

柱塞气举排水采气井工作制度优化方法研究

肖雨阳^{1,2} 李军亮^{1,2}

1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100;
2. 油气钻采工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100

摘 要: 柱塞气举作为一种经济、有效的排水采气工艺技术,在气井排采中应用广泛。目前柱塞气举排水采气井工作制度调整通常依靠现场经验进行,调整难度大、效率低。针对上述问题,在对不同工作制度下气井产气量、产液量和柱塞运动速度分析的基础上,根据柱塞运行特征将柱塞上升过程分为三个阶段,并从柱塞基本运动方程出发,研究每个阶段柱塞运动方程的求解方法,编制了柱塞气举排水采气动态模拟软件系统。通过实例分析,柱塞气举排水采气动态模拟软件系统能有效模拟柱塞气举排水采气井在不同工作制度下的生产动态,为确定合理的工作制度提供了依据。通过对某试井现场应用,取得了平均产气量由 $16\,323\text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $18\,724\text{ m}^3/\text{d}$ 、平均排液量由 $1.73\text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $1.87\text{ m}^3/\text{d}$ 的增产效果。研究结果为柱塞气举在现场运用提供更可靠的理论基础。

关键词: 气井; 柱塞气举; 工作制度; 运动特征; 动态模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.06.012

Study on optimization method of working system of plunger gas lift drainage gas production well

XIAO Yuyang^{1,2}, LI Junliang^{1,2}

1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China;
2. China Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Wuhan, Hubei, 430100, China

Abstract: As an economical and effective technology, plunger gas lift is widely applied in drainage gas production. At present, the adjustment of working system of plunger gas lift drainage gas production wells usually depends on field experience, which is difficult and inefficient. Based on the analysis of gas production, liquid production and plunger movement speed under different working conditions, the rising process of the plunger is divided into three stages in accordance with the its operating characteristics. Based on the basic motion equation of the plunger, the solution method of the motion equation of the plunger in each stage is studied and the dynamic simulation software system of the plunger gas lift drainage gas production is developed as well. Through case study, the system can effectively simulate the production performance of plunger gas lift drainage gas well under different working conditions and provide a basis for determining a rational working system. Finally, field application of a well test shows that the average gas

收稿日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目“多种通讯约束下网络化智能系统的性能分析与优化设计”(62173049)

作者简介:肖雨阳(1998-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事采油采气工艺研究相关工作。E-mail:786312314@qq.com

通信作者:李军亮(1977-),男,河南鹤壁人,副教授,博士,主要从事采油采气工艺及系统控制与优化相关工作。E-mail:lijunliang@yangtzeu.edu.cn

production is increased from 16 323 m³/d to 18 724 m³/d and the average drainage is increased from 1.73 m³/d to 1.87 m³/d, which provides reliable theoretical basis for the field application of plunger gas lift.

Keywords: Gas well; Plunger gas lift; Working system; Movement characteristics; Dynamic simulation

0 前言

柱塞气举技术是气举采油技术系列之一,它是通过利用油井气层的气体(或外加气源气体)推动井下柱塞,举升油层液体的一种间歇举升方式。柱塞在被举升液体和高压气体之间起分隔作用,以减小气相和液相的滑脱损失,从而提高油井的举升效率^[1-6],目前柱塞气举更多应用在气井排采中。

目前对柱塞气举的研究主要集中在两个方面:一个是柱塞运动规律模拟研究^[7-13];另一个是合理工作制度研究^[13-14]。工作制度反映了柱塞气举井的开、关时间,并进一步决定了油气井是否能正常生产以及产量的大小,因而现场工作更关心的是确定合理的工作制度。载荷系数是衡量柱塞是否能够正常举升的一项重要参考因素,经常被用来评价工作制度。根据现场经验统计,载荷系数>50%时,柱塞无法上行举升排液;载荷系数<50%时,开井后柱塞能够到达地面的可能性超过80%^[10]。韩强辉^[14]通过数值模拟的方法计算了柱塞流场恰好不漏液的临界柱塞上行速度为3.7 m/s;张春等人^[15]通过定时、定压、压力微升、时间优化四种模式对应不同气井类型,对工作制度进行优化;刘苗^[16]通过现场经验,把油套压差作为依据对工作制度进行优化;夏星等人^[17]通过关井后油套压恢复速度计算最佳工作制度;刘丽萍等人^[18]以最佳气井载荷因数为依据,对工作制度进行优化;刘华敏等人^[19]利用测量续流流量低于临界携液流量的方法,以减少无效续流时间来优化工作制度。现制度优化依赖于现场经验,其动态模型缺少对柱塞气举工艺整体全面的运动过程建立,且没有考虑柱塞运动漏失、地层产水产气的影响,所模拟出的数据与现场实际数据误差较大,不能准确预测气井在某一工作制度下的柱塞气举生产情况。

本文建立柱塞排水采气工艺全过程模型,考虑多种因素之下,从柱塞的基本运动方程出发,根据生产运动特征,分阶段研究了方程的求解方法,并编制了柱塞气举排水采气动态模拟软件系统。利用该系统模拟气井不同工作制度下的生产动态,从而确定合理的工作制度。

1 柱塞气举动态模型建立

柱塞气举系统能否正常工作主要体现在柱塞在上升过程中的运动动态。开、关井时间决定了柱塞能否举升以及举升的速度。

将柱塞及上部举升的液体看成一个运动单元。运动单元在上升过程中受到自身重力、摩擦力、上部和下部的压力的共同作用,见图1。

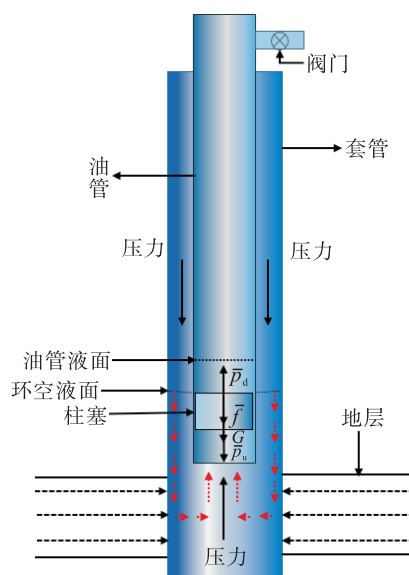


图1 柱塞气举示意图

Fig.1 Schematic diagram of plunger gas lift

取微时间单元 Δt 以及时间节点 $t_1, t_2, \Delta t = t_2 - t_1$ 。运动单元的运动规律可用以下公式表示:

$$M\bar{a} = (\bar{p}_d - \bar{p}_u) / A - Mg - \bar{f} \quad (1)$$

$$v_2 = v_1 + \bar{a} \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$\bar{p}_u = (p_{u1} + p_{u2}) / 2 \quad (3)$$

$$\bar{p}_d = (p_{d1} + p_{d2}) / 2 \quad (4)$$

式中: t_1, t_2 为计算时间点,s; A 为柱塞横截面积,m²; Δt 为时间间隔,s; M 为柱塞及上部液体质量,kg; $\bar{a}$ 为在 Δt 内的平均加速度,m/s²; v_1, v_2 分别为在 t_1, t_2 时间点柱塞上升速度,m/s; $p_{u1}, p_{u2}, \bar{p}_u$ 分别为在 t_1, t_2 时间点运动单元上部压力和平均压力,MPa; $p_{d1}, p_{d2}, \bar{p}_d$ 分别为在 t_1, t_2 时间点运动单元下部压力和平均压力,MPa; g 为重力加速度,m³/s; $\bar{f}$ 为摩擦阻力,N。

其中 M 随着柱塞上部液柱漏失而发生变化,本文根据棒状柱塞气举液体漏失公式^[20]:

$$M_2 = M_1 - q_v \Delta t \rho \quad (5)$$

$$q_v = \frac{\pi D \delta^3}{12 \mu} \left(2 \rho g + \frac{\Delta p}{l_p} \right) \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{e}{\delta} \right)^2 \right] + \frac{\pi D \delta v}{2} \quad (6)$$

式中: q_v 为液体漏失量,m³/s; D 为管柱内径,m; μ 为液体黏度,Pa·s; ρ 为液相密度,kg/m³; Δp 为柱塞上下压力差,MPa; l_p 为柱塞长度,m; e 为偏心距离,m; δ 为柱塞

与管壁距离, m; M_1 、 M_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻的柱塞上部液柱质量, kg。

由于摩擦力、上部和下部的压力随着时间不断发生变化, 因此运动单元在任何时间点的运动状态不是恒定的。根据生产运动特征, 将柱塞上升过程分解为三个阶段: 环空液体进入油管阶段、环空气体进入油管阶段、井口排液阶段。

1.1 环空液体进入油管阶段

开井后, 油压降低, 运动单元在上下压差的作用下向上运动, 环空气体膨胀, 将环空底部液体压至油管, 环空液面下降, 油管液面上升。在此阶段柱塞上部气体不断从井口采出, 同时运动单元上升, 因此气体的质量及体积都发生了变化。根据标况下气体体积守恒则有:

$$V_{st2} = V_{st1} - q_g \cdot \Delta t / 86\,400 \quad (7)$$

式中: V_{st1} 、 V_{st2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点运动单元上部气体在标况下的体积, m^3 ; q_g 为在 Δt 内井口油嘴出气量, q_g 可由气体过井口节流阀公式判断节流状态计算得出, m^3/d 。

根据 Δt 内运动单元平均速度, 在 t_2 时刻运动单元到井口之间油管空间体积为:

$$V_{st2} = L_{st2} \cdot A_i \quad (8)$$

$$L_{st2} = L_{st1} - \bar{v} \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中: V_{st1} 、 V_{st2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点运动单元到井口的油管空间体积, m^3 ; A_i 油管环空面积, m^2 ; L_{st1} 、 L_{st2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点运动单元到井口的距离, m。

利用气体状态方程, 计算 t_2 时刻油管上部气体的平均压力:

$$\bar{p}_{st2} = \frac{p_{bk} V_{st2} \bar{T}_{st2} \bar{Z}_{st2}}{V_{st2} T_{bk} Z_{bk}} \quad (10)$$

式中: $\bar{p}_{st2}$ 为在 t_2 时间点运动单元上部气体的平均压力, MPa; $\bar{T}_{st2}$ 为在 t_2 时间点运动单元上部气体的温度, K; $\bar{Z}_{st2}$ 为在 t_2 时间点运动单元上部气体的压缩因子; p_{bk} 为标况下压力, MPa; T_{bk} 为标况下温度, K; Z_{bk} 为标况下气体压缩因子。

同时 $\bar{p}_{st2}$ 也可以看作井口油压 p_{i2} 和 p_{u2} 的平均压力, 在不考虑气体与管壁的摩擦的情况下, p_{i2} 和 p_{u2} 之间的关系可以用静气柱表示:

$$p_{u2} = p_{i2} \cdot \exp\left(\frac{0.034\,15\gamma_g L_{st2}}{2 \times \bar{Z}_{st2} \bar{T}_{st2}}\right) \quad (11)$$

式中: γ_g 为天然气相对密度; p_{i2} 为在 t_2 时间点井口压力, MPa。

在已知 t_1 时刻柱塞运动状态的情况下, 通过迭代计算可以得到 t_2 时刻的柱塞运动状态: 假设柱塞上部压力 p_{u2} , 得到上部平均压力 $\bar{p}_u$, 进一步得到 Δt 内的柱塞平均上升速度 $\bar{v}$; 然后根据 t_2 时刻油管上部空间, 利用气体状态方程计算出油管上部气体平均压力 $\bar{p}_{st2}$; 由 p_{u2} 和 $\bar{p}_{st2}$ 计

算出 p_{d2} ; 最后利用静气柱计算公式得到 p'_{u2} , 对比 p'_{u2} 和 p_{u2} , 如果误差大于要求, 则令 $p_{u2} = p'_{u2}$ 继续迭代。

在计算 p_{d2} 时, 假设柱塞卡定器在油管底部, 在油管底部油管压力和套管压力相等。在 t_2 时刻有:

$$p_{d2} + p_{xt2} = p_{egl2} + p_{cl2} \quad (12)$$

式中: p_{xt2} 、 p_{egl2} 分别为在 t_2 时间点油管和油套环空底部液柱产生的压力, MPa; p_{cl2} 为在 t_2 时间点油套环空气体界面上的压力, MPa。

在 Δt 时间内柱塞上升的距离为 $\Delta L = \bar{v} \cdot \Delta t$, 柱塞底部液面上升, 环空液面下降。由于环空气体未进入油管, 在柱塞底部全部为液体, 在 t_2 时刻柱塞底部和环空液体高度分别为:

$$L_{xt2} = L_{xt1} + \Delta L \quad (13)$$

$$L_{cl2} = L_{cl1} - \Delta L A_i / A_c \quad (14)$$

式中: L_{xt1} 、 L_{xt2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油管底部液柱高度, m; L_{cl1} 、 L_{cl2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油套环空底部液柱高度, m; A_c 为套管环空面积, m^2 。

因此:

$$p_{xt2} = 10^{-6} \rho g L_{xt2} \quad (15)$$

$$p_{egl2} = 10^{-6} \rho g L_{cl2} \quad (16)$$

在 t_2 时刻环空气体体积为:

$$V_{c2} = V_{c1} + \Delta L A_i \quad (17)$$

式中: V_{c1} 、 V_{c2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点的油套环空气体体积, m^3 。

则环空平均压力为:

$$\bar{p}_{cg2} = \frac{\bar{p}_{cg1} V_{c1} \bar{T}_{c2} \bar{Z}_{c2}}{\bar{T}_{c1} \bar{Z}_{c1} V_{c2}} \quad (18)$$

式中: $\bar{p}_{cg1}$ 、 $\bar{p}_{cg2}$ 分别为在 t_1 、 t_2 时间点的油套环空气体平均压力, MPa; $\bar{T}_{c1}$ 、 $\bar{T}_{c2}$ 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油套环空气体平均温度, K; $\bar{Z}_{c1}$ 、 $\bar{Z}_{c2}$ 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油套环空气体平均压缩因子。

同时也可以将 $\bar{p}_{cg2}$ 看作井口套压 p_{c2} 和 p_{egl2} 的平均压力。将环空看成静止气柱, 利用式 (18) 可以求出 p_{egl2} 和 p_{c2} 之间的关系。

利用求 p_{u2} 类似的迭代方法即可求出 p_{d2} 。

1.2 环空气体进入油管阶段

当油套环空液体下降至油管鞋处时, 环空气体继续膨胀并且开始进入油管, 在气体膨胀的过程中, 柱塞与其上部积液继续向上运动, 直到柱塞上部液柱到达井口。

在此阶段 p_{u2} 的计算方法和第一阶段相同。而求 p_{d2} 的关键是求出在 Δt 时间有多少气体从套管进入油管, 且在油管底部油压和套压相等。

设在 Δt 时间内从套管进入油管的气体在标况下体积为 ΔV_{c1g} , 则在 t_2 时刻套管和油管柱塞下部气体在标况下体积分别为:

$$V_{xlg2} = V_{xlg1} + \Delta V_{ctg} \quad (19)$$

$$V_{cg2} = V_{cg1} - \Delta V_{ctg} \quad (20)$$

式中: ΔV_{ctg} 为在 Δt 内从油套环空进入油管的气体在标况下的体积, m^3 ; V_{xlg1} 、 V_{xlg2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油管中运动单元下部气体在标况下的体积, m^3 ; V_{cg1} 、 V_{cg2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油套环空中气体在标况下的体积, m^3 。

套管空间体积和油管柱塞下部气体占据的空间体积分别为:

$$V_c = H_{kdq} \cdot A_c \quad (21)$$

$$V_{xt2} = V_{xt1} + \bar{v} \cdot \Delta L \cdot A_t \quad (22)$$

式中: V_c 为油套环空体积, m^3 ; H_{kdq} 为卡定器下深, m ; V_{xt1} 、 V_{xt2} 分别为在 t_1 、 t_2 时间点油管中运动单元下部气体体积, m^3 。

根据气体状态方程得到环空和柱塞下部气体平均压力:

$$\bar{p}_{cg2} = \frac{p_{bk} V_{cg2}}{V_c} \quad (23)$$

$$\bar{p}_{xt2} = \frac{p_{bk} V_{xt2} \bar{T}_{xt2} \bar{Z}_{xt2}}{V_{xt2} T_{bk} Z_{bk}} \quad (24)$$

将环空和柱塞下部气体看成静止气柱, 仍可利用式(17)求出 p_{lg12} 和 p_{d2} 、 p_{ck2} 和 p_{c2} 之间的关系。

在卡定器处油压和套压相等, 即:

$$p_{ck2} = p_{lg12} + \rho g L_{xt12} \quad (25)$$

式中: p_{lg12} 为在 t_2 时间点运动单元下部气液界面上的压力, MPa ; p_{ck2} 为在 t_2 时间点卡定器处油套环空压力, MPa 。

ΔV_{ctg} 可按下述方法计算: 假设 ΔV_{ctg} , 计算出 V_{cg2} , 利用气体状态方法得到 $\bar{p}_{cg2}$ 。将 $\bar{p}_{cg2}$ 看成 p_{c2} 和 p_{ck2} 的平均值。不断调整 p_{c2} , 通过静止气柱计算 p_{ck2} , 直至其平均值与 $\bar{p}_{cg2}$ 相差很小, 满足误差范围。同样的方法可以得到 p_{d2} 和 p_{lg12} , 并计算卡定器处油压。如果卡定器处套压大于油压, 则增加 ΔV_{ctg} , 反之则减小 ΔV_{ctg} , 直至卡定器处油压和套压相等。在可以确定 ΔV_{ctg} 的基础上, 计算 p_{d2} 的方法: 假设 p_{d2} , 得到 $\bar{p}_d$, 进一步得到 Δt 内的 $\bar{v}$ 。计算 ΔV_{ctg} , 同时得到 p'_{d2} , 对比 p'_{d2} 和 p_{d2} , 如果误差大于要求, 则令 $p_{d2} = p'_{d2}$ 继续迭代。

1.3 井口排液阶段

随着环空气体继续不断膨胀, 柱塞上部液柱顶部到达井口, 气井开始排液, 柱塞上部液柱不断减少, 直到柱塞上部液柱全部排出。在 Δt 内的平均井口油压和井口油嘴后压力决定了排出的液体体积:

$$\Delta V_{st} = q_1 \cdot \Delta t = V_{st1} - V_{st2} \quad (26)$$

式中: ΔV_{st} 为在 Δt 内井口排液量, m^3 。

p_{u2} (p_{l2}) 可按下述方法计算: 假设 p_{l2} , 由 p_{u1} 可知在 Δt 时间内其平均压力 $\bar{p}_1$, 根据方程(26)可以计算出排液量 ΔV_{st} 和柱塞上部剩余空间 V_{st2} 。再结合 p_{d2} 、 p_{u2} (p_{l2}) 利

用运动方程可以计算出柱塞平均运动速度 $\bar{v}$, 以及在 Δt 时间内运动了距离 L , 进一步可以计算出柱塞上部空间减小量 ΔV_{st} 。对比 ΔV_{st} 和 $\Delta V'_{st}$, 如果误差大于要求, 则重新假设 p_{l2} 进行迭代计算。 p_{d2} 的计算方法与上一阶段相同。

1.4 续流过程

排液阶段结束后, 柱塞停留在井口捕捉器位置, 柱塞上的液段完全进入生产管线, 继续开井续流生产, 直到开井时间结束。在续流的过程中, 油管鞋处和套管鞋处压力可能还未到达平衡, 环空气体继续膨胀进入油管。由于地层气体流量小于临界携液流量值, 井筒底部逐渐开始积液, 油管鞋处压力逐渐上升。在一段时间后油管鞋处和套管鞋处压力达到平衡, 环空气体将停止膨胀进入油管。随着地层继续出液, 井筒积液继续增加, 油管鞋处和套管鞋处压力被平衡打破后, 油管积液进入套管继续维持油套管鞋处压力平衡。

1.5 关井过程

在气井完成续流过程后关井, 井口捕捉器释放柱塞, 柱塞在自身重力的影响下开始下落到达井底卡定器处。在关井后, 油套管是一个封闭的空间, 井口油压和井口套压开始恢复, 地层继续出液、出气。将单位时间下的出气量和出液量分配到油管和套管当中。采用在 t_1 时刻下, 地层出气量按油管、套管横截面积大小分配。在分配气体后, 假设分别分配给油管和套管一定量的液体, 计算出油套管鞋处压力。如果油管鞋处压力小于套管鞋处压力, 油管分配液量增加单位体积; 如果油管鞋处压力大于套管鞋处压力, 套管分配液量增加单位体积; 直到油套管鞋两处压力相同, 完成 t_1 时刻气液分配并循环此过程直到关井时间结束。

2 模拟结果与讨论

根据上述理论, 编制了柱塞气举排水采气动态模拟软件, 通过模拟得到某井在一定生产条件下的油套压变化曲线, 见图2。

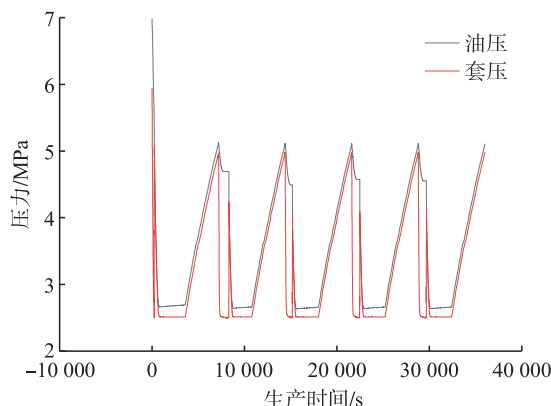


图2 油套压变化曲线图

Fig. 2 Oil casing pressure variation curve

由图 2 可知,软件在模拟一段时间后,油套压趋于周期性稳定变化。选取压力变化稳定后,对柱塞运动一个循环周期的油套压变化曲线进一步分析,见图 3。

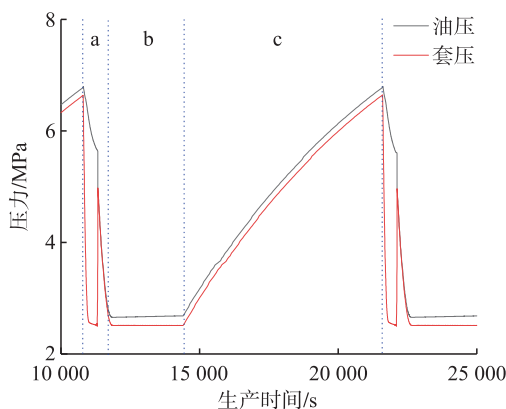


图 3 一个周期的油套压变化曲线图

Fig. 3 One cycle curve of oil casing pressure change

由图 3 可观察出,a 时间段处于开井阶段,油压、套压开始降低,柱塞从底部向上运动,当柱塞到达顶部时,

表 1 试验井基本情况表

Tab. 1 Basic information of test well

油管内径 / mm	气水比 / ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	井底温度 / $^{\circ}\text{C}$	井径 / mm	井深 / m	套管内径 / mm	井口温度 / $^{\circ}\text{C}$	气体相 对密度	水相对 密度	卡定器 下深 /m
62	2 000	84.55	244.5	3 700	114.3	20	0.606	1.007	3 000

3.2 模拟软件系统可靠性验证

采用本文开发的柱塞气举排水采气动态模拟软件系统模拟,试验井在此制度下的产气量 $17\,387\text{ m}^3/\text{d}$,排量 $1.90\text{ m}^3/\text{d}$,与实际生产数据误差小于 10.0%,表明模拟软件系统可靠、能满足现场生产需求。

3.3 工作制度优化

3.3.1 生产动态模拟

试验柱塞气举工艺井不同工作制度下的生产动态模拟结果见表 2。

表 2 试验井不同工作制度下的生产动态模拟结果表

Tab. 2 Dynamic simulation of production performance of test well under different working system

开井 时间 / h	关井 时间 / h	平均 产气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	平均 排量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	柱塞平 均速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	备注
1.50	1.00	19 416	2.29	2.99	正常举升
1.00	1.00	19 506	2.28	3.50	正常举升
1.00	2.00	17 387	1.90	6.19	正常举升
1.00	3.00	15 132	1.62	7.18	正常举升
2.50	1.50	17 096	2.13	2.31	正常举升
2.00	1.50	18 021	2.12	3.11	正常举升
2.00	1.00	—	—	—	无法举升
3.00	1.50	19 395	2.13	1.89	正常举升

套压压力暂时上升,然后继续降低;b 时间段处于续流阶段,油压、套压变化相对稳定;c 时间段处于关井阶段,柱塞落回井底,地层继续产气产水,油压、套压逐渐增加。通过分析发现,模拟出来的油套压变化曲线符合实际柱塞气举工艺生产压力变化情况。重复以上过程继续生产,可模拟气井在长时间内的生产情况。

3 现场应用

3.1 现场应用井简况

试验井于 2012 年 9 月投产,投产初期油压为 28 MPa,平均产气量 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均排量 $20 \sim 30\text{ m}^3/\text{d}$ 。投产后由于井底积液,油压快速下降到 6 MPa,平均产气量 $1.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均排液量为 $7.5\text{ m}^3/\text{d}$,排液能力差。该井于 2021 年 5 月开展柱塞气举排液采气工艺,采用开井 1 h 关井 2 h 工作制度,平均产气量 $16\,323\text{ m}^3/\text{d}$,平均排液量 $1.73\text{ m}^3/\text{d}$,生产正常。

试验井基本情况见表 1。

3.3.2 工作制度优选

对模拟结果分析可见:关井时间越长,柱塞平均上升速度越大;开井时间越长,柱塞平均上升速度越小。在开井 1 h 关井 2 h 制度下,其产气排液能力相对较低,且由于关井时间较长,井底流压上升,导致柱塞上行平均速度为 6.19 m/s ,速度过快,液体漏失严重,开井 1 h、关井 1 h 时,日均产气量和排量最大,且柱塞平均速度为 3.50 m/s ,在最佳速度范围内^[14],优选开井 1 h、关井 1 h 为试验井工作制度。

3.3.3 应用效果分析

试验井于 2021 年 7 月,由开井 1 h 关井 2 h 变更为开井 1 h 关井 1 h 工作制度后,平均产气量由 $16\,323\text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $18\,724\text{ m}^3/\text{d}$,提高了 14.71%,平均排量由 $1.73\text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $1.87\text{ m}^3/\text{d}$ 提高了 8.09%,见表 3。

表 3 试验井工作制度优化前后对比

Tab. 3 Changes before and after test well optimization

日期	平均产气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	平均排量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	工作 制度	备注
2021-05-28 ~ 2021-07-02	16 323	1.73	开 1 h、 关 2 h	优化前
2021-07-03 ~ 2021-08-18	18 724	1.87	开 1 h、 关 1 h	优化后

根据工作制度优化前、后共 72 组数据,通过观察气井日产气量、日排液量和累积产气量、累积排液量绘制

的曲线也可见,工作制度优化效果明显,见图 4。

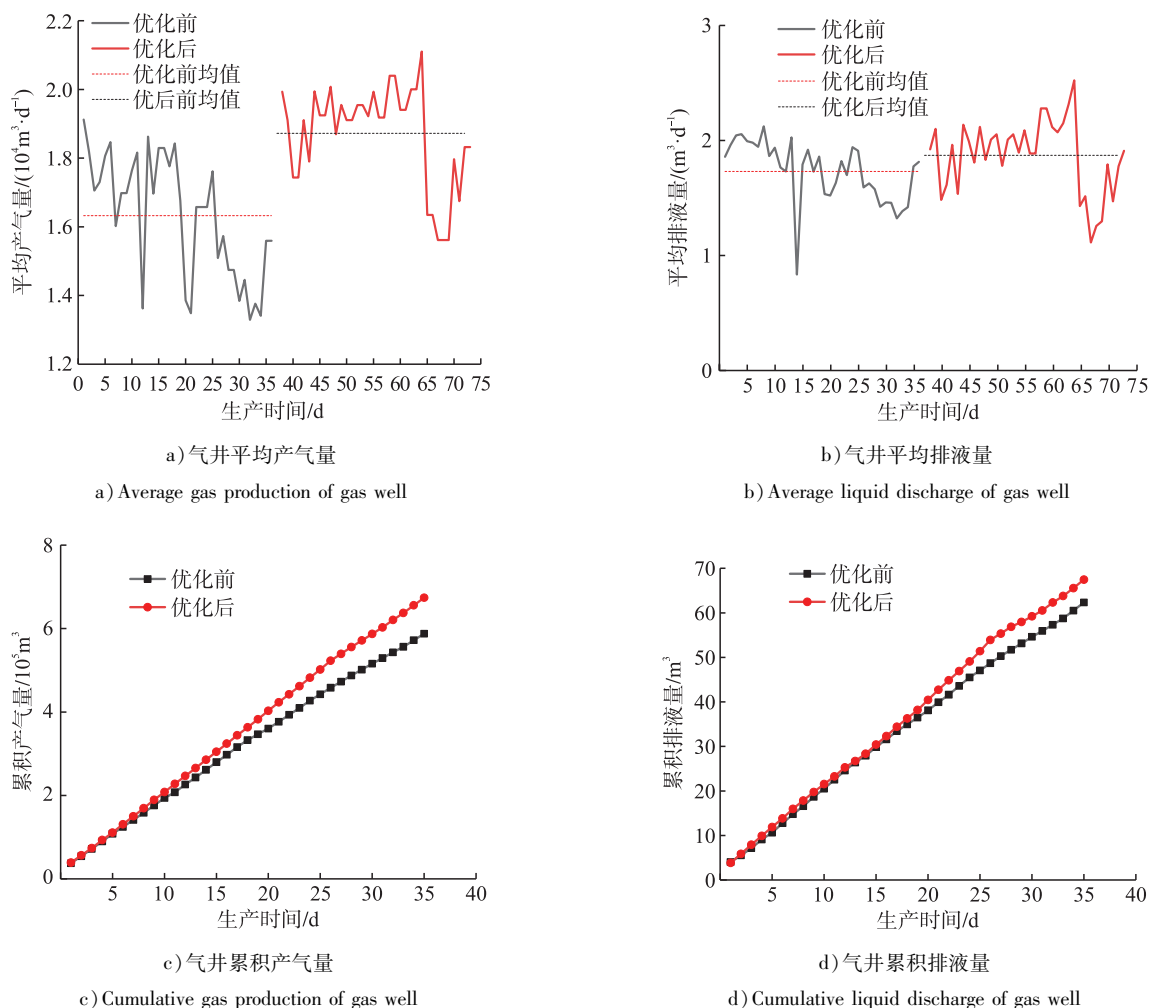


图 4 工作制度优化前后对比图

Fig.4 Comparison before and after optimization of working system

4 结论

1)通过建立柱塞气举全过程,考虑地层产气产液、柱塞漏失等因素,能预测柱塞气举生产以指导现场的工作制度优化。

2)从柱塞运动的基本方程出发,分阶段进行求解,详细叙述了求解过程,方法简单,易于编程。在编制了柱塞气举排水采气动态模拟软件后,结合现场实例对比,误差精度小于 10%,从而验证了该方法的可行性。

3)通过对实例井进行不同工作制度下的动态模拟,优选出最优工作制度,实现了单井排水采气效果的增加。

参考文献:

- [1] 杨亚聪,穆谦益,白晓弘,等. 柱塞气举排水采气技术优化研究[J]. 石油化工应用,2013,32(10):11-13.

YANG Yacong, MU Qianyi, BAI Xiaohong, et al. Optimization study on plunger gas lift of drainage gas recovery technology [J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32 (10): 11-13.

- [2] 韩 勇,宋志军,白建文,等. 柱塞气举排水采气工艺在苏里格气田的应用研究[J]. 内蒙古石油化工,2011,37(4):119-120.

HAN Yong, SONG Zhijun, BAI Jianwen, et al. Research and using of gas lift plunger drainage gas in the Sulige gas field [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011, 37 (4): 119-120.

- [3] 于 蓉. 对柱塞气举排水采气工艺的几点认识[J]. 钻采工艺,1994(2):82-85.

YU Rong. Several understandings of piston gas lift drainage gas recovery technology [J]. Drilling & Production Technology, 1994 (2): 82-85.

- [4] 余淑明,田建峰. 苏里格气田排水采气工艺技术研究与应用

- 用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(3): 40-43.
- YU Shuming, TIAN Jianfeng. Research and application of drainage gas recovery technology in sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(3): 40-43.
- [5] 魏 纳, 刘安琪, 刘永辉, 等. 排水采气工艺技术新进展[J]. 新疆石油天然气, 2006(2): 78-81.
- WEI Na, LIU Anqi, LIU Yonghui, et al. New progress of dewatering gas production [J]. Xinjiang Oil and Gas, 2006(2): 78-81.
- [6] 刘 琦, 蒋建勋, 石 庆, 等. 国内外排液采气方法应用效果分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006(3): 51-54.
- LIU Qi, JIANG Jianxun, SHI Qing, et al. Application analysis of methods of gas recovery by liquid unloading at home and abroad [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006(3): 51-54.
- [7] 汪崎生, 廖锐全. 柱塞气举中柱塞运动分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000(1): 89-96.
- WANG Qisheng, LIAO Ruiquan. In the plunger gas lift plunger motion analysis [J]. Applied Basic and Journal of Engineering Science, 2000(1): 89-96.
- [8] 李冰毅, 周 翀, 何 云, 等. 浅析大牛地气田柱塞气举排水采气工作制度优化[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(11): 225-227.
- LI Bingyi, ZHOU Chong, HE Yun, et al. Analysis on the optimization of plunger gas lift drainage gas production system in Daniudi gas field [J]. Science and Technology Information Development and Economy, 2009, 19(11): 225-227.
- [9] 汪崎生, 廖锐全. 柱塞气举特性分析[J]. 江汉石油学院学报, 2000(3): 61-64.
- WANG Qisheng, LIAO Ruiquan. The characteristics analyses of plunger gas lifting [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2000(3): 61-64.
- [10] 何顺利, 吴志均. 柱塞气举动态模型的建立[J]. 石油学报, 2005(4): 88-92.
- HE Shunli, WU Zhijun. A dynamic model for piston gas lift [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005(4): 88-92.
- [11] 李 璇, 杨芾汕, 刘玉祥等大牛地气田柱塞气举动态模型的研究与应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2013, 26(1): 1-5.
- LI Xuan, YANG Fushan, LIU Yuxiang, et al. Research and application of dynamic model of piston gas lift in daniudi gas field [J]. Journal of Jianghan Petroleum University, 2013, 26(1): 1-5.
- [12] 葛奇奇, 韩秋雅, 吴永红, 等. 本井气柱塞气举排水采气动态模型的求解及应用[J]. 数码设计, 2017, 6(3): 65-68.
- GE Keke, HAN Qiuya, WU Yonghong, et al. The solution and application of dynamic model of gas production by gas plunger gas lift drainage in the well [J]. Numerical Design, 2017, 6(3): 65-68.
- [13] HASHMI G M, HASAN A R, KABIR C S. Simplified modeling of plunger-lift assisted production in gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 52: 454-460.
- [14] 韩强辉. 长庆气田柱塞气举排液自动化控制技术[J]. 石油化工应用, 2016, 35(12): 119-122.
- HAN Qianghui. Automatic control plunger gas-lift drainage technology [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(12): 119-122.
- [15] 张 春, 金大权, 李双辉, 等. 苏里格气田新型柱塞气举系统应用研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(6): 74-76.
- ZHANG Chun, JIN Daquan, LI Shuanghui, et al. Application of new type plunger lift system at Sulige gasfield [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(6): 74-76.
- [16] 刘 苗. 苏西区块柱塞气举排水采气合理工艺参数研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- LIU Miao. Study on reasonable process parameters of drainage gas recovery by piston gas lift in Suzi Block [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.
- [17] 夏 星, 夏继宏, 季 伟, 等. 神木气田柱塞气举工作制度优化[J]. 石油化工应用, 2017, 36(5): 66-68.
- XIA Xing, XIA Jihong, JI Wei, et al. Optimization of piston gas lift system in shenmu gas field [J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(5): 66-68.
- [18] 刘丽萍, 刘 洋, 高旺斌, 等. 柱塞气举排水采气工艺运行优化[J]. 石油化工应用, 2018, 37(11): 68-71.
- LIU Liping, LIU Yang, GAO Wangbin, et al. Operation optimization of plunger gas lift drainage gas production process [J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 37(11): 68-71.
- [19] 刘华敏, 李 牧, 刘乔平, 等. 涪陵页岩气田柱塞气举工艺研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 102-107.
- LIU Huamin, LI Mu, LIU Qiaoping, et al. Research and application of plunger gas lift technology in fuling shale gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 102-107.
- [20] 师浩文, 刘 捷, 罗 威, 等. 棒状柱塞气举液体漏失模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 101-106.
- SHI Haowen, LIU Jie, LUO Wei, et al. Study on liquid leakage model of rod plunger gas lift [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(1): 101-106.