

# 四川河坝异常高压气藏的产能方程及其计算

郭春华<sup>1,2</sup> 周文<sup>1,2</sup> 冯文光<sup>2</sup> 杨宇<sup>1,2</sup> 吕新东<sup>2</sup>

1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·成都理工大学 2.成都理工大学能源学院

郭春华等.四川河坝异常高压气藏的产能方程及其计算.天然气工业,2009,29(6):86-88.

**摘要** 四川盆地河坝气藏压力系数高达2.3,属于典型的异常高压气藏,如何建立该气藏的产能方程至关重要。常规二项式和指数式产能方程忽略了应力敏感的影响,计算的无阻流量一般大于实际值。在考虑岩石渗透率随地层压力呈指数函数变化的基础上,从气体的高速非达西渗流理论出发,推导出新的拟压力二项式产能方程及其求解方法。河坝1井的产能计算结果表明,考虑应力敏感的拟压力二项式产能方程所计算的无阻流量更加符合实际,对于开发类似高压气藏具有一定的参考意义。

**关键词** 河坝气藏 异常高压 生产能力 应力 方程 计算 四川盆地

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.06.025

## 1 考虑高压变形效应的拟压力二项式产能方程

定义拟压力为:  $\psi = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp$  (1)

用拟压力表示的常规二项式产能方程式<sup>[1]</sup>为:  $\psi_R - \psi_f = A Q_{sc} + B Q_{sc}^2$  (2)

可以采用下述实测数据处理方法求取气井的产能方程和绝对无阻流量<sup>[1]</sup>。将产能方程改写为:

$$(\psi_R - \psi_f) / Q_{sc} = A + B Q_{sc} \quad (3)$$

在实测数据处理时,可在直角坐标系数上线性回归  $\frac{\psi_R - \psi_f}{Q_{sc}} - Q_{sc}$  关系曲线,利用直线的斜率和截距求取产能方程中的常数 A、B 值和绝对无阻流量  $Q_{AOF}$ 。

对于异常高压气藏,在衰竭式开采过程中,随着气体的采出及地层压力下降,有效覆压的增加,储集层会发生显著的塑性或弹性形变,使渗透率逐渐降低。用常规的产能方程并不能反映渗透的变化。所以有必要提出一种改进的产能方程来考虑渗透率的应力敏感<sup>[2-4]</sup>。

通常采用指数式来描述渗透率变化<sup>[4]</sup>,而用拟压力表示的渗透率变化形式也是符合指数函数关系式的<sup>[4-5]</sup>,即  $K(\psi) = K_i \exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)]$  (4)

对于超高压气藏,气体在地层中的渗流速度较

高,气体的运动规律将不符合达西定律,Forchheimer 通过实验,得出了用二项式表示气体的运动方程<sup>[1]</sup>:

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} v + \beta v^2 \quad (5)$$

其中:  $\beta = 7.644 \times 10^{10} / K^{1.5}$ 。

由式(1)、(5)得:

$$-\frac{d\psi}{dr} = -\frac{2p}{\mu Z} \frac{dp}{dr} = \frac{2p}{\mu Z} \left( \frac{\mu}{K} v + \beta v^2 \right) \quad (6)$$

又因为:

$$Q = B_g Q_{sc} = \frac{p_{sc} Z T Q_{sc}}{T_{sc} p} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{M \gamma_g p}{Z R T} \quad (8)$$

由式(7)得:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q_{sc} p_{sc} T Z}{2 \pi r h T_{sc} p} \quad (9)$$

由式(8)、(9)代入式(6)得:

$$-\frac{d\psi}{dr} = \frac{Q_{sc} p_{sc} T}{K \pi h r T_{sc}} + \frac{\beta Q_{sc}^2 p_{sc}^2 M \gamma_g T}{2 \pi^2 h^2 r^2 \mu T_{sc}^2 R} \quad (10)$$

由式(4)代入式(10)得:

$$-\frac{d\psi}{dr} = \frac{Q_{sc} p_{sc} T}{K_i \exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)] \pi h r T_{sc}} + \frac{7.644 \times 10^{10} Q_{sc}^2 p_{sc}^2 M \gamma_g T}{K_i^{1.5} \exp[-1.5 \alpha_\psi(\psi_R - \psi)] 2 \pi^2 h^2 r^2 \mu T_{sc}^2 R} \quad (11)$$

由于式(11)的积分只有用数值积分才能解出,不能给出积分结果的常规表达式,所以应考虑将式

(11)进行简化。根据应力敏感试验结果,  $\alpha_\psi$  一般较小,可作如下简化:

$$\exp[-1.5\alpha_\psi(\psi_R - \psi)] \approx m \exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)] \quad (12)$$

式中:  $m$  是一个与  $\alpha_\psi$  有关的常数,可由试验数据拟合得出。

例如,当  $\alpha_\psi = 0.00001$  和  $-0.00001$  时,分别作出  $\exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)]$  与  $\exp[-1.5\alpha_\psi(\psi_R - \psi)]$  的关系图,并分别拟合了它们的截距为零的线性关系(图1),由图1可以看到得到拟合出的线性关系的相关系数是比较高的。

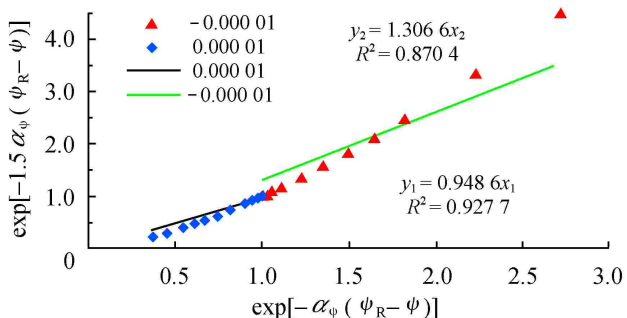


图1 复合参数拟合关系图

$$A = \frac{p_{sc} T}{K_i \pi h T_{sc}} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)$$

$$B = \frac{7.644 \times 10^{10} p_{sc}^2 M \gamma_g T}{m K_i^{1.5} 2\pi^2 h^2 \mu T_{sc}^2 R} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R}\right)$$

利用式(12),同时考虑内、外两个边界条件。

$$\text{当 } r=R \text{ 时: } \psi_R = \psi(p_R) \quad (13)$$

$$\text{当 } r=r_w \text{ 时: } \psi_R = \psi(p_w) \quad (14)$$

将式(11)近似积分得:

$$\frac{\exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)] - 1}{\alpha_\psi} = A Q_{sc} + B Q_{sc}^2 \quad (15)$$

## 2 新产能方程的求解

$$y = \frac{\exp[-\alpha_\psi(\psi_R - \psi)] - 1}{\alpha_\psi Q_{sc}} \quad (16)$$

若求得地层的拟压力对应的渗透率模量,则根

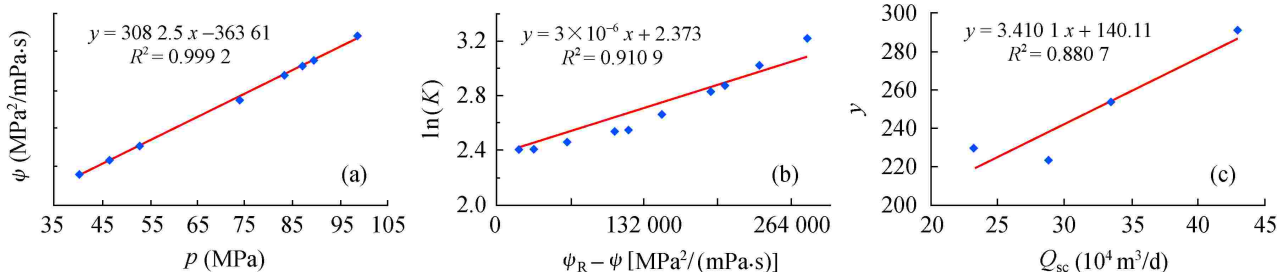


图2 河坝1井压力—拟压力关系、渗透率模量试验结果、改进拟压力二项式产能方程曲线图

据测试的压力和产量数据,可以计算求得  $y$ 。以  $y$  作为纵坐标,以  $Q_{sc}$  作为横坐标,在直角坐标系下绘制关系曲线,则在理论上应得到一条直线。利用线性回归求得系数  $A$ 、 $B$  后,可以求得最大无阻流量。式中  $\alpha_\psi$  的值可以根据应力敏感试验数据,利用式(4)拟合。

## 3 新产能方程在河坝1井的应用

河坝1井下三叠统飞仙关组三段主力气层埋藏较深,深度4870~5012 m。河坝1井飞三段射孔井段(4970~4984 m)的压力、温度测试结果:原始地层压力为111.11 MPa,地层温度为132℃。地层压力及温度绝对值高,计算的温度梯度为2.38℃/100 m,地层压力系数高达2.3,为典型的异常高压气藏<sup>[6]</sup>。

在高压和超高压条件下,拟压力与压力为直线关系。根据河坝1井的实际情况计算得到不同压力所对应的拟压力,从而建立了该井的压力—拟压力图版(图2-a)。

从河坝1井的实际的岩样分析拟合出与净覆压对应的拟压力和渗透率的关系曲线(如图2-b),可以得到  $\alpha_\psi$  为  $-3 \times 10^{-6}$  (MPa<sup>2</sup>/mPa·s)<sup>-1</sup>。

根据河坝1井的实际情况,由2007年9月试井资料(表1)得出  $A$  和  $B$  的系数分别为139.29和3.4621(图2-c),即河坝1井的改进拟压力二项式产能方程为:

$$\frac{1 - \exp[3 \times 10^{-6}(\psi_R - \psi)]}{3 \times 10^{-6}} = 140.11 Q_{sc} + 3.1401 Q_{sc}^2 \quad (17)$$

表1 河坝1井产能试井资料表

$Q(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$	$p_{wf}(\text{MPa})$	$\psi_{Rf}[\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})]$
23.22	102.49	279 770.59
28.78	102.13	278 639.31
33.50	101.44	276 537.05
43.00	100.10	272 394.17

计算无阻流量( $Q_{AOF}$ )为  $226.1465 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

而根据 2007 年 9 月试井资料,采用常规的拟压力二项式产能方程方法计算得到的拟压力产能方程为:

$$\psi - \psi_f = 129.37 Q_{sc} + 3.8985 Q_{sc}^2 \quad (18)$$

计算无阻流量( $Q_{AOF}$ )为  $255.966 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

## 4 结 论

1)建立了异常高压气藏渗透率应力敏感的产能方程,同时给出了方程的求解方法。

2)对河坝 1 井的计算实例结果表明,用改进拟压力产能方程求出的绝对无阻流量为  $226.1465 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,而不考虑应力敏感时计算的绝对无阻流量为  $255.966 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。前者比后者减小 11.65% 左右。

3)在对异常高压气藏建立产能方程时,在允许的条件下需要考虑透率应力敏感。

### 符 号 说 明

$A$ 、 $B$  为产能方程系数; $\psi$  为拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $p$  为压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_0$  为参考点的压力,  $\text{MPa}$ ;  $\mu$  为气体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $Z$  为气体偏差系数, 无因次;  $\psi_R$  为地层静压, 是  $p_R$  时对应的拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $\psi_f$  为井底流动压力为  $p_{wf}$  对应的拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $Q$ 、 $Q_{sc}$  分别为气井产量和气井地面标况下的产量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{AOF}$  为气井绝对无阻流量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $p_R$  为气藏平均地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_e$ 、 $p_w$  分别为有效

覆压和井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $\psi_f$  为  $p_w$  对应的拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $K$ 、 $K_i$ 、 $K(\psi)$  分别为渗透率、 $\psi_f$  和拟压力  $\psi$  下的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $r$  为距离气井井轴的径向距离,  $\text{m}$ ;  $v$  为气体渗流速度,  $\text{m/s}$ ;  $\beta$  为湍流速度系数,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\rho$ 、 $\rho_c$  分别为气体密度和地面标准状况下气体密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $\alpha_f$  为拟压力对应的渗透率模量,  $[\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})]^{-1}$ ;  $h$  为气藏有效厚度,  $\text{m}$ ;  $T$ 、 $T_{sc}$  分别为地层温度和地面标准状况下温度,  $\text{K}$ ;  $R$  为通用气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $r_w$  为井筒半径,  $\text{m}$ ;  $D$  为湍流系数,  $(10^4 \text{ m}^3/\text{d})^{-1}$ ;  $\gamma_g$  为气体相对密度, 无因次。

### 参 考 文 献

- [1] 杨继胜.采气工艺基础[M].北京:石油工业出版社, 1989.
- [2] 杨永智,廖新维,沈平平,等.应力敏感性高压气井流入动态分析[J].天然气工业,2006,26(6):100-101.
- [3] 杨胜来,肖香娇,王小强,等.异常高压气藏岩石应力敏感性及其对产能的影响[J].天然气工业,2005,25(5):94-95.
- [4] 廖新维,冯积累.超高压低渗透气藏应力敏感试井模型研究[J].天然气工业,2005,25(2):110-112.
- [5] 王建光,廖新维,杨永智.超高压应力敏感性气藏产能评价方法[J].新疆石油地质,2007,28(2):216-218.
- [6] 张数球,刘传喜,刘正中.异常高压气藏产能特征分析——以四川盆地河坝场构造飞三气藏河坝 1 井为例[J].石油与天然气地质,2008,29(3):376-382.

(修改回稿日期 2009-03-27 编辑 韩晓渝)