

气举阀气举排液采气 工艺参数设计与优选技术研究

苏月琦 汪海 汪召华 栾艳春

(中原油气高新股份有限公司天然气产销厂)

苏月琦等.气举阀气举排液采气工艺参数设计与优选技术研究.天然气工业,2006,26(3):103-106.

摘要 东濮凹陷气藏多属低渗致密砂岩气藏,开发过程中表现为气井产能低、压力下降快、地层水矿化度高、积液影响严重等特征。气举排液是一项常用的气井排液采气工艺方法,具有很强的适应性,不但适用于低产气井的辅助排液采气,而且还适用于各种类型积液停产气井的诱喷排液复产。受井筒流态差异的影响,气井气举阀气举诱喷排液不同于油井气举阀气举采油,简单照搬油井气举阀排液设计模式难以在气井诱喷中获得成功。文章结合工作实践,对气举阀及气举排液采气工作原理进行了剖析,对气举排液采气工艺特点与影响因素进行了论述,对气举排液采气工艺参数进行了设计,并编制了软件,实现了程序化,现场应用取得了较好效果。

主题词 气举阀 排液 采气 工艺参数 现场试验

一、气举阀工作原理

目前现场气井使用较多的是套管压力操作气举阀。气举阀凡尔关闭状态如图1所示。

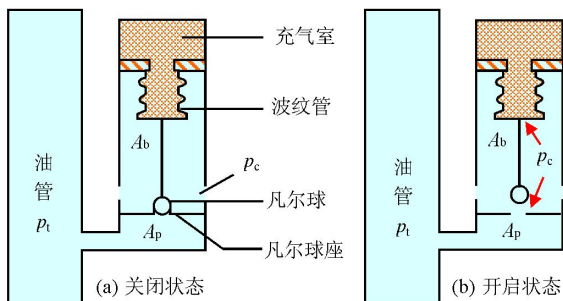


图1 双波纹管凡尔开、闭状态

1. 凡尔打开

试图打开凡尔的力:

$$F_o = p_c (A_b - A_p) + p_t A_p$$

保持凡尔关闭的力:

$$F_c = p_d A_b$$

若以 p_{op} 表示气举阀将要开启瞬间凡尔处的套管压力(称凡尔开启压力),则:

$$p_{op} = (p_d - R p_t) / (1 - R) \quad (1)$$

式中: p_d 为凡尔在井下时封包内的压力; R 为凡尔孔与封包的面积比, $R = A_p / A_b$; p_t 为凡尔处的油管压

力; p_c 为凡尔处的套管压力; A_b 为封包面积; A_p 为凡尔孔面积。

将上式改写为:

$$p_{op} = \frac{p_d}{1 - R} - \frac{R p_t}{1 - R} \quad (2)$$

可以看出,随着油管压力增加,打开凡尔所需要的套管压力要减小。当凡尔处的 $p_c \geq p_{op}$ 之后,凡尔就会被打开,如图1-b所示。

2. 凡尔关闭

凡尔打开后,保持凡尔开启的力为:

$$F_o = p_c (A_b - A_p) + p_c A_p = p_c A_b$$

试图关闭凡尔的力:

$$F_c = p_d A_b$$

当 $F_o \leq F_c$ 时,凡尔就会关闭。

以 p_{vc} 表示凡尔即将关闭瞬间凡尔处的套管压力(称凡尔关闭压力),则

$$p_{vc} = p_d \quad (3)$$

可以看出,凡尔的关闭压力仅与封包内的压力有关,与油管压力无关。

3. 凡尔的距

凡尔开启压力(p_{op})与关闭压力(p_{vc})之差称为凡尔的距,是表征封包式凡尔工作特征的一个主要参数。用 P 表示,其值为:

$$P = p_{op} - p_{vc} = \frac{p_d - p_t R}{1 - R} - p_{vc}$$

作者简介: 苏月琦,1966年生,高级工程师;1989年毕业于原成都地质学院石油地质专业,现从事气田开发工作。地址:(457061)河南省濮阳县柳屯镇。电话:(0393)4878371。E-mail:zywangha@163.com

又 $p_{vc} = p_d$, 整理后得:

$$p = \frac{R}{1-R} \times (p_d - p_i) \quad (4)$$

即凡尔的距随油管压力的增大而减小。当 $p_i = p_d$ 时为最小, 等于零; 当 $p_i = 0$ 时, 其值最大。

二、工艺技术应用

1. 气举排液采气特点

气举阀气举排液采气具有两个特点。

(1) 气举排液是靠气举阀的逐级打开和关闭来实现的, 且气举阀的打开和关闭压力都是自上而下逐级减小的。

(2) 只有上一级气举阀关闭, 气流被截断, 环空液面才能继续下降。即上一级气举阀的关闭是下一级气举阀发挥作用的前提。

这两个特点是气举设计的重要依据和基本原则, 也是气举设计必须满足的条件。

2. 气举排液采气影响因素研究

(1) 井筒工况及动态对参数设计的影响

在普通的压缩机增压注气气举采油工艺设计中, 因压缩机的压力、排量相对稳定, 且注入气经过净化处理, 在气举过程中, 注气压力和气量也相对稳定。另外, 因油井的产液量较大, 地层供液及时, 凡尔以上通常保持气液两相流态, 凡尔处的油管压力也相对较高, 由式(4)可知凡尔的距较小。因此, 在气举采油工艺参数设计时, 两级气举阀之间的开启压力差值一般都比较小, 通常为 $0.1 \sim 0.3$ MPa。

但是, 在引用邻井高压气气举施工时, 因气源井生产压力本身就有一定的波动, 加上气源未经过净化, 注气压力在 0.5 MPa 左右甚至更大幅度的波动是很正常的现象; 再加上气井的地层产液量相对较少, 不能及时持续供液, 举通后, 凡尔以上很快就会变成近似纯气流, 凡尔处的油管压力也相对较低, 由式(4)可知, 气举采气井中凡尔的距相对较大。所以, 在按气举采油工艺参数设计方法确定的 $0.1 \sim 0.3$ MPa 的阀间的开启压力差值下, 上级凡尔很难有效关闭, 造成气举过程中气举阀自上而下逐级关闭的设计目的无法实现, 在多级气举阀中, 最上一级持续开启, 注气持续短路, 下部各级气举阀无法发挥作用, 造成气举排液施工失败。

如部 8 井气举排液气举管柱设计, 按简单引用气举采油设计思路, 参数确定见表 1。

在气举排液施工中, 多次气举均出现了井口注气压力升到 11 MPa 左右, 油管开始出气液, 但出液

时间很短, 然后开始出纯气, 没有出现注气压力逐级下降、气液间喷的凡尔逐级启动和关闭的正常反应。计算分析表明, 每次气举排出的液量都是仅相当于第一级气举阀以上的积液量。表现为第一级气举阀在连续注气的情况下无法关闭, 气举没有发挥预期作用。

表 1 部 8 井气举排液的气举管柱设计

参 数	第一级	第二级	第三级	第四级
凡尔下深(m)	1055.76	1850.54	2531.45	3002.23
开启压力(MPa)	10	9.86	9.72	9.51

研究论证认为, 两级气举阀间开启压力差值小是气举排液采气失败的主要原因。

(2) 气举管柱对气井生产的负面影响

气举排液通常有低压低产气井的气举排液维持生产和作业压井(或积液停产井)后的排液诱喷两种类型。对于低压低产井的连续气举排液, 因气举的目的是有效降低井底流压, 增大生产压差, 所以, 气举阀的存在只能起到正面辅助作用。但是, 对地层能量充足的积液停产(或作业压井)气井的排液复产而言, 就出现了另外一个问题。

假如气井复产后的正常生产套压为 10 MPa, 如果气举阀的开启压力分别为 11 、 10 、 9 、 8 MPa, 则气举诱喷复产后, 气井正常生产时, 第二、三、四级气举阀会处于开启状态, 对气井而言, 自第二级气举阀以下, 相当于油套管同时生产。但不利于气井的正常带液生产, 而且会造成套管和油管外壁腐蚀速度加快, 对气井的生产和寿命形成一定威胁。因此, 气举阀不可冒然下井。

三、工艺参数优化设计

气举工艺参数设计主要包括地面气举压力、气举凡尔级数和深度、凡尔的开启压力、气室的充气压力以及气举气量等。为便于现场实际操作, 本次设计还包括地面气举压力、临界液面深度和相应地面气举压力。

考虑气举过程中油管内的流态和压力的动态变化过程会影响凡尔的距, 进行气举工艺参数设计时以凡尔的距为零和最大值来分别设计计算压力调整区间。

由井下凡尔开启压力公式为:

$$p_{op} = \frac{p_d}{1-R} - \frac{R p_i}{1-R}$$

当气举凡尔的距为零(即 $p_i = p_d$)时,开启压力为 $p_{op} = p_d$;当凡尔的距为最大(即 $p_i = 0$)时,最大开启压力为:

$$p_{opmax} = p_d / (1 - R)$$

由于现场操作时地面压力难以控制为一定值,往往在一定压力范围内波动,因此,为保障凡尔充分开启,在设计时将地面气举压力的上限值和下限值分别对应井下凡尔最大开启压力和零凡尔距开启压力($p_{op} = p_i = p_d$)。由井口注气压力计算井下凡尔处的注气压力,按静止气柱的平均温度和平均气体偏差系数算法迭代计算:

$$p_{ws} = p_{ts} \exp\left(\frac{0.03415 \gamma_g H}{ZT}\right)$$

式中: p_{ws} 为按静止气柱公式计算的井下凡尔处的压力,MPa; p_{ts} 为静止气柱的井口压力,MPa; γ_g 为气体相对密度; H 为井口到凡尔处的距离,m; T 为井口到凡尔间气体平均温度,K, $T = (T_{ts} + T_{ws})/2$; T_{ts} 、 T_{ws} 分别为静止气柱井口、凡尔处温度,K; Z 为井口、凡尔间气体平均偏差系数, $Z = f(p, T)$; p 为井口、凡尔之间的平均压力,MPa, $p = (p_{ws} + p_{ts})/2$ 。

第一级凡尔各项参数具体计算步骤如下。

① p_{max} 为地面能提供的最大气举压力。定义井口气举压力上限值为 p_{omax1} ,对应井下凡尔处最大开启压力为 p_{opmax1} ,取 $p_{opmax1} = p_{max}$;设井口开启压力下限值为 $p_{o1} = p_{omax} - \gamma$,对应井下凡尔处开启压力 p_{op} , γ 取初值为 $\gamma_0 = 1$ MPa。

②假设初始液面和凡尔深度距离为 $x_0 = 400$ (m),则凡尔下深为 $H_1 = h_h + x_0$, h_h 为初始液面深度,计算液面降低到凡尔处的油管回压(p_i)为:

$$p_i = (1 + r)x_0 \rho_l / 100 \text{ (MPa)}$$

式中: r 为油管和油套环管内相同体积的液柱高度之比, ρ_l 为压井液密度。

③温度按线性分布计算,利用下面的公式计算凡尔处开启压力(p_{op}):

$$p_{op} = p_{ws} = p_{o1} \exp\left(\frac{0.03415 r_g H_1}{ZT}\right)$$

④令 $p_{ws} = p_i$,代入 $p_i = (1 + r)x_1 \rho_l / 100$ 反求出 x_1 。

⑤把 x_1 与 x_0 进行比较,判断两者之差是否小于 0.0001 m,即判断深度 H_1 处油压和注气压力是否相等,条件满足则进行下一步,否则 $x_0 = x_1$,重复第②~④步,直到条件满足为止。

⑥计算油压为零时的最大开启压力 p_{opmax1} 。 $p_{opmax1} = p_{o1} / (1 - R)$,再利用静止气柱公式反求出井

口气举压力上限值 p_{omax1} 。

⑦令 $\gamma_1 = p_{omax1} - p_{o1}$,判断 γ_1 与 γ_2 两者之差是否小于 0.0001 ,即判断 p_{omax1} 与 p_{omax} 是否相等,若不等,则令 $\gamma_0 = \gamma_1$,重复第①~⑥步,直到条件满足为止。

⑧计算室温下的气室充气压力(p_{d01}):

$$p_{d01} = Z_0 \times 293.15 p_{opl} / (Z_d T_d)$$

测试架上的凡尔开启压力(p_{tro1})为:

$$p_{tro1} = p_{d01} / (1 - R)$$

式中: Z_0 为 293 K 和 100 kPa 下的氮气压缩因子; Z_d 、 T_d 分别为凡尔所在深度处氮气的温度及相应的压缩因子。

于是便确定了第一级凡尔的下深 H_1 、地面工作压力范围 $p_{o1} \sim p_{omax1}$ 、凡尔井下开启压力 p_{opl} 、凡尔关闭压力 $p_{vc} = p_{opl} = p_d$ 、室内充气压力 p_{d01} 和测试架上的开启压力 p_{tro1} ,其中井口气举压力上限值 p_{omax1} 将作为井口气举的工作压力。

若在设计第一级气举凡尔时出现油管液面高出井筒,则应适当减小气举压力。

第二级凡尔参数设计方法与第一级基本类似,但要考虑如下两点。

①为保证气举凡尔不被刺坏,一般在地面气举工作压力下控制注气量在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,此时井下凡尔前后的压差为 $1 \sim 2$ MPa,这里取中间值 1.5 MPa,即在第一级凡尔气举压力上限值 p_{omax1} 下第一级凡尔前后压差为 1.5 MPa。在压差 1.5 MPa 下油套液面会产生液面差值,若卸掉气举压力,则液面会回落到一个平衡液面,在确定第二级凡尔下深时液面初始高度应以平衡液面为准。

②为保证第一级凡尔的关闭,第二级凡尔地面气举工作压力即开启压力的上限值 p_{omax2} 取第一级凡尔开启压力的下限值 p_{o1} ,即取 $p_{omax2} = p_{o1}$,这样第一级凡尔举通后降低气举压力开启第二级凡尔时,能保证第一级凡尔完全关闭,然后通过迭带求出二级凡尔地面开启压力下限值 p_{o2} 和其他参数。

进行下一级凡尔设计时与第一、二级凡尔设计过程完全一样,至此便完成了气举凡尔参数设计的全过程。

综上所述,气举设计是一个反复迭代的复杂计算过程,按以上思路进行了设计计算程序编制,完成后调试通过,使一次、多次气举参数设计全部通过 Visual Basic 6.0 语言编程实现。设计时只需输入气源压力和气举井的井筒积液深度和管柱等基本参数,即可迅速输出气举设计参数。

四、现场应用试验效果分析

以一口气举诱喷复产的作业井进行实例应用分析。基本数据:气层压力 16 MPa,中深 2600 m,油管下深 2500 m,液面深度 1000 m,压井液密度 1.13 g/m³,井口温度 25 ℃,井底温度 112 ℃,2.5"油管内外径分别为 73.02 mm、62 mm,5.5"套管内径为 121.4 mm,地面能提供的最大气举压力为 12 MPa,注入气相对密度 0.6,临界压力 4.623 MPa,临界温度 196.3 K。具体设计步骤如下。

(1)参数设计前,先比较管鞋处最大注气压力是否大于管鞋处的油管液面回压。若大于油管回压,则不必下气举凡尔,否则进行气举凡尔参数设计。经计算,该井在地面最大气举压力下难以不下气举凡尔而直接举通,所以需进行气举参数设计。

(2)首先进行一次气举参数设计。按四级凡尔气举设计,按程序界面输入已知数据,选择计算,输出结果如表 2 所示。

表 2 计算结果表

参 数	第一级	第二级	第三级	第四级
地面注气压力(MPa)	12.00	10.97	10.03	9.17
地面开启压力(MPa)	10.97	10.03	9.17	8.38
井下开启压力(MPa)	12.10	11.34	10.59	9.87
室内充气压力(MPa)	10.37	9.36	8.45	7.63
测试开启压力(MPa)	11.36	10.25	9.25	8.35
设计初始液面(m)	1000	1413	1806	2178
井下凡尔深度(m)	1311	1704	2077	2431
井下临界深度(m)	970	1376	1771	2145
地面临界压力(MPa)	12.00	11.29	10.32	9.45

可以看出,第三级气举凡尔下深 2077 m,第三级气举凡尔下的油管液柱为 433 m,气源压力完全有能力自油管鞋彻底举通。因此,该井确定为三级凡尔气举排液。

(3)完成一次气举参数设计后,为防止一次气举难以举活,需进行多次气举参数设计。

现场操作步骤如下。

(1)一次气举操作步骤。若为第一次气举,并且无液面误差,注气压力首先控制在 10.97~12.00 MPa 之间,并尽量稳定在工作压力 12.00 MPa,出口气量控制在 1×10⁴ m³。待第一级凡尔开启,并将液体充分举出后,降低井口气举压力至 10.0~10.97 MPa 之间,并尽量稳定在工作压力 10.97 MPa,出口

气量仍稳定在 1×10⁴ m³。依次类推,直至第三级凡尔完全举通。

(2)多次气举操作步骤。如果实施第一次气举后气井仍未举活,还需再次气举,则应按照多次气举设计实施气举措施。分述如下:①如果气举前实际液面深度为 1500 m,则开始气举时压力应控制在 10.03~10.97 MPa 之间,直接开启第二级凡尔,而后再降低压力开启第三级凡尔进行气举;②如果实际液面深度为 1350 m,则开始气举时压力应控制在 11.29~12.00 MPa 之间,并尽量稳定在 12.00 MPa 左右,待第一级凡尔以上的液体充分举出后再按照一次气举设计的方式逐级开启下级凡尔进行气举;③如果气举后气井仍未复活,应停止气举,恢复一段时间,直至地层压力和井筒液面回压相平衡,则会得到一套压值。

根据套压值可折算出井筒内套压为零的平衡液面,再按照此平衡液面实施气举措施。

计算结果为 1761 m,则开始气举时注气压力控制在临界压力 10.32~10.97 MPa,直接开启第二级气举凡尔,待井筒出液后将压力稳定控制在 10.97 MPa 左右,按照一次气举参数设计实施气举,一次成功。

程序软件编制完成后,已成功地指导了 20 多口作业气井的诱喷排液复产,起到了一次性迅速彻底排除井筒积液的理想效果。

五、认识及结论

气举阀气举排液采气工艺参数设计与优选技术,针对气举工艺应用中的存在问题,在分析论证的基础上,研究论证了气举采气与气举采油的区别,提出了气举阀开启压力、阀间距和开启压力差值应适当增大的工艺参数设计优选新思路,并在此基础上通过编程计算,形成了一种新方法,提高了气举的针对性和成功率。

参 考 文 献

[1] 张育林,余树良.采气[M].北京:石油工业出版社,1989.
[2] 王鸿勋,张琪.采油工艺原理[M].北京:石油工业出版社,1990.
[3] 崔海清.工程流体力学[M].北京:石油工业出版社,1995.
[4] 冷向军.VB6.0 入门与提高[M].北京:清华大学出版社,1999.

(收稿日期 2005-11-18 编辑 韩晓渝)