

极地冰钻关键技术研究进展

张楠^{1,2,3,4}, 王亮^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2,3,4}, 范晓鹏^{1,2,3,4}, 王如生^{1,2,3,4},
杨阳^{1,2,3,4}, 洪嘉琳^{1,2,3,4}, 宫达^{1,2,3,4}, 孙友宏^{1,4,5}, 李院生⁶, 李冰^{1,2,3,4}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026;
3. 吉林大学极地科学与工程研究院, 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. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 6. 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要: 极地冰钻技术是获取冰芯, 研究冰盖—冰架—海洋相互作用, 以及获取极地冰下基岩与冰下水环境样品, 开展冰下水环境探测的重要手段。目前极地冰钻技术的难点与前沿主要包括深冰芯钻探、冰架热水钻、冰下基岩钻和冰下水环境采样与观测技术。本文针对以上 4 个极地冰钻关键技术, 对国内外相关技术的研究进展与项目开展情况进行了总结与梳理。综合来看, 虽然我国开展极地钻探技术研究起步较晚, 但随着我国极地战略不断推进, 我国的极地冰钻关键技术与装备的研究正持续向着赶超极地钻探强国方向迈进, 这必将为我国的极地科学研究提供强有力的技术支撑。

关键词: 极地; 深冰芯钻探; 热水钻探; 冰下基岩钻探; 冰下水环境探测

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)02-0016-16

Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions

ZHANG Nan^{1,2,3,4}, WANG Liang^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2,3,4}, FAN Xiaopeng^{1,2,3,4},
WANG Rusheng^{1,2,3,4}, YANG Yang^{1,2,3,4}, HONG Jialin^{1,2,3,4}, GONG Da^{1,2,3,4},
SUN Youhong^{1,4,5}, LI Yuansheng⁶, LI Bing^{1,2,3,4}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
3. Polar Science and Engineering Research Institute, 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. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
6. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract: Ice drilling technologies for the polar regions are the crucial means of obtaining the ice core to investigate the interaction of the polar ice sheet, ice shelf, and ocean; and obtaining subglacial bedrock core and water sample to explore the subglacial environment. At present, the difficulties and frontiers of polar ice drilling technology mainly include deep ice core drilling, ice shelf hot water drilling, subglacial bedrock drilling and subglacial environment sampling, observation technology. In view of the above four key technologies of polar ice drilling, this paper summarizes and sorts out the research progress and project development of related technologies in China and abroad. In general, the research on polar drilling

收稿日期: 2020-02-03 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.02.001

基金项目: 国家自然科学基金专项“极地冰盖前沿科学问题及探测技术”(编号: 41942047); 国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制专项“极地深冰下无钻杆取芯钻探装备”(编号: 41327804); 科技部国家重点研发计划“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”(编号: 2016YFC1400302); 原国家海洋局“南北极环境综合考察与评估专项”课题 04-02“南极周边海域与大陆资源潜力综合评估”(编号: CHINARE2016-04-02)

作者简介: 张楠, 男, 汉族, 1981 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, 吉林省长春市西民主大街 938 号, znan@jlu.edu.cn。

通信作者: 李冰, 男, 汉族, 1988 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, 吉林省长春市西民主大街 938 号, bingxueleng4@126.com。

引用格式: 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(2): 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(2): 1-16.

technology started late in China, but the research on the key technologies and equipment of polar ice drilling in China is moving towards surpassing the polar drilling powers in the world, as China's polar strategy continues to advance. And it will certainly provide a strong technical support for China's polar scientific research.

Key words: polar regions; deep ice core drilling; hot water drilling; subglacial bedrock drilling; subglacial environment observation

0 引言

由于特殊的地理位置和恶劣的自然环境,地球的南北两极目前是人类活动影响最小的地区,是地球上“最后的净土”。极地科学与技术研究是探寻地球系统及其变化的关键、是应对全球气候变化和提高防灾减灾能力的手段、是探测极地资源、保护极地生态环境的方法、是我国建设海洋强国、保障极地战略核心利益的需求^[1]。

在极地研究领域,与极地冰盖相关的科学问题始终是研究的前沿和热点,极地冰盖主要分布在南极大陆和北极格陵兰岛(如图1所示),总面积约1600万km²,约占地球陆地面积的11%^[2],是地球系统的重要组成部分,该系统十分复杂,其内部各主要元素与冰盖相互驱动,并对地球系统产生着影响,人类对其机制认识较浅,但通过对极地冰的研究分析,我们能够对气候环境的动态过程进行深入了解。同时,极地冰盖深层及底部还是人类鲜有“触及”的“新世界”,冰下水环境与冰下地质的研究无论在基础科学领域还是在战略意义上也都将为前沿科学研究提供绝佳的机会。所以近些年,针对极地冰盖形成、演化、物质平衡、冰下环境等问题的研究日益成

为科学界探索的焦点,极地冰盖、冰架、冰下基岩和冰下水系统成为了主要研究对象。

极地冰盖蕴藏着数百万年以来随降雪而保存的重要气候信息,地球大气中的灰尘和悬浮颗粒、可溶性化学元素通过气流沉积在冰盖上,并随空气被冰雪所覆盖,所以冰盖记录了全球气候变化、重大地质事件和人类活动影响引起的气候与环境变化历史^[3-4]。极地冰盖的冰芯具有分辨率高、保真性好、时间序列长等优点,是研究地球系统环境、生物、物化过程的最佳媒介^[5-6]。

极地冰盖在冰流的作用下进入海洋^[7],陆地冰及与大陆架连接的冰体,延伸到海洋形成冰架。冰架底部与海洋相连,并且与海洋相互作用,而通过冰架向海洋输送的淡水直接对洋流和大洋水团产生影响。极地冰盖物质损失主要以冰架作为出口,所以对冰架的观测和研究是冰盖动态过程和物质平衡研究以及全球海平面变化、大洋环流研究的关键^[8-9]。

极地冰下环境近年来成为了极地科学界关注的重点,冰下环境包括冰下水系统、冰下地质、冰下沉积物等。对冰下环境的探索和研究为诸多自然科学及跨学科研究提供了特有的信息,对于了解南极冰盖形成和演化机制、深入探究地球气候变化机制、研究冰盖底部过程、寻找古老的地球生命形态、认识极地冰下地质构造与演化、评估矿产资源等有着重要的科学意义^[10-14]。

针对上述重要科学问题,最主要的就是获取样品进行科学的分析与研究,而高效、保真的获取样品则依赖于对极地冰钻技术的研究。研发适用于极地恶劣环境、冰下复杂条件等特殊工况的极地冰钻关键装备,进一步完善极地深冰芯钻探、极地热水钻探、极地冰下基岩钻探,以及极地冰下湖钻探技术可以大力推动极地冰芯、岩心、冰下水样与沉积物的研究,进而促进极地领域地球系统科学的研究水平。目前,上述几类极地冰钻技术与装备是极地科学钻探领域的难点与前沿,本文将以上述4个技术与装备方向为主要内容,讨论极地冰钻关键技术研究进展。

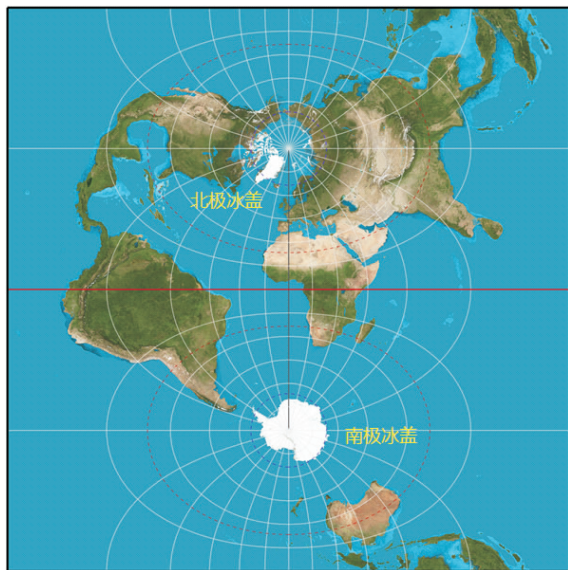


图1 极地冰盖分布示意图^[2]

Fig.1 Map of polar ice sheet distribution^[2]

1 极地冰盖深冰芯钻探技术研究进展

通过极地深冰芯钻探可以获取早期地球气候演变信息,尤其是末次冰期一系列千年级、大幅度的气候突变事件,事件发生的原因及其对未来气候的指示意义成为古气候研究领域研究热点之一,钻取的冰芯已成为人类了解古气候变化情况,从而预测未来气候变迁的关键佐证,为此从 20 世纪中叶开始,各个国家纷纷开展了极地深冰芯钻探计划,对极地冰盖钻探技术装备进行研发。

1.1 国外研究进展

开展极地冰心钻探早期,人们曾试图采用传统地质勘探钻机进行冰层取心钻探,传统钻机在原理上是可行的,但由于深孔回转钻机质量大、功率消耗大,极地地区交通不便、基础设施匮乏、环境恶劣(严寒、暴风雪和缺氧等),另外极地冰盖稳定性较差等因素,使其很难适用于极地冰盖钻探。为此美国寒区研究与工程实验室(CRREL)在 20 世纪 60—70 年代设计和研制了一种用于深冰芯钻探的铠装电缆

式电动机械取心钻具,该钻具在西南极中部的伯德站成功获取第一支南极深冰芯。首先于 1966—1967 工作季采用热力钻形成先导孔,并下入 200 m 套管。1967 年 11 月 1 日开始采用 CRREL 钻具取心钻进,钻井液为柴油(加入三氯乙烯),最终于 1968 年 1 月 29 日钻至 2164 m^[14]。

自此以后,各国(组织)纷纷启动了极地深冰芯钻探计划,表 1 列出了国际上主要的一些极地冰芯钻探项目情况。各国(组织)相继开始设计、研发和改进了用于极地深冰芯钻探的铠装电缆式电动机械取心钻具,主要的几种钻具如表 2 所示^[14-27]。这其中最具代表性的是美国的 CRREL 钻具、俄罗斯的 KEMS 钻具、丹麦的 HANS TAUSEN 钻具、日本的 JARE 钻具和美国的 DISC 钻具等,如图 2 所示。

美国 CRREL 钻具如前文所述是早期铠装电缆式电动机械取心钻具的原型,成功应用于南极伯德站深冰芯钻探项目,钻具的长度和整装质量以及功率消耗都比较大。

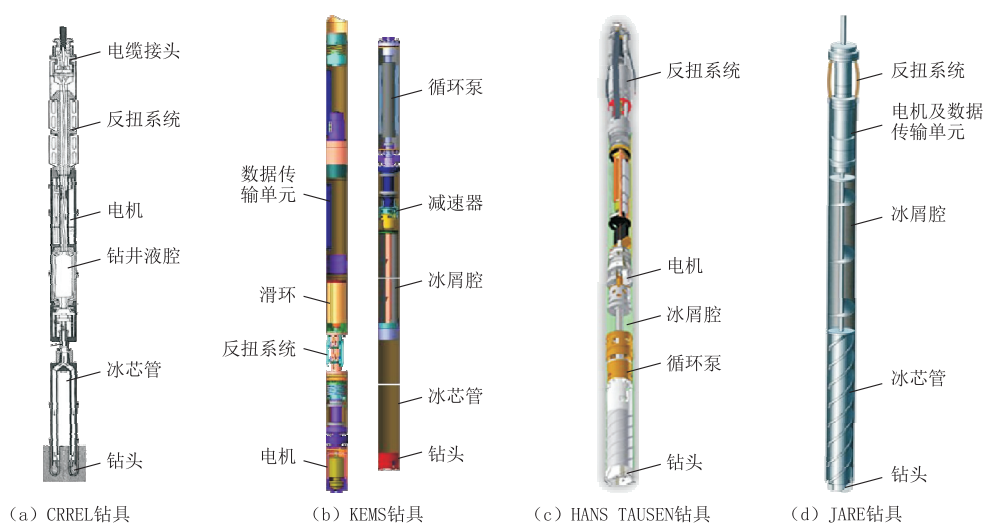
表 1 国际主要深冰芯钻探项目实施情况^[14-29]
Table 1 Implementation of major international deep ice core drilling projects^[14-29]

时 间	孔深/m	位 置	机 构/项 目	钻具类型
1966—1968	2164	伯德站	美国寒区研究与工程实验室	CRREL
1979—1981	2037	Dye 3 站	格陵兰冰盖计划	ISTUK
1983—1989	2546	东方站	俄罗斯圣彼得堡国立矿业学院	KEMS132
1989—1992	3029	格陵兰顶峰	格陵兰冰盖计划(GRIP)	ISTUK
1989—1993	3053	格陵兰顶峰	美国极地冰芯钻探计划(GISP2)	PICO
1994—1996	2504	冰穹 F	日本国家极地研究所	JARE
1997—2003	3085	北格陵兰	北格陵兰冰芯计划 NGRIP	HANS TAUSEN
1999—2005	3270	冰穹 C	欧洲南极冰层取心计划(EPICA)	HANS TAUSEN
2001—2006	2774	毛德皇后地	欧洲南极冰层取心计划(EPICA)	HANS TAUSEN
2002—2007	3035	冰穹 F	日本国家极地研究所	JARE
1990—2015	3769	东方站	俄罗斯圣彼得堡国立矿业学院	KEMS132
2006—2012	3405	WAIS 分冰岭	西南极冰盖分冰岭冰芯钻探计划	DISC
2007—2012	2540	北格陵兰	北格陵兰 Eemian 冰芯钻探计划(NEEM)	HANS TAUSEN
2015—2020	2550 *	东格陵兰	东格陵兰深冰芯计划(EGRIP)	HANS TAUSEN

注:* 为 EGRIP 设计孔深。

表 2 国际上具有代表性的铠装电缆式电动机械钻具及其主要参数^[14-27]
Table 2 Typical armored cable electric mechanical drills and main parameters^[14-27]

钻具类型	长度/ m	质量/ kg	回转速度/ (r · min ⁻¹)	电机功 率/kW	钻速/ (m · h ⁻¹)	切削具 数量	钻头内外径/ mm	外取心管内 外径/mm	内取心管内 外径/mm	平均冰芯 长度/m	生产 国家
CRREL	26.5	1200	225.0	12.8	0~7	8	114.3/155.6	No/146	117.6/No		美国
ISTUK	11.5	180	37.5	0.6	22	3	102.35/129.5	单管	104/110	2.20	丹麦
KEMS	13.0	240	230.0	2.2	12~20	3	107/132,135	单管	117/127	2.57	俄罗斯
PICO-5.2 in	27.0	730	100.0	2.2	60	3	137/177.5	157.1/171.3	137/143.34		美国
JARE	12.3	187	66.0	0.6	6~20	3	94/135	115/122	97.4/101.6	3.67	日本
HT	11.0	150	50~60	0.3	15	3	98/129.6,132,134	113/118	100/104	2.80	丹麦
DISC	14.5	404	80.0	1.8	28	4	122/170	单管	137/157	2.49	美国

图 2 国际上主要的深冰芯钻具结构示意图^[2]Fig.2 Schematic diagram of main deep ice core drilling tools abroad^[2]

俄罗斯的 KEMS 钻具是由俄罗斯圣彼得堡矿业大学(前身为列宁格勒矿业学院)研制并投入到南极东方站的深冰芯钻探项目中,钻具的尺寸、质量、功耗都大幅度降低,使大规模快速实施极地冰层取心钻探成为可能。该钻具在东方站的钻探中发挥巨大作用,从 20 世纪 70 年代开始至今,俄罗斯科学家及国际合作者已经在东方站进行了 5 个钻孔的取心钻探,并钻穿冰盖直至冰下的东方湖,也创造了极地冰钻的深度记录,获取了超过 40 万年气候信息记录。

丹麦的 HANS TAUSEN 钻具是由丹麦哥本哈根大学为欧洲南极冰层取心钻探计划(EPICA)和北格陵兰冰芯计划(NGRIP)而设计的钻具,从 20 世纪 90 年代至今在 2 个极地钻探项目中以及很多后续极地钻探项目中(包括北极 NEEM 和 EGRIP 计划)成功应用,在南极获取了约 80 万年的气候信息记录。

日本的 JARE 钻具是由日本国立极地研究所于 20 世纪 80 年代设计的,钻具的质量和功耗进一步降低,而且单回次取心长度更长,达到约 3.7 m,大大提高了取心钻探的效率。该钻具成功应用于冰穹 F 深冰芯钻探项目,钻进深度超过 3000 m,几乎钻至冰盖底部,但由于暖冰取心难等问题停止了继续钻进。尽管如此,该钻具在冰穹 F 的应用仍是目前国际上比较成功的南极深冰芯钻探案例之一,获取了超过 70 万年的气候信息记录。

美国的 DISC 钻具是近年来由美国威斯康星大

学麦迪逊分校所研发的,设计囊括了现有深冰芯钻具的优势特征,钻具详细介绍参见文献[15]—[21]。DISC 已于 2006—2012 年成功应用于西南极冰盖分冰岭冰芯钻探计划(WAIS),终孔深度为 3405 m^[22]。

上述用于深冰芯钻探的铠装电缆式电动机械取心钻具在钻具基本结构上大同小异,基本都是由铠装电缆悬吊,钻具自重提供钻压,钻具内部的回转电机驱动冰芯管进行回转切削。钻具由反扭系统、电机及减速器、孔内检测控制单元、冰屑腔、冰芯管以及钻头等部分组成,在收集冰屑方式上几种钻具有所不同,有的是靠冰芯管外的螺旋机构将冰屑输送到冰屑腔,有的是靠电机带动循环泵,建立孔底局部反循环将冰屑抽吸至冰屑腔。经过多年的工程应用与经验总结,各国极地钻探技术人员对深冰芯钻探技术及钻机进行了持续优化改进,目前已经形成了较为成熟稳定的技术方案,该类型钻具也成为了目前国际上针对极地深冰芯进行取心钻探的主要手段。

1.2 国内研究进展

我国的第一个极地深冰芯钻探项目是在中国南极昆仑站实施的 DK-1 工程^[5],这也是国际上第一个在该区域开展的深冰芯钻探项目。之所以选择在昆仑站开展我国第一个南极深冰芯钻探工程,是因为昆仑站位于南极冰盖最高点的冰穹 A 地区,该地区地处东南极冰盖分冰岭的中心^[30],该区域海拔近 4100 m,冰厚约 3100 m,年平均温度达 -58 ℃,冰

体流变作用最小,雪积累速率约为 16 mm 水当量,是目前已知地球上温度最低、年雪层厚度最小的地方^[5],有资料显示冰穹 A 地区可能钻取含有超过百万年气候信息记录的冰芯^[31-32],因此该区域被认为是一个寻找冰盖起源与早期演化和冰盖流动历史证据以及检验冰盖运动模拟结果的理想地点^[33-34]。

2012 年 1 月,中国第 28 次南极科学考察队昆仑站队实施 DK-1 的先导孔施工,采用浅冰芯钻机进行先导孔钻进,钻进深度 120.79 m,取心 120.33 m,进行了 3 次扩孔施工,并成功下放 100 m 套管^[5]。2013 年 1 月,中国第 29 次南极科学考察队昆仑站队完成深冰芯钻机安装与调试,正式进行深层取心钻探,完成取心钻探 3 回次,钻进深度 10.54 m,取冰芯 10.99 m,如图 3 所示^[5]。此后,中国第 31、32、33 和 35 次南极科学考察队昆仑站队分别完成进尺 172.5、350.9、146.2 和 2.78 m(35 次队主要任务为钻孔观测和钻机设备维护),钻孔总深度到达 803.7 m。

中国南极深冰芯科学钻探 DK-1 工程使用的钻探设备 CHINARE 深冰芯钻探系统为中国极地



图 3 Dome A 深冰芯钻机及中国深冰芯钻探首季 3 回次冰芯^[5]
Fig.3 Dome A deep ice core drill rig and 3 runs of deep ice cores of the first season of Chinese Deep Ice Core Drilling Project in Dome A, Antarctica^[5]

研究中心与日本 GEO TECS 公司联合研制的,主要包括钻具、钻塔、铠装电缆、控制系统、绞车、钻井液和流体处理装置,以及地表辅助系统等,钻具作为核心部件,主要由电缆终端、反扭装置、信号发送单元与 CPU 控制器、驱动电机及减速器、冰屑管、冰芯管及钻头组成,具体参数如表 3 所示。

表 3 CHINARE 深冰芯钻探系统主要技术参数^[5]
Table 3 Main technical parameters of CHINARE deep ice core drilling system^[5]

部 件		技 术 参 数
钻具	主参数	整装长度:12223 mm;冰芯:直径 94 mm;最大取心长度 3800 mm
	反扭部件	板簧式 3 片
	驱动部件	电机:永磁直流电机;电机参数:200 V,500 W,4000 r/min;减速器:谐波减速器;减速器参数:减速比 1/80,输出转速:50 r/min
	外管	外径:123 mm;外管长 4598 mm;材质:高强度铝合金
	冰屑腔	外径:123 mm;内径:114 mm;冰屑腔长:5000 mm
绞车	冰芯管	冰芯管外径:101.6 mm;冰芯管长:4000 mm;冰屑输送螺旋:3 螺旋;钻头外径:132 mm;钻头内径:94 mm
	主参数	容量:4000 m;提升力:1000 kg(最大 1500 kg);提升速度:0~60 m/min
钻塔	绞车电机	输入:160 V,53 Hz(可变频);输出功率:15 kW;电机转速:0~1500 r/min(变频器可调 50 Hz);制动:电磁制动
	钻塔顶部	宽:400 mm;高:450 mm;长:2750 mm;顶部滑轮直径 630 mm;称重传感器连接:法兰连接
电缆	底部导向滑轮	底部滑轮直径:480 mm;安装传感器:旋转编码器
	主参数	电缆形式:铠装电缆;电缆直径:7.72 mm;缆长:4000 m
控制设备	钻机控制箱	供电输入:3 相交流 200 V;输出至钻具电机:直流 0~400 V;主要电子电气部件:滑动式变压器,交流电源电压表,直流电源电压表,钻机电压电流表,钻机转速表,钻进压力表
	钻机供电箱	电源:3 相交流 200 V;主要电子电气部件:0~240 V 滑动调压器,240~500 V 变压器,桥式整流器,续电器
	绞车主控制箱	电源:3 相交流 200 V;输出:变频器控制;变频器:200 V,18.5 kW;主要电子电气部件:电磁接触器,制动电源部件,变频器
	制动电阻箱	额定功率:5280 W,7.5 Ω
信号检测单元	绞车控制箱	电源:3 相交流 200 V;主要电子电气部件:电缆张力表,电缆速度表,钻深表,电机电压电流表,变频器频率计,隔离转换器
	信号发送单元(钻具部分)	外形尺寸:圆柱形外形,长度 490 mm,直径 80 mm;供电电源:200~400 V 直流,0.2 A(不含电机供电电流);检测参数:电机电压,电机转速,钻头钻压,钻具倾斜角(x,y 方向),钻井液温度,钻井液内孔底压力,压力腔内漏液报警,电机舱温度,减速器温度,CPU 主控板温度,信号发送单元电压
信号检测单元	信号中继单元(地表部分)	外形尺寸:箱式,宽 430 mm,长 430 mm,高 150 mm;供电电源:AC100 V(+/- 10%),50/60 Hz,1.5 A(不含电机电流);检测参数:电机电流,电机整流电压,绞车温度,地表场地温度,中继单元主控板温度;通讯部件:通讯电缆长:4000 m,孔内至地表数据传输速率 600 bps,中继单元至上位机数据传输速率 9600 bps

中国南极深冰芯科学钻探 DK-1 工程截至目前已实施了 6 个南极工作季,总钻孔深度仅突破 800 m^[35],相对国外深冰芯钻探工程进展较慢。

在整个钻进过程中遇到过一些由技术设备和人为因素带来的问题,总体来讲,钻进参数的变化呈现一定的规律性。但由于冰盖结构的不确定性和孔内的复杂情况,即使按照正常规程进行钻探作业,也会因由钻机、冰层和个体操作差异形成的复杂时变系统而导致的复杂钻探过程和钻进效率不稳定的情况。其中钻探系统因素主要为电子、电气元件故障、通讯连接问题以及机械部件损坏;冰层因素主要为易碎冰层和钻孔缩径;人为因素为场地气候条件对人的影响和人员操作经验差异等^[36]。另外,中国南极深冰芯钻探的单季野外工作时间较短也是制约工程效率的主要因素。由于昆仑站地处南极内陆纵深地区,是最不易接近的地区,根据目前的南极内陆考察运行模式,每季只能确保人员在站停留 21 d 左右,去除前期准备工作、设备调试和后期收尾工作,深冰芯钻探有效钻进天数仅约 16 d。所以优化我国南极内陆考察后勤保障模式,延长现场作业时间是提高工作效率、缩短工期最有效的方法。另外,要将深冰芯钻探新人专业培训作为长效机制加以运行,是减少人为因素造成钻探效率降低的有效方法。我国南极深冰芯钻探工程后续还需要更多地总结经验,完善模式,以及技术与设备优化,相信会在未来几年内完成该项目的取心钻探工作,穿冰盖,钻至冰岩界面,获取连续冰心,为我国大规模开展极地冰心研究,进而研究地球气候演化、东南极冰盖形成与演化机制等提供样品。

2 极地冰架热水钻技术研究进展

为预测冰架随气候与海洋条件变化的响应,针对冰盖融化过程、冰架与大洋的相互作用和海洋温盐环流等开展研究,获取冰架下海水与沉积物样品,需钻穿冰架形成一个高质量大直径钻孔,而热水钻是形成该钻孔最高效的一种钻进方法。其原理是将水加热加压,再将高温高压水通过软管和喷嘴喷射到冰上,对冰进行融化,进而形成钻孔,原理见图 4,钻进用水经过换热器加热后送至高压泵加压,再通过主绞车的软管泵送至喷嘴,喷射出的高压热水融化冰层,同时通过重力作用下放软管和喷嘴,不断融化冰(雪)层形成钻孔,孔内融水通过副孔中下放的

潜水泵抽出,送至地表储水装置。

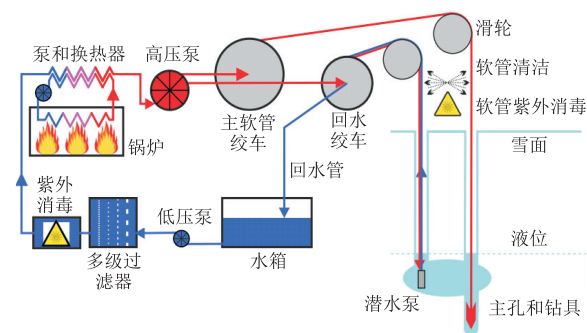


图 4 热水钻工作原理示意图^[37]

Fig.4 Schematic diagram of the hot water drilling system^[37]

2.1 国外研究进展

热水钻最初应用于冰川钻探,1978—1979 年首次用于南极冰架钻探,成功钻穿冰架,平均孔径为 91.4 cm^[38-39]。英国南极调查局(British Antarctic Survey, 简称为 BAS)自 1978 年采用热水钻开展冰川研究以来,多次进行设备与技术更新,钻进能力与设备轻便化显著提高,近年来研制的新热水钻(New Ice-Shelf Hot Water Drilling, 简称为 NHWD)解决了很多之前复杂的问题,并且根据钻进深度提供了 2 种模式(500 m 和 1000 m),分别于 2011—2012 南极工作季在 Larsen C 和 George VI 冰架,2014—2015 南极工作季在 Ronne 冰架成功应用^[40-41]。为满足 Ellsworth 冰下湖探测与取样需求,BAS 设计和研发了清洁深冰热水钻(Clean Hot Water Drills, CHWDs)系统,设计钻深为 3500 m,孔径为 36 cm^[37]。美国于 2004—2011 年采用加强版热水钻(Enhanced Hot Water Drill, EHWD)在南极点实施了 IceCube 中微子天文台,共完成 86 个钻孔,孔深 2500 m,孔径 60 cm^[42]。日本、澳大利亚、德国、丹麦和瑞典等国也均在极地地区实施热水钻工程以开展科学研究,部分热水钻开展情况如表 4 所示^[37-52]。

通过以上热水钻发展历史可以看出,热水钻钻孔深度需求逐渐增加、应用领域逐步扩大、所使用热水钻钻机系统越来越完善,表 5 列出了近年来国外研制的具有代表性的热水钻系统及主要参数。

上述热水钻系统设计原理与系统结构基本相似,都是通过高压热水成孔,主孔中进行钻探,副孔中抽取融水,对抽出的水进行加热,再通过主软管送入主孔进行热水钻探。可以说热水钻是针对冰架、冰盖底部过程研究与取样快速成孔最有效的方法之

表 4 极地地区热水钻项目部分统计结果^[37-52]
Table 4 Summary of some hot water drilling projects in the polar regions^[37-52]

年 份	孔深/m	孔径/cm	位 置	机构/项目	研究内容/目标
1971—1979	420	91.4	Rose 冰架	RISP	冰架环境调查
1982	50	23	Ellesmere 岛冰架	加拿大	钻穿冰架
1978—1979	15~60	+7.6	冰穹 C	PICO	地震调查
1987—1988	390		格陵兰岛	丹麦	冰川水文
1987—1988	370,450	26	Crary 冰隆	内布拉斯加大学	冰隆动力
1988—1989	1200~1330	12~18	Jakobshavns 冰川	阿拉斯加大学	冰川动力
1995—1996	825	20~30	Ronne 冰架	BAS	海洋学
2000—2001	380	30	Amery 冰架	AMISOR	海洋学
1990—2003	420	50	Filchner—Ronne 冰架	德国	海洋学
1990—1992	541,562	0.2~0.25	Ronne 冰架	BAS	冰架和海洋环境
2003	70,144	50	麦克默多冰架	ANDRILL	西南极地质研究
2011	300~320	30	Larsen C 冰架、George VI 冰架	BAS	海洋学
1991—1998	1400~2400	60	南极点	Amanda	探测宇宙中微子
2004—2011	2500	60	南极点	Icecube	探测宇宙中微子
2011—2012	398,431		Langhovde 冰川	北海道大学	冰川动力
2012—2013	300	36	Ellsworth 冰下湖	SLE	冰下湖探测与取样
2013	800	30	Whillans 冰下湖	WISSARD	冰下湖探测与取样
2014—2015	770	+30	Filchner—Ronne 冰架	挪威/BAS	海洋学
2018—2019	1067	30	Mercer 冰下湖	SALSA	冰下湖探测与取样

注:RISP,Ross 冰架计划(Rose Ice Shelf Project);PICO,极地冰芯办公室(Polar Ice Coring Office);AMISOR,Amery 冰架海洋研究计划(Amery Ice Shelf Oceanographic Research Project);ANDRILL,南极地质钻探(Antarctic Geological Drilling);AMANDA,南极介子和微中子探测矩阵(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array);Icecube,立方千米微中子探测(cubic-kilometer neutrino detector);SLE,Ellsworth 冰下湖勘探(Exploration of Subglacial Lake Ellsworth);WISSARD,Whillans 冰流冰下湖探测研究钻探计划(Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling Project);SALSA,南极冰下湖科学探测(Subglacial Antarctic Lakes Scientific Access)。

表 5 近年来国外主要热水钻钻机系统参数及应用情况统计^[37-52]
Table 5 Summary of the parameters and applications of the main hot water drilling systems abroad in recent years^[37-52]

型 号	设计 深 度/ m	设计 钻孔 直径/ cm	主软 管内 径/ cm	最大钻 进速度/ (m· min ⁻¹)	最大回 收速度/ (m· min ⁻¹)	注入泵 流量/ (L· min ⁻¹)	注入 泵压/ MPa	出水 温 度/ ℃	总 功 率/ kW	水过 滤单 元/ μm	杀 菌 方 式	研 制 单 位	应 用 地 点	应 用 时 间	用 途
HWDS	1000	40	3.18			>270	12.3	90	450	2.0, 0.2	UV(40 W, 85 W, 245 nm)	UNL	Whillans 冰下湖, Mercer 冰下湖	2012—2013, 2018—2019	WIS- SARD, SALSA
CHWDs	3500	36	3.20	2.0	10	210	15.0	90	1500	0.2	UV(200 W, 254 nm),巴氏 杀菌(90℃)	BAS	Ellsworth 冰下湖	2012—2013	SLE
EHWD	2500	60	6.40	2.2	10	760	7.6	88	5000	无	无	UW— Madison	南极点	2004—2012	IceCube
NHWD	500, 1000	30	2.54	0.9	9	90,120	2.1, 6.9	80, 90	约 500	无	无	BAS	Larsen C, George VI 冰架, Filchner—Ronne 冰架	2011—2012, 2014—2015	冰架调 查
SHWD	25~ 30	10							5	无	无	IDDO	Beardmore 冰川	2012—2013	地震调 查孔

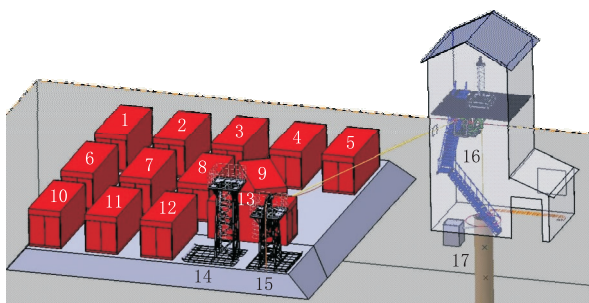
注:HWDS,热水钻系统(Hot-Water Drill System);SHWD,小型热水钻(Small Hot Water Drill);UV,紫外线辐射(Ultraviolet);IDDO,冰芯钻探设计与实施(Ice Drilling Design and Operation);UNL,内布拉斯加大学林肯分校(University of Nebraska Lincoln);UW—Madison,威斯康星大学麦迪逊分校(University of Wisconsin-Madison)。

一,国外相关技术与装备的研发开展也较早,已经形成较为成熟的技术体系。

2.2 国内研究进展

20 世纪 80 年代,梁素云、王茂海等人研发了冰川-I 和冰川-II 型热水钻在山地冰川实施过浅孔钻探^[53],完成 4 次超过 100 m 的钻孔,但目前尚未在

极地地区实施热水钻工程。“十二五”期间,中国极地研究中心等单位承担了国家高技术研究发展计划(“863”计划)“冰架热水钻机关键技术及系统开发”项目,正式开启我国极地热水钻的研制与技术攻关。这个自主研发的热水钻系统主要包括钻进系统、绞盘系统、水体加热系统、水体循环利用系统、测控系统、辅助系统6个子系统,设备分装于13个集装箱内。装备研发完成后,整装设备的联机调试及室内钻进试验在吉林大学自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室试验基地开展,试验场地示意图如图5所示。各子系统测试以及整机联机调试首次获得成功,试验现场如图6所示。



1~4—加热锅炉;5—副软管绞车;6—热水加压箱;7—热水箱;8—融雪箱;9—主软管绞车;10—发电舱;11—备件集装箱;12—热熔钻;13—控制箱;14—主钻塔;15—回水钻塔;16—低温实验室;17—模拟冰孔

图5 热水钻系统测试现场布置示意图

Fig.5 Layout of the hot water drill system test site

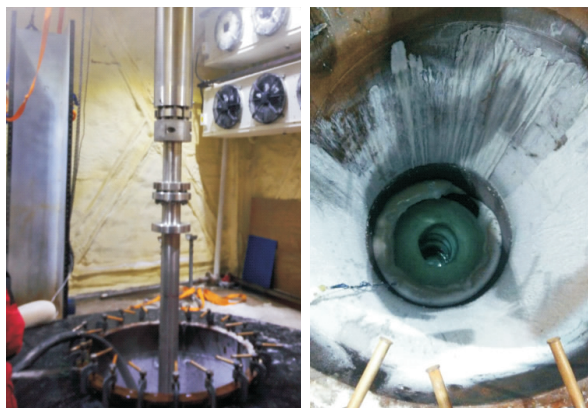


图6 热水钻在模拟冰孔(13 m 低温冰池)内钻探试验及完成的钻孔

Fig.6 Hot water drill drilling test in the simulated ice hole (low temperature ice well) and the drilled ice borehole

整个试验过程总共完成4次热水钻联调联试和低温模拟钻冰试验验证,系统实现了设计的功能,达到了预期的目标,该热水钻系统的成功研制与试验使我国已经具备南极冰架热水钻探的能力^[54]。

3 极地冰下基岩钻探技术研究进展

研发极地冰下基岩钻探技术与装备、钻取深冰下基岩样品有着十分重要的科学意义。极地深冰下基岩钻探为探知冰下环境提供了机会,通过获取的冰下基岩及冰岩界面样品,可以探究冰下地质构造重要信息,寻找古生物的生命形式,同时为极地地热研究提供了空间。但由于极地恶劣的环境条件和复杂的冰下环境(基底冰、基底融水和冰碛物等),因此冰下基岩钻探取样难度非常大。

3.1 国外研究进展

前文叙述的铠装电缆式电动机械取心钻具在极地冰层钻进中得到了广泛应用,国外早期曾尝试用该方法进行冰下基岩及冰岩界面样品的取心钻探尝试。然而由于其电动马达功率小、循环系统无法及时携带出岩屑、反扭力矩无法满足基岩钻进需求等原因,在进行冰下基岩钻进时具有很大难度。

1965年美国利用CRREL钻具(参见表2)在格陵兰岛进行了钻进,在1387.5 m钻遇冰下沉积物,最终钻至1391 m,冰下总进尺3.5 m^[55]。1966年,美国再次采用CRREL钻具在南极伯德站钻至2162.2 m时获取了含岩石和泥土冰芯,钻至2164.4 m处,无法继续钻进,最终未获取冰下基岩样品^[14]。1988年,俄罗斯采用KEMS钻具在Vavilov冰川钻遇冰岩夹层,机械钻速为1.6 m/h,最终获得了2.28 m的冰岩夹层岩心,冰的含量低于50%,具有典型的冻土构造^[56]。1993年,GISP-2项目在格陵兰冰峰进行冰层钻探时,在3053.44 m钻遇冰岩交界面,更换PICO132钻具下部结构以连接基岩取心钻头,最终获得了1.55 m的岩心^[57]。2001年,俄罗斯采用KEMS135钻具在北地群岛Akademiya Nauk冰川钻遇冰下基岩,获取冰下岩心约2 m,终孔深度724 m^[56,58]。

在南极冰下基岩取心钻探,根据现有的文献资料来看,目前只有少数几个项目成功实现了取心的目标。20世纪60年代前苏联在南极Queen Mary Land的Mirny站附近海岸钻穿66.7 m冰层,获取了2.2 m长的基岩岩心;1994年,美国采用PICO132钻具在南极Taylor Dome钻穿554 m厚冰层,钻取0.1 m长岩心样品^[59];另外美国还在南极Pirrit Hill附近钻穿158 m冰层,钻取8 m岩心。上述南极冰下取心成功案例均是在海边区域,并不是在南极内陆冰盖进行冰下基岩取心钻探,但所取

得的突破也是十分巨大的,为后续大规模开展南极冰下基岩钻探奠定了基础。

近年来,美国明尼苏达大学设计了一种快速冰钻钻具(Rapid Access Ice Drill,简称为 RAID),可在单工作季快速穿过冰层,实现冰—沉积物—冰下基岩联合探测以更好地解释大陆板块构造、冰盖和气候变化等。RAID 基于地质岩心回转钻进系统,采用常规钻杆连接的方式钻进冰层,通过低温钻进液反循环的方式排除冰屑,如图 7 所示。接近冰盖底部时,采用绳索装置实现冰、冰川河床和冰下基岩的快速取心。根据设计指标,RAID 钻具可在 200 h 内快速穿透 3300 m 冰盖(钻孔直径 <10 cm),到达底部冰层,并完成对距基底约 50 cm 的冰芯和最少 25 m 的岩心样品采集(直径最大为 5 cm)^[60]。

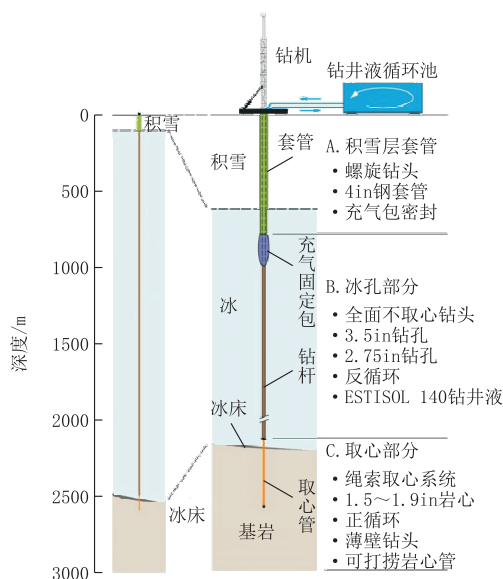


图 7 RAID 钻进方法示意图^[60]

Fig.7 Diagram of RAID drilling method^[60]

根据钻进与取样需求,RAID 孔底装置采用双管设计:连接有外部切冰钻头的外管与钻杆相连,一直延伸至孔底,外部钻头外径 89 mm,长度 20 cm,如图 8a 所示;内管包括岩心管和内钻头,可采用绳索打捞方式实现内管提放,内钻头包括全面切冰钻头(图 8b)或取心钻头(图 8c),内取心钻头取心直径为 38 mm。通过双管设计和绳索钻进工艺,可实现在不提钻情况下将内管钻头切换至取心钻进模式,如图 8d 所示,内管装置下放至孔底装置后,可随钻杆柱一起转动,钻取岩心,回次结束后,采用绳索打捞装置将内管提至地表,回收岩心后,接单根进行下一回次钻进。取心钻杆采用的单根长为 1.5 m,通

过接单根的方式,最深可获取 25 m 冰下基岩岩心。

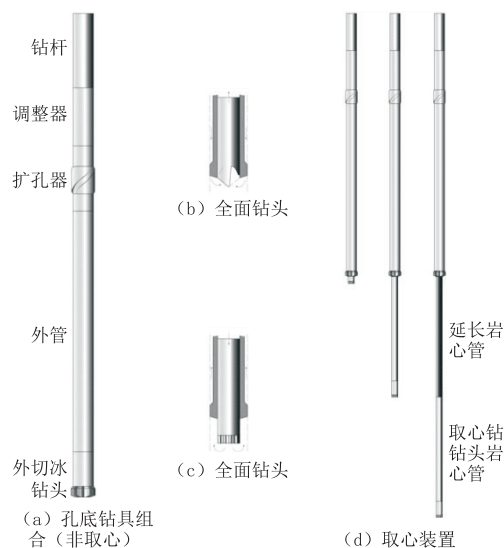


图 8 RAID 钻具结构示意图^[60]

Fig.8 Structure of RAID drill tool^[60]

2015 年,在犹他州(寒冷和高海拔)完成了对 RAID 系统的野外测试,测试结果证明 RAID 具有钻穿冰层和回收岩心的能力。根据计划,该套装置正于 2019—2020 工作季在南极开展野外试验。

可以说,针对极地冰下基岩取心钻探的尝试由来已久,但成功的案例并不多,其主要原因是冰下复杂的结构以及技术层面的难度较大,国外尝试过多种钻具方式。目前来看传统商用钻机在极地内陆冰盖应用,由于液压系统、钻井液处理系统等在低温下并不适用,所以都需要重新设计;另外考虑到传统钻机质量大、功耗大、保障不便等因素,在极地应用有诸多不利因素。针对极地冰下基岩取心钻探的技术与装备正在持续改进与创新。

3.2 国内研究进展

吉林大学极地研究中心自 2010 年成立以来,一直致力于极地钻探技术与装备的研究,特别是针对国际上视为热点的冰下基岩钻探装备的研发。2014 年研究中心承担了国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制专项“极地深冰下基岩无钻杆取芯钻探装备”,正式开启了我国的极地深冰下基岩钻探技术研究。针对南极甘布尔采夫山脉基岩取心钻探地点夏季 $-30\sim-50$ °C 的超低温气候、地理位置偏远、后勤保障困难等条件,设计了可移动式、模块化的钻探系统,为钻探施工提供地表所需的工作舱、钻塔、绞车、控制系统、冰屑与钻井液处理系统、发电机组、设备维修工作台等,所有设施与设备集成于两个

工作舱(钻探舱和发电及维修舱)中,如图9所示。工作舱在运输过程中可以由雪地车牵引行走在冰盖上,大大降低了设备转场运输的难度和成本。

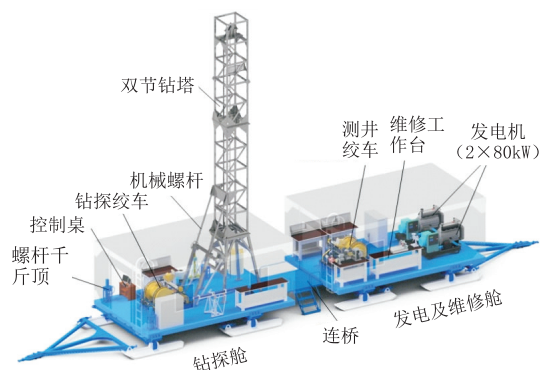
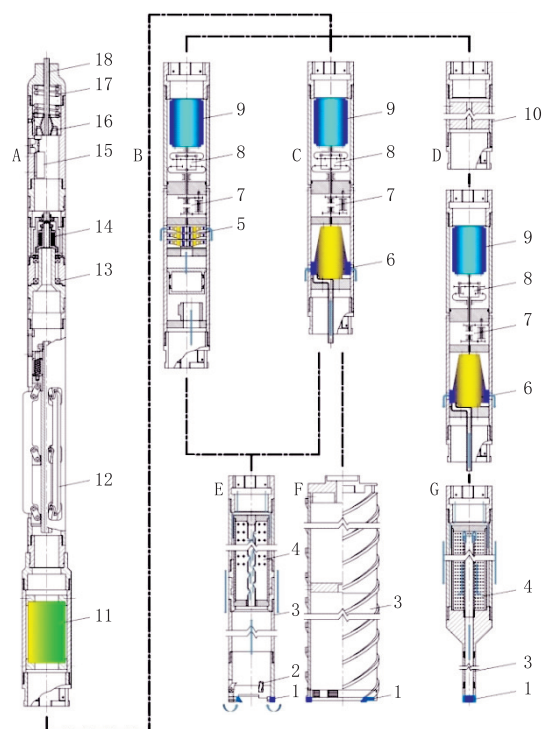


图9 极地深冰下无钻杆取心钻探装备系统效果图^[61]
Fig.9 System structure of non-pipe core drilling equipment for subglacial bedrock in the polar regions^[61]

整个系统主要由6个子系统组成:(1)多功能无钻杆式孔底驱动机械钻具子系统;(2)快速升降钻具子系统(绞车、天车、铠装电缆等);(3)钻探状态实时检测控制系统(传感器、控制阀等);(4)低温测井子系统;(5)移动式工作舱子系统(舱体、钻塔、发电机、燃料等);(6)低温钻井液及其它辅助装置子系统(钻井液制备和储存装置,岩心和冰屑辅助提取装置等)。

该系统钻具采用了铠装电缆式电动机械钻具,代替传统钻杆进行起下钻作业,并通过对新式反扭系统、冰岩界面复杂地质条件取心钻头和冰下基岩仿生金刚石取心钻头进行研究,研制出了能够钻进深冰及冰下基岩的模块化无钻杆式电动机械取心钻具,能够针对冰层、冰岩夹层和基岩等不同地层更换相应的功能模块后完成安全高效取心钻进。为解决上部积雪层钻井液容易漏失、冰岩夹层和冰下基岩反扭系统容易失效以及冰下基岩钻进钻压和扭矩大、循环系统排渣困难等技术难题,研发多功能无钻杆式孔底驱动机械钻具子系统,模块化钻具结构如图10所示,包括积雪—雪冰层空气反循环取心钻进和大直径螺旋取心钻进模块(A+B+E与A+C+F)、冰层钻进模块(A+C+E)和冰岩夹层及冰下基岩取心钻进模块(A+D+G)^[62]。

该钻探系统于中国第35次南极科学考察期间(2018—2019 南极工作季),在距离中国南极中山站约12 km的达尔克冰川边缘的冰盖上进行了成功试钻应用,项目组成员耗时近2个月,将设备部件进

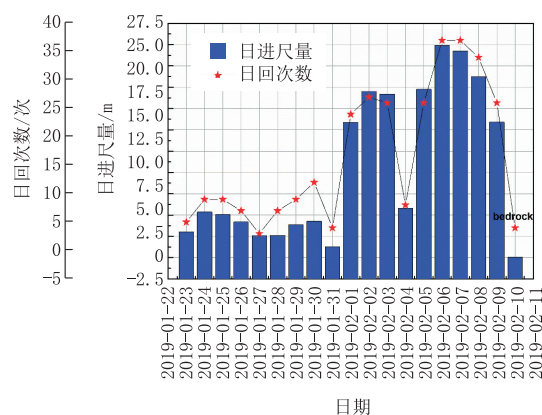
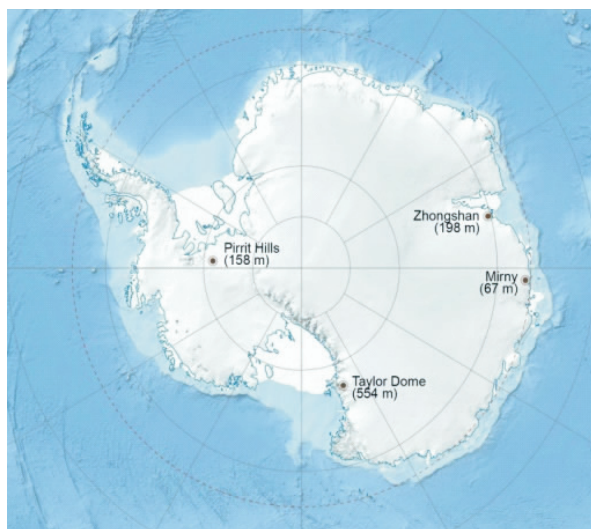


1—钻头;2—冰芯卡断器;3—冰—岩心管;4—冰屑室;5—驱动部分;6—钻井液泵;7—减速机构;8—联轴器;9—电机;10—配重;11—高压电气舱;12—反扭装置;13—单动机;14—滑环;15—位移传感器;16—压紧螺母;17—弹簧;18—电缆

图10 模块化多功能无钻杆式孔底驱动机械钻具结构示意图^[62]
Fig.10 Structural diagram of the modular multi-function non-pipe downhole driven mechanical drill^[62]

行组装,并通过海冰运输方式将可移动式钻探系统与辅助物资及设备运输至冰盖,经过航空雷达探测拟钻探区域冰下地形,确定了一处冰厚近200 m的地点作为钻探地点,经过设备联调测试,确保设备运行正常,于2019年1月23日顺利开钻,并历时18 d钻穿191 m厚的冰盖以及8 m厚的冰岩夹层,钻至冰岩界面,随后更换基岩钻钻具及钻头,成功钻取6 cm冰下基岩岩心^[62]。整个冰钻及冰下基岩钻日进尺量及回次数如图11所示,图12为所钻取的冰下基岩岩心和基岩钻钻头。

此次南极考察,是我国首次将自主研发的极地深冰下基岩无钻杆取心钻探装备应用于南极深冰及冰下基岩钻探,成功钻穿近200 m冰盖,获取连续冰芯,并成功钻取冰下基岩岩心样品,也是我国首次钻取南极冰下基岩岩心样品,更是东南极近60年来首次获取冰下基岩,同时也是国际上在南极钻取的第4支冰下基岩样品^[62-63](图13),我国成为继俄

图 11 日进尺量及回次数统计^[62]Fig.11 Summary of daily drilling amount and runs^[62]图 12 钻取的冰下基岩岩心及基岩钻头^[62]Fig.12 Subglacial bedrock cores and the bedrock drill bit^[62]图 13 目前在南极成功钻取冰下基岩岩心位置示意图^[61]Fig.13 Position of successful bedrock core drilling in Antarctica^[61]

罗斯(前苏联)、美国之后第 3 个有能力并且实现在南极获取冰下基岩样品的国家。装备的研发和此次成功试钻,突破了可移动式集成化工作舱、模块化铠

装电缆式电动机械钻具、冰岩界面及岩层取心钻头 etc 冰下基岩取心钻探关键技术。试钻的成功为我国深入开展极地钻探工程提供了强有力的技术支撑。

4 极地冰下水环境钻探采样技术研究进展

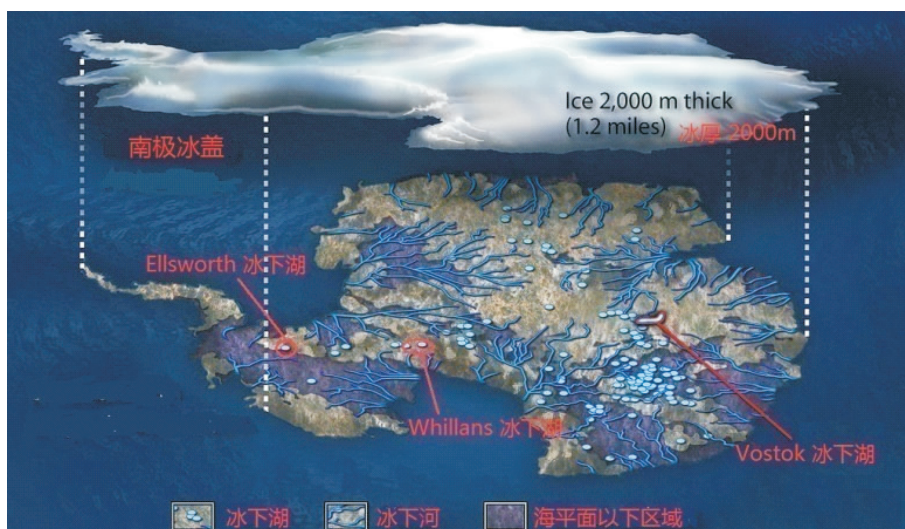
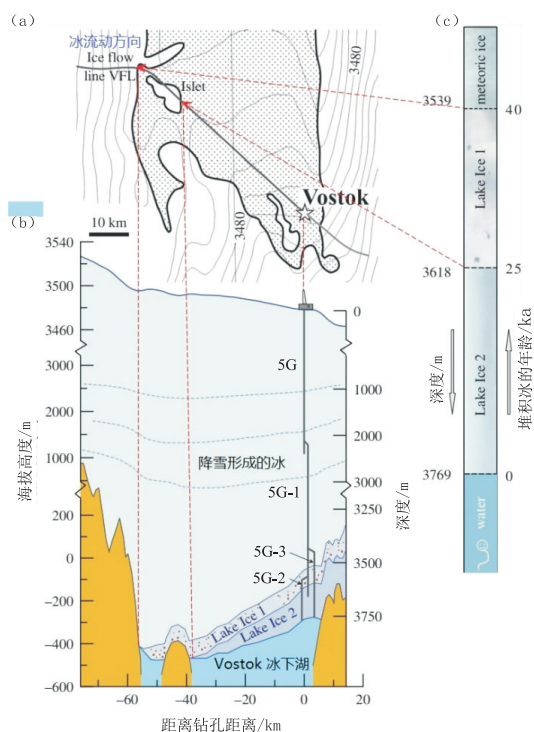
冰下湖是位于冰盖基底,处于冰和冰下地层之间的独立的水体^[11],目前已在南极冰盖下探测出超过 400 个冰下湖^[12],冰下湖及水环境被认为是微生物的极端栖息地,另外湖底沉积物可能记录着年代更长远的气候记录,冰下湖运动历史。为此,冰下水环境钻探采样与观测技术是目前极地钻探技术研究的热点。

4.1 国外研究进展

国外开展冰下湖钻进、参数测量与取样研究,主要以探测冰下湖内是否存在微生物及其存在形式、反演上新世后西南极冰盖历史、获取古环境和古气候记录、探究特殊生存环境下物种多样性和进化过程及为探寻其他星球上生命形式提供技术支持为主要目的^[10]。俄罗斯、美国和英国分别在南极冰下 Vostok、Willams、Mercer 和 Ellsworth 开展了南极冰下湖及水环境探测研究计划^[64],如图 14 所示。所使用的钻探方法包括电动机械钻、热水钻、热熔钻等。

Vostok 冰下湖是南极探明面积最大的冰下湖,面积约为 12500 km²,位于俄罗斯南极东方站(Vostok Station)所在位置冰盖底部,东方站冰盖厚 3500~4000 m^[64-65]。1998 年 2 月,东方站深冰芯钻探 5G-1 孔钻至湖水堆积冰(图 15),钻深 3539 m,第一次完成了东方湖的水样采集。2006 年,在 3600 m 深度开始实施 5G-2 分支孔的钻进,于 2012 年初探底至湖水表面,最终钻至 3769 m,冰下湖水体由于存在的压力,从钻孔底部上返 363 m,并在孔中结冰^[64]。2016 年,又在孔深 3458 m 处实施了第二次分支孔(5G-3)的钻进,钻至 3769.13 m 时,冰下水体又一次在压力作用下进入钻孔,上返 70 m,并再次结冰^[64]。最后,再次下钻,在湖水冻结的冰中钻进,获取了 12 m 长的湖水冻结冰^[25]。

通过对 2 次分支孔的分析,上部堆积冰(图 15 中深度 3539~3618 m)中发现冰下湖底沉积物,下部堆积冰(图 15 中深度 3618~3769 m)较为洁净,没有杂质颗粒考虑是深层冰下湖水体上返结冰形成^[25]。至此,俄罗斯成为首个深冰钻触及南极冰下

图 14 南极冰下湖及冰下水系分布^[12]Fig.14 Subglacial lake and hydrologic distribution in Antarctica^[12]

(a) Vostok 冰下湖南部及穿过 5G 钻孔的冰流动线;(b)沿冰流动线的垂直冰盖剖面示意图;(c)基于 5G-1、5G-2 和 5G-3 冰芯分析的 Vostok 冰下湖堆积冰垂直剖面示意图

图 15 东方站深冰芯钻探钻孔及东方湖堆积冰空间与时间分布示意图^[25,64]

Fig.15 Diagram of deep ice core drill boreholes in Vostok Station and distribution of accumulated ice in space and time at Vostok lake^[25,64]

湖的国家,然而以航空煤油为主要材料的钻井液会对冰下湖水造成污染^[64]。为此无污染的冰下湖钻进与采样技术成为冰下环境观测的技术热点,后续

美国和英国将热水钻结合清洁系统用于了冰下湖探测。

2013 年 1 月,美国 Whillans 冰流冰下探测计划(WISSARD)将带有清洁设备的热水钻系统应用于南极 Whillans 冰下湖取样钻探,取得无污染的冰下湖样品和沉积物,这是首次成功钻取洁净的南极冰下水系样品^[13,58,64]。Mercer 冰下湖与 Whillans 冰下湖一样都位于西南极 Ross 冰架边缘,2018 年 12 月 28 日,美国 SALSA 项目团队采用同一套热水钻系统钻穿冰盖,采取了湖水样和沉积物样品,同时还下入了 CTD 和 ROV 等仪器对湖水进行了物化参数测量及影像观测,他们在沉积物样品里还发现微小动物尸体^[66]。

Ellsworth 冰下湖同样地处西南极。2012 年 12 月,英国南极局(BAS)应用清洁深冰热水钻系统对 Ellsworth 冰下湖进行钻探,深度达到 300 m 时,出现了钻进用的主孔和取水用的副孔没有形成连接的情况,最终由于没有足够的热水,导致钻进停止。

可以说国外对极地冰下水环境的探测与取样技术研究开展较早,所采用的方法不尽相同,取得了一些突破,但在高效、无污染采样方面仍有待提高,目前俄、美、英等极地钻探大国仍在继续开展冰下水环境采样技术与装备的攻关研发。

4.2 国内研究进展

2016 年,中国极地研究中心作为牵头单位,吉林大学作为课题承担单位之一,开展了国家重点研发计划专项“极地环境观测/探测技术与装备研发”

项目的研究工作,其中“南极冰下湖无污染钻进采样与观测系统研发”是该研发计划的重要组成部分。以“可回收式自动冰下环境探测取样装置”为核心,构建一套无污染的、可自行钻进并自行回收的冰下湖探测系统,拟在南极冰盖进行钻进采样和观测试验,为南极冰下湖研究提供关键技术装备。

如前文所述,美国等国采用清洁热水钻系统成孔的方式进行冰下水环境探测与采样可以比较有效地防止水体被污染,但仍存在一定风险。为全面实现无污染钻进、观测与采样,需确保冰下湖与地表环境隔绝,为此提出“可回收型全自动冰下环境探测器”^[64,67],如图 16 所示。

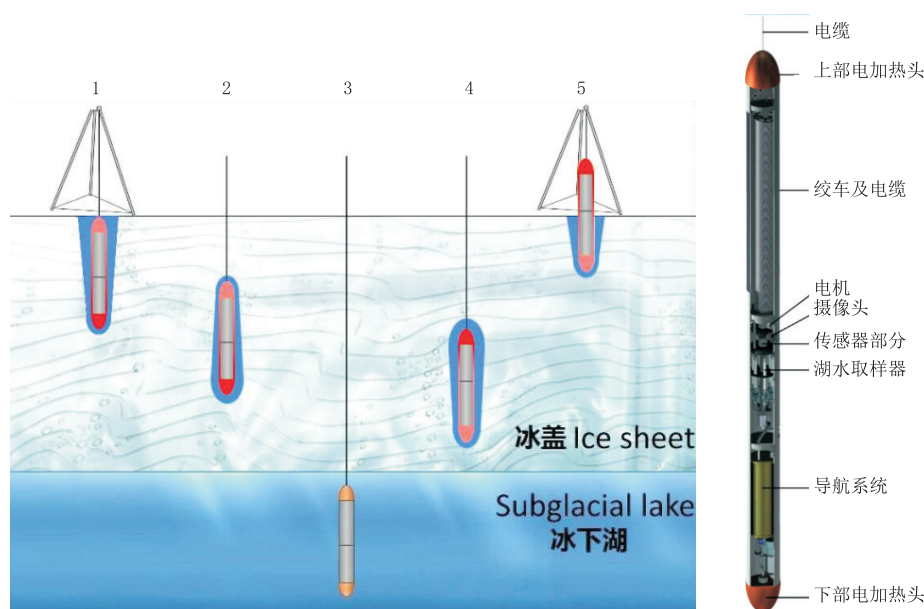


图 16 可回收型全自动冰下环境探测器结构示意图及工作原理^[67]

Fig.16 Structural diagram and principle of the recoverable autonomous sonde for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes^[67]

探测器主要包括热熔钻头与梯度加热钻具、钻探过程检测与控制单元、内嵌式绞车系统和多参数观测采样科学载荷平台^[64]。钻头与梯度加热钻具主要包括顶部和底部两个热熔钻头和钻具侧壁加热部件,热熔钻头在向下钻进和上返过程进行融冰,侧壁加热部件可使钻具在整个钻进和返回过程中不与钻孔孔壁冻结。钻进过程中边钻进,边冻结,如图 16 所示。首先将经过灭菌处理的钻具吊装起来,开始钻进后,底部热熔钻头开始融冰钻进,钻具将冰融化形成钻孔,随着钻进过程,钻具逐渐进入钻孔内,孔内上部融水逐渐结冰,钻孔逐渐封闭,从而不会引起污染,缠绕在钻具内嵌式绞车中的高强度电缆(电力供给,同时作为载波通讯信号传输通道)持续从内嵌式绞车中放出,当钻具钻至冰下湖界面,并逐渐探入湖水内部,采样与观测机构开始进行水体参数(如压力、温度、电导率和 pH 值等)测量,并采集水样,取样与观测完成后,启动上返钻进模式,顶部热熔钻头开始工作,同时侧壁加热单元配合加热,内嵌式绞车回收缠绕电缆,使钻具自行返回地表。

上述后 3 个系统均安装于探测器内部。内嵌式绞车系统置于钻具上部,负责钻具的下放和提升,钻探过程检测与控制单元包括孔内和地表两部分,孔内部分进行整个钻探、观测、采样过程的钻进参数采集,并对热熔钻头加热部件和绞车系统进行控制。多参数观测采样科学载荷平台,包括水体取样器、水参数传感器和低温摄像系统,实现冰下湖的湖水取样及物化参数观测^[64]。

目前该探测器已经完成设计加工和实验室联调测试,计划于 2020 年中国第 37 次南极科学考察期间将整装系统运抵南极进行试钻应用。

该可回收式南极冰下湖无污染钻进采样与观测系统突破了传统的冰层钻进及冰下水体取样的理念,以创新性思维进行设备的设计与技术研发,尽可能地降低冰下水体污染的可能,在钻具梯度加热、内嵌式绞车、小直径高强度电缆、钻进与采样自动检测与控制系统等关键技术上取得了巨大突破,为我国未来大规模开展极地深冰下环境探测奠定了坚实的技术基础。

5 结语与建议

极区环境变化的研究是人类认识地球、保护生态的关键所在,其中冰盖、冰架、海洋、大气、岩石圈的耦合变化机理是极地科学的前沿热点问题。通过对极地冰盖及其底部的探索与观测可以揭示极区变化的主要物理、化学、生物、地质过程,可以深入了解极地环境变化对全球的影响以及探索,并对地质资源的潜力进行评估。

目前极地科学领域所面临的重大科学问题和研究趋势主要在于以下几个方面:一是冰盖演化、稳定性及海平面变化;二是冰芯科学与古气候、古环境演化;三是冰下水环境与极端生命演化;四是冰下地质过程等。解决上述问题依赖于先进的钻探取样技术,目前我国已经逐步开展极地探测与采样关键技术攻关和装备研发。

(1)针对极地冰盖深冰芯钻探技术与装备,需要在快速钻进方面和装备轻便化方面进行探索,以便可以在南极冰盖更广泛和便捷地开展大规模深冰芯钻探活动。

(2)针对极地冰架热水钻技术与装备,需要在热水取心钻方面以及系统轻型化方面进行改进和优化,使热水钻作为快速取心钻探手段投入到大规模极地冰架调查活动中成为可能。

(3)针对极地冰下基岩钻探技术与装备,需要在冰岩夹层及冰下基岩取心钻探和孔底驱动循环、暖冰层取心钻进等方面进行深入研究,解决条件复杂的冰岩界面和冰下基岩钻探技术难题。

(4)针对极地冰下水环境钻探采样技术与装备,需要在无污染钻进采样与装备自动化等方面继续开展深入研究,使长期野外无人值守、无污染钻探与取样成为现实。

针对极地冰钻技术的研究必将为极地科学探索与发展提供强有力的技术及装备支撑,这也符合我国建设海洋强国、极地强国和“冰上丝绸之路”的必然要求,对我国现代化建设具有极其重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 陈大可. 极地科学基础研究优先发展领域[Z]. 极地前沿科学问题与钻探技术学术研讨会, 中国地质大学(北京), 2019.
CHEN Dake. Priority areas of polar science fundamental research[Z]. Symposium on Polar Frontier Science and Drilling Technology. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [2] Pavel G Talalay. Mechanical Ice Drilling Technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.

- [3] Fuji Y, Azuma N, Tanaka Y, et al. Deep ice coring at Dome Fuji station, Antarctica[J]. ANTARCTIC RECORD-TOKYO-O, 1999, 43: 162-210.
- [4] 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.
- [5] Zhang N, An C, Fan X, et al. Chinese First Deep Ice-Core Drilling Project DK-1 at Dome A, Antarctica (2011-2013): progress and performance[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55 (68): 88-98.
- [6] 刘小汉. 全球视野下的中国南极陆地系统科学[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(11): 43-49.
LIU Xiaohan. China's Antarctic land system science from the global perspective[J]. Frontiers, 2017(11): 43-49.
- [7] Livingstone S J, Cofaigh C O, Stokes C R, et al. Antarctic palaeo-ice streams[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 111(1): 90-128.
- [8] Mercer J H. West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster[J]. Nature, 1978, 271(5643): 321-325.
- [9] Pritchard H D, Vaughan D G. Widespread acceleration of tide-water glaciers on the Antarctic Peninsula[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112: F03S29.
- [10] Mowlem M, Saw K, Brown R, et al. Probe technologies for clean sampling and measurement of subglacial lakes[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2016, 374 (2059): 20150267.
- [11] Siegert M J. Antarctic subglacial lakes[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 50(1): 29-50.
- [12] Wright A, Siegert M. A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes[J]. Antarctic Science, 2012, 24(6): 659-664.
- [13] Hodson T O, Powell R D, Brachfeld S A, et al. Physical processes in Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: inferences from sediment cores[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 444: 56-63.
- [14] Bentley C R, Koci B R. Drilling to the beds of the Greenland and Antarctic ice sheets: a review[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 1-9.
- [15] 王士猛, 谢爱红, 效存德, 等. 4000m DISC 深冰芯钻机概述[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 701-709.
WANG Shimeng, XIE Aihong, XIAO Cunde, et al. An overview of the 4000m electromechanical machine for deep ice-sheet coring (DISC)[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 701-709.
- [16] Shturmakov A J, Lebar D A, Mason W P, et al. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 1. Design concepts[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 28-34.
- [17] Mason W P, Shturmakov A J, Johnson J A, et al. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanical design[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 35-40.
- [18] Mortensen N B, Sendelbach P J, Shturmakov A J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 3. Control, electrical and electronics design[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 41-50.

- [19] Shturmakov A J, Sendelbach P J. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 4. Drill cable [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 47(1): 51–53.
- [20] Johnson J A, Mason W P, Shturmakov A J, et al. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 5. Experience during Greenland field testing [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 47(1): 54–60.
- [21] 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.
- [22] Souney J M, Twickler M S, Hargreaves G M, et al. Core handling and processing for the WAIS Divide ice-core project [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68): 15–26.
- [23] 范晓鹏. 极地冰下基岩取心钻具反扭装置与钻头钻压平衡关系研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
FAN Xiaopeng. Research on the balance between subglacial bedrock drilling parameters and capabilities of antitorque system of cable-suspended electromechanical drill [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [24] Johnsen S J, Hansen S B, Sheldon S G, et al. The Hans Tausen drill: design, performance, further developments and some lessons learned [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 47(1): 89–98.
- [25] Lipenkov V Y, Ekaykin A A, Polyakova E V, et al. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2016, 374(2059): 20140303.
- [26] Motoyama H. The Second Deep Ice Coring Project at Dome Fuji, Antarctica [J]. *Scientific Drilling*, 2007, 5(5): 67.
- [27] 王士猛, 效存德, 谢爱红, 等. NEEM 计划 2537.36m 透底深冰芯的钻取与成果概述 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 589–594.
WANG Shimeng, XIAO Cunde, XIE Aihong, et al. An ice core to bedrock, 2537.36m in Depth, of the NEEM International Project [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 589–594.
- [28] 郭正堂. 南极深钻初步调研 [Z]. 极地前沿科学问题与钻探技术学术研讨会. 中国地质大学(北京), 2019.
GUO Zhengtang. Preliminary investigations of deep drilling in Antarctica [Z]. Symposium on Polar Frontier Science and Drilling Technology. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [29] 张楠. 东格陵兰深冰芯计划概况 [Z]. 极地前沿科学问题与钻探技术学术研讨会. 中国地质大学(北京), 2019.
ZHANG Nan. General situation of East Greenland deep ice core drilling project [Z]. Symposium on Polar Frontier Science and Drilling Technology. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [30] 孙波, 崔祥斌. 2007/2008 年度中国南极冰穹 A 考察新进展 [J]. *极地研究*, 2008, 20(4): 371–378.
SUN Bo, CUI Xiangbin. Progress on Chinese expedition of Antarctic Dome Argus in 2007/2008 [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2008, 20(4): 371–378.
- [31] Hou S, Li Y, Xiao C, et al. Recent accumulation rate at Dome A, Antarctica [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(3): 428–431.
- [32] Xiao C, Li Y, Hou S, et al. Preliminary evidence indicating Dome A (Antarctica) satisfying preconditions for drilling the oldest ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 102–106.
- [33] 唐学远, 孙波, 李院生, 等. 冰穹 A 冰川学研究进展及深冰芯计划展望 [J]. *极地研究*, 2012, 24(1): 77–86.
TANG Xueyuan, SUN Bo, LI Yuansheng, et al. Review of the glaciological research progress and future development of deep ice core plan at Dome A, East Antarctica [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(1): 77–86.
- [34] Nature (News in Brief). China set to drill for Antarctica's oldest ice [J]. *Nature*, 2006, 444: 255.
- [35] Nan ZHANG, Yuansheng LI, Zhengyi HU, et al. Progress of Chinese Deep Ice Core Drilling at Dome A: 2014–2019 [Z]. 8th Ice Drill Symposium, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, 2019: 9–10.
- [36] Nan ZHANG, Yuansheng LI, Guitao SHI, et al. Chinese Deep Ice Core Drilling at Dome A, Antarctica: Progress and problems [Z]. SCAR and IASC Conference POLAR2018, Davos, Switzerland, 2018.
- [37] Makinson K, Pearce D, Hodgson DA, 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.
- [38] 王如生, 达拉拉伊, 李院生, 等. 国际冰层热水钻研究进展与面临的挑战 [C]// 中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集, 2015: 767–772.
WANG Rusheng, Pavel Talalay, LI Yuansheng, et al. Research progress and challenges of the worldwide hot-water drilling [C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conferences, 2015: 767–772.
- [39] Koci B R. Hot water drilling in Antarctic firn, and freezing rates in water-filled boreholes [R]. NEBRASKA UNIV LINCOLN, 1984.
- [40] 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.
- [41] Østerhus, Svein, Schröder M, et al. Long-term observing system for the oceanic regime of Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica [C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [42] Benson T, Cherwinka J, Duvernois M, et al. IceCube Enhanced Hot Water Drill functional description [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68): 105–114.
- [43] Verrall R, Baade D. A simple hot-water drill for penetrating ice shelves [R]. DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT PACIFIC VICTORIA (BRITISH COLUMBIA), 1984.
- [44] Marshall P S, Kuivinen K C. Polar Ice Coring Office Antarctic field activities, 1979–1980 [J]. *Polar Record*, 1981, 20(129): 561–562.
- [45] Koci B, Bindschadler R. Hot-water drilling on Crary Ice Rise, Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 1989, 12: 214.
- [46] Iken A, Echelmeyer K, Harrison W D. A light-weight hot water drill for large depth: experiences with drilling on Ja-

- kobshavns glacier, Greenland[C]// Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology, 1988, 10:14.
- [47] Makinson K. Hot water drilling on Ronne Ice Shelf 1995/96 [J]. Filchner Ronne Ice Shelf Programme Report, 1996(10): 55—57.
- [48] Craven M, Elcheikh A, Brand R, et al. Hot water drilling on the Amery Ice Shelf-the AMISOR project [J]. Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue, 2002, 56: 217—225.
- [49] Robinson N J, Williams M J M, Barrett P J, et al. Observations of flow and ice-ocean interaction beneath the McMurdo Ice Shelf, Antarctica [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115: C03025.
- [50] Koci B. Wotan: a drill for ice cube [J]. Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue, 2002, 56: 209—216.
- [51] Prisco 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.
- [52] 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(2059): 20140305.
- [53] 王茂海, 李纲, 沈颖, 等. 冰川-2型热水钻研制及其在海螺沟冰川上的应用 [J]. 冰川冻土, 1996(S1): 375—379.
- WANG Maohai, LI Gang, SHEN Ying, et al. Development of the hot waterjet of Model Glacier-2 and its application on the Hailuoguo Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996(S1): 375—379.
- [54] 姚友明. 我国突破热水钻机技术为南极科考增利器 [N]. 新华社, 2017-04-05.
- YAO Youming. Chinese breakthrough in hot water drilling technology contributes a new tool for CHINARE [N]. The Xinhua News Agency, 2017-04-05.
- [55] Ueda H T, Garfield D E. DRILLING THROUGH THE GREENLAND ICE SHEET [J]. Acta Crystallographica, 1968, 29(1): 26—31.
- [56] Kudryashov, B. B. Vasiliev, N. I. Talalay, P. G. KEMS-112 electromechanical ice core drill [J]. Memoirs of National Institute of Polar Research Special Issue, 1994, 49: 138—152.
- [57] Gow, A. J., Meese, D. A. Nature of basal debris in the GISP2 and Byrd ice cores and its relevance to bed processes [J]. Annals of Glaciology, 1996, 22: 134—140.
- [58] Ueda H T, Talalay P G. Fifty Years of Soviet and Russian Drilling Activity in Polar and Non-Polar Ice: A Chronological History [R]. ERDC/CRREL TR-07-20, 1—130. <http://hdl.handle.net/11681/5303>, 2007.
- [59] Steig E J, Morse D L, Waddington E D, et al. Wisconsin and Holocene Climate History from an Ice Core at Taylor Dome, Western Ross Embayment, Antarctica [J]. Geografiska Annaler, 2000, 82(2-3): 213—235.
- [60] Goodge J W, Severinghaus J P. Rapid Access Ice Drill: A New Tool for Exploration of the Deep Antarctic Ice Sheets and Subglacial Geology [J]. Journal of Glaciology, 2016, 62(236): 1—16.
- [61] Pavel Talalay. Future opportunities of scientific drilling in Antarctica [Z]. 极地前沿科学问题与钻探技术学术研讨会. 中国地质大学(北京), 2019.
- Pavel Talalay. Future opportunities of scientific drilling in Antarctica [Z]. Symposium on Polar Frontier Science and Drilling Technology. China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [62] Pavel Talalay, Xingchen Li, Nan Zhang, et al. (In press). Antarctic subglacial drilling rig: Part II. IBED ice and bed-rock electromechanical drill [J]. Annals of Glaciology.
- [63] Alexandra Witze. Chinese crew extract first rock from beneath East Antarctic ice in 60 years [J]. Nature, News, 2019-03-05: 13—14.
- [64] 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 [C]// 中国地质学会探矿工程专业委员会, 第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 2017: 16—22.
- SUN Youhong, LI Bing, FAN Xiaopeng, et al. Research progress of drilling and sampling technologies in Antarctic subglacial lake [C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Nineteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conferences, 2017: 16—22.
- [65] Leitchenkov G L, Antonov A V, Luneov P I, et al. Geology and environments of subglacial Lake Vostok [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2016, 374(2059): 20140302.
- [66] Fox, D. Exclusive: Tiny animal carcasses found in buried Antarctic lake [J]. Nature, 2019, 565(7740): 405.
- [67] Talalay P G, Zagorodnov 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.

致谢: 本文的研究得到国家自然科学基金专项“极地冰盖前沿科学问题及探测技术”项目(编号: 41942047)、国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制专项“极地深冰下无钻杆取芯钻探装备”项目(编号: 41327804)、科技部国家重点研发计划“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)、原国家海洋局“南北极环境综合考察与评估专项”课题 04—02“南极周边海域与大陆资源潜力综合评估”项目(编号: CHINARE 2014—04—02、CHINARE 2015—04—02、CHINARE 2016—04—02)及课题 02—02“2014—2016 年度冰盖断面及格罗夫山综合考察与冰穹 A 深冰芯钻探”项目(编号: CHINARE 2014—02—02、CHINARE 2015—02—02、CHINARE 2016—02—02)、“吉林大学科研创新团队”项目(编号: 2017TD-24), 以及国家自然科学基金青年基金“基于介电剖面法的极地冰芯电学性质测量机理与技术优化研究”项目(编号: 41406210)的支持, 在此笔者一并表示感谢。

(编辑 韩丽丽)