(若产气很少, 即为原始地层压力), 然后以此压力为控制点, 用早期资料在双对数图上进行匹配, 从而求出地层参数, 达到利用早期资料进行解释的目的。

## 1 基本方法的推导

### 1.1 基本假设

均质等厚无限大地层中心一口生产井, 流体单相微可压缩, 渗流满足达西定律; 重力作用可忽略, 生产前地层中各点压力为  $P_i$ , 以定产量  $q$  生产  $t$  时间后关井测压。

\* Kuchuk F J. Gladfelter deconvolution. SPE 16 377

## 1.2 无因次量定义

$$\text{无因次产量: } q_D = \frac{18.42 \times 10^{-4} q u B}{K h (P_i - P_{wf})} \quad (1)$$

$$\text{无因次压力: } P_{SD} = \frac{P_i - P_{ws}}{P_i - P_{wf}} \quad (2)$$

$$\text{无因次时间: } t_D = \frac{3.6 K t}{\Phi \mu C_t \gamma_w^2} \quad (3)$$

式中  $B$  为地层体积系数;  $C_t$  为综合压缩系数,  $1/\text{MPa}$ ;  $h$  为地层厚度,  $\text{m}$ ;  $K$  为地层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $P_{wf}$  为流动压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_{ws}$  为井底恢复压力,  $\text{MPa}$ ;  $q$  为关井前稳定产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\gamma_w$  为井半径,  $\text{m}$ ;  $t$  为关井时间,  $\text{h}$ ;  $u$  为流体粘度,  $\text{mpa}\cdot\text{s}$ ;  $\Phi$  为孔隙度, %; 下标  $D$  为无因次量。

## 1.3 方法推导

根据 Duhamel 原理<sup>\*</sup>, 关井  $t_D$  时间的井底压力为

$$P_{SD} = \int_0^{t_{PD} + t_D} q_D(\tau_D) P_{CD}(t_{PD} + t_D - \tau_D) d\tau_D \quad (4)$$

式中  $P_{CD}$  为  $t_D$  时刻没有井筒储集效应的稳定层面压力解;  $t_D$  为生产时间;  $\tau$  为微分变量。当  $t_D > 100$  时, 有

$$P_{CD}(t_D) = \frac{1}{2}(\ln t_D + 0.80907 + 2S) \quad (5)$$

式中  $S$  为表皮系数。设关井后续流量满足指数递减规律, 即

$$q(t) = qe^{-at} \quad (6)$$

式中  $a$  为递减指数。将(5), (6)代入(4)式可得

$$P_{SD}(t_D) = m_0 \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{t_{PD} + t_D}{t_D} + \int_0^{t_D} e^{-a\tau_D} \frac{1}{2(t_D - \tau_D)} d\tau_D \right] = m_0 \left[ \frac{t_P + t}{2t} + \frac{1}{at(1 - e^{-at})} \right] \quad (7)$$

式中  $m_0 = 18.42 \times 10^{-4} qBu / [Kh(P_i - P_{wf})]$ , 由(2)和(7)可得

$$\frac{P_i - P_{ws}}{P_i - P_{wf}} = m_0 \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{t_P + t}{t} + \frac{1}{at}(1 - e^{-at}) \right] \quad (8)$$

为了减少试算  $P_i$  的次数, 我们采用如下的方法求  $P_i$  近似值, 令

$$\frac{P_i - P_{ws}}{P_i - P_{wf}} = \frac{1}{at}(1 - e^{-at}) = A$$

则

$$P_i = \frac{P_{ws} - P_{wf}A}{1 - A} \quad (9)$$

作  $P_i - t$  和  $P_{ws} - t$  图, 两条曲线外推交点即为  $P_i$  的近似值(图1), 其整个计算过程如下

(1) 计算纯井筒段储集常数;

(2) 计算续流量  $q_j = \frac{24C(P_{ws})_j - (P_{ws})_{j-1}}{B(t_j - t_{j-1})}$ , 并回归, 得出递减率  $a$ ;

(3) 作  $P_{ws} - t$  和  $P_i - t$  图, 并求交点即可得  $P_i$  值;

\* Thompson L. G, Reynolds A. C. Analysis of variable-rate well-test data using Duhamel's Principle. SPE 13 080

(4) 作  $\frac{P_i - P_{ws}}{P_i - P_{wf}} - \frac{1}{2} \ln \frac{t_p + t}{t} + \frac{1}{at} (1 - e^{-at})$  图, 并回归, 检查其截距  $b$ , 若  $|b| < 0.001$ , 则认为  $P_i$  为地层压力或原始地层压力。

## 2 利用地层压力作控制点进行匹配

(1) 用实测(或拟压力)压力差数据与理论图版进行匹配, 当实测曲线达到最佳匹配后, 在匹配的曲线上任取一点, 用下式计算地层压力

$$P_i = \sqrt{P_{wf} + \frac{1}{2\pi h} \left[ \frac{\Delta P}{P_D} \right]_M \left\{ \ln \left[ \left[ \frac{t_D}{C_D} \right] + t_P (C_D e^{2S}) \right]_M \right\}} \quad (10)$$

式中  $( )_M$  为匹配曲线的读数。

(2) 比较理论计算和匹配获得的地层压力, 若两值相等, 则结束匹配, 否则重复 1, 2 步骤, 直到满意为止。

计算地层参数, 方法与双对数法计算地层参数方法相同。

## 3 实例分析

实例 1 Sh1 井是一口评价井。该井马家沟组上段为深灰色溶孔白云岩, 孔洞多被泥质、灰质充填。求产后于 3 月 22 日进行恢复测试, 历时 17 455 min (290.92 h), 关井前稳定产量  $q = 152\ 106\ \text{m}^3/\text{d}$ ; 气体相对密度  $\gamma_g = 0.606\ 9$ ; 含水饱和度  $S_w = 24\%$ ; 其它参数  $h = 14.5\ \text{m}$ ,  $B = 4.374 \times 10^{-3}$ ;  $u = 2.2 \times 10^{-3}\ \text{mpa} \cdot \text{s}$ ,  $C_t = 2.474 \times 10^{-2}$ ,  $P_{wf} = 25.108\ \text{MPa}$ ,  $t_p = 69.59\ \text{h}$ ,  $T = 114.50\ ^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_w = 0.097\ 5\ \text{m}$ ,  $\Phi = 3.07\%$ 。取前 26 个数据点, 即关井后 76 min 以前的恢复资料, 用本文方法进行解释, 无论是双对数拟合图(图 2)还是无因次 Horner 检验图都拟合良好(图 3)。从解释结果(表 1)来看, 两种方法非常接近, 说明本文的解释结果是可靠的。但本文的方法却减少了关井时间 289.62 h。该井实测地层压力 31.001 MPa, 用本文方法求得的外推地层压力 30.804 MPa, 二者相差 0.197 MPa, 这一误差, 远小于工业生产所允许的误差, 因此是可靠的。

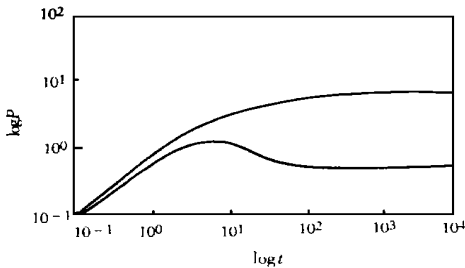


图 2 新方法压恢检验图

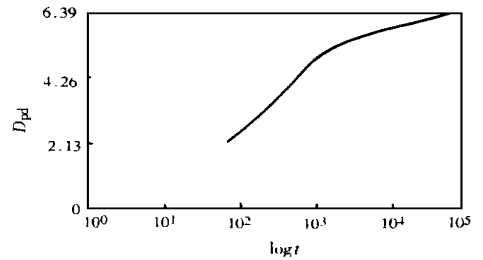


图 3 无因次 Horner 检验图

实例 2 Sh3 井于 1994-07-11 进行测试, 关井 284 h, 关井前稳定产量  $q = 78\ 366\ \text{m}^3/\text{d}$ , 其它参数为  $h = 8.1\ \text{m}$ ,  $B = 4.087 \times 10^{-3}$ ,  $u = 2.293 \times 10^{-2}\ \text{mpa} \cdot \text{s}$ ,  $C_t = 1.686 \times 10^{-2}$ ,  $P_{wf} = 26.667\ \text{MPa}$ ,  $t_D = 72.4\ \text{h}$ ,  $T = 112.42\ ^\circ\text{C}$ ,  $\Phi = 7.56\%$ ,  $S_w = 24\%$ , 取早期段数据(前 90 h)用本文的新方法进行解释其压力恢复检验图(图 4)与无因次霍纳检验图(图 5)均重合较好, 其解释

结果(表 1)也与原方法一致,但新方法减少关井时间 186.25 h,具有明显的经济效益。其它各井解释见表 1。

表 1 典型曲线匹配与新方法解释结果对比表

| 井 号 | 原始地层压力/MPa |        | 地层系数/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ |        | 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ |       | 表皮系数   |        | 减少关井<br>时间/h |
|-----|------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|-------|--------|--------|--------------|
|     | 外推         | 本文     | 双对数                          | 本文     | 双对数                         | 本文    | 双对数    | 本文     |              |
| Sh1 | 31.006     | 30.804 | 38.409                       | 45.304 | 2.649                       | 3.124 | -2.633 | -2.007 | 289.620      |
| Sh2 | 30.849     | 36.772 | 43.290                       | 69.480 | 3.578                       | 3.260 | 1.600  | 1.420  | 132.000      |
| Sh3 | 31.551     | 31.556 | 18.645                       | 21.118 | 2.302                       | 2.615 | -3.053 | -2.450 | 186.250      |
| Sh4 | 29.700     | 29.594 | 38.930                       | 38.730 | 4.279                       | 4.256 | -4.091 | -3.792 | 131.000      |
| Sh5 | 29.780     | 29.423 | 1.831                        | 3.334  | 0.118                       | 0.215 | -4.630 | -4.140 | 150.440      |

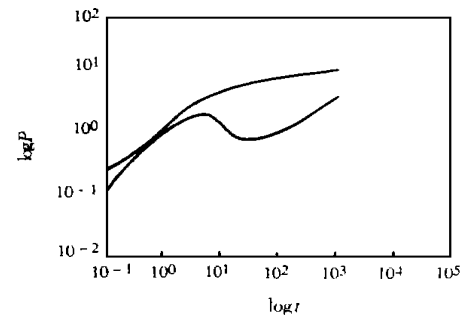


图 4 新方法压恢检验图

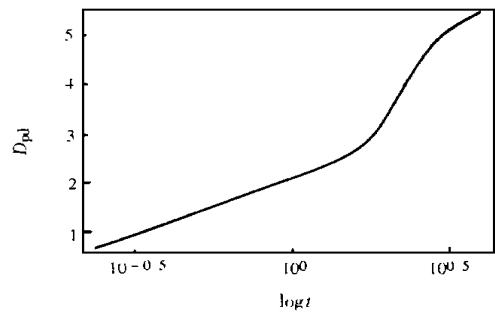


图 5 无因次 Horner 检验图

4 结论

- (1) 该方法不仅能获得地层参数,也能求准地层压力,克服了很多早期分析方法不能计算地层压力的缺点。
- (2) 能缩短关井测压时间,有明显的经济效益。
- (3) 因为有地层压力作为统一的控制条件,因此提供的地层参数准确可靠。

参 考 文 献

1 McKinley R M. Wellbore transmissibility from after flow dominated pressure buildup data. JPT, 1971, 23( 7) : 863~ 872

A NEW METHOD OF BUILD-UP PRESSURE DATA INTERPRETATION  
FOR LOW PERMEABILITY GAS WELLS

Guo Kangliang Zhou Lijuan  
(Department of Geology, Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei)

Abstract

Early-time pressure build-up data of low permeable gas reservoirs, affected by fluid phase changes and non-Darcy effect, can not be used in pressure data interpretation. In this paper, a new method is developed in which phase change is used as the condition, and Duhamel's principle is used to derive formation pressure equation and then calculate the formation pressure in low permeability wells with early-time data, and use this pressure as a match point to match the early time data, thus getting the formation parameters. It has been proved by practice that the parameters obtained by this method possess high reliability.