

# 气井泥浆喷空后的压井

雷宗明\*  
(重庆石油高等专科学校)

林安村  
(四川石油管理局钻采工艺技术研究院)

雷宗明等. 气井泥浆喷空后的压井. 天然气工业, 1997; 17( 2): 45 ~48

**摘 要** 气井泥浆喷空后的压井, 如果压井方法不当, 措施不正确, 不仅会导致压井失败, 浪费人力、时间和材料, 而且对油气产层还可能造成严重污染和损害。对于气井泥浆喷空后的压井, 现在还没有一种比较成熟的方法, 仍是根据经验来确定各压井参数和制定压井工艺措施, 成功率不高, 其结果往往导致压井失败或将地层压漏。在详细分析气井泥浆喷空后压井过程的基础上建立了平衡点的概念和环空气液两相流模型并结合现场实践经验, 提出了气井泥浆喷空后各压井参数的计算方法以及压井施工工艺措施。

**主题词** 气井 钻井液 井喷 压井 平衡压力钻井

## 压井模式

### 1. 压井流程

气井泥浆喷空后的情况是井内泥浆全部喷空, 防喷器关闭, 钻柱在井底, 天然气经过放喷管线放喷。根据“U”型管连通器的原理可以将其简化为图 1A 所示的情况。对气井泥浆喷空后的压井, 其整个压井过程可以分为两个阶段。第一阶段: 压井泥浆到达井底前, 压井泥浆在钻具内下行, 环空为气柱, 如图 1B 所示; 第二阶段: 压井泥浆到达井底后沿环空上返, 如图 1C 所示。

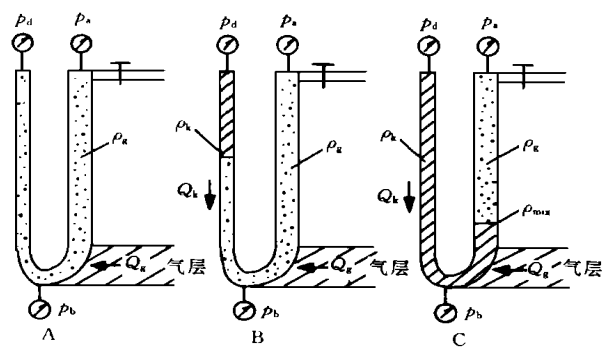


图 1 “U”型管连通器原理

Fig. 1. Principle of “U” shape communicating pipe.

### 2. 平衡点

由于泥浆喷空后, 井内无液柱压力的作用, 因此压井开始时控制的井口回压加上环空天然气的流动

压力和静压力, 一般情况下都不能达到保持井底压力等于或大于地层压力这一压井原则。在压井的第二阶段, 压井泥浆从井底沿环空上返, 如果由压井泥浆的静液压力加上流动压力以及井口回压所形成的井底压力不能与地层压力平衡, 那么地层中的天然气就要继续流入井内, 与压井泥浆混合形成气液两相混合流动; 如果井底压力刚好达到与地层压力平衡, 地层中的天然气就停止流入井内, 从这一时刻起进入环空的压井泥浆就是纯液柱。由此可见, 压井的转折点就是压井泥浆进入环空后形成的压力达到与地层压力平衡这一时刻, 我们把这一时刻称为平衡点。井底压力与地层压力的平衡是动态过程, 它与地层特性、地层压力、压井排量、压井泥浆密度、井口回压等有关。

## 压井参数

### (1) 地层压力

根据天然气放喷量, 放喷时的井底流动压力应用产气二项式方程便可求得地层压力。

$$p_f = (p_s^2 + A Q_g + B Q_g^2)^{0.5} \tag{1}$$

式中:  $p_f$  为地层压力;

$p_s$  为放喷时的井底流动压力;

$Q_g$  为天然气放喷量;

$A$  为达西流动系数(与岩石渗透率、气体粘度、气层厚度等有关);

$B$  为非达西流动系数(与气体密度、岩石孔隙

\* 雷宗明, 1955 年生, 副教授; 1982 年毕业于西南石油学院。1986 年至 1989 年在美国得克萨斯州大学石油工程系学习, 获硕士学位, 现从事教学和科研工作。地址: (630042) 四川省重庆市大坪石油路 1 号。电话: (0811) 8810405 或 8813338。

度等有关)。

(2) 压井泥浆密度

$$\rho_k = \frac{p_f}{0.0098L} \quad (2)$$

式中:  $\rho_k$  为压井泥浆密度,  $g/cm^3$ ;

$p_f$  为地层压力, MPa;

$L$  为气层井深, m。

(3) 压井排量

在气井泥浆喷空后的情况下压井, 第一阶段, 即井底压力达到能平衡地层压力之前, 天然气还要不断地进入井内, 因此为了较快地建立起环空液柱从而平衡地层压力, 可选用该井所允许的最大循环泵压作为计算压井排量的依据, 即

$$p_{\max} = \min\{p_r, p_e\} \quad (3)$$

式中:  $p_{\max}$  为最大循环泵压;

$p_r$  为缸套的额定压力;

$p_e$  为地面管汇的最大承受压力。

在井底压力与地层压力平衡后, 即达到平衡点后, 为了降低循环泵压, 减小设备负荷, 降低环空流动阻力, 防止压漏地层, 压井排量应采用小排量。压井排量可用下式计算:

1) 钻头未装喷嘴

$$Q_k = Q \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \left( \frac{\rho_k}{\rho_m} \right)^{0.8} \left( \frac{\eta_k}{\eta} \right)^{0.2} \right]^{\frac{1}{1.8}} \quad (4)$$

式中:  $Q$  为泥浆排量,  $m^3/s$ ;

$\rho_m$  为泥浆密度,  $kg/m^3$ ;

$\eta$  为泥浆塑性粘度, Pa;

$p_1$  为井喷前的循环泵压;

$\eta_k$  为压井泥浆的塑性粘度。

令  $p_2 = p_{\max}$  代入上式即可求出压井排量( $Q_k$ )。

2) 钻头装有喷嘴

$$p_1 = K_c Q^{1.8} + K_b Q^2 \quad (5)$$

$$p_2 = \left[ \left( \frac{\rho_k}{\rho_m} \right)^{0.8} \left( \frac{\eta_k}{\eta} \right)^{0.2} K_c Q_k^{1.8} + \frac{\rho_k}{\rho_m} K_b Q_k^2 \right] \quad (6)$$

用井喷前的两组( $p$ ,  $Q$ ) 值代入方程(5) 求出系数  $K_c$ ,  $K_b$  的值, 再令  $p_2 = p_{\max}$  代入方程(6) 即可求出压井排量( $Q_k$ )。

达到平衡点后即可采用正常压井循环排量循环以减小设备的负荷, 即

$$Q_k = \left[ \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right] Q \quad (7)$$

(4) 平衡点的计算

气井泥浆喷空后在井眼附近, 由于天然气的渗流流动形成一压力降, 因此在环空液柱压力建立后,  $Q_g$  逐渐减小, 井眼附近的压力逐渐恢复直至地层压

力( $p_f$ ), 所以平衡点实质上就是井内液柱压力达到与地层压力平衡或同步的那一时间点。

在压井循环的第二阶段, 井底压力为:

$$p_b = p_a + p_{cga} + p_{hga} + p_{cmin} + p_{hmin} \quad (8)$$

达到平衡时  $p_b = p_f$  所以

$$p_a + p_{cga} + p_{hga} + p_{cmin} + p_{hmin} = p_f \quad (9)$$

下面分两种情况来讨论方程(9):

1) 如果忽略环空气柱的静压力, 流动压力, 也不考虑环空气液两相的混合流动, 则

$$p_{cga} = 0, p_{hga} = 0, p_{cmin} = 0$$

$$p_{hmin} = p_{hk}$$

$P_{hk}$  为环空中压井泥浆的静液柱压力。

方程(9) 变为

$$p_a + p_{hk} = p_f \quad (10)$$

$$\text{而 } p_{hk} = 0.0098\rho_k L_k \quad (11)$$

$$L_k A_a = Q_k t \quad (12)$$

式中:  $L_k$  为环空中压井泥浆的高度;

$A_a$  为环空截面积;

$t$  为时间。

由式(10)、(11)、(12) 即可解出达到平衡的时间  $t_B$ , 注意  $t_B$  应从压井泥浆开始由钻头上返时算起。

2) 如果在计算中仅忽略环空气柱的静压力, 流动压力  $p_{cga}$  和  $p_{hga}$ , 考虑在达到  $t_B$  前压井泥浆与天然气为气液两相混合流动, 则

$$p_a + p_{cmin} + p_{hmin} = p_f \quad (13)$$

这样必须进行气液两相混合流动的压降计算, 以求出  $p_{cmin}$  和  $p_{hmin}$ 。

从前面的分析可知, 由于  $Q_g$  随时间的增加而减小, 故压井时的压井泥浆与天然气的两相混合流动属一维非稳定的气液两相流问题。对这类问题可以通过数值的方法解决。处理的方法是假定在给定的时间内其流动可以简化为一维稳定流来计算, 随时间的增加连续计算, 直至  $p_b = p_f$  为止, 从而求出达到平衡的时间  $t_B$ 。

(5) 压井泥浆量

$$V_{\min} = V_t + Q_{k\max} t_B + V_s \quad (14)$$

式中:  $V_{\min}$  为最小压井泥浆量;

$V_t$  为钻具内容积、环空容积之和;

$Q_{k\max}$  为最大压井排量;

$t_B$  为达到平衡点的时间;

$V_s$  为泥浆储备量(维持循环所需地面泥浆量)。

气井放喷量计算

应用临界流动时的气产量公式:

$$Q_{g1}=18.9796\frac{p_2D^2}{Z_2\delta T_2}\tag{15}$$

式中:  $Q_{g1}$ 为天然气放喷量,  $m^3/d$ ;  
 $p_2$  为放喷管出口压力, MPa;  
 $D$  为放喷管内径, mm;  
 $Z_2$  为放喷管出口天然气压缩系数;  
 $\delta$  为天然气的相对密度;  
 $T_2$  为放喷管出口天然气温度, K。

再应用输气公式, 其产量为:

$$Q_{g2}=3.4313D^{8/3}\left(\frac{p_1^2-p_2^2}{Z_{cp}\delta T_{cp}L}\right)^{0.5}\tag{16}$$

式中:  $Q_{g2}$ 为天然气产量,  $m^3/d$ ;  
 $p_1$  为放喷时的井口压力, MPa ;  
 $Z_{cp}$  为放喷管内天然气平均压缩系数;  
 $T_{cp}$  为放喷管内天然气平均温度, K;  
 $L$  为放喷管线计算长度, m。

由于天然气在放喷的过程中在管内无漏失, 故 (15) 式应等于 (16) 式, 即

$$Q_{g1}=Q_{g2}=Q_g$$

又由于天然气在管内作等温流动, 即  $T_2=T_{cp}$  所以

$$p_2^2=\left[\frac{D^{4/3}}{30.5954LZ_{cp}/Z_2+D^{4/3}}\right]^{0.5}p_1^2\tag{17}$$

在式(17)中, 由于  $Z_{cp}, Z_2$  与  $p_1, p_2$  有关, 而  $p_2$  此时为未知数, 所以不能计算出  $Z_{cp}, Z_2$ 。只能采用试算法求  $p_2$ , 然后将  $p_2$  代回式 (15) 或 (16) 即可求出天然气放喷量。

气液两相流计算

压井泥浆与天然气在井内混合流动呈非稳定气液两相混合流动状态, 但在处理时可以认为在给定的时刻, 其流动为一维稳定流。因此可以利用一维稳定流的方程, 在给定时刻求解压井泥浆与天然气在环空中的两相混合流动问题。

气液两相流微分方程如下:

$$\frac{dp}{dH}=\frac{\lambda\rho v^2}{2D_{cs}}+\rho g+\frac{\rho vv_g}{p}\frac{dp}{dH}\tag{18}$$

式中:  $\lambda$  为阻力系数;  
 $\rho$  为混合物密度;  
 $v$  为混合物流速;  
 $v_g$  为气相流速;  
 $D_{cs}$  为有效直径。

$$D_{cs}=(D_1^2-D_2^2)^{0.5}\tag{19}$$

式中:  $D_1$  为井眼直径;  
 $D_2$  为钻具外径。

方程 (18) 是一个非线性常微分方程, 其中  $\rho, v, v_g$  都是压力  $p$  的函数。应用数值分析的方法, 可以求解。

计 算 实 例

原始数据: 井深 3 000 m, 放喷管线长 100 m, 内径 92 mm; 最大允许关井套压 10 MPa; 井口温度 20 ; 地热增温率 41.5 m/ ; 井口放喷压力 3 MPa; 天然气的相对密度 0.57; 井径 215 mm, 钻杆外径 127 mm, 内径 105 mm; 不考虑钻铤; 天然气的临界温度 191.85 K, 天然气的临界压力 4.82 MPa。

(1) 根据井口放喷压力 3 MPa, 放喷管线长 100 m 算得天然气的放喷量为  $126.2\times10^4m^3$ ; 地层压力为 67.6 MPa;

(2) 计算压井泥浆密度;  
 $\rho_k=67.6/0.0098/3000=2.30g/cm^3$

设循环系统压耗系数为  $K_L=5.02965\times10^3$ ;

压井泥浆的塑性粘度为  $\eta_k=20mPa\cdot s$ ;

地面管汇的最大承压力  $p_e=17MPa$ 。

(3) 压井排量;  
$$Q_k=(p_e/\rho_k^{0.8}/\eta_k^{0.2}/K_L)^{1/1.8}$$
$$=(17/2.3^{0.8}/0.2^{0.2}/5.02965\times10^3)^{1/1.8}$$
$$=0.035m^3/s$$

(4) 根据地层压力和气液两相流的解(如图 2), 可得平衡时间为  $t_B=29min$ ;

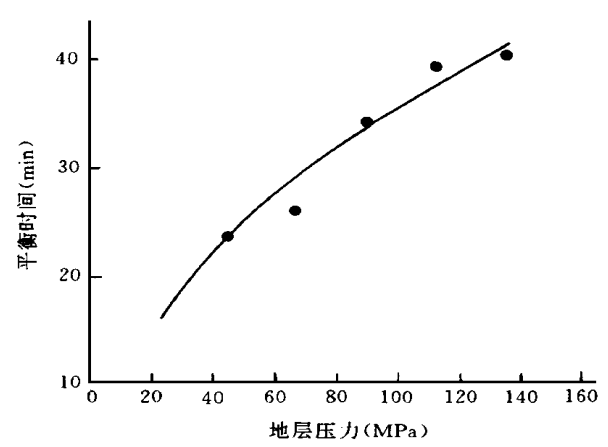


图 2 平衡时间与地层压力的关系  
Fig. 2. Relation between equilibrium time and formation pressure.

(5) 确定最小压井泥浆量;

# 实测钻柱振动特征分析

马 斐\*  
(华南理工大学轻化系)

施太和  
(西南石油学院石油工程系)

马斐等. 实测钻柱振动特征分析. 天然气工业, 1997; 17( 2) : 48 ~51

**摘 要** 结合从现场实际测得的钻柱振动数据较全面地研究了钻柱振动的特征。并分析了由各种振源引起的钻柱振动特征, 包括由钻头与地层之间的相互作用、不规则井壁对钻柱的作用、钻头失效、钻柱的自激振动、地面泥浆泵以及地面动力传动设备等引起的钻柱振动。尤其是对地面动力传动设备引起的钻柱振动, 文中作了较详细地分析, 为进一步研究钻柱振动及今后发展钻柱振动识别技术, 打下了良好的基础。

**主题词** 钻井 钻柱 振动 特征 分析 频谱 测量

钻柱振动通常被认为具有很大的危害性, 它能引起如钻头损伤、钻柱磨损及钻柱疲劳失效等一些故障。但事物总是一分为二的, 钻柱振动有其可利用的一面。由于钻柱系统的固有属性, 即具有一定刚度、一定的弹性和阻力, 它可将钻头及底部钻具组合振动的主要振动特征传递至钻柱的顶部。因此可以通过测量钻柱顶部的振动, 监测下部钻柱的振动状

态。通过振动信号处理和分析, 可以识别钻柱振动的主要特征, 如所钻地层岩性、钻头磨损、钻柱共振、钻柱与井壁之间的相互作用, 以及其它可能的振源。因此, 能否准确地识别振动特征取决于能否把钻头振动所引起的振动特征从钻柱振动所引起的振动特征中分离出来。

钻柱振动是一种很复杂的振动现象, 它不仅有

$$V_{\min}=V_t+Q_k\times t_B+V_s$$
$$V_t=\pi(105^2+215^2-127^2)\times 10^{-6}\times 3\,000/4$$
$$=96.9\,\text{m}^3$$

$$Q_k\times t_B=0.035\times 29\times 60=60.9\,\text{m}^3$$

取  $V_s=50\,\text{m}^3$

$$\text{所以 }V_{\min}=96.9+60.9+50=207.8\,\text{m}^3$$

(6) 计算终了循环压力  $p_{\text{ck}}$ ;

因为  $p_{\text{e}}=p_{\text{ck}}+p_{\text{am}}=\rho_k^{0.8}\eta_k^{0.2}K_{\text{L}}Q_k^{1.8}$

而  $p_{\text{am}}=10\,\text{MPa}$

$$\text{所以 }p_{\text{ck}}=\rho_k^{0.8}\eta_k^{0.2}K_{\text{L}}Q_k^{1.8}-p_{\text{am}}$$
$$=2.3^{0.8}\times 0.2^{0.2}\times 5.0296\,55\times 10^3$$
$$\times 0.035^{1.8}-10=7\,\text{MPa}$$

(7) 作立压、套压曲线;

$$T_1=\pi\times 105^2\times 10^{-6}\times 3\,000/0.035/60/4$$
$$=12.4\,\text{min}$$
$$T_{\text{B}}=t_{\text{B}}+T_1=29+12.4=41.4\,\text{min}$$

$$T_2=T_1+t_{\text{B}}+\pi(215^2-127^2)\times 10^{-6}$$
$$\times 3\,000/0.035/60=75.2\,\text{min}$$

(8) 压井施工步骤(略)。

## 参 考 文 献

1 杨开雄. 压井方法综合应用的参数分析计算. 钻采工艺, 1991

2 姜仁. 井控技术. 东营: 石油大学出版社, 1990

3 陈元千. 油藏工程计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1990

4 史密斯 R V. 实用天然气工程. 北京: 石油工业出版社, 1989

5 陈家琅. 石油气液两相管流. 北京: 石油工业出版社, 1989

〔 审稿人 高级工程师 石仲华 〕  
〔 收稿日期 1996-09-02 编辑 钟水清 〕

\* 马斐, 1963 年生, 博士后; 1994 年在西南石油学院获博士学位, 现在华南理工大学做博士后研究, 从事石油工程、油气开发、制浆废液及污水处理, 已获中国博士后科学基金、广东省博士后科学基金、华南理工大学自然科学基金资助。地址: (510641) 广州市五山。电话: (020) 8711406。

Hu Yong ( *Southwest Petroleum Institute* ), Li Yun, Wang Minghua, Zhong Fuxun: **INFLUENCE OF FORMATION FRACTURES ON THE RECOVERY SCHEME FOR THE OIL-GAS RESERVOIR WITH LOW PERMEABILITY**, NGI 17( 2 ), 1997: 38 ~ 42

**ABSTRACT:** Adopting numerical simulation and up-to-data well testing techniques, the influence of natural fracture, artificial fracture and waterflood induced fracture on recovery scheme for the oil-gas reservoirs with low permeability is analysed. The fracture performance monitoring method of XS oil reservoir is practically researched.

**Subject Headings:** Low permeability reservoir, Fracture azimuth, Fracture extension, Injection-production system, Performance monitoring, Recovery scheme, Well testing numerical simulation.

**Hu Yong**, engineer, graduated in oil-gas field development from Southwest Petroleum Institute with Master<sup>④</sup> degree in 1994; he is engaged in researches on oil-gas field development and oil reservoir engineering; now he is studying for Doctor<sup>⑦</sup> degree in Southwest Petroleum Institute. Add(610051) No. 1, Sec. 1, Fuqing Rd., Chengdu, Sichuan. Tel: (028) 3324911—215652.

Shi Zhonghua ( *Drilling Department of Sichuan Petroleum Administration* ), Wang Junliang: **DEVELOPING THE APPLICATION OF DIRECTIONAL WELL TECHNOLOGY**, NGI 17( 2 ), 1977: 42 ~ 44

**ABSTRACT:** Applying directional well technology to the porous reservoirs with fractures and low permeability, the drop-out straight wells on the high-steep structure and the oil-gas depleted wells, oil-gas reserves and production can be enhanced by secondary exploration and development for increasing the opportunity of drilling through fractures, expanding oil-gas leakage area, reducing oil-gas exhaust resistance. According to the geological characteristics and surface and underground conditions of various gas reservoirs in Sichuan gas fields, the necessity, feasibility and practicable plans of developing directional well technology are expounded.

**Subject Headings:** Sichuan, Oil-gas field, Directional well, Process, Technique, Application.

**Shi Zhonghua**, senior engineer graduated in well drilling from Xi'an Petroleum School in 1956; he has been long engaged in management and research work of well drilling. Add : ( 610051) No. 3, Sec. 1, Fuqing Rd., Chengdu, Sichuan. Tel: (028) 3324911—211755.

Lei Zongming ( *Chongqing Petroleum Higher Training School* ), Lin Ancun: **GAS WELL KILLING METHOD ON CONDITION THAT MUD IS COMPLETELY EJECTED**, NGI 17( 2 ), 1997: 45 ~ 48

**ABSTRACT:** The determination of well killing parameters and techniques by experiences often lead to reservoir damage, serious pollution and kill job failure. Based on analysing well killing process on condition that mud is completely ejected, the concepts of equilibrium point and the model of gas-liquid biphasic flow in annular space are set up. According to on-the-spot experience, the calculation method of various well killing parameters and well killing operating techniques are put forward on the condition that mud is completely ejected.

**Subject Headings:** Gas well, Drilling fluid, Blowout, Well killing, Balanced pressure drilling.

**Lei Zongming**, associate professor, graduated from Southwest Petroleum Institute in 1982; he received Master<sup>④</sup> degree from University of Texas in 1989; now, he is engaged in teaching and research work. Add: (030042) Chongqing, Sichuan. Tel: (0811) 8810405 or 8813338.