

文章编号: 1673-5005(2010)04-0067-03

# 声速流对钻头温度和压力的影响

沈忠厚, 王海柱, 李根生

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 气体钻井过程中, 喷嘴处容易产生声速流, 且在声速流条件下, 伴随着压力间断和喷嘴低温, 会导致钻头“冰包”, 环空压力急剧上升而立管却无法检测的现象, 容易造成地面及井下事故。以超临界 CO<sub>2</sub> 气体钻井为例对钻头渐缩喷嘴压力、温度、流速变化对声速流的影响进行研究。结果表明: 气体从喷嘴喷出后, 压力急剧降低, 体积快速膨胀, 产生焦耳-汤姆逊效应, 使得喷嘴出口温度急剧降低, 降低幅度取决于气体性质以及上下游压力比; 在进行气体钻井设计时, 尤其是需要高压、大排量喷射钻井时, 首先要估算井底压力范围, 再计算喷嘴上游临界压力, 确定钻头上游安全压力带作为水力参数设计的参考标准, 控制好井底与钻头上游之间的压力关系, 避免声速流的发生。

**关键词:** 钻井; 声速流; 喷嘴; 温度; 压力; 二氧化碳

中图分类号: TE 242.6 文献标志码: A doi 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.04.012

## Influence of sonic flow on temperature and pressure of bit

SHEN Zhong-hou, WANG Hai-zhu, LI Gen-sheng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract** The sonic flow occurred easily at the bit nozzles during gas drilling meanwhile, the pressure discontinuity and low-temperature at the nozzle result in ice-balling of bit which will further cause the pressure gauge failure on the stand pipe with the annular pressure increasing rapidly, and the accidents will happen easily on the ground and downhole. The effects of pressure, temperature and velocity variation of the bit nozzles on sonic flow were investigated taking supercritical CO<sub>2</sub> gas drilling as an example. The results show that when the supercritical CO<sub>2</sub> jets out from the bit nozzles, the pressure drops rapidly and the volume expands suddenly. At the same time, Joule-Thomson effect occurs which results in the temperature of nozzle outlet drops suddenly and the decrease range of temperature depends on the gas properties and the pressure ratio between upstream and downstream. In the gas drilling design with high jetting pressure and large flow rate, first estimate the downhole pressure and then calculate the nozzle critical pressure of upstream and provide the secure pressure zone for the bit of upstream which can be regarded as reference standard for hydraulic parameters design. Controlling the pressure relation between the upstream of bit and the bottom hole can avoid sonic flow in the nozzles.

**Key words** oil well drills; sonic flow; nozzle; temperature; pressure; CO<sub>2</sub>

由于空气、气体、雾化和不稳定泡沫钻井中气体的体积分数一般在 97% 以上, 因此在计算过程中这一类型的钻井流体可以作为纯气体来处理<sup>[1-2]</sup>。通常钻头的水眼里装有喷嘴, 喷嘴尺寸较小, 当其上下游压差达到一定值时, 会产生喷嘴声速流。声速流条件下钻井液温度急剧下降, 导致钻头冰包、井壁结冰、环空截面积减小, 由于井底压力无法通过钻头喷嘴传递到地面, 而这时地面泵组正常工作且持续向

井筒注入气体, 致使环空压力急剧上升, 造成井漏, 严重时将导致地层破裂等恶性事故。通常在空气、气体、雾化和不稳定泡沫钻井过程中, 钻井流体主要用来清洗井底、携带岩屑以及平衡井底压力, 钻头压降及喷射压力均较小, 一般不会产生声速或超声速流。对于超临界 CO<sub>2</sub> 钻井来说, 超临界 CO<sub>2</sub> 钻井液又多了一项新的功能——喷射破岩, 因此所需喷射压力较高, 容易产生声速或超声速流, 喷嘴压降以及

收稿日期: 2010-05-28

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2010CB226704)

作者简介: 沈忠厚(1928-), 男(汉族), 四川大竹人, 中国工程院院士, 博士生导师, 从事石油钻井和水射流技术研究。

钻头温差均较大。因此,有必要对喷嘴声速流进行深入研究,掌握喷嘴流动规律,避免声速流的发生。

### 1 喷嘴声速流

声波和压力波都是机械波,当喷嘴流速达到声速在流体中传播的速度时,产生喷嘴声速流。对于不可压缩流体定常流动,速度随着流体截面积的变化反向变化,而对于可压缩流体这种现象不会出现,因为密度的变化会影响速度的改变,而且当截面积发生变化时,可压缩流体的速度变化取决于流体是亚声速 ( $Ma < 1$ ,  $Ma$  为马赫数) 还是超声速 ( $Ma > 1$ )。钻井过程中,钻杆截面积较大,钻杆中流体流速达不到超声速,因此只有通过截面积较小的钻头喷嘴时才可能达到超声速,从喷嘴到井底的这一流动过程可以视为渐缩喷嘴流动。由于喷嘴处流速较高、喷嘴较短,摩阻损失和热传导(热损失,耗散)可以忽略不计,流动过程视为等熵流动<sup>[3]</sup>,故有

$$\frac{dv}{v} = \frac{1}{Ma^2 - 1} \frac{dA}{A} \tag{1}$$

式中,  $dv$  为喷嘴上下游速度差,  $m/s$ ;  $v$  为喷嘴上游速度,  $m/s$ ;  $dA$  为喷嘴上下游截面积差,  $m^2$ ;  $A$  为喷嘴上游截面积,  $m^2$ 。

对于一维恒定可压缩流体、渐缩喷嘴:亚声速流 ( $Ma < 1$ ) 满足  $dA/A < 0$   $dv/v > 0$  (截面积减小速度增大); 超声速流 ( $Ma > 1$ ) 满足  $dA/A < 0$   $dv/v < 0$  (截面积减小速度减小)。

在声速或超声速流动下,由于流体流动方向和喷嘴下游压力波向上传播方向相反,因此压力波不能从喷嘴下游传递到喷嘴上游,这样在喷嘴处产生压力间断,导致井底压力与钻杆中压力不连续。由于喷嘴处压力间断的存在,导致立管压力表不能检测到井底岩屑堆积或泥饼环增厚造成的异常高压,很容易出现井下事故,因此在气体钻井过程中要尽量避免声速或超声速流动发生。

### 2 喷嘴压降和温度计算

对于钻头喷嘴压降,没有适合所有钻井流体的普适计算方程,可以在文献中查得多种喷嘴出流计算模型,计算模型取决于流体类型以及流动类型。

#### 2.1 声速流动

声速流动的存在与否取决于喷嘴下游与上游压力比,如果这个比值小于临界压力比就会产生声速或超声速流动。喷嘴临界压力比为

$$\left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)_c = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{2}$$

式中,  $p_{up}$  和  $p_{dn}$  分别为喷嘴上、下游压力,  $MPa$ ;  $k$  为气体等熵指数。

气体的等熵指数也就是比热容比 ( $c_p/c_v$ )。由式(2)可以计算出不同气体的临界压力比,声速流条件下钻头水眼质量流量为

$$q_m = A \sqrt{p_{up} \rho_{up} k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \tag{3}$$

或

$$q_m = \frac{A p_{up}}{\sqrt{T_{up}}} \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \tag{4}$$

式中,  $q_m$  为质量流量,  $kg/s$ ;  $\rho_{up}$  为喷嘴上游流体密度,  $kg/m^3$ ;  $T_{up}$  为喷嘴上游流体温度,  $K$ ;  $R$  为普适气体常数,  $8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

气体从喷嘴喷出后,压力急剧降低,体积快速膨胀,产生焦耳-汤姆逊效应,使得喷嘴处温度急剧降低,此时喷嘴下游温度  $T_{dn}$  为

$$T_{dn} = T_{up} \left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \tag{5}$$

#### 2.2 亚声速流动

在气体钻井过程中一般要保持亚声速流动,当下游压力与上游压力比大于临界值时就会产生亚声速流动,此时气体质量流量<sup>[3-4]</sup>为

$$q_m = A \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_{up} \rho_{up} \left[ \left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \tag{6}$$

此时气体的温度也可由式(5)求得。

### 3 实例计算

在超临界  $CO_2$  钻井过程中,假设 1.9 km 井深处喷嘴上游温度为 340 K 恒定不变,喷嘴下游(井底)压力为 10 MPa,喷嘴直径为 4 mm,计算在喷嘴上游压力分别为 14, 18, 22, 26 MPa 时流过喷嘴的质量流量以及喷嘴下游温度。

经文献查得  $CO_2$  气体的等熵指数  $k$  为 1.28<sup>[5]</sup>。由式(2)可计算得  $CO_2$  的临界压力比为 0.549,由此可以计算出喷嘴下游压力为 10 MPa 时的临界压力为 18.21 MPa,当喷嘴上游压力为 14, 18 MPa 时,喷嘴处为亚声速流,当喷嘴上游压力为 22, 26 MPa 时喷嘴处为声速流。

由式(6)计算出喷嘴处为亚声速流时的质量流量和喷嘴下游温度为

$$p_{up} = 14 MPa \text{ 时, } q_m = 0.437 kg/s, T_{dn} = 315.87 K;$$

$p_{up} = 18 \text{ MPa}$ 时,  $q_m = 0.61 \text{ kg/s}$   $T_{dn} = 298.98 \text{ K}$ 。

由式 (3) 或 (4) 计算出喷嘴处为声速流时的质量流量和喷嘴下游温度为

$p_{up} = 22 \text{ MPa}$ 时,  $q_m = 0.746 \text{ kg/s}$   $T_{dn} = 286.14 \text{ K}$ ;

$p_{up} = 26 \text{ MPa}$ 时,  $q_m = 0.882 \text{ kg/s}$   $T_{dn} = 275.87 \text{ K}$ 。

同时, 可以求出在临界压力比条件下质量流量为  $0.617 \text{ kg/s}$  喷嘴下游压力为  $10 \text{ MPa}$  时, 喷嘴上游压力与喷嘴质量流量之间的关系如图 1 所示。当喷嘴上游压力低于临界压力时喷嘴处为亚声速流, 反之为声速流。因此, 在钻井过程中要控制好喷嘴上下游压力之间的关系。

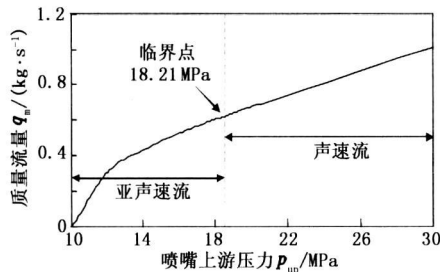


图 1 喷嘴上游压力与质量流量关系

Fig 1 Relationship between upstream pressure and mass flow of the nozzle

喷嘴上游温度为  $340 \text{ K}$ 、下游压力为  $10 \text{ MPa}$  时, 喷嘴上游压力与喷嘴下游温度之间的关系如图 2 所示。当喷嘴上游压力增至  $27.2 \text{ MPa}$  时, 喷嘴下游温度降为冰点温度, 即  $273.15 \text{ K}$ , 喷嘴上下游温度变化幅度高达  $66.85 \text{ K}$ , 如果钻井过程中有地层水出现, 则会导致钻头“冰包”, 即使温度能够维持在冰点之上, 也会达到水蒸气的露点以下, 这会促使环空形成“泥环”, 导致井底压力急剧升高<sup>[7-10]</sup>。

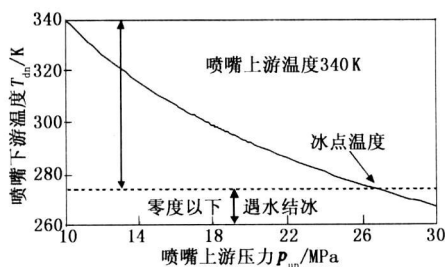


图 2 喷嘴下游温度与上游压力关系

Fig 2 Relationship between downstream temperature and upstream pressure of the nozzle

根据式 (2) 计算的不同喷嘴下游压力条件下的喷嘴上游临界压力如图 3 所示。图 3 中两条曲线之间部分为喷嘴上游安全压力带, 安全压力带的上限为喷嘴临界压力, 下限为喷嘴下游压力。在这一压力范围内能够使喷嘴处于亚声速流, 保证安全钻进,

如果喷嘴上游压力高于这一压力范围, 喷嘴处将是声速流。

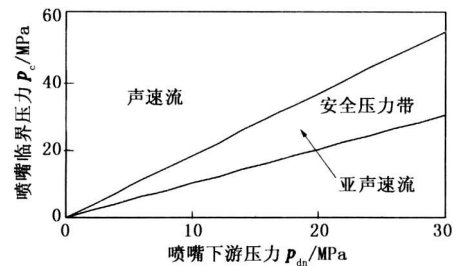


图 3 不同喷嘴下游压力下的上游临界压力

Fig 3 Nozzle upstream critical pressure at different downstream pressure

## 4 结论

(1) 在气体钻井过程中, 喷嘴处容易产生声速流, 且在声速流条件下, 伴随着压力间断和喷嘴低温, 会导致钻头“冰包”, 环空压力急剧上升而立管却无法检测的现象, 容易造成地面及井下事故。

(2) 气体从喷嘴喷出后, 压力急剧降低, 体积快速膨胀, 产生焦耳-汤姆逊效应, 使得喷嘴出口温度急剧降低, 降低幅度取决于气体性质以及上下游压力比。

(3) 在进行气体钻井设计时, 尤其是需要高压、大排量喷射钻井时, 首先要估算井底压力范围, 之后计算喷嘴上游临界压力, 确定钻头上游安全压力带作为水力参数设计的参考标准, 控制好井底与钻头上游之间的压力关系, 避免声速流的发生。

## 参考文献:

- [1] GUO Boyun, GHALAMBOR A. 欠平衡钻井气体体流量的计算 [M]. 胥思平, 译. 北京: 中国石化出版社, 2006 62-63
- [2] GUO Boyun. Use of spread sheet and analytical models to simulate solid water oil and gas flow in underbalanced drilling [R]. SPE 72328, 2001.
- [3] JHON Finnmore E, FRANZINI Joseph B. 流体力学及其工程应用 [M]. 钱翼稷, 周玉文, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006 439-455.
- [4] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996 186-196
- [5] REID Robert C, PRAUSNITZ John M, POLING Bruce E. 气体和液体性质 [M]. 李芝芬, 杨怡生, 译. 北京: 石油工业出版社, 1994 740-751.
- [6] 王保国, 刘淑艳, 黄伟光. 气体动力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005 152-214

(下转第 74 页)

## 参考文献:

- [1] 刘修善, 苏义脑. 地面信号下传系统的方案设计 [J]. 石油学报, 2001, 21(6): 88-92  
LIU Xi-shan, SU Yi-nao. Scheme design of downward signaling system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 21(6): 88-92
- [2] 任双双, 刘刚, 沈飞. 空气钻井的应用发展 [J]. 断块油气田, 2006, 13(6): 62-64  
REN Shuang-shuang, LIU Gang, SHEN Fei. Application and development of air drilling [J]. Fault-block Oil Gas Field, 2006, 13(6): 62-64
- [3] 李志刚, 管志川, 王以法. 基于钻杆信道的声波遥测的实验研究 [C] // 首届油气资源国际博士生学术论坛组委会. 首届油气资源国际博士生学术论坛论文集. 北京, 2007: 672-675.
- [4] WILLIAM H Cox, PRETON E Chaney. Telemetry system: US, 4293936 [P]. 1981.
- [5] BARNES T G, KRKWOOD B R. Passbands in acoustic transmission in idealized drill string [J]. JASA, 1972, 75: 1606-1608
- [6] DRUMBELLER. The propagation of sound waves in drill strings [J]. JASA, 1995, 97(4): 2116-2125
- [7] CARCINDI, JOSE M Poletto, FLAVIO. Simulation of stress waves in attenuating drill strings including piezoelectric sources and sensors [J]. JASA, 2000, 108(1): 53-64
- [8] GAO L, GARDNER W, et al. Limits on data communication along the drill string using acoustic waves [R]. SPE 95490, 2005.
- [9] 李志刚, 管志川, 王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析 [J]. 石油矿场机械, 2008, 37(9): 6-9.  
LI Zhi-gang, GUAN Zhi-chuan, WANG Yi-fa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(9): 6-9.
- [10] 李成, 丁天怀. 不连续边界因素对周期管结构声传输特性的影响 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 172-175.  
LI Cheng, DING Tian-huai. Influence of discontinuous boundaries on acoustic transmission in periodic cascade with application to drill pipes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 172-175.
- [11] 车小花, 乔文孝, 李俊. 随钻测井钻柱声波的频谱特性 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 66-70.  
CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, LI Jun. Acoustic spectral characteristics of drill string of logging while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 66-70.  
(编辑 沈玉英)
- (上接第 69 页)
- [7] GUPTA A P, GUPTA A, LANGLINA IS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation [R]. SPE 96992, 2005.
- [8] AL-ADWAN I Faisal Abdullah. Mechanistic modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2007: 71-72.
- [9] LYONS William C, GUO Boyun, SEIDEL Frank A. 空气和气体钻井手册 [M]. 曾义金, 樊洪海, 译. 北京: 中国石化出版社, 2006: 172-202.
- [10] AL-ADWAN I Faisal, LANGLINA IS Julius P, HUGHES Richard. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [R]. SPE 114050, 2008.  
(编辑 李志芬)