

# 冰层回转钻进钻头切削具温度理论计算分析

曹品鲁<sup>1,2</sup>, 陈卓<sup>1,2</sup>, 曹宏宇<sup>1</sup>, 董硕<sup>1</sup>, 崔国庆<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 极地冰盖底部暖冰层冰的脆性小而粘弹性大, 且温度和压力较高, 可钻性差。回转钻进时产生的切削热量极易使冰屑处于熔融或半融状态, 致使冰屑相互聚结成团, 甚至会在钻具局部位置再次冻结, 导致孔内事故频发。为了解冰层回转钻进时切削具的温度变化规律, 本文对切削具的受力特性和传热规律进行了理论研究, 建立了钻井液循环条件下切削具温度计算理论模型, 对切削具的温度变化及影响因素进行了深入分析。结果表明, 回转速度、切削深度、冰与切削具间的摩擦系数、切削具刃前角及冰的抗剪强度等参数对切削温度均有重要影响, 而低温钻井液虽有良好的冷却、降温效果, 但仍可使切削具温度升温 2~5 °C, 为暖冰层钻进带来不利影响, 需深入优化钻进参数组合。

**关键词:** 暖冰; 极地钻探; 钻头; 切削热量; 切削温度; 低温钻井液

**中图分类号:** P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)01-0005-08

## Theoretical calculation and analysis on cutting heat with drilling fluid in ice core drilling

CAO Pinlu<sup>1,2</sup>, CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>, CAO Hongyu<sup>1</sup>, DONG Shuo<sup>1</sup>, CUI Guoqing<sup>1</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130061, China;

2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130061, China)

**Abstract:** The warm ice at the bottom of polar ice sheet has small brittleness, high viscoelasticity, high temperature and pressure, and poor drillability. The cutting heat generated during rotary drilling can easily cause the ice chips to be in melting or semi-melting state; as a result, the ice chips will gather together and even freeze again locally over the drilling tool, resulting in frequent accidents in the hole. In order to understand the temperature change law of cutting tools during ice rotary drilling, theoretical study is conducted on the mechanical characteristics and heat transfer law of cutting tools, and then the theoretical model for cutting tool temperature calculation under drilling fluid circulation is established. The result shows that rotation speed of the drilling bit, cutting depth, friction coefficient, cutting edge angle and ice shearing strength et al. are all have important impact on cutting temperature. Although the low-temperature drilling fluid has good cooling and cooling performance, it can still make the cutting tool temperature rise by 2 to 5 °C, adversely affecting warm ice drilling. In-depth optimization should also be made for the combination of drilling parameter.

**Key words:** warm ice; polar drilling; bit; cutting heat; cutting temperature; low temperature drilling fluid

## 0 引言

极地冰盖约占全球陆地面积的 10%, 其自然环境对人类具有重要价值。由于极地地区气温低、远离人类污染, 同其它气候代用指标相比具有信息量大且保真度好、时间分辨率高、时间尺度范围大、分

布面积广等特点, 是研究全球气候变化最为关键的地区之一<sup>[1-3]</sup>。获得年代久远的冰心, 对于重建地球历史演化以及预测全球气候变迁具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。在南极获取的深冰心已帮助人类恢复了地球 80 万年来的气候变化情况, 发现了新世纪以来的

**收稿日期:** 2019-12-09; **修回日期:** 2019-12-20 **DOI:** 10.12143/j.tkge.2020.01.002

**基金项目:** 国家自然科学基金项目面上基金“冰层取芯钻探暖冰破碎机理及冰屑运移规律研究”(编号: 41576184)

**作者简介:** 曹品鲁, 男, 汉族, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 主要从事复杂条件钻探技术和极地钻探技术方面的科研与教学工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, jlucl@jlu.edu.cn。

**引用格式:** 曹品鲁, 陈卓, 曹宏宇, 等. 冰层回转钻进钻头切削具温度理论计算分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 5-12.

CAO Pinlu, CHEN Zhuo, CAO Hongyu, et al. Theoretical calculation and analysis on cutting heat with drilling fluid in ice core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 5-12.

以10万年为主导周期的冰期—间冰期旋回。不过,对于之前以4万年为主导周期的冰期—间冰期旋回的了解还非常有限,各国科学家都在竞相开展新的深冰心钻探项目,寻找包含更长时间尺度的深冰心<sup>[6-8]</sup>,获取高质量冰心已成为极地科学的重要研究方向之一。然而,受上覆冰盖重力和基底地热温度作用的影响,冰盖底部“暖冰层”冰的熔点低而温度高,局部地区甚至会达到冰的压力熔点,冰的脆性小而粘弹性大,可钻性极差。回转钻进时产生的切削热量可能会导致冰屑处于熔融状态,致使冰屑相互聚结难以有效带离孔底。融化如果产生水,还将会在钻具局部位置再次冻结,导致孔内事故频发<sup>[9-11]</sup>。在南极进行的EPICA Dome C-2、Byrd站、EPICA DML、Vostok站5G-1以及格陵兰岛Neem、NorthGRIP等深冰心钻探项目均遇到了“暖冰”钻进技术难题<sup>[12-13]</sup>。山岳冰川钻探中也会遇到类似问题,如在北冰洋地区阿拉斯加山脉Aurora Peak冰川、Wrangel冰川和Black Rapids冰川开展的冰心钻探,以及俄罗斯阿尔泰山脉西部Belukha高原实施的冰心钻探等<sup>[14-16]</sup>。

虽然国内外学者对钻头回转切削冰层产生的热量及切削具温度变化进行了计算和分析,但均未考虑低温钻井液循环的影响<sup>[17-19]</sup>。本文借鉴地质岩心钻探钻井液循环条件下钻头温度场分析方法<sup>[20-23]</sup>,通过冰钻钻头切削具受力和温度传输特性,对低温钻井液循环条件下钻头切削具的温度分布及变化规律进行了研究。

## 1 冰层回转钻进切削热量的计算

### 1.1 干切削条件下的切削热量计算

将钻头回转切削的过程简化为平面剪切模型,冰

$$Q_s = F_s V_s = \frac{\pi n (r + R) \cos \alpha \cos(\varphi + \delta - \alpha) (P_x \cos \delta - P_y \sin \delta)}{60 \cos(\varphi - \alpha) \cos(\alpha - 2\delta)} \quad (2)$$

$$Q_{f1} = F_1 V_1 = \frac{\pi n (r + R) \sin \varphi [P_x \sin(2\delta) - 2P_y (\sin \delta)^2]}{120 \cos(\varphi - \alpha) \cos(\alpha - 2\delta)} \quad (3)$$

$$Q_{f2} = F_2 V_0 = \frac{\pi n (r + R) \sin \delta [P_x \cdot \sin(\alpha - \delta) + P_y \cos(\alpha - \delta)]}{60 \cos(\alpha - 2\delta)} \quad (4)$$

式中: $F_s$ ——剪切面上的剪应力,N; $F_1$ ——切削具前刃面与切屑之间的摩擦力,N; $F_2$ ——垫鞋与冰层之间的摩擦力,N; $V_s$ ——剪切速度,m/s; $V_1$ ——切削相对切削具的运动速度,m/s; $V_0$ ——切削具回转线速度,m/s; $n$ ——切削具回转速度,r/min; $P_y$ ——给进力,切削具所受的轴向压力(钻压的一部分),N; $P_x$ ——切削力(回转扭矩产生的水平力的一部分),N; $R$ ——切削具外径,m; $r$ ——切削具内径,m; $\varphi$ ——剪切面与水平面之间的夹角,rad; $\alpha$ ——刃前角,rad; $\delta$ ——冰与钢接触面摩擦角,rad。

层回转钻进过程中产生的热量主要来自三部分:冰屑剪切变形产生的热、切削具与冰屑摩擦产生的热以及切削具垫鞋与冰层摩擦产生的热,其中前两项对冰屑和切削具的温升起主导作用<sup>[12]</sup>,如图1所示。

$$Q = Q_s + Q_{f1} + Q_{f2} \quad (1)$$

式中: $Q$ ——切削具钻进产生的热量,W; $Q_s$ ——冰屑发生剪切变形产生的热量,W; $Q_{f1}$ ——切削具前刃面与冰屑摩擦产生的热量,W; $Q_{f2}$ ——垫鞋与冰层之间的摩擦热量,W。

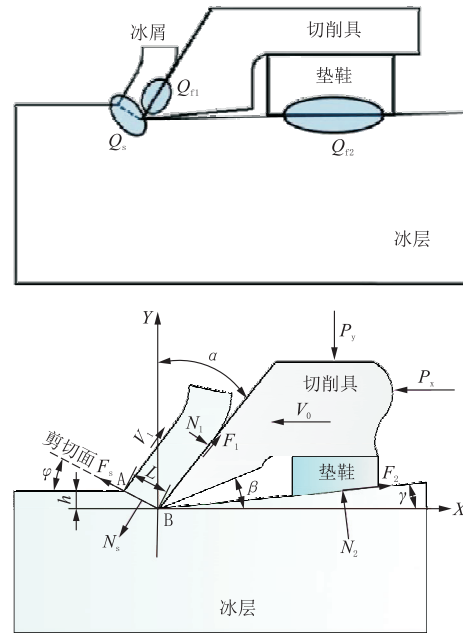


图1 切削具热量来源及受力分析

Fig.1 Heat source and force analysis diagram of cutting tools

冰层回转切削过程与金属切削过程相似,Azuma等人借鉴金属切削理论对干切削条件下冰层钻进产生的热量进行了分析<sup>[13,17-18]</sup>。结果表明,各部分热量可按如下公式计算:

根据金属切削理论,剪切变形引起的温度变化为:

$$\Delta T_s = \frac{Q_s}{c_i \rho_i V_0 h b} \cdot \frac{1}{1 + 1.33 \sqrt{\lambda_i \varepsilon / (V_0 h)}} \quad (5)$$

其中,

$$\varepsilon = \frac{\cos \alpha}{\sin \varphi \cos(\varphi - \alpha)} \quad (6)$$

式中: $\Delta T_s$ ——剪切变形引起的刀具温度变化, $^{\circ}\text{C}$ ; $c_i$ ——冰的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; $\rho_i$ ——冰的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $h$ ——切削具侵入深度, $\text{m}$ ; $b$ ——切削具宽度, $\text{m}$ ; $\varepsilon$ ——切屑变形; $\lambda_i$ ——冰的热扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ,其他参数同上。

摩擦引起冰屑的温度变化公式<sup>[24]</sup>为:

$$\Delta T_f = \frac{\frac{Q_{f1}}{b k_c} \Lambda - \Delta T_s}{1 + \frac{\Lambda}{0.377} \cdot \frac{k_i}{k_c} \cdot \sqrt{\frac{V_1 l_f}{4 \lambda_i}}} \quad (7)$$

其中:

$$\Lambda = \frac{2}{\pi} \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{b}{2l_f} \right) + \frac{b}{2l_f} \sinh^{-1} \left( \frac{2l_f}{b} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{b}{2l_f} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{2l_f}{b} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{b}{2l_f} + \frac{2l_f}{b} \right) \left[ 1 + \left( \frac{b}{2l_f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

$$l_f = \frac{h \sin(\varphi + \delta - \alpha)}{\sin \varphi \cos \delta} \quad (9)$$

式中: $\Delta T_f$ ——前刃面摩擦引起的刀具温度变化, $^{\circ}\text{C}$ ; $k_i$ ——冰的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; $l_f$ ——冰屑与切削具接触长度<sup>[25]</sup>, $\text{m}$ ; $\Lambda$ ——移动平面热源的形状系数, $k_c$ ——切削具导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,其它参数同上。

干切削条件下钻头切削具的温度为:

$$T_c = \Delta T + T_0 = \Delta T_s + \Delta T_f + T_0 \quad (10)$$

式中: $T_c$ ——钻头切削具温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_0$ ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$ ;其它参数同上。

## 1.2 钻井液冷却条件下的切削热量计算

在深冰心钻探中,为平衡孔壁压力、防止冰发生蠕变而缩径,必须采用低温钻井液。钻井液同时可起到携带冰屑和冷却钻头的作用。因此,需对不同条件下钻井液对切削具的冷却效果进行分析。

钻井液从切削具表面顶端流到底端将发生热量传递,可以近似看成外掠平板的对流换热过程<sup>[21]</sup>。假设钻井液为不可压缩牛顿型液体,常物性,无内热源,粘性摩擦产生的热耗散忽略不计。根据傅里叶

导热定律和对流换热微分方程组可知<sup>[26-27]</sup>,对于长为 $l_c$ 的切削具,切削具平板平均表面传热系数 $\psi$ 为:

$$\psi = 0.664 \frac{k_{df}}{l_c} \left( \frac{V_{df} l_c}{\nu_{df}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_{df} c_{df}}{k_{df}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

式中: $\psi$ ——换热系数; $k_{df}$ ——钻井液的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; $V_{df}$ ——钻井液流速, $\text{m}/\text{s}$ ; $l_c$ ——切削具长度, $\text{m}$ ; $\nu_{df}$ ——钻井液的运动粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $\mu_{df}$ ——钻井液的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $c_{df}$ ——钻井液的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,其他参数同上。

钻井液与切削具的换热面积 $A$ 为:

$$A = b l_c \quad (12)$$

根据牛顿冷却公式,单位时间内由切削具流向钻井液的热量 $q_t$ 为:

$$q_t = \psi (T_c - T_{df}) A \quad (13)$$

设钻井液与切削具的热交换时间为 $t$ :

$$t = l_c / V_{df} \quad (14)$$

则在 $t$ 时间内,钻井液吸收的热量 $Q_t$ 为:

$$\begin{aligned} Q_t &= q_t t \\ &= 0.664 \frac{k_{df}}{l_c} \left( \frac{V_{df} l_c}{\nu_{df}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_{df} c_{df}}{k_{df}} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &\quad (T_c - T_{df}) l_c b (l_c / V_{df}) \end{aligned} \quad (15)$$

根据热量计算公式可知在 $t$ 时间内,钻井液吸收的热量 $Q_t$ 为:

$$Q_t = c_{df} m_{df} \Delta T_{df} \quad (16)$$

其中,切削具表面钻井液质量 $m_{df}$ 为:

$$m_{df} = \rho_{df} l_c b \cdot ds \quad (17)$$

式中: $m_{df}$ ——切削具表面钻井液的质量, $\text{kg}$ ; $ds$ ——切削具表层钻井液的平均厚度, $\text{m}$ , $\Delta T_{df}$ ——切削具表层钻井液的平均温升, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(15)~(17)可得切削具表层钻井液的平均温升 $\Delta T_{df}$ 为:

$$\Delta T_{df} = \frac{0.664 \frac{k_{df}}{l_c} \left( \frac{V_{df} l_c}{\nu_{df}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_{df} c_{df}}{k_{df}} \right)^{\frac{1}{3}} (T_c - T_{df}) \frac{l_c}{V_{df}}}{c_{df} \rho_{df} \cdot ds} \quad (18)$$

切削具表面钻井液吸收热量后的平均温度 $T_{df}$ 为:

$$\begin{aligned} T_{df} &= T_{df0} + \Delta T_{df} \\ &= T_{df0} + \frac{0.664 \frac{k_{df}}{V_{df}} \left( \frac{V_{df} l_c}{\nu_{df}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_{df} c_{df}}{k_{df}} \right)^{\frac{1}{3}} (T_c - T_{df})}{c_{df} \rho_{df} \cdot ds} \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $T_{df0}$ ——切削具表面钻井液的初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

回转钻进时产生的热量在切削具内部通过热传导传至切削具另一侧, 钻井液流过切削具另一侧时对切削具进行降温。在稳定工作状态下, 切削具表面附近钻井液的温度与切削具表面温度相等。切削具的切削面和钻井液降温面两热源保持稳定, 切削具内部的导热过程可看作平壁稳态导热过程<sup>[28]</sup>。

对于任一点  $(x, y, z)$ , 其微分方程为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$$

切削具温度沿切削具长度和宽度方向变化率很小, 主要沿厚度方向变化<sup>[29]</sup>, 故可近似按照一维导热问题处理, 则(19)可简化为:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \quad (21)$$

而边界条件为:  $x=0$  时,  $T=T_{df}$ ;  $x=d$  时,  $T=T_c$ 。

对式(21)积分可得钻头切削具的温度:

$$T_x = T_{df} - (T_{df} - T_c) \frac{x}{d} \quad (22)$$

式中:  $T_x$ ——任一点切削具的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $x$ ——切削具内任一点到坐标轴原点的距离,  $\text{m}$ ,  $d$ ——切削具的厚度,  $\text{m}$ 。

对式(22)求积分可得到切削具平均温度  $T_{ac}$  为:

$$\begin{aligned} T_{ac} &= \frac{\int_0^d T_x dx}{d} \\ &= \frac{\int_0^d \left[ T_{df} - (T_{df} - T_c) \frac{x}{d} \right] dx}{d} \\ &= \frac{T_{df} + T_c}{2} \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)可知, 切削具的平均温度即为切削面温度与降温面温度的平均值。

## 2 切削具平均温度变化影响因素及钻井液降温效果

结合极地钻探实际情况, 采用航空煤油作为低温钻井液, 冰层、钻头及航空煤油的热物性参数如表 1 所示。钻头外径 134 mm, 内径 105 mm, 切削具外径 138 mm, 内径 101 mm, 切削具宽度为 15 mm, 长度为 20 mm。冰层温度假定为  $-5^{\circ}\text{C}$ , 切削具表

层钻井液平均厚度为 0.5 mm。

表 1 钻头切削具和冰的热物性参数  
Table 1 Thermal properties of drill bit cutters and ice

| 材料   | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 比热/<br>[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ] | 导热系<br>数/[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ] | 热扩散<br>系数/<br>( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 动力<br>粘度/<br>( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) | 导热系数                   |
|------|--|---|--|---|---|------------------------|
| 切削具  | 1500                                       | 230   | 30.00  |   |   | $1.185 \times 10^{-6}$ |
| 冰层   | 850  | 2078  | 2.29   | $1.2 \times 10^{-6}$                                |   |                        |
| 航空煤油 | 870  | 1625  | 0.14   |   | 0.013                                       |                        |

### 2.1 钻压的影响

假定冰与切削具之间的动摩擦系数为 0.05, 冰的抗剪强度为 4 MPa, 切削具刃前角为  $30^{\circ}$ , 切削深度为 2 mm, 钻头转速为 50 r/min。根据式(10)和式(23)对不同钻压条件下, 切削具的温度变化进行了计算, 结果如图 2 所示。为避免切削具切削冰层时切入过深, 易使扭矩增大而增加钻具反扭系统负担并防止切削具折断, 通常在切削具后方设置垫块来控制切削深度, 大部分钻压由垫块承担。因此随着钻压的增加, 仅仅增大垫块处的摩擦热量, 切削具前刃面剪切热量和摩擦热量基本不变, 总的热量基本不变, 切削具温度也基本不变。从图 2 可以看出, 当钻压由 500 N 增加到 1500 N 时, 热量和温度基本不变, 干切削使切削具温度达到了  $-0.07^{\circ}\text{C}$ , 而钻井液冷却后的切削具温度为  $-2.53^{\circ}\text{C}$ , 钻井液循环可有效降低切削温度。

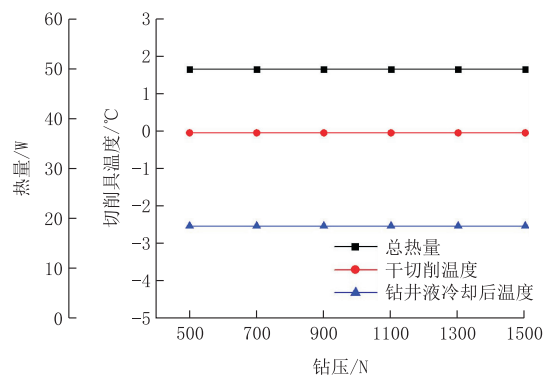


图 2 钻压与热量、切削具温度之间的关系

Fig.2 Drilling pressure vs cutting heat and temperature

### 2.2 转速的影响

保持钻压为 500 N 及其它参数不变, 对不同转速条件下的切削具温度进行了计算, 结果如图 3 所示。随着转速的增加, 单位时间内破碎的冰量增多, 导致切削热量随之增加, 切削具温度随之升高。当转速由 50 r/min 增大到 150 r/min 时, 切削产生的



热量由 49.64 W 增大到 148.92 W, 无钻井液条件下, 切削具温度由  $-0.07^{\circ}\text{C}$  增大到  $2.7^{\circ}\text{C}$ 。钻井液的冷却效果显著, 当转速由 50 r/min 增大到 150 r/min 时, 切削具温度由  $-2.53^{\circ}\text{C}$  增加到  $-1.15^{\circ}\text{C}$ 。因此, 在满足机械钻速的前提下, 降低转速可以降低切削产生的温升, 同时钻井液可以有效降低温度。

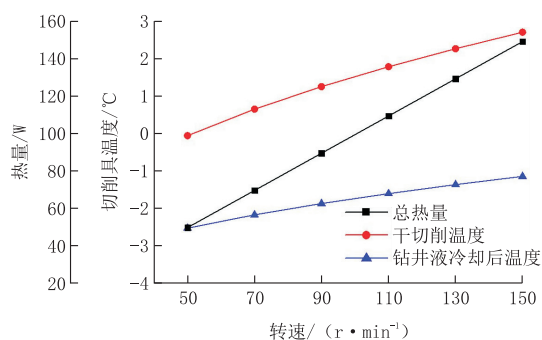


图 3 转速与热量、切削具温度之间的关系

Fig.3 Rotation speed vs cutting heat and temperature

### 2.3 切削深度的影响

保持钻压为 500 N、转速 50 r/min 及其它参数不变, 计算不同切削深度下切削具的温度变化情况, 结果如图 4 所示。随着切削深度的增加, 相同条件下单位时间内破碎的冰量也随之增加, 冰屑与切削具的接触面积和摩擦增加, 切削热量增大。当切削深度由 1 mm 增加到 5 mm 时, 切削热量从 24.82 W 增加到 124.1 W。钻井液的降温效果显著, 当切削深度由 1 mm 增加到 5 mm 时, 干切削下切削具的温度分别为  $-0.97$  和  $1.78^{\circ}\text{C}$ , 而采用低温钻井液后, 切削具温度分别降低到  $-3.03$  和  $-1.61^{\circ}\text{C}$ 。相同条件下, 切削深度越大, 钻进速度越快, 但切削具温度也相应增高, 应根据实际情况, 适当控制切削深度。

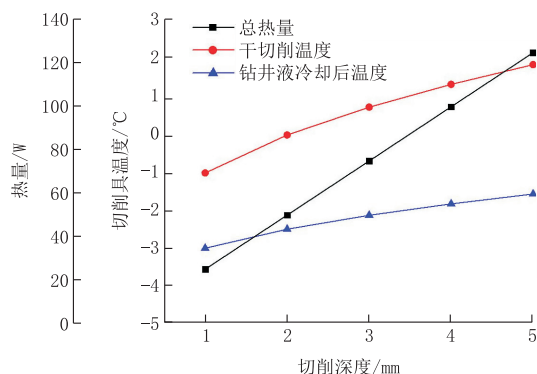


图 4 切削深度与热量、切削具温度之间的关系

Fig.4 Cutting depth vs cutting heat and temperature

### 2.4 切削具与冰之间摩擦系数的影响

保持钻压为 500 N、转速 50 r/min、切削深度 2 mm 及其他参数不变, 计算不同摩擦系数下切削具的温度变化情况, 结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 冰与切削具之间的摩擦系数对切削热量及切削具温度影响较大。相同条件下, 摩擦系数越大, 切削具与冰之间的摩擦热量就越大, 切削具温度相应越高。当摩擦系数从 0.05 增加到 0.3 时, 切削热量从 49.64 W 增加到 60.73 W, 切削具温度由  $-0.07^{\circ}\text{C}$  增加到  $11.24^{\circ}\text{C}$ , 而采用低温钻井液时, 切削具温度分别降低到  $-2.53$  和  $3.12^{\circ}\text{C}$ 。因此钻进时, 应尽可能的优化钻具表面材料和结构, 以降低切削具与冰之间的摩擦系数。

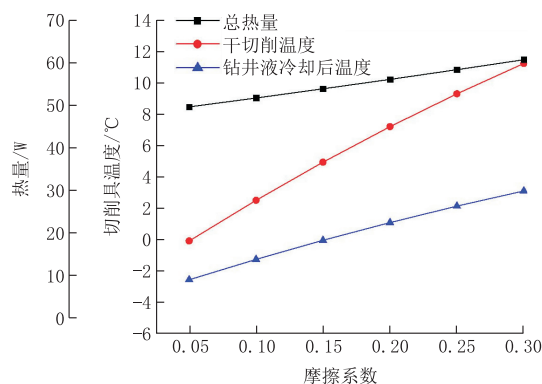


图 5 摩擦系数与热量、切削具温度之间的关系

Fig.5 Friction coefficient vs cutting heat and temperature

### 2.5 切削具刃前角的影响

保持钻压为 500 N、转速 50 r/min、切削深度 2 mm、冰与切削具之间的摩擦系数为 0.05 及其它参数不变, 分析切削具刃前角对其温度的影响规律, 结果如图 6 所示。刃前角的变化改变了冰屑与切削具之间的接触状态和接触长度, 导致切削热量和切削温度随之变化。从图 6 中可以看出, 随着切削具刃前角的增加, 切削热量和切削具温度逐渐降低。当

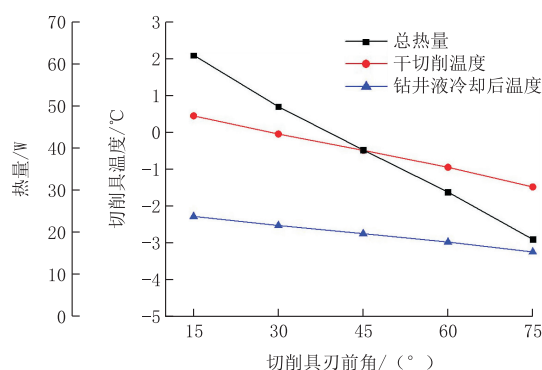


图 6 切削具刃前角与热量、切削具温度之间的关系

Fig.6 Cutting edge angle vs cutting heat and temperature

切削具前刃角由  $15^\circ$  增加到  $75^\circ$  时,切削热量从  $61.79\text{ W}$  降低到  $18.3\text{ W}$ ,干切削条件下切削具温度由  $0.42\text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $-1.49\text{ }^\circ\text{C}$ 。而采用低温钻井液后,切削具温度由  $-2.29\text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $-3.25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 2.6 冰强度的影响

从式(10)和式(23)可以看出,冰的抗剪强度对切削具温度具有一定的影响。因此,保持钻压为  $500\text{ N}$ 、转速  $50\text{ r/min}$ 、切削深度  $2\text{ mm}$ 、冰与切削具之间的摩擦系数为  $0.05$ 、切削具刃前角为  $30^\circ$  及其它参数不变,分析冰的抗剪强度对切削具温度的影响,结果如图 7 所示。随冰抗剪强度的增加冰的剪切破碎难度增大,相同条件下钻进消耗的功率增高,切削具扭矩变大,即切削具受到的水平抗力增加,导致切削具与冰屑之间的摩擦力随之增加,因此摩擦产生的热量不断升高。同时,冰抗剪强度的变化导致剪切面倾角发生变化,同比条件下冰的剪切热量迅速增加。当冰的抗剪强度由  $3\text{ MPa}$  增大到  $8\text{ MPa}$  时,低温钻井液循环条件下的切削温度分别由  $-3.15\text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $-0.06\text{ }^\circ\text{C}$ 。

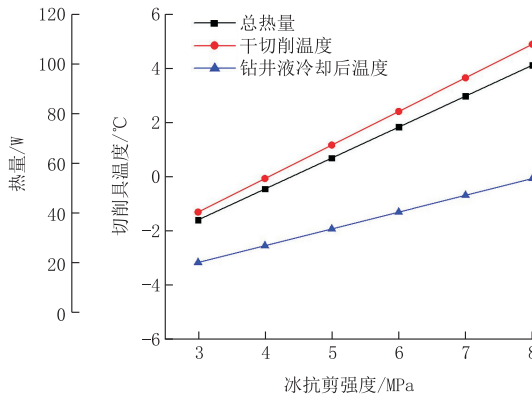


图 7 冰抗剪强度与热量、切削具温度之间的关系

Fig.7 Ice shear strength vs cutting heat and temperature

## 2.7 切削具导热系数的影响

保持钻压为  $500\text{ N}$ 、转速  $50\text{ r/min}$ 、切削深度  $2\text{ mm}$ 、冰与切削具之间的摩擦系数为  $0.05$ 、切削具刃前角为  $30^\circ$ 、冰的抗剪强度为  $4\text{ MPa}$  及其它参数不变,计算钻井液条件下切削具导热系数对切削具温度的影响,结果如图 8 所示。当其它条件不变时,切削具导热系数增加会导致切削产生的热量很快散发,钻井液也可以更迅速的将热量带走,因此冰屑及切削具的温升随之降低。当切削具导热系数由  $20\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  增加到  $60\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  时,无钻井液条件下切削具温度由  $0.28\text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $-0.87\text{ }^\circ\text{C}$ 。当切

削具导热系数为  $20$  和  $60\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$  时,钻井液降温后的温度分别为  $-2.36$  和  $-2.93\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此在钻进时,选择导热系数较高的钻头材料可以降低切削产生的热量。

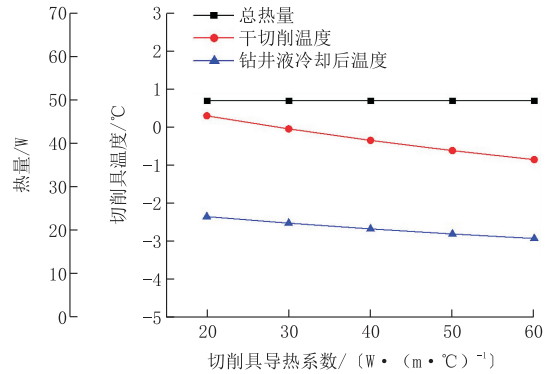


图 8 切削具导热系数与热量、切削具温度之间的关系

Fig.8 Heat conduction coefficient of cutters vs cutting heat and temperature

## 2.8 钻井液流量影响

保持钻压为  $500\text{ N}$ 、转速  $50\text{ r/min}$ 、切削深度  $2\text{ mm}$ 、冰与切削具之间的摩擦系数为  $0.05$ 、切削具刃前角为  $30^\circ$ 、冰的抗剪强度为  $4\text{ MPa}$ 、切削具导热系数为  $30\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ,其它参数不变,计算钻井液条件下钻井液流量对切削具温度的影响,结果如图 9 所示。由于冰层回转钻进时,切削具产生的热量较小,造成的温升也较小,所以钻井液流速很容易达到最佳降温效果的临界值,且钻井液很容易将小部分热量带走,增加钻井液流速对降温效果无明显影响。

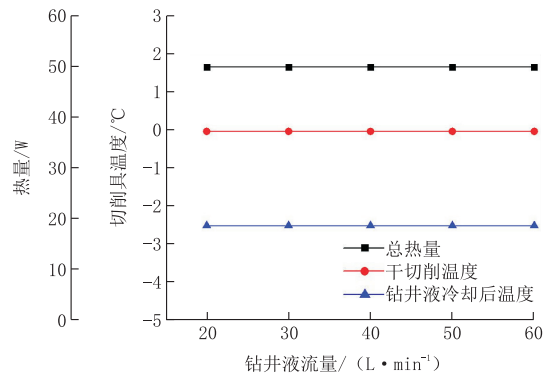


图 9 钻井液流量与热量、切削具温度之间的关系

Fig.9 Flow rate of drilling fluid vs cutting heat and temperature

## 3 结论

借鉴金属切削理论和岩心钻探钻头温度场分析方法,对低温钻井液循环条件下的冰层回转钻进切削具温度变化进行了理论分析,建立了切削热和切

削温度计算模型,对钻压、转速、切削具刃前角、冰与切削具之间的摩擦系数以及冰的抗剪强度、钻井液性能参数等因素对切削热量和切削具温度的影响规律进行了系统研究:

(1)受钻头垫鞋的影响,钻压对切削热量和切削温度的影响较小。

(2)转速、切削具刃前角、切削深度、摩擦系数、冰的抗剪强度等参数对切削热和切削温度均有一定的影响;设计钻头切削具时应优选低摩擦系数和高导热系数的材料,其刃前角应尽可能大些,切削深度和转速在满足钻速需求下尽可能小。

(3)低温钻井液能显著降低钻头切削具的温度,但由于特殊的低温环境和较低的切削具温升变化,钻井液流量对切削具温度的变化影响较小。

#### 参考文献 (References):

- [1] 张向培.基于冰雷达探测技术的南极冰盖冰层厚度和冰下地形特征研究[D].长春:吉林大学,2007.  
ZHANG Xiangpei. The study of ice thickness and bed topography in the Antarctic ice sheet detected by Ice Penetrating Radar[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [2] 姚檀栋,王宁练.冰芯研究的过去、现在和未来[J].科学通报,1977,42(3):225-230.  
YAO Tandong, WANG Ninglian. Past, present and future of ice core research[J]. Chinese Science Bulletin, 1977, 42(3): 225-230.
- [3] 王宁练,姚檀栋.冰芯对于过去全球变化研究的贡献[J].冰川冻土,2003,25(3):275-287.  
WANG Ninglian, YAO Tandong. The contribution of ice cores to the study of past global changes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 275-287.
- [4] 侯书贵,李院生,效存德,等.南极 Dome A 地区的近期积累率[J].科学通报,2007,52(2):243-245.  
HOU Shugui, LI Yuansheng, XIAO Cunde, et al. Recent accumulation rates of Dome A, Antarctica[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(2): 243-245.
- [5] 韩俊杰,韩丽丽,徐会文,等.极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):23-26.  
HAN Junjie, HAN Lili, XU Huiwen, et al. Theoretical and experimental research on the ultralow temperature drilling fluids for the polar ice coring drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(6): 23-26.
- [6] 崔祥斌.基于冰雷达的南极冰盖冰厚和冰下地形探测及其演化研究[D].杭州:浙江大学,2010.  
CUI Xiangbin. Ice thickness and subglacial topography detection by ice radar in Antarctic ice sheet and its evolution research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] 唐学远,孙波,李院生,等.冰穹 A 冰川学研究进展及深冰芯计划展望[J].极地研究,2012,24(1):77-84.

- TANG Xueyuan, SUN Bo, LI Yuansheng, et al. Review of the glaciological research progress and future development of deep ice core plan at Dome A, east Antarctica[J]. Chinese journal of polar research, 2012, 24(1): 77-84.
- [8] 任贾文,效存德,侯书贵,等.极地冰芯研究的新焦点:NEEM 与 Dome A[J].科学通报,2009,54(4):399-401.  
REN Jiawen, XIAO Cunde, HOU Shugui, et al. New focus on polar ice cores: NEEM and Dome A[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(4): 399-401.
- [9] Kotlyakov V M. Deep Drilling by Russian Scientists Reaches Subglacial Lake Vostok[J]. The IUGG Electronic Journal, 2012, 12(4): 1-3.
- [10] Pattyn F.. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 295: 451-461.
- [11] 曹品鲁,陈宝义,刘春朋,等.极地深冰心钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):58-62.  
CAO Pinlu, CHEN Baoyi, LIU Chunpeng, et al. Analysis of the technology difficulties and countermeasures in warm ice deep core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 58-62.
- [12] 刘春朋,曹品鲁,白杨,等.极地冰层回转钻进切削热量测试装置的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):13-17.  
LIU Chunpeng, CAO Pinlu, BAI Yang, et al. Development of test stand for measuring cutting heat generated in polar ice drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(12): 13-17.
- [13] 刘春朋.冰层回转钻进切削热分析与实验研究[D].长春:吉林大学,2014.  
LIU Chunpeng. Thermal analysis and experimental study on ice core drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [14] Matoba S., Shimbori K., Shiraiwa T. Alpine ice-core drilling in the north Pacific region[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 83-87.
- [15] Truffer, M., Motyka, R.J., Harrison, W.D., et al. Subglacial drilling at Black Rapids Glacier, Alaska, USA: Drilling method and sample descriptions[J]. Journal of Glaciology, 1999, 45(151): 495-505.
- [16] Takeuchi A., Takahashi A., Uetake J., et al. A report on ice core drilling on the western plateau of Mt. Belukha in the Russian Altai Mountains in 2003[J]. Polar Meteorol. Glaciol., 2004, 18: 121-133.
- [17] Azuma N., Tanabe I., Motoyama H.. Heat generated by cutting ice in deep ice-core drilling[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47: 61-67.
- [18] 曹品鲁,白杨,刘春朋,等.冰层回转钻进冰屑温度计算及影响因素分析[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(2):269-273,279.  
CAO Pinlu, BAI Yang, LIU Chunpeng, et al. Theoretical calculation on cutting heat and its influence factors analysis in ice core drilling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(2): 269-273, 279.
- [19] 杨成.极地冰岩夹层钻进碎岩机理分析及试验研究[D].长春:

- 吉林大学, 2016.
- YANG Cheng. Theoretical and experimental study on fragmentation mechanism during polar debris-rich ice drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [20] 杨晓峰, 李晓红, 卢义玉. 岩石钻掘过程中的钻头温度分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3164-3169.
- YANG Xiaofeng, LI Xiaohong, LU Yiyu. Temperature analysis of drill bit in rock drilling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 3164-3169.
- [21] 李晓红, 杨晓峰, 卢义玉, 等. 水射流辅助硬质合金钻头切割岩石过程的刀具温度分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 844-849.
- LI Xiaohong, YANG Xiaofeng, LU Yiyu, et al. Temperature analysis of cemented carbide drill cutting rock associated with water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 844-849.
- [22] 杨晓峰. 岩石钻进过程刀具温度变化特性及其热失效机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- YANG Xiaofeng. Tool temperature variation characteristics and thermal failure mechanism during rock drilling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [23] 杨晓峰, 李晓红, 卢义玉. 水射流辅助岩石切削过程的刀具热应力分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 152-156.
- YANG Xiaofeng, LI Xiaohong, LU Yiyu. Thermal stress analysis of tool in cutting rock with water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 152-156.
- [24] 杨荣福, 董申. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- YANG Rongfu, DONG Shen. Principle of metal cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [25] 万珍平, 刘亚俊, 叶邦彦, 等. 金属切削加工中刀-屑紧密型接触长度的研究[J]. 工具技术, 2002(4): 9-11.
- WAN Zhenping, LIU Yajun, YE Bangyan, et al. Study on tool-chip close contact length in metal cutting[J]. Tool technology, 2002(4): 9-11.
- [26] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 120-124.
- WANG Houhua. Heat transfer[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 120-124.
- [27] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [28] 章熙民, 任则需, 梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- ZHANG Ximin, REN Zepai, MEI Feiming. Heat transfer[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [29] 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- Nakayama Kazuo. Theory of metal cutting[M]. Translated by LI Yunfang. Beijing: China Machine Press, 1985.

(编辑 韩丽丽)

## 2019年度《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志高影响力学术论文

本刊讯 基于论文被引和网络下载数量,《探矿工程》编辑部对本刊2017-2019年刊登的论文进行统计打分,评选出了10篇“2019年度《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志高影响力学术论文”,获奖名单如下:

| 论文题目                                | 作者                              | 年,卷(期)      | 作者单位   |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------|--|
| 绿色地质勘查综合技术应用分析                      | 贾占宏,高元宏,梁俭,刘海声,陈佰辉              | 2017,44(4)  | 青海省有色地质矿产勘查局八队;青海省第二地质矿产勘查院;青海省岩心钻探工程技术研究中心;青海省水文地质工程地质环境地质调查院 |
| 超临界二氧化碳压裂技术研究进展                     | 陈晨,朱颖,翟梁皓,潘栋彬,靳成才               | 2018,45(10) | 吉林大学建设工程学院;自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室                                  |
| 绿色勘查技术在青海格尔木铜金山矿区钻探施工的应用分析          | 刘海声,穆元红,刘鹏,高元宏,窦斌,汪洪民,庞怀玮,张世元   | 2017,44(3)  | 青海省第二地质矿产勘查院;青海省岩心钻探工程技术研究中心;中国地质大学(武汉)                        |
| 页岩气调查黔地4井钻探技术                       | 王宗友,陈刚,乔生贵                      | 2018,45(2)  | 四川省煤田地质局一四一队   |
| 虚实结合的地质工程实践教学方法改革探索——钻探虚拟仿真实验教学平台研究 | 韦猛,霍宇翔,李谦                       | 2017,44(1)  | 成都理工大学环境与土木工程学院;地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)                   |
| 新时代地热资源勘查开发问题研究                     | 卢予北,李艺,卢玮,李贵亮,陈莹,王攀科            | 2018,45(3)  | 河南省地矿局第二地质环境调查院;河南省深部探矿工程技术研究中心;中国地质科学院勘探技术研究所;河南省地矿局第四地质矿产调查院 |
| 深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究              | 汤凤林,沈中华,段隆臣,高申友,彭莉,Чихотки В.Ф. | 2017,44(4)  | 无锡钻探工具厂有限公司;中国地质大学(武汉)   |
| 应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究                  | 宋刚练,牌卫卫,江建斌,何健                  | 2017,44(7)  | 上海市地矿建设有限责任公司  |
| 中国页岩气革命现状与发展建议                      | 赵全民,张金成,刘劲歌                     | 2019,46(8)  | 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司;中国石化石油工程技术研究院                               |
| 钻探技术在煤矿水害防治工作中的应用                   | 王永全,周兢                          | 2017,44(11) | 中国煤炭地质总局水文地质局;中国煤炭地质总局   |

注:统计数据截止日期为2019年12月31日。

请获奖作者尽快与《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部联系,提供联系地址和联系电话,编辑部将免费邮寄奖品和证书。

联系方式:0316-2096324 Email:879017787@qq.com。