

各向异性岩石破碎过程分析及其钻进用钻头设计研究

汤凤林^{1,2}, 沈中华², 段隆臣¹, 彭莉², 柳少青², ЧИХОТКИН В. Ф.¹
(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214174)

摘要: 钻探工程施工中经常遇到各向异性岩石。钻进各向异性岩石时,不同方向上的岩石强度是不同的。在垂直地层方向上的岩石最容易钻进破碎,其他方向破碎阻力较大,因此岩石压挤核成椭圆形。轴载用于克服岩石的内摩擦阻力和克服来自岩石破碎时产生的反力。在岩石反力垂直分力的作用下,对钻头产生翻转力矩。在此翻转力矩的作用下,钻头偏斜,钻孔弯曲,直接影响钻进效率和钻孔质量。因此,要采取措施解决这个翻转力矩问题。俄罗斯博士 СКОРОМНЫХ В. В. 教授等对此进行多年研究,提出了宜用钻头设计的新思路。

关键词: 各向异性岩石; 翻转力矩; 钻孔弯曲; 钻探技术经济指标; 新型钻头设计

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)11-0083-06

Analysis on Anisotropic Rock Fragmentation Process and Research on the Drill Bit Design/TANG Feng-lin^{1,2}, SHEN Zhong-hua², DUAN Long-chen¹, PENG Li², LIU Shao-qing², CHIKHOTKIN V. F.¹ (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China)

Abstract: Anisotropic rocks are often encountered in drilling engineering construction; while drilling, the anisotropic rocks strengths in different directions are not the same. The rocks that are vertical to the strata are broken easily, but those drilling in other directions have big fragmentation resistance, therefore the core part of rock is deformed into ellipsoidal shape by extrusion. Axial drilling load is mainly used for overcoming internal friction resistance in the rock and the reactions from the rock fragmentation. Under the action of vertical component of rock reaction, overturning moment is produced to the drill bit; under the action of the overturning moment, drill bit is deflected and borehole is deviated, which have direct influence on the penetration rate and hole quality. Doctor СКОРОМНЫХ В. В., who is a Russian professor, and some others have made a lot of studies in resolving the overturning moment, a new idea of drill bit design is proposed for drilling in the anisotropic rocks.

Key words: anisotropic rock; overturning moment; drill hole deviation; drilling technical results and economic indicators; design of new type drill bit

1 问题的提出

钻探工程中常常遇到各向异性(非各向同性)岩石。从岩石力学和岩石破碎原理得知,钻进各向异性岩石时,不同方向的强度是不同的。在垂直地层方向上岩石最容易钻进破碎,其他方向破碎阻力较大,因此破碎核成椭圆形(见图1a)。轴载 P 用于克服岩石的内摩擦阻力和克服来自岩石破碎的反力,在岩石反力垂直分力 P_{\parallel}^B 和 P_{\perp}^B 的作用下,对钻头产生翻转力矩 $M_{\text{оп}}$ (见图1b), $M_{\text{оп}} = P_{\parallel}^B a - P_{\perp}^B c$ 。在这个翻转力矩的作用下,钻头将偏离中心线一个角度 Ψ (见图1c),结果是钻头偏斜,钻孔弯曲,直接影响钻进效率和钻孔质量。因此,要采取措施解决这个翻转力矩 $M_{\text{оп}}$ 问题^[1-6]。

2 各向异性岩石破碎模拟分析^[7-22]

钻探工程中遇到的各向异性岩石多为层状岩石或片状岩石,其破碎特点是不同方向上的强度不同,弹性模量:

$$E_{\parallel} / E_{\perp} \geq 1$$

式中: E_{\parallel} 、 E_{\perp} ——分别为岩石顺着层理、片理和垂直层理、片理的弹性模量,Pa。

根据虎克定律知:

$$\xi_{\parallel} = \sigma / E_{\parallel} > \xi_{\perp} = \sigma / E_{\perp}$$

式中: ξ_{\parallel} 、 ξ_{\perp} ——分别是岩石顺着层理、片理和垂直层理、片理的相对变形; σ ——导致岩石破碎的应力,Pa。

2.1 球形压模破碎岩石

收稿日期:2017-07-15

基金项目:江苏省江苏双创团队资助项目(编号:苏人才办[2014]27号)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士、俄罗斯自然科学院院士、国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,ftang_wuhan@aliyun.com。

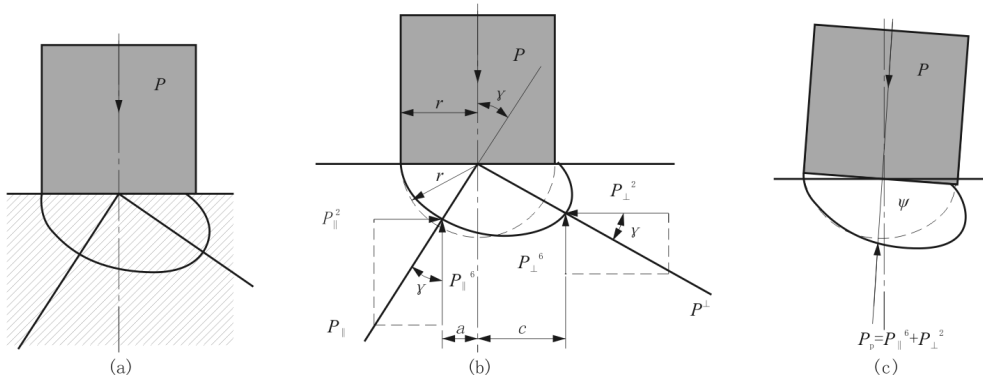
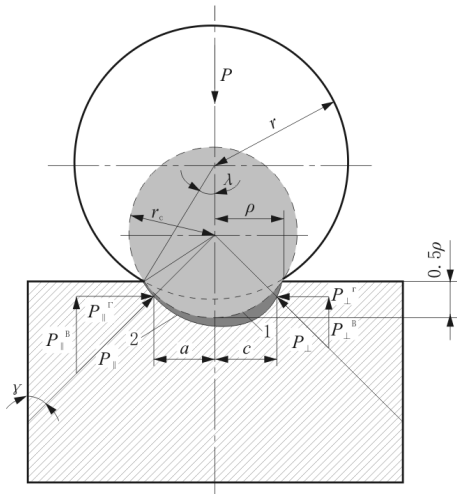


图1 各向异性岩石钻进时岩石破碎示意图

图2为球形压模破碎岩石示意图。从图2可见,各向异性岩石钻进时,与各向同性岩石钻进时(轮廓线1)不同,在垂直层理方向上的岩石压缩部分变形情况呈轮廓线2所示。岩石变形时,作用在球形压模上的力 P ,主要用来克服岩石变形地层中的内摩擦力和克服岩石的弹性反力。可以把作用在岩石顺层方向和垂直方向并作用在岩石压挤核(轮廓线2)上的岩石弹性反力 $P_{||}$ 和 P_{\perp} 分解成垂直分力 $P_{||}^B$ 和水平分力 $P_{||}^F$ 。



1—压模切入岩石轮廓图;2—岩石压挤核轮廓图
图2 球状压模破碎岩石过程分析示意图

作用在岩石上的垂直分力为:

$$P_{||}^B = p \cos^2 \gamma (1 - \tan \varphi_{||})$$

$$P_{\perp}^B = p \cos^2 \gamma (1 - \tan \varphi_{\perp})$$

作用在岩石上的水平分力为:

$$P_{||}^F = p \sin \gamma \cos \gamma (1 - \tan \varphi_{||})$$

$$P_{\perp}^F = p \sin \gamma \cos \gamma (1 - \tan \varphi_{\perp})$$

式中: γ ——作用力 P 与地层层面的夹角, $(^\circ)$; $\varphi_{||}$ 、 φ_{\perp} ——分别是岩石与岩层平等方向和垂直方向上

的内摩擦角, $(^\circ)$ 。

岩石破碎垂直反力 $P_{||}^B$ 和 P_{\perp}^B 作用点,同压模中心线的距离分别是 a 和 c ,故产生的翻转力矩为 $M_{\text{on}} = P_{||}^B a - P_{\perp}^B c$ 。

从图2可见,压挤核半径 $r_c = 0.5\rho/\sin\lambda$,压模下最大剪应力时破碎深度为 0.5ρ 的角度 λ 为 $51^\circ \sim 53^\circ$,所以 $r_c = 1.25\rho$ 。 $a = r_c \sin \gamma$, $c = r_c \cos \gamma$ 。

所以 $M_{\text{on}} = 1.25P\rho F(\gamma)$,式中 $F(\gamma)$ 是 M_{on} 与遇层角有关的函数。

压模切入岩石深度 h 按下式计算^[15]:

$$\rho = \sqrt{dh + h^2}$$

故

$$M_{\text{on}} = 1.25P \sqrt{dh + h^2} F(\gamma) \quad (1)$$

式中: P ——钻头轴载,kN;其余符号的意义同前。

切削具切入岩石的深度 h 为:

$$h = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{P}{\pi N \rho_{\text{m}} (1 + \tan \varphi)}} \quad (2)$$

式中: h ——切削具切入岩石的深度,m; d ——碎岩切削具直径,m; ρ_{m} ——轴载 P 施载方向上各向异性岩石的硬度,Pa; N ——同时作用在孔底上的切削具个数; φ ——轴载 P 施载方向上测量的岩石内摩擦角, $(^\circ)$ 。

2.2 尖楔形压模破碎岩石

图3为尖楔形压模碎岩示意图。

尖楔子宽度为 l ,刃尖角为 2ψ 。在与切削具侧面成 90° 角度方向上的两个岩石反力 N 是破碎岩石的阻力。弹性反力 N 通过岩石压挤核对压模施加作用。切削具垂向位移时在切削具侧面上产生的摩擦阻力为 T :

$$T = N\mu$$

式中: μ ——切削具与岩石的摩擦系数。

岩石弹性反力:

$$N = S_{CM} P_{III} (1 + \tan\varphi)$$

式中: S_{CM} ——切削具侧面支承表面的挤压面积;
 P_{III} ——岩石硬度; $\tan\varphi$ ——内摩擦角正切(内摩擦系数)。

切削具表面摩擦力 T :

$$T = N\mu$$

式中: μ ——切削具与岩石的摩擦系数。

把这些作用力投影到垂直剖面上,得到:

$$\sum Y = P - 2N\mu\cos\psi - 2N\sin\psi = 0$$

由上式得:

$$N = P / [2(\mu\cos\psi + \sin\psi)]$$

岩石反力 N 的挤压面积 $S_{CM} = al$, 其中 l 为压模宽度, 因为 $\tan\psi = a/h$, 所以 $S_{CM} = htan\psi l$, $N = htan\psi l P_{III} (1 + \tan\varphi)$ 。

$$h = \frac{P}{2\rho_{III} l \tan\psi (\mu\cos\psi + \sin\psi) (1 + \tan\varphi)} \quad (3)$$

式中: P_{III} ——轴载 P 作用方向上各向异性岩石硬度, Pa; l ——压模宽度, m; φ ——轴载 P 作用方向上测得的变形岩石层内的内摩擦角, ($^{\circ}$); μ ——轴载 P 作用方向上测得的压模和岩石的摩擦系数。

与球形压模模拟类似, 作用在尖楔形压模的翻转力矩 M_{OII} 为:

$$M_{OII} = PaF(\gamma) = Ph\tan\psi F(\gamma) \quad (4)$$

式中: P ——压模轴载, kN; a ——压模下面挤压面积的宽度, m; ψ ——压模刃尖半角, ($^{\circ}$); h ——压模切入岩石深度, m; $F(\gamma)$ ——与遇层角 γ 有关的函数。

2.3 平底楔形压模破碎岩石

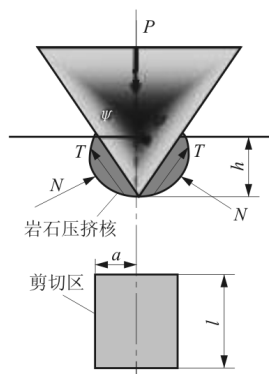


图 3 尖楔形压模碎岩深度计算用示意图

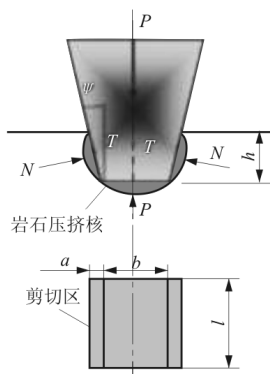


图 4 平底楔形压模碎岩深度计算用示意图

对于端面呈等腰梯形(宽度为 b)的平底压模(图 4)来说, 岩石挤压面积由两个部分组成: 压模底端平面面积 bl 和两个侧面面积(挤压是由压模斜侧

面承受的)斜侧面面积 $S_{CM} = htan\psi l$ 。

弹性反力:

$$N = S_{CM} P_{III} (1 + \tan\varphi)$$

岩石反力:

$$P_P = blP_{III} (1 + \tan\psi)$$

作用在切入岩石压模上的力为:

$$\sum Y = 2N\sin\psi + P_P + 2T\cos\psi - P = 0$$

切削具表面摩擦力 T :

$$T = N\mu$$

故:

$$N = \frac{P - P_P}{2(\sin\psi + \mu\cos\psi)}$$

等腰梯形平底楔形压模切入岩石深度为:

$$h = \frac{P - bl\rho_{III} (1 + \tan\varphi)}{2\rho_{III} \tan\psi (\mu\cos\psi + \sin\psi) (1 + \tan\psi)} \quad (5)$$

式中: ρ_{III} ——轴载 P 作用方向上的各向异性岩石硬度, Pa; l ——压模宽度, m; φ ——轴载 P 作用方向上测得的变形岩石层内的内摩擦角, ($^{\circ}$); μ ——轴载 P 作用方向上测得的压模和岩石的摩擦系数。

作用到等腰梯形平底楔形压模上的翻转力矩为:

$$M_{OII} = P(a + 0.5b)F(\gamma) = P(htan\psi + 0.5b)F(\gamma) \quad (6)$$

式中: P ——压模轴载, kN; a 、 b ——分别是压模端面的尺寸, m; ψ ——压模圆锥度刃尖半角, ($^{\circ}$); h ——压模切入岩石深度, m。

从上述讨论分析可见, 各种不同压模模拟钻进试验时, 各向异性岩石对钻头端面均产生翻转力矩。翻转力矩的大小主要与压模切入深度、轴载、压模(碎岩工具)形状尺寸、岩石各向异性参数和遇层角等有关。各向异性岩石的性质是岩石本身固有的, 钻进时对钻头产生翻转力矩是必然的, 钻孔和岩层的遇层角是地质方面布置钻孔时要求的, 这些都是不好改变的。因此, 只能从钻头设计方面做文章, 把产生的翻转力矩的负面作用减小到最低限度。

3 对策钻头的设计

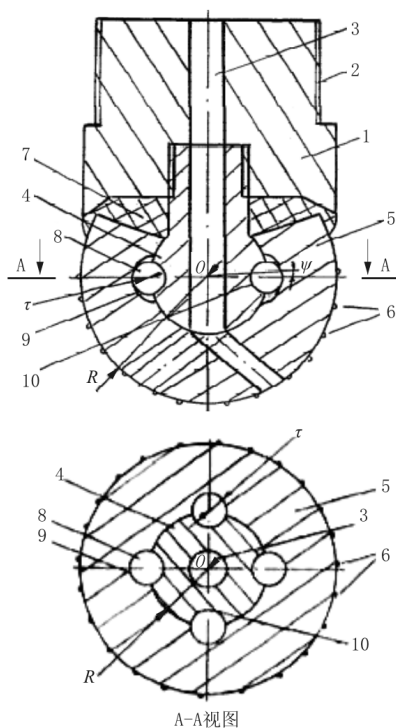
设计对策钻头的必要性在于钻进各向异性岩石时, 由于钻头破碎孔底过程中产生孔底破碎不均匀而使钻头端面受到翻转力矩的作用, 引起钻头偏斜、上部钻柱弯曲和钻孔弯曲。俄罗斯博士、西伯利亚联邦大学钻探教研室 Скоромных В. В. 教授等对

此进行了多年研究,提出了各向异性岩石钻进用钻头的新的设计思路^[7-22]。

3.1 各向异性岩石钻进用钻头设计

设计的钻头可以是取心钻头或不取心钻头^[9]。

设计的不取心钻头(见图5)包括有带螺纹2的钻头体1和冲洗用的内通道3。球形胎体5通过球形轴颈4与钻头体1连接起来。球形胎体5和球形轴颈4的中心(O点)是重合的。碎岩切削具6置于胎体5的球状外表面上。钻头体1和胎体5之间置有弹性保护密封件7。



1—钻头体;2—螺纹;3—冲洗用内通道;4—轴颈;5—胎体;
6—碎岩切削具;7—保护密封件;8—钢球;9—胎体内侧槽;
10—轴颈外侧槽

图5 不取心钻头

为了把扭矩从钻头体1传送到胎体5上,在胎体5的内表面和轴颈4的外表面的接触表面的侧槽中装有钢球8。钢球8装在胎体内侧槽9和轴颈外侧槽10中。侧槽9和10位于通过轴颈4和胎体5球面中心的同一轴线水平上。轴颈4、胎体5和分别安装在胎体5内侧槽9和轴颈4外侧槽10中的钢球8,把胎体5和钻头体1形成了一个铰链连接。这个铰链连接可以保证把扭矩传到胎体5上,并可保证胎体可以在垂直剖面上摆动。

胎体5可以在垂直平面内摆动,是由胎体内侧槽9的形状和尺寸决定的。为了把钢球安置在胎体

5内,内侧槽9在钢球中心垂直方向上上下各加长了L距离。

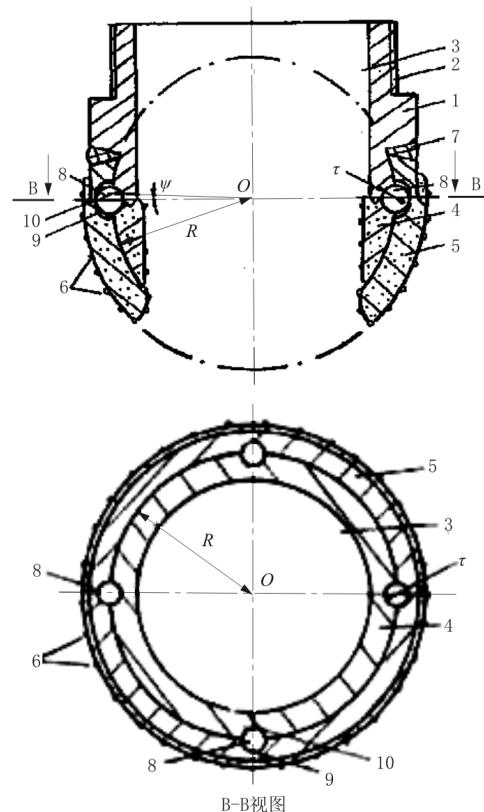
$$L = (R + r) \tan \psi$$

式中: R ——轴颈4球形外表面的半径,等于胎体5球形内表面的半径; r ——位于胎体5内侧槽9和轴颈4的外侧槽10中的钢球8的半径; ψ ——胎体5在垂直平面内可以摆动的最大角度, ($^{\circ}$)。

同时,胎体5内表面中的内侧槽9,在宽度上严格等于钢球8的直径,这样可以保证把胎体5相对轴颈4固定在一个水平面上,排除了胎体5相对轴颈4的转动。侧槽10的尺寸严格与安置于其中钢球的直径相等。

冲洗用内通道3通过轴颈4和胎体5,从钻头端部出来。

这种结构可以用于不取心钻头(见图5)上,也可用于取心钻头(见图6)上。



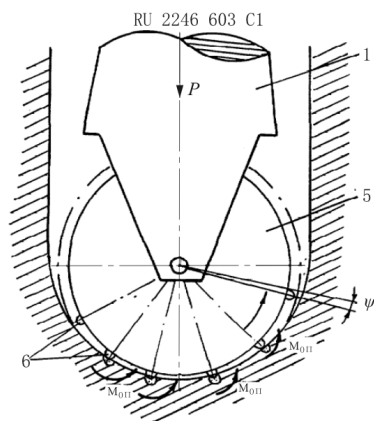
1—钻头体;2—螺纹;3—冲洗用内通道;4—轴颈;5—胎体;
6—碎岩切削具;7—保护密封件;8—钢球;9—胎体内侧槽;
10—轴颈外侧槽

图6 取心钻头

取心钻头上的冲洗液通道3比较宽,除了供给冲洗液外,还可以使钻进时形成的岩心通过。

3.2 钻头如何工作

在钻进与钻头中心线成一定角度的各向异性岩石时,胎体5上的碎岩切削具6在轴载的作用下切入岩石(见图7),形成变形和破碎区。由于岩石相对层理和片理方向上的硬度、弹性和塑性性质各不相同,所以碎岩切削具6下面的变形部分呈不对称形状,而决定各个翻转力矩 M_{on} 的岩石垂直反力,对碎岩切削具6本身的作用,在数值上是相同的。岩石垂直反力的不同,正是岩石弹性、塑性等性质各向异性决定的。作用在各个切削具上翻转力矩的总和,决定着作用到钻头端面上翻转力矩的总和 ΣM_{on} 。



1—钻头体;5—胎体;6—碎岩切削具
图7 钻头工作示意图

在本设计中, ΣM_{on} 可使胎体5摆动的角度为 ψ ,根据 Скоромных В. В. 教授等的试验和分析研究结果,这个 ψ 角等于 $0.3^\circ \sim 1^\circ$ 。而且,钻头胎体5是球形的,所以摆动这个角度不会引起把翻转力矩传到上方的钻柱上,钻头本身也不会偏斜。弹性密封件7可以保证胎体5和轴颈4铰链连接的密封性,并可保证胎体在垂直平面转动时对胎体5进行弹性回位。

胎体5的形状和及其直径等于钻头外径,可以保证摆动 ψ 角度时不会对孔壁产生偏斜力 P_ψ (钻头轴载, dN)。在这种情况下,球形胎体5摆动时,胎体严格内接(切)孔底部分的尺寸,消除了胎体对孔壁的压力,不会切削孔壁,因而消除了孔筒弯曲^[9]。

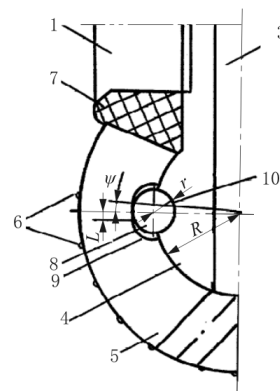
扭矩从钻头体1传到胎体5,是因为在铰链连接中有其中心线与胎体5和轴颈4的球形表面中心(O点)相重合的钢球8存在所致。胎体5可以在垂直平面中的摆动,是因为胎体5、轴颈4是铰链连接,以及侧槽9的形状尺寸决定的。侧槽9在其中心线方向上呈对称并加长了L距离,且其宽度与钢球8直径完全一致。因此,这个铰链连接保证了把

扭矩从钻头体1和轴颈4传到胎体5上。

侧槽9从钢球8中心开始、向其轴线两侧加长的距离L如下计算(见图8):

$$L = (R + r) \tan \psi$$

式中: ψ ——胎体5在垂直平面内可能摆动的最大角度, $(^\circ)$;R——轴颈外球状表面的半径,等于胎体内球状表面的半径,m;r——位于胎体5和轴颈4之间的侧槽9和10中的钢球半径,m。



1—钻头体;3—冲洗用内通道;4—轴颈;5—胎体;6—碎岩切削具;7—保护密封件;8—钢球;9—胎体内侧槽;10—轴颈外侧槽

图8 计算胎体内表面上装置钢球用侧槽尺寸^[9]

3.3 具体设计尺寸

钻进各向异性岩石可以使用不取心钻头和取心钻头。这些钻头的结构参数是如下计算的:胎体5在垂直平面中的可能摆动角度为 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ (可按 1° 计算),胎体5球面外表面的直径等于钻头的外径。轴颈球状外表面半径 $R = 20 \text{ mm}$ 、钢球半径 $r = 5 \text{ mm}$ 和 $\psi = 1^\circ$ 时,侧槽9的加长距离 $L = (20 + 5) \tan 1^\circ = 0.43 \text{ mm}$,即侧槽9的纵向尺寸等于钢球8的直径(10 mm)加上 $2L(0.43 \text{ mm}) = 10.86 \text{ mm}$ 。这个计算结果与 $\varnothing 76 \text{ mm}$ 不取心钻头是相呼应的^[9]。

对于同样外径的取心钻头来说,可能是 $R = 30 \text{ mm}$, $r = 5 \text{ mm}$ 。 $\psi = 1^\circ$ 时, $L = (R + r) \tan \psi = 0.6 \text{ mm}$,则侧槽9的纵向尺寸为 11.2 mm ^[9]。

4 讨论和建议

根据上述研究,可做如下讨论和建议。

(1)各向异性岩石是钻探工程中经常遇到的岩石,多呈层状或片状,在不同方向上物理力学性质不同,在钻进过程中,岩石反力对钻头产生翻转力矩,导致钻头偏斜,钻孔弯曲,影响钻探的技术经济指标。

(2)各向异性岩石的物理力学性质是客观存在的,钻孔方向及其与地层的遇层角度也是地质方面与施工单位共同研究确定的,是不好改变的。因此,若想解决这个翻转力矩问题,除了钻探工艺之外,只能从钻头结构设计方面着手进行探讨和研究。

(3)俄罗斯教授提出的对策钻头设计思想具有创新性质,结构合理,针对性强,巧妙地解决了翻转力矩对钻头的负面作用,将其减少到了最低程度,钻头可以不再偏斜,钻孔可以不再弯曲,对于保证各向异性岩石中的正常钻进具有一定的理论意义和实际价值。这是俄罗斯的一项发明专利,专利号是2446603,这种设计思想值得我们借鉴,进行探讨、试验和研究。

参考文献:

- [1] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2014.
- [2] 朱恒银,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
- [3] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2012.
- [4] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进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.
- [5] 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.
- [6] 汤凤林,А.Г.加里宁,段隆臣.岩心钻探学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [7] Способизбирательногодробленияалмазов:Россия,2492138[P].
- [8] Алмазнаякоронкадлякомпановкибуровогоснаряда:Россия,2078193[P].
- [9] Буровойинструмент:Россия,2246603[P].
- [10] Алмазнаякоронкадлябурения:Россия,148333[P].
- [11] Алмазнаяимпрегнированнаябуроваякоронка:Россия,138678[P].
- [12] КубасовВ.В.Повышениеэффективностибурениягеологоразведочныхскважинвтвердыхпородахпутем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента[D].Московский государственный геологоразведочный университет,2015.
- [13] Г.П.Богацьрева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноалмазами [С]//Сборник научных трудов,Киев,2011:97-102.
- [14] Скоромных В.В. и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета,2015,Т.326(4):30-40.
- [15] Скоромных В.В. и др. Анализ процесса разрушения анизотропной породы шарошечными долотами [J]. Известия Томского политехнического университета,2015,Т.326(4):80-89.
- [16] Будюков Ю.Е.,СпиринВ.И.,КубасовВ.В.Повышение прочностных свойств природных алмазов в аппарате вихревого слоя[С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов X V II научно-технической конференции. Тула:Изд.-ств «Инновационные технологии»,2015:93-98.
- [17] КубасовВ.В.,Будюков Ю.Е.,СпиринВ.И.Повышение работоспособности алмазных коронок криогенной обработки [С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно-технической конференции Тула:Изд.-ство «Инновационные технологии»,2013:45-50.
- [18] КубасовВ.В.,Будюков Ю.Е.,СпиринВ.И.Выбор матричных композиций для алмазного породоразрушающего инструмента [С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно-технической конференции Тула:Изд.-ство «Инновационные технологии»,2014:11-16.
- [19] Будюков Ю.Е.,КубасовВ.В.,СпиринВ.И.Характер износа алмазной коронки [С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов X V II научно-технической конференции Тула:Изд.-ство «Инновационные технологии»,2015:89-92.
- [20] Кубасов В.В. Новые технологии повышения эффективности работы алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень,2014,10:383-387.
- [21] КубасовВ.В.,Будюков Ю.Е.,СпиринВ.И.Зависимость работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента от смачиваемости алмаза металлом [С]//Инновационные наукоемкие технологии: тезисы докладов международной научно-технической конференции Тула:Изд.-ство «Инновационные технологии»,2014:6-11.
- [22] Кубасов В.В. Исследование износа алмазных коронок [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-аналитический журнал),2015,4:6-11.