

各向异性岩石钻进用唇面偏心钻头的研发及其在钻孔弯曲控制中的应用

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, Нескоромных В.В.³, 李博¹,
周欣⁴, 刘浩¹, 段隆臣², Чихоткин В.Ф.²

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 西伯利亚联邦大学(Сибирский Федеративный университет), 克拉斯诺雅尔斯克(г.Красноярск) 660095, 俄罗斯(Россия); 4. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430064)

摘要: 钻探工程中常常遇到钻孔弯曲问题。钻孔弯曲与许多因素有关, 如地层条件、钻头结构、规程参数、操作水平和管理能力等。地层条件中, 常常遇到各向异性岩石, 钻进时此类岩石对钻头产生翻转力矩, 致使钻头唇面偏斜, 进而钻孔弯曲。为此, 俄罗斯专家提出了利用钻进时偏心唇面钻头产生的弯曲力矩抵制(平衡)这个翻转力矩来设计钻头, 取得了专利, 得到了较好的效果, 值得引起我们的注意。

关键词: 钻探工程; 各向异性岩石; 唇面偏心钻头; 翻转力矩; 钻孔弯曲强度

中图分类号: P634.4⁺1 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2025)03-0110-07

Development of drill bit with eccentric matrix top used for drilling anisotropic rocks and its application in borehole inclination control

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, NESKOROMNYH V.V.³, LI Bo¹,
ZHOU Xin⁴, LIU Hao¹, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V.F.²

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd, Shanghai 200032, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia; 4. Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: In drilling engineering, borehole inclination is often encountered. The borehole inclination depends on many factors, such as formation conditions, bit design, drilling parameters, operation level, management ability and so on. Among them, the formation conditions objectively exist and can not be changed by human will. In the formation conditions anisotropic rocks are encountered often. An important problem in drilling of the anisotropic rocks is production of overturning moment (produced from rock reaction force), leading to deviation of bit matrix top and as a result to serious inclination of the borehole. To resolve the problem, Russian specialists have proposed designing the drill bit to resist (balance) of the overturning moment by using the bending moment produced by the eccentric matrix top while drilling and got patents and good results obtained. That deserves our attention.

Key words: drilling engineering; anisotropic rocks; bit with eccentric matrix top; overturning moment; intensity of borehole inclination

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-03-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.014

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号: 42272366)

第一作者: 汤凤林, 男, 汉族, 1933年生, 教授, 博士生导师, 俄罗斯工程院外籍院士, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 国际矿产资源科学院院士, 主要从事探矿工程方面的教学和科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, fltang_wuhan@aliyun.com。

引用格式: 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В.В., 等. 各向异性岩石钻进用唇面偏心钻头的研发及其在钻孔弯曲控制中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 110-116.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V.V., et al. Development of drill bit with eccentric matrix top used for drilling anisotropic rocks and its application in borehole inclination control[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 110-116.

0 引言

钻探工程中常常遇到钻孔弯曲问题。钻孔弯曲与许多因素有关,如地层条件、钻头结构、规程参数、操作水平和管理能力等。地层条件中常常遇到各向异性地层,这是客观存在的,不以人的意志为转移。严格来说,绝大多数岩石都是各向异性的,各向同性的岩石是很少见的。各向异性岩石钻进中遇到的一个重要问题是,钻进时岩石对钻头产生翻转力矩,致使钻头唇面偏斜,进而产生钻孔弯曲。如何解决这个问题,需要研究和探讨。中国在这方

面做的工作较少^[1-7],俄罗斯做了大量的工作^[8-32]。

1 各向异性岩石破碎过程的特点和翻转力矩的产生

各向异性岩石钻进的难点,是井筒弯曲严重,在定向钻进时容易产生事故。俄罗斯加里宁 A.Γ. 教授等^[8-12]对井筒弯曲原因和机理进行了理论和试验研究,认为井筒弯曲是井底岩石和井壁岩石破碎不均匀所致。已经确定,各向异性岩石钻进井筒弯曲的主要因素之一,是岩石对钻头唇面产生的翻转力矩 M_{on} , 见图 1。

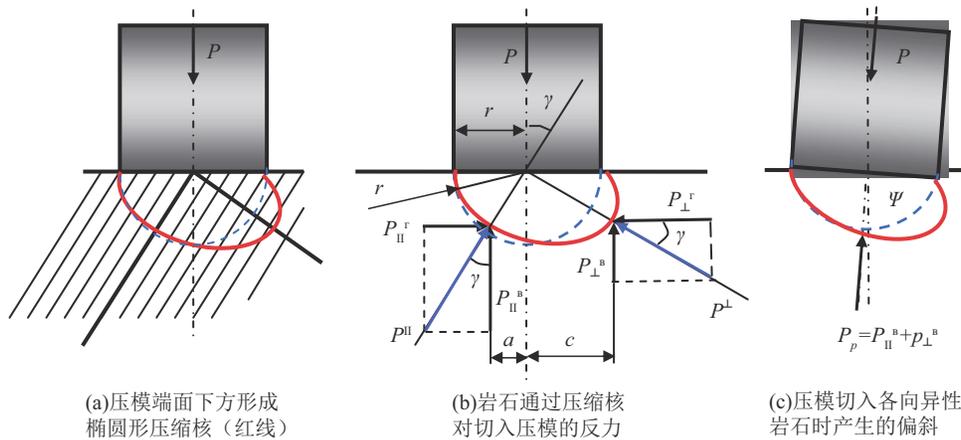


图 1 平底压模破碎岩石过程及岩石弹性反力作用

Fig.1 Process of rock fragmentation with flat bottom indenter and elastic reaction of the rock

从物理学虎克定律可知,各向异性岩石平行和垂直层理(片理)的弹性模量是不同的,即 E^{\parallel} 和 E^{\perp} 是不等的,且 $E^{\parallel} > E^{\perp}$ 。

从图 1(b)可见,作用于压模上的轴载 P ,在岩石变形时,要克服被变形岩石中产生的内摩擦力和来自岩石的弹性反力。平行和垂直层理(片理)的反力 P^{\parallel} 和 P^{\perp} 可以分解成为垂直分力和水平分力。

垂直分力为:

$$P_{\parallel}^B = P \cos^2 \gamma (1 - \tan \Phi_n^{\parallel})$$

$$P_{\perp}^B = P \sin^2 \gamma (1 - \tan \Phi_n^{\perp})$$

水平分力为:

$$P_{\parallel}^r = P \cos \gamma \sin \gamma (1 - \tan \Phi_n^{\parallel})$$

$$P_{\perp}^r = P \cos \gamma \sin \gamma (1 - \tan \Phi_n^{\perp})$$

式中: P ——作用到压模上的轴载, dN; γ ——压模与层面的遇层角, ($^{\circ}$); Φ_n^{\parallel} 、 Φ_n^{\perp} ——分别为与层理面平行和垂直的内摩擦角, ($^{\circ}$)。

从图 1(b)中可见,在平底压模压入各向异性岩

石时,在岩石弹性变形中,对压模端面产生的翻转力矩 M_{on} 是由垂直反力的作用决定的。如果此反力的作用点距压模中心线的距离分别为 a 和 c , 则 $M_{on} = P_{\parallel}^B a - P_{\perp}^B c$ 。从图 1(b)可见, $a = r \sin \gamma$, $c = r \cos \gamma$ 。

故翻转力矩为:

$$M_{on} = Pr [\cos^2 \gamma \sin \gamma \sqrt{1/K} (1 - \tan \Phi_n^{\parallel}) - \sin^2 \gamma \cos \gamma \sqrt{K} (1 - \tan \Phi_n^{\perp})] \quad (1)$$

式中: r ——压模端面半径, m; K ——各向异性系数, 即平行和垂直岩石层理或片理弹性模量的比, $K = E^{\parallel} / E^{\perp}$ 。

研究表明^[8,11,13],同理,金刚石钻头钻进(球形压模)(见图 2)时,翻转力矩 M_{on} 为:

$$M_{on} = 1.25 P_{oc} [\cos^2 \gamma \sin \gamma \sqrt{1/K} (1 - \tan \Phi_n^{\parallel}) - \sin^2 \gamma \cos \gamma \sqrt{K} (1 - \tan \Phi_n^{\perp})] \sqrt{d_a h} \quad (2)$$

式中: P_{oc} ——金刚石钻头轴载, dN; γ ——钻头与岩石层理或片理的遇层角, ($^{\circ}$); d_a ——金刚石切削具

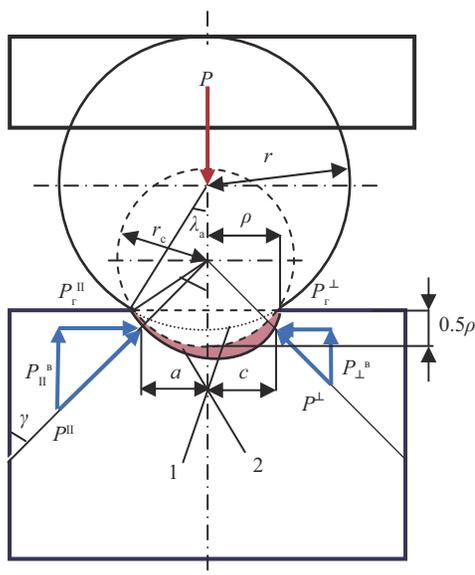


图2 球形压模(金刚石)破碎岩石过程示意

Fig.2 Process of rock fragmentation with spherical indenter (diamond)

的直径, m; h ——金刚石切削具切入岩石的深度, m。

$$h = \frac{d_a}{2} - \sqrt{\frac{d_a^2}{4} - \frac{P}{\pi P_m (1 + \tan \Phi_n)}}$$

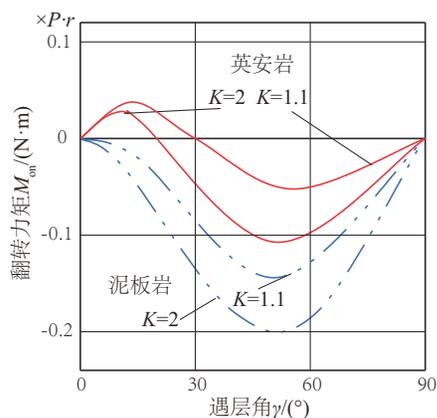
式中: P ——钻头一个切削具上的载荷, dN; P_m ——岩石硬度, Pa。

从式(2)可见, 翻转力矩 M_{on} 与岩石各向异性系数 K 、岩石沿着层理和垂直层理破碎时的内摩擦系数、钻头和层理或片理相遇角度(遇层角) γ 有关, 与遇层角 γ 的关系最大。破碎岩浆喷出岩(英安岩)、沉积岩(泥板岩)时, 计算得到的不同 K 、不同内摩擦系数情况下, 翻转力矩 M_{on} 与遇层角 γ 的关系曲线见图3。

泥板岩的内摩擦系数为 $\tan \Phi_n^{\parallel} = 1$, $\tan \Phi_n^{\perp} = 0.6$ 。英安岩的内摩擦系数 $\tan \Phi_n^{\parallel} = 0.8$, $\tan \Phi_n^{\perp} = 0.7^{[8]}$ 。临界遇层角 γ_{kp} 为:

$$\gamma_{kp} = \arctan \frac{1 - \tan \Phi_n^{\parallel}}{K(1 - \tan \Phi_n^{\perp})}$$

从式(2)和图3可见, 翻转力矩 M_{on} 和遇层角 γ 的关系曲线是正弦曲线。 K 值增大时, M_{on} 增加, 临界遇层角 γ_{kp} 减小, 临界遇层角 γ_{kp} 到某一定值时, M_{on} 作用方向改变。遇层角小时, M_{on} 在沿着层理或片理方向上向钻头施加作用。当遇层角大于 γ_{kp} 时, 在垂直层理或片理方向上向钻头施加作用。根据图

图3 破碎英安岩、泥板岩时产生的翻转力矩 M_{on} 与遇层角 γ 的关系曲线Fig.3 Dependence of overturning moment M_{on} from encountered angle γ while fragmentating of dacite and argillite

3, 可以确定出 $M_{on}=0$ 时 γ_{kp} 的数值。

从式(2)和图3可见, 遇层角等于 0° 或 90° 时, $M_{on}=0$, 即沿着各向异性岩石层理(或片理)或垂直各向异性岩石层理(或片理)破碎岩石时, 岩石破碎均是均匀的。所以在这种情况下, 翻转力矩不受各向异性的影响, 钻孔不会因此发生弯曲。

2 翻转力矩 M_{on} 的控制和钻头唇面偏心距 e 的确定

钻头唇面偏心时, 钻头可能产生的弯曲力矩 $M_{钻头}$ 为:

$$M_{钻头} = P_{oc} e$$

式中: P_{oc} ——钻头轴载, dN; e ——钻头唇面的偏心距, mm。

从图2可见, 为了能在各向异性岩石钻进时防止钻头偏斜使井筒弯曲, 控制翻转力矩可以通过 $M_{钻头} = M_{on}$ 来实现, 故钻头唇面偏心距 e 为^[8-9, 13]:

$$e = 1.25 \left[\cos^2 \gamma \sin \gamma \sqrt{1/K} (1 - \tan \Phi_n^{\parallel}) - \sin^2 \gamma \cos \gamma \sqrt{K} (1 - \tan \Phi_n^{\perp}) \right] \sqrt{d_a h} \quad (3)$$

从式(3)可见, 钻头唇面偏心距 e 的数值与岩石各向异性系数 K 、岩石沿着层理和垂直层理破碎时的内摩擦系数、钻头和层理或片理相遇角度 γ 有关。

研究表明^[11, 13], 在 $K=1.1$ 和 $K=2$ 条件下, 计算得到的遇层角 $\gamma=35^\circ \sim 70^\circ$ 时, M_{on} 的数值最大(见图3)。钻探工作实践也证明, 遇层角在此范围内时, 钻孔弯曲强度最大。

在式(3)中, 为了实际计算, 可取切削具的直径

为0.5~4 mm,其极限切入深度 $h=(0.1\sim 0.3)d_a$,则根号 $\sqrt{d_a h}$ 取整数后,得:

$$e=(0.375-0.25)Nd_a[\cos^2\gamma\sin\gamma\sqrt{1/K}(1-\tan\Phi_n^{\parallel})-\sin^2\gamma\cos\gamma\sqrt{K}(1-\tan\Phi_n^{\perp})] \quad (4)$$

式中: N ——设计的 $M_{\text{钻头}}$ 高于 M_{on} 的倍数, $N=1\sim 3$ 。

根据式(4),可以确定出钻头唇面的偏心距。如果使 $M_{\text{钻头}}=M_{\text{on}}$,则 $e=1\text{ mm}$ 。如果使 N 等于2~3,则 $e=2\sim 3\text{ mm}$ 。

破碎各向异性岩石时产生的翻转力矩对钻孔弯曲的影响,与钻柱下部钻具组合(半波)在井筒弯曲部分的挠曲方向有关,见图4。图4中, ω (红线)表示钻柱下部钻具组合围绕自身轴线回转的速度, Ω (蓝线)表示围绕钻孔轴线回转的速度, γ_0 是钻柱下部钻具组合的偏斜角度。图4(a)是 $\Omega=0$ 时钻柱下部钻具组合的位置,如果翻转力矩很大,它会迫使钻柱下部钻具组合围绕其自身弯曲中心线回转(ω ,红线),钻孔弯曲强度 i 最大($i=\text{max}$),钻头唇面偏斜。图4(b)是钻柱下部钻具组合围绕钻孔中心线回转(Ω ,蓝线),钻孔弯曲可能最小,对钻孔弯曲强度没有影响,钻头偏斜情况保持原来状态($i=0$)。图4(c)表示,在实际钻进中,如果使用标准的钻头和规程参数,则根据钻进规程参数、钻头结构和钻柱下部钻具组合的不同,钻柱下部钻具组合常常是围绕其自身弯曲中心线回转和围绕钻孔中心线回转($\omega+\Omega$)(红线+蓝线)同时进行, $\omega>0,\Omega>0,\Omega$ 不等于 ω ,钻头唇面偏斜情况处于中间状态($i=\text{med}$)。

由前所述,各向异性岩石钻进时,由于翻转力矩 M_{on} 的作用,钻柱下部钻具组合会沿着自身中心线回转。如果使用标准的平底、不偏心金刚石钻头钻进,则在钻头回转一圈期间,翻转力矩是不变的,其曲线呈直线形状1(见图5中曲线1)。如果钻头唇面偏斜、重心移动,则产生的合力矩 $M_{\text{on}+}=M_{\text{on}}+M_{\text{钻头}}$,其曲线在回转一圈的分布与直线1不同(见图5中曲线2)。

从图5可见,如果钻头按照 $M_{\text{钻头}}=M_{\text{on}}$ 设计,则合力矩 $M_{\text{on}+}$ 有最大值和零值。钻柱下部钻具组合在合力矩 $M_{\text{on}+}$ 的作用下,可以改变钻柱下部挠曲的方向和回转的性质。 $M_{\text{on}+}$ 使钻柱下部钻具组合挠曲最大,但是经过半圈,来自孔底力矩的作用可以中和,钻柱下部钻具组合返回原来的稳定状态。

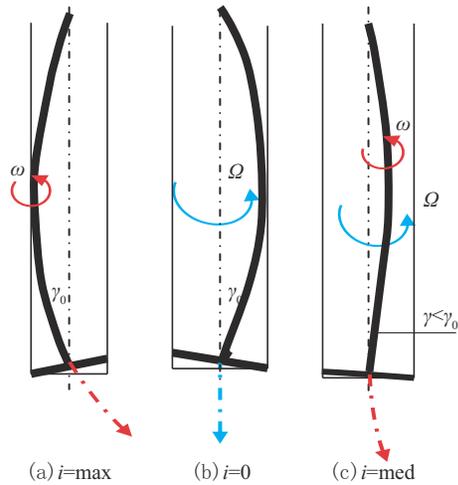


图4 翻转力矩的影响与钻柱下部钻具组合弯曲方向的关系

Fig.4 Dependence of overturning moment from deviation direction of drilling column lower part

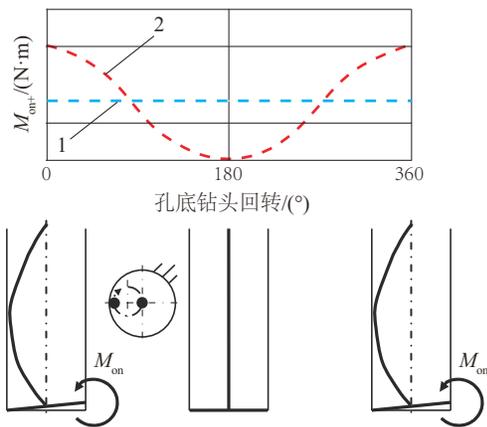


图5 翻转力矩 M_{on} 与钻头回转一圈的关系

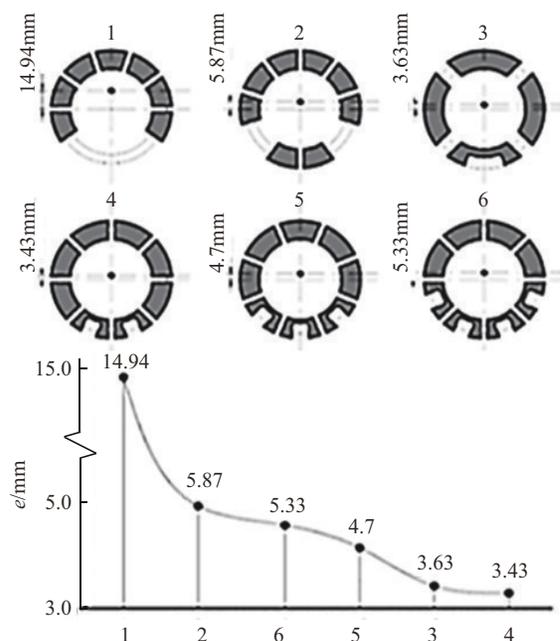
Fig.5 Dependence of overturning moment M_{on} from one rotation of drill bit

可见,使用这种唇面偏心钻头钻进各向异性岩石,可以提高钻柱下部钻具组合的稳定性,改变其回转性质,使钻头围绕钻孔中心线回转,降低钻孔弯曲强度。

3 不同偏心距钻头钻进的分析 and 研究

图6给出了俄罗斯不同单位使用 $\text{O}76\text{ mm}$ 绳索取心钻头和NQ钻杆钻进时,不同结构钻头胎体唇面偏心距 e 的数值^[13]。

1号结构钻头取得了专利,专利号为RU1681598,是伊尔库茨克国立技术大学研发的,其钻头唇面偏心距很大,钻头弯曲力矩 $M_{\text{钻头}}$ 超过了

图6 不同钻头唇面偏心距 e 的数值Fig.6 Quantity of eccentricity e in different bit matrix top

最优值,控制钻孔弯曲的效果不好,甚至没有效果。这种结构钻头的进尺甚至远远不如标准钻头的进尺。

2号结构钻头也取得了专利,专利号为RU148333,它考虑了1号钻头的缺点,在生产条件下进行了试验,效果是肯定的。

3号结构钻头是托木斯克工艺大学研发的钻头,其专利号为RU1620590,在生产条件下进行了试验,得到了良好的效果。

4、5、6号结构钻头的研发,考虑了先前进行的研究和试验结果,符合各向异性岩石钻进时降低钻孔弯曲强度对偏心钻头唇面的基本要求,取得了较好的效果。

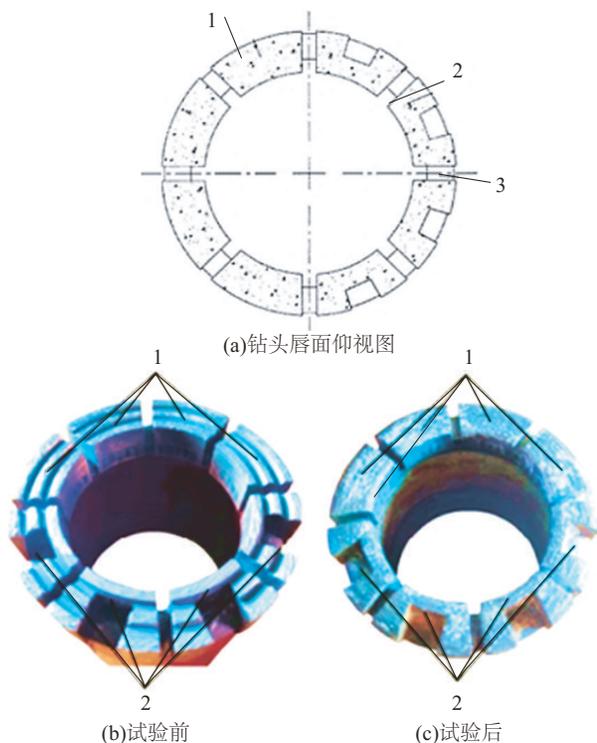
分析上述钻头生产试验结果可以确定,4~6号钻头唇面的偏心距是可取的。

钻头唇面偏心距不宜太大,因为钻头弯曲力矩 $M_{\text{钻头}}$ 过大,不但会影响控制钻孔弯曲的效果,还会降低钻探工程的效率。同时,要保证有好的冲洗液循环条件,保持钻头胎体靠近孔底部分的水力动力学阻力是平衡的。

4 新型钻头的设计与试验

俄罗斯 НЕСКОРОМНЫХ 等根据上述分析

研究结果,设计出了符合最优偏心距的新型钻头,取得了专利,专利号为RU214925,见图7^[8,13-14]。



1—标准扇形块;2—形状变化了的扇形块;3—水口

图7 新钻头结构

Fig.7 Design of the new drill bit

从图7可见,在钻头胎体上有扇形块1、2和水口3。在胎体一半唇面上为标准扇形块1,其形状是没有变化的,而在另一半唇面上的扇形块2,形状是有变化的,其上的凹槽朝外,面向孔壁。

钻头的参数是根据计划钻进孔段的岩石物理力学性质确定的,钻头试验是在克拉斯诺雅尔地质公司的奥林匹克矿区进行的。试验了4个钻头,总进尺830 m。试验钻进的岩石是石英双云母低碳片岩,可钻性等级为7~9级。整个地质剖面的岩石都是各向异性程度很高的岩石。

钻孔弯曲测量是用AB140-GR(2G)型测斜仪进行的,测量步长为10 m。试验的金刚石钻头在生产试验条件下得到的结果及其对比见表1^[13]。

为了进行对比,取了先前在“东方”采石场钻进的、开孔角度和空间条件与之非常相近的2号钻孔。两个钻孔之间的距离为50 m。测斜结果表明,利用试验钻头钻进时,钻孔自然弯曲强度大大降低了。在对比的这两个钻孔(1号钻孔和2号钻孔)中,试验

表1 唇面偏心钻头和标准钻头钻进测斜结果对比
Table 1 Comparison of the inclination measurement results of the hole sections drilled by the lip eccentric bit and the standard bit

孔号	钻头类型	试验孔段/m	初始顶角/(°)	终点顶角/(°)	钻孔弯曲强度/ $[(^{\circ}) \cdot (100\text{m})^{-1}]$	降低/%
1	试验钻头	0~350	30.3	24.6	1.62	76
2	标准钻头	0~115	21.8	13.9	6.87	
3	试验钻头	0~220	29.7	32.4	1.22	10
	标准钻头	280~390	33.3	34.8	1.36	
4	试验钻头	266~467	34.4	39.7	2.63	16
	标准钻头	467~630	39.7	44.8	3.13	

钻头比标准钻头钻进时的钻孔弯曲强度降低了76%。在其它两个单个钻孔(3号钻孔和4号钻孔)的试验中,试验钻头也比标准钻头钻进的钻孔弯曲强度降低了10%~16%。钻头和地层的遇层角为35°~45°,根据对分析式(2)和图3中的曲线判断,试验钻头的弯曲力矩 $M_{\text{钻头}}$ 与翻转力矩 M_{on} 的最大值非常相近。

5 分析与建议

(1) 钻探工程中,各向异性岩石是常见的岩石。严格说来,绝大多数岩石都是各向异性的,各向同性的岩石是很少见到的,只是各向异性的程度不同。在各向异性岩石钻进中,由于岩石不同方向上的强度不同,岩石破碎难度不同,所以钻进时钻孔弯曲(偏斜)是自然的,是正常现象。但是,地质方面和钻探施工单位一般要求打垂直孔,于是钻孔弯曲就成了问题,要求解决。

(2) 各向异性岩石钻进中,钻孔之所以容易弯曲是因为在岩石被破碎时产生的反力及其对钻头产生的翻转力矩所致。为了减缓或平衡这个翻转力矩,俄罗斯专家提出了利用偏心唇面钻头产生的弯曲力矩来控制(平衡)翻转力矩的办法来解决这个问题。这是一个新的设计思想,是个创新。

(3) 按照上述思路设计的钻头获得了俄罗斯专利,在生产试验中得到了好的效果,证明了利用这种新型钻头钻进各向异性地层来控制钻孔弯曲程度是成功的,上述设计思路是正确的。

(4) 虽然这种新型钻头钻进各向异性地层、防止钻孔严重弯曲是有效的,但只是定性的。在定量

方面,钻头唇面偏心距 e 多大是最优的,尚未解决,需要进一步研究来确定。

(5) 中国目前尚未看到有关利用唇面偏心钻头来钻进各向异性地层,以控制钻孔弯曲强度的报道,建议中国有关单位和专家对此加以研究和试验,以解决各向异性地层钻进时产生的钻孔严重弯曲问题。

参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new Generation PDC bit used for deep drilling [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 39-48.
- [3] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 74-79.
- [4] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):88-92.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitier wing bit [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 88-92.
- [5] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].武汉:中国地质大学出版社,2013.
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013.
- [6] 朱恒银.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
ZHU Hengyin. Research and application of diamond bit for deep geological drilling [M]. Wuhan: The Press Of The China University Of Geosciences, 2014.
- [7] 朱恒银.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [8] Скоромных В В, Калинин А Г. Направленное бурение [M]. Москва: Издательство Высшее нефтегазовое образование, 2009.
- [9] Нескоромных В В, Гпетенёв П, Лневеров А, et al. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых

- анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4):30-40.
- [10] Скоромных В В. Разрушение горных пород при бурении [М]. Красноярск: Издательство СФУ, 2014.
- [11] Скоромных В В. Направленное бурение и основы кернометрии [М]. Красноярск: Издательство СФУ, 2012.
- [12] Дудюков Е Ю, Власюк В Е, Спирин В Е. Алмазный инструмент бурения направленных и многоствольных скважин [М]. Тула: Издательство ЗАО «Гриф и К», 2007.
- [13] Нескоромных В В, Петенев П Г, Иванов Д С. Основы проектирования буровых инструментов с эксцентриситетом вооружения торцевой части для бурения анизотропных горных пород [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2024, 2(374):63-69.
- [14] Нескоромных В В, Петенев П Г, Попова М С, et al. Алмазная коронка для бурения [Р]. Номер патента: RU 214925 U1, Патентное ведомство: Россия, пГод. публикации: 2022, Номер заявки: 2022112369 Дата регистрации: 04.05.2022 Дата публикации: 21.11.2022..
- [15] Спирин В И, Будюков Ю Е, Нескоромных В В, et al. Алмазная коронка для бурения [Р]. Заявка: 2014132259/03, 2014.08.05, Дата начала отчета срока действия патента: 2014.08.05, Дата подачи заявки: 2014.08.05, Опубликовано: 2014.12.10.
- [16] Кривошеев Владимир Васильевич Патент РФ №16205906 «Алмазная буровая коронка» [Р]. Дата подачи заявки: 17.10.1988. Дата публикации: 15.01.1991.
- [17] Нескоромных В В, Попова М С, Парахонько Е В. Разработка породоразрушающего инструмента с резами PDC [J]. Инжиниринг георесурсов, 2020, 331(2):131-138.
- [18] Чихоткин А В. Совершенствование методики проектирования инструмента с резами PDC равнопрочного профиля с учетом особенностями механизма разрушения горных пород и сопротивления среды [D]. Россия, г. Москва; Российский государственный геологоразведочный университет, 2020..
- [19] Третьяк А А, АКБорисов. Классификация поломок пласти PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин [С]//Результаты исследований -2020; Материалы 5-ой Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ) - Новочеркасск, 2020; 252-254.
- [20] Мингазов Р Р, Ишбаев Г Г, Балута А Г, et al. снижение вибраций в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC долот [J]. Бурение и нефть, 2021 (7): 13-18.
- [21] Нескоромных В В, Попова М С, Лиу Б. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Россия, г. Красноярск, 2021, 323(9):119-127.
- [22] Нескоромных В В, Попова М С, Комаровский И А, et al. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани [J]. Россия, г. Красноярск, 2022, 3333(4):181-192.
- [23] Нескоромных В В, Попова М С, Чихоткин А В. Методика проектирования долот с резами PDC, учитывающая динамические процессы резания - скалывания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020 (2):13-18.
- [24] Нескоромных В В, Попова М С, Зотов З Г, et al. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Инжиниринг георесурсов, 2022, 333(2):81-89.
- [25] Нескоромных В В, Попова М С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного Института, 2019, 240:701-710.
- [26] Нескоромных В В, Попова М С, Лиу Б. Разрушение Горных Пород При Бурении Скважин Алмазным Буровым Инструментом [М]. Красноярск: Россия, Сибирский федеральный университет, 2020.
- [27] Нескоромных В В. Оптимизация В Геологоразведочном Производстве [М]. МоскваКрасноярск: Сибирский федеральный университет, 2015.
- [28] Нескоромных В В, Попова М С, Харитонов А Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания - скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Инжиниринг георесурсов, 2020, 331(10):40-48.
- [29] Буканов А А, Горшков Л К, Осецкий А И, et al. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Разведка и охрана недр, 2013(7):44-49.
- [30] ВКоротков А. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения [J]. Науки о Земле и недропользование, 2011, 39(2):205-208.
- [31] Борисов К И. Современные Методы Оценки Сопротивления Горных Пород Резанию-Скалыванию При Бурении Долотами PDC [М]. Томск: ТПУ, 2013.
- [32] Третьяк А Я, Попов В В, Гроссу А Н, et al. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно - аналитический бюллетень, 2017, 8:225-230.

(编辑 王跃伟)