

# 空气钻井最小流量计算方法<sup>\*</sup>

毕雪亮<sup>1</sup> 陶丽杰<sup>1</sup> 翟洪军<sup>2</sup> 高立军<sup>2</sup>

(1.“提高油气采收率”教育部重点实验室·大庆石油学院 2.中国石油大庆钻井工程技术研究院)

毕雪亮等.空气钻井最小流量计算方法.天然气工业,2008,28(5):63-64.

**摘要** 应用气体状态方程、热力学定律对空气钻井中各个流动参数进行分析,重点讨论储层流体涌入时空气钻井过程中最小空气流量的确定,以及立管注入压力和钻头喷嘴压力等问题。建立了钻头上喷嘴压力的计算模型,根据所建立的模型编制计算软件,可以较准确地计算管柱内压力以及空气钻井需要的最小流量,同时该模型还考虑了储层流体的涌入。结合现场实践,对该模型进行了分析修正,以期达到指导现场实际空气钻井施工的目的。

**关键词** 空气钻井 空气流量 压力 流动参数 数学模型

空气钻井技术是在20世纪50年代引进的。尽管最初的空气钻井比较原始,但是此项技术能够提高钻速。从经济的角度来考虑,空气钻井目前在钻井领域占主要地位,而对空气钻井流动参数的计算是空气钻井的理论依据。只有对空气钻井各个流动参数有了很清楚的认识,才能很好地应用此项技术。笔者建立了一套符合钻井实际的模型,并且在此模型的基础上编制软件,方便现场施工需要。

## 一、最小流量的确定

由气体状态方程以及热力学定律推导出气体钻井需要的最小流量<sup>[1]</sup>见式(1):

$$\frac{1.178 \times 10^{10} S_g T Q_{g \min}}{v_{g0}^2 A^2} = \sqrt{\left( p_s^2 + \frac{ab}{a-G} T_s^2 \right) \left( \frac{T}{T_s} \right)^{\frac{2\sigma}{G}} - \frac{ab}{a-G} T^2} \quad (1)$$

其中参数  $a$  和  $b$  由下式确定:

$$a = \frac{S_g Q_{g \min} + 1.744 \times 10^{-4} d_b^2 S_s R_p + 800(S_s Q_s + S_l Q_l)}{R Q_{g \min}} \quad (2)$$

$$b = \frac{6.125 \times 10^{13} f Q_{g \min}^2}{g A^2 d_H} \quad (3)$$

式中:  $T$  为井筒某处温度, K;  $T_s$  为地表温度, K;  $G$  为地温梯度, K/m;  $S_g$  为气体相对于空气的密度, 无量纲;  $S_s$  为岩石相对密度, 无量纲;  $Q_{g \min}$  为最小流量,

L/s;  $v_{g0}$  为标准状态下需要的最小返速, m/s;  $R_p$  为钻速, m/h;  $R$  为气体常数, 8.314 J/(mol·K);  $S_s$  为雾化流体相对于水的密度, 无量纲;  $S_l$  为储层流体相对于水的密度, 无量纲;  $d_b$  为钻头直径, mm;  $d_H$  为流道的直径, mm;  $f$  为莫氏摩擦系数, 无量纲;  $A$  为套管横截面积, mm<sup>2</sup>;  $p_s$  为地表压力, Pa;  $Q_s$  为雾化流体的流量, L/s;  $Q_l$  为储层流体的流量, L/s。

因此最小流量可以通过式(1)迭代得出。

## 二、井底压力的确定

井底压力由下式来确定:

$$p = \sqrt{\left( p_s^2 + \frac{ab}{a-G} T_s^2 \right) \left( \frac{T}{T_s} \right)^{\frac{2\sigma}{G}} - \frac{ab}{a-G} T^2} \quad (4)$$

## 三、喷嘴处压力的确定

如果钻头喷嘴处上游压力与下游压力比大于标准压力比, 那么喷嘴处的流动就是亚声速流。通常认为在空气钻井中钻头流体处于亚声速流<sup>[2-3]</sup>。气体通过喷嘴可以表达为:

$$Q_{g0} = 0.013 C A_n p_{np} \sqrt{\frac{k}{(k-1) S_g T_{ln}} \left[ \left( \frac{p_{ln}}{p_{np}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{ln}}{p_{np}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5)$$

式中:  $C$  为流量系数, 对于喷嘴近似为 1.0, 对于钻头孔口近似为 0.6;  $A_n$  为钻头喷嘴总面积, mm<sup>2</sup>;  $p_{np}$  为

\* 本文受到黑龙江省教育厅科研项目(编号:1151HQ007)的资助。

**作者简介:** 毕雪亮, 1971年生, 副教授, 硕士生导师, 国际石油工程学会会员; 从事石油钻井工艺技术理论教学和科研工作。地址: (163318) 黑龙江省大庆市大庆石油学院石油工程学院。电话: (0459) 6500886。E-mail: bixl@163.com

钻头喷嘴上游压力, Pa;  $p_{dn}$  为钻头喷嘴下游压力, Pa;  $T_{dn}$  为钻头喷嘴温度, K;  $Q_{g0}$  为标准条件下气体流量, L/s;  $k$  为气体比热容, 无量纲。

进行校正。减少运算次数, 加大迭代步长, 这样不仅可以提高运算速度, 还能减少舍入误差的积累。并且以计算值为横坐标作散点图进行回归分析, 校正公式系数。修正后的计算值及误差对比见表 2。

#### 四、空气钻井需要的最小空气流量以及井底压力软件编制

通过上面的模型编制最小空气流量计算软件。此软件系统是以 Delphi 和 Windows 为操作平台编写, 输入井身结构数据和相应的储层、地表数据就可以计算空气钻井需要的最小空气流量, 并且可以计算对应井深的注入压力。根据计算模型计算的结果, 其参数为: 井深 3 555.6 m; 钻铤 241.2 m (内径 71.4 mm、外径 159 mm); 钻杆 3 314.1 m (内径 108.6 mm、外径 127 mm); 套管 2 840 m (内径 244.5 mm); 钻头 0.3 m (外径 215.9 mm); 喷嘴 (外径 33 mm)。

根据所输入的数据, 利用软件计算出压力, 并且根据实测值与计算值进行误差分析, 其结果见表 1。

表 1 计算结果与实测结果表

井深 (m)	计算压力 (MPa)	实测压力 (MPa)	相对误差
3 314.26	2.550	2.000	0.275
3 555.60	3.379	2.150	0.578
3 555.30	4.452	2.160	1.061
3 314.04	4.129	2.000	1.065

从对比结果中可以看出, 计算的压力值比实测值偏大, 其原因可能由以下几点:

(1) 由于气体是可压缩性的流体, 井下密度会比地面密度稍大, 所以用地面密度计算出来的数据会比实测结果偏大。

(2) 压力是用迭代的方法求得的, 每一次结果都是以上面计算的压力为根据, 程序中设计的计算步长太小, 运算次数较多, 这样中间过程的舍入误差累计越大。这样造成计算的压力值比实测结果偏大。

根据以上原因进行分析, 采取以下措施对模型

表 2 误差分析表

井深 (m)	计算压力 (MPa)	实测压力 (MPa)	相对误差
3 314.26	2.312	2.000	0.156
3 555.60	2.584	2.150	0.202
3 555.30	2.842	2.160	0.315
3 314.04	2.165	2.000	0.083

#### 五、结 论

(1) 如果流量计算过大, 那么就会增加设备负担, 相反如果流量过小, 就不会有效携带岩屑。笔者给出了计算空气钻井最小流量的具体计算步骤, 模型解决了流量计算的准确性问题。

(2) 利用气体状态方程以及热力学定律推导出了钻头上喷嘴压力的计算公式, 应用此公式计算的结果符合现场实际要求。

(3) 根据文中的模型编制计算软件, 可以比较准确地计算管柱内压力以及空气钻井需要的最小流量, 同时此软件还考虑了储层流体的涌入。具有工程使用价值, 为进一步开展空气钻井提供了有效的帮助。

#### 参 考 文 献

[1] LYONS W C, GUO B, SEIDEL F A. Air and gas drilling manual [M]. United States of America: McGraw-Hill Book Company, 2001.

[2] 刘刚, 朱忠喜, 张迎进, 等. 空气钻井中的压力及注气量问题研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(2): 4-6.

[3] BOYUN GUO, ALI GHALAMBOE. Gas volume requirements for underbalanced drilling [M]. United States of America: Penn Well Corporation, 2002.

(收稿日期 2007-09-17 编辑 钟水清)