

深层电泵采油井井底流压计算新方法

王发清 曹建洪 杨淑珍 彭永洪 任利华

中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000

摘要: 深层电泵采油井井底流压对于电泵工况诊断至关重要,也是油藏动态分析必不可少的资料。由于井下监测工艺复杂、费用高等原因,井底流压实测数据少;而动液面资料录取简单、经济,故现场常采用动液面资料作为约束条件来计算电泵井的井底流压。但根据动液面资料按照静液梯度法计算井底流压,未考虑环空液柱中存在气体的客观实际,误差较大。深层电泵采油井井底流压计算新方法综合考虑了多因素的影响,以电泵入口为节点,将计算管段分为两段,按照流体流动的方向计算井底流压。与现场监测数据对比发现,井底流压的平均绝对误差为0.51 MPa,较静液梯度法的平均绝对误差2.83 MPa更为精确。新方法满足工程精度要求,能够在现场应用。

关键词: 超深;电泵;采油井;井底流压

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.05.011

A New Method to Estimate Bottom-Hole Flowing Pressure in Deep Zone Oil Wells Lifted by ESPs

Wang Faqing, Cao Jianhong, Yang Shuzhen, Peng Yonghong, Ren Lihua

PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: Bottom hole flowing pressure in deep zone oil wells lifted by ESPs is critical to ESP pumping diagnoses, and is indispensable to reservoir performance analysis. As downhole surveillance technique is either inaccessible or expensive, field downhole flowing pressure measurements are scarce. Whereas, dynamic liquid level shooting can be performed routinely and economically, its data are abundant in the field. For this reason, it is frequently estimated by utilizing static pressure gradients in the field. However, this method does not account for the existence of nature gas in the annulus liquid column. A new method proposed in this paper takes into account many related factors to calculate bottom hole flowing pressures in ESPs lifted oil wells. This new technique divides the calculation section into two segments, taking ESP pump intake as a nodal point and predicating the desired flowing pressure in the direction of fluid flow. Validated against field data, its average absolute error is 0.51 MPa, which is more accurate than that of static pressure gradient method of 2.83 MPa. As a result, the new method developed in this paper is accurate for engineering purposes, and can be utilized in the field.

Keywords: Deep zone; ESP; Oil wells; Bottom-hole flowing pressure

收稿日期:2018-05-30

作者简介:王发清(1975-),男,湖北孝感人,高级工程师,学士,主要从事石油工程软件应用与研究工

0 前言

井底流压是电泵采油井进行工况诊断和分析,从而掌握油藏动态必不可少的资料之一。为了测取准确的井底压力,可以通过泵下加监测装置的测试工艺^[1-2],向地面实时传输泵入口、泵出口温度和压力等参数。这些方法虽然推出多年,但由于工艺复杂、费用高等原因,未能在油田得到大面积推广^[3]。

众所周知,动液面的测试简单且经济,因此在油田现场存在大量的动液面资料。油井正常生产时,动液面的高低反映了井底流压的大小^[4-5]。对于井底流压的计算,前人已经从密度迭代、数值法等方面进行了研究^[6-10]。根据动液面估测机采井的井底流压,也有一些文献报道^[11-12],但这些文献要么仅针对气井,要么仅针对浅层油井,没有在深层采油井中进行应用。

计算电泵采油井的井底流压,在油田现场较常采用的是比较简便的静液梯度法,未考虑流体的流动和液柱中存在气体的影响,因此,可能存在较大的计算误差。

本文提出的深层电泵采油井井底流压计算新方法,首先计算动液面至泵入口处的压力分布,然后用石油天然气行业内常用的 Hagedorn-Brown 方法计算油藏中深至泵入口处的流压,其中泵入口以上井段的流动压力计算过程,考虑了多种因素的综合影响。实测电泵井入口处流压验算表明,该方法较静液梯度法计算结果更为精确。

1 井底流压计算新方法

生产实践表明,电泵入口处的流压一般都比较低,导致原油中大量的溶解气分离出来成为自由气。其中部分自由气进入泵体经油管产出;由于油套环形空间大,大部分自由气聚集到环空上部。环空液柱中自由气体的存在,显著地影响了环空中的压力梯度。Schmidt Z、李士伦、杨胜来、Papadimitriou D A、Brown K E、万仁傅等人通过实验研究,发现环空压力梯度不仅与气流量有关,还与流体的物理性质有关^[13-18]。本文以这些文献为基础,并拟合矿场实测数据,提出了一种计算深层电泵采油井井底流压的新方法。

表1 新方法与静液梯度法计算结果对比

井号	测试日期	电泵下深 /m	动液面深度 /m	泵入口流压 /MPa	静液梯度法折算流压值 /MPa	新方法计算流压值 /MPa	绝对误差 /MPa	
							静液梯度法	新方法
A	2015-02-11	3 002	2 068	8.32	10.05	7.37	-1.73	0.95
A	2016-07-14	3 002	1 865	9.32	12.11	9.04	-2.79	0.28
B	2014-07-15	4 005	1 351	21.9	27.74	20.66	-5.84	1.24
B	2015-09-11	4 005	1 367	21.2	27.43	20.71	-6.23	0.49
B	2017-08-03	3 500	2 055	10.5	14.6	11.28	-4.10	-0.78
B	2017-11-03	3 500	2 702	8.3	7.64	6.62	0.66	0.68
B	2018-02-03	3 500	2 581	8.85	8.65	8.15	0.20	0.70

该方法针对深层电泵采油井油藏中深处的流压 p_{wf} ,分两步计算:即泵入口处的流压 p_{in} ;泵下油气流在套管中的多相流动压力 p_{mp} 。

1.1 泵入口压力 p_{in} 的计算

根据电泵采油井环空流体分布, p_{in} 的计算分为2个步骤:动液面以上纯气柱压力 p_g 和含气油水段的压力 p_{tp} 。

纯气柱压力 p_g 的计算公式参见式(1)^[19-20]。

$$p_g = p_{ch} \times \exp\left(\frac{0.03415\gamma_g \times H_d}{T_a \times Z}\right) \quad (1)$$

式中: p_{ch} 为套管头压力,MPa; γ_g 为产出天然气相对密度,无量纲; H_d 为动液面,m; T_a 为动液面井段的平均地层温度,K; Z 为产出天然气在纯气柱段的平均偏差因子,无量纲。李相方、胡建国等人给出了偏差因子的计算公式^[21-22]。

含气油水段压力 p_{tp} 的计算过程,不考虑气液之间的摩擦压力和加速度压力损失,用考虑了气液间滑脱的两相混合物密度计算。为此,需要分别求取气体表观速度和气泡上浮速度^[23]。

气体表观速度 v_{sg} 的计算公式为:

$$v_{sg} = 3.447 \times 10^{-4} \times Q_{sgc} \times t \times Z / (A \times P) \quad (2)$$

式中: t 为平均温度,K; A 为环空横截面积,m²; P 为井筒平均压力,MPa; Q_{sgc} 为环空内气体的体积流量,m³/d;当 Q_{sgc} 小于 28.3 m³/d 时,取为 28.3。

气泡上浮速度 v_{sb} 的计算公式为:

$$v_{sb} = 1.53 \left(\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right)^{0.25} \quad (3)$$

式中: ρ_l 和 ρ_g 分别为液相与气相密度,kg/m³; σ 为油水界面张力,mN/m。

持气率 H_g 的计算公式为:

$$H_g = v_{sg} / (v_{sb} + 1.2v_{sg}) \quad (4)$$

两相混合物密度 ρ_{tp} 的计算公式为:

$$\rho_{tp} = \rho_l(1 - H_g) + \rho_g H_g \quad (5)$$

1.2 泵下多相流压力 p_{mp} 的计算

泵下多相流压力的计算属于常规的气液多相流动问题。本文采用 Hagedorn-Brown 方法计算,Orkiszewski J 对详细计算过程进行了介绍^[24]。

2 实例验算

塔里木盆地的DH油田,属于超深块状底水黑油砂岩油藏,电泵采油是其主体机采方式。近期,有2口井下入了斯伦贝谢公司的电泵监测装置。利用这些数据,对本文新方法进行了验算。结果表明:新方法平均绝对误差为0.51 MPa,比起静液面梯度法平均绝对误差2.83 MPa更为精确。

新方法与静液梯度法对比数据见表1。

3 结论

由于动液面资料的录取简单、经济,因此油田现场资料丰富。本文提出的计算新方法,考虑了环空中自由气体流动和井筒中流体物性对泵入口以上井段流动压力分布的影响,用动液面作为约束条件,以泵入口为节点,分两段计算了深层电泵采油井的井底流压。针对该方法,本文得出如下结论:

1) 油田监测数据验算表明:该方法计算的绝对误差为0.51 MPa,较静液面梯度法的2.83 MPa更为精确,能为电泵工况诊断、油藏动态分析提供可靠的井底流压资料。

2) 该方法满足工程计算的精度要求,能够在现场应用。

参考文献:

- [1] 王克清. 泵下测试工艺在高升油田的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(8): 96-97.
Wang Keqing. Application of Down-Hole Measurement Technique in GS Oilfield [J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2009, 35(8): 96-97.
- [2] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2006: 47-50.
Zhang Qi. Oil Production Mechanism and Design [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2006: 47-50.
- [3] 聂文龙, 刘衍聪, 李成凯. 潜油电泵井下测试系统综述[J]. 内江科技, 2013, 38(1): 23.
Nie Wenlong, Liu Yancong, Li Chengkai. Review on Submersible Pump Down-Hole Measurement System [J]. Neijiang Keji, 2013, 38(1): 23.
- [4] 杨红斌, 冯松林, 居迎军, 等. 油井合理井底流压综合判定方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 103-107.
Yang Hongbin, Feng Songlin, Ju Yingjun, et al. Integrated Evaluation Approach of Reasonable Bottom-Hole Flowing Pressure of Oil Wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 103-107.
- [5] 郑军德, 于洪林, 钱德富. 抽油机井合理流压界限的确定

[J]. 大庆石油学院学报, 1994, 18(4): 39-42.

Zheng Junde, Yu Hongling, Qian Defu. Determination of Reasonable Flowing Pressure Boundary for Oil Pump Well [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1994, 18(4): 39-42.

- [6] 张玄奇, 陈薇, 李剑鹏. 利用密度迭代法计算气井的井底流压[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2014, 29(1): 56-59.
Zhang Xuanqi, Chen Wei, Li Jianpeng. Calculation of Bottom-Hole Flowing Pressure of Gas Well Using Density Iteration Method [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2014, 29(1): 56-59.
- [7] 童敏, 齐明明, 马培新, 等. 高气液比气井井底流压计算方法研究[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(4): 71-73.
Tong Min, Qi Mingming, Ma Peixin, et al. Study on Computing Method of Bottom-Hole Flow Pressure of Gas Well with High Gas-Liquid Ratio [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(4): 71-73.
- [8] 张益, 张宁生, 陈军斌, 等. 低渗高气油比油井合理井底流压研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(1): 42-44.
Zhang Yi, Zhang Ningsheng, Chen Junbin, et al. Determination of Proper Bottom-Hole Fluid Pressure for Low-Permeability and High Gas-To-Oil Ratio Wells [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2011, 26(1): 42-44.
- [9] 许珍萍, 江乾锋, 刘会会, 等. 数值分析法在求解产水气井井底流压的应用[J]. 石油化工应用, 2016, 35(6): 80-83.
Xu Zhenping, Jiang Qianfeng, Liu Huihui, et al. The Application of Calculating Bottomhole Flowing Pressure in Gas Wells Producing Water with Numeric Analysis Method [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(6): 80-83.
- [10] 王林, 彭彩珍, 倪小伟, 等. 气井井底流压计算方法优选[J]. 油气井测试, 2011, 20(4): 25-26.
Wang Lin, Peng Caizhen, Ni Xiaowei, et al. Optimal for Calculating Method About Bottom-Hole Pressure of Gas Well [J]. Well Testing, 2011, 20(4): 25-26.
- [11] 廖锐全, 汪琦生, 张柏年. 用多相管流理论计算抽油机井井底流压[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(4): 44-47.
Liao Ruiquan, Wang Qisheng, Zhang Bonian. Predicting Flowing Bottom-Hole Pressure in Pumping Wells with Vertical Multiphase Flow Theory [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(4): 44-47.
- [12] 史仲乾. 抽油机井筒混气液密度确定和井底流压的计算[J]. 西安石油学院学报, 1994, 9(4): 19-22.
Shi Zhongqian. Determination of Density of the Gaseous Liquid Column and Calculation of BHFP in the Swabbing Wells [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1994, 9(4): 19-22.
- [13] Schmidt Z, Brill J P, Beggs H D. Prediction of Annulus

