

◀钻井完井▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.02.012

# 非水化地层微量出水后气体钻井最小注气量理论研究

闫铁<sup>1</sup> 刘顺利<sup>2</sup> 刘国勇<sup>3</sup> 毕雪亮<sup>1</sup>

(1. 提高油气采收率教育部重点实验室(东北石油大学),黑龙江 大庆 163318;2. 大庆钻探工程公司 钻井二公司,黑龙江 大庆 163413;3. 大庆石油国际工程公司,黑龙江 大庆 163453)

**摘要:**气体钻井过程中,当钻遇水层时,地层出水容易造成岩屑聚并,影响井眼净化效果,严重时会导致施工无法正常进行,因此地层出水是限制气体钻井应用范围的最大障碍之一。当地层微量出水时,可采用增大气体注入量的方法继续钻进,而计算增加多少气体注入量是关键。前人只研究了地层大量出水条件下,地层出水量与注气量的关系。为此,在前人研究的基础上,对气体钻井过程中地层微量出水时的携岩基本规律和有关理论进行了研究,并对气体钻井过程中最小气体注入量模型进行了分析和修正,从而推导出了确定地层微量出水时气体钻井所需最小注气量的计算公式,以方便现场计算地层微量出水时所需的最小注气量,指导气体钻井安全顺利进行,以达到提高钻井速度、节约钻井成本的目的。

**关键词:**气体钻井;地层出水;井眼净化;最小注气量;数学模型

**中图分类号:**TE21    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2011)02-0065-03

## Theoretical Study of Minimum Gas Influx in Gas Drilling after Water Production from Unhydrated Formation

Yan Tie<sup>1</sup> Liu Shunli<sup>2</sup> Liu Guoyong<sup>3</sup> Bi Xueliang<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Northeast Petroleum University), Daqing, Heilongjiang, 163318, China; 2. No. 2 Drilling Company of Daqing Drilling and Exploration Engineering Company, Daqing, Heilongjiang, 163413, China; 3. DQE International, Daqing, Heilongjiang, 163453, China)

**Abstract:** In gas drilling, cuttings will accumulate due to formation water production when water layer is drilled. Borehole purification effect will be affected seriously and drilling work cannot be carried out, so formation water production restrains the application of gas drilling. When formation water production is small, increasing the amount of gas injection should be used in order to continue drilling. The key point is how to calculate gas injection volume. The relationship between formation water production and gas injection was already studied with large formation water production. Based on previous work, cutting transport and associated theory is investigated when formation water production is small. The model of minimum gas injection is analyzed and modified. The required minimal gas injection is derived when small formation water production is confirmed. This could ensure gas drilling safely and smoothly with the aim of increasing drilling speed and saving drilling cost.

**Key words:** gas drilling; formation water production; hole cleaning; minimum gas influx; mathematical model

井眼的清洁程度关系到井眼摩阻、井眼轨迹控制、钻井效率和安全钻进,甚至影响到钻井的成败。在气体钻井过程中,当钻遇水层时井底会有地层水侵入,若岩屑不能及时排除,会造成井眼净化不好,严重时会造成卡钻,导致钻井周期延长<sup>[1]</sup>。气体钻井在地层出水时的主要措施是增大注气量,蒋祖军<sup>[2]</sup>通过临界韦伯系数的卷席作用计算液膜的含水率,从而计算出了携带地层水的流量。陈北东等<sup>[3]</sup>

收稿日期:2009-06-07;改回日期:2011-01-14

基金项目:国家科技重大专项“碳酸盐岩、火成岩及酸性气藏高效安全钻完井技术”(编号:2008ZX05021-002)资助

作者简介:闫铁(1957—),男,黑龙江肇州人,1982年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,1989年获大庆石油学院油气田开发工程专业硕士学位,2001年获哈尔滨工业大学工程力学专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事石油钻井工艺技术与理论方面的教学和科研工作。

联系方式:(0459) 6503923, yant@dipi.edu.cn

研究了竖直环空气液两相流的流型及转换准则,利用气液两相流的相关理论,从垂直环空环雾流的动量方程出发,建立了计算气体携水能力的数学模型。以上这些方法只适用于地层大量出水,且计算复杂,抽象,不容易理解。为此,笔者对地层微量出水后的气体钻井最小注气量进行了分析,并根据现场经验分析,将地层出水速度小于  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$  视为微量出水,将地层视为非水化地层,即地层某深处的岩屑颗粒遇地层水不膨胀不分散(如砂岩地层)。也即岩屑吸水后质量增加,体积不变,这样计算出的最小气体注入量是岩屑质量增大、体积不变条件下的最小气体注入量。

## 1 最小气体注入量模型分析及修正

在气体钻井过程中,当环空中有水存在(地层水或气体本身非常潮湿)时,液滴碰撞岩屑会形成一层水膜包裹岩屑。大尺寸岩屑上升速度慢,小尺寸岩屑上升速度快,小尺寸岩屑追上大尺寸岩屑时,形成岩屑团,产生聚并。这种聚并在环空关节点处最易发生大颗粒减速、群聚,从而使小颗粒更容易聚并。岩屑团的形成如图1所示。

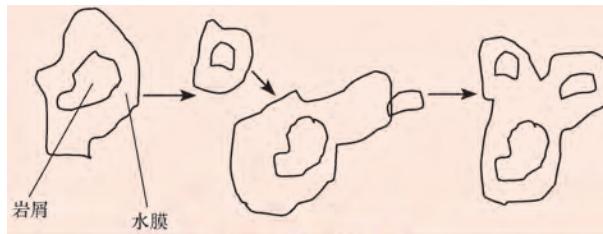


图1 岩屑团的形成

Fig.1 The formation of drilling cuttings lump

要计算地层微量出水后的最小气体注入量,首先计算携带固体颗粒所需的气体流速,该流速要不小于沉降速度和岩屑运移速度之和。以往的沉降速度计算公式没有考虑岩屑吸水后质量变大的影响,计算难免出现误差,笔者考虑地层微量出水,在岩屑吸水后质量变大的基础上建立了最小气体注入量计算模型。

### 1.1 岩屑沉降速度公式修正

岩屑的沉降速度受很多因素影响,包括颗粒的尺寸、形状和密度等,颗粒的最大尺寸可以根据钻头每旋转一周的最大进尺来计算:

$$D_s = \frac{R_p}{60N} \quad (1)$$

考虑气体和岩屑之间的相互作用,当固体颗粒被置于静止气体中时,由于受到重力作用,固体颗粒将下沉。在下沉过程中颗粒也会受到来自气体的阻力,且下沉速度越大,阻力也越大,直至最后阻力与重力平衡,固体颗粒保持匀速下沉为止,该下沉速度即为固体颗粒的临界速度<sup>[5]</sup>。岩屑沉降速度为:

$$v_{sl} = \sqrt{\frac{4D_s g(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_D}} \frac{\psi}{1 + D_s/D_H} \quad (2)$$

考虑岩屑吸水,推导岩屑吸水后的沉降速度。岩屑吸水率为吸水后的岩屑质量和干燥岩屑质量之差与干燥岩屑质量的比,其计算公式为:

$$\eta = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \quad (3)$$

岩屑质量是岩屑密度和体积的函数,假定岩屑颗粒是圆球体,则有:

$$(1 + \eta) \frac{4}{3} \pi \rho_s r^3 = \frac{4}{3} \pi \rho_0 r^3 \quad (4)$$

岩屑吸水后的密度为:

$$\rho_0 = \rho_s (1 + \eta) \quad (5)$$

地层微量出水时,考虑岩屑吸水后的沉降速度为:

$$v'_{sl} = \sqrt{\frac{4D_s g[\rho_s (1 + \eta) - \rho_g]}{3\rho_g C_D}} \frac{\psi}{1 + D_s/D_H} \quad (6)$$

式中: $D_s$  为固体颗粒的当量直径, m;  $N$  为转速, r/min;  $R_p$  为钻速, m/h;  $v_{sl}$  为岩屑沉降速度, m/s;  $v'_{sl}$  为岩屑吸水后的沉降速度, m/s;  $\rho_g$  为气体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_D$  为阻力系数, 根据颗粒形状不同而不同, 扁平颗粒(页岩和石灰岩)为 1.40, 棱角状和次圆颗粒(砂岩)为 0.85;  $\psi$  为球形度, 量纲为 1;  $m_0$ 、 $\rho_0$  分别为吸水后岩屑的质量和密度, kg/kg/m<sup>3</sup>;  $m_s$ 、 $\rho_s$  分别为干燥岩屑的质量和密度, kg/kg/m<sup>3</sup>;  $r$  为岩屑半径, m;  $\eta$  为岩屑吸水率, 岩石种类不同吸水率不同, 砂岩吸水率  $< 10\%$ , 石灰岩吸水率  $2\% \sim 6\%$ , 花岗岩吸水率  $< 1\%$ ;  $D_H$  为流道水力直径, m。

### 1.2 岩屑运移速度分析

所需携岩速度由钻头产生岩屑的速度和钻进井眼中允许的运动颗粒数决定,流道内固体颗粒的体积流量应该等于钻头产生岩屑的体积流量<sup>[5]</sup>。

岩屑运移速度为:

$$v_{rt} = \frac{\pi d_b^2}{4C_p A} \frac{R_p}{3600} \quad (7)$$

式中: $v_{rt}$ 为岩屑运移速度, m/s;  $C_p$ 为流道中固体颗粒的体积分数;  $A$ 为环空截面积,  $m^2$ ;  $d_b$ 为钻头直径, m。

### 1.3 最小气体注入量计算

分析可知,携带固体颗粒所需的气体流速为岩屑沉降速度和岩屑运移速度之和,即:

$$v_g = v'_{sl} + v_{rt} \quad (8)$$

所需钻铤顶部最小空气体积流量为:

$$Q_g = A v_g \quad (9)$$

根据气体状态方程计算标准状况下的最小气体体积流量,其公式为<sup>[4]</sup>:

$$Q_{g0} = \frac{520 Q_g p}{14.7 \times 144 t} \quad (10)$$

式中: $Q_g$ 为钻铤顶部的最小空气体积流量,  $m^3/s$ ;  $v_g$ 为气体流速,  $m/s$ ;  $Q_{g0}$ 为标准条件下的最小气体体积流量,  $m^3/s$ ;  $t$ 为井底温度,  $^{\circ}C$ ;  $p$ 为井底压力, Pa。

## 2 实例计算

某井采用气体钻井技术钻进,用 $\phi 200.0$  mm钻头钻至井深2 743.2 m的砂岩层,钻速18.288 m/h,转速50 r/min,钻柱外径11.43 cm,井底压力0.55 MPa,井底温度114  $^{\circ}C$ ,球形度为1,干砂岩的相对密度为2.6,砂岩吸水率为8%。分别求无地层水侵入和地层微量出水时的最小气体注入量,结果见表1。

表1 最小气体注入量计算

Table 1 The calculation of minimum injection rate

条件	最终沉降速度/ 携岩气体速度/ $m \cdot s^{-1}$	最小气体注入 量/ $m^3 \cdot min^{-1}$
无地层水侵入	6.39	5.58
地层微量出水	6.64	6.83
		38.75
		40.22

从表1可以看出,地层微量出水时最小气体注入量比无地层水侵入时的最小气体注入量增加1.47  $m^3/min$ 。

以上计算公式是在非水化地层微量出水的基础上建立的,若地层大量出水,注气量也要相应地增大,但注气量不能无限制地增大,注气量过大不但易造成井壁坍塌,而且需要更多的设备,不经济。地层大量出水应该采用雾化钻井或不稳定泡沫钻井。雾化液特有的起泡、吸附、润湿反转等作用,将钻屑团和粘附于井壁上的钻屑分离开来,防止液滴聚集、钻屑堆积现象发生。不稳定泡沫钻井就是在雾化液中

加入表面活性剂,降低地层水的表面张力,有利于增强环空气体的携水能力<sup>[5-6]</sup>。

## 3 结论与建议

1) 地层微量出水后气体钻井携岩规律有所变化,考虑岩屑吸水的影响,建立了最小气体体积注入量模型,方便现场应用。

2) 应根据井底地层水侵入情况及时改变注气量,若井底大量出水应转换钻井方式(如雾化钻井和不稳定泡沫钻井),以安全顺利地完成钻井作业。

3) 建议通过现场试验来进一步验证所建模型计算结果的准确性。

## 参 考 文 献

- [1] 杨晓莉,刘素君,樊晓萍.大位移井井眼净化的理论与方法[J].钻采工艺,2005,28(6):24-26.  
Yang Xiaoli, Liu Sujun, Fan Xiaoping. Theory and method for the bore-cleaning problem of reach-extended well[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(6): 24-26.
- [2] 蒋祖军.地层出水后的气体钻井携岩携水机理研究[J].钻采工艺,2008,31(1):12-14.  
Jiang Zujun. Research on the mechanism for carrying debris and water about gas drilling on condition of formation water output [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 12-14.
- [3] 陈北东,廖开贵,刘永辉,等.气井环空携水能力定量研究[J].石油钻采工艺,2007,29(4):97-99.  
Chen Beidong, Liao Kaigui, Liu Yonghui, et al. Quantitative study on the capability of liquid carrying flow rate for gas wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(4): 97-99.
- [4] 赵业荣,孟英峰,雷桐,等.气体钻井理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2007:72-73.  
Zhao Yerong, Meng Yingfeng, Lei Tong, et al. The theory and practice of gas drilling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:72-73.
- [5] Guo B, Ghalambor A. 欠平衡钻井气体体积流量的计算[M].胥思平,译.北京:中国石化出版社,2006:13-19.  
Guo B, Ghalambor A. Gas volumetric requirements for underbalanced drilling [M]. Translator: Xu Siping. Beijing: China Petrochemical Press, 2006:13-19.
- [6] 王文刚,王萍,杨景利.充气泡沫钻井液在元坝地区陆相地层的应用[J].石油钻探技术,2010,38(4):45-48.  
Wang Wengang, Wang Ping, Yang Jingli. Application of aerated drilling fluid in terrestrial formation in Yuanba Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 45-48.