

美国极地钻探科学目标分析与钻探技术进展

李冰¹, 韩丽丽², 李亚洲¹, 范晓鹏^{3,4}, 宫达^{3,4,5}, 洪嘉琳^{3,4,5},
张楠^{3,4,5}, 冶宇霆¹, 汪月¹, 孙友宏^{1,4,5}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;
3. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026; 4. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
5. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 极地钻探是获取极地冰层或冰下环境样品和在极地冰层或冰下布放科学观测仪器的最直接方法, 是开展极地科学研究的必要技术手段。美国是开展极地钻探较早的国家之一, 也是极地钻探强国。相比美国, 我国极地钻探技术尚处于起步阶段。本文以《美国冰钻委员会长期科学规划 2021—2031》为基础, 结合其官方网站和相关文献资料, 梳理了美国极地钻探科学目标和极地钻探技术现状, 并简要介绍了过去 10 年美国极地钻探的现场工作情况及其在未来 3 年的工作计划, 以期为我国极地钻探发展提供参考。

关键词: 极地钻探; 科学目标; 钻探技术; 冰层; 冰芯; 冰下环境; 美国

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)09-0010-16

Science goals analysis and technological progress of U.S. ice drilling

LI Bing¹, HAN Lili², LI Yazhou¹, FAN Xiaopeng^{3,4}, GONG Da^{3,4,5}, HONG Jialin^{3,4,5},
ZHANG Nan^{3,4,5}, YE Yuting¹, WANG Yue¹, SUN Youhong^{1,4,5}

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

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

4. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resource, Changchun Jilin 130026, China)

5. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

Abstract: Polar drilling is the most direct method to obtain samples of the polar ice layer or subglacial environment and install scientific observation instruments in ice layer or subglacial environment, and it is a necessary technical method to carry out polar scientific research. The United States is one of the earliest countries that started polar drilling and is also a powerful country in polar drilling technology. Compared with the United States, China's polar drilling technology is still in its infancy. Based on the Ice Drilling Program long term science plan of America for 2021—2031, and with reference to its official website and related literatures, this article sorts out the scientific goals of polar drilling and the current state of polar drilling technology of the United States, and briefly introduces the polar fieldwork in the past ten years and upcoming fieldwork in the next three years, which are expected to provide some reference for the development of China's polar drilling.

Key words: polar drilling; scientific goals; drilling technology; ice layer; ice core; subglacial environment; United States

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-08-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.09.002

基金项目: 国家自然科学基金项目“极地冰盖前沿科学问题及探测技术”(编号: 41942047); 国家重点研发计划“极地环境观测/探测技术与装备研发”课题二“南极冰下湖无污染钻进采样与观测系统研发”项目(编号: 2016YFC1400302)

作者简介: 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: 李冰, 韩丽丽, 李亚洲, 等. 美国极地钻探科学目标分析与钻探技术进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(9): 10-25.

LI Bing, HAN Lili, LI Yazhou, et al. Science goals analysis and technological progress of U.S. ice drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 10-25.

0 引言

南极大陆和北极格陵兰岛的绝大部分区域被冰盖所覆盖,还广泛分布着冰架和冰下湖等,如图1所示^[1]。极地冰盖记录了地球过去几十年乃至几百万年以来的气候变化信息^[2]。在冰流作用下,冰盖流入海洋形成冰架,其与海洋的相互作用对冰架和冰盖的稳定性至关重要。极地冰盖下分布着湖泊、河流、盆地和山脉等,蕴含着极地冰盖、古气候、古生命

和冰下地质构造的形成与演化等信息^[2]。通过极地冰层及冰下环境样品分析和原位观测可以获取上述相关信息,极地钻探则是获取冰芯、冰下基岩、冰下湖湖水等样品和布放科学观测仪器最直接的技术手段。本文所述的极地钻探不仅包括传统的极地冰层钻探,还包括近些年发展起来的极地冰下环境钻探,但不包括常规地质岩心钻探和南大洋岩心钻探。

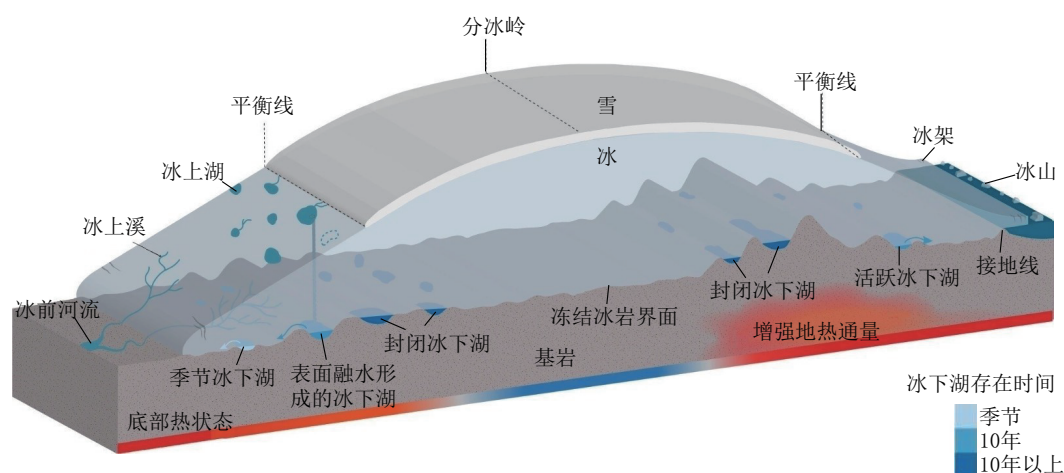


图1 极地冰盖、冰架及冰下环境概念图

Fig.1 Conceptual model of the polar ice sheet, ice shelf and subglacial environment

美国是历史上开展极地钻探较早的国家之一,也是当前极地钻探技术相对比较完善的国家。目前,美国绝大部分的极地钻探科学与技术由美国冰钻委员会(U.S. Ice Drilling Program,简称IDP)负责。在美国科学基金会资助下,IDP由来自达特茅斯学院、威斯康星大学麦迪逊分校和新罕布什尔大学的专家组成,主要负责制定美国的冰层取芯和钻探的规划,并提供钻具和钻探服务^[3]。为制定和更新《IDP长期科学规划》,IDP每年都会召集其科学咨询委员会委员召开会议,以阐明美国冰层取芯和钻探的科学目标,并确定实现这些科学目标所需的钻具和钻探技术。为此,他们每年还会更新《IDP长期钻探技术规划》。此外,为了在钻具更新、设计和操作上获得最好的建议,IDP还建立了技术咨询委员会,委员们除了定期利用邮件交流外,正常情况下,该委员会每2年还会召开一次线下会议^[4]。

本文以《IDP长期科学规划2021—2031》为基础文件,结合IDP官网(<https://icedrill.org/>)和相关文献资料,主要介绍美国极地钻探2021—2031年科学

目标、美国现有极地钻探技术及美国极地钻探现场工作情况,并提出关于中国极地钻探发展的建议。

1 极地钻探科学目标

当前全球气候正在发生快速变化,为降低未来气候变化预测的不确定性,人们迫切需要了解过去气候变化的规律和主要机制。冰芯和冰下环境样品包含了过去大气成分和气候演化的关键信息,有助于我们理解过去气候演变的规律和驱动机制。同时,理解冰川动力学、冰盖稳定性和冰盖对气候变化的响应对于预测海平面的变化亦至关重要。特别需要指出的是,极地冰下环境蕴藏着独特的生物、地球化学和地质信息,但目前对冰下环境的认知几近空白,主要原因是缺乏有效的冰下环境样品采集和观测条件。极地钻探则是开展这些观测和样品采集的直接手段。但这是一项专业且富有挑战性的工作,需要合理的规划、适当的技术和充足的后勤保障。为便于将科学目标与钻探技术联系起来,IDP将极地钻探科学目标分为4类:古气候变化,冰川动力学

及其历史,冰下地质、沉积物和生态系统,冰基科学观测站。下文主要描述了这些目标及其对应的极地钻探技术需求。

1.1 古气候变化

通过获取不同位置 and 不同深度的冰芯来研究不同时间和空间尺度的气候变化有助于人类了解地球气候系统的演化历史。许多美国冰川科学家以及国际冰芯科学协作组织(International Partnership in Ice Core Sciences, 简称为 IPICS)均对以下时期的气候变化比较关注,需开展相关的冰芯钻探和研究。

通过获取不同位置(格陵兰冰盖、南极冰盖、冰帽和高山冰川)的浅冰芯(通常深度 $<200\text{ m}$),并形成空间网络,以分析工业时代(过去200年)和仪器时代(过去100年)人类活动对气候、冰冻圈和大气的影 响,研究现代环境过程及机制,并使用实测数据校准现有模型和遥感数据。

近2000年来的气候记录对于分析工业革命以来的气候变化十分重要。这是因为它足够长,可以记录每年至每百年的气候变化,同时它又足够短,与之相关的气候边界条件在这一时期内没有明显变化。因此,这一时期代表了工业革命前的气候基准,可以用来对比分析20世纪以来气候、冰冻圈和大气成分的变化。另外,由于缺少1600年前精确的年度气候记录,加之很多气候过程具有高度区域性,近2000年气候的定量重建仍存在较大争议。因此,国际上仍在努力获取一个具有较高时间分辨率的2000年冰芯空间阵列,如在阿拉斯加中部山脉、南极半岛底特律高原、西南极冰架沿岸和冰穹与格陵兰冰盖等。

外力驱动的全球气候变化涉及到冰盖、碳循环、植被、灰尘、海洋和大气环流之间的相互作用,会导致区域气候的快速变化。理解地球系统动力学,尤其是气候快速转变时期的地球系统动力学,对于改进当前地球系统模型以评估未来气候变化至关重要。然而,目前关于气候千年尺度变化和区域影响过程及动力学的证据并不完整,需要更多的冰芯证据以揭示其潜在机制,如已经完成的西南极分冰岭冰芯钻探和南极点冰芯钻探、计划实施的Hercules冰穹冰芯钻探和格陵兰岛2个潜在地点的冰芯钻探。

由于地球轨道参数差异,末次间冰期(Last Interglacial, 简称LIG)期间(约13万年至11万年前)

比现在更温暖。获取LIG冰芯可为理解地球怎样响应当前人类引起的全球变暖提供线索。钻取跨越末次间冰期冰芯的优先科学目标包括确定西南极冰盖在LIG期间是否经历部分或全部崩解、量化LIG期间格陵兰岛与南极洲温度、降水和海冰范围等6项。比如,Hercules冰穹冰芯钻探项目就是为了实现这一目标而规划的。

位于南极冰穹C(Dome C)的欧洲南极冰芯项目(European Project for Ice Coring in Antarctica, 简称EPICA)获取的冰芯气候记录可以追溯到80万年前。然而,为了进一步了解气候系统历史,需要获取更古老的冰芯,如可以通过追溯大约150万年前的冰芯记录解读约100万年前发生的冰期-间冰期的周期转变(中更新世气候转型:气候变化主导周期从4.1万年转变为10万年)。目前,有2种互补但又截然不同的方法有可能获取冰龄超过80万年的古老冰芯。一是在东南极内陆降雪积累率极低的地点钻探,该方法可以获取连续冰芯记录,但是钻探位置选择是一个棘手的问题^[5]。目前,欧盟、日本和澳大利亚均在计划钻取古老冰芯,并且还研发了几种不同的快速钻具以进行古老冰芯钻探位置的选择。二是获取蓝冰冰芯,如在Allan Hills进行蓝冰钻探,这种方法也可以获得古老冰芯^[6],但该方法获取的冰芯记录并不连续。

除上述情况外,还可以通过获取大直径冰芯中超痕量物质、微粒和稀有同位素等研究古气候变化,也可以提取冰芯中微生物DNA和活生物体作为气候记录。

总之,通过冰芯研究古气候变化需要大量的从几十米深到几千米深的冰芯。需要根据不同的科学目的、钻孔深度、冰芯直径和后勤保障条件选择不同的钻探装备与方法。

1.2 冰川动力学及其历史

近些年的观测表明,快速流动的入水冰川、溢出冰川和冰流的流速正在发生快速变化,因此迫切需要了解它们的动力学过程。通过测量冰下基底条件、地热通量、冰-海界面、冰流变特性、冰盖基底冰的年龄和冰下基岩宇宙核素等可以开展冰川动力学和冰川历史的研究。

通过直接测量冰下基底条件,包括基底冻融情况、基底孔隙水压力、滑动、沉积物属性与变形,可以开发和测试控制冰流和溢出冰川快速流动的模式。

判断基底是否发生融化需要结合热-力耦合流动模型,因此需要测量地热通量。然而,目前南北极冰盖仅有几个站位通过钻孔温度确定了地热通量,且测量结果差异较大,例如格陵兰冰芯项目(GRIP)测量的地热通量小于 40 mW/m^2 ,而北格陵兰冰芯项目(NGRIP)测得的地热通量为 130 mW/m^2 ,南极 Whillans 冰下湖地热通量更是高达 $285 \pm 80 \text{ mW/m}^2$ ^[7],因此,需要更多的地热通量测量来为冰盖模型提供边界条件。通过快速钻探形成钻孔是开展冰下基底条件和地热通量测量的前提条件。除了目前已完成研发的快速钻(U.S. Rapid Access Ice Drill,简称 RAID),还需要能够钻穿 $500 \sim 2500 \text{ m}$ 冰层并达到基底的热钻。通过有源和无源地震探测可以补充冰下基底条件的原位测量数据,因此需要一系列浅孔(深度 $25 \sim 100 \text{ m}$ 、直径 $50 \sim 100 \text{ mm}$)来布放震源,快速空气钻(Rapid Air Movement,简称 RAM)可以用于地震孔的钻探。

海洋温度控制着冰架融化速度,最近的观测结果^[8]和模型结果表明^[9],冰架底部的融化对冰盖物质平衡有着强烈的控制作用。然而,目前关于冰架底部融化过程的监测仍然很少,所以,需要足够大的钻孔来布设水下自主航行器等,以获取短时间内冰架底部融化的空间分布数据。另外,还可以通过钻孔下放仪器来长时间监测海-冰界面的变化过程。评估冰流和溢出冰川在冰盖稳定性中的角色需加强对接地线区域的理解,同样需要小直径钻孔来下放仪器以进行接地线区域关键参数的监测。

冰的流变特性对于冰盖模型至关重要,深部冰层的褶曲现象和冰盖底部形成的大型结构与冰的流变特性相关。测量冰孔中温度、冰组构、钻孔倾角和直径等,并根据冰芯进行校准,有助于理解冰的流变特性,为开发冰盖流动模型提供支撑。为开展这项工作,需研发可钻穿 3000 m 冰层的快速钻机,以下放相关传感器。沿冰流线实施多个钻孔并进行相关监测可以提供冰流变特性的空间分布特征,对于分析冰川动力学特征有重要的意义。

冰川历史对于预测未来冰盖的范围和体积具有重大意义,可以通过确定基底冰的年龄和分析冰下基岩宇宙核素浓度来开展相关研究。基底冰的年龄可以用年龄-深度流动模型分析,或者直接根据基底冰中封存空气的年代来确定。冰下基岩中宇宙核素可以告诉我们露头岩石以前的分布范围、暴露时间

及持续时间,进而分析冰盖历史。因此,可通过钻取短的冰下基岩岩心($1 \sim 5 \text{ m}$)开展相关研究。

总之,为了提高预测冰盖和海平面的未来变化的能力,需要了解冰川和冰盖的现状和历史。快速钻探对于实现该科学目标至关重要,无论是快速形成钻孔进行基底条件测量还是在冰架底部进行冰-海作用监测,无论是开展冰流变特性监测还是冰下基岩岩心钻探,均需要快速穿透冰层,方可进行下一步作业。

1.3 冰下地质、沉积物和生态系统

目前,关于冰下地质、沉积物和生态系统的研究较少,需要发展快速钻探技术以开展相关研究,主要的科学目标包括冰下地质、冰下盆地与沉积物记录、冰下微生物生态系统与生物地球化学循环、冰下湖与水文系统。

南极大陆及其岩石圈板块在全球地质构造中扮演着重要的角色,但人们对其知之甚少。南极冰盖下甘布尔采夫山的起源是什么?东南极构造历史、地热通量和构成是什么?东南极内陆基底岩石成分是什么?诸如这些需要解答的问题还很多。因此,为了确定南极地壳结构,需要钻穿冰层进入冰下基岩中进行被动和主动地震试验。要了解南极大陆地形对冰川的控制作用,同样需要钻穿冰层获取冰下基岩样品。钻孔位置应基于岩石地质、基底古地形和冰盖范围等因素进行优选。

南极内陆冰下盆地和沉积物可能包含了古气候和冰盖历史记录,以下4类冰下沉积物可作为研究目标:冰下湖、冰隆、西南极沉积盆地和东南极盆地。每一类目标均可能存在不同的起源和历史。例如,东南极 Aurora 和 Wilkes 冰下盆地可能包含了东南极冰盖历史动力演化和古气候环境的信息。

极地冰下水和沉积环境是微生物的聚集地^[10],其规模可能与表层海洋相当。这些环境中可能包含大量的甲烷,随着快速的冰退效应它可以影响大气中的甲烷浓度。相对于微生物细胞的生命周期,冰下环境中微生物圈闭的长时间尺度为探索进化速率和生物多样性的限制提供了机会。微生物细胞及其基因组材料还可以提供与古气候变化相关的宝贵信息。因此,有必要通过钻探获取基底冰芯样品开展相关研究,并且需要使用清洁钻探与取样技术。

冰下水文是极地冰盖动态演化的一个重要影响因素。冰下水的体积和分布对基底阻碍冰流运动的

能力有较大影响。截至目前,已在南极发现了400余个冰下湖。对这些冰下湖和冰下水文系统进行量化观测有助于理解冰川运动、冰下岩石风化和侵蚀、沉积物输运、微生物生态系统、水文地球化学和保护冰下湖系统等。因此,需要实施一系列钻孔并进行湖水及沉积物样品采集和湖水理化参数的观测。

总之,冰下环境包含了生物、气候、地质和冰川学等信息,其中许多是其他地方无法获得的,迫切需要通过钻探形成钻孔通道,以进行基底冰、冰下水、冰下沉积物和冰下基岩取样,目前常用的钻探方式为清洁热水钻和快速机械钻。

1.4 冰基科学观测站

极地冰盖和中纬度冰帽除记录了古气候和冰动力学信息外,还可以作为地震活动、行星科学和天体物理学观测和实验的平台。为了充分利用冰层中保存的气候和冰动力学信息,可将冰层钻孔作为一个长期观测平台,定期进行测井。测井结果可用于补充冰芯、冰动力学和遥感数据。为更好地开展冰层测井工作,IDP成立了一个钻孔测井工作组,负责测井仪器与设备(主要包括测井仪和绞车)的管理、冰层钻孔的维护以及测井项目的部署等。

极地冰作为一种丰富、干净、稳定和透明(对无线电波和光波)的探测介质,可以用于观察亚原子粒子的相互作用。例如,美国已在南极点完成了“冰立方”望远镜以探测来自宇宙的高能中微子,为完成该项目,美国研发了一款增强型热水钻,并实施了86个直径约为600 mm、深度为2500 m的钻孔^[11]。目前,美国正在规划“冰立方二代”和“南极罗斯冰架天线中微子阵列”实验平台。南极点远程地球科学和地震观测站已在一些钻孔安装了地震设备,设备安装深度约为300 m,且正计划在格陵兰冰盖建立一个类似的地震观测网络。此外,极地冰盖还是一个有效收集陨石和微陨石的场所,除了在一些蓝冰区表面寻找,还可以通过在冰层中建造融水井来筛选陨石。

2 美国极地钻探技术现状

过去几十年间,美国开展了大量的关于极地粒雪层、冰层和冰下基岩钻探技术的攻关,研发了一系列适用于极地环境的钻具与装备。这些钻具的钻进能力从数米的浅层、数百米的中深层到数千米的深层不等。其中,有些钻具利用螺旋叶片或钻井液来

输送冰屑并钻取冰芯,而有些钻具则不钻取冰芯,直接利用空气或热水等作为介质完成冰层的全面钻进。本文将从机械钻具和热力钻具2个方面对美国正在使用和研发的诸多钻具进行分类,并做简要介绍。

2.1 机械钻具

机械钻具通过钻头对冰层或冰下基岩的回转切削实现钻进。钻进过程中产生的冰屑一般通过螺旋叶片、钻井液和高压空气等介质返回地表。机械钻具既可用于取心钻进,也可用于非取心钻进。IDP将机械钻具按照钻进深度和钻进介质分为手摇冰芯钻、便捷式电动冰芯钻、中深及深冰芯钻、冰下基岩钻和非取心机械钻。

2.1.1 手摇冰芯钻

手摇冰芯钻是最简单的冰层机械钻具,其通过延长杆将地表动力传递至孔内钻具。在不依靠外界动力源的情况下,手摇钻最大钻进深度约为30 m。手摇钻操作简便,通常可由科考人员自己操作,无需IDP专业人员协助。目前IDP正在使用的手摇冰芯钻有3种:SIPRE钻(Snow, Ice and Permafrost Research Establishment,简称SIPRE)^[12]、IDDO钻(Ice Drilling Design and Operations,简称IDDO)^[13]和“土拨鼠”钻具^[14],3种钻具的主要参数如表1所示。

SIPRE手摇钻由不锈钢制成,因此质量较大,有助于提高钻进效率。其延长杆采用销接方式连接,便于快速组装和拆卸,如图2所示。该钻多用于粒雪层和脆冰层,受冰芯卡断方式的影响不适用于硬冰层和湿冰层。

IDDO手摇钻是一种轻便钻具,冰芯管由玻璃纤维复合材料制成,延长杆为铝制空心杆,其主要用于粒雪层取心钻进,也可用于冰层钻进。这种钻具有3种冰芯卡取方式,分别是锥形钻头、卡簧和卡断器,以适应不同的钻探条件。

“土拨鼠”手摇钻为双管钻具,内外管均由玻璃纤维复合材料制成。钻进过程中内管(冰芯管)带动钻头旋转,外管在反扭机构作用下不随之旋转。它的双管设计有助于冰屑运移上返,提高钻进效率和冰芯质量,尤其是可用于暖冰层。

在“响尾蛇”配合下,IDDO手摇钻和“土拨鼠”手摇钻的钻进能力均可提升至40 m。“响尾蛇”(Sidewinder)是与手摇钻配套使用的回转驱动/提升系统^[15],由电机和绞车系统组成,钻进过程中驱

表 1 手摇冰芯钻主要参数
Table 1 Main parameters of hand augers for ice coring

钻具名称	钻具类型	最大 钻进 深度/ m	钻孔 直径/ mm	冰芯 直径/ mm	冰芯长 度/m	是否 需要 IDP 钻 工	是否 使用 钻井 液	动力源	预计 钻进 时间/ h	拆解 与组 装时 间/h	是否 能 用直 升 机或 轻 型 飞 机 运 输	运输 质量/ kg	运输 体积/ m ³
SIPRE 手 摇钻	取心	6	120	76	0.5	否	否	手动或斯蒂尔 BT121 用汽油机	2(6 m)	0.25	是	38 (6 m 套装)	0.17
IDDO 手 摇钻	取心	20	110/ 132	76/ 101	0.5;1	否	否	手动或 Side-winder	2(5 m) 4(10 m) 7(20 m)	<1	是	41 (20 m 套装)	0.17
“土拨鼠” 手摇钻	取心	30	141	98	1	是, 1 人	否	手动或 Side-winder	2(5 m) 3(10 m) 6(20 m) 9(30 m)		是	45	0.17

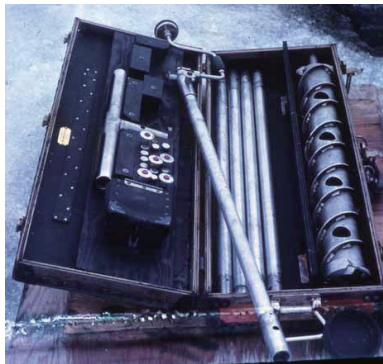
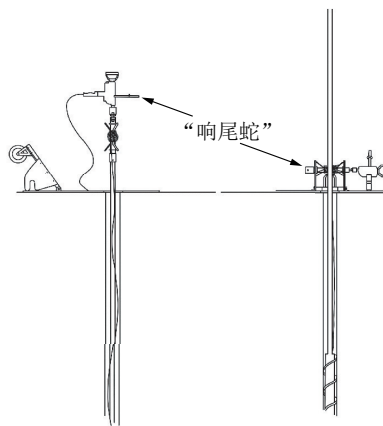


图 2 SIPRE 手摇钻
Fig.2 SIPRE hand auger

动钻具回转,起下钻过程中辅助提升和下放钻具,如图 3 所示。

2.1.2 便捷式电动冰芯钻

美国现有的便捷式电动冰芯钻主要包括“花栗鼠”钻^[16]、Stampfli 钻^[17]、蓝冰钻(Blue Ice Drill,简称 BID)^[18]、Badger-Eclipse 钻^[19]、4-Inch 钻^[20]、Foro 400 钻^[21]和 BPRC (Byrd Polar Research Center,简称 BPRC)钻^[22]。便捷式电动冰芯钻通常用于浅层雪芯或冰芯的钻取。除“花栗鼠”钻以外,冰层钻进能力从几十米到几百米不等。除 BPRC 钻由俄亥俄州立大学研发外,其余钻具均属于 IDP。7 种钻具的主要参数如表 2 所示。



(a) 钻进状态 (b) 提升/下放钻具状态
图 3 “响尾蛇”驱动/提升系统工作原理
Fig.3 Working principle of the Sidewinder drive/lifting system

如图 4 所示,“花栗鼠”钻是一种手持式电动冰芯钻,主要用于雪坑取样和侧壁冰样采取。

Stampfli 钻是一种轻型电动机械冰芯钻,如图 5 所示,虽然钻进能力可达 100 m,但运输质量仅为 16 kg。由电池供电,而电池则可由小型发电机或太阳能板充电,非常便于现场运输与操作。

BID 钻是一种用于钻取蓝冰样品的大直径电动冰芯钻,冰芯直径达 241 mm。经过改进,BID 钻的钻进能力由初始版本的 25 m 增加至 200 m

表2 便捷式电动冰芯钻主要参数

Table 2 Main parameters of agile ice coring drills

钻具名称	钻具类型	最大钻进深度/m	钻孔直径/mm	冰芯直径/mm	冰芯长度/m	是否需要IDP钻工	是否使用钻井液	动力源	预计钻进时间/h	拆解和组装时间/h	是否能用直升飞机或轻型飞机运输	运输质量/kg	运输体积/m ³	备注
“花栗鼠”钻	取心	0.9	64	41	0.15; 0.5	否	否	120 V, 1 kW 发电机			是	16	0.07	
Stampfli 钻	取心	100	72	57	0.8	否	否	电池	3(20 m) 14(50 m) 40(100 m)	1	是	172	约 1	工作温度可低至-25℃; 电池可由太阳能板或 2 kW 发电机充电
BID/BID-Deep 钻	取心	25/ 200	288	241	1	是, 1 人	否	120 V, 3.5 kW/ 5 kW 发电机	2(10 m) 4(20 m) 25(100 m) 60(200 m)	4	是	1950	7.65	BID-Deep 钻深受场地或冰层特征影响较大
Badger-Eclipse 钻	取心	300	113	81	1	是, 1 人	否	120 V, 3 kW 发电机或太阳能和风力供电系统	60(100 m) 110(150 m) 150(200 m)	4	是	589	1.98	钻具系统总重约 363 kg, 单件最重为约 181 kg 的绞车(含雪橇)
4-Inch 钻	取心	300~ 350	145	104	1	是, 1 人	否	220 V, 5 kW 发电机	30(100 m) 50(150 m) 75(200 m)	6	是	1179	4.13	钻具系统总重约 497 kg, 单件最重为约 297 kg 的绞车(含雪橇)
Foro 400 钻	取心	400	126	98	1	是, 1 人	否	220 V, 5 kW 发电机	30(100 m) 50(150 m) 75(200 m)	6	是	816	2.15	钻具系统(钻具、绞车、电缆、钻塔和控制系统)总重约为 274 kg, 单件最重 123 kg
BPRC 钻	取心	500	129	100	1.05	否	否		平均钻进 3~6 m/h	4	是			钻具重约 35 kg

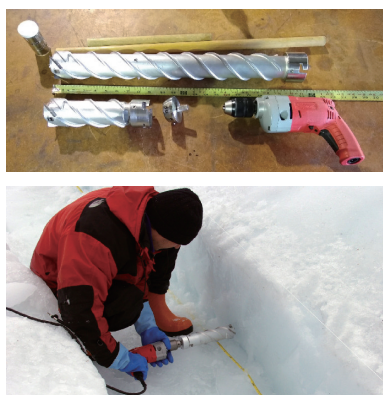


图4 “花栗鼠”钻

Fig.4 Chipmunk drill

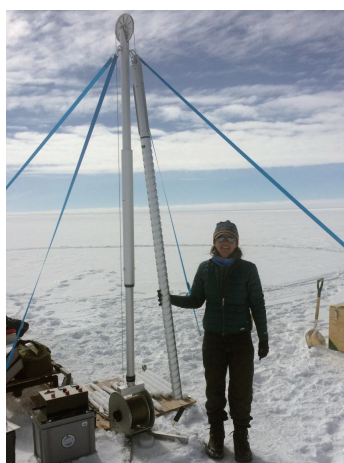


图5 Stampfli 钻

Fig.5 Stampfli drill

(BID-Deep),并采用了新型阶梯刀头,但BID-Deep钻的实际钻进深度受冰层特征影响较大,该钻曾成功在格陵兰冰盖钻至187 m。

Badger-Eclipse 钻是在Eclipse 钻基础上改造而成的,使其可通过冰芯管反向旋转清除冰芯管和外管之间的冰屑。

IDP 目前有2套Badger-Eclipse 钻,其中1套安装在雪橇上,被称为“运输”型Badger-Eclipse 钻,如图6所示。

4-Inch 钻配备了容缆量分别为100、200和400 m的绞车,可根据设计孔深选择绞车,该钻具设计成熟,已成功应用数十年。但由于系统老化,需要经常维修。

为满足对此类钻具的持续需求,IDP在此基础上研发了Foro 400 钻以替代4-Inch 钻。通过结构优化,Foro 400 钻的质量大大减轻。另外,Foro 400 钻



图6 Badger-Eclipse 钻

Fig. 6 Badger-Eclipse drill

还进行了防水设计,可在钻井液环境中工作。

BPRC 钻由俄亥俄州立大学伯德极地研究中心于20世纪90年代研发,该钻具包含2种不同类型的反扭系统,一种反扭系统由4个板簧制成,另一种反扭系统则采用U型叶片。该钻具的主要特点是能从干孔机械钻进模式快速切换到乙醇电热取心钻进模式或全面热融钻进模式。

2.1.3 中深及深冰芯钻

中深及深冰芯钻主要用于钻取中深层和深层冰芯,均为电动机械取心钻具。目前,美国拥有一套中等深度冰芯钻具Foro 1650^[23]和一套深冰芯钻具(Deep Ice Sheet Coring Drill,简称DISC)^[24],其中,IDP还为DISC 钻具研发了侧壁取心钻进系统^[25]。另外,为满足科学界对中深层和深层冰芯日益增长的需求,IDP正在研发700 m 钻^[26]和Foro 3000 钻^[27]。4种钻具的主要参数如表3所示。

Foro 1650 钻是在丹麦Hans-Tausen 钻和丹麦深冰芯钻基础上研发的,并配备了冰芯处理系统、离心机、钻井液处理系统、真空系统和先导孔钻进系统,如图7所示。为在2个工作季内完成1500 m深的钻孔,需采用3班24 h工作制,因此需10名钻探技术人员。Foro 1650 钻成功应用于2014—2016年在南极点附近实施的SPICEcore项目,共钻取1751 m冰芯^[28]。DISC 钻的设计钻进能力达4000 m,冰芯直径122 mm,直径相对较大,故其钻头安装有4个刀头和4个冰芯卡断器。钻具本体由钻头、冰芯管、冰屑管、电机和传动装置、循环泵、仪表/控制单元、反扭系统、电缆终端及滑环等组成。电缆用于在孔内悬吊钻具,并为钻具提供电力和光纤通信,铠装电缆直径为15 mm。DISC 钻成功应用于2007—2013年在西南极分冰岭实施的深冰芯钻探工程中,

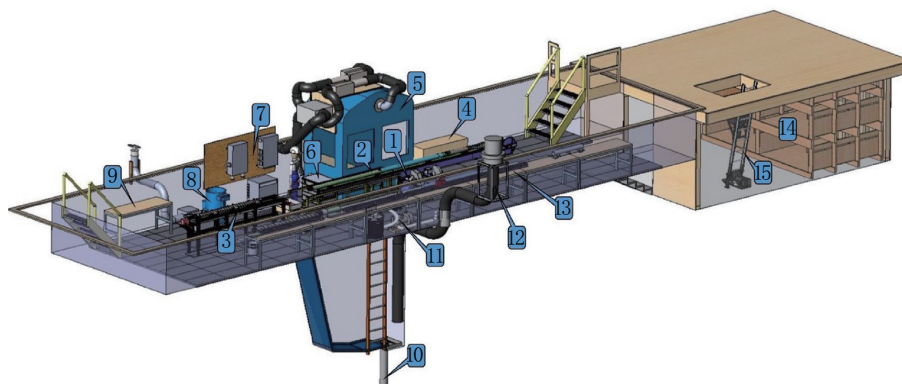
表3 中深及深冰芯钻主要参数

Table 3 Main parameters of medium and deep ice coring drills

钻具名称	钻具类型	最大钻进深度/m	钻孔直径/mm	冰芯直径/mm	冰芯长度/m	是否需要IDP钻工	是否使用钻井液	是否需要冰槽	动力源	预计钻进时间	是否能用直升机或轻型飞机运输	运输质量/kg	运输体积/m ³
Foro 1650 钻	取心	1650	129.6 (湿孔); 126 (干孔)	98	2	是,3人 以上	是	是	460 V, 35 kW 三相发电机	85d(1500 m, 24 h工作制)	是	3175	53
DISC 钻	取心	4000	163;170	122	3.2; 4	是,3人 以上	是	是	460 V, 135 kW 三相发电机	100~122 d (2800 m, 24 h工作制)	否	约 61700	240
700 钻	取心	700	88	64	1	是,2人	是	是	240 V, 5 kW 发电机	400 h(700 m)	是	约 1775	7.6
Foro 3000 钻	取心	3000		98	2;3	是,3人 以上	是	是	460 V, 35 kW 三相发电机	120 d(3000 m, 24 h工作制)	是	17300 ~ 25000	66~99

注:运输质量不含钻井液、发电机和燃料

完钻井深达3405 m,并且为其配备的侧壁取心钻进系统也得到成功应用,如图8所示,在侧壁获取了285 m冰芯^[29]。



1—绞车;2—钻具与钻塔;3—冰芯管拖拽台;4—手套烘干机;5—控制室;6—控制箱;7—配电柜;8—离心机;9—工作台;10—钻孔套管;11—真空系统;12—钻探槽通风系统;13—冰芯处理台;14—冰芯室;15—升降机

图7 Foro 1650钻现场布置

Fig.7 Layout plan of Foro 1650

为适应自然环境更恶劣的高山或极地冰芯钻探项目,IDP正在研发一种新型轻便中深层冰芯钻具,即700 m钻,目前已完成初步概念设计,正在进行详细设计。优化后,该钻的后勤保障需求大幅度降低。冰芯直径和钻孔直径的减小也大幅度降低了对钻井液和冰芯箱的需求。另外,由于DISC钻对后

勤保障需求较大,为满足深冰芯钻探需求,IDP在美国国家科学基金会要求下正设计Foro 3000钻,目前已完成新钻具和绞车系统设计,主要设计要求包括钻具最低工作温度为 -53°C 、地表设备最低工作温度为 -40°C 、冰芯管长度应保证能在3个工作季钻探至3000 m、钻孔倾角应小于 6° 、与侧壁取芯系统

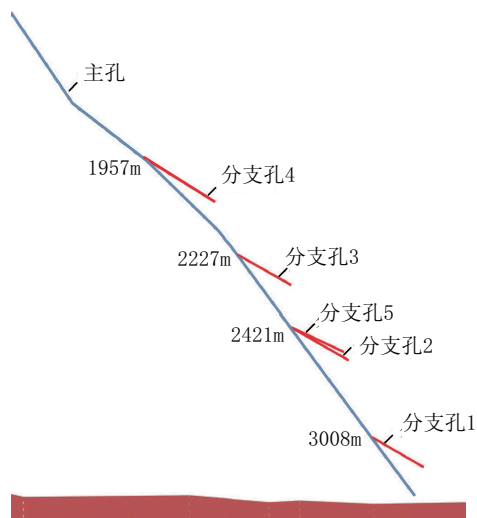


图 8 西南极分冰岭深冰芯钻探项目中侧壁取芯
Fig.8 Replicate ice coring in West Antarctic Ice Sheet Divide Project

兼容等。

2.1.4 冰下基岩钻

为获取极地冰盖下基岩样品,美国先后研发 3

款钻进能力不同的冰下基岩钻,分别为 Winkie 钻^[30]、便捷式冰下基岩钻(Agile Sub-Ice Geological Drill,简称 ASIG)^[31]和冰层快速钻具(U.S. Rapid Access Ice Drill,简称 RAID)^[32],3 款钻探装备及钻具均由传统岩心钻探装备和钻具改造而来,采用钻杆连接方式实现转速和钻压传递。3 种钻的主要参数如表 4 所示。

Winkie 钻是由商用岩心钻机改造而成,改造后具备冰层取芯及钻进能力,如图 9 所示。该钻机为顶部驱动式钻机,动力头提供回转,手轮控制钻压,转速和钻压通过标准铝合金钻杆(钢钻杆接头)和双壁岩心管传至钻头,钻杆内外径分别为 31.8 和 44.5 mm,冰层全面钻进钻头如图 10(a)所示,冰下基岩取芯钻头如图 10(b)所示^[25]。

ASIG 钻为 IDP 研发的第一个冰下基岩取心钻,同样是基于商用矿产勘探钻机,IDP 对其进行了一定程度的改造,使其能应用于冰层全面/取芯钻进。ASIG 钻采用模块化设计,便于运输和组装,主要包括钻塔、顶驱、液压系统、控制台、动力头和液压

表 4 冰下基岩钻主要参数
Table 4 Main parameters of subglacial bedrock coring drills

钻具名称	钻具类型	最大钻进深度/m	钻孔直径/mm	冰芯直径/mm	冰芯长度/m	岩芯直径/mm	岩芯长度/m	是否需要 IDP 钻工	是否使用钻井液	动力源	预计钻进速度(m·min ⁻¹)		拆解和组装时间	是否能用直升机或轻型飞机运输	运输质量/kg	运输体积/m ³
											冰层全面钻进	岩层取芯钻进				
Winkie 钻具	基岩、冰层取心/全面钻进	120	50~52; 86	33.4; 71.7	1.5	33.4	3	是, 1人	是	2.5 kW 发电机	0.4~0.5	0.02~0.05	3 h	是	997	3.1
ASIG 钻具	基岩取心、冰层全面钻进	700	62.5			39	1.5	是, 2人	是	120 V, 5 kW 发电机	1	0.15	2 d	是	14061	19.8
RAID 钻具	基岩、冰层取心/全面钻进	3300	56(基岩) 89(冰层)	56	0.5	38	3	是, 1人	是	2台 500 kW 发电机	1.2		< 36 h	否	98800	

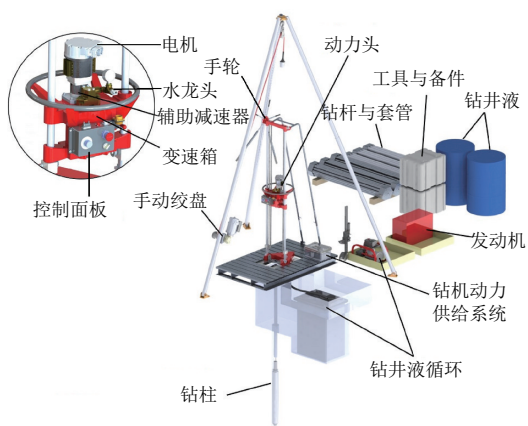
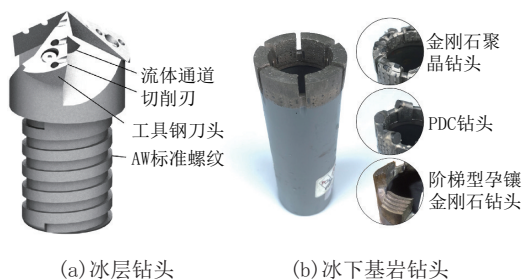


图9 Winkie 钻
Fig.9 Winkie drill



(a) 冰层钻头 (b) 冰下基岩钻头

图10 Winkie 钻钻头

Fig.10 Bits for Winkie drill

油箱等,属于全液压钻机,如图11所示。钻杆内外径分别为46.0和53.2 mm。冰层采用全面钻进,钻头如图12(a)所示,冰下基岩取心采用PDC钻头,如图12(b)所示,取心工具为TK56绳索取心钻具。先导孔采用螺旋钻进行钻进,穿过粒雪层后下入套管,然后采用钻井液进行钻进。

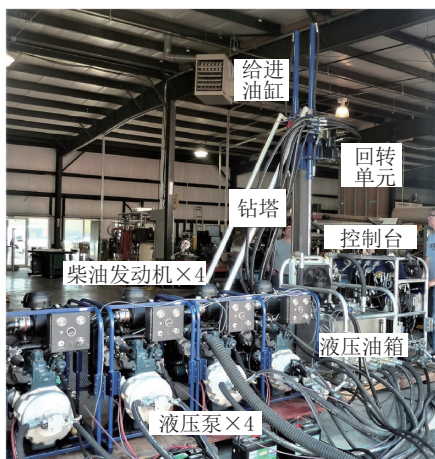


图11 ASIG 钻

Fig.11 ASIG drill



(a) 冰层全面钻进钻头



(b) 冰下基岩钻进取心钻头

图12 ASIG 钻钻头

Fig.12 Bits for ASIG

RAID 钻由明尼苏达大学德卢斯分校和DOSECC勘探服务有限公司等单位联合设计、制造和测试,IDP虽然没有直接参与RAID钻的设计和制造工作,但RAID钻团队与IDP保持了良好的沟通。RAID钻的冰层钻进能力为3300 m,冰下基岩钻进能力为25 m,既可在冰层全面钻进,又可定点取冰芯钻进,冰下基岩采用绳索取心钻具进行取心钻进。经过前期的南极现场测试,RAID钻于2019/2020工作季成功在南极 Minna Bluff 附近完成4口钻孔,如图13所示,其中,最深孔为2号孔,孔深为681 m,包括钻穿678 m冰层,钻取2 m冰岩夹层样品和2 m冰下基岩岩心,但试验过程中遇到了冰层被钻井液压裂导致钻井液漏失和钻井液中冰屑分离不彻底等问题。需要说明的是,这3种冰下基岩钻均只适用于冻结的冰岩界面。

2.1.5 非取心机械钻

以上钻具均以取心为目的,旨在获取极地粒雪层、冰层和冰下基岩样品。为进行地震地球物理勘探,IDP还研发了一种非取芯钻——快速空气钻(Rapid Air Movement Drill,简称RAM)^[33],为减小后勤需求,后续又对RAM进行了升级,形成RAM-2钻^[34]。

RAM钻使用柔性软管悬挂钻具,以高压空气

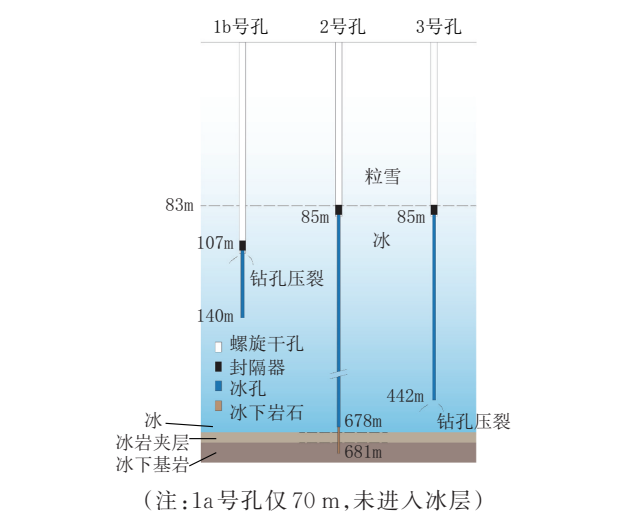


图 13 2019/2020 南极工作季 RAID 试验钻孔情况

Fig.13 RAID boreholes completed in 2019/2020 Antarctic season

为动力,驱动孔底动力钻具带动钻头旋转切削冰层,产生的冰屑被高压空气从孔内吹出,空气循环方式为正循环,需对空气进行冷却,防止出现冰屑融化现象,如图 14 所示。由于钻进速度可达 3 m/min,完成 50~90 m 的钻孔仅需 20~30 min,因此需频繁移孔,故将 RAM 钻整套设备安装在雪橇上,通过雪地车牵引,便于移位。RAM 钻成功应用于南极,完成钻孔 500 余个,累计进尺 3 万余米。2017 年,IDP 对 RAM 钻进行了升级改造,采用模块化设计,如图 15 所示,既可用于浅层(40 m)钻进,也可用于相对深层(100 m)钻进,孔径从 100 mm 减小至 75 mm。空压机由 2 台英格索兰-斗山 VHP-400(额定压缩速率约为 23 m³/min,空气压力 1.2 MPa,单台重 2800 kg)更换为 5 台小压缩机(额定压缩速率约为 14 m³/min,空气压力 0.86 MPa,单台重 280 kg)。通过结构优化和缩减孔径,将整套装备质量由 10000 kg 减小至 2000 kg,大大降低了后勤保障需求。经过南极现场测试,RAM-2 钻工作性能良好。



图 14 RAM 钻

Fig.14 Rapid Air Movement drill and drill bit



图 15 RAM-2 钻

Fig.15 Rapid Air Movement-2 drill

2.2 热力钻具

热力钻具是通过融化冰层实现钻进的钻具。按照融冰方式不同,可将热力钻具分为热融钻具和热水钻具。热融钻具一般是利用电阻产生的焦耳热来融化热融钻头前方的冰层,实现钻进;而热水钻具则是利用高温高压热水来冲击并融化钻具前方冰层,实现钻进。热融钻具既可实现取芯钻进,也可进行全面钻进,而热水钻具多用于全面钻进。

2.2.1 热融钻具

热融钻具可分为热融取芯钻具和热融全面钻具,本文主要介绍美国现有热融取芯钻具,包括 IDP 取芯钻^[35]、Hot Jay 取芯钻^[36]和乙醇电热取芯钻(Ethanol Thermal Electric Drill,简称 ETED)^[37]。热融取芯钻特别适用于温度接近压力熔点的冰层。3 种钻具的主要参数如表 5 所示。

表 5 热融钻具主要参数									
Table 5 Main parameters of thermal drills									
钻具名称	钻具类型	最大钻进深度/m	钻孔直径/mm	冰芯直径/mm	冰芯长度/m	是否使用钻井液	钻头功率/kW	冰层钻进速度/(m·h ⁻¹)	运输质量/kg
IDP 取芯钻	取芯	295	104	86	1~2	否	1.8	6~7.5	544
Hot Jay 取芯钻	取芯		80	63.5	1	否	2		23
ETED 取芯钻	取芯	1000	>127	<102	1.5	是(乙醇)	2.25	最大 4.3	1000

IDP取芯钻通过钻头产生的热量在冰层中融化出环状空间,从而达到钻取冰芯的目的,如图16所示。IDP取芯钻与4-Inch钻使用同一绞车系统,因而可替代4-Inch钻用于暖冰层钻探。为满足科学需求,2018年开始,对IDP取芯钻进行了升级改造,主要改进包括更换新钻头、水密缆、钻井液输送机构和真空沉积物收集器等。



图16 IDP取芯钻钻头及获取的冰芯

Fig.16 Ice coring bit for the electrothermal drill and recovered ice core

Hot Jay取芯钻是为研究格陵兰冰盖含水粒雪层而研发的,基于IDP取芯钻进行设计,但它体积小,质量更轻,钻具总质量约为23 kg。

ETED取芯钻由俄亥俄州立大学研发,采用向钻孔内注入乙醇保持钻孔稳定的方式增加取芯钻进深度。

2.2.2 热水钻具

美国现有一系列热水钻具,钻进能力涉及浅层、中深层和深层。浅层热水钻具主要包括用于下放科学仪器的湖冰热水钻(Sediment Laden Lake Ice Drill,简称SLLID)^[38]、用于实施地震勘探孔的小型热水钻(Small Hot Water Drill,简称SHWD)^[39]和用于实施中微子观测孔的无线电阵列(Askaryan Radio Array,简称ARA)热水钻^[40],钻孔直径分别为

76~250、100(可调)和150 mm,钻进能力分别为6、60和200 m。中深层热水钻具主要包括用于冰川探测的阿拉斯加大学费尔班克斯分校热水钻^[41]、怀俄明大学热水钻^[42]和用于冰下湖探测的WISSARD热水钻^[43],钻孔直径分别为200、150和300 mm,钻进能力分别为500、830和1000 m。此外,还有一款用于中深冰层钻进的模块化热水钻(Scalable Hot Water Drill,简称ScHWD)正在研发中^[44],钻孔直径为100~300 mm,钻进能力为1000 m。深层热水钻只有用于冰立方中微子观测项目(IceCube)的增强型热水钻(Enhanced Hot Water Drill,简称EHWD)^[45],钻孔直径>600 mm,设计钻进能力2500 m。

3 美国极地钻探现场工作

3.1 过去10年极地钻探现场工作

过去10年(2010—2020年)IDP负责和参与实施了80余个极地钻探现场工作或项目^[46],大部分具有明确的科学目标(主要是围绕古气候变化、冰川动力学及其历史这2类科学目标),也有部分现场工作的目的是测试钻具。北极钻探现场工作主要在格陵兰冰盖和阿拉斯加山地冰川开展,南极钻探现场工作主要在西南极和南极点开展。总的来看,除2020年受疫情影响外,每个科考季美国都会安排10个左右的极地钻探现场工作。大多数极地钻探现场工作属于浅冰层钻探,可在一个工作季内完成,而少数钻探项目,开展了多个工作季的现场作业,如西南极分冰岭深冰芯钻探项目、南极Allan山蓝冰冰芯钻探项目、南极点深冰芯钻探项目和RAID钻测试项目等。除这些IDP负责和参与的项目之外,还有一些由其他组织负责实施的极地钻探项目,如IceCube极地钻探项目、Whillans和Mercer冰下湖钻探项目等。

3.2 未来3年极地钻探现场工作

未来3年美国拟实施的极地钻探现场工作或项目共10项,其中,6项位于南极,4项位于北极^[47]。南极钻探现场工作均位于西南极,其中3项位于Thwaites冰川。除1项位于加拿大境内外,其余北极钻探现场工作均在格陵兰冰盖。钻探工作的目的、科学意义、地点、计划时间和组织单位等如表6所示。由表6可知,美国未来3年极地钻探科学目标主要为研究古气候变化和冰盖动力学。

表 6 未来 3 年美国极地钻探现场工作
Table 6 U.S. Antarctic drilling fieldwork in next 3 years

序号	名称	地点	目的	科学意义	计划时间	使用钻具	主要单位
1	Thwaites 冰川粒雪层取心钻探	南极, Thwaites 冰川	获取粒雪层样品, 测量其密度	利用粒雪芯密度验证 ICESat—2 卫星估算冰川物质平衡的能力	2021.11—2022.01	IDDO 钻	纽约大学
2	Thwaites 冰川冰下基岩钻探	南极, Thwaites 冰川	获取冰下基岩岩心, 测量其宇宙核素浓度	基于宇宙核素浓度分析冰下基岩暴露时间, 从而推算冰川进退史, 并提供区域性海平面变化记录	2021.11—2022.01	Badger-Eclipse 钻、Winkie 钻	杜兰大学、缅因大学、伯克利地质学中心
3	Thwaites 冰川地震勘探孔钻探	南极, Thwaites 冰川	在冰层形成炮孔以进行地震勘探	通过地球物理方法全面表征冰川基底特征, 进而分析冰下基底条件是否允许冰川接地线快速后退等	2022—2024	RAM 钻、SHWD 钻	宾夕法尼亚州立大学、堪萨斯大学、华盛顿大学和威斯康星大学
4	Waesche 山冰下基岩钻探	南极, Waesche 山	获取冰下基岩岩心, 测量其宇宙核素浓度	基于宇宙核素浓度分析冰下基岩暴露时间, 从而推算冰川进退史, 并分析末次间冰期西南极冰盖高程演化	2022.11—2023.01	Winkie 钻	新墨西哥州矿业技术学院、哈佛大学和缅因大学
5	Allan 山蓝冰钻探	南极, Allan 山	获取更多 200 万年前或更古老的冰芯	重建过去气体组分, 分析过去温室气体浓度与古气候之间关系	2022.11—2023.01	4-Inch 钻、BID 钻	普林斯顿大学
6	冰穹 Hercules 深冰芯钻探	南极, 冰穹 Hercules	获取一支 2800 m 连续深冰芯	了解西南极过去和未来对全球海平面上升的贡献	2024—2027	Foro 3000 钻	华盛顿大学、加州大学欧文分校和新罕布什尔大学等
7	GreenDrill 项目	北格陵兰冰盖	获取冰下基岩岩心, 测量其宇宙核素浓度	基于冰下基岩暴露时间推算北格陵兰冰盖演化历史, 并分析其对气候变化的敏感性	2023	ASIG 钻、Winkie 钻	哥伦比亚大学、布法罗大学
8	Tunu 冰芯钻探	东北格陵兰, Tunu 区域	获取一支 400~450 m 高分辨率冰芯	重建过去 4000 年以来的气候变化, 研究古代社会、火山作用、气候与人类活动之间的关系	2022.05—2022.07	Foro 400 钻	沙漠研究所
9	Helheim 冰川冰芯钻探	东南格陵兰, Helheim 冰川	获取浅冰芯	研究积累率和地表融化强度变化及其对 Helheim 冰川的影响	2022.04	Stampfli 钻、ID-DO 钻	伍兹霍尔海洋研究所
10	Combatant Col 冰芯钻探	加拿大	获取浅冰芯	重建过去 500 年水文气候变化, 观测是否存在粒雪含水层, 并确定其对冰川能量平衡和动力学的影响	2022.06—2022.07	IDP 热融取芯钻	华盛顿大学

4 对中国极地钻探发展的建议

与美国极地钻探技术和极地钻探现场工作相比,我国仍有较大差距。在国家重大科研仪器设备研制专项、“863”计划和国家重点研发计划等资助下,我国研发了浅冰芯钻、深冰芯钻、冰下基岩钻、中深热水钻和冰下湖探测器等极地钻探装备,但数量和种类相对较少。我国在南极开展钻探作业也较少,积累的现场钻探经验非常有限,目前已实施的现场钻探作业主要包括 Dome A 深冰芯钻探、中山站内陆出发基地冰下基岩钻探和中山站—昆仑站断面部分位置的浅冰芯钻探和热融钻探等。为更好地发展我国极地钻探事业,我们可以从科学目标规划、技术储备和管理模式等方面借鉴美国的经验,比如,组建极地钻探科学与技术委员会,结合我国确定的极地基础科学优先领域、现有极地钻探技术和考察站支撑条件梳理极地钻探科学目标,并做出长期规划,根据拟定的科学目标,维护和研发极地钻探装备,实施极地钻探现场作业。

5 结语

美国的极地钻探技术已经成熟,除 IDP 外,还有多家高校从事极地钻探技术研究,形成了较为完善的极地钻探技术体系。从取心钻进到全面钻进,从小直径到大直径,从浅层到深层,从粒雪层、冰层到冰下基岩层,从机械切削钻进到热力融冰钻进,都有相对应的钻探技术与装备,基本涵盖了极地钻探的全部领域。另外,为进一步提高钻进效率、满足更多的科学需求和减轻后勤保障要求,美国还在致力于对已有钻具进行升级改造和研发新钻具,并根据科学委员会建议,分别确定未来 1 年、3 年和 5 年优先发展的技术领域。我们可以从科学目标规划、技术储备和管理模式等方面借鉴美国的经验,以更好地发展我国极地钻探事业。

参考文献(References):

- [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] 张楠,王亮, Pavel Talalay, 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(1):1-16.
ZHANG Nan, WANG Liang, Pavel Talalay, et al. Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(1):1-16
- [3] Mary R. Albert, Louise Huffman, Kristina Slawny, et al. Ice drilling program long range science plan 2021—2031[R]. 2021-06-30.
- [4] Learn about IDP and meet our team[EB/OL]. <https://icedrill.org/about#team>.
- [5] Fischer H, Severinghaus J, Brook E, et al. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS “Oldest-Ice” ice core[J]. *Climate of the Past*, 2013,9(6):2489-2505.
- [6] Voosen, Paul. 2.7-million-year-old ice opens window on past[J]. *Science*, 2017,357(6352):630-631.
- [7] Fisher A T, Mankoff K D, Tulaczyk S M, et al. High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet[J]. *Science Advances*, 2015,1(6):1500093.
- [8] Stanton T P, Shaw W J, Truffer M, et al. Channelized ice melting in the ocean boundary layer beneath Pine Island Glacier, Antarctica[J]. *Science*, 2013,341(6151):1236-1239.
- [9] Pattyn F, Perichon L, Durand G, et al. Grounding-line migration in plan-view marine ice-sheet models: results of the ice 2 sea MISMP3d intercomparison[J]. *Journal of Glaciology*, 2013,59(215):410-422.
- [10] Dahl-Jensen D, Albert M R, Aldahan A, et al. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core[J]. *Nature*, 2013,493(7433):489-494.
- [11] Collaboration I C, Aartsen M G, Ackermann M, et al. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and online systems[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016,arXiv:1612.05093.
- [12] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/hand-auger-sipre>.
- [13] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/hand-auger-iddo>.
- [14] Kyne J, McConnell J. The PrairieDog: A double-barrel coring drill for ‘hand’ augering[J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47:99-100.
- [15] Kyne J, McConnell J. The SideWinder for powering a hand-coring auger in drilling and lifting[J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47:101-104.
- [16] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/chipmunk-drill>.
- [17] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/stampfli-drill>.
- [18] Kuhl T W, Johnson J A, Shturmakov A J, et al. A new large-diameter ice-core drill: the Blue Ice Drill[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(68):1-6.
- [19] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/badger-eclipse-drill>.
- [20] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/4-inch-drill>.
- [21] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/>

- equipment/foro-400-drill.
- [22] Zagorodnov V, Thompson L G, Mosley-Thompson E. Portable system for intermediate-depth ice-core drilling[J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(152):167-172.
- [23] Johnson J A, Shturmakov A J, Kuhl T W, et al. Next generation of an intermediate depth drill[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):27-33.
- [24] Shturmakov A J, Lebar D A, Bentley C R. DISC drill and replicate coring system: A new era in deep ice drilling engineering[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):189-198.
- [25] Gibson C J, Johnson J A, Shturmakov A J, et al. Replicate ice-coring system architecture: mechanical design[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):165-172.
- [26] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/700-drill>.
- [27] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/foro-3000-drill>.
- [28] 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.
- [29] Alexander J. Shturmakov, Donald A. Lebar, Charles R. Bentley. DISC drill and replicate coring system: A new era in deep ice drilling engineering[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):189-198.
- [30] Boeckmann G V, Gibson C J, Kuhl T W, et al. Adaptation of the Winkie Drill for subglacial bedrock sampling[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):109-117.
- [31] Kuhl T, Gibson C, Johnson J, et al. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):53-66.
- [32] Goodge J W, Severinghaus J P, Johnson J, et al. Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2021:1-16 (Published online). DOI: <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>
- [33] U. S. Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/rapid-air-movement-drill>.
- [34] Gibson C, Boeckmann G, Meulemans Z, et al. RAM-2 Drill system development: an upgrade of the Rapid Air Movement Drill[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):99-108.
- [35] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/electrothermal-drill>.
- [36] Miège C. 18 Days on the ice. Retrieved 18 March, 2017[EB/OL]. <https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/fromthefield/category/greenland-aquifer-expedition/page/2/>.
- [37] Zagorodnov V, Thompson L G, Ginot P, et al. Intermediate-depth ice coring of high-altitude and polar glaciers with a light-weight drilling system[J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(174):491-501.
- [38] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/sediment-laden-lake-ice-drill>.
- [39] U. S. Ice Drilling Program [EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/small-hot-water-drill>.
- [40] Talalay P G. Thermal Ice Drilling Technology[M]. Singapore: Geological Publishing House and Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020:145-250.
- [41] Bentley C, Koci B, LJ-M A. Ice Drilling And Coring[M]//BAR-COHEN Y, ZACNY K. Drilling in extreme environments. penetration and sampling on earth and other planets. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, 2009: 221-308.
- [42] Harper J T A, Humphrey N F B, Meierbachtol T W A, 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.
- [43] Rack F R, Carpenter C, Burnett J, et al. Developing a hot-water drill system for the WISSARD project: 1. Basic drill system components and design[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):285-297.
- [44] Ice Drilling Program Long Range Drilling Technology Plan[R]. 2021-06-30.
- [45] Greenler L, Haugen J, Karle A, et al. IceCube enhanced hot water drill functional description[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):105-114.
- [46] U.S. Ice Drilling Program[EB/OL]. <https://icedrill.org/field-work/completed>.
- [47] U.S. Ice Drilling Program[EB/OL]. <https://icedrill.org/field-work/upcoming>.

(编辑 李艺)