

文章编号:1000-7393(2005)06-0063-03

## 有杆抽油系统井下能耗研究

冯虎<sup>1</sup> 吴晓东<sup>1</sup> 张建军<sup>2</sup> 张妮<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学, 北京 102249; 2. 华北油田公司采油工艺研究院, 河北任丘 062552)

**摘要** 随着有杆抽油系统能耗问题的日益尖锐和研究的不断深入,从系统能耗角度确定有杆抽油系统的损失功率虽然有了很大进展,但还存在很多的缺陷。针对该问题归纳总结了有杆抽油系统井下损失功率的计算方法,分析并指出了存在的缺陷,如:解波动方程的方法求取杆液摩擦损失比较复杂,而且依赖于各区块的摩擦阻尼系数,不便于推广应用,而现场数据回归公式求取杆液摩擦方法需要大量实测数据,工作量大,也不利于推广应用。为此提出了新的井下损失功率计算分类方法,推导了以井筒流体为对象的杆—液、管—液能耗计算模型。该模型既能满足能耗计算精度要求,又进行了适当的近似简化,为从计算角度确定有杆抽油系统效率提供了理论支持。

**关键词** 有杆抽油系统 能耗 损失功率 系统效率

**中图分类号**:TE358 **文献标识码**:A

有杆抽油系统工作时,是一个能量不断传递和转化的过程。在每一次传递时都将损失一定的能量,产生损失功率。以计算方式确定抽油机井的系统效率时,需要首先确定有杆抽油系统的有用功率和损失功率。而确定损失功率的难点集中于井下部分,尤其是井筒流体与抽油杆、油管间的黏滞摩擦以及抽油杆与油管间的滑动摩擦。井下部分损失功率的确定方法大致分为2类,一类以解带阻尼系数的波动方程为基础,另一类是以现场实测数据为前提的经验公式回归。这2类方法都存在局限性,需要研究出既能满足计算误差许可要求,又包含理论根据的井筒能耗计算方法。

以光杆悬绳器为界,悬绳器以下到抽油泵,再由抽油泵到井口的效率为井下效率,井下部分的能量损失在盘根盒、抽油杆、抽油泵和管柱中。

### 1 盘根盒损失功率

为了防止油气从光杆处漏失,在抽油机井口安装盘根盒。抽油机工作时,由于光杆与盘根盒中填料有相对运动产生摩擦,故会产生损失功率。盘根盒密封属于接触密封,接触密封的接触力使密封件与被密封面接触处产生摩擦力,盘根盒与光杆处摩擦力可按式<sup>[1]</sup>计算

$$F = 9.8fK\pi dh_1p \quad (1)$$

式中, $f$ 为摩擦系数,主要受密封圈材质与密封圈形式影响,变化范围较大; $K$ 为因数, $V$ 型夹织物圈取 $K=1.59$ ,其他密封圈取 $K=1$ ; $d$ 为光杆直径, $m$ ; $h_1$ 为密封有效高度, $m$ ; $p$ 为密封处的工作压力,即井口油管压力, $Pa$ 。

盘根盒损失功率的计算公式<sup>[1]</sup>为

$$\Delta P_{\text{盘}} = Fv/1000 \quad (2)$$

式中, $v$ 为光杆运动速度, $m/s$ 。

要准确确定摩擦力和摩擦损失功率需要实测或试验测定出摩擦系数。

### 2 抽油泵损失功率

抽油泵损失功率包括机械摩擦损失功率、容积损失功率和水力损失功率<sup>[1]</sup>

$$\Delta P_{\text{泵}} = \Delta P_{\text{机}} + \Delta P_{\text{容}} + \Delta P_{\text{水}} \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{机}} = \frac{1}{10^3 \times 60} \pi d n S \left( 10^6 \frac{\Delta p h}{2} + \frac{1}{60} \frac{l n S}{\sqrt{1 - \varepsilon^2} h} \right) \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{容}} = 10^9 \frac{\pi d \Delta p^2 h^3}{24 \mu l} (1 + 1.5 \varepsilon^2) \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{水}} = 10^{-3} \xi_p \frac{Q_1^3}{2A^2} \quad (6)$$

式中, $n$ 为冲次,次/min; $S$ 为冲程, $m$ ; $\Delta p$ 为柱塞两

端压差, MPa;  $h$  为柱塞与衬套间径向间隙, mm;  $l$  为柱塞长度, m;  $\mu$  为液体黏度, Pa · s;  $\varepsilon$  为偏心率;  $\rho$  为流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\xi$  为流体流经阀球的阻力系数, ( $\xi=2.5$ );  $A$  为泵阀阀座孔面积, m<sup>2</sup>;  $Q_1$  为流体流经阀孔的流量, m<sup>3</sup>/s。

### 3 管柱损失功率

井筒流体从泵出口到井口损失的功率, 包括油管漏失引起的损失功率即容积损失功率, 原油沿油管流动引起的损失功率即水力损失<sup>[1]</sup>

$$\Delta P_{\text{管}} = \Delta P_{\text{管容}} + \Delta P_{\text{管水}} \quad (7)$$

$$P_{\text{摩}} = 2\pi\mu \left\{ \left[ \frac{1}{\ln m} + (B_1 + 1) \right] \int_0^L \int_0^L \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dt dx + \frac{4}{B_2} (B_1 + 1) \int_0^L \int_0^L \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{x=L} \frac{\partial u}{\partial t} dt dx \right\} \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{m^2 - 1}{2 \ln m} - 1 \quad (12)$$

$$B_2 = m - 1 - \frac{(m^2 - 1)^2}{\ln m} \quad (13)$$

$$m = r_1 / r_0 \quad (14)$$

式中,  $L$  为抽油杆柱长度, m;  $T$  为抽汲循环周期, s;  $r_1$  为抽油杆半径;  $r_0$  为油管半径。

抽油杆与油管间的摩擦功率与井本身的斜度关系极大, 一般靠试验与实测获得。求解以波动方程为基础的杆液黏滞摩擦功率比较困难, 而且不同油井条件阻尼系数不同。针对这种情况, 江苏油田郑海金等提出如下以经验系数为基础的杆液、杆管摩擦损失公式<sup>[2]</sup>。

杆管滑动摩擦损失功率

$$\Delta P_{\text{杆-管}} = 2f_k q_{\text{杆}} L_{\text{水平}} S n \quad (15)$$

式中,  $f_k$  为杆、管间滑动摩擦系数, 取 0.1。

杆液、管液黏滞损失功率

$$P_r = k_3 \pi^3 S^2 n^2 \frac{m^2 - 1}{(m^2 + 1) \ln m - (m^2 - 1)} \sum \mu_i L_i \quad (16)$$

$$\sum \mu_i L_i = k_4 \mu_o (T_{\text{地层}} - T_{\text{析}}) + k_5 \mu_o Q_{\text{油}} (T_{\text{析}} - T_{\text{井口}}) + k_6 \mu_o (-f_w^2 + 1.2 f_w) + C \quad (17)$$

式中,  $f_w$  为含水率, 小数;  $k_3$  为油管系数;  $k_4$ 、 $k_5$ 、 $k_6$  为实测系数;  $T_{\text{地层}}$  为地层油温, °C;  $T_{\text{析}}$  为原油析蜡温度, °C。

可以看出, 上述计算中杆管摩擦损失功率是一种近似算法, 存在较大误差; 而杆液、管液的黏滞损失功率的计算中用到几个现场实测回归系数, 没有可靠的理论依据, 而且实测系数必然存在局限性, 相对于千差万别的油井情况, 必然存在误差。

针对这种情况, 从流体力学角度出发, 以泵上井筒液体为考虑对象, 推导出杆液、管液损失功率公

$$\Delta P_{\text{管容}} = 10^3 \Delta p \cdot \Delta Q_{\text{油漏}} \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{管水}} = \Delta h_{\text{油管}} \rho g Q / 1000 \quad (9)$$

$$\Delta h_{\text{油管}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_{i\text{当}}} \frac{u_i^2}{2g} \quad (10)$$

式中,  $u_i$  为与第  $i$  级抽油杆相应油管中流体流速, m/s。

### 4 抽油杆损失功率

在抽油过程中, 抽油杆上下往复运动, 在抽油杆与油管间、抽油杆与液体间会产生摩擦造成损失功率。在一个循环中抽油杆与液体总黏滞摩擦功率可用下式<sup>[1]</sup>计算

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \quad (18)$$

几乎在所有的井内流动情况下, 加速度都非常小, 可以忽略加速压差。摩擦阻压差可表示为

$$\Delta p_1 = \Delta p - \Delta p_2 \quad (19)$$

摩擦阻力损失为

$$\Delta h = \frac{\Delta p_1}{\gamma} = \frac{\Delta p - \Delta p_2}{\gamma} \quad (20)$$

摩擦损失功率为

$$\Delta P_{\text{摩擦}} = \frac{\Delta p_1}{\gamma} \rho g Q' / 1000 = \frac{\Delta p - \Delta p_2}{\gamma} \frac{\rho g Q'}{1000} = (\Delta p - \Delta p_2) Q' / 1000 \quad (21)$$

式中,  $Q'$  为油管流量, m<sup>3</sup>/s;  $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$ 、 $\Delta p_3$  分别为摩擦阻压差、重力压差和加速压差。

式(21)适用于较短的管段, 对于整个抽油机生产井筒, 应分段计算然后叠加起来, 即

$$\Delta P_{\text{摩擦}} = \sum \Delta P_{\text{摩擦}i} = \sum (\Delta p_i - \Delta p_{2i}) Q_i / 1000 = \frac{(p_d - p_i) \sum Q_i - \sum \rho_i g \Delta z Q_i}{1000} \quad (22)$$

式中,  $\Delta z$  为微元段长度, m;  $p_d$  为泵排出口压力, Pa;  $p_i$  为井口油压, Pa。

如果把井筒液体当作不可压缩流体稳定流动来考虑, 式(22)可以简化为

$$\Delta P_{\text{摩擦}} = \frac{(p_d - p_i) Q' - \rho g H Q'}{1000} = \frac{(p_d - p_i) Q - \rho g H Q}{1000 \times 86400} \quad (23)$$

式中,  $H$  为下泵深度, m;  $Q$  为日产液量, t/d。

## 5 有杆抽油系统井下损失功率

通过对以上井下各部分损失功率总结,可以对有杆抽油系统井下损失功率进行新的分类,包括:盘根盒损失功率,抽油泵损失功率,杆—管滑动摩擦损失功率和流体与杆、管间的黏滞损失功率。据此,由式(2)、(3)、(15)、(23)可以得到有杆抽油系统井下损失功率

$$\Delta P_{\text{井下}} = \Delta P_{\text{盘}} + \Delta P_{\text{泵}} + \Delta P_{\text{摩擦}} + \Delta P_{\text{杆-管}} \quad (24)$$

## 6 结论与建议

(1)以解波动方程为基础的损失功率计算以抽油杆为研究对象,方程的求解和阻尼系数的确定比较复杂,阻尼系数的大小也要根据区块原油特性来确定。

(2)利用现场经验系数确定损失功率时,需分析回归大量现场实测数据,工作量大,缺乏理论支持。

(3)以井筒流体为研究对象的杆液、管液损失功率计算,存在推导的理论依据,在一定的假设条件

下,可以简便地确定出流体与杆、管间的黏滞摩擦损失功率。

### 参 考 文 献

- [1] 崔振华,余国安,安锦高,邬亦炯.有杆抽油系统.北京:石油工业出版社,1994
- [2] 郑海金,邓吉彬,唐东岳,袁林岩.提高机械采油系统效率的理论研究及应用.石油学报,2004,25(1):93~96
- [3] 张琪,吴晓东.抽油井计算机诊断技术及其应用.华东石油学院学报,1984,(2):144~159
- [4] 王鸿勤,张琪.采油工艺原理.北京:石油工业出版社,1989
- [5] 袁恩熙.工程流体力学.北京:石油工业出版社,1998
- [6] 陈家琅.石油气液两相管流.北京:石油工业出版社,1989

(收稿日期 2005-08-10)

(修改稿收到日期 2005-10-15)

[编辑 付丽霞]

万方数据

(上接第62页)

## 4 现场应用情况

莫西庄油田庄1井区自2003年有5口深抽井投产,其主要举升工艺参数和设备为:12型抽油机、三级抽油杆组合、 $\varnothing 44$  mm泵。通过对工艺参数的不断优化和调整,有效地降低了悬点载荷、提高了泵效,其调整措施如下:(1)将D级抽油杆换为H级高强度杆;(2) $\varnothing 44$  mm泵换为 $\varnothing 38$  mm泵;(3)将冲程、冲次由4.8 m、5次/min调整为5 m、4次/min;(4)将泵挂深度从2400 m上提至2200 m;(5)沉没度控制在42 m左右;(6)采用二合一油管锚定器和加重杆;(7)将普通气锚换为螺旋式高效气锚。

通过工艺措施的配套完善和不断改进,庄1井区平均悬点载荷由131 kN降低到102 kN,平均泵效由26%提高到44.6%,取得了较好的效果。

## 5 结论及建议

(1)莫西庄油田庄1井区的举升工艺在深度和负荷2方面均达到了目前深抽工艺的极限。

(2)通过对庄1井区各举升工艺参数的研究和

应用,有效降低了油井悬点载荷,提高了泵效。

(3)庄1井区油藏渗流能力较差,开发中存在压敏效应,加深泵挂放大生产压差并不一定能提高油井产量,生产压差应控制在15 MPa左右,以减少压敏伤害,确保油井产能。


(4)庄1井区气油比较高,沉没度应控制在350~450 m,以减少气体对泵效的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 万仁溥.采油工程手册.北京:石油工业出版社,2003:148~161
- [2] 李颖川.采油工程.北京:石油工业出版社,2002:114~131
- [3] 沈文龙,蔡晓辉,曲秀英.大庆石油地质与开发.1997,16(3):62~64
- [4] 阮敏.压敏效应对低渗透油田开发的影响.西安石油学院学报(自然科学版),2001,16(4):40~45

(收稿日期 2005-08-25)

[编辑 付丽霞]

作者: 冯虎, 吴晓东, 张建军, 张妮, [Feng hu](#), [Wu Xiaodong](#), [Zhang Jianjun](#), [Zhong Ni](#)  
作者单位: 冯虎, 吴晓东, [Feng hu](#), [Wu Xiaodong](#) (中国石油大学, 北京, 102249), [张建军](#), [张妮](#), [Zhang Jianjun](#), [Zhong Ni](#) (华北油田公司采油工艺研究院, 河北, 任丘, 062552)  
刊名: [石油钻采工艺](#)   
英文刊名: [OIL DRILLING & PRODUCTION TECHNOLOGY](#)  
年, 卷(期): 2005, 27 (6)  
被引用次数: 4次

参考文献(6条)

1. 崔振华; 余国安; 安锦高; 邬亦炯 [有杆抽油系统](#) 1994
2. 郑海金; 邓吉彬; 唐东岳; 袁林岩 [提高机械采油系统效率的理论研究及应用](#) [期刊论文] - [石油学报](#) 2004 (01)
3. 张琪; 吴晓东 [抽油井计算机诊断技术及其应用](#) 1984 (02)
4. 王鸿勋; 张琪 [采油工艺原理](#) 1989
5. 袁恩熙 [工程流体力学](#) 1998
6. 陈家琅 [石油气液两相管流](#) 1989

本文读者也读过(10条)

1. [马春成](#) [有杆抽油井口光杆密封装置技术研究](#) [学位论文] 2006
2. [丛峰](#) [机采有杆抽油系统经济运行浅议](#) [期刊论文] - [中国设备工程](#) 2009 (12)
3. [檀朝东](#), [贺德才](#), [张嗣伟](#), [TAN Chao-dong](#), [HE De-cai](#), [ZHANG Si-wei](#) [钢丝绳杆泵抽油系统优化设计方法及现场应用](#) [期刊论文] - [石油学报](#) 2005, 26 (6)
4. [朱君](#), [姜民政](#), [刘宏](#) [有杆抽油系统的经济运行](#) [期刊论文] - [石油机械](#) 2003, 31 (6)
5. [张积明](#), [马春成](#), [Zhang Jiming](#), [Ma Chucheng](#) [胜利油田有杆泵抽油系统常见故障原因调查及改进措施](#) [期刊论文] - [石油钻采工艺](#) 2000, 22 (1)
6. [郑海金](#), [ZHENG Hai-jin](#) [抽油机井地面损失功率计算方法的研究与认识](#) [期刊论文] - [石油天然气学报](#) 2010, 32 (4)
7. [徐芄](#), [徐士进](#), [尹宏伟](#), [Xu Peng](#), [Xu Shijin](#), [Yin Hongwei](#) [有杆抽油系统故障诊断的人工神经网络方法](#) [期刊论文] - [石油学报](#) 2006, 27 (2)
8. [倪振文](#), [赵来军](#), [职黎光](#), [NI Zhen-wen](#), [ZHAO Lai-jun](#), [ZHI Li-guang](#) [智能化抽油系统在游梁式抽油机上的应用](#) [期刊论文] - [大庆石油学院学报](#) 2000, 24 (3)
9. [张明毅](#) [小排量井口式抽油系统研究](#) [学位论文] 2006
10. [窦宏恩](#) [提高有杆抽油系统效率的新理论与新技术](#) [期刊论文] - [石油机械](#) 2001, 29 (5)

引证文献(4条)

1. [肖伟](#), [吴晓东](#), [郭吉民](#), [张胜利](#), [冯虎](#) [利用综合粘度因子评价系统效率](#) [期刊论文] - [西南石油大学学报](#) 2008 (2)
2. [秦忠诚](#) [有杆泵抽油机井节点能耗及系统效率优化仿真模型及应用](#) [期刊论文] - [中外能源](#) 2012 (8)
3. [刘柏希](#), [刘宏昭](#) [定向井有杆抽油系统井下耗能分析](#) [期刊论文] - [西安理工大学学报](#) 2007 (4)
4. [赵瑞东](#), [熊春明](#), [张建军](#), [吴晓东](#), [师俊峰](#), [朱拾东](#), [张娜](#) [基于遗传算法的机抽系统优化设计新方法](#) [期刊论文] - [石油天然气学报](#) 2012 (6)

引用本文格式: [冯虎](#), [吴晓东](#), [张建军](#), [张妮](#), [Feng hu](#), [Wu Xiaodong](#), [Zhang Jianjun](#), [Zhong Ni](#) [有杆抽油系统井下能耗研究](#) [期刊论文] - [石油钻采工艺](#) 2005 (6)