

# 钻头各向异性钻井特性的 理论分析和试验

高德利 聂翠平 刘希圣

石油大学(北京)

**摘要** 基于钻头与地层相互作用模型,对钻头的各向异性钻井特性进行了理论分析,用两个特性参数定量描述了钻头转角对井斜变化和方位漂移的影响。对钻头各向异性的试验研究表明,钻头各向异性指数可用室内试验来确定。

**主题词** 钻头;定向钻井;钻柱力学;井斜;方位角

**中图法分类号** TE 821.1

## 0 引言

油气钻井中所使用的钻头一般具有侧切特性。同时,钻头的侧切钻井效率与其轴向之间存在差异,称之为钻头各向异性。钻头各向异性可用钻头各向异性指数来表征<sup>[1,2]</sup>。关于钻头的侧切性及其各向异性钻井特性等问题,国内外虽已有不少研究<sup>[2~6]</sup>,但仍不完善。本文将通过理论分析进一步阐明钻头的各向异性及其转角对井眼轨迹控制的影响规律,并试图用室内试验来确定钻头各向异性指数。

## 1 钻头各向异性的影响

由于钻头各向异性的影响,即使在均质各向同性地层中,钻头也不能沿着机械合力方向钻进。在这种情况下,钻头转角也对钻进方向产生影响。各向异性钻头与均质各向同性地层的相互作用模型为<sup>[1]</sup>:

$$\{Q\} = \{I_b[E] + (1 - I_b)[B]\}\{F\} \quad (1)$$

式中,  $[E]$  是三阶单位矩阵;  $\{F\}$  是钻头对地层的机械净作用力列阵;  $\{Q\}$  称为有效钻力列阵;  $I_b$  是钻头各向异性指数;  $[B]$  是与钻头转角有关的实对称矩阵,其中的元素可表达为:

$$\left. \begin{aligned} b_{11} &= (\sin\theta_x \cos\theta_y)^2 \\ b_{12} &= \sin\theta_x \cos\theta_y \sin\theta_y \\ b_{13} &= \sin\theta_x \cos\theta_x \cos^2\theta_y \end{aligned} \right\}$$

本文收到时间: 1991-01-05

$$\left. \begin{aligned}
 b_{21} &= b_{12} \\
 b_{22} &= \sin^2 \theta_y \\
 b_{23} &= \cos \theta_x \cos \theta_y \sin \theta_y \\
 b_{31} &= b_{13}, \quad b_{32} = b_{23} \\
 b_{33} &= (\cos \theta_x \cos \theta_y)^2 \\
 [B] &= (b_{ij})_{3 \times 3}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 分别表示钻头转角在井斜平面和方位平面上的投影分量 (rad)。

在一般情况下, 钻头转角可按“小量”处理。若忽略二阶小量, 则[B]可简化为如下形式:

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \theta_x \\ 0 & 0 & \theta_y \\ \theta_x & \theta_y & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 即得下列简化方程组:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_x &= (F_x - \theta_x F_z) I_b + \theta_x F_z \\
 Q_y &= (F_y - \theta_y F_z) I_b + \theta_y F_z \\
 Q_z &= (\theta_x F_x + \theta_y F_y) (1 - I_b) + F_z
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $F_x$ ,  $F_y$  及  $F_z$  表示钻头机械净作用力分量,  $F_x$ 以增斜作用为正,  $F_y$ 以减方位作用为正,  $F_z$ 可取净钻压值(实际钻压减去岩石破碎的门限压力);  $Q_x$ 称为钻头有效井斜力(简称井斜力), 以增斜作用为正;  $Q_y$ 称为钻头有效方位力(简称方位力), 以减方位作用为正;  $Q_z$ 称为有效钻压, 一般为正值。

由式(4)可见, 井斜力 $Q_x$ 和方位力 $Q_y$ 均与钻头各向异性指数 $I_b$ 成线性关系。当 $I_b$ 值一定时,  $Q_x$ 和 $Q_y$ 分别与钻头转角 $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 也呈线性相关。显然, 增大钻头的 $I_b$ 值, 既有利于钻头的增斜作用或降斜作用, 也有利于钻头的减方位作用或增方位作用。另一方面, 当 $I_b \rightarrow 0$ 时 ( $I_b = 0$ 是钻头各向异性的极端情况之一), 钻头的侧向切削效率趋于“无”, 钻头指向便基本上决定了钻进方向。这样的钻头配合“刚性满眼”钻具组合(能保持钻头转角为极小)在均质各向同性地层里钻进时, 具有良好的稳斜及稳方位效果。因此, 设计制造不同 $I_b$ 值的定向井专用钻头(即具有不同各向异性钻井特性的钻头), 对于改善井眼轨迹的控制钻具是十分必要的。目前常用牙轮钻头和PDC钻头的 $I_b$ 值, 一般都在(0, 1)范围内。

## 2 钻头特性参数

为了更清楚地定量描述钻头转角对井眼轨迹变化的影响规律, 可直接根据式(1)定义如下两个钻头特性参数 ( $B_\alpha$ 和 $B_\phi$ ):

$$\left. \begin{aligned}
 B_\alpha &= \frac{(1 - I_b) b_{13}}{I_b + (1 - I_b)(b_{11} + b_{22})} \\
 B_\phi &= \frac{(1 - I_b) b_{23}}{I_b + (1 - I_b)(b_{11} + b_{22})}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $B_a$ 称为钻头的造斜特性参数,以增斜效果为正;  $B_\phi$ 称为钻头的变方位参数,以减方位效果为正;  $b_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ )可由式(2)确定。钻头特性参数恰好等价表达了各向异性钻头 ( $I_b \neq 1$ )的转角对井眼轨迹变化的影响效果。

通过式(3)的近似处理,可将式(5)简化为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} B_a &= (1 - I_b)\theta_x / I_b \\ B_\phi &= (1 - I_b)\theta_y / I_b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 表示钻头转角分量(rad)。由式(6)可见,钻头特性参数与钻头转角成线性正比关系。钻头转角的非零解是钻头特性参数存在(不等于零)的必要条件,而钻头的各向异性特性是其内因。对于各向同性钻头(即 $I_b=1$ ),钻头特性参数恒等于零,钻头转角对井眼轨迹无影响。

### 3 钻头各向异性的试验研究

如何确定实际钻头的各向异性指数,是一个值得研究和解决的重要问题。钻头各向异性指数 $I_b$ 的大小,主要取决于钻头的类型、结构和尺寸。因为常用钻头的种类不多,所以可用室内试验方法测试各种钻头的 $I_b$ 值。有人主张用钻后分析法反算钻头各向异性指数[6],但由于多种因素的影响而难以获得理想的反算结果。

#### 3.1 试验装置简介

为了在室内试验测定 $I_b$ 值,设计装配了一个钻头与岩石相互作用的小型全尺寸试验装置(称为RBI装置,如图1所示),可以用小尺寸普通钻头做试验。该装置由钻机、动力系统、轴向和侧向加载系统、液压和测量系统等组成)。

(1) 钻机和动力系统。采用701A型车载钻机的减速箱及转盘,配以 $\phi 88.9\text{mm}$ 六角方钻杆带动钻头旋转。通过不同的配合接头可以配接不同尺寸的钻头。采用JZTy5-4-7.5kW交流电磁调速电动机,并使用JD1A-40型控制器,实现在120~960r/min范围内无级调速。

(2) 轴向加载系统。采用两个双作用液缸,在双扶正杆刚性扶正下实现同步液压加载和提升。液缸规格为 $\phi 60\text{mm} \times 900\text{mm}$ ;最大行程850mm;最大压力54 kN;最大设计钻速为250mm/min。

(3) 侧向加载系统。采用 $\phi 60\text{mm} \times 160\text{mm}$ 双作用液缸,侧向加载于岩石箱上。侧向力最大可达9.81kN,岩石箱尺寸为430mm $\times$ 430mm $\times$ 400mm。岩石箱底部装有四个滚动轴承,整体放置于钢制底板上,以减小摩擦阻力的影响。岩石箱侧面还装有位置可调且顶部带滚动轴承的四根夹持杆,以

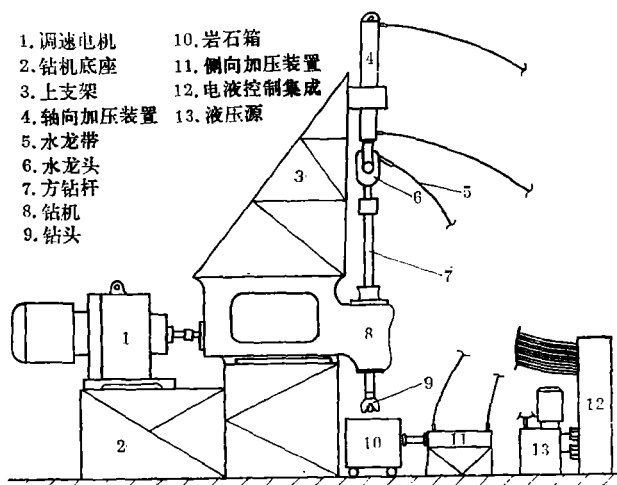


图1 岩石与钻头相互作用试验装置

抵抗钻头给岩石箱的扭矩。

(4) 液压系统。采用LSJ400型组合式液压源,调压范围为0~39.24MPa,排量为4L/min,为保证侧向力施加系统油路压力低于一次油路压力并保持恒定,在分路上装有减压阀。主油路及分油路都装有换向阀组,以实现换向控制。

(5) 测量系统。用精密压力表指示轴向钻压及侧向力。通过固定在轴向和侧向的标尺分别直读钻头的轴向位移和侧向位移,用电子秒表计时。

另外,用清水冲洗井眼,且不加围压,不产生强喷射。

### 3.2 试验方法

在试验开始前要备好岩石试件,装上需要测试的钻头。选用的岩石试件应力求均质各向同性,以便提高 $I_b$ 值的试验精度。本研究选用的岩石试件为400mm×400mm×400mm而均质性极好的中硬白砂岩,还用水泥和细石英砂制作了少量人造岩石。

在记录数据前不加侧向力,先在轴向钻一个适当深的导眼,以便使钻头与岩石的相互作用进入稳定状态。在导眼的基础上继续钻进时,便可施加一个侧向力,并同时记录数据。施加在钻头的侧向力是通过岩石箱间接实现的,如图2所示。需要记录的试验数据包括:轴向钻压和位移、侧向力和位移、钻进时间。钻头的轴向位移受到轴向液缸最大行程的限制,而钻头的侧向位移则不能大于井眼视半径(即方钻杆与井眼之间的最小间隙)。

利用获得的试验数据可以计算出钻头的轴向钻速及侧向钻速,再根据文献[1]中的定义求得试验钻头的各向异性指数( $I_b$ 值)。

### 3.3 试验结果及分析

利用所设计的钻头与岩石相互作用装置,分别试验了 $\phi 152$ mm镶齿牙轮钻头和 $\phi 117$ mmY<sub>4</sub>钢齿牙轮钻头的各向异性,结果分别如表1和表2。由表中数据可见,两只钻头的 $I_b$ 值均处在 $0 < I_b < 1$ 范围内,表明它们的侧向切削效率比轴向低。由表1可发现,钻头转速变化对 $I_b$ 的试验结果稍有影响。表2说明,在相同条件下,钻头各向异性指数的试验值具有良好的重复性。表2中的位移是指测量的总位移值;岩样是均质石英砂水泥块,转速为54r/min;轴向钻压为9.939kN,侧向力是0.836kN。

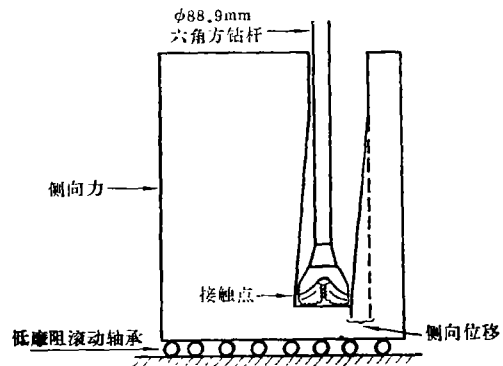


图2 钻头侧向力的施加原理

表1  $\phi 152$ mm镶齿牙轮钻头各向异性试验结果

转速 (r/min)	75	100	150
$I_b$ 值	0.7154	0.6920	0.6780

注:岩样为均质白砂岩,轴向钻压侧向力分别是6.931kN及1.035kN。

表2  $\phi 117\text{mm Y}_4$  钢齿牙轮钻头各向异性试验结果

钻进时间 (min)	侧向位移 (mm)	轴向位移 (mm)	侧向钻速 (mm/min)	轴向钻速 (mm/min)	$I_b$ 值
3.57	11.7	220	3.34	62.8	0.6324
4.0	13.5	254	3.37	63.5	0.6320
4.1	13.6	253	3.32	61.7	0.6392
3.9	13.5	256	3.46	65.6	0.6271
4.1	14.0	262	3.41	63.9	0.6354
3.0	13.0	251	3.42	66.0	0.6159

## 4 结 论

(1) 在井眼轨迹控制计算中, 一般不应忽略钻头各向异性的影响。研制具有各向异性钻井特性的定向井专用钻头, 是改善井眼轨迹控制工具条件的重要途径之一。

(2) 钻头特性参数是与钻头各向异性及钻头转角有关的无因次量, 可用来定量表达各向异性钻头的转角对井斜和方位变化的影响效果。

(3) 钻头各向异性指数 ( $I_b$  值) 可通过室内试验测定。

**致谢** 本工作得到了马家骥、丁岗及其他实验人员的大力协助, 在此谨表谢意。

## 参 考 文 献

- 高德利, 刘希圣. 钻头与地层相互作用的新模型. 石油钻采工艺, 1989, 11(5)
- 高德利, 刘希圣, 黄荣樽. 钻头与地层相互作用的三维宏观分析. 石油大学学报(自然科学版), 1989, 13(1): 23~31
- Bradley W B. Factors Affecting the Control of Borehole Angle in Straight and Directional Wells. JPT, June 1975
- Millheim K K et al. Side Cutting Characteristics of Rock Bits and Stabilizers While Drilling, SPE 7518, Fall Ann SPE Conf, 1978
- Ma D, Azar J J. A Study of Rock-Bit Interaction and Wellbore Deviation. J Energy Res Tech, Trans ASME, 1986, 108: 228~233
- Ho H S. SPE paper 16658, SPE/IADC Conf, Dallas, Oct, 1987

# A STUDY ON ANISOTROPIC DRILLING CHARACTERISTICS OF DRILLING BIT

*Gao Deli Nic Cui ping Liu Xisheng*

University of Petroleum (Beijing)

**Abstract** The anisotropic drilling characteristics of drill are discussed on the basis of a rock-bit interaction model, and the effects of bit tilt angle on hole angle and direction are described quantitatively with two characteristic parameters. The apparatus and methods used in experimental study and some results about the bit anisotropy are presented in this paper.

**Key words** Drill bit; Directional drilling; Drilling string dynamics; Hole deviation; Hole angle

---

科技  
简讯

## 储运工程一项科研成果通过鉴定

海上高含蜡原油保温管道停输温降和再启动压力规律的研究成果于1991年12月在石油大学(北京)通过专家鉴定。鉴定结论认为,这一研究成果达到国内先进水平,对我国海洋石油储运工程具有重要实用价值。这是中国海洋石油工程设计公司委托我校(北京)储运教研室历时3年时间完成的,课题负责人是汤楷孙教授和李才高工。

## 石大石油化工新技术开发研究所成立

石油大学(北京)科技开发办公室最近成立了十达石油化工新技术开发研究所。这是一个技术、生产、销售一体化的机构,是一个高科技企业,也是校办企业。主要服务项目是石油、化工及电子计算机软件的技术开发、技术咨询和技术服务。