

◆ 钻井与完井 ▶

油气上窜速度实用计算方法

张桂林

(胜利石油管理局石油工程技术管理处, 山东东营 257000)

摘要: 简要分析了传统的迟到时间法、容积法计算油气上窜速度的主要不足, 提出了一种用相对时间计算钻井及井下作业施工中油气上窜速度的方法。该方法通过一次下钻测量记录未受油气侵钻井液和受油气侵钻井液的两个显示时间, 就能计算油气上窜速度, 解决了一般开发井不测量迟到时间和传统计算方法中数据取值一致性差、精度低的问题。推导出了等直径井眼与复合直径井眼不同情形的油气上窜速度计算公式。

关键词: 钻井; 井下作业; 油气上窜速度; 计算方法

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 06-0023-04

1 对传统计算方法的分析及问题提出

在钻井和井下作业施工中, 油气上窜速度是衡量井下安全的重要技术数据, 是确定下一步施工方案的重要依据。油气上窜速度过快, 将导致井涌、井喷等问题发生, 造成对地下油气资源和地面环境的破坏, 并严重威胁钻井施工安全。特别是随着油气勘探开发区域的逐年扩大和地下状况的不断复杂化, 对钻井和井下作业技术与安全提出了更高的要求, 要求计算油气上窜速度的方法更方便, 计算结果更准确。

对于油气上窜速度的计算, 传统的计算方法有“迟到时间法”和“容积法”两种。这两种计算方法在理论上是正确的, 但是, 这两种方法涉及到的关键参数——迟到时间、钻井泵排量是否准确, 对计算的准确性有很大影响。

迟到时间法是钻井现场一直采用的方法^[1]。该方法的主要不足有: 1) 测量比较繁琐; 2) 测量中受到“钻井液运载比”和钻具内部下行时间的影响, 很难保证精确; 3) 测量与计算油气上窜速度是在不同的下入钻具次数和状态下, 数据一致性差; 4) 没有将油气侵段的显示时间引入到上窜速度计算中, 缺乏全面性; 5) 用钻屑的迟到时间计算油气上窜速度不合理; 6) 没有考虑复合井眼情况。同时, 钻开发井和井下作业一般不测量迟到时间。

对于容积法, 现场应用较少^[1]。其原因主要是钻井泵排量的具体值精确性差, 井眼容积也不容易准确确定。

因此, 建立一种新的计算方法是十分必要的。笔者在长期分析的基础上, 提出了一种计算油气上窜速度的实用方法——相对时间法。

2 基本原理与计算方法

相对时间法是利用钻井液循环中各种时间所占相对比值计算油气上窜速度的方法。不同性质的钻井液, 在返出井口时都有相应的显示时间, 显示时间的长短受到循环排量、井眼容积、相应体积等因素影响。对于井身结构、循环排量、井眼容积、相应体积确定的井眼, 井口显示时间的相对长短就代表着所占井段的相对长度。

在发生油气侵、盐水侵等情况下, 下入钻具(管柱)循环时, 井眼上部未受侵染的钻井液有一定的显示时间, 下部受侵染钻井液返出后也有显示并持续一定的时间。这两个时间分别代表着未受侵染井段和受到侵染井段的相对长度, 对其进行记录并引入到计算当中, 即可计算出油气上窜速度, 这就是相对时间法的基本原理和实质。

实际的井眼有单一直径井眼和复合直径井眼(包括二级复合直径井眼、三级复合直径井眼、多级复合井眼等)两种。在计算中, 每一种井眼又都有3种情形: 钻头(管柱底部)深度小于油层顶部深度、与油层顶部深度相同和大于油层顶部深度。笔者以较为繁琐的三级复合直径井眼、钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度的情形为例进行了推导。

将钻头(管柱)下至油气层内某一深度, 开泵循

收稿日期: 2006-02-28; 改回日期: 2006-08-11

作者简介: 张桂林 (1959—), 男, 1981年毕业于胜利石油学校钻井专业, 石油大学(华东)本科学历, 副处长, 高级工程师。系本刊通讯员。

联系电话: (0546) 8555165

环（应保持等泵速）并在井口记录显示时间段 t_1 、 t'' ，根据记录的时间计算油气上窜速度 v 。

假设：1) 开泵后油气不再侵入井眼；2) 忽略开泵后油气滑脱、气体膨胀上升速度。

应考虑下入钻具（管柱）时油气侵钻井液返入了钻具（管柱）内部，随开泵循环又进入环空并与环空油气侵钻井液一同上返（如图 1 所示）。油气上窜速度的计算公式为：

$$v = \frac{H_1}{t_{\text{静}}} \quad (1)$$

式中， v 为油气上窜速度，m/h； H_1 为油气侵钻井液实际高度，m； $t_{\text{静}}$ 为从停泵起钻至本次开泵的总静止时间，h。

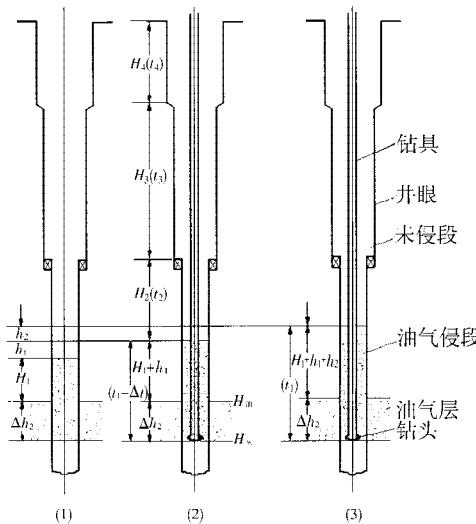


图 1 钻头（管柱底部）深度大于油层顶部深度的情形

根据图 1，存在如下关系式：

$$\frac{t_1 - \Delta t}{t_2 + t_3 + t_4} = \frac{(H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_1 / Q}{H_2 q_1 / Q + H_3 q_3 / Q + H_4 q_4 / Q} = \frac{(H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_1}{H_2 q_1 + H_3 q_3 + H_4 q_4} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta t}{t_1 - \Delta t} = \frac{(H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_3 / Q}{(H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_1 / Q} = \frac{q_3}{q_1} \quad (3)$$

$$t_2 + t_3 + t_4 = t'' \quad (4)$$

$$H_{\text{底}} = h_2 + H_1 + h_1 + H_2 + H_3 + H_4 \quad (5)$$

$$(H_1 + \Delta h_2) q = (H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_1 + (H_1 + h_1 + \Delta h_2) q_{\text{内}} \quad (6)$$

由式 (2) ~ (6) 可得：

$$\Delta t = \frac{t_1 q_{\text{内}}}{q_1 + q_{\text{内}}} \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{q - q_1 - q_{\text{内}}}{q_1 + q_{\text{内}}} H_1 + \frac{q - q_1 - q_{\text{内}}}{q_1 + q_{\text{内}}} \Delta h_2 \quad (8)$$

$$H_2 = \frac{q t_2}{q_1 t_1} H_1 + \frac{q t_2}{q_1 t_1} \Delta h_2 - \frac{q_3}{q_1} H_3 - \frac{q_4}{q_1} H_4 \quad (9)$$

由式 (7)、(8)、(9) 得：

$$H_1 = \frac{H_{\text{底}} + (\frac{q_3}{q_1} - 1) H_3 + (\frac{q_4}{q_1} - 1) H_4}{q (\frac{t''}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}})} - \Delta h_2 \quad (10)$$

将式 (10) 代入 (1) 得：

$$v = \frac{H_{\text{底}} + (\frac{q_3}{q_1} - 1) H_3 + (\frac{q_4}{q_1} - 1) H_4}{q (\frac{t''}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}}) t_{\text{静}}} - \frac{\Delta h_2}{t_{\text{静}}} \quad (11)$$

式 (11) 就是该种情形下的油气上窜速度计算公式。

式 (2) ~ (11) 中， t_1 为循环时井口油气显示的时间 ($H_1 + h_1 + \Delta h_2$ 段)，h； Δt 为将钻具（管柱）内受侵钻井液全部替入环空的时间，h； H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 为各井段长度，m； t_2 、 t_3 、 t_4 分别为 H_2 、 H_3 、 H_4 段钻井液返出井口时间，h； q_1 、 q_3 、 q_4 分别为 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 井段的环空容积，L/m； t'' 为从开泵循环到见到油气显示时间，h； q 为油气侵井段井眼容积，L/m； $q_{\text{内}}$ 为钻具（管柱）内容积，L/m； h_1 为下入钻具（管柱）后油气侵段上升高度，m； h_2 为钻具（管柱）内受侵钻井液在环空的高度，m； Δh_2 为钻具（管柱）下入油气层中的长度，m； $H_{\text{底}}$ 为钻具（管柱）底部深度（应小于或等于油气层底部深度），m； Q 为循环排量，L/s（不用于计算）。

由式 (11) 可知，对于一口具体的井，钻头深度 $H_{\text{底}}$ 、井段长度 (H_3 、 H_4)、钻具（管柱）下入油气层内长度 Δh_2 、井眼容积 q 、环空容积 (q_1 、 q_3 、 q_4)、钻具（管柱）内容积 $q_{\text{内}}$ 是确定的，开泵循环后只要准确记录时间 t_1 、 t'' 与总静止时间 $t_{\text{静}}$ ，代入式 (11) 便可求出油气上窜速度。

式 (11) 虽然繁琐，但未知条件只有三个，因此借助计算机进行计算非常方便（可根据实际井眼考虑一定的扩大率，井下作业施工不必考虑）。

笔者根据相同的原理，对于单一直径井眼、二级复合直径井眼、多级复合井眼，分钻头（管柱底部）深度浅于油层顶部深度、与油层顶部深度相同和大于油层顶部深度 3 种情形进行了推导，结果如下。

1) 单一直径井眼。

钻头（管柱底部）深度浅于油层顶部深度时，油气上窜速度为：

$$v = \frac{H_{\text{钻头}}}{q (\frac{t_2}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}}) t_{\text{静}}} + \frac{\Delta h_1}{t_{\text{静}}} \quad (12)$$

钻头（管柱底部）深度等于油层顶部深度时，油

气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{油}}}{q \left(\frac{t_2}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} \quad (13)$$

钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{底}}}{q \left(\frac{t_2}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} - \frac{\Delta h_2}{t_{\text{静}}} \quad (14)$$

2) 二级复合井径井眼。

钻头(管柱底部)深度浅于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{钻头}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3}{q \left(\frac{t'}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} + \frac{\Delta h_1}{t_{\text{静}}} \quad (15)$$

钻头(管柱底部)深度等于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{油}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3}{q \left(\frac{t'}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} \quad (16)$$

钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{底}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3}{q \left(\frac{t'}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} - \frac{\Delta h_2}{t_{\text{静}}} \quad (17)$$

3) 三级复合井径井眼。

钻头(管柱底部)深度浅于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{钻头}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3 + \left(\frac{q_4}{q_1} - 1 \right) H_4}{q \left(\frac{t''}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} + \frac{\Delta h_1}{t_{\text{静}}} \quad (18)$$

钻头(管柱底部)深度等于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{油}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3 + \left(\frac{q_4}{q_1} - 1 \right) H_4}{q \left(\frac{t''}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} \quad (19)$$

钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度时, 油气上窜速度为:

$$v = \frac{H_{\text{底}} + \left(\frac{q_3}{q_1} - 1 \right) H_3 + \left(\frac{q_4}{q_1} - 1 \right) H_4}{q \left(\frac{t''}{q_1 t_1} + \frac{1}{q_1 + q_{\text{内}}} \right) t_{\text{静}}} - \frac{\Delta h_2}{t_{\text{静}}} \quad (20)$$

以三级复合井径井眼、钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度为例进行分析, 若为等直径井眼, 则 $q_1 = q_3 = q_4$, $t'' = t_2$, 式(20)变为式(14), 即单一直径井眼、钻头(管柱底部)深度大于油层顶部深度的情形。对于每一种井眼、情形进行的分析, 都能得出相同的结论。所以, 每一种具体的情况, 都是相对时间法的一种特例。

3 注意事项及有关说明

3.1 钻具(管柱)下入深度问题

钻具(管柱)下入深度分3种情况, 即下至油气层以上深度、顶部深度和中部(底部)深度。下至油气层顶部是指在开泵初期钻具(管柱)处于顶部, 开泵循环, 钻具(管柱)内油气进入环空后, 可活动钻具(管柱), 以防止发生卡钻事故。下至油气层中部(底部)深度, 应以下至油气层内部更合适, 一般情况下入油气层的长度不要太长, 以防止井口油气显示间断对于计算的影响。

3.2 循环排量问题

开泵后应保持排量稳定, 不能过多调节。若井下情况需要排量变化, 应根据实际情况对时间进行相应的修正(如采用1/3排量时, 显示时间是全排量的3倍)。

3.3 两个时间的测量问题

开泵到见到油气显示的时间 t_2 、 t' 、 t'' 和从见到油气显示到显示段结束的时间 t_1 , 应根据油气侵浆段实际显示确定, 准确记录。一般情况下应以是否对井控安全造成影响来确定, 取油气侵浆段显示时间的中间点。

3.4 井眼容积与环空容积问题

对单一直径井眼, 因钻具(管柱)处在同一井眼、同一次下钻开泵过程, 容积变化对时间的影响具有较好的一致性, 可不考虑井径扩大问题; 对复合井眼中、上部在套管中, 不考虑扩大问题。油气侵段在井眼最下部, 井径有一定的影响, 应考虑井径扩大问题; 井下作业施工不存在该类问题。

3.5 现场应用问题

实际应用中, 应根据井眼情况首先确定各项常数, 预先代入公式计算出来。在循环时测量完两个显示时间后, 与总静止时间一起代入公式, 可方便求出油气上窜速度。

4 结论及认识

1) 采用相对时间法计算油气上窜速度, 一次下

钻就能将油气上窜速度计算出来，解决了常规计算方法存在的问题，具有广泛的适用性，是钻井和井下作业现场一种方便、准确计算油气上窜速度的方法。

2) 相对时间法计算油气上窜速度，用了时间的相对量，不涉及循环排量的具体数值，现场应用方便。对于具体的井眼，公式中只有三项时间未知量通过测量得到，其余都为常数，特别适用于现场计算。

3) 将钻具(管柱)底部下至油气层顶部进行测量计算，计算公式相对简单，应优先考虑采用。

4) 井下作业试油气中，射孔后油管内关闭而环空敞井口观察、反循环排溢流等具体工况，可采用该

原理进行计算，准确性较高。

5) 钻井和井下作业施工中，应提高对油气上窜速度计算重要性的认识，对计算方法进行认真分析并正确应用，以提高计算准确性，保证井控安全。

6) 公式推导中未考虑开泵后油气滑脱上升、气体膨胀等因素，这有待今后继续研究。

参 考 文 献

- [1] 张殿强, 李联伟. 地质录井方法与技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.

〔审稿 韩志勇〕

The Practical Method to Calculating Oil and Gas Upward Velocity

Zhang Guilin

(Petroleum Engineering Technology Administrative Department, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: This paper analyzes briefly the traditional lag time method and the volumetric method, and puts forward the limitations to them. On the basis of above analysis, this paper introduces a new method to calculate oil and gas upward velocity during drilling and workover operation according to the relative time. The two time are respectively the time of origin drilling fluid and the time of gas-invaded drilling fluid, which can be recorded by trip into the hole once. This method solves problems that normal development well does not measure the lag time and the data with traditional calculation method is not consistent and accurate. The upward velocity formula has also been deduced for equal-diameter holes and complex diameter wellbores.

Key words: drilling; borehole service; oil & gas upward flow velocity; calculation method

《石油钻探技术》2005 年主要期刊评价指标大幅提高

根据清华大学中国学术期刊(光盘版)电子杂志社中国科学文献计量评价研究中心提供的“中国学术期刊综合引证年度报告(2006)”，《石油钻探技术》2005 年度影响因子值为 0.573，与 2004 年度影响因子值(0.318)相比，提高了 0.255，提高率达到 80.2%；总被引频次由 2004 年的 325 上升到 2005 年的 587，增加了 262，增加幅度达 80.6%。

影响因子(IF, Impact Factor)是指某一年的引文统计数据中，某种期刊前两年发表的论文被引用的次数与该刊在同一时期内发表论文的数量比。它直接反映了一个期刊的内在质量，而且国际上六大检索系统(数据库)以及国内的主要引文数据库(如 CSCD)也将期刊影响因子的大小作为选刊和衡量期刊学术(技术)水平的标准。

总被引频次是指期刊自创刊以来所登载的全部论文在统计当年的统计刊源中被引用的总次数，它可以客观地说明期刊总体被使用和受重视的程度，以及在学术交流中的作用和地位。

《石油钻探技术》2005 年度影响因子和总被引频次大幅提高，说明本刊 2003~2004 年刊发论文的质量有了很大的提高，越来越受到石油工程技术人员及科研人员的重视，这为本刊的进一步发展奠定了良好的基础。

根据“中国学术期刊综合引证年度报告(2006)”，《石油钻探技术》的其他指标，如即年指标、被引期刊数、被引半衰期、基金论文比、Web 即年下载率等也有了不同程度的提高。相信，在主办单位领导、同事的关心支持下，在国内外石油工程界专家、学者的帮助下，在广大读者、作者的支持帮助下，《石油钻探技术》会取得更大的成绩，期刊质量会有更大的提高！