

极地深层热水钻回水腔结构及热特性研究

李亚洲^{1,2}, 徐良^{1,2}, 李冰^{1,2*}, 汪月^{1,2}, 李小冰^{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:热水钻被认为是开展极地冰下湖探测最高效、最安全和最清洁的钻探装备。利用热水钻开展冰下湖钻探时需要建造回水腔,但目前回水腔的结构及热特性尚不清楚。为此,本文首先梳理了深层热水钻回水腔的主要结构形式。然后,以上覆冰层对冰下湖水的压力为基础,建立了回水腔建造深度计算方法,并确定了回水腔的初始形状及主要尺寸的计算方法。接着,通过建立回水腔周围冰层温度场的物理模型和数学模型,提出了回水腔临界回水温度和临界注热流量的计算方法,并系统分析了各因素对这两个参数的影响规律。研究表明:当深层热水钻用于冰下湖钻探时,回水腔应优先选用双层主/副孔结构,主孔和副孔之间的距离应该小于1 m,主/副孔直径应在0.3~0.6 m之间且回水腔的高度应比潜水泵大2~3 m;回水腔的建造深度主要由冰盖厚度决定,在实际工程中,回水腔的建造深度应比理论计算值大15~30 m;回水腔的临界回水温度和临界注热流量随时间的增大而减小;正常工况下,回水腔的临界回水温度不超过2~3℃,而临界注热流量不超过12 L/min。

关键词:极地;冰下湖;深层热水钻;回水腔;临界回水温度;临界注热流量

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0084-12

Research on structure and thermal characteristics of return-water cavity of deep hot-water drill in polar regions

LI Yazhou^{1,2}, XU Liang^{1,2}, LI Bing^{1,2*}, WANG Yue^{1,2}, LI Xiaobing^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, 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: The hot-water drill is considered to be the most efficient, safest and cleanest drilling equipment for exploring subglacial lakes in polar regions. A return-water cavity must be built when using hot-water drill to explore subglacial lakes. However, at present, the structure and thermal characteristics of the return-water cavity are still not clear. This paper first sorts out the main structure of return-water cavities of deep hot-water drill. Subsequently, a method for calculating the construction depth of the return-water cavity is established based on the pressure of the overlying ice on the subglacial lakes, and the initial shape of the return-water cavity is determined and the calculation methods for its dimensions is proposed. Then, the methods for calculating the critical temperature of return-water and the critical flow rate of injected hot water are proposed by establishing the physical and mathematical model of the ice temperature field surrounding the return-water cavity. Later, the influence of various factors on the two parameters are systematically analyzed. The research shows that the double-layer main/secondary hole structure is preferred for the return-water cavity when it is used for drilling subglacial lakes. The distance between the main hole and the secondary hole should be

收稿日期:2024-08-28; 修回日期:2024-11-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.011

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。

通信作者:李冰,男,汉族,1988年生,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, bing@cugb.edu.cn。

引用格式:李亚洲,徐良,李冰,等. 极地深层热水钻回水腔结构及热特性研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 84-95.

LI Yazhou, XU Liang, LI Bing, et al. Research on structure and thermal characteristics of return-water cavity of deep hot-water drill in polar regions[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 84-95.

less than 1m, the diameter of the main or the secondary hole should be between 0.3m and 0.6m, and the length of the return-water cavity should be 2~3m longer than that of the submersible pump. The construction depth of the return-water cavity mainly depends on the thickness of the overlying ice sheet. In practical engineering, the construction depth of the return-water cavity should be 15~30m greater than the theoretical value. The critical temperature of return-water and the critical flow rate of injected hot water decrease with time. In normal conditions, the critical temperature of return-water does not exceed 2~3°C and the critical flow rate of injected hot water does not exceed 12L/min.

Key words: polar regions; subglacial lake; deep hot-water drill; return-water cavity; critical temperature of return-water; critical flow rate of injected hot water

0 引言

极地冰盖底部存在着一个庞大的水环境系统,其中包括冰下湖、冰下溪流以及冰下湿地等^[1]。冰下湖在极地冰盖底部广泛分布,目前仅南极冰盖底部已知的冰下湖就达到了675个^[2-3]。开展极地冰下湖探测,对反演冰盖演化历史、揭示冰盖运动规律以及探索未知生命形式等均具有重要意义^[4-6]。钻探取样是开展冰下湖探测最直接的方法。目前,仅美国、俄罗斯和英国在南极开展过4次冰下湖的钻探尝试^[7-8]。俄罗斯采用传统电动机械取心钻具进行Vostok冰下湖钻探,虽成功钻至冰下湖,但使用的钻井液污染了冰下湖湖水样品^[9-10]。而英国在Ellsworth冰下湖的探测以失败告终^[11]。美国利用热水钻成功完成Whillans和Mercer冰下湖的钻探,但两个冰下湖的深度均不到1100m。近年来,在东南极伊丽沙白公主地发现了麒麟冰下湖,其上覆冰盖厚度约3600m^[12-13]。目前我国计划对该冰下湖开展钻探采样^[14]。此外智利和英国也提出了对CECs冰下湖的钻探计划^[15]。热水钻是目前公认的开展冰下湖探测最高效、最安全、最清洁的钻探装备,美国、英国及我国的冰下湖钻探均以热水钻为主^[16-18]。

热水钻是一种利用高温高压热水来融冰钻进的钻探装备,其被广泛应用于极地冰盖调查^[19-20]。热水钻主要用于在极地冰盖快速成孔并向孔内布设科学观测仪器^[21-22]。迄今为止,人类已经研发了几十种不同的热水钻^[19]。通常,把钻探深度能力超过1500m的热水钻称为深层热水钻。目前,世界各国已经研发出的深层热水钻共有6套,分别是美国为AMANDA项目和IceCube项目研发的热水钻^[23-24],英国为RABID项目、BEAMISH项目以及Ellsworth冰下湖项目研发的热水钻^[11,18,25-27],我国为Amery冰架钻探研发的热水钻^[19]。其中,IceCube项目完成的热水钻孔深度达到2500m,是目前最深的热水钻孔。

深层热水钻在工作时,热水由主软管输送到孔底来融冰,之后沿主软管和孔壁之间的环状空间上返。由于极地冰盖普遍存在粒雪层,因此为了避免融水在上返过程中漏失,一般要在距地表一定深度处设置潜水泵将融水经回水软管抽回地表,并重新加热以实现循环利用^[20]。为了在井下安装潜水泵,通常需要在距地表一定深度的冰层内建造回水腔,其主要目的是为热水钻进提供足够的水源,并利用下放的潜水泵抽取融水并在地表重新进行加热。

极地冰盖温度可低至-60°C,回水腔在整个钻探过程中因充满融水极有可能发生冻结。当钻孔深度较浅时,上返至回水腔内的融水尚有余温,能够阻止回水腔的冻结。随着钻孔深度的增大,上返至回水腔的融水温度不断降低,直至回水腔开始冻结。本文将回水腔开始发生冻结时上返融水的温度称为回水腔的“临界回水温度”。一旦回水腔开始冻结,一般需要从地表向回水腔内注入高温热水^[28]。本文将所需注入高温热水的最小流量称为回水腔的“临界注热流量”。计算出回水腔的临界回水温度能够辅助钻探人员确定何时向回水腔内补充热量,而确定回水腔的临界注热流量则有助于合理的设置注入回水腔的热水流量大小,从而避免注入热水过少造成回水腔冻结,注入热水过多导致能量浪费。

围绕极地深层热水钻回水腔冻融问题,本文主要对回水腔的关键结构特征、临界回水温度和临界注热流量进行计算,以揭示其变化规律,为未来麒麟冰下湖热水钻的设计和应用提供一定的指导。

1 回水腔关键结构特征

结构特征是开展深层回水腔热特性研究的基础,也是建造回水腔的重要依据。回水腔的关键结构特征主要包括回水腔结构形式、建造深度、初始形状及尺寸。

1.1 回水腔结构形式

如图1所示,深层热水钻的回水腔一般有3种结构,分别是单层主孔结构、单层主/副孔结构和双层主/副孔结构。单层主孔结构只在主孔内建造一个回水腔。这种结构的主孔内需要同时放置回水软管和主软管,因此要求主孔直径较大。在深层热水钻中,仅AMANDA项目和IceCube项目的水热钻因钻孔直径较大而采用了这种结构^[23-24]。单层主/副孔结构的回水腔通过将主孔和副孔在冰下连通起来的方式来建造,一般在井下的回水腔只有一个。此时,主孔用于主软管的安放,而副孔则用于回水软管的安放。这种结构是目前深层热水钻普遍采用的一种回水腔结构。若回水腔建造深度较大,则要在回水腔建造之前在地表准备大量的融水来满足主/副孔钻进的需要。为此,提出了双层主/副孔结构。采用这种结构时,先用较少的地表融水在距地面较浅的深度建造上层回水腔,以建立水循环,然后再继续向下钻进主孔和副孔,并建造下层回水腔。这种回水腔结构虽然能够减少钻探前需要准备的融水量,但其工艺较为复杂,现场操作不便。值得一提的是,在实际工程中,为了满足热水钻回水需求,有时需要两个潜水泵才能满足抽水需求,此时一般采用两个副孔分别放置潜水泵,如

BEAMISH 热水钻探项目^[15,26]。在这种情况下,如果再使用双层回水腔,井下钻孔结构将十分复杂^[15]。表1展示了部分用于钻探极地冰下水环境系统的水热钻回水腔结构参数。值得注意的是,表中也展示了 Whillans 冰下湖和 Mercer 冰下湖钻探中所使用的中深层热水钻回水腔的结构和参数。

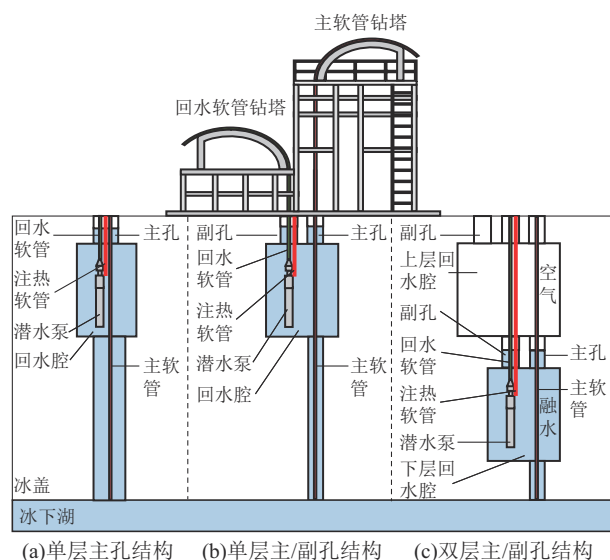


图1 回水腔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of return-water cavity

表1 极地冰下水环境钻探用热水钻回水腔的主要参数

Table 1 Main parameters of the return-water cavity used for drilling subglacial aquatic environment in polar regions

极地冰下水环境	建造年份	冰层厚度/m	结构	建造深度/ m	主/副孔 距离/m	主/副孔 直径/m	回水腔 高度/m	平衡水 位/m
Ellsworth冰下湖 ^[18]	2012—2013	3155	单层主/副孔	300	≈2	>0.36	—	—
Whillans冰下湖 ^[17,29]	2012—2013	≈801		120	<1	0.6	—	<110
Mercer冰下湖 ^[16]	2018—2019	1087		175	≈0.8	≈0.4	—	101
Rutford冰流-孔1 ^[26-27]		2154		150				
Rutford冰流-孔2 ^[26-27]	2018—2019	2154	双层主/副孔	100/240	0.5~0.7	0.3	10	≈230
Rutford冰流-孔3 ^[26-27]		2130		100/240				

注:建造深度指的是地表到回水腔底部的深度;平衡水位指的是钻透冰层后,冰下水压力与主孔内水压力达到平衡时主孔内液位的深度;Rutford冰流-孔2和孔3中的建造深度分别为上层回水腔和下层回水腔的建造深度。

1.2 回水腔建造深度

对单层主/副孔结构的回水腔而言,其建造深度只有一个,而对双层主/副孔结构的回水腔而言,其有两个建造深度,分别是上层回水腔的建造深度和下层回水腔的建造深度。上层回水腔的建造深度需要平衡以下两点:第一点是应确保建造深度足

够大,从而保证建造深度处的粒雪层密度较大,能够避免融水不向周围漏失;第二点是要避免建造深度过大,导致钻探到该深度所需的融水量过大,从而给地表融雪工作带来巨大的负担。能保证融水不漏失的粒雪层深度目前并没有确切的理论和试验数据支撑。IceCube项目在South Pole的回水腔

深度为35~40 m^[24], BEAMISH项目在Rutford冰流的上层回水腔深度约为100 m^[26]。下文将单层主/副孔结构回水腔的建造深度和双层主/副孔结构中下层回水腔的建造深度统称为“回水腔建造深度”。

回水腔的建造深度取决于冰下湖上覆冰层对湖水的压力。回水腔建造深度应确保钻穿冰下湖时,热水钻孔内融水的静水压力小于上覆冰层对冰下湖水的压力,从而避免钻孔内融水在压差作用下涌入冰下湖中,故有:

$$P_w \leq P_i \quad (1)$$

式中: P_w ——热水钻孔内融水对冰下湖产生的静水压力,MPa; P_i ——上覆冰层对冰下湖水的压力,MPa。

P_w 和 P_i 可分别按下式计算:

$$P_w = \rho_w g (h - z_c) \quad (2)$$

$$P_i = \rho_i g (h - z_i) + \int_0^{z_i} \rho(z) g dz \quad (3)$$

式中: ρ_w ——水的密度,取1000 kg/m³; g ——重力加速度,取9.8 m/s²; h ——冰盖厚度,m; z_c ——回水腔深度,m; ρ_i ——冰的密度,取917 kg/m³; z_i ——雪转变为冰的深度,m; z ——深度,m; ρ ——不同深度雪的密度,kg/m³。

ρ 可按照下式进行计算^[30]:

$$\rho(z) = \rho_i - (\rho_i - \rho_s) \exp(-z/z_\rho) \quad (4)$$

式中: ρ_s ——地表雪的密度,kg/m³; z_ρ ——粒雪层特征深度,m。

将式(2)~(4)带入式(1)中,可得:

$$z_c \geq \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w}\right) h + \frac{\rho_i - \rho_s}{\rho_w} z_\rho \left[1 - \exp\left(-\frac{z_i}{z_\rho}\right)\right] \quad (5)$$

在冰川学上,一般有 $z_\rho = z_i/1.9$ 。此时,式(5)可简化为:

$$z_c \geq \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w}\right) h + 0.85 \frac{\rho_i - \rho_s}{\rho_w} z_\rho \quad (6)$$

h 、 ρ_s 、 z_ρ 均取决于钻探地点的位置,一般 $\rho_s = 300 \sim 400$ kg/m³, $z_\rho = 30 \sim 70$ m。

表2展示了极地部分地点的冰盖厚度、地表雪密度及粒雪层特征深度。

为评估上述计算方法的可靠性,采用式(6)对表1所述热水钻回水腔的理论建造深度进行了计算。如图2所示,除Rutford冰流1号钻孔外,回水腔的实际建造深度均比理论建造深度大13~60 m,满

表2 极地部分地点的冰雪参数

Table 2 Snow and ice parameters of some locations in polar regions

地 点	h/m	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	z_ρ/m
南极	South Pole	2700 ^[31]	≈ 340 ^[32]
	Dome C	3275 ^[33]	≈ 290 ^[34]
	Byrd	2164 ^[35]	≈ 360 ^[36]
格陵兰岛	GISP2	3035 ^[37]	$\approx 272 \sim 311$ ^[38]
			44 ^[30]

足回水腔建造的基本原则。Rutford冰流1号钻孔回水腔实际建造深度小于理论建造深度,这主要是因为首次钻进Rutford冰流时未对回水腔建造深度开展合理评估。这导致在钻穿冰盖的1 min内,钻孔内的水位下降了约30 m^[26]。此外,回水腔理论建造深度与钻穿冰下水环境后钻孔内的实际平衡水位之间的差异仅为14~28 m。因此,可采用上述方法作为回水腔建造深度的初步估算方法。值得注意的是,采用式(6)计算回水腔的理论建造深度时对粒雪层的密度分布进行了一定程度的简化,适用于对粒雪层结构不清楚条件下的初步估算。在实际冰下湖钻探工程中,建议首先在冰下湖钻探点开展浅冰芯钻探以获取粒雪层密度分布特征,再利用式(1)~(3)进行回水腔理论建造深度的精确计算。

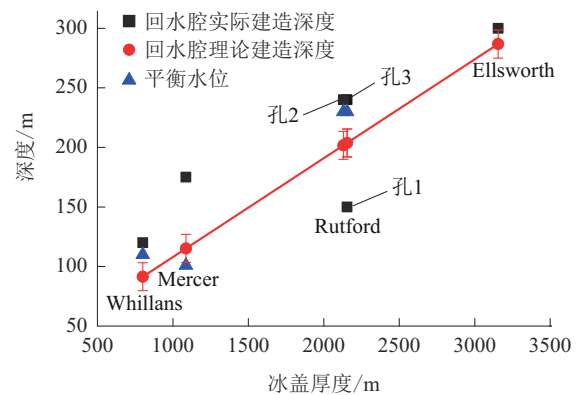


图2 回水腔建造深度理论计算方法校验

Fig.2 Verification of theoretical method for calculating the construction depth of return-water cavity

以上述方法为基础,计算了冰盖厚度为1600、2600、3600 m时,深层热水钻回水腔建造深度随地表雪密度和粒雪层特征深度的变化规律见图3。

从图3中可以看出,随着地表雪密度的增加,回水腔建造深度不断降低,但其对回水腔建造深度的影响较小。例如,若冰盖厚度为3600 m,当地表雪

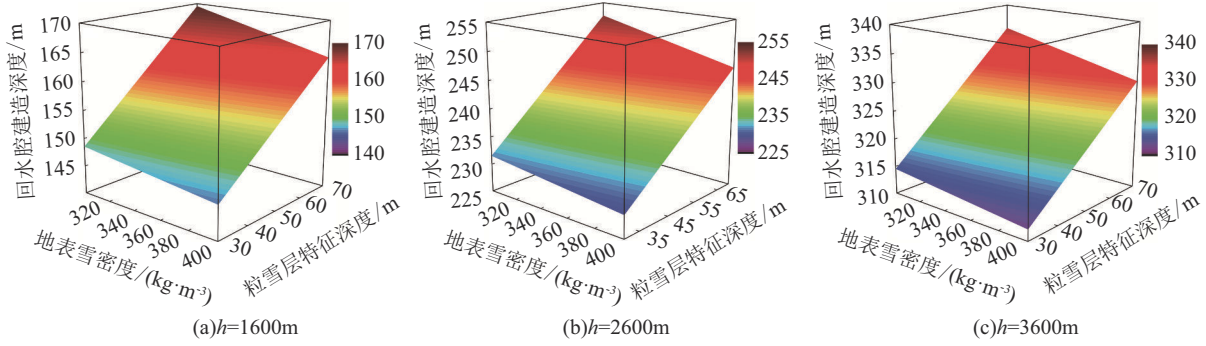


图3 回水腔建造深度的变化规律

Fig.3 Variation of the construction depth of the return-water cavity

密度从 300 kg/m^3 增大到 400 kg/m^3 时,回水腔建造深度仅减小了不到 5 m。粒雪层特征深度对回水腔建造深度有较为显著的影响,随着粒雪层特征深度的增加,回水腔建造深度快速增长。以冰盖厚度为 3600 m 的情况为例,若地表雪密度为 300 kg/m^3 ,当粒雪层特征深度从 30 m 增大到 70 m 时,回水腔建造深度从 315 m 增大到了 335 m,增大了约 20 m。冰盖厚度是影响回水腔建造深度的主导因素,当冰盖厚度从 1600 m 增大到 3600 m 时,回水腔建造深度从约 145~170 m 快速增大到 312~335 m。因此,利用深层热水钻开展极地冰下湖钻探时,应优先采用冰雷达等技术手段获取冰下湖上覆冰盖的厚度。此外,若能开展浅冰芯钻探钻穿粒雪层,获得粒雪层特征深度等参数,则能较为准确的计算出回水腔所需的最小建造深度。若无法获取冰下湖上覆粒雪层的相关参数,则建议按照地表雪密度为 300 kg/m^3 ,粒雪层特征深度为 70 m 来估算回水腔建造深度,并适当保留 15~30 m 的冗余。

1.3 回水腔初始形状及尺寸

回水腔的实际形状是不规则的,其与热水的注入位置、注入温度以及潜水泵的抽吸口等多种因素均有密切关系,且回水腔形状在热水钻进时始终处于动态变化中^[26,39]。在实际工程中,很难预测回水腔形状随时间的动态变化过程。通过主孔和副孔连通方式构建的回水腔可以看成是由两个相同的圆柱体组成。不管是上层回水腔还是下层回水腔,在两个圆柱体连通的初始时刻,其形状均如图 4 所示。分析回水腔内融水与冰层和空气的接触面积等尺寸参数,是开展其热特性分析的基础,以下将对这些关键尺寸参数进行计算。

回水腔的侧表面积为两个圆柱的侧面积之和:

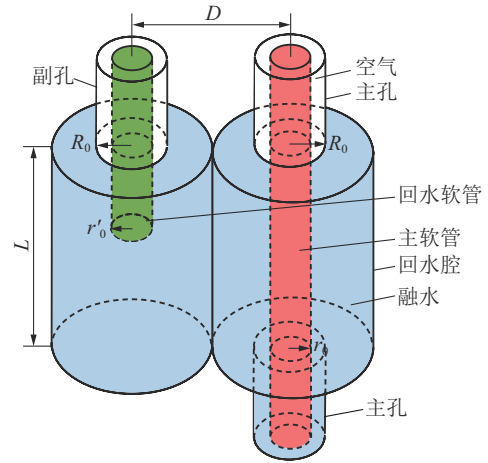


图4 回水腔初始时刻的形状

Fig.4 Shape of the return water chamber at the initial moment

$$A_1 = 2\pi DL \quad (7)$$

回水腔的上底面积:

$$A_2 = \pi D^2/2 - 2\pi R_0^2 \quad (8)$$

回水腔的下底面积:

$$A_3 = \frac{\pi}{2} D^2 - \pi R_0^2 \quad (9)$$

则回水腔与冰层接触的总表面积:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (10)$$

将式(7)~(9)带入式(10),可得:

$$A = 2\pi DL + \pi D^2 - 3\pi R_0^2 \quad (11)$$

主孔回水面积及主孔与空气的接触面积均为:

$$A_4 = \pi(R_0^2 - r_0'^2) \quad (12)$$

副孔与空气的接触面积:

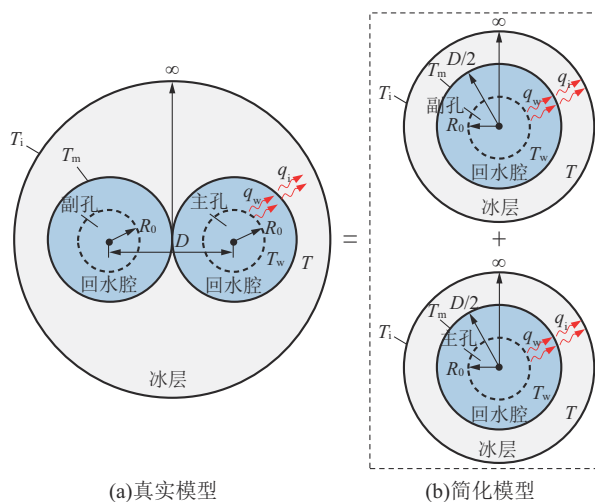
$$A_5 = \pi(R_0'^2 - r_0'^2) \quad (13)$$

式中: D ——主孔和副孔之间的距离, m; L ——回水腔高度, m; R_0 ——主孔和副孔的半径, m; r_0 ——主软管半径, m; r_0' ——回水软管半径, m。

2 回水腔临界回水温度

2.1 回水腔临界回水温度计算方法

为了获得回水腔临界回水温度,必须获取回水腔周围冰层温度场。建立如图5(a)所示的回水腔周围冰层温度场二维物理模型。半径为 R_0 的主孔和副孔相距 D 的距离,当其内部融冰扩孔所形成的圆柱腔体半径达到 $D/2$ 时,两者连通形成回水腔。此时,回水腔内的水体温度为 T_w ,而周围的冰层温度可以用 T 表示。在距回水腔无穷远处,冰层温度保持为原始温度 T_i 。在热水钻进过程中,回水腔内融水通过热对流将 q_w 的热量传递给冰水界面,而冰水界面又以热传导的形式将 q_i 的热量传递给周围冰层。在这个物理模型中,因回水腔形状不规则,因此建立它的数学模型并进行求解是比较困难的。为此,将该物理模型简化为如图5(b)所示的物理模型。在简化模型中,将真实的回水腔看成是由主孔和副孔融冰扩孔所形成的两个圆柱腔体的叠加,但这两个圆柱腔体并不相连,而是单独被冰层包围。通过这种简化,将两个圆柱腔体之间互相的热扰动消除,因此,通过简化模型计算出的冰水界面热散失要更大。因此,通过其计算出的临界回水温度和临界注热流量值更保守。



(a)真实模型

(b)简化模型

图5 回水腔周围冰层温度场物理模型

Fig.5 Physical model of ice temperature field around the return-water cavity

针对简化后的回水腔周围冰层温度场物理模型,建立其数学模型进行求解。建立数学模型过程中,采用以下4个假设条件:(1)假设回水腔内的融

水充分混合,水温均匀分布,即回水腔内各处水温均为其平均水温 T_w ;(2)忽略回水腔形成过程中,融水对周围冰层形成的热扰动,即假设在回水腔形成的初始时刻,周围的冰层仍保持在原始温度 T_i ;(3)忽略压力等对冰水相变温度的影响,假设冰水界面温度 T_m 始终保持为 0°C 。

因简化二维物理模型为轴对称结构,因此为了方便计算,冰层内温度分布的控制方程可以用以下一维方程来描述:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

式中: T ——冰层内的温度,K; t ——时间,s; r ——径向坐标,m; α_i ——冰的热扩散系数, $\alpha_i = k_i / c_i \rho_i$, m^2/s ; k_i ——冰的热导率, $k_i = 9.828 \exp[(-0.0057(T + 273.15))]$, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; c_i ——冰的比热容, $c_i = 152.5 + 7.122(T + 273.15)$, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

控制方程(14)的边界条件为:

$$T(r=R, t) = T_m \quad (15)$$

$$T(r=\infty, t) = T_i \quad (16)$$

式中: R ——圆柱体回水腔的半径, $R = D/2$, m; T_m ——冰的熔点,K; T_i ——无限远处冰层的温度,K。

方程(14)的初始条件为:

$$T(r, 0) = T_i \quad (17)$$

联立方程(14)~(17)并求解,可得冰层内部的温度场,则单位面积上冰水界面向冰层传导的热量为:

$$q_i = -k_i \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (18)$$

此时,回水腔内融水通过热对流在单位面积内向冰水界面传递的热量为:

$$q_w = h_{wi}(T_w - T_m) \quad (19)$$

式中: h_{wi} ——回水腔内融水和冰层之间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_w ——回水腔内水的平均温度,K。

为了维持回水腔形状,保证冰水界面不发生相变,则应有:

$$q_i = q_w \quad (20)$$

将(18)~(20)联立起来,即可求得回水腔临界回水温度。

Lunardini等^[40]通过大量实验,给出了融水和冰层之间的换热量的计算方法。

当 $Re < 1.5 \times 10^4$, 且 $T_w > 3.4^\circ\text{C}$ 时:

$$q_w = 488.5 \text{ W/m}^2 \quad (21)$$

当 $Re < 1.5 \times 10^4$, 且 $T_w \leq 3.4^\circ\text{C}$ 时:

$$h_{wi} = 135.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad (22)$$

当 $Re > 1.5 \times 10^4$ 时:

$$Nu = 0.0078 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0.927} \quad (23)$$

式中: Re ——雷诺数; Nu ——努塞尔数; Pr ——普朗特数。计算方法如下:

$$Re = V_w H_d / \nu \quad (24)$$

$$Nu = h_{wi} H_d / k_w \quad (25)$$

$$Pr = \nu / \alpha_w \quad (26)$$

式中: V_w ——回水腔内冰水界面处融水的平均流速, m/s ; H_d ——等效水力直径, m ; ν ——水的运动黏度, 取 $1.79 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; k_w ——水的热导率, 取 $0.55 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; α_w ——水的热扩散系数, $\alpha_w = k_w / c_w \rho_w$, m^2/s ; c_w ——水的比热容, $4200 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

回水腔等效水力直径可近似用下式计算:

$$H_d = D \quad (27)$$

冰水界面处融水的平均流速则因其结构复杂而难以衡量, 但其数值应在如下范围内:

$$\frac{2Q_r}{\pi D^2} \leq V_w \leq \frac{Q_r}{\pi (R_0^2 - r_0^2)} \quad (28)$$

式中: Q_r ——从孔底返回回水腔的融水流量, 将其称为回水流量, m^3/s 。

联立方程(23)~(27), 可得:

$$h_{wi} = 0.0078 \alpha_w^{-\frac{1}{3}} k_w \nu^{-0.594} V_w^{0.927} D^{-0.073} \quad (29)$$

在麒麟冰下湖钻探工程中, 初步拟定在冰层钻进时注入主软管的热水量约为 $160 \sim 230 \text{ L/min}$, 则预估回水流量约为 $170 \sim 250 \text{ L/min}$ 。

从式(29)可以看出, h_{wi} 与 V_w 呈正相关, 与 D 呈负相关。

理论上, 通过式(19)、(21)~(29)即可计算出回水腔内融水向冰水界面传递的热量。但在计算过程中, 需要首先知道冰水界面处融水的平均流速 V_w 及回水腔内的平均水温 T_w , 而 T_w 正是待求解的参数, V_w 为未知数, 这导致实际计算难以进行。Lunardini等^[40]通过实验发现, 水冰对流换热系数 h_{wi} 的值在实验工况下始终在 $135.7 \sim 184.5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间, 且这一数值得到了广泛应用^[41-42]。此外, Vanier等^[43]发现当水温为 $0.5 \sim 4^\circ\text{C}$ 时, 水冰对流换热系数 h_{wi} 在 $125 \sim 175 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间。Li等^[44]通

过大量实验研究发现, 当冰层温度为 0°C , 水流温度为 $0.7 \sim 3.3^\circ\text{C}$, 流速为 $0.024 \sim 0.084 \text{ m/s}$ 时, 水冰对流换热系数 h_{wi} 在 $107.7 \sim 417.4 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间。

在本文中, 假设回水腔内融水温度超过 3.4°C , Q_r 在 $170 \sim 250 \text{ L/min}$ 之间变化, D 在 $0.6 \sim 1 \text{ m}$ 之间变化, R_0 在 $0.15 \sim 0.2 \text{ m}$ 之间取值, r_0 为 4 cm , 则可以根据(28)式求得 V_w 在 $0.0018 \sim 0.0635 \text{ m/s}$ 之间。此时, Re 在 $603 \sim 3.55 \times 10^4$ 之间。当 $603 < Re < 1.5 \times 10^4$ 时, $h_{wi} = 135.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; 当 $Re > 1.5 \times 10^4$ 时, h_{wi} 的最大值为 $176.6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, 故 h_{wi} 的取值范围应为 $135.7 \sim 176.6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间。结合文献数据及上述计算, 本文假设水冰对流换热系数 h_{wi} 在 $107.7 \sim 184.5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间, 并以此开展回水腔临界回水温度的计算。

采用 MATLAB 2014b 软件对上述方程求解, 其中偏微分方程(14)采用中心差分法求解。求解时, 冰层的原始温度 T_i 设置在距冰水界面 $50R$ 的位置处, r 在 R 到 $50R$ 的空间上被离散成 5 mm 的节点。 t 的区间范围为 $0 \sim 240 \text{ h}$, 时间步长为 5 s 。

值得注意的是, 通过上述方法计算得到的临界回水温度, 仅能保证回水腔在没有其他热量损失的情况下不发生冻结。若考虑实际工况, 临界回水温度还应保证水流通过回水软管上返后不发生冻结。假设回水软管在工作过程中的温度损失为 T_w' , 那么实际临界回水温度应为:

$$T_c = \max(T_w', T_w) \quad (30)$$

对 T_w' 的计算已经开展过讨论^[28, 45], 本文不再赘述。后文临界回水温度仅考虑能保证回水腔不发生冻结的情况, 不考虑回水软管的温度损失。

2.2 回水腔临界回水温度的影响规律

从上节可以看出, 影响回水腔临界回水温度的主要因素包括冰层温度、水冰对流换热系数、回水腔直径以及时间。为了获取冰层温度对临界回水温度的影响规律, 假设其在 $-10 \sim -60^\circ\text{C}$ 之间变化, 回水腔直径为 0.4 m , 水冰对流换热系数为 $135.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。如图6(a)所示, 临界回水温度随着冰层温度的降低而增大。在回水腔形成 24 h 后, 当冰层温度从 -10°C 降低到 -60°C 时, 临界回水温度从 0.55°C 增大到 2.96°C 。在同一冰层温度下, 临界回水温度在前 48 h 内快速减小, 随后其开始缓慢减小。这说明在回水腔形成初期, 需要较高的回水温度才能保证回水腔不冻结, 而在热水钻探后期,

回水腔所需的回水温度可以越来越小。这主要是因为回水腔连通初期,周围冰层温度很低,而随着钻探过程的进行,回水腔内的融水向周围冰层不断扩散导致其温度逐渐升高。值得注意的是,之所以在回水腔形成初期需要较大的回水温度,主要是因为本文的计算忽略了回水腔形成过程对周围冰层的热扰动。所以,在实际工程中,回水腔形成初期所需的回水温度会小于本文的计算值。

为了分析水冰对流换热系数对临界回水温度的影响规律(图6b),假设冰层温度为 -40°C ,回水腔直径为 0.4 m ,水冰对流换热系数分别为 107.7 、 135.7 和 $184.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。从图中可以看出,随着水冰对流换热系数的减小,临界回水温度逐渐增大。但当回水腔形成时间超过 12 h 后,因水冰对流换热系数所导致的临界回水温度差异不会超过 1.1°C 。由于实际的水冰对流换热系数难以计算,在

实际工程中,为保证回水腔不发生冻结,建议采用最小的 $107.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 来计算临界回水温度。但即使采用 $107.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的水冰对流换热系数,在回水腔形成 12 h 后,临界回水温度仍仅为 2.61°C 。而当回水腔形成超过 24 h 后,临界回水温度则降低到 2°C 左右,并随着时间的延长而持续降低。

在计算回水腔直径大小对临界回水温度的影响规律时,假设冰层温度为 -40°C ,水冰对流换热系数为 $135.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,回水腔直径从 0.6 m 增大到 1.0 m 。如图6(c)所示,随着回水腔直径的增大,临界回水温度不断减小,但其减小的幅度很小。例如,在回水腔形成 48 h 时, 0.6 m 直径的回水腔对应的临界回水温度为 1.81°C ,而 1.0 m 直径的回水腔对应的临界回水温度为 1.52°C ,二者的差距不足 0.3°C 。因此,相较于冰层温度和水冰对流换热系数,回水腔直径大小对临界回水温度的影响较小。

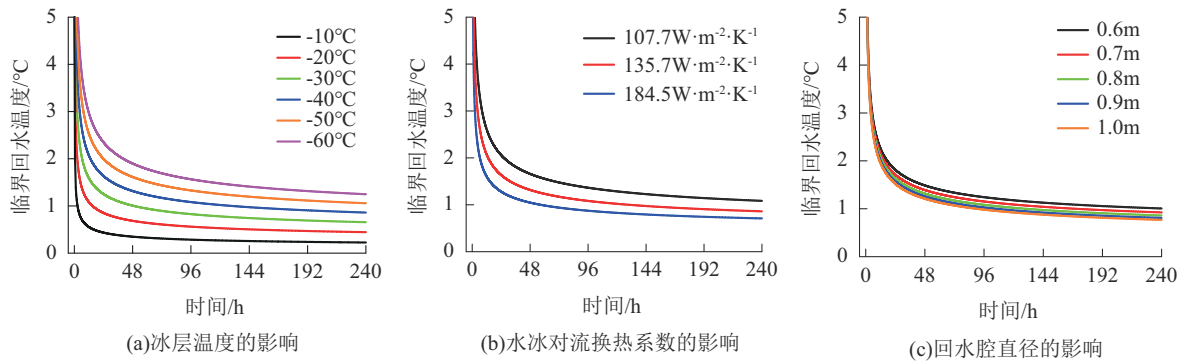


图6 临界回水温度的变化规律

Fig.6 Variation of the critical temperature of return-water

总的来看,回水腔的临界回水温度一般不超过 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。此外,由于回水软管温度损失一般不超过 2°C ^[28]。因此,只要通过孔底返回回水腔的融水温度达到 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,回水腔就不会发生冻结,且能够保证回水软管内的融水也不发生冻结。在深层热水钻设计中,应对上返至回水腔内的融水温度进行预测,以指导热水钻探工程的现场实施。

3 回水腔临界注热流量

3.1 回水腔临界注热流量计算方法

当回水腔内的实际回水温度小于临界回水温度时,回水腔会发生冻结。这时,须向回水腔内注入高温热水。假设注入的热水和从孔底返回的融水在回水腔内充分混合,此时回水腔通过冰水界面

向周围冰层散失的热量:

$$P_L = q_i A \quad (31)$$

回水腔通过主孔向上部空气中散失的热量:

$$P_m = h_{wa}(T_w - T_i)A_4 \quad (32)$$

回水腔通过副孔向上部空气中散失的热量:

$$P_n = h_{wa}(T_w - T_i)A_5 \quad (33)$$

从孔底返回的融水携带进入回水腔的热量:

$$P_r = \rho_w c_w Q_r |T_w - T_r| \quad (34)$$

高温热水进入回水腔后,回水腔接收的热量:

$$P_h = \rho_w c_w Q_{in}(T_h - T_w) \quad (35)$$

式中: h_{wa} ——水和空气的换热系数,一般为 $5.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[41-42]; T_r ——返回的融水温度,本文假设其始终为 0°C ; T_h ——从地表注入的热水到达回水腔时

的温度,将其称为注热温度, K ; Q_m ——注入的热水流量, m^3/s 。

根据能量平衡关系,有:

$$P_L + P_m + P_n + P_r = P_h \quad (36)$$

将(31)~(36)式联立,即可得到回水腔的临界注热流量。此处得到的回水腔临界注热流量,只能保证回水腔不冻结。实际所需的注热流量还应考虑注热软管在热水注入过程中损失的热量。注热软管损失的热量可按照下式计算:

$$P_p = \rho_w c_w Q_{in} (T_h' - T_h) \quad (37)$$

式中: T_h' ——热水在地表的注入温度, K 。

则实际从地表向回水腔注入的热量应为:

$$P_c = P_p + P_h \quad (38)$$

P_c 的计算超出了本文的讨论范畴,在此不再讨论,详情可参考文献[28]。

3.2 回水腔临界注热流量的影响规律

从上面的讨论中,可以看出影响回水腔临界注热流量的因素包括冰层温度、注热温度、回水流量、水冰对流换热系数、回水腔直径、回水腔高度、主管管外径、回水软管外径、钻孔直径以及时间。为了探明上述因素对回水腔临界注热流量的影响规律,本文采用控制变量法对不同因素的影响机制进行了计算,计算中采用的参数如表3所示。

表3 临界注热流量计算时的参数设置

Table 3 Parameter settings for calculating the critical flow rate of injected hot water

冰层温度/ $^{\circ}C$	注热温度/ $^{\circ}C$	回水流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	水冰对流换热系数/ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	回水腔直径/ m	回水腔 高度/ m	主管 外径/ cm	回水软管 外径/ cm	钻孔直径/ m
-60~-10	70	210	135.7	0.8	7	7	8	0.4
-40	50~90	210	135.7	0.8	7	7	8	0.4
-40	70	170~250	135.7	0.8	7	7	8	0.4
-40	70	210	107.7~184.5	0.8	7	7	8	0.4
-40	70	210	135.7	0.6~1.0	7	7	8	0.4
-40	70	210	135.7	0.8	5~9	7	8	0.4
-40	70	210	135.7	0.8	7	6~8	8	0.4
-40	70	210	135.7	0.8	7	7	7~9	0.4
-40	70	210	135.7	0.8	7	7	8	0.2~0.6

如图7(a)所示,冰层温度对临界注热流量有较大影响。随着冰层温度的降低,临界注热流量快速增大。例如,在回水腔形成12 h后,当冰层温度从-10 $^{\circ}C$ 降低到-60 $^{\circ}C$ 时,临界注热流量从2.25 L/min快速增大到12.47 L/min。在同一冰层温度下,临界注热流量随时间逐渐减小。在回水腔形成超过24 h后,即使在-60 $^{\circ}C$ 的冰层中临界注热流量也会降低到10 L/min以下。因此,在实际工程中为节约能量,只需在回水腔形成初期注入较多热水,之后可根据需要逐步减小注入回水腔的热水流量。

图7(b)展示了注入热水温度对临界注热流量的影响。显而易见,由于相同条件下防止回水腔冻结所需的热量为一定值,所以随着注热温度的增加,临界注热流量不断减小。在回水腔形成12 h后,若注热温度为50 $^{\circ}C$,则所需的注热流量要达到12.17 L/min,而当注热温度为90 $^{\circ}C$ 时,注热流量可

以减小到6.63 L/min。在深层热水钻探工程中,地表热水进入回水腔时温度一般都能达到80~90 $^{\circ}C$ 。

回水流量对临界注热流量也有一定程度的影响(图7c)。随着回水流量的增加,临界注热流量相应增大。这是因为回水流量的增大给回水腔内带来了更多的冷水,因此为了提高回水腔内整个水体的温度,就需要从地表向回水腔内注入更多的热水。相比于冰层温度和注热温度,回水流量对临界注热流量的影响较小。例如,在回水腔形成24 h时,若回水流量从170 L/min增大到250 L/min,临界注热流量则仅从5.78 L/min增大到7.96 L/min。

如图7(d)所示,临界注热流量随着水冰对流换热系数的减小而增大。在回水腔形成12 h后,当水冰对流换热系数从184.5 $W/(m^2 \cdot K)$ 减小到107.7 $W/(m^2 \cdot K)$ 时,临界注热流量从6.85 L/min增大到10.33 L/min。这是因为在较小的水冰对流换热系

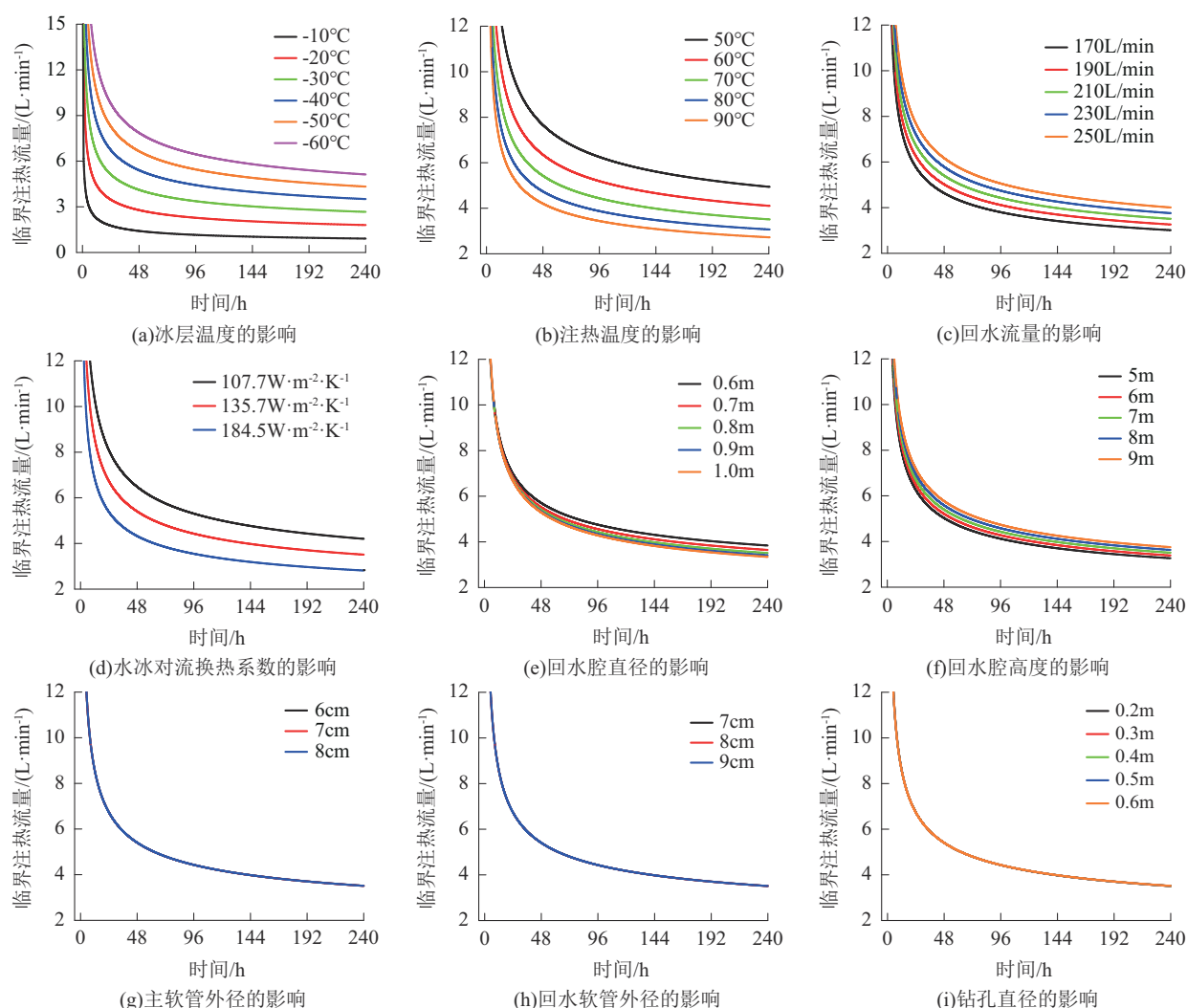


图7 临界注热流量的变化规律

Fig.7 Variation of the critical flow rate of injected hot water

数下,融水向冰水界面传递热量的速度减慢。此时,为了保证冰水界面获取更多的热量避免其发生冻结,就需要向回水腔内注入更多的热水以提高回水腔内融水的温度。总的来看,即使在 $107.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的水冰对流换热系数下,大约 $10 \text{ L}/\text{min}$ 的注热流量也能满足回水腔不发生冻结的需求。

如图7(e)和7(f)所示,回水腔直径和回水腔高度对临界注热流量的影响较小。随着回水腔直径的增大,临界注热流量不断减小。在相同情况下,随着回水腔直径的增大,单位面积内冰水界面向周围冰层传导的热量减小,但与此同时,回水腔与冰层的接触面积增大。二者互相作用,最终导致回水腔向冰层传输的总热量减小,那么,对应的临界注热流量也就减小。回水腔高度的增加导致其回水

腔侧面积的增加,此时,更多的热量通过冰水界面向周围冰层扩散,因此,需要向回水腔内注入的热水流量需要增加。

主软管外径、回水软管外径以及钻孔直径主要通过影响回水腔内融水和上部空气的接触面积来影响回水腔与周围环境的散热,进而影响临界注热流量(图7g、7h和7i)。由于主软管和回水软管的截面积相比于钻孔截面积和回水腔截面积均很小,加之融水和空气之间的换热系数远小于水冰对流换热系数,因此由回水腔融水向上部空气散失的热量要远远小于回水腔通过冰水界面散失的热量,故主软管外径、回水软管外径以及钻孔直径对临界注热流量的影响非常小,可以忽略不计。以钻孔直径为例,在回水腔形成 12 h 后,当其从 0.2 m 增大到

0.6 m 时, 临界注热流量仅从 8.59 L/min 减小到 8.57 L/min, 变化微乎其微。

总的来看, 回水腔的临界注热流量不超过 12 L/min。在实际工程中, 随着冰层温度的升高、注热温度的升高、回水流量的减小以及时间的延长, 可进一步减少向回水腔内注热的热水流量。

4 结论

(1) 回水腔建造深度随着冰盖厚度和粒雪层特征深度的增大而增大, 随地表雪密度的增大而减小。其中, 冰盖厚度对回水腔建造深度影响最大。本文提出的回水腔建造深度计算方法与实际情况基本一致。在实际工程中, 回水腔的建造深度应比理论计算值大 15~30 m。

(2) 回水腔临界回水温度与冰层温度、水冰对流换热系数和回水腔直径均负相关, 其中冰层温度和水冰对流换热系数是临界回水温度的主导因素。一般工况下回水腔的临界回水温度不超过 2~3 °C。

(3) 回水腔临界注热流量与冰层温度、注热温度、水冰对流换热系数和回水腔直径负相关, 与回水流量和回水腔高度正相关, 其中, 冰层温度、注热温度、水冰对流换热系数和回水流量对临界注热流量的影响最大。一般来说, 回水腔的临界注热流量不超过 12 L/min。

(4) 回水腔的临界回水温度和临界注热流量一般随时间的增大而减小, 在实际工程中, 须根据计算结果, 并结合现场工况, 确定合理的热热水注入时间和注入流量。

参考文献(References):

- [1] 周岩, 崔祥斌, 戴振学, 等. 南极冰下水文研究进展[J]. 极地研究, 2021, 33(4): 591-603.
ZHOU Yan, CUI Xiangbin, DAI Zhenxue, et al. Advances in subglacial hydrology of Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2021, 33(4): 591-603.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 温家洪. 南极冰下湖的发现及其意义[J]. 极地研究, 1998, 10(2): 155-160.
WEN Jiahong. A Primary introduction of antarctic subglacial lakes[J]. Chinese Journal of Polar Research, 1998, 10(2):

- 155-160.
- [5] 李言. 南极冰下湖探测及其水文变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
LI Yan. Detection and hydrological changes of antarctic subglacial lakes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [6] 效存德, 秦大河, 任贾文. 南极冰盖冰下湖群——冰川学家和生命科学家共同的兴趣[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 99-102.
XIAO Cunde, QIN Dahe, REN Jiawen. Subglacial lakes in Antarctica: An interesting subject for glaciologists and life scientists[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 99-102.
- [7] 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.
LI Yazhou. Research on the mechanism of ice hot-point drilling process and development of thermal heads for subglacial lakes accessing[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [8] 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): 27-33.
SUN Youhong, LI Bing, FAN Xiaopeng, et al. Research progress on drilling and sampling techniques for Antarctic subglacial lakes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(S1): 27-33.
- [9] 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.
- [10] 王秋雯, 李冰, Talalay P, 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.
WANG Qiuwen, LI Bing, Talalay P, et al. Drilling technology for deep ice and the subglacial lake at Vostok Station, Antarctica[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 35-46.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Yan S, 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.
- [14] 张建松, 孙青. 我国将在南极钻探麒麟冰下湖[EB/OL]. (2024-02-27) [2024-10-26]. <http://www.news.cn/20240227/5bf956b907d24365a0d51d0c73e817af/c.html>.
ZHANG Jiansong, SUN Qing. China will drill Qilin Ice Lake in Antarctica[EB/OL]. (2024-02-27) [2024-10-26]. <http://www.news.cn/20240227/5bf956b907d24365a0d51d0c73e817af/c.html>.
- [15] Makinson K, Anker P G D, Garces J, et al. Development of a clean hot water drill to access Subglacial Lake CECs, West Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 2021, 62(85/86): 250-262.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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): DOI: 10.1029/2011RG000361.
- [19] Talalay P G. Thermal ice drilling technology[M]. Singapore: Springer, 2020.
- [20] 刘刚. 热水钻融冰过程及钻进系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- LIU Gang. Research on melting process and ice hot-water drilling system[D]. Changcun: Jilin University, 2019.
- [21] Makinson K, Anker P G D. The BAS ice-shelf hot-water drill: Design, methods and tools[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):44-52.
- [22] Harper J T, Humphrey N F, Meierbachtol T W, et al. Borehole measurements indicate hard bed conditions, Kangerlussuaq sector, western Greenland Ice Sheet[J]. *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2017, 122(9):1605-1618.
- [23] Koci B R. Wotan: A drill for ice cube[J]. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 2002, Special(56):209-216.
- [24] Benson T, Cherwinka J, Duvernois M, et al. IceCube enhanced hot water drill functional description[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):105-114.
- [25] Smith A M. Basal conditions on Rutford Ice Stream, West Antarctica: hot-water drilling and downhole instrumentation; R/2004/S3[R]. Cambridge: British Antarctic Survey, 2005.
- [26] Anker P G D, Makinson K, Nicholls K W, et al. The BEAMISH hot water drill system and its use on the Rutford Ice Stream, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(85/86):233-249.
- [27] Smith A M, Anker P G D, Nicholls K W, et al. Ice stream subglacial access for ice-sheet history and fast ice flow: The BEAMISH Project on Rutford Ice Stream, West Antarctica and initial results on basal conditions[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(85/86):203-211.
- [28] 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.
- LAI Xingwen, LI Yazhou, LI Bing, et al. Research on thermal and flow characteristics of return-water hose and heat-injection hose of deep hot-water drill in polar regions[J]. *Journal of glaciology and geocryology*, 2024, 46(2):637-649.
- [29] Rack F R. Enabling clean access into Subglacial Lake Whillans: Development and use of the WISSARD hot water drill system[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, 374:1-16.
- [30] Cuffey K M, Paterson W S B. The physics of glaciers[M]. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2010.
- [31] Johnson J A, Kuhl T, Boeckmann G, et al. Drilling operations for the South Pole Ice Core (SPICEcore) project[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):75-88.
- [32] Kuivinen K C, Koci B R. South pole ice core drilling, 1981-1982[J]. *Antarctic Journal of the United States*, 1982, 17(5):89-91.
- [33] Parrenin F, Barnola J M, Beer J, et al. The EDC3 chronology for the EPICA dome C ice core[J]. *Climate of the Past*, 2007, 3(3):485-497.
- [34] Barnes P R F, Wolff E W, Mulvaney R, et al. Effect of density on electrical conductivity of chemically laden polar ice[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2002, 107(B2): ESE 1-1-ESE 1-14.
- [35] Gow A J. Bubbles and bubble pressures in Antarctic glacier ice[J]. *Journal of Glaciology*, 1968, 7(50):167-182.
- [36] Gow A J. Deep core studies of the accumulation and densification of snow at Byrd Station and Little America V, Antarctica: CRREL Research Report 197[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1968.
- [37] Alley R B, Meese D A, Shuman C A, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event[J]. *Nature*, 1993, 362(6420):527-529.
- [38] Fausto R S, Box J E, Vandecrux B, et al. A snow density dataset for improving surface boundary conditions in Greenland ice sheet firm modeling[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2018, 6:51.
- [39] Makinson K, Pearce D, Hodgson D A, et al. Clean subglacial access: Prospects for future deep hot-water drilling[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A-Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 374(2059):20140304.
- [40] Lunardini V J, Zisson J R, Yen Y C. Experimental determination of heat transfer coefficients in water flowing over a horizontal ice sheet: CRREL Report 86-3[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1986.
- [41] Lunardini V J, Rand J. Thermal design of an Antarctic water well: CRREL Special Report 95-10[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1995.
- [42] Hoffman S J, Andrews A, Watts K, et al. Progress in simulating water well performance on Mars[C]//Resource Extraction-Excavation/Material Acquisition. AIAA, 2020.
- [43] Vanier C R, Tien C. Free convection melting of ice spheres[J]. *AIChE Journal*, 1970, 16(1):76-82.
- [44] Li N, Tuo Y C, Deng Y, et al. Heat transfer at ice-water interface under conditions of low flow velocities[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(4):603-609.
- [45] 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.