

# 气体钻井注气模型优选及设备优化配置分析

杨毅<sup>1</sup>, 齐彬<sup>2</sup>, 马晓伟<sup>1</sup>

(1. 大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413; 2. 大庆油田有限责任公司天然气分公司油气加工九大队, 黑龙江 大庆 163413)

**摘要:** 计算气体钻井注气排量的方法主要有最小动能法和最小速度法。通过对这两种方法的分析, 优选出最小动能法并对 8 1/2 in 井眼不同井深所需注气量进行计算, 同时对影响气体钻井设备配置因素进行分析, 最终得出不同条件下气体钻井设备优化配置, 为气体钻井经济化施工提供科学依据。

**关键词:** 气体钻井; 注气排量; 最小动能; 最小速度; 设备配置

**中图分类号:** TE242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)07-0053-04

**Optimization of Injection Model for Gas Drilling and Optimal Configuration of the Equipment/YANG Yi<sup>1</sup>, QI Bin<sup>2</sup>, MA Xiao-wei<sup>1</sup>** (1. Daqing Drilling Engineering and Technology Research Institute, Daqing Heilongjiang 163413, China; 2. No. 9 Brigade of Gas Processing, Oil and Gas Branch, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang 163413, China)

**Abstract:** The calculation of gas injection displacement of air drilling methods is mainly by the minimum kinetic energy and the minimum rate law; the paper analyzes these 2 methods, the minimum kinetic energy method was optimized and the injection volume requirement for the hole of 8 1/2 in with different depth were calculated. Analysis was made on the factors affected the gas drilling equipment configuration, and the configurations under different condition were finally determined, which could be the scientific basis for economic construction of gas drilling.

**Key words:** gas drilling; injection displacement; the minimum kinetic energy; the minimum speed; equipment configuration

在气体钻井施工中保持充足的注气量对钻井的成功至关重要。低的气体流量经常会导致携岩能力的不足和卡钻的发生, 而高的气体流量则需要更多的气体钻井设备, 柴油消耗及设备磨损就越大, 使气体钻井变得不经济, 并且会使井眼冲蚀进一步扩大。通过本文研究, 给出了在保证气体钻井安全携岩的前提下最优化、最经济的设备配置, 以减少气体钻井成本的投入。

## 1 计算模型分析及优选

### 1.1 最小动能法

#### 1.1.1 模型来源<sup>[1]</sup>

这一标准是根据空气采矿钻井长期实践得来的。通常认为井眼中有效携带固体颗粒所需的标况下(1个大气压, 20℃)最小单位体积动能为流速 15.25 m/s 时的对应动能为 142.34 J/m<sup>3</sup>。

#### 1.1.2 模型假设条件

(1) 假设气体和岩屑是具有同一密度和流速的流体;

(2) 最小携岩动能为 142.34 J/m<sup>3</sup>。

### 1.1.3 模型推导

携岩流速为 15.25 m/s 的空气中的携岩能力可以用单位体积的空气动能  $E_0$  来评价。

$$E_0 = \frac{1}{2} \gamma_{g0} v_{g0}^2 = \frac{1}{2} \times 1.22 \times 15.25^2 = 142.34 \text{ J/m}^3 \quad (1)$$

式中:  $\gamma_{g0}$  ——标准条件下空气的密度, 1.22 kg/m<sup>3</sup>;  $v_{g0}$  ——标准条件下气体最小携岩流速, 15.25 m/s。

142.34 J/m<sup>3</sup> 这个数值就是携带固体颗粒所需的最小单位体积动能。如果流体的携岩能力与标准空气的携岩能力相当, 就一定满足下式:

$$\frac{1}{2} \gamma_g v_g^2 = \frac{1}{2} \gamma_{g0} v_{g0}^2 \quad (2)$$

式中:  $\gamma_g$  ——井底处气体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v_g$  ——气体流速, m/s。

根据理想气体状态方程, 公式(2)中的气体的密度可以表示为:

$$\gamma_g = \frac{PS_g}{RT} \quad (3)$$

式中:  $P$  ——井底压力, Pa;  $T$  ——井底温度, K;  $R$

收稿日期: 2011-01-04; 修回日期: 2011-05-05

作者简介: 杨毅(1984-), 男(汉族), 陕西延安人, 大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院助理工程师, 石油工程专业, 从事欠平衡钻井、气体钻井科研和现场服务工作, 黑龙江省大庆市红岗区八百垅, yangyi008@cnpc.com.cn。

——通用气体常数,  $R = 8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$ ;  $S_g$

——气体相对空气的密度,  $S_g = 1.0$ 。

井底所需空气排量  $Q_g$  可表示为:

$$Q_g = \frac{1.01325 \times 10^5 T Q_{g0}}{288.7 P} \quad (4)$$

式中:  $Q_{g0}$  ——标准状况下气体的体积流量,  $\text{m}^3/\text{min}$ 。

#### 1.1.4 模型特点

由经验数据得出最小携岩动能,忽略了气体和岩屑之间的相互作用,使最小注气排量计算更加简单。

### 1.2 最小速度法

#### 1.2.1 模型来源<sup>[2]</sup>

该模型考虑了固体颗粒与岩屑之间的相互作用,即岩屑的速度与气体的速度不是同一速度。通过相对速度理论推导出岩屑上返速度,从而建立计算模型。当把固体颗粒放入静止的低粘度流体中时,由于重力作用颗粒开始时先加速运动,接着由于流体的阻力不断增加,颗粒转换为减速运动。颗粒的运动达到恒定时的速度,也被称为最终速度,自由沉降速度和下滑速度。

#### 1.2.2 模型假设条件

- (1) 岩屑颗粒的形状为规则体;
- (2) 岩屑颗粒的大小。

#### 1.2.3 模型推导

根据相对速度理论,携带固体颗粒所需的气体流速  $v_g$  可以表示为:

$$v_g = v_{st} + v_{tr} \quad (5)$$

式中:  $v_{st}$  ——岩屑最终沉降速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_{tr}$  ——岩屑运移速度,  $\text{m/s}$ 。

假定颗粒是圆形的, Boyum Guo 等提出了下列公式来确定最终沉降速度  $v_{st}$ <sup>[3]</sup>:

$$v_{st} = \sqrt{\frac{4gD_s(\gamma_s - \gamma_g)}{3\gamma_g C_D}} \cdot \frac{\psi}{1 + D_s/D_H} \quad (6)$$

式中:  $D_s$  ——固体颗粒的当量直径,  $\text{m}$ ;  $\gamma_s$  ——固体颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_D$  ——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, 棱角状或次圆颗粒(砂岩)为 0.85;  $\psi$  ——球形度, 无量纲;  $D_H$  ——流道水力直径,  $\text{m}$ 。

所需的携岩速度由钻头产生岩屑的速度和钻进中井眼允许的运动颗粒数决定。钻头产生的岩屑的体积流量  $Q_p$  可表示为:

$$Q_p = \frac{\pi}{4} \times 60 D_H^2 R_p \quad (7)$$

式中:  $R_p$  ——机械钻速,  $\text{m}/\text{h}$ 。

流道中携带岩屑的体积流量  $Q_{tr}$  可表示为:

$$Q_{tr} = 60 v_{tr} C_p A \quad (8)$$

式中:  $C_p$  ——流道中固体颗粒的体积分数;  $A$  ——流道截面积,  $\text{m}^2$ 。

根据固体颗粒的物质平衡原理,流道内固体颗粒的体积流量应该等于钻头产生的体积流量,即:

$$Q_{tr} = Q_p \quad (9)$$

把公式(8)、(9)代入公式(10)从而推出  $v_{tr}$ :

$$v_{tr} = \frac{\pi D_H^2}{4 C_p A} \cdot R_p \quad (10)$$

井底所需气体流量  $Q_g$ :

$$Q_g = v_g A \quad (11)$$

#### 1.2.4 模型特点

该模型虽然考虑了岩屑与气体之间的相互作用,但是岩屑的最终速度受许多因素的影响,其中包括颗粒尺寸、形状,颗粒的密度和粘度,流体模式,颗粒间的相互作用和颗粒与器壁间的相互作用等,而这些因素在气体钻井过程中是很难被监测到的,从一定程度上说,限制了最小速度标准的进一步应用<sup>[4]</sup>。

### 1.3 模型优选

最小动能标准和最小速度标准在国内外气体钻井中都得到了应用。以井深 3000 m、井眼直径 230 mm、机械钻速 10 m/h 为例,根据现场经验,岩屑直径取 6~8 mm,分别用最小动能标准和最小速度标准计算最小注气排量,计算结果见表 1,最小动能标准和最小速度标准计算的最小注气排量基本一样。同时由于最小速度标准考虑的因素比较多,特别是对一些未知因素的假设(岩屑颗粒大小和形状),计算起来过于复杂,不如最小动能标准计算过程简单,所以优选最小动能标准用于气体钻井最小注气排量的计算。

表 1 最小动能标准和最小速度标准计算结果对比

最小动能标准	69.13 $\text{m}^3/\text{min}$	
最小速度标准	岩屑直径/mm	所需最小注气排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
	6	68.06
	7	71.57
	8	73.82

### 1.4 模型验证

徐深 28 井气体钻井井段 3220~3921 m,其中空气钻井井段 3220~3879.8 m,机械钻速 10.31 m/h,氮气钻井井段 3879.8~3921 m,机械钻速 9.43 m/h。钻进过程中,返屑正常,注压稳定,地层未出水、出气,无井下复杂情况发生。

利用最小动能标准对徐深 28 井气体钻井井段所需气量进行计算,计算结果见图 1。理论计算值与实际值误差 <3%。

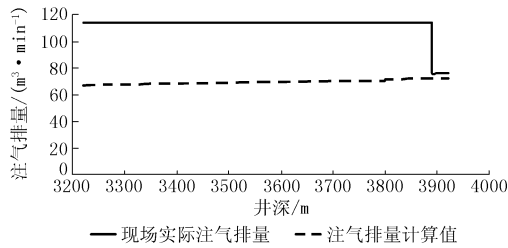


图 1 徐深 28 井理论注气排量与实际注气排量对比

## 2 气体钻井设备优化配置分析

气体钻井现场设备的配置主要考虑气体的携岩能力及经济性,为对气体钻井进行最优化设备配置,首先要对现有空气压缩机排量影响因素进行分析,再根据最小动能标准依据不同井深气体钻井最小注气排量,进行设备优化配置。

### 2.1 影响空压机排量的自身因素分析

以 SULLAIR1500/350HP 型螺杆式空气压缩机为例,影响排气量的参数包括螺杆直径、螺杆长度和柴油机转速。在螺杆直径及长度一定的情况下,影响排量的参数只有柴油机的转速。SULLAIR1500/350HP 型空压机排量与柴油机转速关系见表 2。

表 2 SULLAIR1500/350HP 型空压机排量与柴油机转速关系表

柴油机转速 /(r·min <sup>-1</sup> )	排量 /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	排气压力 /MPa
1400	28.53	2.4
1500	30.59	2.4
1600	32.65	2.4
1700	34.72	2.4
1800	36.79	2.4
1900	38.85	2.4
2000	40.92	2.4
2100	43.02	2.4

目前,气体钻井现场为了更好地保护及使用空压机,柴油机转速调至 1800 r/min,此时对应的空压机排量是 36.79 m<sup>3</sup>/min,考虑效率问题(效率按 95% 计算),SULLAIR1500/350HP 型排量是 36.79 × 95% = 34.95 m<sup>3</sup>/min。

### 2.2 影响空压机标况下排量的外界因素分析

最小动能标准计算出的最小注气排量是标况下对应的排量,为了进行优化设备配置,也需要把设备的排量转化成标况下的排量。这就需要考虑海拔、环境温度及湿度的影响<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.1 海拔因素

随着海拔的增加,气体变得稀薄,压力减小,见表 3。

表 3 海拔与大气压关系对照表

海拔/m	大气压/kPa	海拔/m	大气压/kPa
0	101.33	1829	81.06
610	94.24	2438	74.98
1219	87.14	3048	68.90

利用气体状态方程,按照空压机排量 34.95 m<sup>3</sup>/min 计算,海拔每升高 500 m,大气压大约降低 5.07 kPa,标况下空压机排量大约降低 2 m<sup>3</sup>/min。

#### 2.2.2 环境温度因素<sup>[6]</sup>

利用气体状态方程计算,在同一海拔处,环境温度每升高 10 ℃,标况下空压机排量大约降低 1.4 m<sup>3</sup>/min。

#### 2.2.3 环境湿度因素

在同样的温度和压力下,水蒸气的密度小于空气的密度,因此,湿空气的密度小于干空气的密度,相同体积下湿空气的质量小于干空气的质量。根据 Miska 提供的湿度校正公式<sup>[3]</sup>:

$$P_w = 6895 \times 10^{6.39416 - \frac{1750.286}{234.99 + 0.999t}} \quad (12)$$

$$Q_h = \frac{P_a}{P_a - f_w \varphi P_w} \cdot Q_a \quad (13)$$

式中:Q<sub>h</sub>——湿气体的体积流量,m<sup>3</sup>/min;P<sub>a</sub>——现场实际大气压力,MPa;f<sub>w</sub>——除水效率,分数;φ——相对湿度,分数;P<sub>w</sub>——水蒸气饱和压力,MPa;t——温度,℃。

在其它条件不变的情况下,根据公式计算出湿度每增加 10%,标况下空压机排量大约降低 0.005 m<sup>3</sup>/min。

结合大庆气体钻井实际井场环境,可以不用考虑海拔对排量的影响,由于湿度对排量影响比较小,可以忽略。综合考虑,只有环境温度对排量影响比较大。

根据以上分析,给出了 SULLAIR1500/350HP 型空压机标况下排量与环境温度之间的关系(见表 4)。

表 4 SULLAIR1500/350HP 型空压机环境温度与标况下的排量对照表

环境温度 /℃	标况下注气量 /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	环境温度 /℃	标况下注气量 /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
-20	40.48	10	36.18
-15	39.69	15	35.56
-10	38.94	20	34.95
-5	38.21	25	34.36
0	37.51	30	33.80

### 2.3 不同井深处最小注气排量

根据大庆气体钻井实际:  $\varnothing 215.9$  mm 井眼, 平均机械钻速 10 m/h, 井眼扩大率 10%, 地温梯度 3  $^{\circ}\text{C}/100$  m, 使用最小动能法计算, 计算结果见表 5。

表 5 不同井深需要最小注气排量对照表

井深 /m	标况下所需最小排量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	井深 /m	标况下所需最小排量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )
3000	69.1	4200	82.6
3400	73.5	4600	86.3
3800	77.9	5000	90.1

### 2.4 气体钻井设备合理化配置

根据不同井深计算出最小注气排量和环境温度与设备标况下的排量进行设备配置, 另外考虑到设备正常的维修保养, 额外增加一台空压机备用, 配置见表 6。

## 3 结论与认识

(1) 最小动能法和最小速度法均可以用来计算最小注气排量, 但最小动能法计算简单方便。应用表明: 最小动能法计算最小注气排量值与实际值误差小于 3%, 用此方法计算的最小注气排量可以指导现场作业施工。

(2) 气体钻井设备配置时, 除考虑工程参数外,

(上接第 31 页)

官能团种类与数量多少有密切关系。线性的分子链结构对温度的敏感性要低于环形的敏感性, 多官能团离子型的高聚物比单官能团离子型高聚物的温度敏感性要低, 离子型和非离子型共存的高聚物比非离子型高聚物的温度敏感性要低。

(3) 在试验条件下, 各处理剂的耐低温能力的顺序为 PAC - 141 < PHPA < PAM < Na - CMC < KHm。

### 参考文献:

- [1] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases (second edit) [M]. New York: MarcelDekker Inc, 1998. 1 - 628.
- [2] 许红, 黄君权, 夏斌. 最新国际天然气水合物研究现状及资源潜力评估[J]. 天然气工业, 2005, 25 (6): 18 - 23.
- [3] 康志勤, 赵建忠, 赵阳升. 冻土带天然气水合物稳定性研究

表 6 不同井深空气钻井设备配置表

井深/m	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	设备配置/台
3000	-20 ~ 25	3
	25 ~ 40	4
3500	-20 ~ 0	3
	0 ~ 4	4
4000	-20	3
	-15 ~ 40	4
4500	-20 ~ 40	4
5000	-20 ~ 40	4

还应考虑环境因素影响, 在环境因素中, 温度影响最大。

### 参考文献:

- [1] William C. Lyons, Boyun Guo, Frank A. Seidel. 空气和气体钻井手册[M]. 曾义全, 樊洪海, 译. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [2] 毕雪亮, 陶丽杰, 翟洪军, 等. 空气钻井最小流量计算方法[J]. 天然气工业, 2008, 28(5): 63 - 64.
- [3] Boyun Guo, Ali Ghalambor. 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.
- [4] 柳贡慧, 刘伟. 计算空气-氮气钻井最小气体体积流量的新方法[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 629 - 632.
- [5] 李士斌, 陈晓华, 唐玉龙, 等. 空气钻井最小注气量的计算及其影响参数[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(22): 6635 - 6637.
- [6] 王存新, 孟英峰, 姜伟, 等. 气体钻井中井眼温度变化及其对注气量的影响[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 67 - 69.
- [7] 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25 (2): 290 - 291.
- [4] 冯哲. 抗低温钻井液性能的试验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2008.
- [5] 汤凤林, 等. 俄罗斯南极冰上钻探技术[J]. 地质科技情报, 1999, (6).
- [6] 天津大学, 华东石油学院. 有机化学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978. 169 - 169.
- [7] 曹婧. 低温条件下醇类水溶液黏性变化实验研究[J]. 石油规划设计, 2005, 16 (2): 20 - 22.
- [8] 鄢捷年, 黄林基. 钻井液优化设计与实用技术[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 1993. 75.
- [9] 张凌, 蒋国盛, 蔡记华, 等. 低温地层钻进特点及其钻井液技术现状综述[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 69 - 72.
- [10] 汤凤林, 蒋国盛. 生产条件下冻结岩石钻进的试验研究——冻土钻探专题之三[J]. 探矿工程, 2002, (3): 28 - 38.
- [11] 展嘉佳. 不分散低固相聚合物钻井泥浆抗低温试验研究及地表冷却系统设计[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2009.
- [12] 张红红, 徐会文, 冯哲. 聚合物钻井液防塌机理的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(1): 44 - 46, 61.