

小口径孔底动力钻具组合造斜率预测研究

于宗仁, 李巨龙

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要 介绍了小口径孔底动力钻具组合造斜的影响因素及预测方法, 确定了 BHA 自重作用下临界钻压及临界长度, 并对钻具的力学特性进行了分析。

关键词 小口径钻具组合 造斜率 临界钻压 力学特性

中图分类号 TP634.7 **文献标识码** A **文章编号** 1672-7428(2005)S1-0250-03

Study on Prediction of Build-up Rate of BHA in Small-diameter Hole/YU Zong-ren, LI Ju-long (China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract : The paper introduced the factors which effect building-up rate of BHA and predict methods in small-diameter hole. The method that resolved the critical drilling pressure and critical length has been pointed out under its weight and the mechanics characteristics of BHA have been analyzed.

Key words : BHA ; build-up rate ; critical drilling pressure ; mechanics characteristics

煤田地质勘探孔多为小孔径 ($\leq 110\text{mm}$) 钻孔, 利用孔底动力螺杆钻具组合进行定向钻孔施工, 在造斜段或降斜段多采用随钻测斜仪随钻钻进, 如何正确地预测所选 BHA (Bottom Hole Assembly) 钻具的造斜能力, 对于定向孔的空间轨迹设计、合理的钻具组合, 具有十分重要的意义。

本文主要就孔底钻具组合 ($\varnothing 91\text{ mm}$ 钻头 + $\varnothing 65\text{ mm} \times 2.65\text{ m}$ 螺杆钻具 + $\varnothing 71\text{ mm}$ 绳索取心钻杆) 的造斜率、力学特性等方面进行分析。

1 影响造斜率的因素

控制和预测钻具造斜率, 首先要分析造斜机理及其影响因素, 从中抓住主要因素, 建立造斜率的计算分析模型, 并根据实钻资料进行检验和修正, 造斜率的大小主要由钻头侧向力和钻头倾角所决定。其影响因素有以下几个方面:

(1) 钻具组合的类型与结构参数 (螺杆钻具组合, BHA 尺寸、刚度、大小和形状, 结构弯角大小、位置等);

(2) 井身几何参数 (井眼尺寸、井斜角和方位角、井眼曲率等);

(3) 钻井工艺参数 (钻压、冲洗液量、螺杆钻具的装置角等);

(4) 地层特性参数 (地层倾角和走向、岩石各向

异性指数、岩石强度指标等);

(5) 钻头类型和特性参数 (钻头分类及其结构型式、钻头尺寸、钻头侧向切削能力和方位漂移特性等)。

上述 5 类因素中, 地层特性和井身几何参数是不可改变的, 其余 3 类因素是可控制的。

2 造斜率的预测方法

对定向井井眼轨迹的预测方法, 国内外主要以钻头侧向力、钻头合力方向、钻头轴线方向、平衡曲率作为钻进曲率、岩石 - 钻头的相互作用模型确定钻进方向、力 - 位移模型确定钻进方向、根据经验评选钻具组合的造斜率等方面来预测井斜变化。

2.1 三点定圆法

这是国外普遍用来确定弯外壳螺杆钻具组合的造斜能力的方法, 计算公式为:

$$K = 2\gamma / (l_1 + l_2)$$

式中: K —— 工具的造斜率; γ —— 工具的结构弯角; l_1 —— 钻头到下稳定器的距离; l_2 —— 下稳定器到上稳定器间的距离。

该计算方法的优点在于计算简单, 强调了结构弯角对工具造斜率的影响并在一定程度上反映了稳定器位置的影响。对没有稳定器的小口径螺杆钻具来说, 孔壁间隙小, 孔底钻具处于超临界压力, 产生

收稿日期 2005-06-30

作者简介 : 于宗仁 (1966-), 男 (汉族), 江苏徐州人, 中国矿业大学实验师, 探矿工程专业, 从事岩土工程专业的实验教学与对外技术服务工作, 江苏省徐州市, (0516) 3995227、13912005331 李巨龙 (1964-), 男 (汉族), 江苏徐州人, 中国矿业大学副教授, 探矿工程专业, 从事定向钻探方面的教学与科研服务工作, 13815308351。

弯曲变形,弯点与孔壁接触,支撑钻具,可以把该接触点看成稳定器的位置。对于 $\varnothing 65\text{ mm}$ 型螺杆钻具组合,4 kN 以上的钻压,可以产生一次弯曲变形,接触井壁第一点为弯外管,第二点第一次临界压力时产生的接触点,取 $l_1 = 0.95\text{ m}$, l_2 的取值要根据钻压的大小、钻具的性质来确定, $l_2 = 11.42\text{ m}$, $\gamma = 1.5^\circ$ 。

则 $K = 3^\circ / (0.95 + 11.42)\text{ m} = 0.24^\circ / \text{m}$ 。

2.2 极限曲率法

由苏义脑教授提出的极限曲率法,极限曲率 K_C 是指下部钻具组合的钻头侧向力为 0 时所对应的井眼曲率值,以此为基础,依据相关关系,确定工具造斜能力 $\overline{K_T}$ 、工具造斜率 $\overline{K_{T\alpha}}$ 。

根据理论分析与钻井实践, K_C 、 $\overline{K_T}$ 、 $\overline{K_{T\alpha}}$ 存在如下关系:

$$\overline{K_T} = AK_C, \overline{K_{T\alpha}} = B \overline{K_T}, \overline{K_{T\alpha}} = (AB) K_C$$

一般系数 A 可取 $0.70 \sim 0.85$,地层造斜能力强时取上限。当使用随钻测斜仪 MWD 或 SST 测量时,由于工具面对准程度高,则实钻井眼的井斜变化率基本接近 $\overline{K_T}$ 。折减系数 B 按经验取为 $0.8 \sim 0.9$ 。在一般计算与粗略预测中往往采用 $\overline{K_{T\alpha}} = 0.7 K_C$ 。极限曲率 K_C 值可由求解下部钻具组合受力与变形的计算软件确定。

3 螺杆钻具力学特性分析

3.1 BHA 钻具自重作用下临界钻压的确定

小口径钻具组合在自重作用下发生失稳如图 1 所示,其轴线偏离平衡位置,根据其几何及力学边界条件,钻具的挠曲线方程为 $v = \delta \sin [\pi x / (2l)]$, BHA 任一截面 x 处的轴向移量。

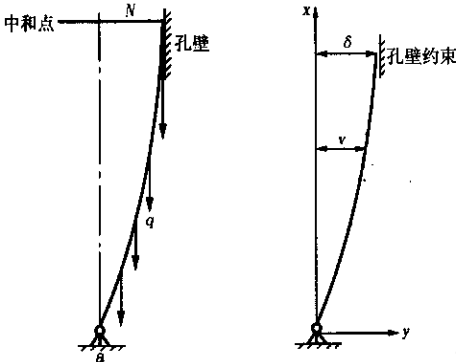


图 1 自重作用下钻具失稳示意图

$$\lambda(x) = \int_0^x \frac{1}{2} (v')^2 dx = \frac{\pi^2 \delta^2}{16l^2} (x + \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi x}{l})$$

则变形能 U :

万方数据

$$U = \int_0^l \frac{EI}{2} (v'')^2 dx = \frac{EI\pi^4 \delta^2}{64l^2}$$

弯曲时产生的势能 W :

$$W = \int_0^l q \lambda(x) dx = \frac{4 + \pi^2}{32} q \delta^2$$

利用其临界状况下总势能 A 最小原理, $A = U - W$, $\partial A / \partial \delta = 0$ 第一次得临界钻压 p_1 :

$$p_1 = 1.52 \sqrt[3]{EI/q_m} \cdot q_m = 3151\text{ N}$$

$$\text{临界长度为 } l_1 \text{ 为 } 1.52 \sqrt[3]{EI/q_m} = 11.42\text{ m}$$

钻压超过第一次临界压力,钻具中和点上移,底部钻具在上部钻压的作用下,沿径向压缩 Δl ,孔壁支撑点也相应下移 Δl ,其大小与钻具长度相比较小,可忽略。当达到第二次临界钻压时,可以把第一支撑点看为铰链支撑,产生第二次弯曲变形。依据上述原理可以得到第二临界钻压 p_2 和临界长度 l_2 :

$$p_2 = 3.05 \sqrt[3]{EI/q_m} \cdot q_m = 6322\text{ N}$$

$$l_2 = 3.05 \sqrt[3]{EI/q_m} \cdot q_m = 23\text{ m}$$

式中 E —— 钻具的弹性模量; J —— 钻具截面惯性矩; q_m —— 单位钻具在泥浆中的质量。

3.2 钻具力学分析

取钻头以上 50 m 长的下部钻具为研究对象,充分考虑上端截面处的力和位移的作用。下部钻具在自重、钻压等外载荷作用下发生拉压、弯扭组合变形。用纵横弯曲法对孔底钻具进行受力分析,采用以下基本假设:

- (1) 孔底钻具组合为等截面弹性变形体系,变形前其轴线与井眼轴线重合,变形后与井壁产生点接触;
- (2) 井壁为刚性体,井眼尺寸不随时间变化;
- (3) 不考虑钻具转动和振动的影响;
- (4) 上切点以上的钻具一般因其自重而躺在下井壁;
- (5) 不考虑地层力和地层力偶的作用。

将钻具组合从弯点和与孔壁切点处断开时,得到若干受纵横弯曲载荷的简支梁柱,用弹性稳定理论求出每跨简支梁柱的端部转角值,利用连续梁柱在支座处转角相等的连续条件和上切点的边界条件,即可得到一系列以支座内弯矩和最上一跨长度为未知数的代数方程组,解此代数方程组,即可完全确定该弹性体系的受力与变形。

对于定向井或钻孔纠斜,钻孔轨迹一般设计为只有井斜角变化而无方位角变化的钻孔,为二维空间钻孔,如图 2 所示。根据钻具连续条件和边界条件,其弯矩方程组为:

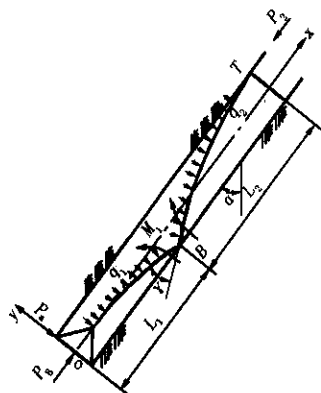


图2 孔底钻具受力与变形示意图

$$\left\{ \begin{aligned} &2M_1 \left[Y(u_1) + \frac{I_1 L_2}{I_2 L_1} Y(u_2) \right] + M_2 \frac{I_1 L_2}{I_2 L_1} Z(u_2) \\ &= -\frac{q_1 L_1^2}{4} X(u_1) - \frac{q_2 L_2^3 I_1}{4 L_1 I_2} X(u_2) - \frac{6EI_1}{L_1} \\ &\quad \left(\frac{y_1 - y_0}{L_1} - \frac{y_2 - y_1}{L_2} + \gamma \right) \\ &q_2 X(u_2) L_2^4 + 4 \left[2M_2 Y(u_2) + M_1 Z(u_2) \right] L_2^2 \\ &= 24EI_2 \left[L_2 (L_1 + L_2) K - y_2 + y_1 \right] \end{aligned} \right.$$

式中 L_1 、 L_2 ——弯外管接头处到孔底、钻具与孔壁第一个切点的距离。

钻头处侧向反力 P_a 的求解：

$$P_a = \frac{P_b y_1}{L_1} + \frac{q_1 L_1}{2} + \frac{M_1}{L_1}$$

根据孔底钻压和钻具的性质,先求出 L_2 , 然后求出相应的 M_1 值, 就可以求出钻头的侧向力。

4 钻头级配问题

使用 $\varnothing 65$ mm 型螺杆钻具, 弯外管弯点至钻头的长度为 0.95 m, 对使用不同结构弯角的弯外管, 钻头的径向偏移量见表 1。

表1 钻头的径向偏移量

弯外管结构弯角/(°)	钻头的径向偏移量/mm
1.5	24.9
1	16.6
0.5	8.3

钻具可以级配的钻头有 $\varnothing 110$ 、91、76 mm 三种规格, 现分别就其在垂直孔中的工作状态进行分析。

$\varnothing 76$ mm 钻头, 形成的钻孔直径为 78 mm 左右, 螺杆钻具与孔壁间隙为 13 mm, 钻杆与孔壁的间隙为 8 mm 左右。由于间隙过小, 冲洗液上返速度高, 对孔壁冲刷厉害, 易造成孔壁坍塌、卡钻等事故。故只适用于稳定地层且一般较少采用, 但在直径为 91

mm 的钻孔中纠斜, 因造斜段短, 可以采用 1.5° 弯外管, 切削面积小, 进尺快, 钻进效率高。

$\varnothing 91$ mm 钻头, 钻孔直径 93 mm, 螺杆钻具与孔壁间隙为 28 mm, 钻杆与孔壁的间隙为 22 mm 左右, 弯外管在孔底接触井壁, 在钻压的作用下, 弯外管紧贴井壁, 钻具在孔底弯曲变形较稳定。钻进效率适中。

$\varnothing 110$ mm 钻头, 钻孔直径 113 mm, 螺杆钻具与孔壁间隙为 48 mm, 钻杆与孔壁的间隙为 42 mm 左右。无钻压情况下, 弯外管不接触井壁, 钻具在钻压作用下, 发生倾倒, 钻具挠度变形大, 处于不稳定状态, 且钻头的工具面角不好调控。钻进过程中, 易发生钻具脱扣、掉钻具现象, 应考虑安装扶正器以增加钻具的稳定性。由于切削面积大, 螺杆钻具转速、扭矩的限制, 钻进效率较低。

5 实例

结合山东武屯所矿井检孔纠斜施工, 孔底螺杆钻具组合在不同阶段受力情况分析, 总结钻具的造斜能力及钻孔空间轨迹控制。武所屯矿井检孔是由山东省煤田勘探队负责施工的高保直井检孔。该孔在 260 ~ 700 m 为泥岩、砂岩互层, 属易造斜地层。据该地区前施工钻孔情况, 均沿方位 $270^\circ \sim 290^\circ$ 方向倾斜。钻至 343 m 时, 方位 271° , 顶角为 4.5° , 超过了钻孔设计要求。采用 MWD 随钻定向系统进行纠斜, 设计钻头方位角为 271° , 钻头工具面为方位角 $271^\circ \sim 180^\circ \pm$ 弯外管的面向与定向靴面向的差。钻具组合为 $\varnothing 91$ mm 钻头 + $\varnothing 65$ mm $\times$ 2.65 m 螺杆钻具 (1.5° 的弯外管) + $\varnothing 71$ mm 绳索取心钻杆。如图 3 所示, 原钻孔轨迹近似认为一斜直孔, 钻具在井下的状态为: 在钻具自重压力作用下, 转动钻杆使弯外管靠在上井壁上, 弯外管以上的钻具产生弯曲, 在下井壁产生上切点 T, 上部钻具由于自重作用躺在下井壁上。钻具组合实际造斜率为 $0.3^\circ/\text{m}$ 。

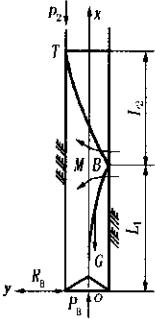


图3 纠斜孔孔底钻具受力图

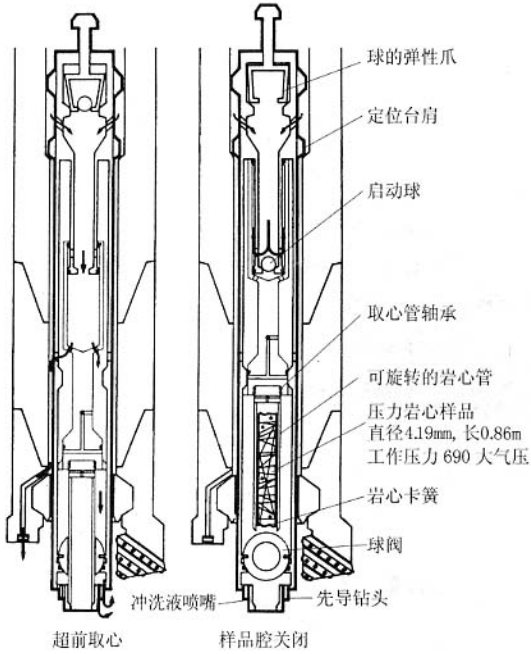


图 12 压力取心器

仪表,保持所需的温度和压力,最终送至船上的实验室供科学家研究。这一系列过程皆是为了保持岩心样品在海底下的真实性,即我们所要求的保真性。

3.4.8 奈维取心器(NCB)(略)

(上接第 252 页)

6 结论

(1) 自重作用下孔底钻具组合的第一次临界钻压为 $p_1 = 1.52 \sqrt[3]{EI/q_m} \cdot q_m$,这与有扶正器的钻具组合不同,其值小于后者。由于钻具在孔底未加钻压时,弯外管处已与孔壁接触,第一次临界长度应以此为铰链连接,进行钻具的弯曲变形处理。

(2) 钻具力学特性将弯外管及弯曲钻杆与孔壁的接触点断开,得到若干受纵横弯曲载荷的简支梁柱,用弹性稳定理论求出每跨简支梁柱的端部转角值,利用连续梁柱在支座处转角相等的连续条件和上切点的边界条件,即可得到一系列以支座内弯矩和最上一跨长度为未知数的代数方程组,解此代数

除此之外深海钻探要求取出的样品是全方位的,即要取固体样、液体样、气体样,全面进行物性测量及化学分析,对固体样进行孔隙水和有机化学的研究,从而进一步了解地球深部的生物圈和生命的起源。如果不能保护好岩心裂隙和空隙中的水及气体,也就失去了深海取样的科学目的,为此一定要保持好岩心样品的细微的结构——孔隙和裂隙,采用合理的科学的深海取样工具。

4 结语

随着地球科学的发展及国家对矿产资源的急需,都对深部取样技术提出更严格的要求,对钻探工作者的取样任务日趋繁重,取样的范围更加广阔(上天、入地、下海、登极)。为了保证国民经济的持续发展,为了地球科学地质理论的创新,钻探工作者取样任务任重道远,大有可为。

参考文献:

[1] 赵尔信. 新疆砂岩铀矿的取心与钻进工艺[J]. 探矿工程, 2001,(增刊).
[2] 张晓西. 大口径硬岩钻探技术在中国大陆科学钻探工程中的应用[J]. 探矿工程,2003,(1).

方程组,即可完全确定该弹性体系的受力与变形。
(3) 合理的钻头级配可以提高钻进效率。

参考文献:

[1] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2001,(3).
[2] 狄勤丰,彭国荣. 下部钻具组合造斜能力的预测方法研究[J]. 石油钻采工艺,2000,(2).
[3] 苏义脑. 极限曲率法及其应用[J]. 石油学报,1997,(3).
[4] 王建军,等. 偏心垫块对螺杆钻具造斜能力影响和预测方法[J]. 石油机械,1994,(12).
[5] 赵国珍,龚伟安. 钻井力学基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1988.
[6] 张平占. BHA 受压失稳的模型及临界钻压公式[J]. 煤田地质勘探,1995,(5).