

气井超重泥浆司钻法压井

刘 凯

(西南石油学院)

内容提要 超重泥浆司钻法压井为处理天然气溢流提供了一个新的途径。本文给出了必须使用超重泥浆司钻法压井的判断准则；提出了套压与立管压力综合控制的方法，以及先用大排量，后用小排量压井的方法；推导了临界泥浆排量、套压、立管压力、临界泥浆增量、超重泥浆密度与用量等的计算公式；讨论了使用该法压井的实际问题。

在钻井过程中，当井内压力失去平衡而引起井内天然气溢流量较大、环空泥浆柱压力低于地层压力太多时，就不能用常规的司钻法或工程师法压井。“超重泥浆司钻法”为此提供了一种处理天然气溢流的新途径。用该法进行压井时，首先注入一定体积的超重泥浆（密度为 γm_2 ， t/m^3 ）使之进入环空后所产生的液柱压力大于等长度的正常压井泥浆所产生的压力，从而降低井口回压及裸眼井段地层的受力，达到安全压井的目的。所注入的超重泥浆可以是井场已配好的高密度泥浆。

一、使用超重泥浆司钻法压井的前提

当发现井底溢流太晚，溢流量过大时，用司钻法、工程师法就不能进行常规压井作业，否则就可能出现压裂地层、井口压力超过井口许用工作压力或出现二次溢流等复杂情况，此时可采用超重泥浆司钻法压井。是否用该法进行压井可用“临界泥浆增量”来进行判断。

可以证明，工程师法使用的极限条件就

是超重泥浆法使用的初始条件。所以，把用工程师法所能够处理天然气溢流的最大体积量（井底状况）就称为超重泥浆司钻法的临界溢流体积。由于发现溢流并关井稳定后的井底溢流体积近似于地面泥浆池泥浆体积增加量（简称泥浆增量）。故当临界溢流体积用泥浆增量来表示时，就叫临界泥浆增量。下面就以工程师法压井过程中气顶到达套管鞋与井口作为两个临界点推导出超重泥浆司钻法压井的临界泥浆增量的计算公式。

1. 气顶到达套管鞋位置

理论上已经证明，当气顶到达套管鞋位置时，该处的受力最大；同时，在承受相同的井口压力情况下，套管鞋处地层所受压力的压力梯度最大。如果地层的破裂压力梯度一定，则套管鞋附近的地层将首先被压裂。当气顶到达套管鞋、该处受力刚好达到其破裂压力值时，则在环空系统中有如下等式成立：

$$P_i = P_{ix} + P_s + g\gamma_m HS_d/S_s + g\gamma_{m1} (H - H_{gs} - HS_d/S_s - H_g) = P_r \quad (1)$$

式中：

P_i 、 P_{ix} 、 P_s 分别为原始地层压力、

编者注 此为压力控制方法的理论探索，建议有全尺寸井控模拟井条件的单位先模拟验证，提出意见。

套管鞋附近裸眼地层的破裂压力以及天然气柱重量造成的压力, kP_a 。

γ_m 、 γ_{m1} 分别为原钻井泥浆密度与正常压井泥浆密度, t/m^3 ;

H 、 H_{c1} 、 H_g 分别为井深、套管鞋井深与气柱长度, m ; g 为重力加速度 m/s^2 。

令 $= \frac{P_g}{Z \cdot T} \bar{Z} \bar{T}$, 则气柱高度 H_g 为:

$$H_g = u V_{g,1} / s_1 (P_{c,m,x} + P_g / 2) \quad (2)$$

式中:

Z_c 、 \bar{Z} 分别为天然气在标准状态下与井内平均温度与平均压力下的压缩系数;

T_c 、 \bar{T} 分别为标准状态温度与井内平均温度, K ;

P_c 为标准状态压力, kP_a ;

S_1 、 s_d 分别为环空横截面积与钻杆内横截面积, m^2 ;

$V_{g,1}$ 为标准状态下的气体溢流体积, m^3 。

联解(1)、(2)两式并考虑到发现溢流并关井稳定后的井底溢流体积近似地等于泥浆增量, 再利用状态方程, 则得由套管鞋附近地层的破裂压力所决定的临界泥浆增量 $V_{k,cu1}$ 为:

$$V_{k,cu1} = [P_{c,m,x} + P_g + g\gamma_m H S_d / s_1 + g\gamma_{m1} (H - H_{c1} - H S_d / s_1) - P_g] \cdot [P_{c,m,x} + P_g / 2] \cdot S_1 / g\gamma_{m1} P_g \quad (3)$$

2. 气顶到达井口

理论已经证明, 当用工程师法进行压井时, 以气顶到达井口时的井口装置所受压力最大。如果此时井口所必须控制的环空回压超过井口装置的承压能力, 则必须用超重泥浆法压井。经过与前面相同的推导, 则可得由井口装置的许用压力所决定的临界泥浆增量 $V_{k,cu2}$ 为:

$$V_{k,cu2} = [P_{c,m,x} + g\gamma_m H S_d / s_1 + g\gamma_{m1}$$

$$(H - H S_d / s_1) + P_g - P_g] \cdot [P_{c,m,x} + \frac{P_g}{2}] S_1 / g\gamma_{m1} P_g \quad (4)$$

式中,

$P_{c,m,x}$ 为井口装置允许承受的最大压力, kP_a ;

可见, 当发现溢流并关井稳定后的泥浆增量 V_k 满足:

$$V_k \geq V_{k,cu} = \text{MIN}[V_{k,cu1}, V_{k,cu2}] \quad (5)$$

时, 不能用工程师法压井, 更不能用司钻法压井, 只能用超重泥浆法进行压井。其中,

$$V_{k,cu} = \text{MIN}[V_{k,cu1}, V_{k,cu2}]$$

称为判断是否用超重泥浆法压井的临界泥浆增量。 MIN 表示取 $V_{k,cu1}$ 与 $V_{k,cu2}$ 两者中的较小值。

二、超重泥浆司钻法的压井过程与方法

1. 原始条件

设发现井底天然气溢流时, 井底环空中溢流为一段纯天然气柱, 该天然气柱在标准状态下的体积为 $V_{g,1}$, m^3 。天然气顶部以上环空中以及钻杆内全是密度为 γ_m 的原钻井泥浆。在关井稳定后, 立管压力为 P_{d1} , 套压为 P_{s1} 。用前述临界泥浆增量法来判断是否必须用超重泥浆法进行压井。

2. 压井过程

(1) 压井开始时, 从钻杆中向井内打入密度为 γ_{m2} 的超重泥浆 V_1 , m^3 ;

(2) 接着打入密度为 γ_m 的原钻井泥浆, 直到超重泥浆全部返出井口;

(3) 打入密度为 γ_{m1} 的正常压井泥浆, 将原钻井泥浆全部顶出而恢复正常钻进。

3. 泥浆排量

由于超重泥浆密度 γ_{m2} 较正常压井泥浆密度 γ_{m1} 大得多, 使得钻杆内的超重泥浆(或与原钻井泥浆一起)产生的液柱压力将

较地层压力大得多, 这个压力与地层压力的差值 ΔP 就会反映到套压上或使立管压力失去控制, 这是不允许的。故必须充分利用超重泥浆在钻杆内的流动阻力来克服这个差值 ΔP , 这就提出了超重泥浆压井的大排量、变排量的方法。因此, 超重泥浆压井排量选择与控制是很关键的, 它不象常规司钻法与工程师法那样在压井过程中始终保持固定的低排量。而是在超重泥浆未全部进入环空前, 用大的甚至是变化的排量来保证立管压力 P_d 有读数; 在超重泥浆全部进入环空后再以固定的低排量进行压井。

(1) 临界泥浆排量 Q_c 。

临界泥浆排量指超重泥浆在钻杆内下行的整个过程中, 为使立管压力不低于零所需要的泥浆泵最小排量。

如果超重泥浆用量小于钻杆内容积, 则临界泥浆排量发生在超重泥浆全部进入钻杆到超重泥浆刚到钻头水眼入口的这段时间内。

如果超重泥浆用量大于或等于钻杆内容积, 则临界泥浆排量发生在超重泥浆到达钻头到超重泥浆全部进入钻杆中这段时间内。如果钻头装有喷嘴, 则发生在超重泥浆刚到钻头水眼入口这一时刻。

可以推得 (见附录一) :

A. 当超重泥浆用量小于钻杆内容积时, 临界泥浆排量的计算公式为:

$$Q_c = \{ [g v_u (\gamma_{m2} - \gamma_m) + g \gamma_m H S_d - S_d p_f] / [k_2 V_u + k (H S_d - V_u) + C_s] \}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中,

Q_c 为临界泥浆排量, m^3/s

V_u 为超重泥浆用量, m^3

γ_{m2} 为超重泥浆密度, t/m^3

$C = \gamma_m / 2\mu^2 F^2$

F 为喷嘴横截面积, m^2

μ 为喷嘴流量系数

$$K_2 = \frac{\gamma_{m2}}{\gamma_m} K$$

K 可用发现溢流前所记录的流量 Q_m 下所对应的立管压力 P_{d1}' , 由下式而求得:

$$K = (\frac{P_{d1}'}{Q_m^2} - C) / H$$

$P_{d1}' = P_d -$ 环空流动压降 (近似计算时环空压降可以略去)

B. 当超重泥浆用量大于钻杆内容积时, 临界泥浆排量的计算公式为:

$$Q_c = \sqrt{ \frac{g \gamma_{m2} H - P_f}{K_2 H + C} } \quad (7)$$

2. 实际压井泥浆排量

A. 超重泥浆全部进入环空之前

设1*、2*泥浆泵的缸套所对应的实际额定压力与实际排量分别为 (P_{d1}, Q_1) 与 (P_{d2}, Q_2) 且

$$\begin{cases} P_{d1} > P_{d2} \\ Q_1 < Q_2 \end{cases} \quad (8)$$

同时,

$$Q_2 < Q_c < (Q_1 + Q_2) \quad (9)$$

显然, 为使实际压井泥浆排量 $Q_m \geq Q_c$ 就必须双泵并用。

如果

$$P_{d2} \geq P_{d1} + KHQ_2^2 + C_2 Q_2^2 \quad (10)$$

则在超重泥浆全部进入环空前可一直用固定的大排量 Q_m 进行压井作业。式中,

P_{d1} 为关井立管压力, kPa

Q_m 为实际压井泥浆排量, $m^3/s, Q_m \geq$

Q_c

$$C_2 = \frac{\gamma_m^3}{2\mu^2 F^2}$$

如果

$$P_{d1} + KHQ_2^2 + CQ_2^2 \leq P_{d2} < P_{d1} + KHQ_2^2 + C_2 Q_2^2 \quad (11)$$

则从压井开始到立管压力上升到 P_{d2} 之前可一直用固定的大排量 Q_m 进行压井; 当立管压力上升到 P_{d2} 之后, 可停2*泵而用固定的低排量 (即仅用1*泵) 进行压井作业。

如果

$$P_{1,2} < P_{d,1} + kHQ_{1,2}^2 + CQ_{1,2}^2 \quad (12)$$

则可先用低排量(即用1*泵)压井;当立管压力快降为零时,用大排量(即1*、2*双泵同用)压井;随着压井的进行,当立管压力上升到 $P_{1,2}$ 后,再用低排量进行压井作业。

总之,实际压井过程中,必须随时保证立管压力 $P_{1,1}$

$$0 < P_{1,1} < P_{1,2} \quad (13)$$

B. 超重泥浆全部进入环空以后

为保证排除溢流时,易于操作阻流器、控制套压与立管压力,要求压井泥浆排量小而稳定(通常取正常钻井泥浆排量的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$)。可专用1*泵来实现这一要求。

4. 套压与立管压力的控制

附录二中给出了超重泥浆压井过程中套压与立管压力的计算公式及其示意图。由此可得:

(1) 超重泥浆全部进入环空之前 ($V_m \leq V_a + HS_d$)

在这一阶段中,立管压力变化太急而套压变化较小,故应以控制套压为标准来控制井底压力略大于地层压力(不是等于地层压力)。应当控制的套压值 $P_{1,1}$ 为:

$$\begin{cases} P_{1,1,b} = P_{1,1,b} + \Delta P \\ P_{1,1,c} = P_{1,1,c} + \Delta P \end{cases} \quad (14)$$

式中, ΔP 为附加压力, $kP_{1,0}$ 。它取决于气层渗透率,泥饼厚度等因素而不超过破坏泥饼使压井泥浆向气层中渗漏的压差值(可取该值的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$);

$P_{1,1,b}$ 、 $P_{1,1,c}$ 为以井底压力等于地层压力为标准所求得的套压值(见附录二)。

(2) 超重泥浆全部进入环空到超重泥浆全部返出井口,即 $V_a + HS_d < V_m \leq V_a$

$$+ H(S_1 + S_2)$$

控制立管压力恒定来保证井底压力等于地层压力。

(3) 正常压井泥浆进入环空前

保证套压($P_{1,1}$)恒定来控制井底压力等于地层压力。

(4) 正常压井泥浆进入环空到压井结束

保证立管压力恒定来控制井底压力等于地层压力。

5. 超重泥浆密度与用量的确定

见附录四。

三、计算实例

某气井当钻至井深3500m时,发现溢流后关井。测得泥浆增量 $V_k = 6.21m^3$,并通过关井立管压力5831kPa求得原始地层压力 $P_t = 57967kPa$ 。该井 $\varnothing 244.5(9\frac{5}{8})$ 套管,内径为0.2244m下到井深1700m处,为简化计算,设套管鞋以下的裸眼井段井径仍为0.2244m, $\varnothing 127(5)$ 钻杆下至井底,钻杆外径0.127m,内径0.1086m,原钻井泥浆密度 $\gamma_m = 1.52t/m^3$,正常钻进时,测得 $Q_m = 0.024m^3/s$ 时,立管压力 $P_{1,1} = 6370kPa$,无喷嘴。井场现有密度为 $\gamma_{m2} = 2.1t/m^3$ 的超重泥浆40m³。计算时,取井内平均温度为 $\bar{T} = 421K$,气体平均压缩系数 $\bar{Z} = 0.7$,略去天然气柱重量的压力与环空摩阻。该井裸眼段地层破裂压力梯度为22.54kPa/m,井口最大允许环空回压为14700kPa。

1. 压井方法选择

由公式(3)、(4)、(5)求得:

$$V_{k,u,1} = 8.744m^3$$

$$V_{k,u,2} = 5.22m^3$$

$$V_{k,u} = 5.22m^3$$

因 $V_k = 6.21m^3 > V_{k,u} = 5.22m^3$,故不能用工程师法压井,更不能用司钻法压井,要采用超重泥浆司钻法进行压井。

2. 超重泥浆密度与用量的确定

(1) 密度 $\gamma_{m2} = 2.1t/m^3$ (已知)

(2) 用量

A. 最小用量 $V_{m,1}$

a. 由公式 (附21) 得:

$$V_{n,1,1} = 22.25\text{m}^3$$

b. 由公式 (附22) 得:

$$V_{n,1,2} < 0$$

说明对套管鞋而言, 即使不用超重泥浆法压井也是安全的。

由公式 (附23) 得: $V_{n,1,1} = 22.25\text{m}^3$

B. 最大用量 $V_{n,1,2}$

取 $\Delta P = 980\text{kPa}$, 则由公式 (附25) 得 $V_{n,1,2} = 32.19\text{m}^3$

把 $V_{n,1,2} = 32.19\text{m}^3$ 代入公式 (6) 中得:

$$Q_c = 0.030\text{m}^3/\text{s}$$

因井场已有2台2PN—1258泥浆泵, 故实际所能达到的排量可以比 Q_c 大, 完全可以把 32.19m^3 超重泥浆全部泵入井筒而不使立管压力小于零。所以取

$$V_{n,1,2} = V_{n,1,1} = 32.19\text{m}^3$$

取 $V_n = 25\text{m}^3 \in (22.25\text{m}^3, 32.19\text{m}^3)$ 作为压井时的超重泥浆用量。

3. 所需控制的套压与立管压力值

(1) 当 $V_n \leq V_n + HS_d$ 时必须控制的套压, 由公式 (13) 确定, 取 $\Delta P = 980\text{kPa}$ 。

A. 当 $V_n \leq HS_d (= 32.41\text{m}^3)$ 时

$V_n (\text{m}^3)$	0	5	10
$P_{s,1,1}^* (\text{kPa})$	10253.6	10426.5	10617.7
	15	20	25
	10830.2	11067.9	11335.4
	30	32.41	
	11638.7	11800.0	

B. 当 $V_n > HS_d$ 时

$V_n (\text{m}^3)$	37.41	42.41	47.41
$P_{s,1,2}^* (\text{kPa})$	11270.0	10866.2	10637.9
	52.41	57.41	
	10666.3	11593.6	

(2) 超重泥浆全部进入环空到超重泥浆全部返出井口所必须控制的立管压力 [$V_m \in (57.41, 151.46)$];

由公式 (附9), 取 $Q_m = 0.01\text{m}^3/\text{s}$ 得:

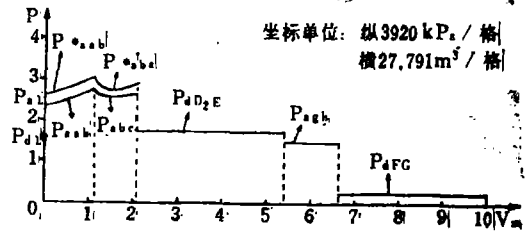


图1. 压井过程中所控制的套压、立管压力曲线

$$P_{w,2,8} = 6937\text{kPa}$$

(3) 正常压井泥浆进入环空前必须控制的套压 [$V_m \in (151.46, 183.86)$], 由公式 (附17) 得 $P_{s,1,1} = 5831\text{kPa}$

(4) 正常压井泥浆进入环空后到压井结束必须控制的立管压力 ($Q_m = 0.01\text{m}^3/\text{s}$) [$V_m \in (183.86, 277.91)$]

由公式 (附11) 得 $P_{w,1,1} = 1230\text{kPa}$

4. 最大套压、套管鞋的受力比较

(1) 如果用司钻法压井, 最大套压 $P_{s,1,1}$ 为:

$$P_{s,1,1} = 17340\text{kPa} > P_{s,1,1} = 14700\text{kPa}$$

故不能用司钻法进行压井。因套管鞋附近裸眼地层最大受力

$P_{s,1,1}$ 为:

$$P_{s,1,1} = 36605.8\text{kPa} < P_{s,1,1} = 38318\text{kPa}$$

(2) 如果用工程师法压井, 最大套压 $P_{s,1,1}$ 为:

$$P_{s,1,1} = 15934\text{kPa} > P_{s,1,1} = 14700\text{kPa}$$

故不能用工程师法进行压井。因套管鞋附近裸眼地层最大受力 $P_{s,1,1}$ 为:

$$P_{s,1,1} = 36280\text{kPa} < P_{s,1,1} = 38318\text{kPa}$$

(3) 用超重泥浆司钻法压井, 最大套压 $P_{s,max}$ 为:

$$P_{s,max} = 14401 \text{ kPa} < P_{s,lim} \\ = 14700 \text{ kPa}$$

套管鞋附近裸眼地层最大受力 $P_{e,max}$ 为:

$$P_{e,max} = 35537 \text{ kPa} < P_{e,lim} \\ = 38318 \text{ kPa}$$

故能用超重泥浆司钻法进行压井。

由前面的计算可知:

$$P_{s,max} < P_{s,lim} < P_{e,lim} \\ P_{e,max} < P_{e,lim} < P_{s,lim}$$

四、认识与结论

1. 超重泥浆司钻法为井控工作者提供了一种新的压井方法。在一定条件下, 用司钻法与工程师法不能进行的压井作业, 可以用超重泥浆司钻法进行常规井控作业, 不会出现井口蹩坏、地层蹩漏或二次溢流等复杂情况。经本文推导, 认为超重泥浆司钻法压井在理论上是可行的。

2. 当 $V_k \leq V_{k,c}$ 时, 不必使用超重泥浆司钻法压井, 用常规司钻法或工程师法压井即可。当 $V_k > V_{k,c}$ 时, 就要采用超重泥浆司钻法压井。

3. 本文提出适合于超重泥浆司钻法压井的大排量与临界泥浆排量的概念, 使得该法的使用范围扩大。如果钻头水眼全装喷嘴, 则临界排量 Q_c 的数值较小, 且当压井过程中的最高立管压力不超过缸套的实际许用压力时, 可一直用临界泥浆排量 Q_c 进行压井直到结束。如果使用变排量进行压井, 则应以泵入泥浆总体积来计“时”。

4. 超重泥浆司钻法压井能否进行现场试验的关键在于压井过程中套压与立管压力的控制问题, 文中进行了较详细的探讨与研究。如果在超重泥浆全部进入环空以前, 用变化的大排量进行压井时, 则以控制套压来

保证井底压力略大于地层压力为宜。如果临界泥浆排量 Q_c 较小, 则可以由附录二中所求得的立管压力来控制井底压力略大于地层压力。但无论是以控制套压还是以控制立管压力为标准来控制井底压力, 在超重泥浆完全进入环空以前, 所需调节的阻流器的开度的变化都是很小的, 进出口泥浆的体积流量相差不大。这就使得在这一阶段中的阻流器调节者的操作变得简单。关键在于阻流器调节者必须随时知道所应该控制的立管压力或套压的大小。

5. 使用超重泥浆司钻法压井可以大大地降低套压与地层受力, 避免出现复杂情况。当必须使用该法进行压井时, 应先经过严格的计算。

附录一

临界泥浆排量计算公式推导

当超重泥浆用量小于钻杆容积时, 为使超重泥浆在钻杆内下行过程中立管压力大于或等于零, 则在钻具中以下等式成立:

$$g\gamma_m V_u/s_d + g\gamma_m (H - V_u/s_d) \\ - K_2 Q_c^2 V_u/s_d - K Q_c^2 (H - V_u/s_d) \\ - C Q_c^2 - P_i \geq 0 \quad (\text{附1})$$

式中, 从左向右的各项分别为超重泥浆重力压力, 原钻井泥浆重力压力, 超重泥浆摩阻, 原钻井泥浆摩阻, 钻头压力降与地层压力。解此不等式则有:

$$Q_c \geq \{ [g v_u (\gamma_{m2} - \gamma_m) + g \gamma_m H S_d \\ - P_i S_d] / [K_2 v_u + K (H S_d - V_u) \\ + C S_d] \}^{1/2} \quad (\text{附2})$$

该不等式的最小值就是临界泥浆排量 Q_c 的计算公式(6)。同样可推得式(7)。

附录二

立管压力与套压的计算公式推导

一、立管压力公式推导

下面仅给出先以恒定的大排量 Q_{mmax} ，再以恒定的小排量 Q_m 压井时的立管压力计算公式（设 V_m 为从压井开始向井内注入泥浆的总体积， m^3 ）。

1. 超重泥浆到钻头前

A. $V_u < HS_d$

a. $V_m \leq V_u$ 时，

$$P_{dAB} = P_f + CQ_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})V_m/S_d + (KQ_{mmax}^2 - g\gamma_m)(H - V_m/S_d) \quad (附3)$$

b. $V_u < V_m < HS_d$

$$P_{dBc1} = P_f + CQ_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})V_u/S_d + (KQ_{mmax}^2 - g\gamma_m)(H - V_u/S_d) \quad (附4)$$

B. $V_u \geq HS_d$

$$P_{dAB1} = P_f + CQ_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})V_m/S_d + (KQ_{mmax}^2 - g\gamma_m)(H - V_m/S_d) \quad (附5)$$

2. 超重泥浆进入环空

A. $V_u < HS_d$

$$P_{d12D1} = P_f + C_2 Q_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})(V_u + HS_d - V_m)/S_d + (KQ_{mmax}^2 - g\gamma_m)(V_m - V_u)/S_d \quad (附6)$$

式中， $C_2 = \gamma_{m2}/2\mu^2 F^2$

B. $V_u \geq HS_d$

a. $HS_d \leq V_m \leq V_u$

$$P_{dB2C} = P_f + C_2 Q_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})H \quad (附7)$$

b. $V_u \leq V_m \leq V_u + HS_d$

$$P_{dCD1} = P_f + C_2 Q_{mmax}^2 + (K_2 Q_{mmax}^2 - g\gamma_{m2})(V_u + HS_d - V_m)/S_d + (KQ_{mmax}^2 - g\gamma_m)(V_m - V_u)/S_d \quad (附8)$$

3. γ_m 的钻井泥浆再次进入环空到超重泥浆全部返出井筒（此时以小排量 Q_m 进行压井）

$$P_{dD2E} = P_f + CQ_m^2 + (KQ_m^2 - g\gamma_m)H \quad (附9)$$

4. 正常压井泥浆到钻头前（密度为 γ_{m1} ）

$$P_{dEF1} = P_f + CQ_m^2 + (K_1 Q_m^2 - g\gamma_{m1})(V_m - V_u - HS_d - HS_s)/S_d + (KQ_m^2 - g\gamma_m)[2H + (V_u + HS_s - V_m)/S_d] \quad (附10)$$

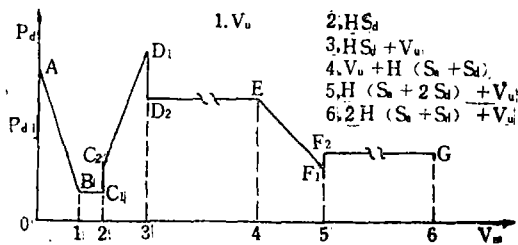
5. 正常压井泥浆进入环空到压井结束

$$P_{dF2G} = P_f + C_1 Q_m^2 + (K_1 Q_m^2 - g\gamma_{m1})H \quad (附11)$$

式中， $C_1 = \gamma_{m1}/2\mu^2 F^2$

$$K_1 = \frac{\gamma_{m1}}{\gamma_m} K$$

下面是各种情况下立管压力变化曲线示意图。



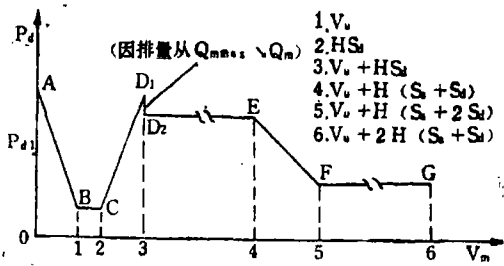
附图1 $V_u < HS_d$ 且有喷嘴时超重泥浆司钻法压井的立管压力变化曲线示意图

说明：（1）当 $V_m = HS_d$ 时，立管压力从 $P_{d1} \downarrow P_{d2}$ 是因为通过喷嘴的泥浆密度从 $\gamma_m \uparrow \gamma_{m2}$ ；

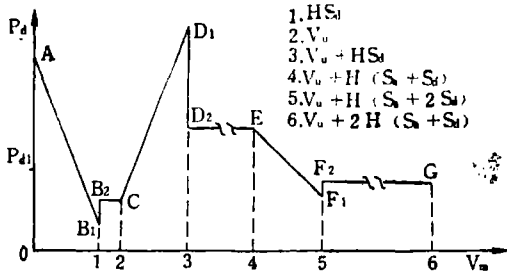
（2）当 $V_m = V_u + HS_d$ 时，立管压力从 $P_{D1} \downarrow P_{D2}$ 是因为通过喷嘴的泥浆密度从 $\gamma_{m2} \downarrow \gamma_m$ ，同时排量从 $Q_{mmax} \downarrow Q_m$ ；

（3）当 $V_m = V_u + H(S_s + 2S_d)$ 时，立管压力从 $P_{F1} \uparrow P_{F2}$ 是因为通过喷嘴的泥浆密度从 $\gamma_m \uparrow \gamma_{m1}$ ；

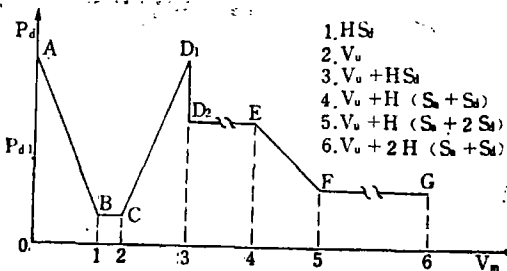
（4）以下各国的立管压力聚增（减）的原因相同。



附图2 $V_m < HS_d$ 且无喷嘴时超重泥浆司钻法压井的立管压力变化曲线示意图



附图3 $V_m \geq HS_d$ 且有喷嘴时超重泥浆司钻法压井的立管压力变化曲线示意图



附图4 $V_m \geq HS_d$ 且无喷嘴时超重泥浆司钻法压井的立管压力变化曲线示意图

二、套压计算公式推导

1. 超重泥浆未进入环空之前

随着压井的进行, 首先进入环空的是密度为 γ_m 的原钻井泥浆。为保证井底压力等于地层压力, 则套压 $P_{s.s}$ 必须满足下式:

$$P_{s.s} = P_t - P_g - g\gamma_m H + g\gamma_m u V_{s.i.} / S_a (P_t - g\gamma_m \frac{V_m}{S_a} - \frac{P_g}{2}) \quad (附12)$$

由于压井排量是变化的, 故用泵入压井泥浆总体积而不用压井时间来进行套压 (与

立管压力) 控制具有优越性。

2. 超重泥浆全部进入环空之前

$$P_{s.s} = A_1 - g\gamma_m \left[H - \frac{V_m}{S_a} - \frac{u V_{s.i.}}{S_a (A_1 + P_g/2)} \right] \quad (附13)$$

式中,

$$A_1 = P_t - P_g - g\gamma_m \frac{V_m - HS_d}{S_a} - g\gamma_m \frac{HS_d}{S_a}$$

3. 原钻井泥浆进入环空到气顶到井口

$$P_{s.s} = A_2 - g\gamma_m \left[H - V_m/S_a - \frac{u V_{s.i.}}{S_a (A_2 + P_g/2)} \right] \quad (附14)$$

式中:

$$A_2 = P_t - P_g - g\gamma_m \frac{V_u}{S_a} - g\gamma_m (V_m - V_u)/S_a$$

4. 从井口排除天然气溢流

$$P_{s.s} = P_t - g\gamma_m \frac{V_u}{S_a} - g\gamma_m (V_m - V_u)/S_a \quad (附15)$$

5. 排除原钻井杆内泥浆

$$P_{s.s} = P_t - g\gamma_m \frac{V_u}{S_a} - g\gamma_m (H - V_u/S_a) \quad (附15')$$

6. 排除超重泥浆

$$P_{s.s} = P_t - g\gamma_m \left[H - (V_m - V_u - HS_d)/S_a \right] - g\gamma_m (V_m - V_u - HS_d)/S_a \quad (附16)$$

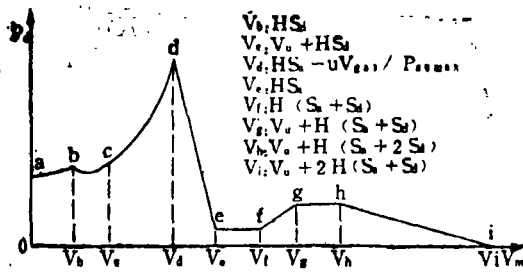
7. 密度为 γ_{m1} 的正常压井泥浆进入钻杆

$$P_{s.s} = P_t - g\gamma_{m1} H \quad (附17)$$

8. 正常压井泥浆进入环空到上返至井口

$$P_{s.s} = P_t - g\gamma_{m1} \left[V_m - V_u - H(S_a + 2S_d) \right] / S_a - g\gamma_{m1} \left[H - \frac{V_m - V_u - H(S_a + 2S_d)}{S_a} \right] \quad (附18)$$

附图5给出了超重泥浆司钻法压井过程中套压变化曲线示意图。



附图5 超重泥浆司钻法压井套压变化关系曲线示意图

附录三

井口与套管鞋附近地层最大受力计算

一、井口最大套压 $P_{i,umax}$ (即 P_{id}):

$$P_{i,umax} = [A_3 + (A_3^2 + 4g\gamma_m u V_{g,1} / S_1)^{1/2}] / 2 \quad (附19)$$

式中, $A_3 = P_f - g\gamma_{m2} V_u / S_1 - g\gamma_m (H - V_u / S_1)$

二、套管鞋附近裸眼地层最大受力

$P_{i,umix}$:

$$P_{i,umix} = [A_4 + (A_4^2 + 4g\gamma_m u V_{g,1} / S_1)^{1/2}] / 2$$

$$A_4 = P_f - g\gamma_{m2} V_u / S_1 - g\gamma_m (H - H_{1,1} - V_u / S_1)$$

$$(H - H_{1,1} \geq HS_d / S_1 + V_u / S_1 + uV_{g,1} / S_1 P_{i,umax})$$

$$P_{i,umix} = [A_5 + (A_5^2 + 4g\gamma_{m2} u V_{g,1} / S_1)^{1/2}] / 2$$

$$A_5 = P_f - g\gamma_m HS_d / S_1 - g\gamma_{m2} (H - H_{1,1} - HS_d / S_1)$$

$$(H - H_{1,1} \geq HS_d / S_1 + uV_{g,1} / S_1 P_{i,umax})$$

$$P_{i,umax} = \{ [P_f - g\gamma_m (H - H_{1,1})] + [(P_f - g\gamma_m (H - H_{1,1}))^2 + 4g\gamma_{m2} u V_{g,1} / S_1]^{1/2} \} / 2$$

$$(H - H_{1,1} \geq uV_{g,1} / S_1 P_{i,umax})$$

(附20)

附录四

超重泥浆密度与用量的确定

一、超重泥浆密度 γ_{m2}

可以是现场上已有的(或重配)任意密度的超重泥浆,但当 $V_u \geq HS_d$ 时, γ_{m2} 必须满足不等式(附26)。

二、超重泥浆用量 V_u

1. 超重泥浆最小用量 $V_{u,min}$

A. 由气顶到井口、井口环空回压不超过井口许用环空回压 $P_{i,mix}$ 所需超重泥浆最小用量 $V_{u,min1}$:

此时有以下不等式成立:

$$P_f - g\gamma_{m2} V_u / S_1 - g\gamma_m (H - H_g - V_u / S_1) \leq P_{i,mix}$$

式中, $H_g = uV_{g,1} / S_1 (P_{i,mix} + P_g / 2)$

由此求得:

B. 同样,以气顶到达套管鞋时,地层所受压力不超过裸眼地层的破裂压力为准,求得的超重泥浆最小用量 $V_{u,min2}$ 为:

$$V_{u,min1} = [P_f - P_{i,mix} - g\gamma_m (H - H_g)] S_1 / g(\gamma_{m2} - \gamma_m) \quad (附21)$$

$$V_{u,min2} = [P_f - P_{i,mix} - g\gamma_m (H - H_{1,1} - H_g)] S_1 / g(\gamma_{m2} - \gamma_m) \quad (附22)$$

式中, $H_g = uV_{g,1} / S_1 (P_{i,mix} + \frac{P_g}{2})$

综合考虑 $V_{u,min1}$ 、 $V_{u,min2}$ 得 超重泥浆最小用量 $V_{u,min}$:

$$V_{u,min} = \text{MAX}(V_{u,min1}, V_{u,min2}) \quad (附23)$$

式中, MAX 表示取最大值。

2. 超重泥浆最大用量 $V_{u,max}$

A. 超重泥浆到井口时,环空液柱压力不得大于原始地层压力太多,否则原钻井泥浆会漏入气层而有可能出现泥浆有进无出,污染气层等现象。由此得不等式:

$$g\gamma_{m2} V_u / S_1 + g\gamma_m (H - V_u / S_1)$$

$$\leq P_f + \Delta P \quad (\text{附24})$$

式中, ΔP 为破坏泥饼使井筒中的泥浆漏入气层中时井底压力大于地层压力的差值, kP_i 。

由此求得由该条件所决定的最大用量 V_{umax1} 为:

$$V_{umax1} = [P_f + \Delta P - g\gamma_m H] S_d / g(\gamma_{m2} - \gamma_m) \quad (\text{附25})$$

B. 超重泥浆以进入钻杆到井底(未通过喷嘴)时, 立管压力最小。为了保证立管压力 $P_d \geq 0$, 则必须有(设实际所能达到的最大排量为 Q_{max});

a. 当 $V_u \geq HS_d$ 时,

可任取超重泥浆用量, 但 γ_{m2} 必须满足不等式:

$$\gamma_{m2} \leq (P_f + CQ_{max}^2) / H(g + \frac{KQ_{max}^2}{\gamma_m}) \quad (\text{附26})$$

b. 当 $V_u < HS_d$ 时所允许的超重泥浆最大用量 V_{umax2} 为:

$$V_{umax2} = \frac{[P_f + (C + KH)Q_{max}^2 - g\gamma_m H] S_d}{g(\gamma_{m2} - \gamma_m) - (K_2 - K)Q_{max}^2} \quad (\text{附27})$$

综合考虑 V_{umax1} 、 V_{umax2} 则得:

$$V_{umax} = \text{MIN}(V_{umax1}, V_{umax2}) \quad (\text{附28})$$

可见, 只要超重泥浆用量在 (V_{umax}, V_{imax}) 范围内取值, 则可安全地进行压井。

如果改变不同的超重泥浆密度 γ_{m2} , 不等式组

$$\begin{cases} V_u \leq V_{umax} \\ V_u \geq V_{imax} \end{cases} \quad (\text{附29})$$

无解, 则说明溢流量太多, 不能用超重泥浆司钻法进行压井作业。

致 谢

超重泥浆法压井是郝俊芳教授首先提出并进行研究的。本文得到周大钧同志的全面审核与指导, 并得到李世放、李昌全同志的指导, 在此向他们表示衷心的感谢。

(本文收到日期 1987年7月28日)

新书预告

由西安重型机械研究所吴凤梧等翻译的苏联冶金出版社1983年版的《焊管生产的现代化》一书即将问世。

这本书着重介绍了直缝焊管的生产理论和工艺, 反映了苏联和世界焊管制造技术的最新成就。对于我国众多焊管机组的改造和新产品的开发都很有助益。它是制管行业广大科技人员和有关高校师生不可多得的参考书。

全书近20万字, 主要章节有: 1. 直缝焊管连续成型过程的理论基础; 2. 管坯成型过程的研究及完善; 3. 管坯焊接过程的研究和改进; 4. 直缝焊管焊接的新方法; 5. 直缝焊管的成型焊接设备; 6. 现代化的电焊管机组; 7. 电焊管机组的改造。

欢迎广大读者订阅, 望各订阅单位和个人将订阅数近期内函告陕西省宝鸡石油钢管厂内《焊管》编辑部。(每期含邮资计价3.50元)