

文章编号:1004-1338(2007)06-0516-03

# 基于实验基础上的油水两相流滑脱速度求取方法

周勇<sup>1</sup>, 陈科贵<sup>1</sup>, 刘洪亮<sup>2</sup>, 曹和民<sup>2</sup>, 田建军<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油测井有限公司吐哈事业部, 新疆 吐鲁番 838200)

**摘要:** 为准确确定油水两相的产液剖面引入了滑脱模型。滑脱模型的关键在于滑脱速度的求取。通过三相流实验装置模拟井下油水两相流的流动状态, 利用测井仪器记录的实验数据, 总结出了滑脱速度与流量和持水率之间的关系和规律, 并采用指数拟合的方法对实验数据进行处理, 最终得到了滑脱速度的计算方法。将该方法运用到部署油田的3-181井进行产液剖面解释, 解释的结果完全能够达到油田的要求, 并且更为准确, 为油气田的勘探开发提供了可靠的动态数据。

**关键词:** 生产测井; 油水两相流; 产液剖面; 流量; 持水率; 滑脱模型; 滑脱速度  
**中图分类号:** P631.84      **文献标识码:** A

## Solving Slippage Velocity of Oil-Water 2-Phase Flow Experimentally

ZHOU Yong<sup>1</sup>, CHEN Ke-gui<sup>1</sup>, LIU Hong-liang<sup>2</sup>, CAO He-min<sup>2</sup>, TIAN Jian-jun<sup>2</sup>

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;  
2. Tuha Division of CPL, Tulufan, Xinjiang 838200, China)

**Abstract:** The key for applying slippage model of oil-water 2-phase production profile is to correctly solve oil-water slippage velocity. Firstly, data of total flow rate and water holdup etc. are measured by logging tools for simulated oil-water 2-phase flow with various water contents in a 3-phase experimental equipment; then, the slippage velocity is calculated using the slippage model; at last, data of oil-water slippage velocity and water holdup are fitted exponentially for various flow rate to obtain a set of regression expressions on slippage velocity. The method makes the interpretation for fluid production profile of well 3-181 in Shanshan Oilfield more correct.

**Key words:** production logging, oil/water 2-phase flow, fluid production profile, flow rate, water holdup, slippage model, slippage velocity

## 0 引言

产液剖面测井<sup>[1]</sup>解释方法中用得较多的是滑脱模型。在求取滑脱模型中的重要参数滑脱速度时, 中国大多数油田使用斯伦贝谢公司研制的实验图版。由于国外油田多数是流量高于100 m<sup>3</sup>/d的高产井, 因此斯伦贝谢公司制作的图版只考虑了油水密度差对滑脱速度的影响, 而忽略了滑脱速度与流量的关系。对于中国油田油水密度差较小的中低产井, 用这种方法求取的滑脱速度误差较大。结合中国油田实际状况, 通过三相流实验装置模拟井筒中

的油水两相流动实验, 得出了滑脱速度的计算方法, 并将该方法运用到油田实际解释工作, 取得较好效果。

## 1 滑脱模型

由于油水两相的密度差(油轻水重)、界面张力、黏度、油泡直径等差异, 使油的上升速度比水快, 油水之间产生相对运动(称为滑动)。油与水平均速度之差称为油水滑脱速度, 有<sup>[2]</sup>

**基金项目:** 四川省重点项目(SZD0414)。

**作者简介:** 周勇男, 1981年生, 硕士研究生, 从事测井解释研究工作。

$$u_{\text{so}} = u_o - u_w = \frac{u_{\text{so}}}{y_o} - \frac{u_{\text{sw}}}{y_w} = \frac{u_{\text{so}}}{1 - y_w} - \frac{u_{\text{sw}}}{y_w} = \frac{u_m - u_{\text{sm}}}{1 - y_w} - \frac{u_{\text{sw}}}{y_w} \quad (1)$$

由式(1)得到滑脱模型

$$\begin{cases} u_{\text{sw}} = y_w u_m - y_w (1 - y_w) u_{\text{so}} \\ u_{\text{so}} = u_m - u_{\text{sw}} \\ Q_o = A u_{\text{so}} \\ Q_w = A u_{\text{sw}} \\ Q = Q_o + Q_w \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $u_o$ 、 $u_w$ 、 $u_m$  为油水平均速度、油水混合速度,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $u_{\text{so}}$ 、 $u_{\text{sw}}$ 、 $u_{\text{so}}'$  为油水表观速度、油水滑脱速度,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $y_w$ 、 $y_o$  为持水率、持油率, 无因次;  $A$  为套管横截面积,  $\text{m}^2$ 、 $Q_o$ 、 $Q_w$ 、 $Q$  为油水流量、总流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

由式(2)可知,  $y_w$ 、 $y_m$  分别由持水率计和流量计测定。因此,  $u_{\text{so}}'$  确定后产层的油水流量也就确定了, 所以产液剖面的确定关键就在于  $u_{\text{so}}'$  的求取。

## 2 求取滑脱速度

### 2.1 实验方案的设计

实验在中国石油测井有限公司吐哈事业部的油、气、水三相模拟装置中进行。实验中分别选用密度为  $0.805 \text{ g}/\text{cm}^3$  的柴油和  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  的自来水模拟井下的原油和地层水。实验仪器选用高分辨率电机驱动全集流布伞式流量含水测试仪, 每组数据记录不同的流量计、持水率计响应值<sup>[1]</sup>。实验中设定井为直井, 液流量分不同含水百分比进行模拟实验, 记录不同液流量、不同含水百分比情况下的仪器响应值<sup>[3]</sup>, 主要研究不同液流量下, 滑脱速度与流量和持水率之间的关系。实验采用的模拟井内径为  $13.97 \text{ cm}$ , 模拟井筒由透明的有机玻璃制成, 用肉眼可以区分油泡在水中的运动轨迹。实验中油水的总流量设定为  $4$ 、 $7$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $30$ 、 $40$ 、 $50$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ , 不同流量下含水率设定为  $100\%$ 、 $90\%$ 、 $80\%$ 、 $70\%$ 、 $60\%$ 、 $50\%$ 、 $40\%$ 、 $30\%$ 、 $20\%$ 、 $10\%$ 、 $0\%$  共  $11$  组<sup>[4]</sup>。

### 2.2 实验数据分析

首先把测定的持水率计响应值进行归一化处理, 按照式(3)换算成持水率。

$$y_w = \frac{CPS_o - CPS}{CPS_o - CPS_w} \quad (3)$$

式中,  $CPS$  为持水率计响应值;  $CPS_o$ 、 $CPS_w$  分别为持水率计在含水率  $0\%$  和  $100\%$  时的响应值。

由于

$$u_w = \frac{Q}{A}, \quad u_{\text{sw}} = \frac{Q C_w}{A} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得到

$$u_{\text{so}}' = \frac{Q(y_w - C_w)}{A y_w (1 - y_w)} \quad (5)$$

式中,  $C_w$  为含水率。

根据式(5), 以油水滑脱速度  $u_{\text{so}}'$  为纵坐标, 持水率  $y_w$  为横坐标, 用相同的流量和不同的持水率作为一组数据作散点图(见图 1)。

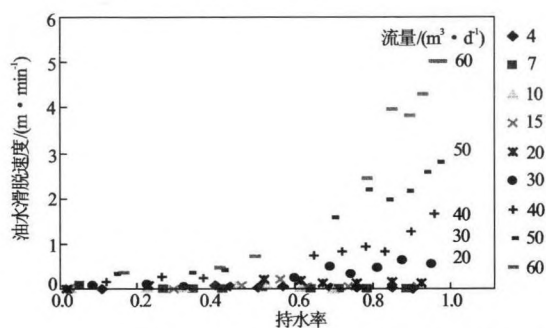


图 1 不同流量和持水率对应的滑脱速度散点图

由图 1 可知, 在流量小于  $20 \text{ m}^3/\text{d}$  时, 滑脱速度非常小, 趋于  $0 \sim 0.1 \text{ m}/\text{min}$  之间, 流量和持水率对滑脱速度的影响不明显, 这主要与油、水本身速度较小和仪器的分辨率有关。流量分别在  $30$ 、 $40$ 、 $50$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ , 持水率小于  $0.5$  时, 滑脱速度随着持水率的增加而缓慢增大, 滑脱速度受流量的影响较小; 相同持水率, 不同流量的滑脱速度差异不明显。在持水率大于  $0.5$  以后, 滑脱速度随持水率的增加急剧增长, 滑脱速度受流量的影响较大。持水率相同时, 流量越大滑脱速度越大, 而且流量越大滑脱速度的增长速率越大。

## 3 滑脱速度计算模型

通过数据分析, 对图 1 中的数据点采用指数的方法进行拟合(见图 2)。拟合的相关式见表 1。

由表 1 可知, 当流量大于  $30 \text{ m}^3/\text{d}$ , 且流量相同时, 滑脱速度与流量为较好的指数关系, 相关系数几

表 1 滑脱速度与流量、持水率的统计分析表

| 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ | 拟合相关式                   | 相关系数   |
|--|-------------------------|--------|
| 30                                     | $y = 0.0477e^{2.5982x}$ | 0.8863 |
| 40                                     | $y = 0.1235e^{2.5886x}$ | 0.9659 |
| 50                                     | $y = 0.1497e^{3.107x}$  | 0.9559 |
| 60                                     | $y = 0.1462e^{3.6375x}$ | 0.9673 |

注: 表 1 中的  $x$  和  $y$  分别代表持水率和油水滑脱速度

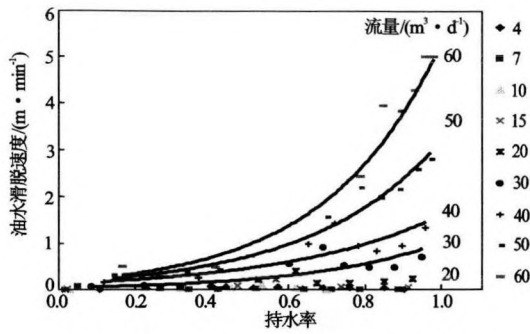


图2 滑脱速度与流量、持水率关系图版

乎都在0.9以上,因此认为采用指数拟合的方法是正确的。为便于求取滑脱速度,以每10 m³/d作为界限,并且假设界限间均匀分布有一族曲线,根据式(4)和表1的结果,将滑脱速度与流量、持水率的关系等效为式(6)

$$v_{sow} = \begin{cases} v_m < 0.91 \text{ m/min} \\ 0.05 \frac{v_m - 0.91}{10} e^{2.6y_w}, \\ 0.91 \text{ m/min} \leq v_m < 1.36 \text{ m/min} \\ (0.05 + 0.07) \frac{v_m - 1.36}{10} e^{2.6y_w}, \\ 1.36 \text{ m/min} \leq v_m < 1.81 \text{ m/min} \\ (0.12 + 0.03 \frac{v_m - 1.81}{10}) e^{(2.6 + 0.6 \frac{v_m - 1.81}{10})y_w}, \\ 1.81 \text{ m/min} \leq v_m < 2.27 \text{ m/min} \\ 0.15 e^{(3.1 + 0.6 \frac{v_m - 2.27}{10})y_w} \end{cases} \quad (6)$$

该模型中只有平均流速和持水率2个参数,在现场测试时,知道了流速和持水率后,就可以计算出各产层的油水流量,从而确定产液剖面。

表2 解释成果表

| 层号 | 持水率  | 滑脱速度/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | 油水平均速度/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | 油平均速度/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | 产油/(m³·d <sup>-1</sup> ) | 产水/(m³·d <sup>-1</sup> ) |
|----|------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1  | 0.68 | 1.23                            | 2.63                              | 1.15                             | 15.2                     | 4.8                      |
| 2  | 0.64 | 0.26                            | 1.70                              | 0.82                             | 0.2                      | 8.6                      |
| 3  | 0.52 | 0.18                            | 1.31                              | 0.82                             | 12.8                     | 5                        |
| 4  | 0.52 | 0.02                            | 0.50                              | 0.24                             | 0                        | 1.6                      |
| 5  | 0.43 | 0.08                            | 0.42                              | 0.24                             | 5.4                      | 4                        |
| 总计 |      |                                 |                                   |                                  | 33.6                     | 24                       |

参考文献:

[1] 戴家才,郭海敏,侯月明,等. 低流量三相流动生产测井实验研究[J]. 测井技术,2004,28(6):482-483.  
 [2] 郭海敏. 生产测井导论[M]. 北京:石油工业出版社,2003:195-234.  
 [3] 杨文举,陈伟中,赵乾富,等. 多相流动超声波测井模拟实验研究[J]. 江汉石油学院学报,2003,25(4):66-

4 运用实例

鄯3-181井是鄯善油田的1口气举井,原油密度为0.806 g/cm³,与实验采用的柴油密度接近,地面计量产油30.5 m³/d,产水20.8 m³/d,综合含水46%,套管内径为13.97 cm。共射开5个层,使用Excell-1000型进行七参数生产测井。用滑脱模型和上述的滑脱速度计算模型进行综合解释,解释结果见表2。

从表2可知,2号层为主产水层,产水8.6 m³/d,占全井产水量的35.8%;产油0.2 m³/d,含水97.8%。4号层仅产少量水。1,3,5号层为主产油层,产油分别为15.2 m³/d、12.8 m³/d、5.4 m³/d。其解释成果与实际动态分析基本一致。根据解释成果对其对应注水井鄯83-149井进行全井段调剖<sup>[5]</sup>,使油井鄯3-181井见效,增油9.8 m³/d,达到了良好的应用效果。

5 结论

利用实验的方法建立的滑脱速度与流量、持水率之间关系计算模型,为现场快速准确的确定产液剖面提供了可考的依据。

由于进行地面实验时的压力、温度等因素与井下有较大的不同,因此容易造成仪器测量上的差异。因此,有待于进行更深入的环境校正方面的研究,以便提高产液剖面的解释精度,为油田勘探开发提供更为可靠的动态数据。

67.

[4] 戴家才,郭海敏,何亿成,等. 水平井、斜井集流式生产测井实验研究[J]. 测井技术,2005,29(6):493-495.  
 [5] 黄泽艳,张维平,金铁山. 用生产测井资料确定油水井注采关系方法及效果评价[J]. 测井技术,2000,24(6):466-469.

(收稿日期:2007-09-05 本文编辑 王小宁)