

# 冰层回转钻进冰屑温度计算及影响因素分析

曹品鲁<sup>1,2</sup>, 白杨<sup>1</sup>, 刘春朋<sup>1</sup>, 杨成<sup>2</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:** 为了分析冰层回转切削钻进时冰屑温度的变化规律, 借鉴金属切削理论, 建立了切削温度计算模型, 对钻压、转速、切削具刃前角、切削具切入冰层深度、冰与切削具之间的摩擦系数、冰的抗剪强度以及切削具导热系数等因素对切削温度的影响规律进行了研究. 结果表明, 上述参数对切削温度均有一定的影响, 其中摩擦系数对冰屑的温升影响最大, 当摩擦系数增大到 0.3 时, 冰屑的温升可高达 9.11 °C. 钻头转速以及切削具刃前角对冰屑温升也有较大的影响, 当钻头转速由 30 r/min 增大到 130 r/min 时, 冰屑的温升由 2.35 °C 增大到 4.35 °C; 切削具刃前角由 15° 增大到 75° 时, 冰屑的温升由 3.48 °C 降低到 2.42 °C.

**关 键 词:** 暖冰; 极地研究; 钻探; 切削热; 切削温度

中图分类号: P 941.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0269-06

## Theoretical Calculation on Cutting Heat and Its Influence Factors Analysis in Ice Core Drilling

CAO Pin-lu<sup>1,2</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>, LIU Chun-peng<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun 130061, China. Corresponding author: CAO Pin-lu, associate professor, E-mail: jlucpl@jlu.edu.cn)

**Abstract:** In order to analyze the temperature changes of ice cuttings in drilling process, a mathematical model was constructed based on metal cutting theory. The factors which affected the cutting temperature were studied, including drilling pressure, rotation speed of drilling bit, cutting edge angle, cutting depth, friction coefficient, ice shearing strength, heat conduction coefficient of cutters and so on. The results show that the parameters mentioned all have a certain effects on cutting temperature, particularly the friction coefficient, and when it increases to 0.3, the temperature of the ice cuttings can raise 9.11 °C. Moreover, the rotation speed of the drilling bit and the angle of the cutting edge also affect the temperature of ice cuttings. The temperature increases from 2.35 °C to 4.35 °C with the rotation speed increasing from 30 r/min to 130 r/min, while it decreases from 3.48 °C to 2.42 °C with an increasing of the cutter edge angle from 15° to 75°.

**Key words:** warm ice; polar research; drilling; cutting heat; cutting temperature

极地冰芯分辨率高、记录时间尺度长、信息含量大, 直接记录着远古时期的大气组成, 蕴藏着珍贵的古气候和古环境信息; 获得年代久远的深冰芯, 对于重建地球的历史演化以及预测全球气候、环境的变迁具有重要意义. 通过深部冰层取芯钻探技术, 获取高质量冰芯已成为极地科学的重要研究方向之一. 实践表明, 深冰芯钻探回转钻进

时, 钻头切削具与冰层之间产生的切削热对钻进安全有着重要的影响. 尤其是“暖冰”层钻进时, 由于冰的熔点低、温度高, 如果切削热较大易导致冰屑融化或处于熔融状态, 融化产生的水在钻头或钻具局部位置可能会再次结冰, 导致钻井液循环不畅、冰屑不能及时带出、钻进效率低等问题, 严重时会造成卡钻等孔内复杂事故. 如格陵兰冰

盖 NorthGRIP 深冰芯钻探项目,在孔深 2 931 m 处遇到“暖冰”,冰层温度为  $-7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (压力熔点  $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),融化的冰屑黏附在钻头切削具和水槽内,阻碍钻井液的正常循环,多次发生了卡钻事故<sup>[1]</sup>. 在南极进行的 EPICA Dome C-2, Byrd 站, EPICA DML, 俄罗斯 Vostok 站 5G-1 以及格陵兰岛 Neem 等深冰芯钻探项目均遇到了“暖冰”层钻进技术难题<sup>[2-6]</sup>. 因此,冰层回转切削钻进切削热问题已引起人们的关注. 如 Green 等对电动机机械钻具钻进工艺进行分析,认为切削产生的热量将冰屑融化,产生的水在钻具局部位置二次冻结是导致卡钻事故的关键所在<sup>[7]</sup>. Azuma 等借鉴金属切削理论对回转钻进时产生的热量进行分析,建立了解析模型,为冰层钻进切削热研究提供了重要借鉴<sup>[8]</sup>.

钻头回转切削钻进过程是一个局部产生高温、高压和高应变的非线性动态随机过程,钻压、转速及冰层的物理力学性质等参数对切削热均有较大影响. 本文在综合前人工作的基础上,借鉴金属切削理论,建立了切削温度计算模型,研究钻压、转速、切削具刃角、冰与切削具之间的摩擦系数以及冰抗剪强度等因素对切削温度的影响规律.

## 1 冰层回转钻进切削热量的解析计算

### 1.1 回转钻进切削具受力分析

冰层回转钻进大多采用三刀具钻头,在钻压和回转扭矩的作用下钻头切削具切入冰层,对冰剪切破坏;切入深度由钻头切削具后刀面处设计的垫块控制,如图 1 所示. 当冰的塑性较高而脆性较低时(如暖冰),冰主要发生塑性变形,其切削过程与金属直角切削加工过程非常相似<sup>[8]</sup>. 金属

直角切削时,切削热主要来自刀具前刀面与工件的摩擦热、工件的塑性变形热以及刀具后刀面与工件的摩擦热. 考虑到冰钻钻头切削具较为锋利,其后刀面与冰层之间的接触面积较小,本文分析时主要考虑切削具前刀面的摩擦热和冰屑的塑性变形热,后刀面主要考察垫块处的摩擦作用,其受力状态如图 1 所示.

取单个切削具为研究对象,将回转切削过程简化为单一剪切平面模型,将切削具和垫块作为一个整体进行受力分析,可得

$$\begin{cases} P_x = F_1 \sin \alpha + N_1 \cos \alpha + F_2 \cos \gamma - N_2 \sin \gamma, \\ P_y = F_1 \cos \alpha - N_1 \sin \alpha + F_2 \sin \gamma + N_2 \cos \gamma. \end{cases}$$

摩擦力:  $F_1 = N_1 f$ ,  $F_2 = N_2 f$ .

$$\text{摩擦系数: } f = \tan \delta.$$

由于切削形成的螺旋降角较小,  $\gamma \approx 0$ , 联合以上各式可得

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{2P_x \cdot (\cos \delta)^2 - P_y \cdot \sin 2\delta}{2\cos(\alpha - 2\delta)}, \\ F_1 &= \frac{P_x \cdot \sin 2\delta - 2P_y \cdot (\sin \delta)^2}{2\cos(\alpha - 2\delta)}, \\ N_2 &= \frac{\cos \delta [P_x \sin(\alpha - \delta) + P_y \cos(\alpha - \delta)]}{\cos(\alpha - 2\delta)}, \\ F_2 &= \frac{\sin \delta [P_x \sin(\alpha - \delta) + P_y \cos(\alpha - \delta)]}{\cos(\alpha - 2\delta)}. \end{aligned}$$

$P_y$  为切削具所受的轴向压力(钻压的一部分);  $P_x$  为切削力(回转扭矩产生的水平力的一部分);  $\phi$  为剪切面与水平面之间的夹角;  $\alpha$  为刃前角;  $\beta$  为刃后角;  $\gamma$  为刀刃切削形成的螺旋降角;  $\theta$  为冰的内摩擦角;  $\delta$  为冰与切削具接触面摩擦角;  $h$  为切削具切削深度;  $L$  为剪切面长度;  $b$  为切削具宽度;  $f$  为冰与切削具之间的滑动摩擦系数;  $F_1$  为切削具前刀面与冰屑之间的摩擦力;  $N_1$  为切削具前刀面受到的正压力;  $F_2$  为垫块与冰层之间的摩擦力;  $N_2$  为垫块受到的正压力.

以冰屑为研究对象,对其进行受力分析,可求出剪切面上的剪切力和正压力,即

$$\begin{aligned} F_s &= \tau_s \cdot L \cdot b = F_1 \sin(\alpha - \phi) + N_1 \cos(\alpha - \phi), \\ N_s &= \sigma_s \cdot L \cdot b = F_1 \cos(\alpha - \phi) - N_1 \sin(\alpha - \phi), \\ L &= \frac{h}{\sin \phi}. \end{aligned}$$

根据库伦-莫尔准则,当剪应力  $\tau_s$  超过内聚力  $C$  与内摩擦力之和时,便发生剪切破坏,即

$$\tau_s = C + \mu \sigma = C + \sigma_s \tan \theta. \quad (1)$$

则

$$\begin{aligned} \tau_s - \mu \sigma &= \\ \frac{(P_x \cos \delta - P_y \sin \delta) \cdot \cos(\phi + \delta - \alpha + \theta) \sin \phi}{\cos \theta \cdot \cos(\alpha - 2\delta) \cdot h \cdot b} &= C. \quad (2) \end{aligned}$$

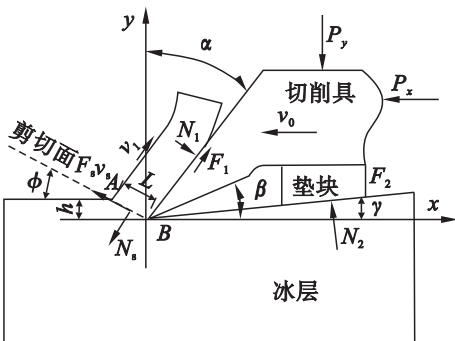


图 1 冰层取芯钻头切削具受力分析图  
Fig. 1 Force analysis diagram of cutter of ice core drilling bit

式中 $(\tau_s - \mu\sigma)$ 是 $\phi$ 的函数. 对式(2)求 $\phi$ 一阶导数得

$$\frac{(P_x \cdot \cos \delta - P_y \cdot \sin \delta) \cdot \cos(2\phi + \delta + \theta - \alpha)}{\cos \theta \cdot \cos(\alpha - 2\delta) \cdot h \cdot b} = 0.$$

上式成立的充分必要条件为

$$\cos(2\phi + \theta + \delta - \alpha) = 0,$$

故

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \theta - \delta}{2}. \quad (3)$$

切削具水平速度 $v_0$ 、冰屑流速 $v_1$ 和剪切速度 $v_s$ 形成一个封闭速度矢量图,如图 1 所示,各速度的表达式分别为

$$v_1 = v_0 \cdot \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)}, \quad (4)$$

$$v_s = v_0 \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)}. \quad (5)$$

根据钻头转速可求出切削具水平速度 $v_0$ :

$$v_0 = \frac{\int_r^R \frac{2\pi rn}{60} dr}{R - r} = \frac{\pi n(r + R)}{60}. \quad (6)$$

式中: $R$ 为切削具外半径; $r$ 为切削具内半径; $v_0$ 为切削具回转线速度; $v_1$ 为冰屑相对于切削具的运动速度; $v_s$ 为冰屑剪切速度; $n$ 为切削具回转速度.

### 1.2 回转钻进切削热的计算

切削产生的热量 $Q$ 来自三部分:切削具与冰屑摩擦产生的热 $Q_{\text{fl}}$ 、冰屑剪切变形产生的热 $Q_s$ (简称为剪切热)以及切削具垫块与冰层摩擦产生的热 $Q_{\text{fz}}$ ,其中前两项对冰屑的温升有重要作用:

$$Q = Q_s + Q_{\text{fl}} + Q_{\text{fz}}. \quad (7)$$

$$Q_s = F_s v_s =$$

$$\frac{\pi n(r + R) \cos \alpha \cos(\phi + \delta - \alpha) (P_x \cos \delta - P_y \sin \delta)}{60 \cdot \cos(\phi - \alpha) \cdot \cos(\alpha - 2\delta)},$$

$$Q_{\text{fl}} = F_1 v_1 = \frac{\pi n(r + R) \sin \phi [P_x \sin 2\delta - 2P_y (\sin \delta)^2]}{120 \cdot \cos(\phi - \alpha) \cdot \cos(\alpha - 2\delta)},$$

$$Q_{\text{fz}} = F_2 v_0 =$$

$$\frac{\pi n(r + R) \sin \delta [P_x \sin(\alpha - \delta) + P_y \cos(\alpha - \delta)]}{60 \cdot \cos(\alpha - 2\delta)}.$$

从上式可以看出,回转切削产生的热量与转速 $n$ 、钻压 $P_y$ 、切削具刃前角、冰与切削具接触面摩擦角以及切削具的结构参数等有关.

### 1.3 切削热量引起切屑温度的变化

根据金属切削理论,切削产生的热量一部分被冰屑带走,一部分传输至刀具,最后一部分传输给冰层. 这里主要分析冰屑的温度变化,计算时不考虑钻并液循环对冰屑温度变化的影响.

设剪切变形区传输给冰屑的热量比例为 $R_1$ ,则剪切面上的平均温度变化(简称为剪切温升)为

$$\Delta t_s = \frac{R_1 Q_s}{c_i \rho_i v_0 h b}. \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{1}{1 + 1.33 \sqrt{\frac{\lambda_i \varepsilon}{v_0 h}}},$$

$$\varepsilon = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)}.$$

假设摩擦热量传输至冰屑的比例为 $R_2$ ,采用 J. C. Jaeger 的动热源方法来计算切削具与冰屑摩擦面的摩擦温度(简称为摩擦温升),则有

$$\Delta t_f = \frac{0.377 \cdot R_2 \cdot Q_{\text{fl}}}{k_i \cdot b \cdot \sqrt{\frac{v_1 l_f}{4\lambda_i}}}. \quad (9)$$

其中,

$$R_2 = \frac{\frac{Q_{\text{fl}}}{bk_c} \cdot \Lambda - \Delta t_s}{\frac{Q_{\text{fl}}}{bk_c} \cdot \Lambda + \frac{0.377 \cdot Q_{\text{fl}}}{bk_i \sqrt{\frac{v_1 l_f}{4\lambda_i}}}},$$

$$\Lambda = \frac{2}{\pi} \left\{ \operatorname{arsinh}\left(\frac{b}{2l_f}\right) + \frac{b}{2l_f} \operatorname{arsinh}\left(\frac{2l_f}{b}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{b}{2l_f}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{2l_f}{b}\right) - \frac{1}{3} \left(\frac{b}{2l_f} + \frac{2l_f}{b}\right) \left[1 + \left(\frac{b}{2l_f}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \right\}.$$

冰屑与切削具接触长度 $l_f$ 由下式计算:

$$l_f = \frac{h \cdot \sin(\phi + \delta - \alpha)}{\sin \phi \cdot \cos \delta}.$$

式中: $k_c$ 为切削具的导热系数; $k_i$ 为冰的导热系数; $c_i$ 为冰的比热容; $\rho_i$ 为冰的密度; $\varepsilon$ 为切屑变形参数; $\lambda_i$ 为冰的热扩散系数; $\Lambda$ 为移动平面热源的形状系数,其他参数同上.

因此,回转切削钻进造成的冰屑温度变化为

$$\Delta t = \Delta t_s + \Delta t_f. \quad (10)$$

## 2 冰屑温度变化影响因素分析

### 2.1 钻压的影响

设冰密度 $920 \text{ kg/m}^3$ ,比热容 $2078 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,导热系数 $2.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,热扩散系数 $1.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,钻头外径 $60 \text{ mm}$ ,内径 $40 \text{ mm}$ ,切削具外径 $66 \text{ mm}$ ,内径 $36 \text{ mm}$ ,冰的内摩擦角为 $4.5^\circ$ ,切削具宽度为 $15 \text{ mm}$ ,切削具刃前角为 $30^\circ$ ,切削具导热系数为 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,切削深度为 $2 \text{ mm}$ ,冰与切削具之间的动摩擦系数为 $0.05$ ,冰的抗剪强度为 $4 \text{ MPa}$ ,钻头转速为 $50 \text{ r/min}$ .

计算不同钻压条件下切削热的大小及冰屑温度的变化情况,结果如图 2a 所示. 由于冰的强度较低,在很小的钻压下切削具即可切入冰层. 为避免切入过深导致扭矩增大而增加钻具反扭系统负担并防止切削具折断,一般在切削具后刃面上设计垫块来控制切削深度,大部分钻压由垫块承担. 因此,当其他条件不变时,增加钻压仅增大垫块处的摩擦热量,剪切热量和前刃面摩擦热量基本不变,冰屑的温升维持在 3℃左右. 从图中还可以看出,切削热主要来自冰的剪切变形热量,前刃面和垫块的摩擦热量相对较小.

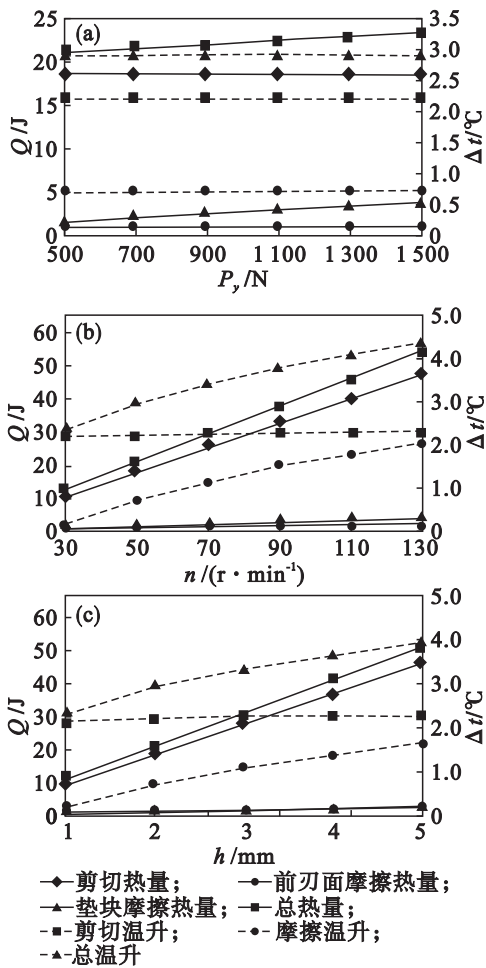


图 2 切削热量、切削温度与钻进切削参数的关系  
Fig.2 Relationship between cutting heat, cutting temperature and drilling parameters

(a)—钻压的影响; (b)—转速的影响;  
(c)—切削深度的影响.

2.2 转速的影响

取钻压为 500 N,保持其他参数不变,分析钻头转速对切削温度的影响,结果如图 2b 所示.

随钻头转速的增高,单位时间内破碎的冰量增多,钻进速度加快,消耗的功率增大,冰的剪切变形热量大幅增加,当转速由 30 r/min 增大到 130 r/min 时,剪切变形热量由 11.16 J 增大到

48.37 J,但由于冰屑同比增多,剪切温升基本不变,维持在 2.2℃左右. 同时,转速的增高使切削具与冰屑之间的摩擦加剧,冰屑摩擦温升不断增大. 当转速由 30 r/min 增大到 130 r/min 时,前刃面摩擦热量由 0.6 J 增大到 2.7 J 左右,冰屑摩擦温升由 0.19℃升到了 2.06℃,导致冰屑总温升达到了 4.29℃. 因此,在机械钻速满足要求的前提下,应尽量降低钻头回转速度,以降低消耗的总功率以及冰屑温升.

2.3 切削深度的影响

取钻压为 500 N,钻头转速为 50 r/min,保持其他参数不变,计算切削深度对切削温度的影响,结果如图 2c 所示.

随切削深度的增加,冰屑厚度增大,单位时间内破碎的冰量随之增多,剪切热量增高. 由于产生的冰屑相应增多,剪切温升基本不变,但摩擦温升逐渐增加,冰屑总温升不断增大. 当切削深度由 1 mm 增至 5 mm 时,冰屑摩擦温升由 0.2℃增至 1.66℃,总温升由 2.34℃增大到 3.95℃.

2.4 切削具与冰之间摩擦系数的影响

取钻压为 500 N,钻头转速 50 r/min,切削具切削深度为 2 mm,保持其他参数不变,分析摩擦系数对切削温度的影响,结果如图 3a 所示.

相同条件下,冰与切削具之间的摩擦力随摩擦系数增加而增大,摩擦热和摩擦温升随之增加. 当摩擦系数由 0.05 增大到 0.3 时,摩擦温升由 0.71℃增大到 6.81℃左右,冰屑的总温度升高了 9.11℃. 因此,虽然摩擦产生的热量较剪切变形产生的热量小,但由于冰屑与前刀面的接触长度较小,导致冰屑温升有显著的变化. 在设计切削具或者优选涂层材料时,应尽可能地降低切削具与冰之间的摩擦系数.

2.5 切削具刃前角的影响

取钻压为 500 N,钻头转速为 50 r/min,切削具切削深度为 2 mm,切削具与冰的摩擦系数为 0.05,保持其他参数不变,分析切削具刃前角对切削温度的影响,结果如图 3b 所示.

随着切削具刃前角的增加,剪切热量和冰屑剪切温度迅速降低,前刃面处摩擦热基本不变而垫块处摩擦热略有增加. 由于切削具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,导致摩擦温升不断增大,当摩擦温升的增幅超过剪切温升的降幅时,冰屑总温升增大. 如图 3b 所示,当刃前角由 15°增大到 60°时,冰屑总温升由 3.48℃降低到 2.3℃. 随后,冰屑温升开始增大,刃前角为 75°时,冰屑总温升达到了 2.42℃.

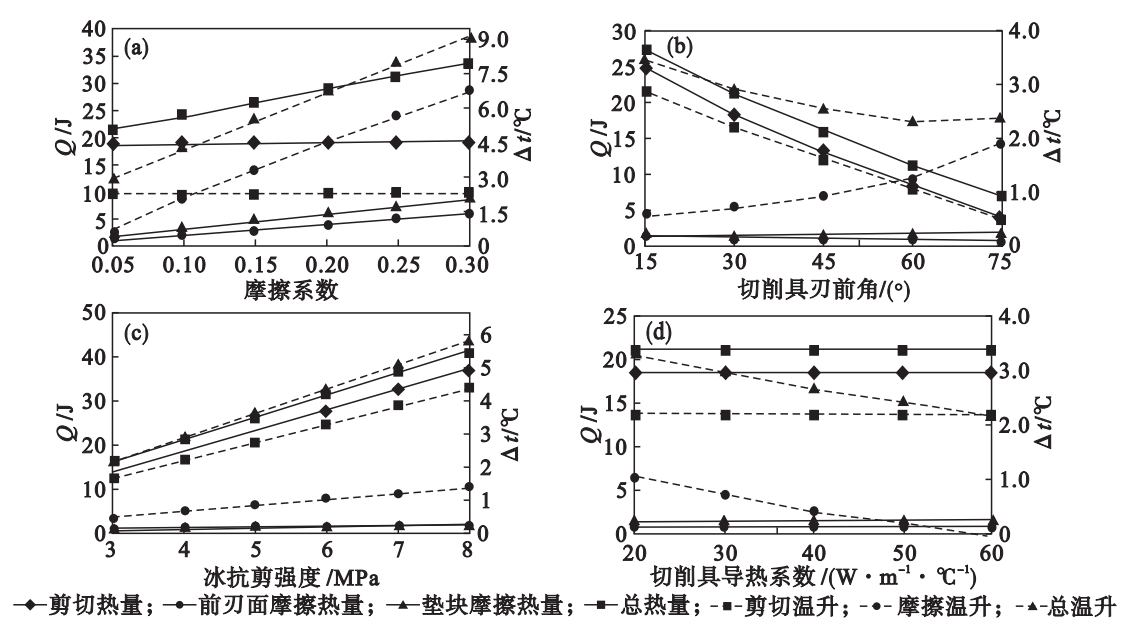


图 3 切削热量、切削温度与物性参数的关系  
Fig.3 Relationship between cutting heat, cutting temperature and physical parameters

(a) —摩擦系数的影响; (b) —切削具刃前角的影响; (c) —冰抗剪强度的影响; (d) —导热系数的影响。

## 2.6 冰抗剪强度的影响

保持其他参数不变,分析冰的抗剪强度对切削温度的影响,结果如图 3c 所示。

随冰抗剪强度的增加,冰的剪切破碎难度增大,消耗的功率相应增加,冰屑的剪切温升和摩擦温升不断升高. 当冰的抗剪强度由 3 MPa 增大到 8 MPa 时,冰屑的总温升由 2.19 °C 升高到 5.84 °C.

因此,相同条件下,钻进的冰层不同,钻进消耗的功率不同,导致冰屑的升高温度也不同。

## 2.7 切削具导热系数的影响

保持其他参数不变,冰的抗剪强度为 4 MPa,切削具导热系数对切削热量和切削温度的影响如图 3d 所示。

由于冰的物理力学性质、切削具结构及钻进参数等条件均未改变,因此钻进消耗的总功率不变,剪切热量、前刀面摩擦热量和垫块处的摩擦热量分别维持在 18.6、1.02 和 1.62 J 左右. 随切削具导热系数的增加,前刀面处的摩擦热量散失速度加快,冰屑温升降低. 当切削具导热系数由 20 W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup> 增大到 70 W·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup> 时,冰屑摩擦温升由 1.05 °C 降低到 0.01 °C 左右,冰屑总温升由 3.27 °C 降低到约 2.23 °C.

因此,在选择切削具材料时,应优选导热系数高的材料。

## 2.8 计算模型可靠性分析

为研究切削温度理论计算的合理性,在冰层回转钻进温度无线测量实验系统中进行了测试. 实验钻头切削具外径为 66 mm,切削具内径为

36 mm,切削具宽度 15 mm,钻压 500 N,转速 70 r/min,冰样取自自来水室外自然冻冰冰样. 结果表明,在实验条件下,冰屑的温升为 2.5 ~ 2.8 °C<sup>[9]</sup>. 相同条件下,利用本文公式计算可得冰屑的温升约为 3.3 °C (图 2b 所示),两者基本吻合。

## 3 结 论

1) 冰层回转切削钻进产生的切削热主要来自冰的剪切变形热量,前刀面及垫块与冰摩擦产生的热量相对较小。

2) 钻压的变化仅改变垫块处的摩擦热量,对冰屑的温升没有影响,但为了降低钻进消耗的总功率,在满足钻进的情况下,应尽量减少钻压。

3) 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,其中摩擦系数对冰屑的温升影响显著,设计时应优选低摩擦系数的材料。

4) 本文没有考虑低温钻井液的影响,应实测钻井液对切削温度的影响程度,对理论模型进行适当修正,为今后极地深冰芯钻探工程提供借鉴。

## 参考文献:

[ 1 ] Johnsen S J, Hansen S B, Sheldon S G, et al. The Hans Tausen drill: design, performance, further developments and some lessons learned [ J ]. *Annals of Glaciology*, 2007, 47 ( 1 ): 89 - 97.