

氮气气举基本计算方法

王文起 陆洪涛

(胜利石油管理局井下作业公司)

摘要 本文提出了使用氮气进行反举和正举时计算液氮用量的准确公式,在计算气柱底部或顶部压力时,将传统的计算近似压力的公式进行了改进,从而提高了 Z_0 的精度。在计算泵压时考虑了井内液体摩阻,并且不是将摩阻简单地加进去,而是通过理论推算提出了摩阻影响的表达式。在正举工艺上,提出了计算过量点系数的精确公式和近似公式。

主题词: 气举 泵压 (过量点) 液面测量 返出排量 计算方法

前 言

氮气在石油工业中有着广泛的用途。在试油测试方面,主要用于气举诱喷排液、测试加氮垫、干井射孔、加氮酸化和压裂、加氮喷砂射孔、扫线及试压等。使用液氮泵进行氮气气举具有施工快、掏空能力强(如 AIRCO3 LMPD 泵工作压力为 15000psi)和不燃不爆等优点。

氮气气举的方法有挤入法、正举法、反举法、连续油管配合作业法等。这些方法各有不同的特点及使用条件。本文主要讨论正举和反举的基本计算方法,这些理论同样可以用于测试加氮垫、干井射孔、氮气环空隔热及氮气加压引爆油管传输射孔等作业。

国内有关氮气气举方面的理论文章以往不多见。张文玉编著的《泡沫流体应用技术》,结合了国内外有关文献,介绍了一些实用的现场计算图表。另外,一些国外专业公司,如加拿大爱斯基摩(Eskimo)、立时高(Nowsco)等公司编写的有关技术手册也有介绍。在理论计算中,最难于处理的是氮气的压缩因子 Z ,它是温度与压力的函数;在井筒内是深度的函数。可以看出,各文献中图表的制作已考虑了 Z 的变化,并使用 Z 的表达式进行了计算机处理。但各文献所列图表有的出入较大,除假定条件有一定差别外,主要在方法上有缺陷,甚至有理论错误。另外,这些图表只列了部分油套配合及井内液体密度,井深等级较粗,并且只考虑一种井内温度表达式,给使用带来一定困难,有时使用内插法也难于获得可靠的数值。

上述文献使用的方法都应属于静态法,即认为井筒内某点的氮气温度与周围地层温度相同,并且忽略氮气和井筒内液体在管壁上的摩擦阻力。本文在讨论时仍做这样的假设,只是在最后计算泵压时考虑摩阻的影响。

反 举 计 算

反举就是从环空注入氮气,井内液体由油管(或钻杆,下同)返出。假设:①套管内径上

下一致,无裸眼段或裸眼段在油管鞋以下;②油管内外径上下一致;③环空截面积大于油管流通面积;④井内液体密度上下一致;⑤油管出口不节流;⑥井眼垂直。

反举施工时,只要氮气到达油管鞋并进入油管(举通),即可将油管内的液体全部推出;如果由于地质或工程的原因不需要或不允许举通时,可用下式确定环空中氮气与液体的最终界面深度:

$$D = \frac{A_s + A_t}{A_s} \cdot D_t \quad (1)$$

根据(1)式计算的 D 有可能大于油管深度,在不允许举通的情况下首先应满足下式:

$$D < D_t \quad (2)$$

其它反举施工参数的计算方法如下:

1. 环空最终气液界面压力(绝对,MPa)

$$P_B = 0.00981\rho D + 0.1013 \quad (3)$$

2. 氮气柱平均温度(等于氮气柱中温度,K)

$$T_{cp} = t_0 + \frac{D}{2M_0} + 273 \quad (4)$$

3. 套压近似值(绝对,MPa)

$$P'_c = P_B \cdot e^{\frac{-0.034157 \cdot D}{T_{cp}}} \quad (5)$$

4. 氮气柱平均压力(绝对,MPa)

$$P_{cp} = \frac{P_B + P'_c}{2} \quad (6)$$

5. 平均压缩因子 Z_{cp}

$$P_r = \frac{P_{cp}}{P_{atm}}, \quad T_r = \frac{T_{cp}}{T_{atm}} \quad (7)$$

根据式(7)计算出 P_r 和 T_r 后,查有关图表(例如可查《钻井测试手册》“天然气压缩系数 Z 值”)即可求得压缩因子 Z_{cp} 。

6. 套压(绝对,MPa)

$$P_c = P_B \cdot e^{\frac{-0.034157 \cdot D}{T_{cp} \cdot Z_{cp}}} \quad (8)$$

7. 液氮用量(反举, m^3)

$$V_f = \frac{(P_B - P_c)A_s}{0.00981\gamma_L} \quad (9)$$

液氮泵排量表一般计量氮气体积排量和累积量,并且常用英制。现场可用下列关系式进行换算:

1 m^3 液氮 = 696 m^3 氮气(21℃)

1 m^3 氮气 = 35.315 CF 氮气(CF:立方英尺)

1 m^3 液氮 = 24580 CF 氮气(21℃)

8. 摩阻

由(8)式计算的套压 P_c 相当于打够液氮停泵稳定后的压力,要计算停泵前的泵压,需要考虑摩阻的影响。氮气摩阻可忽略不计。井内液体摩阻包括环空和油管两部分,设计举通的可仅考虑油管内液体摩阻。

先计算停泵前井口返出液体排量: (m^3/min)

$$Q_L = \frac{Q_N}{10P_B} \quad (10)$$

对 AIRCO 3 LMPD 型液氮泵,单泵 $Q_N=80\sim 100\text{m}^3/\text{min}$,最大 $114\text{m}^3/\text{min}$ 。

将 Q_L 作为已知条件,进行水力学计算求出摩阻 $P_H^{[4]}$ 。也可使用油田有关图表求出摩阻 $P_H^{[5]}$ 。

9. 施工最高泵压

在反举施工中,需要计算液氮用量及施工最高泵压(等于停泵前的泵压)。计算泵压的目的在于当泵车排量表失灵时,可通过泵压控制液氮用量。

$$P_H = P_c + \frac{P_H}{K_f} - 0.1013 \quad (11)$$

根据理论推算:

$$K_f = \frac{P_H}{\sqrt{P_B^2 + \left(\frac{1}{2}P_H\right)^2} - P_B + \frac{1}{2}P_H} \quad (12)$$

因此(11)式可写为

$$P_H = P_c + \frac{1}{2}P_H - 0.1013 \quad (11a)$$

以上方法的缺点是使用了平均温度、平均压力,平均压缩因子的概念,但现场使用仍有足够的精度。这种计算方法也适合于压风机气举、二氧化碳气举,只要将氮气及液氮的密度、临界压力和温度等参数改为其它介质的对应值即可。为方便计算,(9)式可改形为

$$V_s = \frac{(P_B - P_c)A_s}{0.00981 \gamma} \quad (9a)$$

除气举外,对于干井射孔(也叫强化射孔)、氮气加压引爆射孔、测试加氮垫等作业,可参考以上公式进行计算。只是将公式(9)和(9a)中的 A_s 改为 A_t 或 $(A_s + A_t)$,在计算泵压时不涉及摩阻。以测试加氮垫为例, P_B 相当于设计的气柱底部压力,将(9)或(9a)式中的 A_s 改为 A_t ,泵压 $P_s = P_c$ (P_c 在这里实际上是油压)。

正 举 计 算

正举就是从油管内注入氮气,井内液体由环空返出,假设条件与反举相同。

正举时,氮气到达油管鞋(举通),不足以将环空的液体全部举出,必须继续泵入氮气,使其在环空中上升到某一个特定深度,这时停泵才能将全部液体推出。

在正举施工中需要计算举出油管鞋以上井筒液体所需要的液氮量、停泵时的泵压、施工中最大泵压(等于氮气到达油管鞋时的泵压)。

1. 过量点概念及过量点深度的确定

氮气到达井底并从环空上返,停泵后氮气能依靠本身的膨胀能将环空剩余液体全部推出(更确切地说是“继续上推”)所需要的最低气液界面的位置叫过量点(在反举作业中,过量点在油管鞋处)。

过量点是一个理想概念,即假设没有滑脱现象(气液界面上没有串流)。过量点深度由下式确定

$$D_s = O_s \cdot D_t \quad (13)$$

国外专业公司的技术手册中一般列出一个表,可根据不同的油套配合查出 O_e ,如下表。

过量点系数 O_e 表

套管尺寸(或油管)		油管(或连续油管)					
外径	重量,磅/英尺	1 $\frac{1}{4}$ " 内径 1.38	1 $\frac{1}{2}$ " 1.61	2" 1.995	2 $\frac{1}{16}$ " 1.75	2 $\frac{1}{2}$ " 2.441	3" 2.992
2 $\frac{7}{8}$ "	6.50	0.798					
3 $\frac{1}{2}$ "	9.30	0.654	0.743				
4 $\frac{1}{2}$ "	9.50	0.566	0.597	0.676	0.512	0.862	
5"	15.00	0.578	0.584	0.649	0.602	0.763	
5 $\frac{1}{2}$ "	17.00	0.544	0.563	0.607	0.578	0.693	0.895
7"	23.00	0.525	0.536	0.557	0.542	0.594	0.661

对于其它油管套管配合及改变油管或套管壁厚时,使用该表查不到或不准确。为方便使用,下面提出一个求过量点系数的公式:

$$O_e = \frac{A_s + A_t}{2A_s} - \frac{5.165}{\rho D_t} \approx \frac{A_s + A_t}{2A_s} \quad (14)$$

(14)式的数学意义是,过量点以上环空容积等于过量点以下环空容积与油管内容积之和。称句话说,氮气到达过量点时,井筒内氮气和液体所占容积相等。

由(14)式看出, $A_s \geq A_t$ 。实际上,若 $A_s \leq A_t$,当进行正举时,氮气到达油管鞋即达到过量点,氮气足以将环空液体推出,这时可使用上述反举的计算步骤进行计算;相反,进行反举时,氮气到达油管鞋,不足以将油管内的液体推出,氮气必须在油管内上升至某一特定深度(过量点)后停泵,才能将油管内剩余液体推出,这时可使用下式计算过量点系数:

$$O_e = \frac{A_s + A_t}{2A_t} \quad (14a)$$

并使用下述正举的计算步骤进行计算。

$$2. \text{过量点处的压力} \quad P_e = 0.00981\rho D_e + 0.1013 \quad (15)$$

在过量点处,油管内外压力相等。

$$3. \text{过量点以下氮气平均温度(K)} \quad T_{\text{cpz}} = t_0 + \frac{D_t + D_e}{2M_0} + 273 \quad (16)$$

4. 油管鞋处的压力近似值(绝对,MPa)

$$P_t = P_e e^{\frac{0.034157 \rho (D_t - D_e)}{T_{\text{cpz}}}} \quad (17)$$

$$5. \text{过量点以下氮气平均压力(绝对,MPa)} \quad P_{\text{cpz}} = \frac{P_e + P_t}{2} \quad (18)$$

6. 过量点以下氮气平均压缩因子 Z_{cpz}

$$P_{\text{rz}} = \frac{P_{\text{cpz}}}{P_{\text{atm}}}, \quad T_{\text{rz}} = \frac{T_{\text{cpz}}}{T_{\text{atm}}} \quad (19)$$

根据 $P_{\text{rz}}, T_{\text{rz}}$ 查表可求出 Z_{cpz} 。

7. 油管鞋处的压力(绝对,MPa)

$$P_t = P_* \cdot e^{\frac{0.034157(D_t - D_*)}{T_{cpx} \cdot Z_{cpx}}} \quad (20)$$

8. 过量点以上油管内氮气平均温度(K)

$$T_{cpx} = t_0 + \frac{D_*}{2M_*} + 273 \quad (21)$$

9. 油压近似值(绝对, MPa)

$$P'_Y = P_* e^{\frac{-0.034157 D_*}{T_{cpx}}} \quad (22)$$

10. 过量点以上油管内氮气平均压力(绝对, MPa)

$$P_{cps} = \frac{P_* + P'_Y}{2} \quad (23)$$

11. 过量点以上油管内氮气平均压缩因子 Z_{cps}

$$P_{rs} = \frac{P_{cps}}{P_{\#}}, \quad T_{rs} = \frac{T_{cps}}{T_{\#}} \quad (24)$$

根据 P_{rs} 和 T_{rs} 查表可求得 Z_{cps} 。

$$12. \text{油压(绝对, MPa)} \quad P_Y = P_* e^{\frac{-0.034157 D_*}{T_{cps} \cdot Z_{cps}}} \quad (25)$$

13. 液氮用量(m^3)

$$V_z = \frac{(P_t - P_Y)A_t + (P_t - P_*)A_*}{0.00981\gamma_L} \quad (26)$$

$$14. \text{停泵前的摩阻 } P_{fz} \quad Q_L = \frac{Q_N}{10P_*} \quad (27)$$

根据 Q_L 可求出摩阻 P_{fz} 。

15. 停泵前的泵压(相对, MPa)

$$P_{fz} = P_Y + \Delta P_Y - 0.1013 \quad (28)$$

$$\Delta P_Y = f(D_*, O_*, P_{fz}) = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}P_{fz}\right)^2 + 0.00981\rho D_* O_* P_{fz} + \frac{1}{2}P_{fz}}}{2O_* \left(e^{\frac{0.034157 P_{fz}}{T_{cp} Z_{cp}}} - 1\right) + 1} \quad (29)$$

为便于计算, 式(28)可改形为

$$\Delta P_Y = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}P_{fz}\right)^2 + P_* P_{fz} + \frac{1}{2}P_{fz}}}{2O_* \left(\frac{P_t}{P_Y} - 1\right) + 1} \approx \frac{\sqrt{P_* P_{fz} + \frac{1}{2}P_{fz}}}{2O_* \left(\frac{P_t}{P_Y} - 1\right) + 1} \quad (29a)$$

将式(29a)代入式(28)得

$$P_{fz} = P_Y + \frac{\sqrt{P_* P_{fz} + \frac{1}{2}P_{fz}}}{2O_* \left(\frac{P_t}{P_Y} - 1\right) + 1} \quad (28a)$$

16. 施工最高泵压(相对 MPa)

最高泵压出现在氮气到达油管鞋时, 因此可按反举的计算过程求出井口压力 P_{Ym} 及摩阻 P_{fm} , 然后使用下式计算最高泵压:

$$P_{pm} = P_{ym} + P_{fm} - 0.1013 \quad (30)$$

17. 液氮附加量

在正举作业中,氮气到达过量点停泵,由于滑脱现象的存在,环空液体仍有一小部分落回井底,特别在套管出口加控制时,滑脱现象更为严重(泵压当然也会升高)。要想抵消这种影响,可在理论用氮量的基础上附加10%~15%。滑脱程度与 D_i 、 A_s 、 O_s 、 Q_N 有关,其中主要是 O_s 和 Q_N ,因此可根据 O_s 及 Q_N 调整附加量, O_s 和 Q_N 越小,附加量越大。在套管出口有控制时,也应增加附加量。

一般来说,正举比反举用液氮少,应优先使用。当然,在现场作业中,选择气举方式时还要考虑其它因素。

符 号 说 明

- | | |
|---|--|
| D ——环空最终气液界面深度,举通时即为油管下深,m; | P_{ff} ——停泵时井内液体摩阻,MPa; |
| A_s, A_i ——环空截面积和油管流通面积, m^2 ; | K_f ——摩阻影响系数,无因次; |
| D_k ——设计掏空深度,m; | V_g ——气举气体用量, $10^3 m^3$ (21℃, 0.1013MPa); |
| ρ ——井内液体密度, g/cm^3 ; | γ ——气体密度, kg/m^3 , 对氮气、空气和二氧化碳, 21℃, 1atm 时, γ 值分别为 1.1605、1.2、1.8387; |
| t_0 ——地区常年平均气温,℃,并假设蒸发器出口温度与此相等; | P_n, T_n ——过量点以上油管内氮气对比压力及对比温度,无因次。 |
| M_0 ——地热增温率, $m/℃$; | ΔP_Y ——摩阻造成的增量,MPa |
| γ_g ——氮气相对密度,无因次, $\gamma_g = 0.967$; | P_{ym} ——氮气到达油管鞋时井口静态压力(绝对),MPa; |
| P_r ——对比压力,无因次; | P_{fm} ——氮气到达油管鞋时环空液体摩阻,MPa |
| $P_{\text{临}}$ ——氮气临界压力(绝对),MPa, $P_{\text{临}} = 3.393\text{MPa}$; | P_s ——过量点压力(绝对),MPa |
| T_r ——对比温度,无因次; | D_i ——油管下深,m。 |
| $T_{\text{临}}$ ——氮气临界温度,K, $T_{\text{临}} = 126\text{K}$; | O_s ——过量点系数,无因次, $\frac{1}{2} < O_s \leq 1$; |
| γ_L ——液氮相对密度,无因次, $\gamma_L = 0.80823$; | |
| Q_N ——液氮泵氮气排量, m^3/min ; | |
| P_{pf} ——反举最高泵压(相对),MPa; | |

参 考 文 献

1. 钻井测试手册,四川石油管理局、西南石油学院编,1975.10。
2. 氮气应用手册,胜利油田采油院编 1973。
3. 泡沫流体应用技术,张文玉编,1988。
4. 水力学,石油院校教材编写组,1979.3。
5. 压裂设计参考资料,胜利油田钻采院编,1981。

本文收稿日期,1994-07-20 责任编辑:邢厚松 微机排版:刘子君