

冰层热融钻具倾斜原因及防/纠斜方法浅析

李亚洲, 孙友宏, 冶宇霆, 汪月, 李小冰, 王超, 来兴文, 李冰*

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京100083)

摘要:在冰层钻进时,热融钻具往往会发生倾斜,导致其偏离目标冰层,无法完成既定钻探任务,因此必须对热融钻具的倾斜进行预防和纠正。为此,本文首先分析了热融钻具发生倾斜的原因,并将其归纳为热融钻头底部冰层受热不均、热融钻具结构稳定性差、放缆速度高于钻进速度、钻孔直径过大等;然后,从热力法、重力法、浮力法、推靠法、扶正器法、导向杆嫁接法、钻孔直径减小法等方面归纳总结了热融钻具的防/纠斜方法,从而为进一步开展热融钻具防/纠斜研究奠定了基础。

关键词:冰层钻探;热融钻具;钻具倾斜;防斜;纠斜

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)03-0008-13

A brief analysis of inclination causes and preventing/correcting methods for ice hot-point drills

LI Yazhou, SUN Youhong, YE Yuting, WANG Yue, LI Xiaobing, WANG Chao, LAI Xingwen, LI Bing*

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

Abstract: The hot-point drills often tend to tilt in ice drilling, which results in deviation from the target ice and failure to complete the scheduled drilling mission. To this end, the causes for the inclination of hot-point drills are analyzed and categorized into uneven heating of the ice at the bottom of the thermal head, poor stability of the hot-point drill structure, higher speed of cable unwinding than penetration speed and oversized borehole diameter. The methods of preventing and correcting the inclination in hot-point drilling are summarized, including the thermal method, the gravity method, the buoyancy method, the push method, the centralizer method, the guide rod method and the borehole diameter reduction method, so as to lay a foundation for further research on preventing and correcting the inclination of hot-point drills.

Key words: ice drilling; hot-point drills; drill inclination; prevention of inclination; correction of inclination

0 引言

冰川广泛分布于地球的南北两极和中纬度的高海拔山区,占地球陆地面积的10%左右^[1]。其中,南极冰盖是地球最大的淡水水库,其冰储量达到了全球淡水总储量的70%^[2]。冰川是地球气候系统

的重要驱动力之一,也是气候系统演化的“晴雨表”。此外,冰川中还蕴藏着历史时期的重要气候信息^[3-4]。因此,开展冰川学调查,探索冰川演化规律背后的气候密码,不仅事关地球气候系统的命运,而且与人类的生存息息相关。

收稿日期:2022-09-29; **修回日期:**2023-03-06 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2023.03.002

基金项目:国家自然科学基金项目“南极冰下湖科学钻探选址及冰下过程研究”(编号:41941005);国家重点研发计划项目“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”课题四“多工艺极地钻探装备研发与系统集成”(编号:2021YFA0719104);中央高校科研基本业务项目“可回收式热融钻具孔内融水与周围冰层传热机理研究”(编号:2-9-2021-017)

第一作者:李亚洲,男,汉族,1993年生,讲师,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,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, bing@cugb.edu.cn。

引用格式:李亚洲,孙友宏,冶宇霆,等.冰层热融钻具倾斜原因及防/纠斜方法浅析[J].钻探工程,2023,50(3):8-20.

LI Yazhou, SUN Youhong, YE Yuting, et al. A brief analysis of inclination causes and preventing/correcting methods for ice hot-point drills[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 8-20.

钻探是冰川研究中最直接、最有效的方法之一,在冰川学调查中得到了广泛使用。热融钻探是常用的冰层钻探方法,其既可用于取芯钻进,也可用于不取芯钻进^[5]。本文主要针对不取芯的热融钻具开展讨论。

如图1所示,热融钻具是利用热能融化底部冰层,实现融冰钻进的工具,其主要由热融钻头、钻具本体和电缆等组成。热融钻头利用通电后产生的焦耳热来融化冰层。热融钻头上部为钻具本体,其根据钻具类型具有不同的用途,如安装传感器、打捞孔内融水等。钻具本体通过电缆连接到地表。电缆不仅用于提升和下放热融钻具,而且需要为热融钻头提供电能。电能一般来自地表发电机。总的来看,大部分热融钻具都是一个长径比很大的圆柱体。热融钻具按照钻孔是否闭合可以分为常规型和冻结型2种。常规型热融钻具的钻孔始终保持开放,电缆通过地表绞车和钻塔收放(见图1a);而冻结型热融钻具的钻孔会发生冻结,电缆缠绕在钻具内部,通过内置式绞车收放(见图1b)^[6]。

自1940—1941年在南极罗斯冰架首次使用以来,世界各国已经研制了50余个不同类型的热融钻具^[5,7],用于花杆安装、冰川厚度测量、冰下溪流定位、冰川温度测量、冰川流速和密度测量、灰尘层定位以及冰川视频观测等冰川学调查中^[8-11]。近年来,热融钻具被建议用于极地冰下湖的钻探采样和外星球冰下海洋的探测。为此,Cryobot^[12]、RE-CAS^[13]、Ice Diver^[14]、IceMole^[15]、IceShuttle Tere-do^[16]和EMP^[17]等一系列热融钻具相继被研发出来。

热融钻具主要用于在冰层中垂直钻进,但在实际的热融钻进过程中,其极易发生倾斜,从而导致钻孔轨迹偏斜,进而无法钻至目标冰层。1976年,Morev等人采用ETI-1型热融钻具钻进了一个310 m深的钻孔,但由于灰尘在钻孔底部堆积,使钻孔顶角从0°增加到45°,钻孔垂直深度仅为180 m^[5]。此外,1994年,Hensen热融钻具在格陵兰岛Summit站进行测试时,钻具顶角在不到11 h的时间里增大到9.04°,钻探人员曾尝试纠斜,但最后以失败告终,钻探被迫中止^[18]。因此,在热融钻具的设计和使用中,必须重视钻具倾斜带来的危害,尽可能的降低钻具的倾斜程度。截止目前,国内外尚未对热融钻具的倾斜原因及防/纠斜方法开展系统性研究。为此,本文将首先对冰层热融钻具的倾斜原因开展分析,

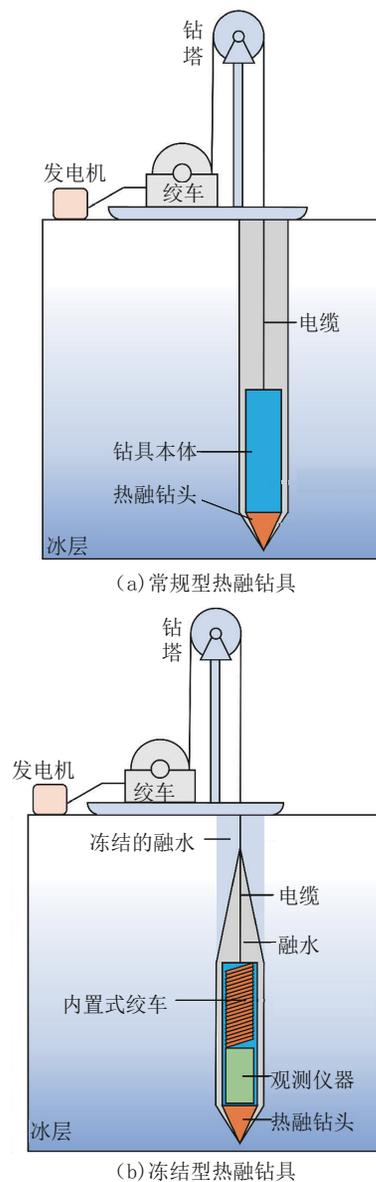


图1 热融钻具工作原理示意

Fig.1 Working principle of the hot-point drills

然后总结归纳出相应的防斜和纠斜方法。

1 热融钻具倾斜原因

引起冰层热融钻具倾斜的原因多种多样,主要包括热融钻头底部冰层受热不均、钻具结构稳定性差、放缆速度高于钻进速度和钻孔直径过大等。

1.1 热融钻头底部冰层受热不均

热融钻头底部的冰层一旦受热不均,就会导致部分冰层融化速度变快,而另一部分冰层融化速度变慢。在自身重力作用下,热融钻具就会自然地向融化速度较快的钻具一侧倾斜,其倾斜的程度取决

于钻头底部冰层受热的不均匀程度。钻头底部冰层受热的不均匀程度越大, 钻具倾角就越大。导致热融钻头底部冰层受热不均的原因主要有以下3点。

1.1.1 热融钻头功率分布不均

热融钻头的钻进速度主要取决于钻头的加热功率, 加热功率越大, 钻进速度越快^[19]。热融钻头一般为中心轴对称结构, 理论上, 通过加热元件的对称布置可以实现钻头热量的均匀分布。但在实际工程中, 由于热融钻头的加工误差和加热元件的不均一, 往往导致热融钻头各处的功率分布不一致。功率较大一侧的钻头温度较高, 具有较快的融冰速度; 功率较小一侧的钻头温度较低, 具有较慢的融冰速度, 从而引起热融钻具的倾斜。这一点已经由 Schüller 和 Kowalski 等人通过数值模拟和实验测试进行了验证^[20-21]。例如, 当平板形热融钻头中心温度为 80 °C, 左右两侧的温差为 4 °C 时, 热融钻头就会倾斜, 钻孔就会发生弯曲, 其弯曲半径约为 3.5 m。

1.1.2 热融钻头钻压分布不均

钻压也是决定热融钻头融冰速度的关键影响因素之一。钻压越大, 热融钻头融冰速度越快; 但当钻压超过一定范围后, 钻压对钻进速度的影响逐渐变小^[22]。冰层热融钻具一般依靠自身重力产生钻压。当热融钻具内部元器件布置不均衡时, 会导致热融钻头一侧压力较大, 另一侧压力较小, 从而引起钻头两侧钻进速度的差异, 进而导致热融钻具向钻头压力较大的一侧倾斜。这种因压力不同而导致相变材料不均衡融化的现象已经在实验室得到了验证^[23]。

1.1.3 冰层内部杂质分布不均

冰川并不都是由均匀的冰层组成的, 局部冰层可能会存在火山灰和冰川漂砾等杂质, 而且这些杂质在冰层中并不是均匀分布的^[24-25]。当热融钻头钻遇含杂质颗粒的冰层时, 这些杂质颗粒会阻碍钻头和底部冰层之间的热交换, 从而导致热融钻头不同位置的钻进速度不一致, 进而引起热融钻具倾斜。前文提到的 ETI-1 型热融钻具就是因为火山灰在钻孔底部堆积, 才导致钻孔顶角从 0° 增加到 45° 的^[5]。值得一提的是, 由于钻头底部的固体颗粒很难排除, 所以由冰层内部杂质分布不均引起的热融钻具倾斜可能会持续下去, 很难得到纠正, 严重时, 会导致热融钻进被迫中止。

1.2 热融钻具结构稳定性差

热融钻具内部常常需要布置诸多传感器, 甚至

缠绕电缆, 所以其长径比一般较大, 为细长杆结构, 且热融钻具通常只有热融钻头支撑在冰层上, 所以其结构稳定性较差, 易在外界扰动下发生倾斜。导致热融钻具结构稳定性差的原因主要有以下3点。

1.2.1 热融钻具重心过高

在热融钻具的设计中, 部分重物布置于钻具上部, 导致热融钻具重心较高, 受到外界扰动时易发生倾斜。例如, Philberth 设计的冻结型热融钻具上部不仅布置了铜制电缆, 而且放置了充满硅油的储油管, 导致热融钻具的重心升高(见图2), 引起钻具倾斜^[26]。1968年, Philberth 在格陵兰岛分别测试了两种不同长度的冻结型热融钻具: Probe I 和 Probe II。其中, Probe I 顺利钻进至 218 m 的深度, 其倾角 < 4°; 而 Probe II 在钻进至 615 m 时, 其倾角已经达到了 10°^[27-28]。

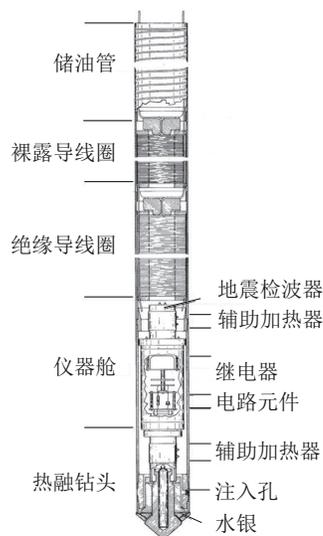


图2 Philberth 热融钻具

Fig.2 Philberth hot-point drillis

1.2.2 热融钻具重心偏离几何中心线

热融钻具重心一旦偏离其几何中心线, 就会以钻头为支点, 产生一个倾斜力矩, 促使热融钻具倾倒。尽管在热融钻具中, 大部分零部件都是按照轴对称布置的, 但对结构较为复杂的热融钻具而言, 往往无法实现所有部件的对称布置。此时, 极易导致热融钻具重心偏离几何中心线, 产生倾斜力矩。

1.2.3 热融钻头与冰层支撑面积小

热融钻头与冰层的支撑面积较小也是导致热融钻具结构稳定性差的一个重要原因。支撑面积越

小,结构稳定性越差。目前,热融钻头的形状多种多样,有圆锥形、球形、圆柱形和抛物线形等^[6]。相同直径下,圆柱形热融钻头与冰层的支撑面积最小。但不管使用哪种形状,热融钻头仅依靠其外表面支撑在冰层上。相较于热融钻具的整个外表面积来说,热融钻头的支撑面积非常小,容易引起钻具结构的不稳定。以EnEx-IceMole钻具为例,其热融钻头与冰层支撑面积约为225 cm²,仅占钻具总表面积的1.8%^[29]。

1.3 绞车放缆速度高于钻进速度

冰层热融钻具依靠地表绞车或内置式绞车下放电缆实现钻进。当地表绞车或内置式绞车的放缆速度高于热融钻头的钻进速度时,热融钻具不再承受上部电缆的拉力,从而失去了力的约束。电缆也不再受力,变得松弛。此时,一旦热融钻具受到侧向扰动等其他外界因素的影响,就很有可能发生倾斜。热融钻具的放缆速度既可以由电机自动控制,也可以由钻探人员手动控制。

1.4 钻孔直径过大

热融钻头融冰钻进时,并不是所有的热量均用于向下钻进。其中,有一部分热量会不可避免的损失到钻孔融水及周围冰层中,导致钻孔直径扩大^[30]。一般来说,热融钻头的热效率越低,其形成的钻孔直径越大。热融钻具发生倾斜时,其上部往往依靠在孔壁上。若钻孔直径较大,则热融钻具和孔壁之间的间隙较大,热融钻具就有足够的空间发生倾斜。且钻孔直径越大,允许钻具倾斜的程度也就越大。值得注意的是,热融钻孔直径的扩大本身并不会引起钻具的倾斜,但在钻具倾斜已经发生后,较大的钻孔直径会加剧钻具的倾斜程度。

2 热融钻具防/纠斜方法

目前,针对不同的钻进工况和不同的倾斜原因,存在多种热融钻具防/纠斜方法。概括来看,这些方法可以分为热力法、重力法、浮力法、推靠法、扶正器法、导向杆嫁接法和钻孔直径减小法等。

2.1 热力法

热力法主要用于解决由热融钻头的不均匀加热引起的钻具倾斜问题,其利用各种技术手段,保证热融钻头底部冰层受热均匀,从而使热融钻头各处融冰速度保持一致,达到防斜和纠斜的目的。按照不同的技术手段,可以将热力法分为以下3种。

2.1.1 热流体导热法

热流体导热法是最早提出的一种热融钻具纠斜方法,其基本原理是在钻具倾斜时,利用热流体将热量导向钻头倾斜一侧,从而加快热融钻头倾斜一侧的融化速度,直到热融钻具逐渐垂直为止。热流体导热法可以分为水银环导热法和热流体加热法两种。

水银环导热法最早应用于Philberth热融钻具(参见图2)^[31]。该热融钻头内部预留有一个环形空腔,里面部分填充液态水银。当热融钻具发生倾斜的时候,水银会向钻具倾斜一侧的空腔流动,从而将热融钻头中加热元件产生的热量导向钻具倾斜一侧,进而加快这侧冰层的融化速度,直到热融钻头再次垂直。1962年,水银环导热法在瑞士的Jungfrau-joch冰川成功进行了测试,应用效果较好^[32]。后来,该方法被Philberth应用于Probe I和Probe II热融钻具。但在实际钻进过程中,水银环导热法的防斜效果不甚理想。如前文所述,Probe I在钻进至218 m时,倾角达到了4°;而Probe II在钻进至615 m时,最大倾角已经达到了10°^[27]。自此之后,这种方法再未被其他热融钻具使用过。

基于水银环导热法的启示,本研究团队提出了一种热流体加热的热融钻头,其亦具有防/纠斜功能。如图3所示,该热融钻头内部为一个空腔,空腔中填充有一定量的导热流体。其在正常工作时,首先采用电加热棒加热导热流体,然后再利用导热流体来加热钻头外壳,实现融冰钻进。当热融钻具发生倾斜时,钻头内部的热流体也发生倾斜,更多的热量将被导入钻头倾斜方向,融化该侧的冰层,实现钻具的纠斜。相较于水银环导热法,热流体加热法在热融钻头垂直钻进时,能够通过热流体的对流循环实现热融钻头功率的均匀分布。此外,当钻具倾斜时,能有更多的热流体参与导热,纠斜效果更优。

2.1.2 热融钻头定向加热法

热融钻头定向加热法是指在检测到热融钻具发生倾斜后,通过调整热融钻头的功率分布,使钻头倾斜一侧的钻进速度慢于另外一侧的钻进速度,从而使热融钻头在钻进过程中逐渐变得垂直。因此,该方法必须与钻具内部的姿态传感器配合使用。钻具的控制系统须能够根据钻具姿态信号调节热融钻头功率分布。为了实现热融钻头的定向加热,通常需要将热融钻头分成不同的加热区,单独进行控制。

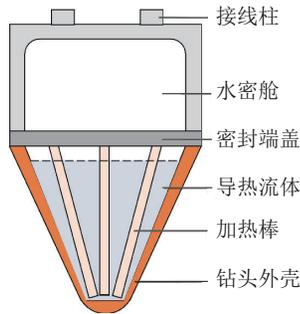


图3 热流体加热式热融钻头

Fig.3 Thermal head heated by hot fluid

1995年, Kelty首次在SIRG钻具的设计中,对热融钻头内部的加热棒进行单独控制,来保证钻具的稳定性^[18]。该钻具热融钻头内部的每一个电加热棒均由单独的固态继电器来控制,而这些继电器则由单独的微控制器自动控制。钻进时,首先设定一个允许的最大倾角,然后利用倾角传感器来测量钻具的倾斜程度。一旦钻具的倾角超过了允许的最大倾角,就打开钻孔高边一侧的电加热棒进行加热来补偿钻具的倾斜。在内布拉斯加大学林肯分校冰井中的测试结果显示,只需要控制热融钻头中两个电加热棒的开启和闭合,而其余电加热棒均保持其额定功率的70%,就能保证热融钻具在冰层中垂直钻进。

IceMole钻具通过定向加热可实现在冰层中的造斜。第一代IceMole钻具的热融钻头分4个加热区分别进行控制,并配合底部微型螺旋钻,使其具备了在冰层中定向钻进的能力^[15,29]。2010年,第一代IceMole钻具在瑞士的Morteratschgletscher冰川以45°的仰角向上钻进1.5 m,沿水平方向钻进超过5 m,沿45°角向下钻进3 m。第二代IceMole钻具内部所有的12个加热元件则均采用单独控制的方式进行加热,并将钻头形状由平底形改成了抛物线形。但2012年在瑞士的Morteratschgletscher冰川和冰岛的Hofsjökull冰川测试时发现其在冰层中的定向造斜能力减弱了。其主要原因是抛物线形钻头无法使微型螺旋钻产生所需的与热融钻具中心线相垂直的给进力。后来,又研发了EnEx-IceMole热融钻具(见图4),其钻头仍为平底形,并分为4个加热区分别进行控制。2014年,EnEx-IceMole钻具在南极Taylor冰川的“血瀑布”通过定向钻进在17 m的深度成功钻取了冰下的高矿化度盐水^[33-34]。

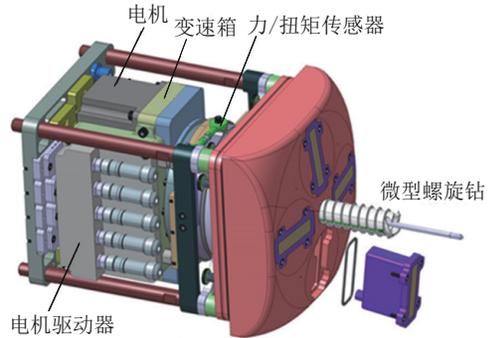


图4 EnEx-IceMole钻具的热融钻头

Fig.4 Thermal head of the EnEx-IceMole drill

2016年,吉林大学开始研发RECAS热融钻具。该钻具的热融钻头共包含16个电加热棒,均分为4组。钻具的控制系统可以对这4组电加热棒进行单独控制,从而有利于钻具倾斜时进行纠斜^[6]。

2.1.3 热融钻头回转法

热融钻头的功率分布不均和钻压分布不均在实际工程中经常难以避免,而这往往会导致热融钻头一侧的钻进速度快于另外一侧。为避免这一现象的发生,可以给热融钻头配备电机,使其缓慢回转,从而消除功率分布不均和钻压分布不均对冰层受热的影响。虽然这种方法尚未被热融钻具使用过,但在理论上使用这种方法防斜是可行的。值得注意的是,这种方法时需为热融钻头配备额外的电机,从而使钻具结构复杂化。此外,使用这种方法时,不能给钻具施加很大的钻压,因为过大的钻压会增加热融钻头的回转扭矩,从而增大电机的功率和尺寸。

2.2 重力法

重力防/纠斜方法是指利用钻具的重心始终指向铅锤方向的原理,来实现热融钻具垂直钻进的方法。常用的重力防/纠斜方法包括降低重心法、钟摆法以及悬吊法等。

2.2.1 降低重心法

降低重心法是指在热融钻具的设计阶段,就尽可能增大钻具直径,缩短钻具长度,或将钻具内部比较重的部件布放在钻具下部,从而降低热融钻具的重心,提高其结构稳定性的方法。这种方法只在一定程度上具有防斜的功能,但不具备纠斜作用。

AIAN热融钻具的钻头在铜制基体的下方安置了很重的烙铁块来增加底部质量以降低钻具重心,进而避免上部钻具的倾斜^[35]。该热融钻头铜制基体处的直径只有63.5 mm,底部的楔形烙铁块直径

只有48 mm,而钻头总质量却达到了23.6 kg,从而很大程度提高了钻具的稳定性。但将烙铁块置于铜制基体以下,不利于热量向冰层的传递,导致其钻进速度较慢(见图5)。1953年,该钻具在冰川钻进时,平均钻速只有1.28 m/h。此外,AIAN热融钻具还采用了导向杆来保证钻具的垂直钻进(见2.6节)。

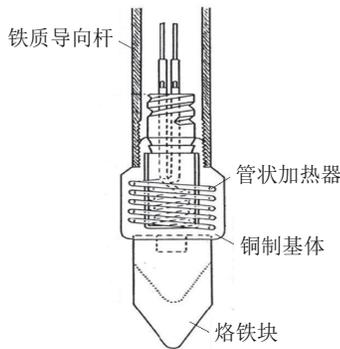


图5 AIAN热融钻具
Fig.5 AIAN hot-point drill

2.2.2 钟摆法

钟摆法是目前使用较为广泛的一种防/纠斜方法,其最早由Aamot于1964年提出^[36]。该方法的基本原理是在热融钻具重心的上方设置支撑点,使热融钻具在重力作用下始终处于“悬吊”状态,进而保持垂直。钟摆法共有两种实现方式。如图6(a)所示,第一种方式须将热融钻具的形状设计为圆锥形,使整个热融钻具的外表面成为承力表面,并由钻具的上部表面承受绝大部分的重力。在此,将其命名为“圆锥面钟摆法”。使用这种方式时,热融钻具的整个外表面均需进行加热,才能实现融冰钻进。截止目前,这种方式仅由Aamot提出,但并未在实际的热融钻具中使用过。第二种方式是“环形加热器钟摆法”。该方法通过在热融钻具的重心以上添加一个环形加热器作为钻具的支撑点来承受大部分的重力(图6b)。为此,必须使上部环形加热器的融冰速度略小于热融钻头的融冰速度,而这可以通过调节上部环形加热器的功率来实现。在实际工程中,Aamot通过控制环形加热器与热融钻头的温度差来调节上部环形加热器的功率。使用环形加热器钟摆法防/纠斜时,无疑会导致需要融化的冰层体积增加,从而导致热融钻具的热效率降低。Aamot通过计算得出,当环形加热器的直径是热融钻头直径的

1.3倍时,热融钻具的热效率只有59.1%^[37]。

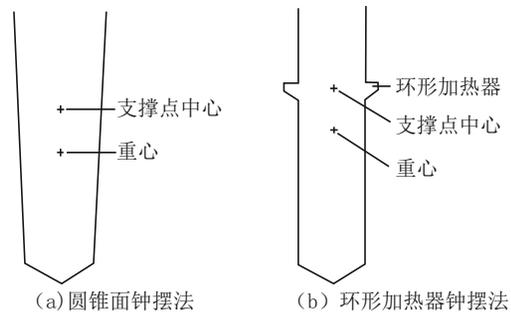


图6 钟摆法的两种方式
Fig.6 Two ways of pendulum steering

Aamot首先利用一个直径101.6 mm、长度0.46 m的热融钻具,在实验室对环形加热器钟摆法进行了测试,发现这种方式的纠斜效率较高。在预先设置的倾斜钻孔中,使用环形加热器钟摆法可在较短的时间内完成纠斜。随后,这种纠斜方式就被应用于CRREL热融钻具(见图7)^[26,37]。1971年,CRREL热融钻具在南极进行测试,但只钻进了6 m就因钻具内电缆烧断而失效,所以并没有对环形加热器钟摆法的应用效果进行验证^[38]。

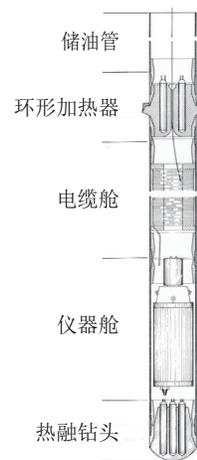


图7 CRREL热融钻具
Fig.7 CREEL hot-point drill

1972年,澳大利亚南极调查局在CRREL热融钻具的基础上研发了一款新的热融钻具。其热融钻头的直径为129.5 mm,功率为5.5 kW,上部环形加热器的直径为152 mm,功率为2 kW,从而使得环形加热器的融冰速度略慢于热融钻头的钻进速度。1973年,该热融钻具在南极凯西站附近成功钻进

112 m后因钻头电加热元件损坏而被迫停止钻进^[39]。目前,尚未见对该钻具纠斜效果的报道。

1979年,内布拉斯加大学林肯分校在研发的PICO热融钻具上也采用了环形加热器钟摆法。该钻具的热融钻头直径为127 mm,加热功率为4.05 kW,而上部环形加热器的直径为165 mm,功率只有1.35 kW。该热融钻具只在实验室完成了测试,并没有在野外工程中使用过,真实的纠斜效果不得而知^[38]。

1990年,内布拉斯加大学林肯分校再次研发了一款Hensen热融钻具,其仍采用环形加热器钟摆法进行纠斜^[18]。如前文所述,1994年,该钻具在格陵兰岛的Summit站进行测试时,钻具倾角在不到11个小时的时间里增大到 9.04° ,纠斜效果并不理想。其主要原因可能是该热融钻具的3个侧壁加热器中有一个发生了损坏,从而导致钻具侧壁热量不足,多次发生卡钻事故,不得不频繁启停侧壁加热器,进而导致钻孔极度不规则,引发钻具倾斜。最终,该钻具在钻进至大约120 m后被永久冻结在钻孔内。

如图8所示,华盛顿大学研发的Ice Diver钻具也采用了环形加热器钟摆式法,其在钻具上部布置有一个环形加热器^[14]。Ice Diver钻具的钻头直径为65 mm,环形加热器的直径为85 mm。热融钻头和环形加热器上均布置有温度传感器,通过控制内部加热元件的通电来调节热融钻头和环形加热器的温度。一般情况下,热融钻头的温度保持在 20°C 左右,而环形加热器的温度维持在 15°C 。2014年, Ice Diver钻具在格陵兰岛成功钻进至 400 ± 50 m的深度,倾角传感器传回的钻孔轨迹几乎是垂直的。这证明该热融钻具的纠斜效果良好。



图8 Ice Diver热融钻具

Fig.8 Ice Diver hot-point drill

2.2.3 悬吊法

悬吊法是指通过电缆悬吊,承受钻具大部分的重力,而只有少部分的重力作用在冰层上,为冰层钻进提供所需钻压。使用悬吊法时,热融钻具的吊点须置于钻具的重心以上,才能保证整个钻具在重力的作用下保持垂直。此外,必须使热融钻具所用绞车的放缆速度慢于热融钻头的钻进速度,才能保证热融钻具始终处于悬吊状态。

悬吊法在热融钻具中使用十分广泛。如图9所示,20世纪90年代,阿尔弗雷德韦格纳极地和海洋研究所研发了冻结型热融钻具SUSI。SUSI热融钻具通过对内置式绞车摩擦离合器的控制来调节电缆的释放速度,进而来调节电缆的张力,使其承受大部分的钻具重量。该钻具根据钻具的倾角和热融钻头的温度来控制摩擦离合器。SUSI热融钻具共研发了三代,其中,第二代SUSI-II钻具于1992—1993年间在南极成功钻穿了225 m厚的Ekström冰架,但未见该钻具倾斜程度的报道^[40]。

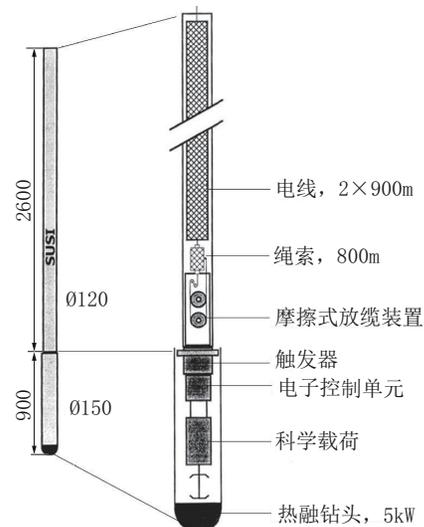


图9 SUSI热融钻具

Fig.9 SUSI hot-point drill

2002年,美国喷气推进实验室研发了SIPR热融钻具,其内置式绞车具有一个力反馈控制系统,可以悬吊钻具,将钻压控制在一个较小的范围,进而保证钻进时的垂直度^[41]。2006年,该热融钻具在格陵兰岛成功钻进了50 m,平均钻进速度约为1 m/h,但未见对该钻孔倾斜程度的报道。

俄亥俄州立大学伯德极地研究中心研发的

BPRC 热融钻具也使用了悬吊法^[42]。该钻具 80% 的重力均有电缆承担,只有约 20% 的重力作用在冰层上。此外,通过控制绞车电机来调节热融钻具的放缆速度为 7.2 m/h,使其略小于热融钻头 7.6 m/h 的钻进速度。2011 年,伯德极地研究中心在南极 McMurdo 冰架完成了两个透底钻孔。第一个钻孔先使用电动机械钻具钻至 185.7 m 的深度,然后再使用热融钻具钻至 192.7 m 的冰架底部;第二个钻孔同样先使用电动机械钻具钻至 190.4 m,然后再使用热融钻具钻进 2.5 m 至冰架底部。在整个钻进过程中,钻具电缆与钻孔中心的偏移量 < 0.05 m,对应的钻孔总体倾斜程度大约为 0.0075° 。此时,地表处钻孔中心与冰架底部钻孔中心的位移偏差 < 0.26 m。

2.3 浮力法

浮力法最早于 1968 年由 Aamot 提出^[43]。使用该方法时,热融钻具上部需配置一个重量较轻的浮力部分,使其能够在水中产生较大的浮力。该浮力须小于下部钻具的重力,如此,才能保证热融钻头有足够的钻压施加在冰层上。但浮力围绕钻头尖端产生的校正力矩必须大于下部钻具自重产生的倾斜力矩,因此,浮力的中心位置必须位于钻具的重心以上。Aamot 通过力和力矩的平衡方程,给出了浮力纠斜的临界条件。值得注意的是,使用这种防/纠斜方法时,往往需要为热融钻具添加较长的浮力部分。因此,使钻具结构复杂化,同时增加了钻具的长度,也增加了对其侧壁进行防冻所需的功率。

如图 10 所示,Aamot 随后设计了一款利用浮力纠斜的热融钻具,其直径只有 20.3 mm,长度只有 0.5 m。其浮力部分由层压塑料管(带有环氧树脂的玻璃布)组成,通过环氧树脂粘合剂粘合在热融钻头之上。1967 年,5 个该型热融钻具在阿拉斯加的冰川上进行了测试,最大钻进深度达到了 62 m,但没有关于其防/纠斜效果的报道。

Classen 热融钻具也采用了浮力法,但实验测试发现所采用浮力部分的壁厚太小,无法承受目标钻进层位的水压,故不得不在浮力部分填充了环氧树脂^[44]。1969 年,该热融钻具在加拿大的 Rusty 冰川完成了 7 个钻孔,深度从 14.6 m 到 48.8 m 不等。1975 年,Classen 热融钻具在 Barnes 冰帽进行了钻探作业,共钻进 7 个孔,累计钻进深度 547 m,最大钻孔深度达 200 m,但未见对其钻孔倾斜程度的报道。

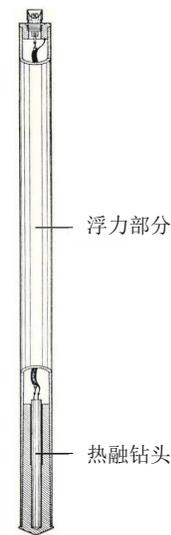


图 10 浮力稳定钻具

Fig.10 Buoyancy-stabilized hot-point drill

在此之后,美国明尼苏达大学也设计了一款利用浮力纠斜的热融钻具^[45]。1970—1978 年间,使用这款热融钻具钻进了 18 个钻孔,最大的钻进深度达到了 300 m,但相关研究人员未对钻孔倾斜程度及纠斜效果进行报道^[46]。

2.4 推靠法

推靠法就是在热融钻具发生倾斜以后,对热融钻具倾斜方向的冰层施加一个推力,并利用该推力产生的反力使热融钻具处于钻孔中心并保持垂直。一般来讲,推力应该施加在热融钻具重心以上,且推力作用点距钻具重心的垂直距离越大,纠斜所需的推力就越小。推靠法属于一种主动的纠斜方法,其须与钻具内部配备的姿态传感器等配合使用。工作时,首先由姿态传感器测量钻具的倾斜方向和倾角大小并传给控制系统;然后,由控制系统发出指令,控制推杆沿钻具倾斜方向伸出,并支撑在孔壁上产生推力直到热融钻具重新垂直。由于推靠法需要在钻具内部部署一套推力产生机构,因此,其所需空间较大,只能应用于直径较大的热融钻具。目前,尚无推靠法在热融钻具中的应用案例,但相关技术已成功应用于地质旋转导向钻具。根据推力的产生方式,可以将推靠法分为机械推靠法和液力推靠法。

2.4.1 机械推靠法

机械推靠法的推力来自于电机回转产生的机械力。本研究团队针对 RECAS 热融钻具,提出了一套机械推靠机构。如图 11 所示,该机械推靠机构主

要由电机、联轴器、主锥齿轮、子锥齿轮、电磁离合器、螺旋副和推杆等组成。子锥齿轮、电磁离合器和推杆各有3个,按 120° 角均布在钻具中。当RECAS钻具中的姿态传感器检测到钻具倾斜后,控制系统启动电机,经联轴器带动主锥齿轮和3个子锥齿轮转动;与此同时,控制系统启动钻具倾斜方向的电磁离合器,使其闭合,带动螺旋副回转,将推杆伸出钻具外侧,抵靠在孔壁上产生推力,直至钻具回到钻孔中心。随后,使电机反转,推杆自动缩回钻具。

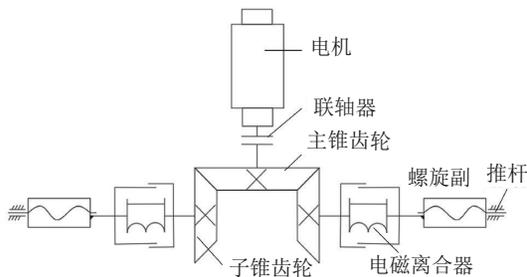


图11 机械推靠法原理

Fig.11 Mechanical push method

2.4.2 液力推靠法

液力推靠法的推力由承压液体产生。在热融钻具中,所用的承压液体可以是钻进时产生的融水,也可以是钻具自带的液压油。目前,虽然尚未有液力推靠法在热融钻具中的应用实例,但液力推靠法在石油钻井中已经得到了广泛应用^[47-48]。如图12所示,本研究团队针对RECAS热融钻具提出了一种液力推靠机构,其主要包括液压泵、溢流阀、节流阀、三位四通电磁阀和液压推杆等。液压泵主要用于抽取孔内融水并对其进行加压;节流阀可以调节融水流量,控制液压推杆的运动速度。三位四通电磁阀用于控制加压后融水的流向,控制液压推杆伸出或收回。液压推杆则是推力产生的执行机构。该液力推靠机构沿钻具周向均布3个液压推杆,每个液压推杆均配备有三位四通电磁阀和节流阀,从而实现对其的单独控制。当热融钻具发生倾斜时,启动液压泵,抽取孔内融水并将其泵送至电磁阀。控制系统根据钻具的倾斜角度和倾斜方向,控制不同电磁阀的开合路径,将高压融水泵入特定的液压推杆,使其伸出支撑在孔壁上,实现钻具纠斜。待钻具垂直后,切换高压融水流动路径,使推杆缩回钻具内部。

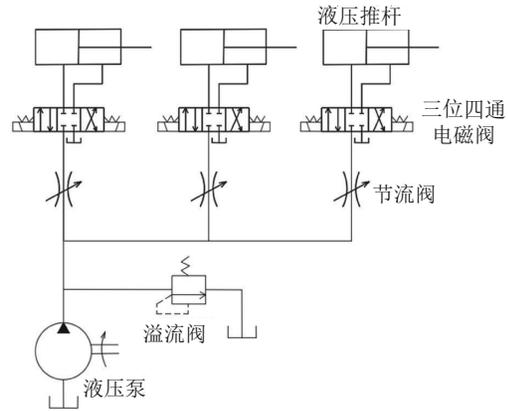


图12 液力推靠法原理

Fig.12 Hydraulic push method

2.5 扶正器法

扶正器法就是在热融钻具上部添加扶正器,使其在钻进过程中支撑在孔壁上,从而来保证钻具的垂直。常用的扶正器一般由3~4个对称分布的弹簧叶片组成。弹簧叶片在地面被弯曲成“弓”形后,安装在扶正器上。扶正器的直径略大于热融钻孔直径,使其能支撑在孔壁上,从而使热融钻具保持在钻孔中心。扶正器与孔壁之间的摩擦力较小,可通过钻具自身重力克服。使用扶正器法时,既可以使用一个扶正器,也可以选择使用多个扶正器,以更好的达到防斜的目的。

20世纪60年代末至70年代初,Morev等^[49]研发了使用扶正器防斜的ETI-1热融钻具。如图13所示,该热融钻具的扶正器位于电缆终端以上。1980年,该热融钻具在南极阿蒙森高原进行了钻进,其从368 m深度钻进到586 m的深度。测井结果显示,形成的钻孔倾角不超过 $1\sim 2^\circ$,垂直度较好,但在孔底附近,倾角突然增大到了 30° ^[50],其原因可能是由冰川内部的灰尘层或漂砾造成的。

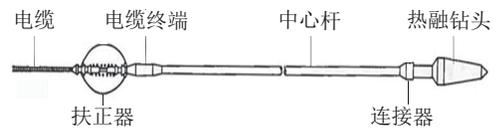


图13 ETI-1热融钻具

Fig.13 ETI-1 hot-point drill

俄亥俄州立大学伯德极地研究中心研发的BPRC热融钻具也采用了扶正器,来辅助电缆悬吊法实现垂直钻进^[42]。如前文2.2.3节所述,2011年

11~12月,该热融钻具在南极McMurdo冰架成功进行了应用,得到的钻孔几乎是垂直的^[51]。

2.6 导向杆嫁接法

导向杆嫁接法就是在热融钻具上部接一根比较长的导向杆,使钻具整体的长径比变大。当热融钻具发生倾斜的时候,导向杆的最上部首先接触孔壁,限制钻具继续倾斜。在相同的钻孔直径下,导向杆越长,钻具发生倾斜后的倾角越小,越有利于减小钻具的倾斜程度。导向杆一般为空心的钢管、铜管或铝合金管,中间可通过电缆,且可通过螺纹进行连接。导向杆嫁接法只能在一定程度减小钻具的倾斜,并不能真正的实现钻具的垂直钻进。

1948年,AINA热融钻具在加拿大的Seward冰川进行了钻进作业。AINA热融钻具直径只有32 mm,但其上部最多可以嫁接60 m长的导向杆,从而保证热融钻孔的垂直度^[52]。随后,对AINA热融钻具进行了改进,将钻头直径增大到了63.5 mm,导向杆的长度缩小到1.7 m,此时,包括导向杆在内的钻具总长度约为2 m。后来,对该热融钻具继续进行了两次改进,改进后的钻具长度(包括导向杆)分别为2.7 m和2.1 m^[35]。目前,尚未见对该钻具倾斜程度的报道。

1956年,Granduc矿山公司研发了一款热融钻具,并在阿拉斯加的Salmon冰川进行了钻孔^[53-54]。第一个钻孔在钻至323 m时因钻孔倾斜而被迫放弃。随后,在该热融钻具上部添加了一根6 m长的导向杆。采用添加导向杆后的热融钻具钻了5个孔,钻进深度从495~756 m不等。结果显示,导向杆极大的改善了钻孔的歪曲程度。但同时也发现,导向杆不能实现纠斜,一旦热融钻具偏离垂直方向,其将沿着原来的方向持续倾斜。

Grześ等人设计了一款直径只有27 mm,长度只有155 mm的热融钻具。为了控制钻孔的垂直度,在热融钻具上部添加了一根10 m长的铜制导向杆^[55]。1979年,该热融钻具在Svalbard半岛的Hans冰川进行了钻孔,用于安装花杆。但钻进深度仅为5~10 m,钻孔几乎没有倾斜。

2.7 钻孔直径减小法

钻孔直径减小法是指通过提高热融钻头的热效率,减小钻孔直径,从而缩小热融钻具与孔壁之间的间隙,降低热融钻具倾斜程度的方法。目前,大部分热融钻头的热效率均在50%~65%,形成的钻孔直

径大约是钻具直径的1.2~1.4倍^[5]。为此,须通过改进钻头形状、合理布置加热元件等形式来提高热融钻头的热效率,进而减小钻孔与钻具间的环状间隙。钻孔直径减小法不能实现钻具的防斜,只能在一定程度上减小钻具的倾斜程度。

3 热融钻具防/纠斜方法比较

冰层热融钻具的防/纠斜方法多种多样,目前使用最广泛的是钟摆法、悬吊法和导向杆嫁接法。如表1所示,在这些防/纠斜方法中,有的只有防斜功能,而有的则既能防斜,又能纠斜。按照应用效果,可将热融钻具的防/纠斜方法分为“好”、“中”、“差”3个等级。热融钻头定向加热法、环形加热器钟摆法、悬吊法以及扶正器法的防/纠斜效果均较好;导向杆嫁接法的防斜效果中等,而水银环导热法的纠斜效果较差。其他防/纠斜方法的应用效果未见报道或尚未开展验证,需要未来进一步开展研究。

4 结语

热融钻具在冰层钻探中应用广泛。自20世纪40年代开始,虽然已经研发了数量众多的热融钻具,但对其倾斜原因以及防/纠斜方法的研究并不够深入,热融钻具的倾斜问题层出不穷。

总的来看,热融钻头底部冰层受热不均、钻具结构稳定性差、绞车放缆速度高于钻进速度、钻孔直径过大等都会造成钻具倾斜。这些原因既包括钻具结构设计上的缺陷,也包括操控系统的误差和冰层性质的差异。其中,最容易引起钻孔倾斜的原因是热融钻头底部功率分布不均、热融钻具重心过高以及绞车放缆速度高于钻进速度。值得注意的是,引起热融钻具倾斜的各种原因往往不是孤立存在的,而是并行发生的。

目前,热融钻具存在多种防/纠斜方法,如热力法、重力法、浮力法、推靠法、扶正器法、导向杆嫁接法和钻孔直径减小法等。这些方法各有优缺点,必须根据实际工况,选择合适的防/纠斜方法。一般情况下,同一个热融钻具可以采用多种方法实现防斜和纠斜。总的来看,热融钻头定向加热法、环形加热器钟摆法、悬吊法、扶正器法是应用效果较好的防/纠斜方法。热融钻头定向加热法和推靠法只具有纠斜功能,而热融钻头回转法、降低重心法、扶正器法、导向杆嫁接法和钻孔直径减小法则只具有防斜作

表1 冰层热融钻具防/纠斜方法比较

Table 1 Comparison of the methods for preventing and correcting the inclination of ice hot-point drills

防/纠斜方法	主要功能	是否应用	应用效果	优点	缺点		
热 力 法	水银环导热法	防斜、纠斜	是	差	结构简单,易于实现	水银量较少,导热作用慢,纠斜效果较差。属被动式纠斜方法,只有当热融钻具发生一定程度的倾斜后,才有纠斜作用,且纠斜所需时间较长	
	热流体导热法	防斜、纠斜	否	待验证	结构简单,易于实现;能够实现热融钻头功率的更均匀分布;相比于水银环导热法,能有更多的热流体参与导热,纠斜效果更优	属被动式纠斜方法,只有当热融钻具发生一定程度的倾斜后,才有纠斜作用,且纠斜所需时间较长	
	热融钻头定向加热法	纠斜	是	好	属主动式纠斜方法,能在钻具倾斜后,快速实现纠斜	需与钻具内部的姿态传感器配合使用,钻头的加热控制系统较为复杂,可靠性降低	
	热融钻头回转法	防斜	否	待验证	能解决热融钻头的功率分布不均和钻压分布问题	需为热融钻头配备电机,使钻具结构复杂;不能给钻具施加较大的钻压;不能纠斜。	
重 力 法	降低重心法	防斜	是	未报道	通过调整钻具几何尺寸及合理布置钻具部件即可实现	有时需为热融钻具添加配重,增加了钻具重量和复杂度;不能纠斜	
	钟摆法	圆锥面钟摆法	防斜、纠斜	否	待验证	相比于环形加热器钟摆法,无需添加额外加热器	热融钻具整体为圆锥形,加热面积大,所需功率高,且不利于钻具内各部件的布置
		环形加热器钟摆法	防斜、纠斜	是	好	纠斜效果好	需要添加环形加热器,增加了系统复杂度;此外,环形加热器增大了融冰体积,导致所需功耗增加,热融钻具的热效率降低
	悬吊法	防斜、纠斜	是	好	主动式纠斜方法,可实时纠斜,且纠斜效果较好	需要与钻具测控系统配合,实时检测钻具倾斜程度,对绞车的控制精度要求较高;无法给钻头施加很大的钻压,降低了热融钻进速度	
浮力法	防斜、纠斜	是	未报道	浮力段结构简单,易于实现	需要较长的浮力段才能产生足够的纠斜力矩,使钻具结构复杂化;增加了钻具的长度,也增加了对侧壁进行防冻所需的功率;钻孔内必须有流体才能发挥作用		
推 靠 法	机械推靠法	纠斜	否	待验证	主动式纠斜方法,能实施开展纠斜,且纠斜效率很高,能在短时间内实现钻具垂直	需要部署一套推力产生机构,因此,其所需空间较大,只能应用于直径较大的热融钻具;此外,推力产生机构使热融钻具结构复杂化	
	液力推靠法	纠斜	否	待验证			
扶正器法	防斜	是	好	好	结构简单,易于实现;纠斜效果较好	扶正器需与钻孔直径配合,不能适应不同直径的钻孔;不能纠斜,只能在一定程度上防斜	
导向杆嫁接法	防斜	是	中		结构简单,易于实现	增加了钻具长度和重量;不能纠斜	
钻孔直径减小法	防斜	否	待验证		减小了钻具功耗,增加了钻具热效率	只能减小钻具的倾斜程度,不能纠斜	

用。本文对热流体加热法、热融钻头回转法、圆锥面钟摆法、推靠法和钻孔直径减小法只进行了理论可行性的分析,目前尚缺乏实际的工程案例来验证其防/纠斜效果。此外,降低重心法和浮力法的应用效果尚未报道,其应用效果亦不得而知。在未来,应针对这些防/纠斜效果不明的方法开展实验验证。

参考文献(References):

- [1] Cuffey K M, Paterson W S B. The Physics of Glaciers (The Fourth Edition)[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010.
- [2] 秦大河,任贾文. 南极冰川学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
QIN Dahe, REN Jiawen. Antarctica Glaciology [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [3] 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.
YAO Tandong. Ice core research and global change[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1996, 11(5): 368-371.
- [4] 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. Contributions of ice core to the past global change research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 275-287.
- [5] Talalay P G. Thermal Ice Drilling Technology [M]. Singapore: Springer Singapore Pte Ltd., 2020.
- [6] 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.
- [7] Wade F A. The physical aspects of the Ross Ice Shelf [J]. Proceedings of the American Philosophical Society, 1945, 89(1): 160-173.
- [8] Nizery A. Electrothermic rig for the boring of glaciers [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1951, 32(1): 66-72.
- [9] Gerrard J A F, Perutz M F, Roch A. Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1952, 213(1115): 546-558.
- [10] LaChapelle E. A simple thermal ice drill [J]. Journal of Glaciology, 1963, 4(35): 637-642.
- [11] Gillet F. Steam, hot-water and electrical thermal drills for temperate glaciers [J]. Journal of Glaciology, 1975, 14(70): 171-179.
- [12] Zimmerman W, Bonitz R, Feldman J. Cryobot: An ice penetrating robotic vehicle for Mars and Europa [C]//2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, USA, 2001.
- [13] Talalay P G, Zagrodnov V S, Markov A N, et al. Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: General concept [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(65): 23-30.
- [14] Winebrenner D P, Elam W T, Miller V, et al. A thermal ice-melt probe for exploration of Earth analogs to Mars, Europa and Enceladus [C]//44th lunar and planetary science conference. Woodlands, Texas, USA, 2013.
- [15] Dachwald B, Mikucki J, Tulaczyk S, et al. IceMole: A maneuverable probe for clean in situ analysis and sampling of sub-surface ice and subglacial aquatic ecosystems [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(65): 14-22.
- [16] Wirtza M, Hildebrandt M. IceShuttle Teredo: An ice-penetrating robotic system to transport an exploration AUV into the ocean of Jupiter's moon Europa [C]//67th International Astronautical Congress (IAC). Guadalajara, Mexico, 2016.
- [17] Dirk H, Peter L, Simon Z, et al. An efficient melting probe for glacial research [J]. Annals of Glaciology, 2020, 62(84): 171-174.
- [18] Kelty J R. An in situ sampling thermal probe for studying global ice sheets [D]. Omaha: University of Nebraska, 1995.
- [19] Talalay P G, Li Y, Sysoev M A, et al. Thermal tips for ice hot-point drilling: Experiments and preliminary thermal modeling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 97-109.
- [20] Schüller K, Kowalski J, Råback P. Curvilinear melting—A preliminary experimental and numerical study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 884-892.
- [21] Schüller K, Kowalski J. Spatially varying heat flux driven close-contact melting—A Lagrangian approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1276-1287.
- [22] Li Y, Talalay P G, Fan X, et al. Modeling of hot-point drilling in ice [J]. Annals of Glaciology, 2021, 62(85-86): 360-373.
- [23] Hiroyuki K, Akio S, Seiji O, et al. Direct contact melting with asymmetric load [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(15): 3221-3230.
- [24] Kohno M, Fujii Y, Hirata T. Chemical composition of volcanic glasses in visible tephra layers found in a 2503 m deep ice core from Dome Fuji, Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 2004, 39: 576-584.
- [25] Narcisi B, Petit J R, Langone A. Last glacial tephra layers in the Talos Dome ice core (peripheral East Antarctic Plateau), with implications for chronostratigraphic correlations and regional volcanic history [J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 165: 111-126.
- [26] Aamot H W C. Instrumented probes for deep glacial investigations [J]. Journal of Glaciology, 1968, 7(50): 321-328.
- [27] Philberth K. The thermal probe deep-drilling method by EGIG in 1968 at Station Jarl-Joset, Central Greenland [C]//Ice-core Drilling: Proceeding of the Symposium. University of Nebraska, Lincoln, USA, 1976.
- [28] Philberth K. Die thermische Tiefbohrung in Station Jarl-Joset und ihre theoretische Auswertung [J]. Polarforschung, 1984, 54(1): 43-49.

- [29] Kowalski J, Linder P, Zierke S, et al. Navigation technology for exploration of glacier ice with maneuverable melting probes[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123:43-70.
- [30] Yazhou L, Yang Y, Xiaopeng F, et al. Power consumption of a Philberth thermal probe in ice sheet exploration[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 177:103-114.
- [31] Aamot H W C. The Philberth probe for investigating polar ice caps, 119[R]. Hanover: USA CREEL, 1967.
- [32] Philberth K. Über zwei Elktro-Schmelzsonden mit Vertikal-Stabilisierung [J]. *Polarforschung*, 1964, 34 (1-2) : 278-280.
- [33] German L, Mikucki J A, Welch S A, et al. Validation of sampling antarctic subglacial hypersaline waters with an electrothermal ice melting probe (IceMole) for environmental analytical geochemistry [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2019, 101(15) :2654-2667.
- [34] Lyons W B, Mikucki J A, German L A, et al. The geochemistry of englacial brine from Taylor glacier, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(3) :633-648.
- [35] Miller M M. The application of electro-thermic boring methods to englacial research with special reference to the Juneau Icefield investigations in 1952-53, 4[R]. Institute of North America, 1953.
- [36] Aamot H W C. Pendulum steering for thermal probes in glaciers, 116[R]. Hanover: USA CREEL, 1967.
- [37] Aamot H W C. Development of a vertically stabilized thermal probe for studies in and below ice sheets[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1970, 92(2) :263-268.
- [38] Hansen B L, Kersten L. An in-situ sampling thermal probe[C]// *Proceeding of the Second International Workshop/Symposium on Ice Drilling Technology*. Calgary, Alberta, Canada, 1984.
- [39] Morton B R, Lightfoot R M. A prototype meltsonde probe-design and experience, 14[R]. Australian Antarctic Division, Department of Science, 1975.
- [40] Tibcken M, Dimmler W. Einsatz einer durchschmelzsonde (susi) zum transporteiner kommerziellen CTD-Sonde unter das schelfeis [J]. *Polarforsch*, 1997, 219:106-112.
- [41] Bentley C R, Koci B R, Augustin L, et al. Ice Drilling and Coring//*Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and Other Planets* [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, 2009:221-308.
- [42] Zagorodnov V, Tyler S, Holland D, et al. New technique for access-borehole drilling in shelf glaciers using lightweight drills[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(223) :935-944.
- [43] Aamot H W C. A buoyancy-stabilized hot-point drill for glacier studies[J]. *Journal of Glaciology*, 1968, 7(51) :493-498.
- [44] Classen D F. Thermal drilling and deep ice-temperature measurements on the Fox Glacier, Yukon [D]. Vancouver: The University of British Columbia, Department of Geophysics, 1970.
- [45] Hooke R L. University of Minnesota ice drill [C]//*Ice-Core Drilling: Proceeding of the Symposium*. University of Nebraska, Lincoln, USA, 1976.
- [46] Hooke R L, Alexander J E C, Gustafson R J. Temperature profiles in the Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, and heat flux from the subglacial terrane [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1980, 17(9) :1174-1188.
- [47] 柴麟, 张凯, 刘宝林, 等. 自动垂直钻井工具分类及发展现状[J]. *石油机械*, 2020, 48(1) :1-11.
CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(1) :1-11.
- [48] 韩来聚, 倪红坚, 赵金海, 等. 机械式自动垂直钻井工具的研制[J]. *石油学报*, 2008, 29(5) :766-768.
HAN Laiju, NI Hongjian, ZHAO Jinmei, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5) :766-768.
- [49] Morev V A, Pukhov V A, Yakovlev V M, et al. Equipment and technology for drilling in temperate glaciers[C]// *Proceeding of the Second International Workshop/Symposium on Ice Drilling Technology*. Calgary, Alberta, Canada, 1982.
- [50] Zagorodnov V S, Zotikov I A. Kernovoe burenie na Shpitsbergene, 40[R]. Akademiia Nauk SSSR, Institut Geografii, 1981.
- [51] Tyler S W, Holland D M, Zagorodnov V, et al. Using distributed temperature sensors to monitor an Antarctic ice shelf and sub-ice-shelf cavity[J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(215) :583-591.
- [52] Sharp R P. Thermal regimen of firm on upper seward glacier, Yukon territory, Canada[J]. *Journal of Glaciology*, 1951, 1(9) :476-487, 491.
- [53] Mathews W H. Glaciological research in Western Canada in 1956 [J]. *Canadian Alpine Journal*, 1957, 40:94-96.
- [54] Mathews W H. Vertical distribution of velocity in Salmon glacier, British Columbia[J]. *Journal of Glaciology*, 1959, 3(26) :448-454.
- [55] Grześ M. Non-cored hot point drills on Hans Glacier (Spitsbergen), method and first results[J]. *Polish Polar Research*, 1980, 1(2-3) :75-85.

(编辑 王文)