

◀ 试井与开采 ▶

# 柱塞举升优化设计及敏感性分析

冯国强<sup>1</sup> 隋义勇<sup>1</sup> 冯国勇<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田有限公司 胜利采油厂, 山东 东营 257051)

**摘 要:**基于系统节点分析,建立了柱塞举升优化设计方法。利用该方法分析了柱塞举升主要生产指标(套压、产液量、日循环次数)以及柱塞运动状态的影响因素;生产气液比对柱塞上行运动速度和地面初始套压的影响,举升深度对地面初始套压及柱塞到达井口速度的影响,周期举液量对地面初始套压的影响,分离器压力对地面初始套压的影响以及油管尺寸对地面初始套压的影响。分析了地面初始套压与日循环次数的关系,每循环所需气量与日循环次数的关系以及日产量与日循环次数的关系;确立了柱塞举升优化设计的主要影响因素,为提高柱塞举升工艺设计的准确性和可靠性,提供了分析手段和参考依据。

**关键词:**气举采油;气举柱塞;节点分析;优化设计

**中图分类号:**TE355.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2007)05-0104-04

柱塞举升具有设备简单、投资少和运行费用低的特点,成为高油气比、低产能油井的首选开采方式,也成为连续气举井的理想接替方式,同时对于气井的排水采气也是非常经济可靠的<sup>[1]</sup>。但在实际应用中,柱塞举升所需的许多工况参数需要经过现场的反复调试才能最终确定下来。随着油井生产控制自动化水平的提高,这一问题愈加突出。

柱塞举升设计模型主要有两种:静态模型和动态模型。这些方法所研究的主要是柱塞的运动特性,而不是针对一个完整的系统<sup>[2-9]</sup>。因此,利用节点系统分析方法<sup>[10]</sup>进行柱塞举升优化设计,是促进柱塞举升工艺普及和推广而亟待解决的问题。

## 1 柱塞举升优化设计

### 1.1 柱塞举升节点分析

节点系统分析是以油气井生产系统为对象把从油气藏到地面分离器所构成的整个油气井生产系统按不同的流动规律分成若干流动子系统,在每个流动子系统的起始及衔接处设置节点,在分析研究各子系统流动规律的基础上分析各子系统的相互关系及其各自对整个系统工作的影响,为优化系统运行参数和进行系统的调控提供依据。

### 1.2 柱塞举升优化设计

#### 1.2.1 油井流入动态<sup>[2]</sup>

油井流入动态采用考虑油、气、水三相的广义 IPR 曲线进行计算。广义 IPR 曲线主要反映了井

底流压和产液量的相互关系,在工程上利用这一方法来计算油井流入动态,已经保证了足够的精度。

#### 1.2.2 流体物性及井筒压力

柱塞在上升过程中,随着环空及油管气体的体积膨胀,井筒压力不断下降,因为柱塞及其上部液体段塞的摩擦损失和动能损失由流体密度、含水率和流体粘度所决定。而流体相对密度和流体粘度受压力的影响比较大,因此精确计算出流体物性和柱塞及其上部液体段塞的摩擦损失和动能损失,从而进一步得到柱塞在任一时刻的运动速度,对于确定合理的柱塞举升运行周期是非常重要的。同样在柱塞下降过程中,这一阶段的计算也相当重要。

#### 1.2.3 液体段塞上部油管中气体的膨胀特性

柱塞在上行过程中,液体段塞上部油管中的气体压力是阻碍柱塞运动的主要因素之一。油井生产阀门打开后,由于油管压力与分离器压力存在较大压差,油管上部气体在该压差作用下迅速膨胀,随着气体的不断流出,液体段塞顶部的压力不断下降,当压力减小到一定值时,柱塞及其上部液体段塞在环空气体压力推动下开始向上运动。

气体速度的计算公式为:

收稿日期:2007-03-27;改回日期:2007-07-27

**作者简介:**冯国强(1971—),男,山东东营人,1994年毕业于石油大学(华东)采油工程专业,1998年获石油大学油气田开发专业硕士学位,讲师,从事采油工程方面的教学与科研工作。

**联系电话:**(0546)8392041

$$v_g = \sqrt{\frac{2dg\Delta p}{f\Delta h\bar{\rho}_g}} \quad (1)$$

式中,  $f$  为气体摩擦系数, 无因次, 用 Jain 公式计算;  $v_g$  为气体流速, m/s;  $\bar{\rho}_g$  为气体平均密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta p$  为压差, Pa;  $\Delta h$  为气体高度, m。

对于某一时间, 气体系统压力的计算公式为:

$$p = \frac{m_g \bar{z} R \bar{T}}{V M_g} \quad (2)$$

式中,  $V$  为气体所占体积, m<sup>3</sup>;  $m_g$  为气体质量, kg;  $M_g$  为气体摩尔质量, kg/mol。

#### 1.2.4 液体段塞下部油管及油套环空中气体的膨胀特性

柱塞在上行过程中, 其动力来自液体段塞下部油管及油套环空中气体的膨胀。油井开始生产后, 首先是上部气体膨胀产出, 造成液体段塞上端面压力下降, 当压力减小到一定值时, 该气体系统开始膨胀做功, 推动柱塞向上运动。

油套环空压力的计算公式为:

$$p_{i+1} = \frac{p_i}{\exp\left(\frac{0.03415\gamma_g\Delta h_{i+1/2}}{z_{i+1/2}T_{i+1/2}}\right)} \quad (3)$$

油套环空中的气体质量为:

$$m_{g,i+1} = \frac{p_{i+1}V_{i+1}M_g}{\bar{z}_{i+1}R\bar{T}_{i+1/2}} \quad (4)$$

式中, 角标  $i$  为油套环空分段数。

油管底部压力校正公式为:

$$p = p_{wf} = \rho_l g h_l \quad (5)$$

式中,  $h_l$  为油层流入井筒的液柱高度, m;  $\rho_l$  为液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p_{wf}$  为井底流压, MPa。

油管中的气体压力分布计算公式为:

$$p_{j+1} = \frac{p_j}{\exp\left(\frac{0.03415\gamma_g\Delta h_{j+1/2}}{z_{j+1/2}T_{j+1/2}}\right)} - \frac{f_{j+1/2}\Delta h_{j+1/2}\rho_{g,j+1/2}v_{g,j+1/2}^2}{2D_{tg}} \quad (6)$$

油管中气体质量计算公式为:

$$m_{g,j+1} = \frac{p_{j+1}V_{j+1}M_g}{\bar{z}_{j+1}R\bar{T}_{j+1}} \quad (7)$$

式中, 角标  $j$  为油管分段数。

#### 1.2.5 柱塞运动特性

精确模拟柱塞的运动状态是衡量一个柱塞举升模型可靠性的最重要的条件。柱塞运动特性分柱塞上行和下行两部分来分析描述。

1) 柱塞上行运动状态。液体段塞上端面尚未到达井口前, 柱塞和液体段塞的瞬时加速度为:

$$a = \frac{(p_1 - p_2)A_t - p_{fr}A_p - m_{l,t}g}{m_{l,t}} \quad (8)$$

式中,  $p_{fr}$  为液体段塞摩擦损失, Pa;  $f_t$  为液体段塞摩擦系数, 无因次;  $p_1$  为液体段塞下端压力, Pa;  $p_2$  为液体段塞上端面压力, Pa;  $A_p$  为液体段塞与油管的接触面积, m<sup>2</sup>;  $m_{l,t}$  为油管中液体段塞和柱塞质量, kg;  $a$  为柱塞和液体段塞的瞬时加速度, m/s<sup>2</sup>。

当液体段塞到达井口后, 柱塞和液体段塞的瞬时加速度为:

$$a_t = \frac{p_1 - p_3 - \frac{f_t L_t \rho_l v_{l,t}^2}{2D_t g} - \frac{f_L L_L v_{l,L}^2}{2D_L g} - \frac{k \rho_l v_{l,t}^2}{2g} - \frac{m_{l,t}g}{A_t}}{\frac{m_{l,t}}{A_t} + \frac{m_{l,L}A_t}{A_L}} \quad (9)$$

式中,  $a_t$  为油管中流体加速度, m/s<sup>2</sup>;  $p_3$  为分离器压力, Pa;  $D_L$  为生产管线直径, m;  $v_{l,L}$  为生产管线中流体速度, m/s;  $v_{l,t}$  为液体段塞在油管中的速度, m/s;  $f_L$  为生产管线中流体摩擦损失系数, 无因次;  $k$  为井口局部摩擦损失系数, 无因次;  $L_t$  为油管中流体长度, m;  $L_L$  为生产管线中流体长度, m;  $m_{l,L}$  为生产管线中液体段塞质量, kg;  $A_L$  为生产管线截面积, m<sup>2</sup>。

经过  $dx$  位移所需时间  $dt$  的计算公式为:

$$dt = \frac{-v_{l,t} + \sqrt{(v_{l,t})^2 + 4a_t dx}}{2a_t} \quad (10)$$

2) 柱塞下行运动状态。在气体中下落时有:

$$F = mg - (F_f - F_{fg}) = ma \quad (11)$$

式中,  $F$  为柱塞所受合外力, N;  $F_f$  为气体浮力, N;  $F_{fg}$  为气体摩擦力 (由 Jain 公式计算摩擦因子), N;  $m$  为柱塞质量, kg。

在液体中下落时有:

$$F = mg - (F_l - F_{fl}) = ma \quad (12)$$

式中,  $F_l$  为液体浮力, N;  $F_{fl}$  为液体摩擦力, N。

#### 1.2.6 油井压力恢复阶段

关闭生产阀门, 即进入油井压力恢复阶段。随着油层流体流入井筒, 井筒压力不断上升; 随着井筒内液柱的积累, 井底流压不断升高, 压力恢复速度逐渐减缓。直到地面套管压力恢复到预定值, 油井重新开始生产, 进入新的循环周期。

油管中的气体压力分布计算公式为:

$$p_{j+1} = \frac{p_j}{\exp\left(\frac{0.03415\gamma_g\Delta h_{j+1/2}}{z_{j+1/2}T_{j+1/2}}\right)} \quad (13)$$

油管中气体质量计算公式为:

$$m_{g,j+1} = \frac{p_{j+1}V_{j+1}M_g}{\bar{z}_{j+1}R\bar{T}_{j+1}} \quad (14)$$

### 1.2.7 柱塞举升优化设计方法

从柱塞举升系统的整体考虑,将以上 6 个部分结合起来,构成柱塞举升优化设计方法。

1)首先假设油管液柱高度、地面套压,由地面套压沿油套环空向下计算井底流压,然后由井底流压沿油管向上计算出初始井口油压。

2)油井开始生产。利用式(1)、(2)计算油管上部气体的膨胀特性。当压力下降到一定程度( $p_1 > p_2 + m_{l,t}gh$ )时,柱塞在油管下部及环空气体的压力推动下开始向上运动。在这一阶段利用式(3)~(7)计算柱塞在不同时刻的瞬时速度:首先假设一速度值,计算出液体段塞的摩擦损失,然后计算加速度,再利用加速度和时间步长计算出一个速度,若两者之差在允许误差范围内,则开始下一时刻速度的计算,否则以计算值作为假设值重新计算该阶段速度。一直计算到液体段塞到达井口为止。如果在液体段塞到达井口之前,柱塞及其上部液体段塞的速度变为负值,则需要重新设定初始地面套压,重复 1)、2)的计算。在该阶段,如果井底流压小于油藏压力,则油层流体将进入井筒。

3)油井停止生产,柱塞下降,进入压力恢复阶段。分阶段计算井筒内气体的物性参数,从而利用式(11)和(12)计算柱塞下降过程中的动态特性。利用式(3)~(5)和式(13)、(14)计算油井压力恢复特性,计算达到规定压力值所需的时间及该时刻井筒内的液柱体积。

4)如果柱塞尚未下降到井底,井筒压力已恢复到规定值,或油井压力恢复到规定值,但井筒内液体体积未达到设定值,则需要调整参数,重复 1)~3)步的计算。

## 2 柱塞举升影响因素敏感性分析

基于以上优化设计方法和柱塞举升动态模型编制了应用软件,利用软件对柱塞举升工艺的影响因素进行了分析。

### 2.1 生产气液比对柱塞上升速度的影响

图 1 为生产气液比对柱塞上升速度的影响关系曲线。从图 1 可以看出:在定油管尺寸和井口初始套压的情况下,油井生产气液比越高,柱塞上升速度越快。在柱塞加速阶段,两条曲线基本重合在一起,随着时间的增加,两条曲线逐渐分开,这主要是因为:柱塞举升的动力来自油套环空及柱塞下部油管中气体的膨胀能,循环生产期间油层气进入井筒后减缓了井筒压力的降低速率,增加了气体的膨胀能,

从而使柱塞速度增加。

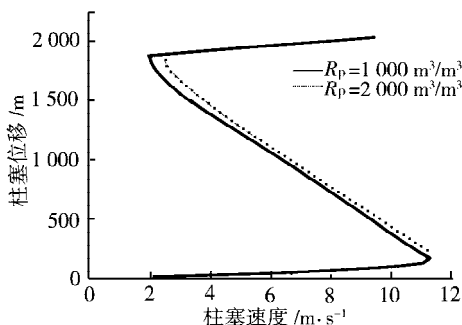


图 1 生产气液比对柱塞上升速度的影响关系曲线

### 2.2 井口初始套压与日循环次数的关系

图 2 为地面初始套压与日循环次数的关系曲线。从图 2 可以看出:在定油管尺寸的情况下,随着日循环次数的增加,井口初始套压相应下降;在定日循环次数的情况下,随着油管尺寸的增加,井口初始套压呈上升趋势。这是因为,对于一口井来说,日循环次数越多,则在循环周期内从井底流入井内的液体就越少,从而需要较小的气量,在操作条件上就表现为较低的井口初始套压。对于不同的油管尺寸,随油管尺寸的增加,油套环空的截面积减小,举升可利用的气体膨胀能减少。为保持正常循环,由压力平衡方程知,对于大尺寸油管就表现为较高的井口初始套压。

### 2.3 每循环所需气量与日循环次数的关系

图 3 为日循环次数与每循环所需气量的关系曲线。从图 3 可以看出:在定油管尺寸的情况下,随着日循环次数的增加,每循环所需气量相应减少;在定日循环次数的情况下,随着油管尺寸的增加,每循环所需气量也呈上升趋势。这是因为,对于一口井来说,日循环次数增加,每循环周期内从井底流入井内的液体就减少,从而需要的气量减少;对于不同的油管尺寸,随油管尺寸的增加,所需初始套压增加,并且油套环空中液体段塞上部的气体量增加,从而使得每

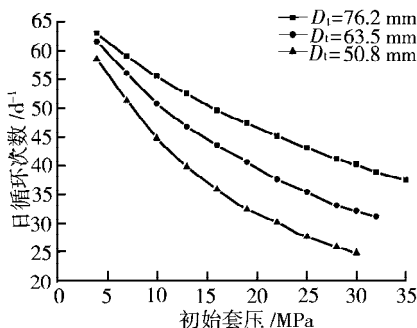


图 2 地面初始套压与日循环次数的关系曲线

循环所需气量增加。针对这一特点,在气液比不高的情况下,可以通过适当缩短循环周期和选用小直径油管以达到油井稳定生产的目的。

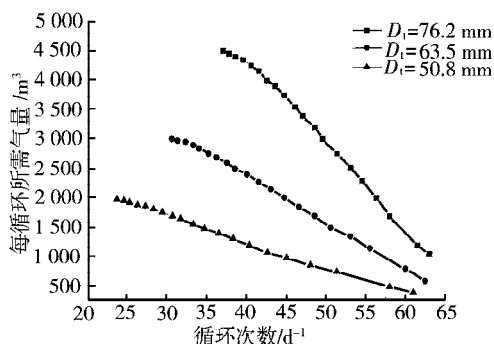


图 3 日循环次数与每循环所需气量的关系曲线

## 2.4 油井日产量与日循环次数的关系

图 4 为油井日产量与日循环次数的关系曲线。从图 4 可以看出:随着日循环次数的增加,油井产量相应提高。这是因为,对于一口油井来说,日循环次数增加,则每循环流入井底的流体减少,有利于保持较低的井底流压,使油井产能得到更充分的发挥,因此产量增加。

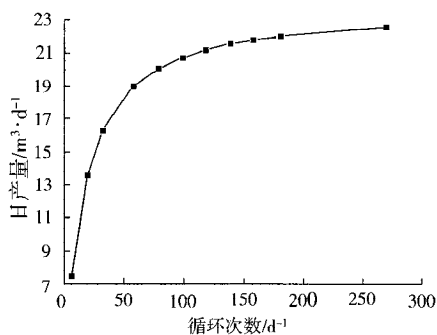


图 4 油井日产量与日循环次数的关系曲线

## 3 结 论

1) 基于节点系统分析,建立了柱塞举升优化设计模型,编制了应用软件。

2) 维持柱塞正常循环所需的地面初始套压受液体载荷、生产气液比和井口回压的影响要比受井深变化的影响更大,因此这三项是柱塞举升设计需要确定的关键参数。

3) 笔者所建立的模型适用于低产能、高气液比油井,并能适应不同井况、流体物性和油藏特性的变化,具有较普遍的实用性。

4) 关于柱塞举升,还应进行油层瞬时不稳定渗流及其与柱塞举升协调关系的研究,以进一步完善柱塞举升优化设计模型。

## 参 考 文 献

- [1] 布朗 K E. 升举法采油工艺(第二卷)[M]. 北京:石油工业出版社,1987:477-543.
- [2] 李长书. 智能柱塞气举采油工艺在塔河油田的应用[J]. 石油钻探技术,2002,30(3):55-57.
- [3] 万仁溥,罗英俊. 采油技术手册(第四分册)(修订本)[M]. 北京:石油工业出版社,1990:586-588,610-616.
- [4] 于蓉. 对柱塞气举排水采气工艺的几点认识[J]. 钻采工艺,1994,17(2):82-85.
- [5] Mower L N, Lea J F, Beauregard E, et al. Defining the characteristics and performance of gas lift plunger[R]. SPE14344, 1985.
- [6] Ali Hernandez, Maracano, Luisana, et al. Liquid fall-back measurements in intermittent gas lift with plunger[R]. SPE26556, 1993.
- [7] Baruzzi J O A, Alhanati F J S. Optimum plunger lift operation [R]. SPE29455, 1995.
- [8] Foss D L, Gaul R B. Plunger-lift performance criteria with operating experience—Ventura Avenue Field[J]. Drilling and Production Practice, API, 1965:124-140.
- [9] Lea J F. Dynamic analysis of plunger lift operations[J]. JPT, 1982,34(11):2617-2629.
- [10] 布朗 K E. 升举法采油工艺(第四卷)[M]. 北京:石油工业出版社,1990:428-440.

[审稿 吴晓东]

## Optimum Design and Sensitivity Analysis for Plunger Lift

Feng Guoqiang<sup>1</sup> Sui Yiyong<sup>1</sup> Feng Guoyong<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Co. Ltd., Dongying, Shandong, 257051, China)

**Abstract:** The method of plunger lift optimum design was built based on nodal analysis. This method analyzed the impact of the main production index (casing pressure, liquid producing capacity, diurnal cycle frequency) and plunger movement parameters, including the impact of production gas-liquid ratio on plunger upstroke velocity and surface initial casing pressure, the impact of raising depth on surface initial casing pressure and plunger velocity at well head, the impact of separator pressure on surface initial casing pressure, and the impact of tubing size on surface initial casing pressure. The relation between surface initial casing pressure and frequency of diurnal cycle, the relation between required gas volume and number of frequency of diurnal cycle, the relation between daily production rate and number of frequency of diurnal cycle, were analyzed. The main factors impacting plunger lift optimization design are identified, which provides the analysis and reference basis to improve the accuracy and reliability of the plunger lift design.

**Key words:** gas lift oil producing; gas lift plunger; node analysis; optimizing design