

极地深层热水钻回水软管伴热功率数值模拟研究

李小冰^{1,2}, 李冰^{1,2}, 李亚洲^{1,2*}, 刘艺倬^{1,2}, 张在兴^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 极地深层热水钻通过高温高压热水融冰钻进, 主要用于快速钻穿冰盖后向其中下放科学监测仪器或获取冰下环境样品。回水腔是深层热水钻重要的组成部分。钻进后的融水上返到回水腔后, 通过潜水泵抽吸, 经回水软管返回地表。由于极地冰层温度很低, 加之深层热水钻回水软管较长, 这导致回水软管内的融水在上返过程中存在被冻结的风险。因此, 在回水软管内铺设具备电加热功能的伴热电缆, 对避免回水软管内融水的冻结以及深层热水钻的稳定运行具有重要意义。目前, 尚没有对回水软管所需伴热功率的研究。为此, 本文首先对回水软管可能面临的正常工况、停钻工况、干烧工况和解冻工况进行了分析, 然后基于COMSOL Multiphysics 6.0软件建立了4种工况下伴热功率的数值模拟方法, 主要对回水软管伴热功能的运行功率、运行时间和安全功率上限进行了研究。研究结果给出了回水软管伴热功能在4种工况下的运行策略, 为回水软管伴热电缆的设计提供了参考。

关键词: 冰下湖; 热水钻; 回水腔; 回水软管; 伴热功率; 极地钻探

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0051-10

Numerical simulation study on heat tracing power of return-water hose of deep hot-water drill in polar regions

LI Xiaobing^{1,2}, LI Bing^{1,2}, LI Yazhou^{1,2*}, LIU Yizhuo^{1,2}, ZHANG Zaixing^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Deep hot-water drills in polar regions are used to melt ice by means of high-temperature and high-pressure hot water and are mainly used for rapidly drilling through the ice cap and then lowering scientific monitoring instruments or obtaining samples of the under-ice environment into it. The return-water cavity is an important part of the deep hot-water drill. After drilling, the meltwater is returned to the return-water cavity, pumped by submersible pumps, and returned to the surface through the return water hose. Due to the very low temperature of the polar regions ice and the long return hose of the deep hot-water drill, this leads to the risk of the meltwater inside the return hose being frozen during the upward return process. Therefore, laying heat tracing cables with electric heating function in the return water hose is of great significance to avoid freezing of meltwater in the return hose and stable operation of the deep hot-water drill. At present, there is no research on the required heat tracing power of return water hose. For this reason, this paper firstly analyses the normal working condition, drilling stop condition, dry burning condition and thawing condition that the return water hose may face, and then establishes the numerical simulation method of heat tracing power in four working conditions based on the COMSOL Multiphysics 6.0 software, and mainly investigates the

收稿日期: 2024-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.008

基金项目: 国家重点研发计划项目“极地大深度冰盖快速钻探关键技术与装备”课题三“高承压多功能软管及其绞车系统”(编号: 2021YFC2801403); 国家自然科学基金青年科学基金项目“可回收式热融钻具孔壁冻融过程的传热规律研究”(编号: 42206255)

第一作者: 李小冰, 男, 汉族, 1999年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 主要从事极地钻探技术与装备研究工作, 北京市海淀区学院路29号, 3002230024@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 李亚洲, 男, 汉族, 1993年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 长期从事极地钻探技术与装备研究工作, 北京市海淀区学院路29号, yazhouli@cugb.edu.cn。

引用格式: 李小冰, 李冰, 李亚洲, 等. 极地深层热水钻回水软管伴热功率数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 51-60.

LI Xiaobing, LI Bing, LI Yazhou, et al. Numerical simulation study on heat tracing power of return-water hose of deep hot-water drill in polar regions[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 51-60.

operating power, operating time and upper limit of the safe power of the heat tracing function of the return water hose. The results of the study give the operation strategy of the return water hose heat tracing function under the four working conditions, thus providing a certain reference for the design of the return water hose heat tracing cable.

Key words: subglacial lake; hot-water drill; return-water cavity; return-water hose; heat tracing power; polar drilling

0 引言

自从冰下湖首次被发现以来,人们已经在极地发现了773个冰下湖,其中675个位于南极^[1-2]。冰下湖被认为是微生物的极端栖息地,另外湖底沉积物可能记录着年代久远的古气候和冰盖运动历史^[3]。而冰下湖上方的冰盖蕴藏着数百万年以来随降雪而保存的重要气候信息^[4-5]。因此,开展极地冰下湖科学钻探,对了解冰盖结构与演化历史、极端生命的起源与演化、古气候环境信息及预测未来全球气候变化等均有重要意义^[6-7]。

迄今为止,人类一共进行过4次冰下湖钻探尝试,分别为俄罗斯的Vostok冰下湖项目,英国的Ellsworth冰下湖项目,美国的Whillans和Mercer冰下湖项目^[8-9]。其中俄罗斯在Vostok冰下湖钻探中虽然成功钻至湖底,但是由于其采用的是传统深冰芯钻探,其获取的冰下湖湖水样品最终被钻井液污染^[10-11]。英国在Ellsworth冰下湖的钻探项目采用了热水钻,但是由于井下主孔和副孔无法连通,最终钻探项目以失败告终^[12]。美国在Whillans和Mercer冰下湖项目中同样采用了热水钻,并成功取得了冰下湖湖水样品^[13-14]。我国于2016年在东南极伊丽莎白公主地发现了麒麟冰下湖,其上覆冰盖约3600 m^[15-16]。目前,我国计划对该冰下湖开展钻探采样^[17]。热水钻是目前公认的开展冰下湖探测最高效、最安全和最清洁的钻探装备,美国、英国的冰下湖钻探均以热水钻为主^[18-20]。

热水钻是一种利用从喷嘴喷射出来的高温高压热水来冲击和融化冰雪层的快速钻进方法,其最高钻速可达120 m/h^[21]。深层热水钻指的是钻进深度>1500 m的热水钻^[21]。目前,我国正在研发适用于麒麟冰下湖钻探的深层热水钻。深层热水钻工作时,首先在地表将雪融化成水并通过加热器加热。加热后的水被高压水泵经主软管泵送至孔底钻具喷嘴,形成高速射流来融冰钻进。钻进后的融水温度降低,并通过环空上返至回水腔,再由潜水泵经回水软管泵送至地表,形成井下和地表的水路循环^[20]。在极地,冰盖温度可低至-60℃,以麒麟

冰下湖所在地为例,其地表平均雪温约为-41℃。这将导致回水软管内融水在上返至地表途中存在较大的冻结风险^[22]。此外,回水软管自身也存在和冰孔发生冻结的风险。为此,可向回水软管内铺设伴热电缆,使其在通电后产生一定的热量,来避免回水软管在井下发生冻结事故。

如图1所示,回水软管主要包含3层,分别是内衬层、增强层和外保护层^[23]。内衬层位于管道最内侧,与内部输送的介质直接接触,用于防止内部介质的渗透,并在纤维缠绕过程中提供支撑作用;增强层由纤维和热塑性材料构成,用于提升软管强度;外保护层位于软管最外侧,与外部环境直接接触,防止外部环境对增强层产生影响和破坏。信号线、动力电缆和伴热电缆可以嵌入软管内衬层中。信号线用于地面和井下监测设备之间的通讯;动力电缆用来给井下潜水泵进行供电;伴热电缆一般为电阻材料,其利用通电后产生的焦耳热来避免回水软管的冻结。为了实现回水软管的均匀加热,伴热电缆沿回水软管螺旋缠绕。伴热电缆两端在地表接入调压器,通过调压器向其输出一定的电压后产生热量,并将热量传递给回水软管基体材料,使回水软管整体温度升高,以避免其在井下发生冻结。

回水软管在不同的冰层温度条件和不同的工况条件下所选的加热功率不同。设置过高的加热

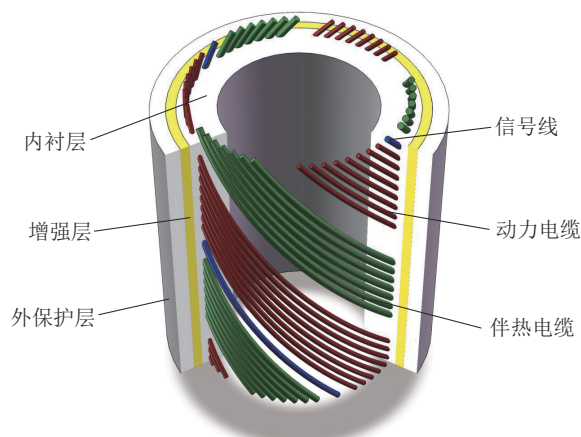


图1 回水软管结构示意图

功率不仅会导致能量的浪费,而且产生的高温会对回水软管自身材料造成损害,而过低的加热功率则难以达到防止回水软管冻结的目的。但目前尚未有人针对回水软管伴热电缆的加热功率开展过研究,因此难以根据实际工况为回水软管选择合适的加热功率。为此,本文首先对回水软管的工况进行了分析,并对不同工况下回水软管伴热电缆的加热功率开展了数值模拟研究,从而为极地深层热水钻回水软管伴热电缆的设计和使用提供一定的依据。

1 回水软管工况分析

热水钻系统中,用于孔底钻具融冰钻进的热量为钻进用水,其流量称为钻进流量;为了防止回水腔冻结而向回水腔内注入的热水为注热用水,其流量称为注热流量;通过回水软管抽送至地面的融水为循环用水,其流量称为回水流量。通常情况下为保证回水腔内水位不发生变化,回水流量的大小为钻进流量和注热流量之和。

回水软管工作时,包括正常运行状态和非正常运行状态。在正常运行时,回水软管位于回水孔中央,经潜水泵抽吸的融水在回水软管内上返,软管外侧被寒冷空气包裹。回水软管将以较大的流量进行回水作业。此时,由于流量较大,软管内融水流速很高,管内融水、软管、软管外侧冷空气三者之间热交换时间短,热交换不够充分,因此回水软管内融水在整个上返过程温降 $\geq 2^\circ\text{C}$ ^[22]。但若钻进后上返至回水腔的水温低至 0°C ,融水仍有可能在回水软管内发生冻结。此时,必须开启伴热电缆,对回水软管进行加热。

回水软管的非正常运行状态主要包括停钻工况、干烧工况和解冻工况。停钻工况下,钻进系统短时间停止作业,为避免回水腔在停钻期间发生冻结,仍需向回水腔内注入一定量的热水。此时,钻进流量为零,回水流量等于注热流量。由于回水软管的流量大幅减小,因此回水软管内融水流速减低,与外界冷空气的热交换时间增长,热交换更加充分,融水在整个上返过程的温降增大,冻结风险增大^[24]。

在干烧工况下,回水软管内没有融水流动,内部充满空气,但伴热电缆仍处于加热状态。在长时间干烧状态下,回水软管本身的温度会不断升高,一旦温度超过软管材料的耐高温极限,将会影响其

力学性能。干烧工况主要在以下两种情况下发生,一是潜水泵损坏,停止工作;二是回水软管部分孔段发生冻结,融水无法在其余管段内流动。

当回水软管内上返融水温度过低或回水软管伴热功能未正常开启时,均有可能导致回水软管内融水在上返过程当中发生冻结,甚至回水软管冻结在冰孔内,此时若要重新进行钻进作业,应先对回水软管进行解冻。解冻工况存在两种情况,在第一种情况下,只有回水软管内的融水发生冻结;第二种情况下,回水软管内融水发生冻结,且回水软管自身和冰层冻结。

对上述4种工况下回水软管的伴热功率开展数值模拟研究。模拟时,以正在研发的麒麟冰下湖深层热水钻为例,假设回水软管的内衬层、增强层和外保护层材料均使用尼龙PA12,其外径为73 mm,内径为40 mm,伴热层直径为55 mm,长度为370 m。同时,假设冰层温度为 -45°C 。

2 正常工况和停钻工况下回水软管伴热功率数值模拟

2.1 正常工况和停钻工况下回水软管传热物理模型

回水软管在正常工况和停钻工况下的流动传热物理模型如图2所示。上返融水以流量 Q 进入回水软管,入口处平均温度为 T_m ,入口处平均速度为 u_m ,其流动方向与重力加速度 g 方向相反。融水在内径为 d ,外径为 D 的回水软管内流动的同时,通过软管本身与外界温度为 T_a 的冷空气进行热交换冷却,当回水软管伴热电缆开启时,分布在直径为 d' 处的伴热电缆以总功率 P 持续运行,最终上返融水在流过长度为 L 的回水软管后,以压力 p_0 流出回水软管。在该模型中,因信号线和动力电缆的发热量很小,故忽略了信号线和动力电缆的影响,且忽略回水软管不同层之间的差异。

2.2 正常工况和停钻工况下回水软管传热数学模型

回水软管内部水流流场的连续性方程及动量方程分别为:

$$\nabla \cdot (\rho_w u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_w (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pI + K] + \rho_w g \quad (2)$$

式中: ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ; u ——速度矢量, $\text{m}/$

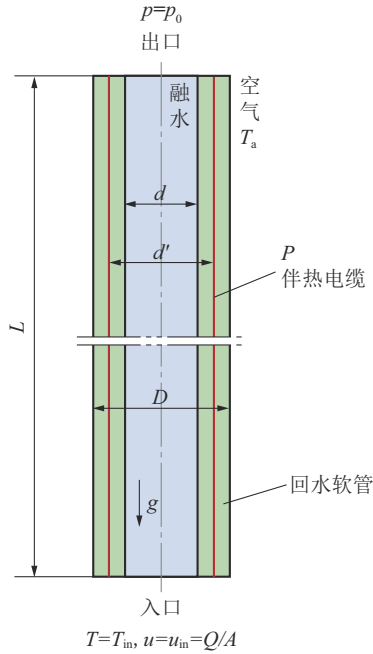


图2 正常工况和停钻工况下回水软管传热物理模型

s ; p ——水流压力, Pa; I ——单位矩阵; g ——重力加速度, m/s^2 ; K ——粘性应力张量, Pa。

K 可用式(3)计算:

$$K = (\mu + \mu_T) \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot u) I - \frac{2}{3} \rho_w k I \quad (3)$$

式中: μ ——水的动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_T ——水的湍流粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k ——湍流动能, m^2/s^2 ; T ——绝对温度, K。

水流的传热控制方程为:

$$\rho_w C_w u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0 \quad (4)$$

$$q = -k_w \nabla T \quad (5)$$

式中: ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ; C_w ——水的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; q ——传导热通量, W/m^2 ; k_w ——水的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

回水软管自身的传热控制方程为:

$$\rho_n C_n u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0 \quad (6)$$

$$q = -k_n \nabla T \quad (7)$$

式中: ρ_n ——软管材料的密度, kg/m^3 ; C_n ——软管材料的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; q ——传导热通量, W/m^2 ; k_n ——软管材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

回水软管入口处的边界条件为:

$$u = u_{in} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

$$T = T_{in} \quad (9)$$

式中: u_{in} ——回水软管入口水的平均流速, m/s ; Q ——回水软管内水的流量, m^3/s ; T_{in} ——回水软管进口水的温度, K; A ——回水软管内部横截面积, m^2 。

A 可通过式(10)计算:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (10)$$

回水软管出口处边界条件为:

$$p = p_0 \quad (11)$$

式中: p_0 ——回水软管出口处压力, 0 Pa。

在伴热电缆上,有:

$$Q_b = \frac{P}{A'} \quad (12)$$

式中: Q_b ——功率密度, W/m^2 ; P ——总功率, W; A' ——伴热电缆的横截面积, m^2 。

A' 可通过式(13)计算:

$$A' = \pi d' L \quad (13)$$

回水软管外壁处的边界条件为:

$$q_0 = h(T_a - T) \quad (14)$$

式中: h ——软管外壁与外界空气的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_a ——外界空气温度, K。

方程(1)~(7)的初始条件为:

$$u_{\text{流体}} = 0 \quad (15)$$

$$T_{\text{流体}} = T_{in} \quad (16)$$

$$p_{\text{流体}} = p_0 \quad (17)$$

$$T_{\text{固体}} = T_a \quad (18)$$

联立以上各式求解即可得到回水软管内上返融水的温度变化规律。运用COMSOL Multiphysics 6.0软件中的固体与流体传热模块和湍流($k-\epsilon$)模块对上述数学模型进行求解,并通过非等温流动将上述两个模块进行耦合,通过控制单一变量的方式即可得到不同入口温度和加热功率下的上返融水温度随深度的变化规律。本模拟以回水软管出口处融水温度是否低于 0°C 来判断回水软管的冻结情况。计算时使用的具体参数见表1。

2.3 正常工况和停钻工况下回水软管内融水温度的变化规律

本节主要探讨回水软管在正常工况和停钻工况下,上返融水在不同的入口温度和加热功率条件下的温度随深度的变化规律。正常工况模拟时,假设上返融水入口温度为 $0\sim 3^\circ\text{C}$ 时,流量为 230 L/

表1 PA、水及空气的热物性参数

参数项	参数值
$\rho_n/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1150
$C_n/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	1700
$k_n/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	0.26
$\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	999.8
$C_w/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	4170.3
$k_w/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	0.56
$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.0018
$\rho_a/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.54
$C_a/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	1004
$k_a/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	0.02

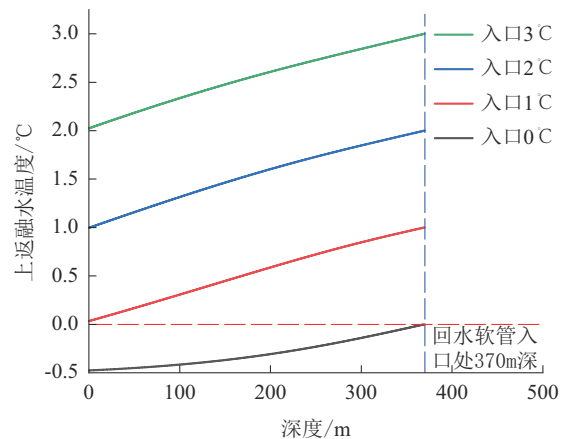
min,加热功率为0~20 kW;停钻工况模拟时,假设上返融水入口温度为0~3℃时,流量为20 L/min,加热功率为10.6~20 kW。

如图3所示,正常工况下,不开启伴热电缆,当融水入口温度分别为0~3℃时,地表出口处温度分别为-0.47、0.03、0.99、2.02℃,上返融水的温降在1℃左右,当入口处温度低于1℃时,存在冻结风险;融水入口为0℃,开启伴热电缆时,其加热功率至少要达到16 kW才能够保证融水在上返过程中不发生冻结。在考虑一定安全余量的条件下建议该工况下的加热功率为20 kW。此时伴热电缆的功率密度为0.0313 W/cm²,线功率密度为54.1 W/m。

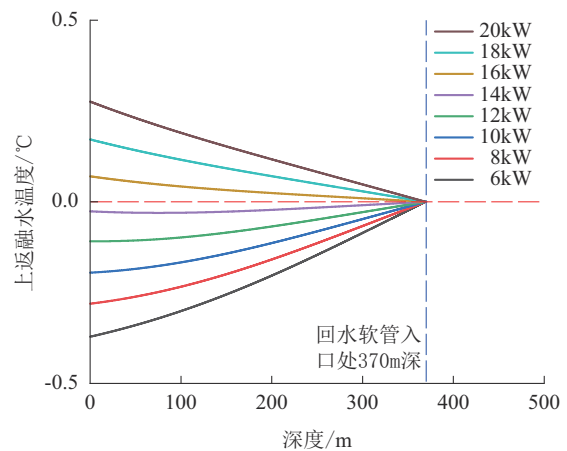
如图4所示,停钻工况下,当融水入口温度分别为0~2℃,回水软管加热功率要分别大于15.6、16、16.4 kW时,才能保证融水温度随着深度的减小逐渐增大,反之逐渐减小;当融水入口温度不变时,要使地表出口处水温增加1℃时,伴热电缆加热功率约增加2 kW;当融水入口温度分别为0~3℃时,要使其在回水软管内不冻结,需要的加热功率分别为15.6、14、12.6、11 kW。总的来看,在停钻工况下,选择16 kW的加热功率即可满足回水软管的伴热需求,在考虑一定安全余量的条件下建议该工况下的加热功率为20 kW。此时伴热电缆的功率密度为0.0313 W/cm²,线功率密度为54.1 W/m。

3 干烧工况下回水软管伴热功率数值模拟

在干烧工况下,若伴热电缆产生的温度超过回水软管材料的安全极限,会对回水软管本身产生不可逆的破坏,降低回水软管的使用寿命。由于



(a) 伴热电缆未开启



(b) 伴热电缆开启

图3 正常工况下回水软管内融水温度随深度的变化规律

PA12的最高耐温能力为90℃,因此,本模拟以90℃为回水软管破坏极限温度。当加热电缆处的温度>90℃时,则说明回水软管有被烧坏的风险。由于回水软管长度对于该工况的求解几乎不存在影响,为提高计算效率,该工况下的模拟仅采用1 m长度的软管。

3.1 干烧工况下回水软管传热物理模型

回水软管在干烧工况下的传热物理模型如图5所示。长度为 L 、内径为 d 、外径为 D 的回水软管内外均是温度为 T_a 的冷空气,且空气处于静止状态。当回水软管的伴热功能开启时,分布在直径为 d' 处的伴热电缆以总功率 P 持续运行,其产生的热量一部分用于提高回水软管内部冷空气及回水软管自身的温度,一部分用于抵消与回水软管外壁冷空气之间进行对流换热所消耗的热量。随着伴热功能开启时间的不断增加,回水软管自身的温度将不断升高。

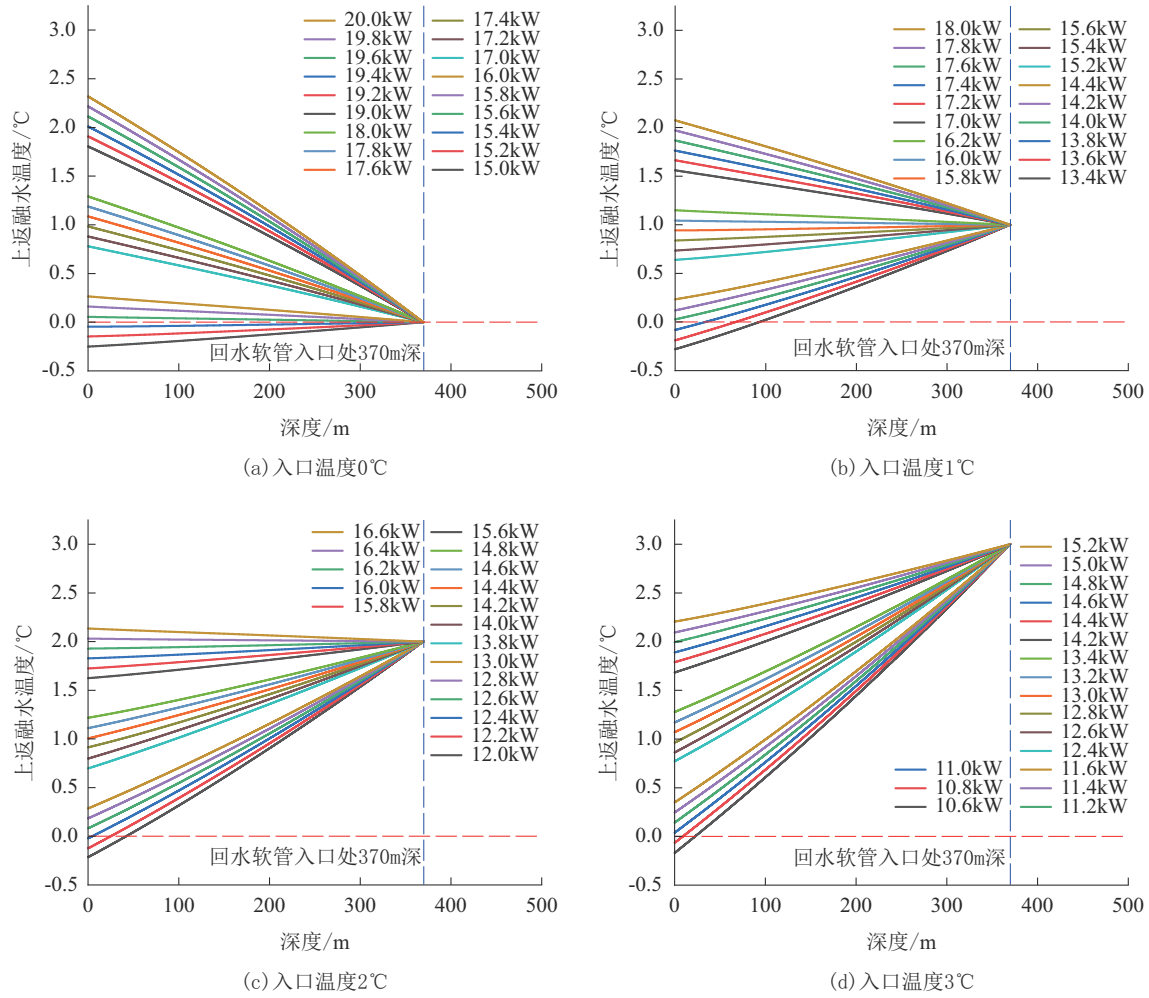


图4 停钻工况下回水软管内融水温度随深度的变化规律

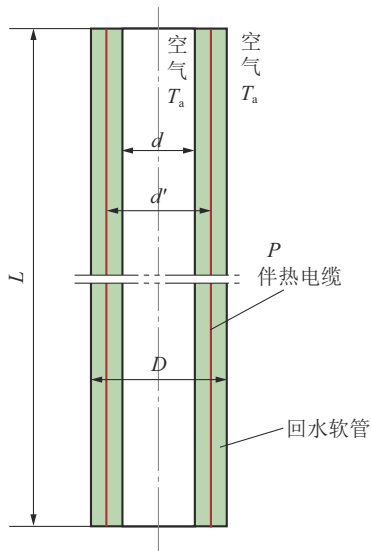


图5 干烧工况下回水软管传热物理模型

3.2 干烧工况下回水软管传热数学模型

回水软管内部空气的传热控制方程为：

$$\rho_a C_a \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a C_a u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0 \quad (19)$$

$$q = -k_a \nabla T \quad (20)$$

式中： ρ_a ——空气的密度， kg/m^3 ； C_a ——空气的恒压热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； q ——传导热通量， W/m^2 ； k_a ——空气的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

回水软管自身的传热控制方程为：

$$\rho_n C_n \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_n C_n u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0 \quad (21)$$

$$q = -k_n \nabla T \quad (22)$$

式中： ρ_n ——回水软管材料的密度， kg/m^3 ； C_n ——回水软管材料的恒压热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； q ——传导热通量， W/m^2 ； k_n ——回水软管材料的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

伴热电缆处满足式(12),回水软管外壁处的边界条件如式(14)所示。

方程(19)~(22)的初始条件为:

$$T = T_a \quad (23)$$

联立以上各式求解即可得到软管自身的温度场变化。运用COMSOL Multiphysics 6.0软件中固体和流体传热模块对上述数学模型进行求解即可得到不同功率密度下软管自身温度随时间的变化规律。计算时使用的具体参数见表1。

3.3 干烧工况下回水软管自身温度随时间的变化规律

如图6所示,回水软管内部空气、伴热电缆和软

管内壁处的温度几乎没有差别,回水软管外壁由于一直与外部冷空气进行换热,其温度相对来说更低,与其余3处的温度相差12~30℃。在环境温度为-45℃、功率密度为0.1 W/cm²时,伴热电缆处在215 min时率先达到90℃,达到PA12安全温度上限,最终温度达到93.87℃。因此建议在该环境温度下启动伴热电缆时,功率密度不要超过0.1 W/cm²,此时总加热功率为63.9314 kW,线功率密度为172.8 W/m。若这样的高功率下发生回水软管干烧现象,建议时间不要超过3 h,否则会破坏回水软管材料。

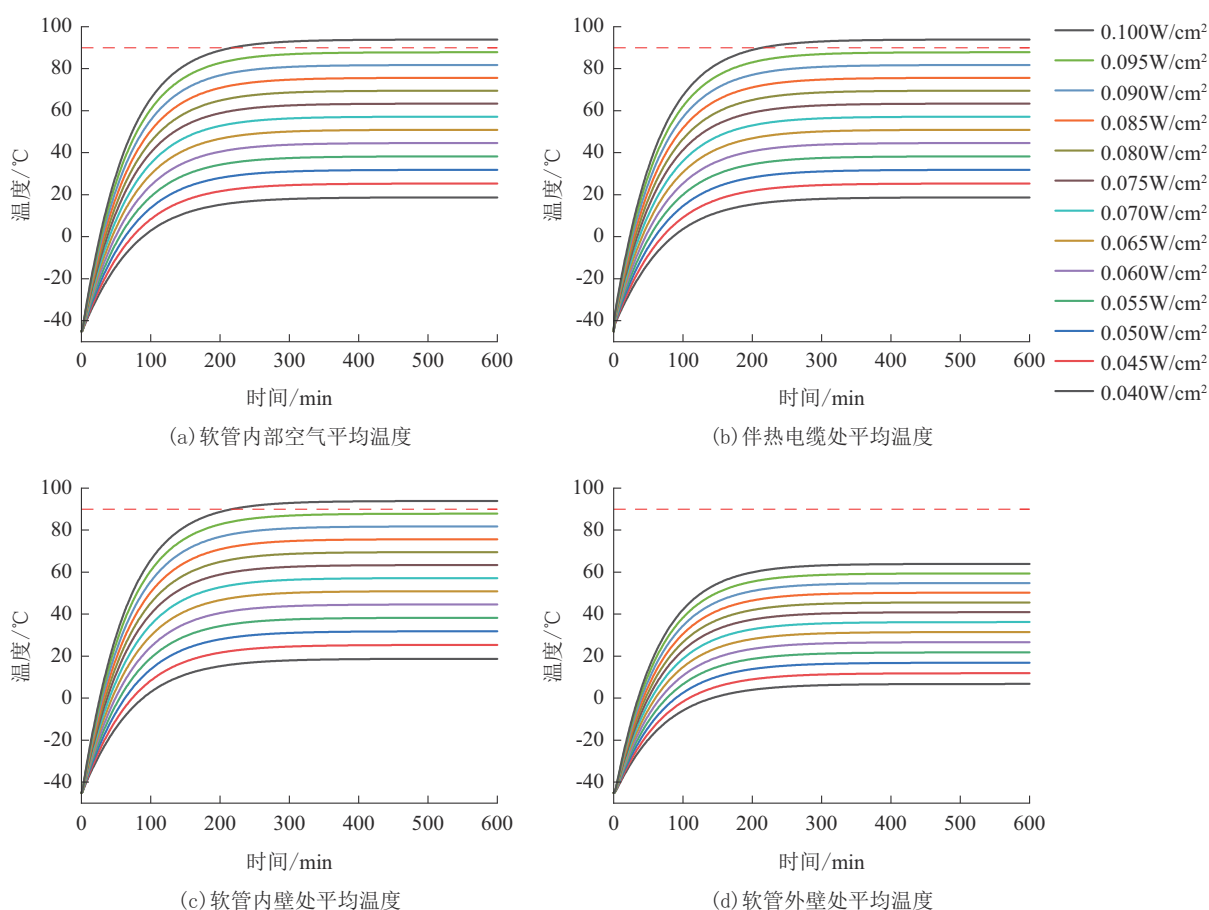


图6 干烧工况下回水软管自身温度随时间的变化规律

4 解冻工况下回水软管伴热功率数值模拟

本节对回水软管发生冻结后的两种解冻情况开展数值模拟。模拟时,通过设置不同加热功率,以回水软管内固相的体积变化来判断回水软管内冰柱的融化情况。由于回水软管长度对于该工况

的求解几乎不存在影响,为提高计算效率,该工况下的模拟仅采用1 m长度的软管。

4.1 解冻工况下回水软管传热物理模型

回水软管在解冻工况下的传热物理模型如图7所示。当只有回水软管内部发生冻结时,长度为 L 、

内径为 d 、外径为 D 的回水软管内外分别是温度为 T_a 的冰柱和冷空气,分布在直径为 d' 处的伴热电缆以总功率 P 持续运行,其产生的热量一部分用于融化回水软管内部的冰柱,一部分用于抵消回水软管与外界冷空气进行对流换热所耗散的热量。当回水软管内外均发生冻结时,回水软管内外均是温度为 T_a 的冰柱或冰层,分布在直径为 d' 处的伴热电缆需要以总功率 P 持续运行,才能融化回水软管内部的冰柱,并提高管壁外冰层的温度。

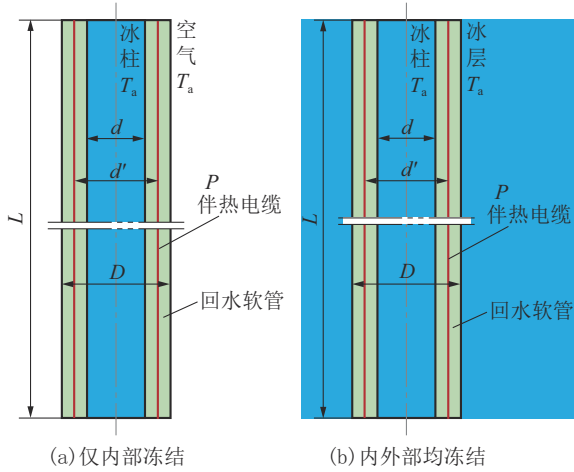


图7 解冻工况下回水软管传热物理模型

4.2 解冻工况下回水软管传热数学模型

4.2.1 回水软管内部发生冻结

回水软管自身的传热控制方程如式(21)、(22)所示。

回水软管内部冰柱的传热控制方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0 \quad (24)$$

$$q = -k \nabla T \quad (25)$$

式中: ρ ——冰或水的密度, kg/m^3 ; C ——冰或水的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q ——传导热通量, W/m^2 ; k ——冰或水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

由于该模拟过程涉及到冰水相变,式(24)、(25)中的 ρ 、 C 、 k 三个参数在相变前后会有所不同,通过软件内置的显热容法可实现平滑过渡,其中相变温度为 273.15 K ,转变间隔为 1 K ,潜热 $L_{i \rightarrow w}$ 为 $333 \text{ kJ}/\text{kg}$,相变控制方程为:

$$\rho = \theta_i \rho_i + \theta_w \rho_w \quad (26)$$

$$C = \frac{1}{\rho} (\theta_i \rho_i C_i + \theta_w \rho_w C_w) + L_{i \rightarrow w} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (27)$$

$$k = \theta_i k_i + \theta_w k_w \quad (28)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_w \rho_w - \theta_i \rho_i}{\theta_i \rho_i + \theta_w \rho_w} \quad (29)$$

$$\theta_i + \theta_w = 1 \quad (30)$$

式中: ρ_i ——冰的密度, kg/m^3 ; C_i ——冰的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_i ——冰的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ; C_w ——水的恒压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_w ——水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; θ_i ——冰的相场分数; θ_w ——水的相场分数; α_m ——质量分数。

该工况的边界条件和初始条件与干烧工况一致,详见式(12)、(14)、(23)。

4.2.2 回水软管内外均发生冻结

仅内部冻结和内外均冻结的区别是将回水软管外部冷空气换成了直径为 12 m 冰层。回水软管自身、内部冰柱及外部冰层的传热控制方程与仅内部冻结工况完全一致,可参照式(21)、(22)、(24)、(25)。相变相关控制方程可参照式(26)~(30)。边界条件及初始条件可参照式(12)和(23)。

联立以上各式求解即可得到回水软管内部冰柱的温度场变化规律,运用 COMSOL Multiphysics 6.0 软件中的固体和流体传热模块及内置的相变显热容法对上述数学方程进行求解,并通过对冰柱区域的相场分数进行积分得到回水软管内部冰柱体积随时间的变化规律。计算时使用的具体参数见表1和表2^[24]。

表2 冰的热物性参数

参数项	数值或公式
$\rho_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	917
$C_i/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	$152.5 + 7.122 \cdot T [\text{K}]$
$k_i/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	$9.828 \exp(-0.0057 \cdot T [\text{K}])$

4.2 解冻工况下回水软管内部冰柱体积随时间的变化规律

如图8所示,回水软管仅内部冻结和内外均冻结的模拟结果趋势基本一致。随着功率密度的增加,软管内部冰柱的开始融化时间变早,融化过程变短。伴热电缆以 $0.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的功率密度运行时,仅内部冻结段软管在 147 min 即可完成解冻,而此时内外均冻结段软管的内部冰柱刚开始融化,其内部完全解冻则需要 669 min 。

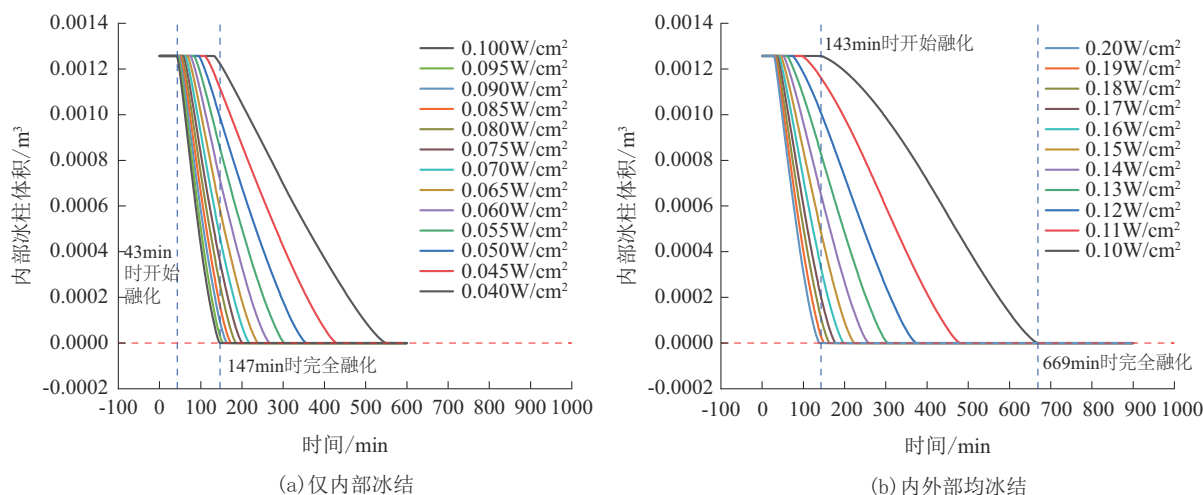


图8 解冻工况下回水软管内部冰柱体积随时间的变化规律

将不同功率密度下管内冰柱完全融化的时间进行统计并进行曲线拟合,即可得到管内冰柱完全融化时间关于功率密度的变化曲线及函数(如图9所示)。从结果来看,功率密度和管内冰柱完全融化时间之间呈现幂函数关系,随着管内冰柱完全融化时间的增加,所需要的功率密度先急速减小,随后趋于平缓,在实际应用时可根据允许的时间范围选择伴热电缆的加热功率密度,如想要在600 min内融化仅内部冻结管段内的冰柱,需要至少0.037 W/cm²的功率密度,将时间减少到100 min,所需的功率密度则增大到了0.2 W/cm²。

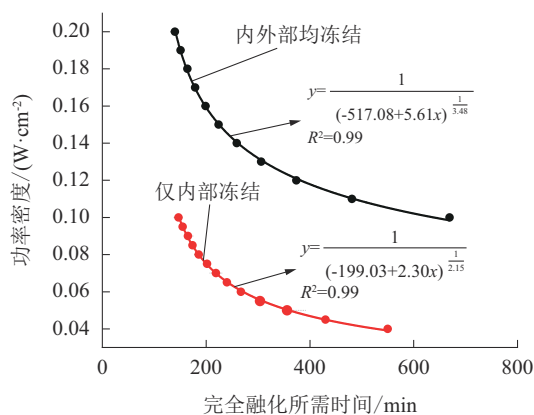


图9 回水软管内冰柱完全融化所需时间随加热功率密度的变化规律

5 结论

围绕极地深层热水钻回水软管防冻问题,本文基于流体力学和传热学理论,利用COMSOL Multiphysics 6.0软件建立了正常工况、停钻工况、干烧工

况和解冻工况下回水软管伴热功率的数值模拟方法,并进行了数值求解,得出的主要结论如下:

(1)在正常工况下,当融水入口处温度 $<1^{\circ}\text{C}$ 时,上返融水存在冻结风险,为保证安全,当回水腔内融水温度为 0°C 时,回水软管伴热电缆应以20 kW(功率密度为 0.0313 W/cm^2)的总功率运行,可保证回水软管内融水不会发生冻结。

(2)在停钻工况下,为保证安全,当回水腔内融水温度为 0°C 时,回水软管伴热电缆应以20 kW(功率密度为 0.0313 W/cm^2)的总功率运行,即可保证其小流量回水过程中回水软管内融水不会发生冻结。

(3)在干烧工况下,回水软管伴热电缆的功率密度尽量不要超过 0.1 W/cm^2 (总功率为64 kW),如果以该功率密度开启伴热功能,开启时间建议不要超过3 h。

(4)在解冻工况下,以 0.1 W/cm^2 的功率密度运行回水软管伴热功能,仅内部冻结的管段需要147 min即可完全融化内部冰柱,内外均冻结的管段在143 min时才开始融化内部冰柱,完全融化则需要669 min。

参考文献:

- [1] Bowling J S, Livingstone S J, Sole A J, et al. Distribution and dynamics of Greenland subglacial lakes[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2810.
- [2] Livingstone S J, Li Y, Rutishauser A, et al. Subglacial lakes and their changing role in a warming climate[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(2): 106-124.
- [3] 张楠,王亮, Talalay Pavel,等. 极地冰钻关键技术研究进展[J].

- 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):1-16.
- [4] Fujii Y, Azuma N, Tanaka Y, et al. Deep ice coring at Dome Fuji station, Antarctica [J]. *Antarctic Record*, 1999, 43: 162-210.
- [5] Clow G D, Koci B. A fast mechanical-access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology [J]. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue*, 2002, 56: 5-37.
- [6] 姚檀栋. 冰芯研究与全球变化[J]. *中国科学院院刊*, 1996, 11(5): 368-371.
- [7] 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(3): 275-287.
- [8] 李亚洲. 冰层热融钻进机理研究及冰下湖钻探用热融钻头研制[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [9] 孙友宏, 李冰, 范晓鹏, 等. 南极冰下湖钻进与采样技术研究进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(S1): 16-22.
- [10] Lukin V V, Vasiliev N I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(65): 83-89.
- [11] 王秋雯, 李冰, Talalay Pavel, 等. 南极东方站深冰层及冰下湖钻探技术[J]. *钻探工程*, 2021, 48(9): 35-46.
- [12] Siegert M J, Makinson K, Blake D, et al. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(65): 59-73.
- [13] Priscu J C, Achberger A M, Cahoon J E, et al. A microbiologically clean strategy for access to the Whillans Ice Stream subglacial environment [J]. *Antarctic Science*, 2013, 25(5): 637-647.
- [14] Fricker H A, Carter S P, Bell R E, et al. Active lakes of Recovery Ice Stream, East Antarctica: a bedrock-controlled subglacial hydrological system[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(223): 1015-1030.
- [15] Jamieson S S R, Ross N, Greenbaum J S, et al. An extensive subglacial lake and canyon system in Princess Elizabeth Land, East Antarctica[J]. *Geology*, 2016, 44(2): 87-90.
- [16] YAN Shuai, Blankenship D D, Greenbaum J S, et al. A newly discovered subglacial lake in East Antarctica likely hosts a valuable sedimentary record of ice and climate change[J]. *Geology*, 2022, 50(8): 949-953.
- [17] 张建松, 孙青. 我国将在南极钻探麒麟冰下湖[N]. 新华社.
- [18] Priscu J C, Kalin J, Winans J, et al. Scientific access into Mercer Subglacial Lake: scientific objectives, drilling operations and initial observations[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(85-86): 340-352.
- [19] Tulaczyk S, Mikucki J A, Siegfried M R, et al. WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: scientific operations and initial observations[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(65): 51-58.
- [20] Siegert M J, Clarke R J, Mowlem M, et al. Clean access, measurement, and sampling of Ellsworth subglacial lake: a method for exploring deep Antarctic subglacial lake environments[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(1).
- [21] Talalay P G. Mechanical ice drilling technology [M]. Singapore: Springer Singapore, 2016.
- [22] 来兴文, 李亚洲, 李冰, 等. 极地深层热水钻回水软管及注热软管热流特性研究[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(2): 637-649.
- [23] 张磊, 娄敏. 纤维增强热塑性复合管疲劳性能研究[J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(2): 23-30.
- [24] Cuffey K M, Paterson W S B. The physics of glaciers[M]. Academic Press, 2010.

(编辑 荐华)