



天然气井空井压井拟瞬态设计理论

——第一次井底压力等于地层压力

刘 凯

(西南石油学院)

内容提要 本文将地层、井筒、井口考虑成一个相互制约,相互影响的连通体系。利用地层气体渗流数学模型,建立了天然气井空井压井的拟瞬态设计理论,解决空井压井的泥浆密度、排量、用量及立管压力、套压等参数的计算问题和施工控制问题。

主题词 天然气 气井 喷空压井 拟瞬态设计 施工 监视控制

第一次井底压力等于地层压力的空井压井拟瞬态设计理论

(一)几个基本概念

为研究、设计和应用方便,下面给出一些定义:

1. 压井泥浆刚从钻杆出钻头时所对应的井底压力名初始井底压力;
 2. 压井泥浆刚到环空时与井喷气体在井底相混合所形成的井底混合物名第一次井底混合物;
 3. 混合物第一次返至井口所对应的井底压力名第一次井底压力;
 4. 第一次井底压力所对应的井底混合物名第二次井底混合物;
 5. 混合物第二次返至井口时所对应的井底压力名第二次井底压力。
- 以此类推,设 $i=0,1,2,3,\dots,N$, 则:
6. 第 $i-1$ 次井底压力所对应的井底混合物名第 i 次井底混合物;
 7. 混合物第 i 次返至井口时所对应的井底压力名第 i 次井底压力。

(二)第一次井底压力等于地层压力的空井压井数学模型及参数的确定

在压井泥浆刚出钻头到混合物第一次返至井口的过程中,环空中的第一次井底混合物逐渐上升,其上面为井喷气体,下面为压井泥浆与井喷气体的混合物。在混合物井段任意截面上的气体含量各不相同。其含量不仅与钻具组合、井身结构、泥浆性能有关,而且还与地层特性、井喷气体特性有关。在混合物段环空中任取微元段 dx , 设其对应压降为 dp , 则有:

$$dp = (g + f_{mix})\gamma_{mix}dx \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度,其值为 9.8m/s^2 ; f_{mix} 为混合物摩阻压降系数, m/s^2 ; γ_{mix} 为混合物密度, g/l 。

在略去混合物中气体重量情况下,有:

$$\gamma_{\text{mix}} = \frac{Q_m}{Q_m + Q_g} \gamma_m \quad (2)$$

式中, Q_m 为压井泥浆排量, m^3/s ; Q_g 为微元段在井底时的地层气体喷量, m^3/s ; γ_m 为压井泥浆密度, g/l 。

由二项式渗流定律可得井喷气体与井底压力 $P_{(0,0)}$ 的关系:

$$P_i^2 - P_{(0,0)}^2 = A Q_{m(0)} + B Q_{m(0)}^2 \quad (3)$$

式中 P_i 为原始气层压力, kPa ; $P_{(0,0)}$ 为 t 时刻的井底压力, kPa ;

$Q_{m(0)}$ 为在井底压力为 $P_{(0,0)}$ 时标准状态下的气体喷量, m^3/s ; A 、 B 分别为二项式渗流系数, 当 $B > 0$ 时由 (3) 式可得 $Q_{m(0)}$:

$$Q_{m(0)} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(P_i^2 - P_{(0,0)}^2)}}{2B} = B'_1 + B'_2 \sqrt{C - P_{(0,0)}^2} \quad (4)$$

$$\text{式中 } B'_1 = -\frac{A}{2B}, B'_2 = \frac{1}{\sqrt{B}}, C = \frac{A^2}{4B} + P_i^2.$$

设在 t_1 时刻微元段在井底, 井底压力为 $P_{(0,t_1)}$, 对应喷量为 $Q_{m(0,t_1)}$; 在经过 Δt 时间之后的 t 时刻, 微元段上升到距井底 x 处, 此时微元段所受压力为 $P_{(x,t)}$ 对应气体含量仍为 $Q_{m(0,t_1)}$ 。忽略纯气柱压力减少所引起的井内压力降低, 可得到:

$$P_{(0,t_1)} \approx P_{(x,t)} \quad (5)$$

于是, 综合 (1)~(5) 式, 再利用气体状态方程就可得到:

$$dp_{(x,t)} = (g + f_{\text{mix}}) \times \frac{\gamma_m Q_m}{Q_m + \frac{B_1}{P_{(x,t)}} + \frac{B_2 \sqrt{C - P_{(x,t)}^2}}{P_{(x,t)}}} dx \quad (6)$$

式中 $B_1 = \frac{P_i Z T A}{2 Z T_0 B}$, $B_2 = \frac{P_i Z T}{Z T_0 \sqrt{B}}$, P_i 为标准状态下的压力, kPa ; T_0 为标准状态下的温度, K ; Z_0 为 (P_i, T_0) 下的气体压缩系数; T 、 Z 分别为井筒平均温度和平均压缩系数。

记压井泥浆刚出钻头为零时刻, 则在 t 时刻, 就混合物而言, 对微分方程 (6) 式分离变量, 两边分别对 dx 、 $dp_{(x,t)}$ 从 $0 \rightarrow L_{(t)}$ ($L_{(t)}$ 为 t 时刻混合物高度, m)、 $P_{(0,0)} \rightarrow P_{(0,t)}$ 积分可得:

$$L_{(t)} = \frac{1}{\gamma_m Q_m (g + f_{\text{mix}})} \{ Q_m [P_{(0,t)} - P_{(0,0)}] + B_1 \ln \frac{P_{(0,t)}}{P_{(0,0)}} + B_2 \sqrt{C} \ln \frac{P_{(0,t)} [\sqrt{C - P_{(0,t)}^2} - \sqrt{C}]}{P_{(0,0)} [\sqrt{C - P_{(0,0)}^2} - \sqrt{C}]} + B_2 [\sqrt{C - P_{(0,t)}^2} - \sqrt{C - P_{(0,0)}^2}] \} \quad (7)$$

上式即为混合物第一次到达井口之前, 混合物高度 $L_{(t)}$ 与井底压力 $P_{(0,t)}$ 的关系式。式中 $P_{(0,t)}$ 为 t 时刻 $L_{(t)}$ 处的压力, kPa :

$$P_{(0,t)} = \sqrt{P_i^2 e^{\frac{2H}{a}} + \beta (e^{\frac{2H}{a}} - 1)} \quad (8)$$

H_0 为上部纯气柱长度, m :

$$H_0 = H - L_{(t)} \quad (9)$$

$$a = \frac{Z T R_m}{g M_m \gamma_m} \quad \beta = \left(\frac{f_0}{2 g D_m} \right) \left(\frac{Q_{m(0)} P_i Z T}{S_m Z T_0} \right)^2$$

R_m 为通用气体常数, $R_m = 8.3143 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M_a 为空气分子量, $M_a = 28.966 \times 10^{-3} (\text{kg}/\text{mol})$; γ_a 为天然气比重, 无量纲; f_a 为天然气流动摩阻系数; D_a 为环空当量直径, m ; S_a 为环空横截面积, m^2 ; P_a 为环空所控制的环空回压, kPa 。

同样, 可以推得井底压力随时间的变化关系:

$$P_{(0,t)} = P_{(0,0)} + \frac{\gamma_m Q_m}{S_a} (g + f_{mx}) t. \quad (10)$$

如果要求压井过程中第一次井底压力等于地层压力, 即第一次井底混合物刚返至井口时井底压力就等于地层压力, 则有以下条件成立:

$$\begin{cases} P_{(0,t)} = P_t \\ L_{(t)} = H \\ P_{(L(t),t)} = P_a \end{cases} \quad (11)$$

将(11)代入(7)式中则得:

$$H = \frac{1}{\gamma_m Q_m (g + f_{mx})} \{ Q_m (P_t - P_a) + B_1 \ln \frac{P_t}{P_a} + B_2 \sqrt{C} \ln \frac{P_a [\sqrt{C - P_t^2} - \sqrt{C}]}{P_t [\sqrt{C - P_a^2} - \sqrt{C}]} + B_2 [\sqrt{C - P_t^2} - \sqrt{C - P_a^2}] \} \quad (12)$$

由此可以求得, 在给定压井泥浆密度 γ_m 的情况下所需要的压井泥浆排量 Q_m 为:

$$Q_m = \frac{B_1 \ln \frac{P_t}{P_a} + B_2 \sqrt{C} \ln \frac{P_a [\sqrt{C - P_t^2} - \sqrt{C}]}{P_t [\sqrt{C - P_a^2} - \sqrt{C}]} + B_2 [\sqrt{C - P_t^2} - \sqrt{C - P_a^2}]}{[P_a - P_t + (g + f_{mx}) \gamma_m H]} \quad (13)$$

可见, 所需要的压井泥浆排量不仅与钻具组合、井身结构、泥浆性能有关, 而且还与地层特性、地层流体特性有关, 它是这些参数综合的结果。

如果实际压井泥浆排量较由上式所计算的压井泥浆排量大, 则在混合物还没有到达井口之前, 井底压力就已等于地层压力。

如果实际压井泥浆排量较由上式所计算的压井泥浆排量小, 则在混合物到井口之前(包括刚到井口)就不能保证井底压力平衡地层压力, 地层气体还将继续向井筒流入。

由(13)式确定出排量之后, 即可确定当井底压力平衡地层压力时, 实际施工中所应该达到的泵压(或立管压力)值。实际压井作业中, 泵压的确定也是很关键的参数, 它决定到底是继续保持套压恒定, 还是保持泵压恒定的主要依据。正确的作法应先由(13)式设计压井泥浆排量 Q_m , 再由下面的(14)式确定泵压。不是先假设一个泵压, 再反求压井泥浆排量。

当已确定出压井泥浆排量 Q_m 后, 井底压力平衡地层压力时, 预计的泵压(或立管压力)值通常由以下经验公式来确定:

$$P_d = K \gamma_m H Q_m^2 + C \gamma_m Q_m^2 \quad (14)$$

式中,

$$n = \left[\lg \frac{P_{d1} - C \gamma_{m0} Q_{m1}^2}{P_{d2} - C \gamma_{m0} Q_{m2}^2} \right] / \lg (Q_{m1} / Q_{m2})$$

$$K = \frac{P_{d1} - C \gamma_{m0} Q_{m1}^2}{\gamma_{m0} H Q_{m1}^2}$$

γ_{m0} 为正常钻井时的泥浆密度, g/l; P_{d1} 、 P_{d2} 为正常钻进时在排量分别为 Q_{m1} 、 Q_{m2} 时所测得的立管压力值, kPa; C 为常数(当喷嘴结构及其组合方式一定之后)。

为求得压井所需泥浆用量 V_k , 把(11)代入(10)式中即可得混合物第一次到达井口所需时间 T_1 (s):

$$T_1 = \frac{(P_1 - P_s)S_a}{\gamma_m Q_m (g + f_{m1})} \quad (15)$$

将 T_1 与 Q_m 相乘即得平衡原始地层压力所需泥浆用量。考虑到井底压力平衡地层压力之后, 尚需把环空中的混合物排除, 同时还必须包括钻柱内容积, 故实际所需压井泥浆用量 V_k 为:

$$V_k = V_d + V_s + (P_1 - P_s)S_a/\gamma_m(g + f_{m1}) \quad (16)$$

式中 V_d 、 V_s 分别为钻杆内容积和环空容积, m^3 。

(三) 实际压井作业问题

1. 压井过程

在条件许可的情况下, 从压井一开始就用恒定的压井排量(由(13)式确定)从钻杆中向井内打入泥浆, 直到压井结束。

2. 套压与立压的控制

(1) 在累计打入压井泥浆量小于或等于 V_{k1} 时, 即:

$$\Sigma V_m \leq V_{k1} = V_d + (P_1 - P_s)S_a/\gamma_m(g + f_{m1})$$

时, 则以控制环空回压为最大许用环空回压的原则来调节阻流器的大小。如果当累计泵入泥浆量已等于 V_{k1} 时, 立管压力还没有上升到预计的立管压力值(由(14)式确定), 则继续控制环空回压为最大许用环空回压, 直到立管压力上升到预计的立管压力值。

(2) 当立管压力上升到预计的立管压力后, 调节阻流器的大小, 保持立管压力为预计的立管压力值, 直到压井结束。

3. 几条特殊措施

(1) 在累计泵入压井泥浆量小于钻杆内容积 V_d 之前(包括在开始压井作业之前), 可降低环空回压使之放喷, 造成井眼周围的地层压力亏空。但在压井泥浆出钻头时, 应立即控制环空回压为最大许用环空回压。主要目的是为了尽快建立起环空液柱压力, 尽快结束压井作业。但防裸眼井壁垮塌, 环空回压不能控制得太低。

(2) 如果刚开始压井时立管压力过大, 则除了降低环空回压外, 还可用小排量进行压井。但要注意在这一阶段中最好不要使立管压力低于零。

(3) 当立管压力上升到预计的立管压力之后, 如果立管压力过大, 则也可用小排量排除环空混合物, 但仍须保持立管压力恒定, 保证井底压力恒大于或等于地层压力。不过此时的立管压力值为相应的小排量下的立管压力值。

(四) 影响压井作业的几个主要参数的规律分析

通过计算, 得出以下一些参数对压井作业的影响规律。由于是一般规律的认识, 故图形(坐标)中无坐标单位。

1. 压井泥浆排量对井底压力的影响

在压井泥浆密度一定的情况下, 由公式(10)和(8)可作出压井过程中不同压井排量下的井

底压力 P_b 随时间的变化关系曲线(图1)。

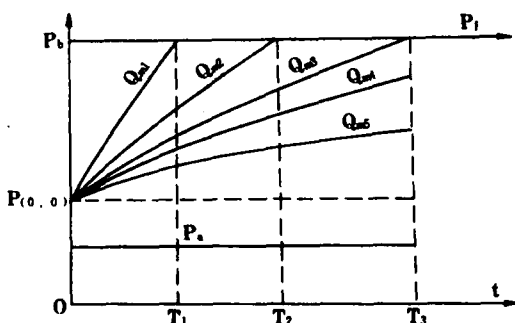


图1 不同压井泥浆排量($Q_{m1} > Q_{m2} > Q_{m3} > Q_{m4} > Q_{m5}$)情况下井底压力 P_b 随时间的变化规律

从图1中可以看出:

(1)不同压井泥浆排量情况下,井底压力与时间的变化关系曲线都近似地成一条直线。如果不考虑混合物上部纯气柱的减少所引起的井底压力变化,则就是一条直线。

(2)不同排量情况下井底压力增加的速度各不相同。排量越大,增加得越快;反之,则越慢。同时,各条曲线的斜率之比,近似地等于其排量之比。

(3)图中 T_3 为第一次井底混合物刚到井口的时间。可见 Q_{m3} 就是要求第一次井底压力等于地层压力所对应的排量。因为 $Q_{m1} > Q_{m2} > Q_{m3}$, 故当用 Q_{m1} 或 Q_{m2} 的排量进行压井时,混合物还没有返至井口,井底压力便达到地层压力,不再有气体进入井筒(在图中表现为 $T_1 < T_2 < T_3$)。当压井泥浆排量小于 Q_{m3} ($Q_{m5} < Q_{m4} < Q_{m3}$) 时,不可能达到第一次井底压力就等于地层压力。此时,用前面所介绍的方法无法求出压井所需泥浆用量。

2. 环空回压对井底压力的影响

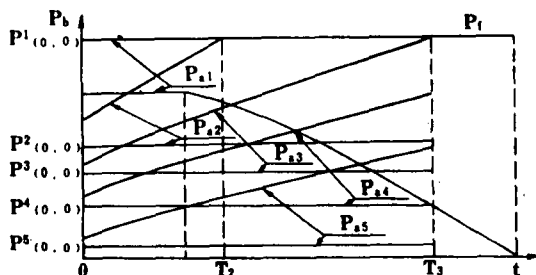


图2 不同环空回压对井底压力变化规律的影响曲线

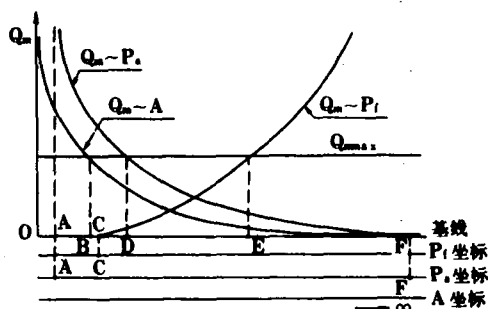


图3 压井泥浆排量影响曲线

图2描述了不同环空回压下,混合物第一次到达井口前井底压力随时间的变化规律。图中每一组箭头所指的细实线为压井过程中所控制的套压,粗实线为对应套压下的井底压力随时间的变化规律。

从图中可以看出,在其它参数一定的情况下:

(1)套压越大,压井越容易;套压越小,压井越困难。图中 $P_{1.1} > P_{1.2} > P_{1.3} > P_{1.4} > P_{1.5}$, 故压井所需时间 T 为: $T_1 < T_2 < T_3$ 。在 $P_{1.4}$ 、 $P_{1.5}$ 两个套压下,无法达到混合物第一次到达井口前,井底压力

就平衡了地层压力。所以,在实际中,应尽量控制压井套压为最大许用套压。

(2)图中 P_{as} 所对应的一组曲线为井口敞喷时的情况。如用定向救援井对付井口完全失控、井口着火的井喷,就属于这种情况。对此将在续篇(刊载《天然气工业》第9卷第5期)内讨论,兹不赘述。

(3)图中 P_{ai} 所对应的一组曲线为井口能完全关井情况下的井口环空回压与井底压力随时间的变化关系曲线。当气层较浅,气层套管或技术套管下得较深,而井口防喷系统具有足够的承压能力和中试后的压井作业等都属于这种情况。此时关井稳定后的井底压力就是原始气层压力。在压井过程中,从压井一开始就能够始终保持井底压力与地层压力平衡(图中表现为二条线重合),故这种情况下的压井作业属于常规井控的范畴,比较简单,在此也不详述。

3. 地层压力、环空回压、地层特性等参数对压井泥浆排量的影响

图3描述了要求第一次井底压力等于地层压力条件下,地层压力、环空回压、地层特性等参数对所需压井泥浆排量的影响。从图中可以看出:

(1)就 $Q_m \sim P_i$ 曲线而言,C点为地层压力等于井口环空回压的点。在其它参数一定的情况下,地层压力越高,所需压井排量越大。当 P_i 增加到E点已不能保证第一次井底混合物到井口前,使井底压力等于地层压力,因排量已超过了实际所能达到的最大压井排量 Q_{max} 。反之,地层压力越低,所需压井排量就越小。当 P_i 小到等于井口环空回压(C点)时,所需压井排量为零,可理解为压井排量相当小。这相当于能够完全关井的情况,此时即使不进行压井作业,地层气体也不会进入井筒。

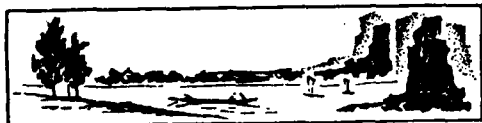
(2)就 $Q_m \sim P_s$ 曲线而言,A点代表井口敞喷的情况,F点代表井口环空回压等于地层压力的情况。可见,套压越大,所需排量越小,当 $P_s = P_i$ 时,所需排量为零[与第(1)点分析结果相同];套压越小,所需排量越大,当套压小到D点的时候,已不能达到第一次井底压力等于地层压力之目的(因 $Q_m > Q_{max}$)。

(3)曲线 $Q_m \sim A$ 描述了当 $B=0$,即达西渗流情况时,所需压井排量与A之间的关系。因A与地层渗透率和打开气层厚度的乘积成反比,故A表征了地层的渗流能力,从图中可以看出,A越小,即 kh (k :地层渗透率, h :打开气层厚度)越大,所需压井排量越大。A越大,即 kh 越小,所需压井排量越小,当 $A \rightarrow \infty$,即 $kh \rightarrow 0$ 时,所需压井排量为零,因地层喷量将趋近于零之故。

参 考 文 献

1. R. D. Grace, "Practical Considerations in Pressure Control Procedures in Field Drilling Operations" (JPT), 1977, Aug.
2. 郝俊芳, 刘 凯 "非常规井控技术" SPE17845
3. 刘 凯 《平衡钻井与井控技术》 钻井工程师短训班教材第四章

(本文收到日期 1988年11月21日)



systems formed by displacement conversion are the favourable position for exploration. Some examples are listed in this paper to explain the relation between various conversion types of the faults and fracture growing as well as natural gas accumulation.

Subject Headings: East Sichuan, fault, displacement conversion, fracture growing zone, natural gas accumulation

Zhang Yuehua, Wang Tan

15 Primary Discussion on the Fault Effects of the Reservoirs in Yangxin Series in Southeast Sichuan

The faults are growing in Yangxin Series, Permian, in Southeast Sichuan. The fractures, formed by lateral effect, terminal effect and intersection effect in the formation and development of faults, had paid an important action on the reservoirs in Yangxin Series. To counter this problem, after defining the concepts and types of the fault effects, this paper emphatically discusses the relation between the three fault effects and fracture growing as well as natural gas accumulation in Yangxin Series.

Subject Headings: Southeast Sichuan, Lower Permian, fault effect, fracture growing zone, natural gas accumulation.

Wu Kang

19 Optimum Variable Successive Overrelaxation (OVSOR) of Three-Dimensional Numerical Simulation for Double Porous Media

This paper presents a theorem of OVSOR of three-dimensional numerical simulation for double porous media, and gives a calculative formula of OVSOR factors. This method has very good stability and convergence, and causes the complex three-dimensional simulation for double porous being able to carry out on microcomputers, so that it is convenient to be applied and popularized in the oilfields.

Subject Headings: double porous media, three-dimensional model, optimization, theorem of OVSOR, oil reservoir, calculative formula.

Feng Wenguang

DRILLING/PRODUCTION TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

23 Design Theory of Quasi-Transient State of Killing Well in Empty Hole Filling with Natural Gas—The First Bottom Pressure is Equal to the Formation Pressure

This paper considers that formation, borehole and well head constitute a connective system restricting and influencing each other. Using the mathematical model of formation gas seepage flow, the design theory of quasi-transient state of killing well in empty holes filling with natural gas is set up, and the parameter calculations of the density pump capacity, volume of the mud and stand pipe pressure as well as casing pressure etc and the problems of operation control are resolved.

Subject Headings: natural gas, gas well, killing well in empty hole, quasi-transient state design, operation monitor, control.

Liu Kai