

# 油气上窜速度实用计算方法

孙晓波

(中石化胜利石油工程有限公司西南分公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 油气上窜速度对钻井施工中下一步施工方案的制定具有重要参考价值。文章在总结分析前人经验的基础上结合现场施工实际对传统油气上窜速度计算公式加以修正,并对修正后的公式中涉及到的参数进行了逐一分析,在不影响正常施工工序的条件下使公式中各参数取值准确性进一步提高。通过现场工程测试,该方法简单实用且计算准确性较高。该计算方法在保证计算结果准确性的同时,也具备较强的现场可操作性,通过大量的实践检验后可进一步推广。

**关键词:** 上窜速度;油气钻井;环空;泥浆上返速度

**中图分类号:** TE22    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672 - 7428(2016)09 - 0047 - 05

**Practical Calculation Method of Oil and Gas Ascending Velocity/SUN Xiao-bo** (Sinopec Shengli Drilling Southwest Branch, Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Oil and gas ascending velocity plays an important role in making next-step work plan during drilling operation. In this paper, the traditional formula of oil and gas ascending velocity is modified based on the analysis on previous experience and combined with the actual construction practice, and the parameters involved in the revised formula are analyzed one by one, the accuracy of each parameter in the formula is further improved without affecting the normal construction procedure. Through the field engineering test, this method is proved to be simple and practical with high calculation accuracy. This method can not only ensure the accuracy of the calculation results, but also has good maneuverability.

**Key words:** oil and gas ascending velocity; oil and gas drilling; annular; mud return velocity

## 0 引言

地层内流体(油气)在井内泥浆静止环境下,通过扩散、置换或渗滤作用进入井眼,产生向井口方向的运移,其上升的速度称为油气上窜速度。油气上窜速度计算不准确,一方面可能导致井涌、井喷等严重的井控事故,另一方面可能造成对油气层不必要的损害,还会因为不能准确计算油气上窜速度而不得不采取“将钻具起至套管鞋内或安全井段,停泵检查一个起下钻周期或需停泵工作时间,再下回井底循环一周观察”<sup>[1]</sup>的措施来制定下一步施工方案,浪费大量的宝贵时间。因此,了解油气上窜速度影响因素、准确计算油气上窜速度对于当前“寒冬”形势下的安全、高效钻井具有重要意义。

目前,油气上窜速度的计算方法很多,前人对传统的计算方法做了很多修正工作并不断有人提出新的方法<sup>[2-15]</sup>,但油气上窜速度的计算仍存在一定的误差:很多学者从不同角度提出了不同的油气上窜速度计算公式,也有部分学者在分析油气上窜速度综合影响因素的基础上提出了理论上较为准确的计

算方法,但每种计算方法的理论公式中涉及的参数取值的准确性仍不能保证。

本文结合现场求取油气上窜速度的具体施工步骤,在分析前人研究的基础上,综合考虑影响油气上窜速度的影响因素,对传统油气上窜速度的计算公式进行修正,并且对修正后的公式中涉及到的参数取值进行了逐一分析,以使油气上窜速度的计算更为精确。

## 1 油气上窜速度计算公式的修正

### 1.1 对传统计算方法的分析

传统的迟到时间法计算油气上窜速度的公式为:

$$v = \frac{H_{\text{油}} - \frac{H_{\text{钻头}}}{t_{\text{迟}}}}{t_{\text{静}}} \quad (1)$$

式中: $v$ ——油气上窜速度, m/h;  $H_{\text{油}}$ ——油气层顶部深度, m;  $H_{\text{钻头}}$ ——循环钻井液时钻头所在深度, m;  $t_{\text{迟}}$ ——钻头所在深度迟到时间, h;  $t$ ——从开泵循环到见到油气显示的时间, h;  $t_{\text{静}}$ ——从停泵起钻至本

收稿日期:2015 - 12 - 31; 修回日期:2016 - 07 - 20

作者简介:孙晓波,男,汉族,1987年生,助理工程师,石油工程专业,主要从事现场技术管理工作,山东省东营市淄博路与云门山路交叉口(重庆市渝中区石油路恒大名都17栋603室),sunxiaobo5105@163.com。

次开泵的总静止时间, h。

根据(1)式中各参数的定义:分母  $t_{\text{静}}$  是指“从停泵起钻至本次开泵的总静止时间”<sup>[2]</sup>, 对应的分子  $H_{\text{油}} - (H_{\text{钻头}}/t_{\text{迟}})t$  (为方便描述, 把它定义为  $\Delta H$ ) 是指在该静止时间段  $t_{\text{静}}$  内油气上窜的距离, 则相应的  $v$  是指侵入井筒内的流体在  $\Delta H$  距离、 $t_{\text{静}}$  时间内的平均上窜速度。

显然根据(1)式中计算出的油气上窜速度  $v$  制定下步施工方案有不妥之处:一方面, 通常情况下  $H_{\text{油}}$  到临界井深(侵入井筒的流体随着其沿井筒不断滑脱上升, 流体的体积不断膨胀, 当上窜到某一高度时, 由于流体体积的膨胀会使井口钻井液自动外溢喷出, 这个高度到井口的距离称之为临界井深)的距离远大于  $\Delta H$ , 对于深井这点尤其突出;另一方面, 由于流体上窜过程中井筒内压力的变化等诸多因素造成油气上窜并非匀速,  $\Delta H$  小段距离内的平均油气上窜速度并不能真实反应  $H_{\text{油}}$  到井口这一大段的平均油气上窜速度。综上所述, 用  $H_{\text{油}}$  到井口段的平均油气上窜速度  $v'$  代替  $\Delta H$  距离内的平均油气上窜速度  $v$  更为合理。因此, 建议采用下式计算油气上窜速度:

$$v' = \frac{H_{\text{油}} - 3600v_{\text{m}}t - h_2}{t_{\text{静}} + t} \quad (2)$$

## 1.2 修正后计算公式的原理及推导

结合具体施工过程, 将流体自侵入井筒开始至返至井口的过程人为的分成4段(如图1):第1段, 在静止时间  $t_{\text{静}}$  内由于密度差的作用油气滑脱上升的距离  $h_1$ ; 第2段, 下钻过程中由于钻具体积的排替造成原始气侵面上升的距离  $h_2$ ; 第3段, 从开泵循环到见到油气显示的时间  $t$  内由于密度差的作用油气滑脱上升的距离  $h_3$ ; 第4段, 从开泵循环到见到油气显示的时间  $t$  内由于钻井液的顶替作用油气上升的距离  $h_4$ 。

(2)式的推导过程如下:

$$H_{\text{油}} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (3)$$

即

$$H_{\text{油}} = v't_{\text{静}} + h_2 + v't + 3600v_{\text{m}}t \quad (4)$$

得

$$v' = \frac{H_{\text{油}} - 3600v_{\text{m}}t - h_2}{t_{\text{静}} + t}$$

式中:  $v'$ ——平均油气上窜速度, m/h;  $v_{\text{m}}$ ——环空泥浆上返速度, m/s。

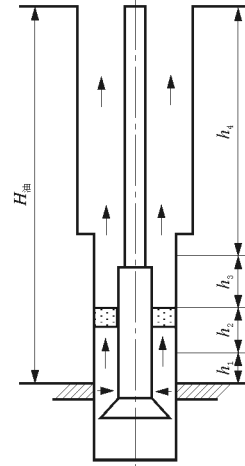


图1 油气上窜的4个阶段

其他参数的含义同(1)式。

从(2)式中可以看出, 油气上窜速度计算中涉及的参数主要有  $H_{\text{油}}$ 、 $t_{\text{静}}$ 、 $v_{\text{m}}$ 、 $t$ 、 $h_2$ , 只要能够确保以上参数取值的准确性, 就能够准确地计算油气上窜速度。

## 2 油气上窜速度计算参数的取值

在具体工程实践中,  $H_{\text{油}}$  的取值误差并不大且可以通过各种方法校验,  $t_{\text{静}}$  目前普遍做法就是从停泵起钻至本次开泵的总静止时间, 为实际测量值, 这两个参数不再做额外说明, 重点对如何取准  $v_{\text{m}}$ 、 $t$ 、 $h_2$  等参数做具体说明。另外, 为方便现场计算对修正后的公式编制了VB小程序。

### 2.1 环空泥浆上返速度 $v_{\text{m}}$ 的确定

#### 2.1.1 环空泥浆上返速度 $v_{\text{m}}$ 的理论推导

环空泥浆上返速度的理论计算公式为:

$$v_{\text{m}} = \frac{H_{\text{钻头}}}{t_{\text{迟}}} \quad (5)$$

(5)式中,  $H_{\text{钻头}}$  的值是确定的, 只要确定  $t_{\text{迟}}$  的准确值, 就可以准确计算  $v_{\text{m}}$  值。

钻头所在深度迟到时间  $t_{\text{迟}}$  的理论计算公式为:

$$t_{\text{迟}} = \frac{V_{\text{环空}}}{Q_{\text{实际}}} \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{环空}}$ ——井眼与钻具间环空容积,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{\text{实际}}$ ——泥浆泵实际排量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

$$Q_{\text{实际}} = 60n \left( \frac{\pi}{4} D^2 L \times 3 \right) \eta \quad (7)$$

式中:  $D$ ——缸套直径, m;  $L$ ——冲程, 一般取 0.3048 m;  $n$ ——每分钟的泵冲数, 次/min;  $\eta$ ——上

水效率,无量纲。

(7)式适用于现场常见的三缸单作用泥浆泵。

将式(5)~(7)合并整理得环空泥浆上返速度:

$$v_m = \frac{H_{\text{钻头}} Q_{\text{实际}}}{V_{\text{环空}}} \quad (8)$$

由式(5)、式(8)可以得出:钻头所在井深  $H_{\text{钻头}}$  的值确定,要想准确确定环空上返速度  $v_m$  的值,必须得到准确的泥浆泵排量  $Q_{\text{实际}}$  和井眼与钻具间环空容积  $V_{\text{环空}}$  或迟到时间  $t_{\text{迟}}$ 。其中,  $V_{\text{环空}}$  理论上可以通过计算得出,但在裸眼段  $V_{\text{环空}}$  受井径扩大率影响较大(裸眼段越长影响越大),在套管内受泥饼厚度影响较大(各开次周期越长、环空返速越小的井影响越明显),因此无法通过纯理论计算得到其准确值。泥浆泵上水效率  $\eta$  受泥浆泵本身工作状况、泥浆性能等影响,再者长时间停泵的情况下开泵之初的排量也不可能达到正常循环排量,另外还有中途停泵的现象时有发生,一系列原因造成泥浆泵排量  $Q_{\text{实际}}$  的准确值不可能通过计算得到。

### 2.1.2 环空泥浆上返速度 $v_m$ 的现场测算

(1)实测对应泥浆泵的上水效率  $\eta$  得到  $Q_{\text{实际}}$  的准确值。

正常钻进或循环过程中,将参与循环的一部分泥浆罐截流,记录一段时间内泥浆的减少量(例如1、2、3号罐参与循环,其中3号罐与泥浆泵上水管线联通,则将1、2号罐截流,记录一段时间内3号罐泥浆的减少量,具体记录时间根据实际情况定,记录时间尽可能长以减少记录误差),根据准确记录的时间及准确计量的泥浆减少量,换算对应泥浆泵的排量及上水效率。

(2)实测  $H_{\text{钻头}}$  处的环空容积  $V_{\text{环空}}$  得到  $V_{\text{环空}}$  的准确值。

传统的实测迟到时间的方法为:起钻前利用投入钻具内的测量指示物(塑料条或碎瓷片等)测一个泥浆循环时间,然后用实测的循环时间减去计算的泥浆在钻具内的下行时间,得出迟到时间。

这种方法存在以下几个问题:第一,卸开钻具投入测量指示物后开泵,泵排量无法立即达到正常循环排量,即实测的泥浆循环时间并非正常排量下的循环时间;第二,泥浆在钻具内的下行时间由理论计算公式  $V_{\text{内}}/Q_{\text{实际}}$  得到,同样由于开泵初期排量无法达到正常循环排量,导致实际钻具下行时间比理论计算偏大。建议采用下述方法计算迟到时间  $t_{\text{迟}}$  及

泥浆的环空容积  $V_{\text{环空}}$ :

$$t_{\text{迟}} = t_{\text{循环}} - t_{\text{下行}} \quad (9)$$

$$V_{\text{环空}} = (s_{\text{循环}} - s_{\text{内}}) \frac{\pi}{4} D^2 L \times 3\eta \quad (10)$$

现场具体操作方法为:根据钻具内容积  $V_{\text{内}}$  及实测泥浆泵排量换算泥浆返出钻头水眼时所需的累计泵冲数  $s_{\text{内}}$ ,将测量指示物投入钻具内,逐渐开泵至正常循环排量并保持排量不变,记录从开泵到达到累计泵冲数  $s_{\text{内}}$  时的时间  $t_{\text{下行}}$ ,在振动筛处观察指示物返出情况,记录从开泵到指示物返出时间  $t_{\text{循环}}$ ,从开泵到指示物返出累计泵冲  $s_{\text{循环}}$ 。

(3)计算环空泥浆上返速度  $v_m$  得到  $v_m$  的准确值。

根据式(5)或式(8)计算泥浆环空上返速度:

$$v_m = \frac{H_{\text{钻头}}}{t_{\text{循环}} - t_{\text{下行}}} \quad (11)$$

$$\text{或} \quad v_m = \frac{H_{\text{钻头}} Q_{\text{实际}}}{(s_{\text{循环}} - s_{\text{下行}}) \frac{\pi}{4} D^2 L \times 3\eta} \quad (12)$$

式(11)和式(12)的计算结果相同,具体计算时可根据现场实际情况进行选择。

## 2.2 从开泵循环到见到油气显示时间 $t$ 的确定

分析式(4)可知,见显时间  $t$  按从开泵循环到见到油气显示时间取值并不影响油气上窜速度  $v'$  计算的准确性。关键是根据相关规范结合现场实际情况确定合理的气测异常标准值,从而确定见到显示的时间点。

## 2.3 由于钻具体积的排替造成原始气侵面上升距离 $h_2$ 的确定

下钻过程中钻具进入油气侵井段一般要经历以下3个阶段(如图2),即钻具未进入油气侵井段、钻具进入部分油气侵井段以及钻具部分穿过油气侵井段。在不考虑井眼扩大率的情况下,钻具排替造成原始气侵面上升,基本原理为原始气侵面深度以下钻具体积等于原始气侵面深度之上的气侵段环空体积<sup>[8]</sup>。具体工程实践中,钻具体积又要综合考虑回压阀是否失效,从而更加准确地确定  $h_2$  的值。

(1)回压阀密封良好,钻具进入部分油气侵井段造成原始气侵面上升的距离定  $h_2$ ,如图2(b)。

$$\sum_{i=1}^n S_{\text{钻具}i} l_{\text{钻具}i} = \sum_{i=1}^n S_{\text{环空}i} l_{\text{环空}i} \quad (13)$$

$$h_2 = \sum_{i=1}^n l_{\text{环空}i} = l_{\text{环空}1} + l_{\text{环空}2} + \dots + l_{\text{环空}n} \quad (14)$$

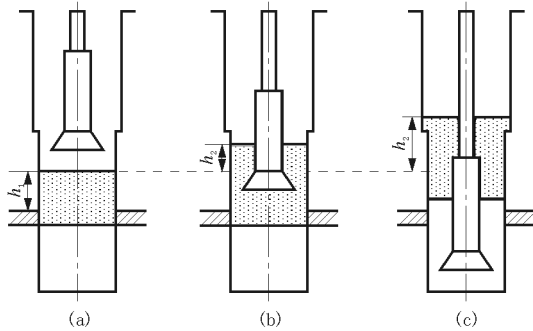


图2 下钻过程中钻具进入油气侵井段示意图

式中: $S_{\text{钻具}i}$ ——原始气侵面深度以下各段钻具的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $l_{\text{钻具}i}$ ——原始气侵面深度以下各段钻具的长度,  $\text{m}$ ;  $S_{\text{环空}i}$ ——原始气侵面深度以上各段环空截面积,  $\text{m}^2$ ;  $l_{\text{环空}i}$ ——原始气侵面深度以上各段环空长度,  $\text{m}$ 。

计算  $h_2$  时, 先根据式(1)计算原始气侵面深度  $H_{\text{油}} - h_1$ , 进而根据实际钻具结构得到原始气侵面深度以下钻具的总排替体积, 然后根据式(13)、式(14)求得  $h_2$ 。

(2) 回压阀密封良好, 钻具部分穿过油气侵井段造成原始气侵面上升的距离  $h_2$ , 如图2(c)。

钻头位置穿过油气侵井段, 继续下钻的过程中, 钻具排替作用使气侵井段被整体向上推移, 其上升距离仍然符合式(13)规律。

(3) 回压阀失效, 则式(13)中  $S_{\text{钻具}i}$  应改为原始气侵面深度以下各段钻具本体的截面积  $S'_{\text{钻具}i}$ ,  $S_{\text{环空}i}$  应改为原始气侵面深度以上各段环空截面积与各段钻具内容积之和  $S'_{\text{环空}i}$ , 其他计算参数与式(13)相同。

### 2.4 修正后计算公式的编程计算

油气上窜速度计算公式修正后计算精度有所提高, 但计算量增大。为解决这个问题, 编制了小程序以方便现场应用, 应用界面见图3。



图3 油气上窜速度实用计算方法编程界面

### 3 现场应用

该计算方法的准确性及可操作性, 在四川盆地川东北巴中低缓构造元坝区块元坝103-1H井的施工现场得到验证。该井完钻井深7508 m, 进行后期完井投产期间, 替喷测试过程中由于封隔器发生窜漏导致油套环空存在倒吸现象。后将完井投产管柱从封隔器顶部倒开, 起出完井管柱进行了一系列其他作业后下入井控管柱(光钻杆), 进而在井内是井控管柱的情况下进行了一系列测量油气上窜速度的相关实验。实验环境如图4所示。

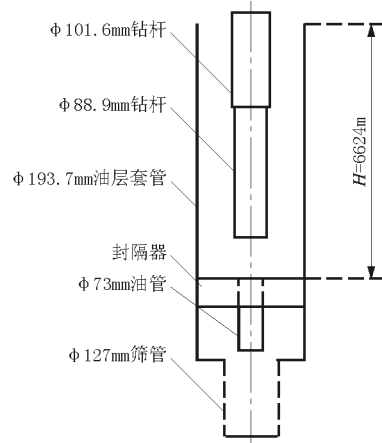


图4 井筒环境示意图

$\text{Ø}193.7 \text{ mm}$  油层套管内径  $168.3 \text{ mm}$ ,  $\text{Ø}101.6 \text{ mm}$  钻杆壁厚  $9.65 \text{ mm}$ ,  $\text{Ø}88.9 \text{ mm}$  钻杆壁厚  $9.35 \text{ mm}$ , 井内钻具组合为  $\text{Ø}88.9 \text{ mm}$  钻杆  $\times 497$  根 ( $4764.69 \text{ m}$ ) +  $311 \times 4\text{A}20$  配合接头 (直径  $140 \text{ mm}$ )  $\times 0.50 \text{ m}$  +  $\text{Ø}101.6 \text{ mm}$  钻杆  $\times 177$  根 ( $1607.25 \text{ m}$ ), 方余  $9.93 \text{ m}$ , 钻具下深  $6362.51 \text{ m}$ 。前期对井内泥浆进行过循环脱气作业, 所以将钻具下深位置假设为油气异常井段的顶深。

#### 3.1 油气上窜速度计算过程实例

首先实测泵的上水效率: 将指示物投入钻具内后, 记录开泵时间为  $8:32$ , 待逐渐开泵至正常循环泵冲  $35 \text{ 次}/\text{min}$ , 将1号、2号循环罐截流  $5 \text{ min}$ , 泥浆泵从3号循环罐单独抽取泥浆。3号循环罐液面空高由  $70 \text{ cm}$  降为  $82 \text{ cm}$ , 液面空高对应体积为  $0.262 \text{ m}^3/\text{cm}$ ,  $5 \text{ min}$  内3号循环罐减少的泥浆量为  $3.144 \text{ m}^3$ , 实测泥浆泵排量  $0.6288 \text{ m}^3/\text{min}$ 。现场泥浆泵所用缸套直径  $165.1 \text{ mm}$ 、冲程  $0.3048 \text{ m}$ , 泵冲为  $35 \text{ 次}/\text{min}$  时理论排量为  $0.6848 \text{ m}^3/\text{min}$ , 计算得上水效率  $91.82\%$ 。

其次实测迟到时间及环空容积: 由钻具组合及

钻具规格得钻具内容积为  $26.94 \text{ m}^3$ , 对应泵冲数  $S_{\text{内}} = 26.94 \div (0.6288 \div 35) = 1499.52$  冲  $\approx 1500$  次, 当累计泵冲达到 1500 次时, 记录时间点为 9:18, 即  $t_{\text{下行}} = 0.77 \text{ h}$ 。记录振动筛处返出指示物时对应的累计泵冲  $S_{\text{循环}} = 6894$  次, 记录时间点为 11:52, 即  $t_{\text{循环}} = 3.33 \text{ h}$ , 则  $t_{\text{返}} = 2.57 \text{ h}$ 。由式(10)得环空容积为  $96.90 \text{ m}^3$ 。

然后计算环空泥浆上返速度: 由式(12)得  $v_m = 6362.51 \div (3600 \times 2.57) = 0.69 \text{ m/s}$ 。

最后计算油气上窜速度: 泥浆静止时间为 45.20 h。气测背景值 0.05%, 10:34 气测值上升至 0.14%, 该时间确定为见显时间, 则  $t = 2.03 \text{ h}$ 。本次实验环境等同于图 2(a) 所示情况, 所以不涉及钻具排替对油气上窜速度的影响。由式(2)计算油气上窜速度  $v' = 27.95 \text{ m/h}$ 。

### 3.2 油气上窜速度计算方法准确性分析

#### 3.2.1 井筒实验环境分析

(1) 该井实验井段为全套管井段, 不存在井径扩大率问题; (2) 下井控管柱前进行了刮管作业, 套管内泥饼对环空容积的影响可以忽略; (3) 井内钻具的排替量在理论数据的基础上, 经过多趟钻的起下钻校验(校验后  $\text{Ø}101.6 \text{ mm}$  钻杆闭端排替量  $8.56 \text{ L/m}$ ,  $\text{Ø}88.9 \text{ mm}$  钻杆闭端排替量  $6.55 \text{ L/m}$ ), 误差可以忽略。

#### 3.2.2 实验数据分析

该井井筒实验环境单一, 通过理论计算能够获得准确的环空容积、迟到时间等数据。若实测数据与理论数据吻合, 则表明用文中方法可以测得准确的上水效率、环空容积、迟到时间等数据, 进而可以用此方法实测环空容积不能通过理论计算的井筒环境, 再结合修正后的计算公式, 获得准确的油气上窜速度。理论计算该井筒与钻杆间环空容积为  $96.58 \text{ m}^3$ , 则在 35 次/min 的泵冲下的迟到时间为 2.56 h。用文中方法测得环空容积  $96.90 \text{ m}^3$ , 迟到时间 2.57 h。

#### 3.2.3 计算方法准确性分析

实验证明用文中所述方法测算的环空容积误差率仅为 0.33%, 迟到时间误差率仅为 0.39%, 有效保证了式(2)中参数取值的准确性, 从而达到了更加准确地计算油气上窜速度的目的。

## 4 结论

(1) 文中论述的方法综合考虑了泥浆泵上水效

率、井身结构、井径扩大率、钻具下入对原始气侵面的举升、开泵初期泵排量不能达到正常循环排量等影响油气上窜速度计算准确性的因素。

(2) 修正后的油气上窜速度计算公式中涉及的参数除  $h_2$  均为实测参数, 有效保证了参数取值的准确性, 从而使得到的数值更准确, 能够更好地指导下步施工。

(3) 利用本文论述的方法, 基层钻井队配合基层录井队在正常施工工序下就可以准确地完成油气上窜速度的计算, 现场可操作性强, 工程应用性强。

(4) 确定钻具体积的排替造成原始气侵面上升距离  $h_2$  时, 未考虑井眼扩大率的影响(将导致计算的油气上窜速度值较大), 并且其中的原始气侵面深度  $H_{\text{油}} - h_1$  是由未经校正的油气上窜速度计算公式得出(导致计算的油气上窜速度值较大), 后续需进一步研究校正。

## 参考文献:

- [1] SY/T 6426—2005, 钻井井控技术规程[S].
- [2] 赵金洲, 张桂林. 钻井工程技术手册(第二版)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 109-113.
- [3] 李基伟, 柳贡慧, 李军, 等. 油气上窜速度的精确计算方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(22): 180-184.
- [4] 孙士平, 孙宝发, 赵勇. 基于泥浆体积排代法计算油气上窜速度研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(3): 499-501.
- [5] 宋广健, 严建奇, 王丽珍, 等. 油气上窜速度计算方法的改进与应用[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(5): 17-19.
- [6] 李振海, 覃保铜, 金庭科, 等. 油气上窜速度计算方法的修改[J]. 录井工程, 2011, 22(2): 12-13, 26.
- [7] 成萍, 周文君, 胥仁强, 等. 气测后效油气上窜高度计算方法完善[J]. 录井工程, 2010, 21(1): 26-28.
- [8] 孙先长, 肖宗林, 刘雁婷, 等. 钻具下入对后效录井的影响分析[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(11): 51-53.
- [9] 张瑞强. 后效气录井油气上窜速度的准确计算[J]. 录井工程, 2010, 21(4): 14-16.
- [10] 高志, 王建伟, 李山昌, 等. 循环钻井液气测录井资料校正方法及应用[J]. 录井工程, 2014, 25(3): 51-55.
- [11] 向前, 阮聪. 后效分析在录井现场的作用[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(2): 18-22, 34.
- [12] 王文忠, 赵军, 张秀红. 油气上窜速度计算公式的修正[J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 64-65.
- [13] 张桂林. 油气上窜速度实用计算方法[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(6): 23-26.
- [14] 赵勇, 邓章华. 钻井液顶替法计算油气上窜速度[J]. 中国科技信息, 2010, (16): 40-41, 52.
- [15] 应维民, 胡耀德. 油气上窜速度的现场计算[J]. 海洋石油, 2002, (2): 63-64, 19.