

南极冰岩界面钻进过程孔斜规律研究及调控装置设计

张永田^{1,2}, 陈晨^{*1,2}, 涂桂刚^{*1,2}, 王如生^{1,2}, 马英瑞^{1,2}, 刘祥^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 南极冰层下基岩取心, 对于研究南极冰川形成的历程和全球气候变化等方面具有重要的意义。钻遇冰层和岩层的倾斜界面时, 极易发生孔斜, 影响基岩取心的质量甚至成败。本文分析了钻头在冰岩界面钻进过程中的受力状态, 探究了地层倾角、钻压、转速、机械钻速、单位体积切削功等因素对钻头受力及孔斜规律的影响。最后, 基于满眼防斜的原理设计了针对冰岩界面防斜的垂直入岩装置。

关键词: 极地钻探; 冰岩界面; 孔斜规律; 地层自然造斜力; 切削力; 垂直入岩装置

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0098-08

Research on hole inclination law during the drilling at Antarctic ice and rock interface and design of the control device

ZHANG Yongtian^{1,2}, CHEN Chen^{*1,2}, TU Guigang^{*1,2}, WANG Rusheng^{1,2}, MA Yingrui^{1,2}, LIU Xiang^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Cores from bedrock beneath the Antarctic ice sheet are important for studying the history of Antarctic glacier formation and global climate change. When drilling the inclined interface between ice and rock, it is very easy for hole inclination to occur, affecting the quality and even the success of bedrock coring. This paper analyses the force state of the drill bit during the drilling process at the ice and rock interface, and investigates the effects of factors such as formation inclination, drilling pressure, rotational speed, mechanical drilling speed and cutting work per unit volume on the force on the drill bit and hole inclination law. Finally, a vertical rock entry device was designed based on the principle of full-hole anti-slanting for the ice and rock interface.

Key words: polar drilling; ice rock interface; hole inclination law; natural inclination force of the formation; cutting force; vertical rock entry device

0 引言

南极冰下基岩样品对于古气候的重建、极地地质的研究、地壳的形成和演变过程等具有重要的意

义^[1-4]。然而, 地表条件恶劣, 给运输及操作人员带来严峻的考验, 并且钻进过程中需要经历冰层、冰岩夹层、冰下基岩等复杂地质条件, 这使得南极冰

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-08-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.015

基金项目: 国家重点研发计划“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”(编号: 2021YFA07191)课题3“冰岩界面及冰下基岩多工艺取心钻进机理与方法”(编号: 2021YFA0719103)

第一作者: 张永田, 男, 汉族, 1997年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事非常规能源钻采研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, 460039025@qq.com。

通信作者: 陈晨, 男, 汉族, 1965年生, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程钻凿技术、基础工程设计、施工与计算机模拟研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街938号, chenchen@jlu.edu.cn;

涂桂刚, 男, 汉族, 1986年生, 工学博士, 主要从事结构优化与找形研究、能源开发技术研究, 吉林省长春市西民主大街938号, gtu@jlu.edu.cn。

引用格式: 张永田, 陈晨, 涂桂刚, 等. 南极冰岩界面钻进过程孔斜规律研究及调控装置设计[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 98-105.

ZHANG Yongtian, CHEN Chen, TU Guigang, et al. Research on hole inclination law during the drilling at Antarctic ice and rock interface and design of the control device[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 98-105.

下基岩取心难度极大。当钻具钻至冰岩界面时极易造成孔斜,严重影响钻孔质量和作业进度^[5-7]。

钻柱力学和钻头侧向力是深井井斜研究的重点。Lubinski^[8]利用连续梁理论研究了直井的钻柱力学问题;白家祉等^[9]研究了钻具下部的受力和变形,应用三弯矩方程,提出地层造斜力公式;Joliansiek等^[10]通过微元分析法建立了三维井眼钻柱力学模型;杨勋尧^[11]通过求解力学模型,研究了地层各向异性对井斜的影响,提出了一个地层造斜率公式。学者们对孔斜机理做了大量的研究,本文在他人研究的基础上,通过微积分方法推导由切削力水平分量及切削力的竖向分量对孔斜的影响因素公式,并分析孔斜受以上因素随钻进深度的影响,为防斜提供理论指导。

钻具防斜通过改变钻具的结构来实现,目前国内外钻具防斜技术有多种,其中钟摆法是通过在钻具适当位置加扶正器,扶正器下部钻具中空产生的钟摆力来抵制钻具偏斜。满眼钻进防斜技术通过减小钻具与钻孔的间隙、提高钻具刚度和扶正器的支撑作用来防斜。离心力防斜技术通过钻具偏重,使钻具产生离心力并公转,钻头的侧向切削力均匀分布于孔壁防斜。导向钻进防斜技术是通过弯外管井下马达产生的离心力和井下马达带动高转速、低转速PDC钻头旋转来防斜。钻具弯曲防斜技术的稳定器之间接有柔性接头使得该段钻杆产生较大的挠度并向前做周期性涡动,带动钻头向下切削孔壁来防斜。复合钻进防斜技术主要利用PDC钻头和中空螺杆组合,结合滑动钻进和螺旋钻进来防斜。本文利用满眼防斜技术设计了针对南极冰岩界面的垂直入岩装置来防斜。

1 冰岩界面孔斜形成机理

当钻头钻至冰岩界面时,在钻头上致使孔斜的因素包括钻头钻进冰层和岩层时产生的切削力水平分量的不同以及切削力的竖向分量的不同。切削力水平分量的不同给钻头一个横向偏斜力,切削力的竖向分量的不同给钻头一个竖向偏斜力。

1.1 切削力水平分量带给环形钻头的扭矩

钻头钻进冰层和岩层时产生的切削力水平分量可由钻头钻进冰层和岩层产生的扭矩进一步计算得到。

钻头切削冰层产生的扭矩由单位体积切削功

E_s 计算^[12]:

$$M_{db} = \frac{ROP}{120n} E_s (R^2 - r^2) \quad (1)$$

式中:ROP——机械钻速,m/h;n——钻头转速,r/min; E_s ——钻头切削冰层的单位体积切削功,MN/m²。

钻头钻进岩石的扭矩一般依据经验公式进行计算,Shamshev等^[13]经过实验得出以下公式(当采用金刚石钻头时):

$$M_{db} = 0.192WOB(R+r) \quad (2)$$

式中:WOB——钻头钻压,N;R、r——钻头内外直径,m。

假设钻进过程中钻头所受的切削力水平分量集中在环形底面的中心位置,既分布在半径为 $r' = \frac{R+r}{2}$ 的圆上,利用微积分方法,钻头微元受到的切削力水平分量为 f ,则每个微元带给钻头中心轴线的扭矩为:

$$w = f \frac{R+r}{2} \quad (3)$$

钻头切削冰层或岩层受到的扭矩为:

$$M = \int_0^{2\pi} w \frac{R+r}{2} \cdot d\varphi \quad (4)$$

因此可由切削扭矩得到钻头外缘微元所受的切削力水平分量为:

$$f = \frac{2M_{db}}{\pi(R+r)^2} \quad (5)$$

钻至冰岩界面时,钻头所受的切削力水平分量如图1所示。

图中,冰岩界面的度数为 Θ ,假设钻进过程中发生微小孔斜,当钻头钻进岩层深度为 H 时,钻头吃入岩石的宽度为 L , $L = \frac{H}{\tan\Theta}$,钻头在岩层中受到的切削力水平分量为:

$$F_{岩} = \int_{-\alpha}^{\alpha} f_{岩} \cos\beta d\beta = 2f_{岩} \sin\alpha \quad (6)$$

其中 $\alpha = \arccos \frac{R-L}{R}$,同理可求钻头在冰层中受到的切削力水平分量为:

$$F_{冰} = 2f_{冰} \sin\alpha \quad (7)$$

钻头受到的切削力水平分量带来的扭矩为:

$$M^* = F_{岩} \times \frac{R+r}{2} + F_{冰} \times \frac{R+r}{2} \quad (8)$$

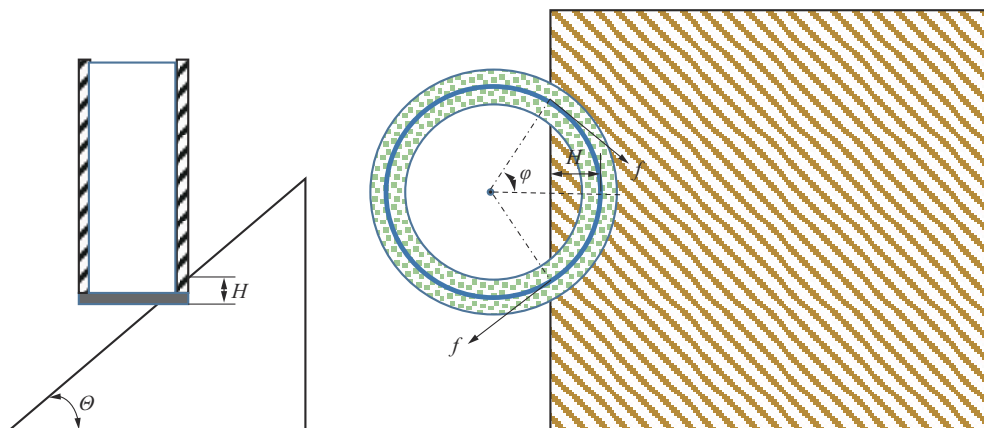


图1 钻头所受切削力水平分量示意

1.2 切削力的竖向分量的差异带给钻头的倾倒力矩

钻头以锐角穿过硬岩层面时有如下的力学模型^[14](如图2所示)。

不同岩性的岩层对钻头的切削力的竖向分量也存在一定差异。由于不同的岩石对钻头切削齿的反作用不同,钻具便会发生偏移,进而使倾倒力矩不同

(如图3所示)。本文先求出钻头在冰层和岩层中的抗压入阻力及它们的比值,再将钻头钻压按此比值分配给钻头,求出冰层对钻头的切削力的竖向分量和岩层对钻头的切削力的竖向分量,再求出冰层区域和岩层区域的几何中心,进而将力集中在几何中心求出倾倒力矩。具体计算步骤如下。

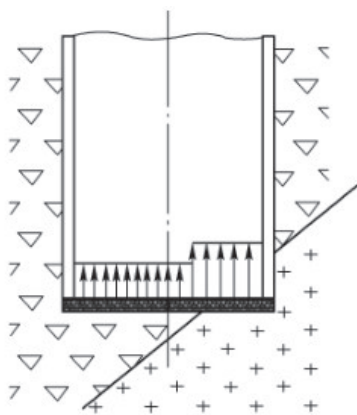


图2 平底钻头底唇阻力分布

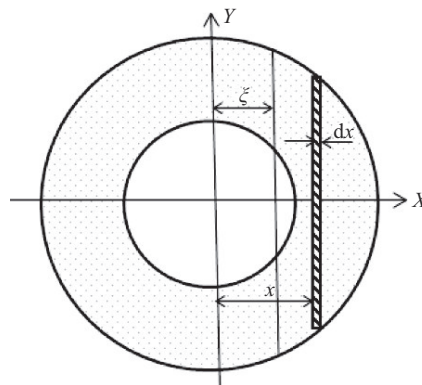


图3 倾倒力矩计算

1.2.1 求岩层和冰层对钻头的抗压入阻力

(1)当 $\xi \geq r$ 时:

$$F_{C岩} = \int_{\xi}^R \sigma_B dF_C = \sigma_B \left(\frac{\pi R^2}{2} - \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} - \xi^2 \arcsin \frac{\xi}{R} \right) \tag{9}$$

$$F_{C冰} = \int_{-R}^{\xi} \sigma_A dF_C - \int_{-r}^{\xi} \sigma_A dF_C' = \sigma_A \left(\frac{\pi R^2}{2} - \pi r^2 + \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} + \xi^2 \arcsin \frac{\xi}{R} \right) \tag{10}$$

(2) $\xi \leq |r|$ 时:

$$F_{C岩} = \int_{\xi}^R \sigma_B dF_C - \int_{\xi}^r \sigma_B dF_C' = \sigma_B \left[\frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} + \xi \left(\sqrt{r^2 - \xi^2} - \sqrt{R^2 - \xi^2} \right) + \xi^2 \left(\arcsin \frac{\xi}{r} - \arcsin \frac{\xi}{R} \right) \right] \tag{11}$$

$$F_{C冰} = \int_{-R}^{\xi} \sigma_A dF_C - \int_{-r}^{\xi} \sigma_A dF_C' = \sigma_A \left[\frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} - \xi \left(\sqrt{r^2 - \xi^2} - \sqrt{R^2 - \xi^2} \right) - \xi^2 \left(\arcsin \frac{\xi}{r} - \arcsin \frac{\xi}{R} \right) \right] \quad (12)$$

(3)同理,当 $\xi \leq -r$ 时:

$$F_{C岩} = \sigma_B \left[\frac{\pi R^2}{2} - \pi r^2 - \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} + \xi^2 \arcsin \frac{-\xi}{R} \right] \quad (13)$$

$$F_{C冰} = \sigma_A \left[\frac{\pi R^2}{2} + \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} - \xi^2 \arcsin \frac{-\xi}{R} \right] \quad (14)$$

式中: dF_C ——以钻头外径为直径的圆的面积元, m^2 ; dF_C' ——以钻头内径为直径的圆的面积元, m^2 ; $F_{C岩}$ ——岩层对钻头的压入阻力, N ; $F_{C冰}$ ——冰层对钻头的压入阻力, N ; σ_B ——岩层抗压入阻力, N/m^2 ; σ_A ——冰层抗压入阻力, N/m^2 ; ξ ——孔底冰层和岩层接触面的 x 坐标, m 。

1.2.2 求钻头在岩层和冰层区域形心坐标

钻头在冰层和岩层中的形心 x 坐标为:

(1)当 $\xi \geq r$ 时:

$$\int_A x dA_{岩层} = \int_{\xi}^R x \cdot 2y dx = 2 \int_{\xi}^R x \sqrt{R^2 - x^2} dx = \frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

则钻头在岩层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{岩} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{\frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\pi R^2}{2} - \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} - \xi^2 \arcsin \frac{\xi}{R}} \quad (16)$$

$$\int_A x dA_{冰层} = \int_{-R}^{-r} x \cdot 2y dx + \int_{-r}^{\xi} x \cdot 2(y - y') dx + \int_r^{\xi} x \cdot 2y dx = -\frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

则钻头在冰层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{冰} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{-\frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\pi R^2}{2} - \pi r^2 + \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} + \xi^2 \arcsin \frac{\xi}{R}} \quad (18)$$

(2)当 $\xi \leq |r|$ 时:

$$\int_A x dA_{岩层} = \int_{\xi}^r x \cdot 2(y - y') dx + \int_r^R x \cdot 2y dx = \frac{2}{3} [(R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} - (r^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}] \quad (19)$$

则钻头在岩层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{岩} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{\frac{2}{3} [(R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} - (r^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}]}{\frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} + \xi \left(\sqrt{r^2 - \xi^2} - \sqrt{R^2 - \xi^2} \right) + \xi^2 \left(\arcsin \frac{\xi}{r} - \arcsin \frac{\xi}{R} \right)} \quad (20)$$

$$\int_A x dA_{冰层} = \int_{-R}^{-r} x \cdot 2y dx + \int_{-r}^{\xi} x \cdot 2(y - y') dx = \frac{2}{3} [(r^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} - (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}] \quad (21)$$

则钻头在冰层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{冰} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{\frac{2}{3} [(r^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} - (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}]}{\frac{\pi(R^2 - r^2)}{2} - \xi \left(\sqrt{r^2 - \xi^2} - \sqrt{R^2 - \xi^2} \right) - \xi^2 \left(\arcsin \frac{\xi}{r} - \arcsin \frac{\xi}{R} \right)} \quad (22)$$

(3)当 $\xi \leq -r$ 时:

$$\int_A x dA_{\text{岩层}} = \int_{-R}^{\xi} x \cdot 2y dx = \frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} \quad (23)$$

则钻头在岩层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{\text{岩}} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{\frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\pi R^2}{2} - \pi r^2 - \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} + \xi^2 \arcsin \frac{-\xi}{R}} \quad (24)$$

则钻头在冰层的形心 x 坐标为:

$$\bar{x}_{\text{冰}} = \frac{\int_A x dA}{A} = \frac{-\frac{2}{3} (R^2 - \xi^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\pi R^2}{2} + \xi \sqrt{R^2 - \xi^2} - \xi^2 \arcsin \frac{-\xi}{R}} \quad (25)$$

式中: $y = \sqrt{R^2 - x^2}$, $y' = \sqrt{r^2 - x^2}$ 。

1.2.3 求钻头受到的倾倒地矩

将钻头钻压按比例分配到钻进冰层和岩层2个部分,求出冰层对钻头的切削力的竖向分量 $F_{\text{反冰}}$ 和岩层对钻头的切削力的竖向分量 $F_{\text{反岩}}$:

$$F_{\text{反冰}} = WOB \cdot \frac{F_{\text{C冰}}}{F_{\text{C冰}} + F_{\text{C岩}}} \quad (26)$$

$$F_{\text{反岩}} = WOB \cdot \frac{F_{\text{C岩}}}{F_{\text{C冰}} + F_{\text{C岩}}} \quad (27)$$

将冰层和岩层的切削力的竖向分量集中到钻头作用岩层和冰层区域形心位置,求出对钻头中心轴线处的倾倒地矩,即:

$$M_C = F_{\text{反岩}} \cdot \bar{x}_{\text{岩}} + F_{\text{反冰}} \cdot \bar{x}_{\text{冰}} \quad (28)$$

1.3 求钻头受到的弯矩

钻头受到的弯矩:

$$M = \sqrt{M_C^2 + M^{*2}} \quad (29)$$

本研究中采用外径 76 mm、内径 38 mm 的孕镶金刚石钻头,机械钻速取 8~12 m/h,冰的单位体积切削功根据美国冻土区研究工程实验室多参数组合测试得出取值范围为 0.54~6.4 MN·m⁻²[15]。极地冰岩夹层中含有多种岩石成分,其中含石英成分较多的花岗岩硬度大,范晓鹏[16]测得的花岗岩岩样平均压入硬度范围为 5271~5688 MPa。南极冰盖冰的温度越接近岩层冰的温度越高,温度在 -2~-8 °C[17],钻头钻进基岩时到达冰盖的最底部,取 $\sigma_{cs} = 11.5$ MPa(冰的温度为 -3 °C),根据 Bogorodsky 等[18]建议在工程上计算冰的压入硬度计算公式:

$$\sigma_H \cong 3\sigma_{cs} \quad (30)$$

式中: σ_{cs} ——冰的单轴抗压强度, Pa; σ_H ——冰的压入硬度, Pa。

通过设计如表 1 所示的钻进工艺参数,探究不同钻进工艺及地质条件对孔斜的影响,通过弯矩来评估孔斜程度。

2 不同工艺参数对钻头弯矩的影响

2.1 机械钻速对钻头弯矩的影响

图 4 对比了不同机械钻速对弯矩的影响,结果显示,随着钻进基岩深度的增加,钻头所受的弯矩逐渐增加,当 L 等于钻头外缘的半径时,弯矩最大,当钻进深度继续增加时,弯矩逐渐减小。通过对比案例 1~案例 3,可以发现,机械钻速越大,钻头所受的弯矩越大,越容易导致钻头倾斜。在钻头钻压为 3 kN、冰的单位体积切削功为 3 MN·m⁻²、地层倾角为 30°、钻头转速为 100 r/min 的条件下,案例 1、案例 2、案例 3 的最大弯矩分别为 395.12、401.10、407.08 N·m。案例 3 比案例 2 高 5.98 N·m,案例 2 比案例 1 同样高 5.98 N·m,也就是说,随着机械钻速的增加,弯矩最大值增加的幅度不变。因此,在冰岩界面钻进时,可以通过适当减小机械钻速来控制孔斜。

2.2 转速对钻头弯矩的影响

图 5 对比了不同转速对钻头弯矩的影响,结果显示,转速越大,钻头弯矩越小。在钻头钻压为 3 kN、冰的单位体积切削功为 3 MN·m⁻²、地层倾角为 30°、机械钻速为 12 m/h 的条件下,案例 3(转速 100 r/min)、案例 4(转速 200 r/min)、案例 5(转速 300 r/min)受到的最大弯矩分别为 407、389、383 N·m。案例 3 比案例 4 高出 18 N·m,案例 4 比案例 5 高出 5 N·m,由此可见,随着转速的增加,弯矩最大值减小的幅度越来越小。

表 1 钻进工艺参数

案例	机械钻速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	钻头转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	钻头钻压/ kN	地层倾角/ ($^{\circ}$)	冰的单位体积切削功/ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	岩层抗压入强度/ MPa	冰层抗压入强度/ MPa
案例 1	8	100	3	30	3	5300	34.5
案例 2	10	100	3	30	3	5300	34.5
案例 3	12	100	3	30	3	5300	34.5
案例 4	12	200	3	30	3	5300	34.5
案例 5	12	300	3	30	3	5300	34.5
案例 6	12	100	4	30	3	5300	34.5
案例 7	12	100	5	30	3	5300	34.5
案例 8	12	100	3	10	3	5300	34.5
案例 9	12	100	3	50	3	5300	34.5
案例 10	12	100	3	30	4	5300	34.5
案例 11	12	100	3	30	5	5300	34.5
案例 12	12	100	3	30	3	5400	34.5
案例 13	12	100	3	30	3	5500	34.5

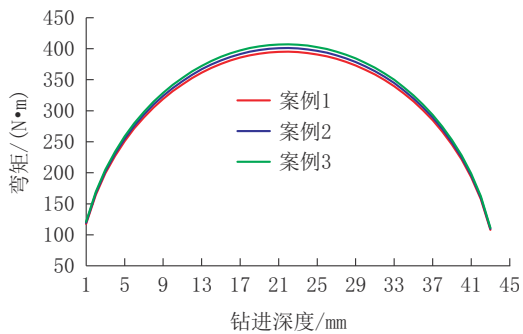


图 4 不同机械钻速条件下弯矩随钻进深度的变化

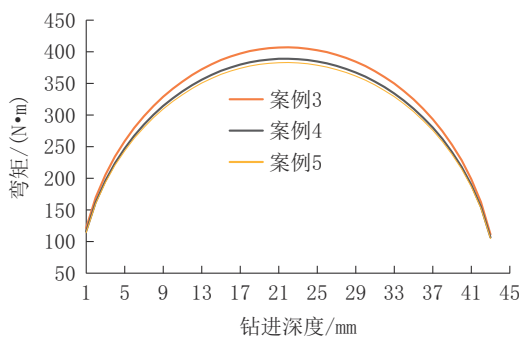


图 5 不同转速条件下弯矩随钻进深度的变化

2.3 钻压对钻头弯矩的影响

图 6 对比了不同钻压对弯矩的影响,结果显示,钻压越大,钻头所受的弯矩越大,在钻头转速为 100 r/min、冰的单位体积切削功为 $3 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、地层倾角为 30° 、机械钻速为 12 m/h 的条件下,案例 3(钻压 3 kN)、案例 6(钻压 4 kN)、案例 7(钻压 5 kN)受到的

最大弯矩摩擦力合力分别为 407、529、650 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。案例 6 比案例 3 高出 122 $\text{N}\cdot\text{m}$,案例 7 比案例 6 高出 121 $\text{N}\cdot\text{m}$ 、比案例 3 高出 243 $\text{N}\cdot\text{m}$,由此可见,随着钻头钻压的增加,最大弯矩值增加的幅度基本不变。

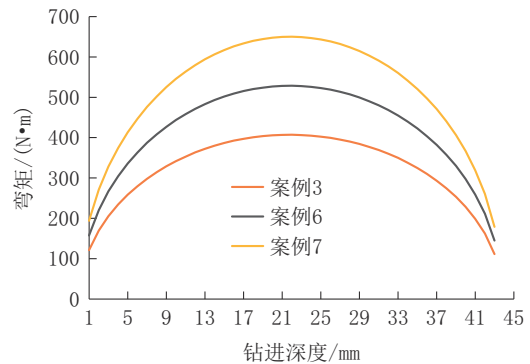


图 6 不同钻压条件下弯矩随钻进深度的变化

2.4 地层倾角对钻头弯矩的影响

图 7 对比了不同的地层倾角对弯矩的影响,结果显示,地层倾角越小,弯矩随钻进深度增加的更快。在钻头转速为 100 r/min、冰的单位体积切削功为 $3 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、钻头钻压 3 kN、机械钻速为 12 m/h 的条件下,案例 3(地层倾角 30°)、案例 8(地层倾角 10°)、案例 9(地层倾角 50°)分别钻进基岩 0.022、0.007、0.045 m 时弯矩达到最大值,最大值均为 407 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。由此可知,地层倾角不会对弯矩最大值造成影响。

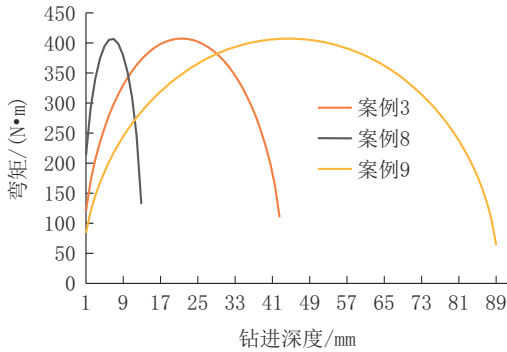


图7 不同地层倾角条件下弯矩随钻进深度的变化

2.5 冰的单位体积切削功对钻头弯矩的影响

图8对比了冰的不同单位体积切削功对钻头弯矩的影响,结果显示,冰的单位体积切削功越大,弯矩最大值越大。案例3(冰的单位体积切削功 $3 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$)、案例10(冰的单位体积切削功 $4 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$)、案例11(冰的单位体积切削功 $5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$)弯矩最大值分别为407、419、431 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。案例10比案例3高出12 $\text{N}\cdot\text{m}$,案例11比案例10同样高出12 $\text{N}\cdot\text{m}$,由此可知,随着冰的单位体积切削功的增加,弯矩最大值的增加幅度不变。

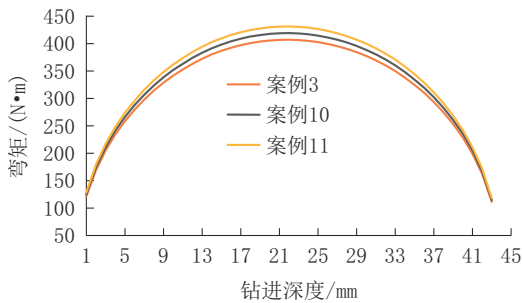


图8 不同冰的单位体积切削功弯矩随钻进深度的变化

2.6 冰层和岩层抗压入强度对弯矩的影响

图9对比了不同岩层抗压入硬度对弯矩的影响,结果显示,在岩层抗压入硬度相差不大的情况下,弯矩的值基本相同,这是因为钻压较小,倾倒地矩的差异较小,因此弯矩值基本保持不变。

3 孔斜控制措施

根据南极冰岩夹层以及冰岩界面的特点,并结合已经确定的基岩取心过程,即先用大孔径钻头钻至冰岩界面,再用小孔径钻头钻至基岩,在传统满眼防斜钻具的基础上进行改进,设计如图10所示的垂直入岩装置,整个结构全部由机械装置构成,可根据

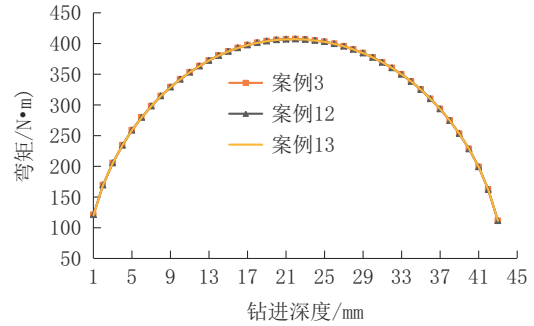


图9 倾倒地矩随钻进深度的变化

孔径的大小自动收放,提供一种简易高效可靠的深孔防斜装置,结构紧凑,适用性强,操作方便。

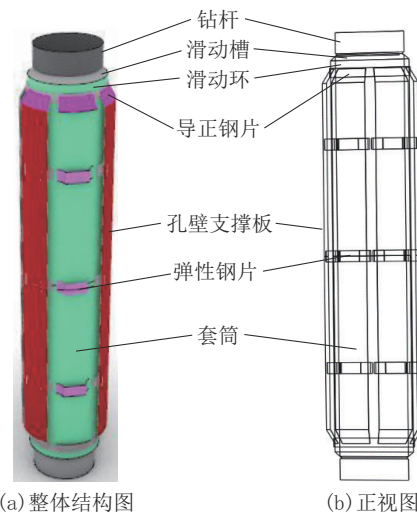


图10 垂直入岩装置

垂直入岩装置由导正钢片、孔壁支撑板、弹性钢片、套筒、滑动环、滑动槽和钻杆等组成,其中的导正钢片一端与滑动环连接另一端与孔壁支撑片连接。

导正钢片是弧形的弹性钢板,连接在孔壁支撑板的两端,孔壁支撑板为平直的板状结构,弹性钢片与滑动环连接,滑动环可沿轴向滑动,在钻孔孔壁变小时,弧状导正钢片的前端紧贴套筒,随着钻杆的运动导正钢片带动滑动环使整个导正钢片紧贴孔壁,进而导正钢片带动孔壁支撑板贴向套筒。

弹性钢片沿钻杆垂直方向铆接在套筒上与孔壁支撑板接触,在孔径变大时,弹性钢片挤压孔壁支撑板,使孔壁支撑板紧贴孔壁。

滑动槽为钻杆上刻挖在沿钻杆横截面圆周上的槽,套筒两端嵌入在滑动槽内,滑动槽内通过润滑脂润滑,孔壁支撑板通过孔壁对其施加的摩擦力保持

不转动的状态,稳定地对孔壁支撑。

4 结论

(1)在冰岩界面钻进时,可以通过适当减小机械钻速、增加转速、降低钻压来控制孔斜。并且随着机械钻速增加,弯矩最大值增加的幅度不变;转速增加,弯矩最大值减小的幅度降低;钻压增加,弯矩值增加的幅度不变。

(2)当钻孔遇层角大于临界值时,地层倾角越大,越容易造成孔斜,地层倾角不会对弯矩最大值造成影响。

(3)冰的单位体积切削功越大,越容易造成孔斜,随着冰的单位体积切削功的增加,弯矩最大值的增加幅度不变。

(4)冰层和岩层的抗压入硬度差距越大,钻头底面所受的倾倒地力矩越大,越容易造成孔斜,本文由于施加钻压较小,弯矩差异较小。

参考文献:

- [1] 刘小汉,郑祥身,鄂莫岚.南极洲大地构造区划和冈瓦纳运动[J].南极研究,1991(2):1-9.
- [2] 刘晓波.中国南极地球科学探索与研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- [3] 方陵生.探秘南极冰下世界[J].大自然探索,2016(6):24-31.
- [4] 刘小汉.南极大陆的演化与科学探索[J].人与生物圈,2017,103-104(S1):8-11.
- [5] Dong G J, Chen P. A review of the evaluation control and application technologies for drill string vibrations and shocks in oil and gas well[J]. Shock and Vibration, 2016, No.7418635.
- [6] 苏义脑.井下控制工程学概述及其研究进展[J].石油勘探与开发,2018,45(4):705-712.
- [7] 汪海阁,苏义脑.直井防斜打快理论研究进展[J].石油学报,2004(3):86-90.
- [8] Lubinski A. A study of the buckling of rotary drilling strings[J]. Drilling & Production Practice, 1950:178-214.
- [9] 白家祉,黄惠泽,刘玉石.纵横弯曲法对钻具组合的三维分析[J].石油学报,1989(2):60-66.
- [10] Johancsik C A, Friesen D B, Dawson R. Torque and drag in directional wells-prediction and measurement[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984,36(6):987-992.
- [11] 杨勋尧.地层造斜力的计算与应用[J].石油学报,1985(1):81-90.
- [12] Talalay P. G. Power consumption of deep ice electromechanical drills [J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37: 69-79.
- [13] Shamshev F. A., Tarakanov S. N., Kudryashov B. B., et al. Tekhnologiya i tekhnika razvedochnogo bureniya [Technology and technique of prospecting drilling] [J]. Moscow, Nedra, 1985,565p.(Text in Russian)
- [14] 程志恒,高浩斌,侯建军,等.软硬互层煤岩体传统钻进工艺钻孔偏斜规律研究[J].华北科技学院学报,2022,19(4):36-42,47.
- [15] Ueda H T, Kalafut J. Experiments on the cutting process in ice [J]. experiments on the cutting process in ice, 1989.
- [16] 范晓鹏.极地冰下基岩取心钻具反扭装置与钻头钻压平衡关系研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [17] Augustin L, Motoyama H, Wilhelms F, et al. Drilling comparison in "warm ice" and drill design comparison[J]. Annals of Glaciology, 2007,47:73-78.
- [18] Bogorodsky V. V., Gavrilo V. P. Lyed: Fizicheskie svoistva. sovremennyye metody glyatsiologii [physical properties. modern methods of glaciology] [J] Leningrad, Gydrometeoizdat, 1980,384p (Text in Russian)

(编辑 荐华)