

# 空气锤钻具防斜机理研究

郑德帅 高德利

(石油工程教育部重点实验室(中国石油大学),北京 102249)

**摘 要:**空气锤在提高气体钻井机械钻速的同时可以有效控制井斜。通过对井底应力及空气锤破岩过程的研究,利用摩尔-库伦准则建立了考虑岩石本身以及周围压力的各向异性指数计算公式。结合空气锤的破岩特性得出空气锤钻具的防斜机理为:空气锤钻具的破岩力主要来自于内部冲击力,较小的钻压使钻具变形较小;空气锤的半圆形牙齿以及巨大冲击载荷使待破碎岩石的局部各向异性指数变小;空气锤低转速条件下的高频冲击有利于克服岩石的各向异性而实现平衡破碎。

**关键词:**空气锤;井斜机理;井底应力;各向异性;井斜控制

**中图分类号:**TE921<sup>+</sup>.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)02-0056-04

## Mechanism for Deviation Control of Drilling Assembly with Air Hammer

Zheng Deshuai Gao Deli

(MOE Key Lab of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Air hammer can control well deviation while enhance ROP. According to Mohr-Coulomb criteria, an anisotropy index of formation based on intrinsic features and confining pressures by studying the process of rock failure by air hammer. Combined with the features of air hammer, this paper presents three reasons for that air hammer can control deflection. Because WOB is smaller and the deformation of drill string becomes smaller. The huge impact force make the anisotropy index of formation being smaller. The air hammer works in low rotation speed and high frequent impact, this kind of character can generate balance failure of anisotropy rock.

**Key words:** air hammer; mechanism of deviation; bottom hole stress; anisotropy index; deviation control

气体钻井在提高机械钻速、缩短钻井周期、降低钻井成本等方面有着巨大优势。近年来,气体钻井技术在我国四川、玉门等地区油田的应用不断增加,但在应用中井斜控制困难的问题日益突出,严重制约了气体钻井技术的推广应用<sup>[1-6]</sup>。国内对此也开展了广泛的研究,其中机理研究主要集中于气体替代钻井液改变了井底应力状态,地层各向异性指数变大,但并未给出原因<sup>[7-8]</sup>;井斜控制措施除了常规的钟摆组合之外,空气锤是目前最有效的气体钻井防斜工具<sup>[9]</sup>,井斜角基本控制在 3°以内,但是其防斜机理并不清楚。为此,笔者在分析空气锤破岩机理的基础上,利用摩尔-库伦准则来判定各向异性地层的岩石破碎,建立了综合地应力、钻井液压力、地层孔隙压力以及地层各向异性的岩石破碎模型,结合空气锤的结构及破岩特征,从岩石破碎的角度对空气锤的防斜机理进行了分析。

## 1 空气锤结构及破岩特征

空气锤的基本结构<sup>[10]</sup>如图 1 所示,工作机理是高压压缩空气(或柴油机尾气等惰性气体)经过外缸进入前气室驱动内部活塞向上运动,运动到一定高度后前气室与钻头排气孔连通,气体排出;同时压缩气体进入后气室,活塞到达死点后即在后气室中的压缩

**收稿日期:**2010-09-02;**改回日期:**2010-11-26

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层破岩机理与高效破岩方法”(编号:2010CB226703)资助

**作者简介:**郑德帅(1983—),男,2006年毕业于中国石油大学(华东)材料成型及控制工程专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事钻井防斜打快方面的研究。

**联系方式:**(010)89733702, cupzheng@sina.com

**网络出版时间:**2011-02-23 08:51

**网络出版地址:**http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20110223.0851.000.html

气体和自身重力作用下高速下行冲击钻头。该过程周而复始,活塞因此作高频往复运动,从而对钻头施加周期性的高频冲击载荷<sup>[10]</sup>,冲击频率可达  $1\ 000 \sim 1\ 500\ \text{min}^{-1}$ ,而且冲击载荷远超过常规钻头钻压。

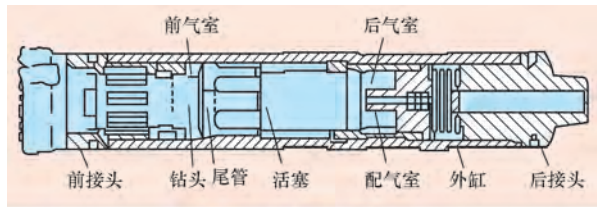


图1 空气锤基本结构

Fig.1 The sketch of air hammer structure

大载荷高频冲击以及低转速的特征使空气锤的破岩原理与常规牙轮钻头不同。在动载冲击作用下,岩石的变形速度增大,塑性变形的扩展受到抑制,塑性系数下降,脆性增强。由于空气锤牙齿为面积较大的半圆形,不像较尖的牙轮钻头牙齿那样吃入地层,巨大的冲击载荷,使应力很快接近甚至超过强度极限,在岩石中产生大量裂隙,直至破碎形成坑穴。较低的转速可以移走已经破碎的岩石,同时可以减轻空气锤钻头的磨损。

## 2 破岩过程分析

### 2.1 井底地层受力

井眼底部地层主要承受水平方向上的两个应力  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$ 、钻井液液柱压力  $p_m$ 、地层孔隙压力  $p_p$  等,钻头牙齿侵入地层后在局部造成应力重新分布,因此井底岩石的破碎要考虑这两方面的因素。由于牙齿及破碎坑皆为对称结构,可以在二维平面内讨论各种应力的影响。为了充分考虑地层的各向异性,这个二维平面可以选择沿着地层上下倾的方位切开的剖面(如图 2 所示)。

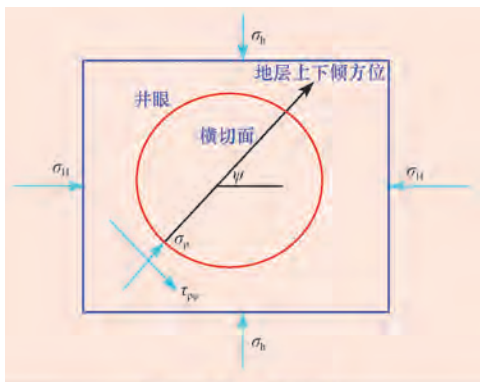


图2 井底平面受力

Fig.2 Pressures at plane of bottom hole

假设地层上下倾方位与最大水平主应力的夹角

为  $\Psi$ ,非均匀地应力  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  在这个剖面上产生的围压和剪应力为:

$$\sigma_p = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\Psi \quad (1)$$

$$\tau_{p\Psi} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h)\sin 2\Psi \quad (2)$$

$\sigma_p$  作用于剖面上,即横切面(见图 3、图 4)中的侧向压力  $p_t$ , $\tau_{p\Psi}$  作用于垂直于剖面的方向上。由式(2)可知,在均匀地应力情况下  $\tau_{p\Psi}$  不存在,这两个应力与  $\Psi$  有关。

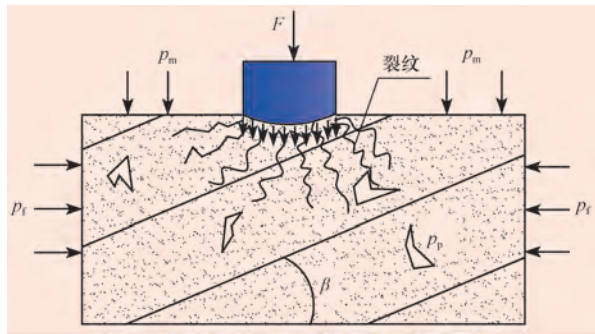


图3 空气锤牙齿作用下井底地层受力

Fig.3 Rock failure under air hammer teeth force and pressures

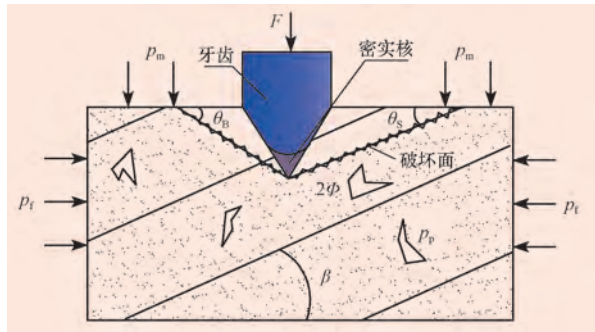


图4 牙轮钻头吃入地层时的井底受力

Fig.4 Rock failure under cone bit teeth force and pressures

假设岩石剪切破坏面与井底平面夹角为  $\theta$ ,则在该破坏面上,各种应力产生的剪切力  $\tau_F$  以及法向力  $\sigma_F$  为<sup>[11]</sup>:

$$\tau_F = \frac{1}{2}(p_t - p_m)\sin 2\theta \quad (3)$$

$$\sigma_F = \frac{1}{2}(p_t + p_m) - \frac{1}{2}(p_t - p_m)\cos 2\theta - p_p \quad (4)$$

当  $p_m$  很小时,计算出来的结果就是空气钻井时岩石受到的剪切力和法向力。

### 2.2 钻头牙齿吃入应力

假设每个空气锤牙齿承受的力为  $F$ ,与井底接触的底面积为  $S$ ,半圆形的牙齿在撞击井底时,对井底会产生一个较大的压力,这个压力在牙齿底部区域产生的剪切力  $\tau_B$  以及法向力  $\sigma_B$  为:

$$\tau_B = -\frac{F}{2S}\sin 2\theta \quad (5)$$

$$\sigma_B = \frac{F}{2S}(1 + \cos 2\theta) \quad (6)$$

由于牙轮钻头牙齿为较尖的楔形,长度为 $L$ ,在压力的作用下将吃入地层,若牙齿以及产生的密实核的尖角为 $2\Phi$ ,侵入深度为 $h$ ,那么剪切破坏面上的剪切力 $\tau_B$ 以及法向应力 $\sigma_B$ 为<sup>[7]</sup>:

$$\tau_B = \frac{F\sin\theta}{2hL\sin\Phi}\cos(\Phi + \theta) \quad (7)$$

$$\sigma_B = \frac{F\sin\theta}{2hL\sin\Phi}\sin(\Phi + \theta) \quad (8)$$

所以,各种应力条件下的剪切力破坏面上的剪切力与法向应力分别为:

$$\tau = \sqrt{(\tau_F + \tau_B)^2 + \tau_{\phi\psi}^2} \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma_F + \sigma_B \quad (10)$$

### 2.3 岩石破碎判定

由于包含井底应力、牙齿侵入应力的剪切力以及正应力已表达出来,因此可以根据摩尔-库伦准则来判断其破坏情况:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c_0 \quad (11)$$

将式(9)、(10)代入式(11)可得到包含非均质地层应力、孔隙压力、钻井液(气)压力、牙齿侵入应力和井底岩石强度以及内摩擦角等所有参数的岩石破碎判定方程。

### 2.4 各向异性指数

石油钻井主要的工作对象是沉积岩,沉积岩往往具有明显的各向异性,其最直接的特征就是沿着地层平面抗剪力要小于垂直于地层面方向的抗剪力。在各向异性地层条件下,牙齿两边破坏面的凝聚力 $c_0$ 是不同的。 $c_0$ 的大小由破坏面的位置决定,与井斜角、地层倾角有关。

根据摩尔-库伦准则,岩石的破坏同时受凝聚力和正应力以及摩擦角的影响,在牙齿两边对称的面上正应力和摩擦角是相同的,但由于各向异性地层的凝聚力不同,会造成容易破坏的一边破碎的体积较大,即牙齿两边的破坏体积不同,这就造成了宏观上的井眼偏斜。

因此,岩石破碎的不平衡是由牙齿两边的抗剪切强度( $\sigma \tan \varphi + c_0$ )不同而引起的,可以用 $H$ 值来衡量不同条件下的各向异性指数:

$$H = 1 - \frac{\sigma \tan \varphi + c_{0s}}{\sigma \tan \varphi + c_{0B}} \quad (12)$$

## 3 空气锤防斜机理

1) 空气锤破岩主要依靠冲击力,而钻压很小。小钻压对于防斜很有利,一方面还可以降低造斜地层的造斜力;另一方面可以减小钻具的变形<sup>[13]</sup>,使钻头上翘的倾角变小。假设钻头直径为215.9 mm,钻铤外径为158.8 mm,内径为71.4 mm,井斜角为 $3^\circ$ ,利用底部钻具组合力学分析软件可以计算出在不同钻压下的钻头转角,如图5所示。由图5可知,钻压增大导致钻头转角增大,数值为正意味着钻头向井眼高边倾斜,会产生造斜效应,因此利用空气锤进行空气钻井时采用小钻压有利于防斜。

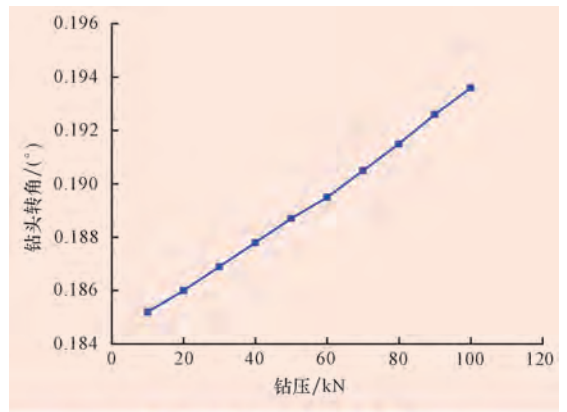


图5 钻压对钻头转角的影响

Fig.5 Effect of weight of bit on bit tilt

2) 空气锤能够达到较高的机械钻速,并不是靠大钻压逼迫牙齿吃入地层,而是以很大的冲击力对岩石进行高频冲击,岩石在高频冲击下逐渐出现裂纹直至完全破碎,然后通过旋转将破碎的岩石剥离出来通过空气带走。由于空气锤钻头在高频冲击时转速很慢,就相当于在同一个地方进行了一段时间的多次冲击。各向异性地层在冲击下,有一侧很快出现裂纹并被破碎,另一侧则保持较为完整,在空气锤的继续冲击作用下,由于容易被破碎的一侧已经被破碎不能再承受冲击力,于是另一侧难破碎保持相对完整的岩石便承受了后续的冲击直至破碎。所以空气锤这种低转速、高频冲击破碎岩石的特性使其在钻进各向异性地层时达到了平衡破碎的效果,从而有效控制了井斜。

3) 国外对于空气锤的冲击力进行了有限元模拟,钻头瞬间冲击力的最大值在400~500 kN之间<sup>[14]</sup>。这远远超过正常的钻压,而且空气锤钻头的牙齿为半圆形,会对局部地层产生一个较强的压力场。由式(12)可知,增大岩石的正压力,就减小了各向异性岩石本身凝聚力的差异,从而降低了岩石的

各向异性指数。这与围压增大导致岩石各向异性降低是相同的机理<sup>[14]</sup>。

这一结论与常规钻具钻压增大导致井斜似乎存在矛盾。这是因为加大钻压时,常规钻具会弯曲而导致钻头上翘,而空气锤钻头的破岩力主要来源于内部结构的冲击,钻具本身变形很小。另一个原因是空气锤的牙齿为半圆形,面积较大,而且冲击力很大,产生的巨大压应力导致待破坏的局部区域各向异性急剧降低。假设地层孔隙压力为 18 MPa,均匀地应力为 40 MPa,气体钻井条件下井底压力为 2 MPa,  $c_{0B}$ 、 $c_{0S}$  分别为 26、24 MPa,空气锤牙齿的压力可使地层各向异性指数最小可降至 0.003 62(如图 6 所示)。对于常规牙轮钻头,由于牙齿较尖,在钻压作用下会吃入地层,而且钻压也远小于空气锤的冲击力,实际上常规钻压大多保持在 100~200 kN,因此单个牙齿受力基本小于 200 kN,即使考虑动载,牙轮钻头钻进条件下地层各向异性指数降低的幅度也要比空气锤小。

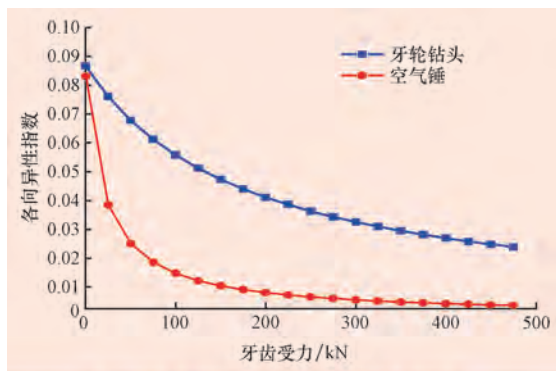


图6 冲击力对岩石各向异性的影响

Fig.6 Effect of teeth force on rock anisotropy

## 4 结 论

1) 不同钻井条件下的地层各向异性指数是以地层固有的各向异性为基础的,同时也受到岩石周围压力的影响,根据摩尔-库伦准则建立了同时考虑两因素各向异性指数计算公式。

2) 空气锤独特的破岩原理使其具有良好的防斜效果,其防斜机理主要为:使用钻压小,钻具变形较小;半圆形牙齿以及破岩时的巨大冲击力,使局部待破碎岩石的各向异性指数变小;低转速条件下的高频冲击有利于平衡破碎。

## 参 考 文 献

[1] 孙起昱,张雨生,王爱芳. 空气锤在普光气田气体钻井中的应用[J]. 石油钻探技术,2009,37(4):68-72.  
Sun Qiyu, Zhang Yusheng, Wang Aifang. Application of air

hammer in gas drilling in Puguang Gasfield[J]. Petroleum Drilling Techniques,2009,37(4):68-72.  
[2] 高如军,何世明,陈佳玉,等. 气体钻井井斜机理与控制初探[J]. 石油钻采工艺,2008,30(2):42-45.  
Gao Rujun, He Shiming, Chen Jianyu, et al. Research on mechanism and control of borehole deviation in gas drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology,2008,30(2):42-45.  
[3] 陈济峰,燕修良,高航献. 川东北地区气体钻井技术实践与认识[J]. 石油钻探技术,2009,37(4):39-41.  
Chen Jifeng, Yan Xiuliang, Gao Hangxian. Gas drilling technique in Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques,2009,37(4):39-41.  
[4] 王文龙,赵勤,李子丰,等. 普光气田气体钻井钻具失效原因分析及预防措施[J]. 石油钻采工艺,2008,30(5):34-43.  
Wang Wenlong, Zhao Qin, Li Zifeng, et al. Cause analysis and precautions of drilling tools failure during gas drilling in Puguang Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology,2008,30(5):34-43.  
[5] 侯树刚,刘新义,杨玉坤. 气体钻井技术在川东北地区的应用[J]. 石油钻探技术,2008,36(3):24-28.  
Hou Shugang, Liu Xinyi, Yang Yukun. Application of gas drilling technology in Northeast Sichuan Area[J]. Petroleum Drilling Techniques,2008,36(3):24-28.  
[6] 肖新磊. 空气钻井技术在元坝地区的应用[J]. 石油钻探技术,2010,38(4):35-37.  
Xiao Xinlei. Application of air drilling technique in Yuanba Area[J]. Petroleum Drilling Techniques,2010,38(4):35-37.  
[7] 邓虎,伍贤柱,余锐. 气体钻井井斜的原因及防斜技术[J]. 天然气工业,2009,29(1):58-60.  
Deng Hu, Wu Xianzhu, Yu Rui. Causes of well deviation during gas drilling and its control[J]. Natural Gas Industry,2009,29(1):58-60.  
[8] 王敏生,唐波. 井底应力场对气体钻井井斜的影响[J]. 岩土力学,2009,30(8):2436-2442.  
Wang Minsheng, Tang Bo. Effects of stress field in bottom hole on borehole deviation during gas drilling[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(8):2436-2442.  
[9] 罗整,徐忠祥,李晓慧,等. 空气锤钻井技术在气体钻井中的应用[J]. 钻采工艺,2007,30(6):9-15.  
Luo Zheng, Xu Zhongxiang, Li Xiaohui, et al. Application of pneumatic hammer drilling technology in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology,2007,30(6):9-15.  
[10] 胡贵,孟庆昆,王向东,等. 空气锤活塞运动规律研究[J]. 石油机械,2009,37(12):50-53.  
Hu Gui, Meng Qingkun, Wang Xiangdong, et al. Research on the movement law of the air hammer piston[J]. China Petroleum Machinery,2009,37(12):50-53.  
[11] Stanley D. Attenuation anisotropy in shale at elevated confining pressures[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2001,38(8):1047-1056.  
[12] 徐小荷,俞静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984,59-74.  
Xu Xiaohu, Yu Jing. Rock failure mechanics [M]. Beijing: Coal Industry Press,1984:59-74.  
[13] 高德利. 井眼轨迹控制[M]. 山东东营:石油大学出版社,1994:34-55.  
Gao Deli. Prediction and control well bore trajectory[M]. Shandong Dongying:Petroleum University Press,1994:34-55.  
[14] Luciano E Chiang, Dante A Elias. A 3D FEM methodology for simulating the impact in rock-drilling hammers[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2008,45(4):701-711.