

南极东方站深冰层及冰下湖钻探技术

王秋雯^{1,2}, 李冰^{1,4}, Pavel Talalay^{1,3}, 孙友宏^{1,4}, 张楠^{1,3},
宫达^{1,3}, 杨阳^{1,3}, 范晓鹏^{*1,3,5}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026;

2. 油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室, 吉林 长春 130021;

3. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026; 4. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

5. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要:自1970年至今,前苏联和俄罗斯在南极东方站持续进行了近50年的冰层钻探活动,先后攻克了包含粒雪层、冰层、冰岩夹层和湖水冻结冰的复杂冰层钻进难题,逐渐形成了一套集热融取芯钻探、电动机械取芯钻探和分支孔钻探等为一体的深冰芯钻探技术。创造了冰层最深干孔钻进深度记录(952.4 m)、最深热融取芯钻进记录(2755 m)、最深冰芯钻探记录(3769.3 m),累计进尺达13000 m,并获取了总长超46 m的含湖水冻结冰样品的冰芯。东方站的钻探活动对极地冰层钻探技术的发展起到了巨大的推动和引领作用,同时积累了宝贵的深冰钻探经验。通过对东方站深冰钻探技术的系统梳理,将为我国正在实施的深冰芯钻探和即将开启的冰下湖科学钻探提供重要的借鉴。

关键词:南极;东方站;深冰芯;热融钻探;电动机械钻探;冰下湖

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)09-0035-12

Drilling technology for deep ice and the subglacial lake at Vostok Station, Antarctica

WANG Qiuwen^{1,2}, LI Bing^{1,4}, Pavel Talalay^{1,3}, SUN Youhong^{1,4}, ZHANG Nan^{1,3},
GONG Da^{1,3}, YANG Yang^{1,3}, FAN Xiaopeng^{*1,3,5}

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

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130021, China;

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

4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

5. College of Earth Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Since 1970, the former Soviet Union and Russia have been drilling for nearly 50 years at Vostok Station in Antarctica. It has overcome the drilling problems with complex ice layers including snow layer, ice layer, debris ice, refrozen lake ice; formed a set of deep ice core drilling technology integrating thermal core drilling, electro-mechanical core drilling and offset hole drilling; and created the dry hole drilling depth record (952.4m), the thermal drilling depth

收稿日期:2020-12-19; 修回日期:2021-08-19 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.09.004

基金项目:科技部国家重点研发计划“南极冰下湖无污染钻进采样与观测系统研发”(编号:2016YFC1400302);国家自然科学基金专项“南极冰下湖科学钻探选址及冰下过程研究”(编号:41941005)、“极地冰盖前沿科学问题及探测技术”(编号:41942047)

作者简介:王秋雯,女,满族,1985年生,工程师,主要从事复杂条件钻进与采样技术和油页岩原位转化与钻采技术研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,wqw@jlu.edu.cn。

通信作者:范晓鹏,男,汉族,1986年生,副教授,博士生导师,主要从事极地与海洋钻探技术和装备研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,hexe@163.com,fxp@jlu.edu.cn。

引用格式:王秋雯,李冰,Pavel Talalay,等.南极东方站深冰层及冰下湖钻探技术[J].钻探工程,2021,48(9):35-46.

WANG Qiuwen, LI Bing, Pavel Talalay, et al. Drilling technology for deep ice and the subglacial lake at Vostok Station, Antarctica [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 35-46.

record (2755m) and the ice core drilling depth record (3769.3m). The cumulative drilling footage was over 13000m, and the refrozen lake ice core with a total length of more than 46m were obtained. The drilling activities at Vostok Station have played a great role in promoting and leading the development of polar ice drilling technology, and accumulated valuable deep ice core drilling experience. This paper conducts a systematic review of deep ice drilling technology at Vostok Station to provide important reference for China's ongoing deep ice core drilling and the upcoming subglacial lake exploration.

Key words: Antarctica; Vostok Station; deep ice core; thermal drilling; electro-mechanical drilling; subglacial lake

0 引言

东方站(78°28'S, 106°48'E)位于东南极中心区域,建造于1957年,海拔3488 m,冰盖厚度达3760 m^[1],其地理位置如图1所示。自1970年以来,由前苏联和俄罗斯科学家主导在东方站进行了大量的冰层钻探活动,先后创造了最深干孔钻进深度记录(952 m)、最深热融取芯钻进记录(2755 m)、最深冰芯钻探记录(3769.3 m)^[2]。在东方站钻取的冰芯首次揭示了在10万年气候周期中全球气候变化与地球大气中CO₂和CH₄浓度之间的密切关系^[1],从而开启了深冰芯研究的热潮。20世纪90年代中期,随着位于东方站冰盖下的大型冰下湖(200 km×80 km)^[3]的发现,开启了南极冰下湖泊探索的新时代,人们迫切希望通过对冰下湖泊的探测寻找未知的生

命形式以及研究冰盖的形成和演化过程^[4]。2012年俄罗斯科学家通过冰芯钻探揭开了东方湖的神秘面纱,获取了总长34.1 m的湖水重新冻结冰芯^[5]。俄罗斯也因此成为全球首个钻穿冰下湖并获取湖冰样品的国家。在东方站进行的钻探活动为极地冰层钻探技术的发展起到了巨大的推动和引领作用,苏联和俄罗斯科学家及工程师也为此付出了艰苦卓越的努力,同时获取了宝贵的深冰层钻探经验。

我国自2011年在Dome A昆仑站正式开始实施深冰芯钻探工程^[6],该地点是国际上公认的有可能获取最古老冰芯的地点之一,截至2020年该钻孔的钻进深度为803.7 m^[4]。2020年,孙波等人通过航空雷达探测,在距我国泰山站100 km附近区域首次发现了规模仅次于东方湖的冰下湖泊^[7]。抢占这两

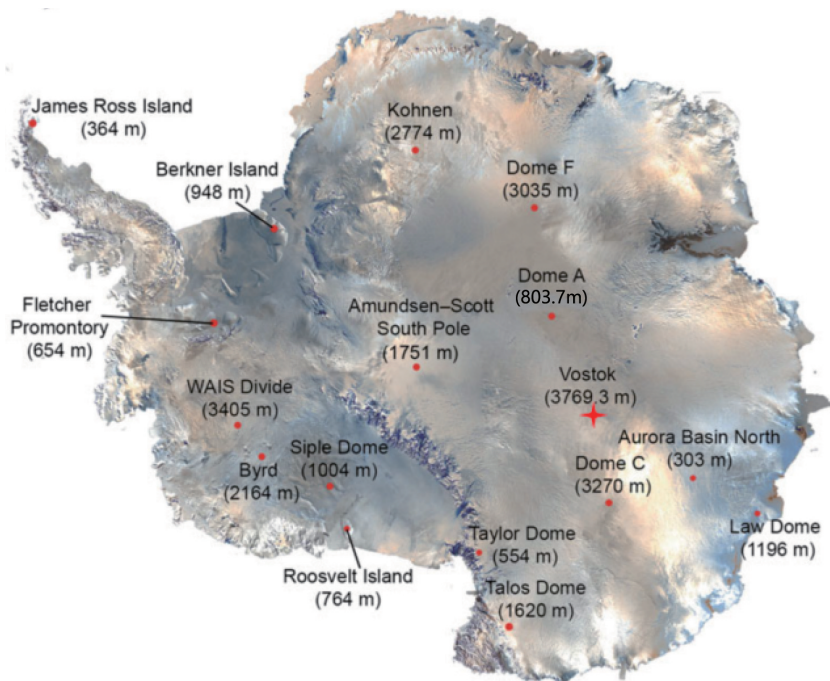


图1 东方站地理位置(图中红星所示)及部分南极深冰芯钻探分布(括号内的数据为钻孔深度)

Fig.1 Location of Vostok Station (marked by red star) and some deep ice core drill sites in Antarctic (the number in brackets is the drilling depth)

块科研“高地”,加速实施和完成我国主导的南极科学钻探计划,将有利于提升我国极地科考综合实力,促进我国从极地大国向极地强国迈进。详细总结东方站深冰层及冰下湖钻探技术、装备和钻探经验,将为我国正在实施的深冰芯钻探和即将开启的冰下湖科学钻探提供重要的借鉴。

1 东方站深冰芯钻探

前苏联在东方站的钻探活动最早可追溯到1958年,由第4次苏联南极考察队实施了热融钻探,

最深钻孔钻至52 m深度,但由于技术原因,所有钻具均被冻结在孔内^[2]。此后苏联南极和北极研究所联合列宁格勒矿业学院先后研制了多种电缆悬挂式冰层取芯钻具,并于1970年开始深冰芯钻探活动,自此之后的40余年,俄罗斯考察队在东方站先后钻进实施了1号钻孔(952 m)、2号钻孔(450.4 m)、3G(3G-1,3G-2)钻孔(2201.7 m)、4G(4G-1,4G-2)钻孔(2546.4 m)和5G(5G-1,5G-2,5G-3,5G-4,5G-5)钻孔(3769.3 m),这些钻孔的结构如图2所示。5G钻孔采用的地表设施如图3所示。

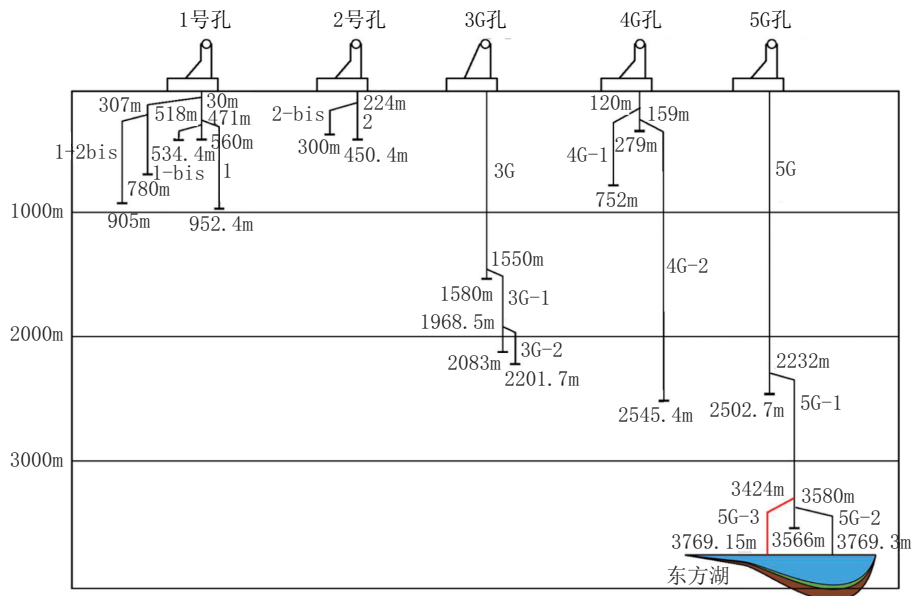


图2 东方站冰层钻孔结构示意图^[1]

Fig.2 Schematic diagram of the borehole structure, Vostok Station



图3 东方站5G钻孔地表钻探设施^[5]

Fig.3 Surface drilling shelter for 5G hole, Vostok Station

1.1 1号、2号、3G和4G钻孔

1号、2号、3G和4G孔主要采用热融钻探方法钻进,施工时间为1970年至1989年。其中1号孔全

孔段均采用TELGA-14型钻具钻进而成,并达到了952.4 m的冰层干孔钻进的最深深度^[8-9]。2号、3G和4G孔上部粒雪层采用TELGA-14型钻具钻进,雪冰过渡层以下冰层采用孔内填充钻井液的TBZS-152M和TVB-112VCh型钻具钻进,在4G-2钻孔底部采用KEMS-135型机械钻具钻进了118 m。这4个钻孔钻进过程中,均在不同深度因孔底融水清除不充分、钻井液不足以平衡上覆冰层压力导致缩径或设备故障出现了卡钻、掉钻事故。为了充分利用原有钻孔继续钻进,在每个钻孔中均进行了大量的分支孔钻进。具体情况参见表1。

1.2 5G钻孔

5G孔开始于1990年2月,粒雪层采用TELGA-14M型钻具钻进。随后改用TBZS-152M型钻

表1 东方站1号、2号、3G和4G钻孔事故汇总^[2,5,8-10]

Table 1 Summary of drilling incidents of No.1, No.2, 3G and 4G holes at Vostok station

钻孔编号	分支孔编号	钻进孔段/m	钻具型号	钻进工艺	平均回次进尺/m	平均钻进速度/(m·h ⁻¹)	事故点深度/m	事故或终孔原因	分支孔造斜方式
1号	1	0~560	TELGA-14		1.73	1.34	560	孔内融水清除不充分,卡钻	造斜器+圆锥钻头短钻具
	1-1	505~534.4			1.6	1.3	534.4	连通旧钻孔	
	1-2	471~625.2			1.6	1.3	952.5	绞车制动装置失效,掉钻,造斜时冰柱卡在30 m处	冰柱+非对称
	1-bis	625.2~952.4	2.3	1.2	提钻过程中,卡钻;钻头与钻具分离,提钻至308 m,卡钻	加热钻头			
	1-2bis	30~780.2	TELGA-14M	热融	2.3	1.2	762		
			307~905			2.5	1.2	905	卡钻风险升高,停钻终孔
2号	2	0~108	TELGA-14M		1.6	1.3	450.4	孔内融水清除不充分,卡钻	/
		108~450.4			1.55	2.6			
	2-bis	224~300	TBZS-152	热融(钻井液)	/	/		为了改善和测试填充钻井液的钻探技术,停钻终孔	
3G	3G	0~112	TELGA-14M	热融			1580	孔内融水清除不充分,卡钻	长度7.1m的TBS-112VCh型钻具
		112~1580	TBZS-152M		2.0	2.0			
	3G-1	1500~2083		热融(钻井液)			2083	火灾烧毁了发电舱和钻探舱,导致钻进中止	/
	3G-2	1968.5~2201.7	TBS-112VCh		1.55	3.7	1943	在1935~1943 m段扩孔过程中,卡钻,终孔	
4G	4G	0~120	TELGA-14M	热融	/	2.0			TELGA-14M型钻具
		120~279	TBZS-152M	热融(钻井液)	2.18	1.9	279	绞车失效,掉钻	
4G	4G-1	120~167	TELGA-14M	热融	/	/	159	连通旧钻孔	/
		167~752			1.8~2.3	1.3			
		159~201	TBZS-152M	热融(钻井液)	/	/	2428.5	钻井液压力不足,导致钻孔缩径,钻进困难	
	4G-2	201~2428.5		机械回	2.05~3.0	1.2~2.1	2431.7	卡钻,5 d后解卡	/
	2428.5~2546.4	KEMS-112	转(钻井液)	2.5	12.5	2437.5	卡钻,2 h后解卡		
						2564.4	卡钻被迫终孔		

注:“/”表示未找到相应数据

具,于1991年12月钻至2502.7 m的深度^[11]。但在该深度由于孔内钻井液压力不足导致钻孔缩径,造成钻具在上行过程中卡在2259 m处。打捞钻具失败后,最终电缆被拉出地面^[11]。向孔内添加HCFC 141b加重剂后,将大约35 m的人造冰芯放在被卡钻具的顶部,作为人造井底,开始分支孔钻进,从而在2232 m处形成一个新的井底。之后采用缩短版TBZS-132型钻具钻进形成了5G-1孔。

使用长度为8 m的TBZS-132型钻具从2249.5 m的深度继续钻至2755.3 m(1993年9月)。随后将孔口段120 m的粒雪层扩孔至220 mm口径,并下入了内外径为165/179 mm的玻璃纤套管,底部带有热融套管靴以封隔粒雪层,防止钻井液漏失。1994年采用电动机械扩孔钻具将2200~2755 m孔段的直径由134 mm扩孔至139 mm,之后采用KEMS-135型钻具继续钻进,至1998年2月,该钻孔深度达到了3623 m^[12]。随后该钻孔的钻探工作进入停滞状态,重点商讨如何穿透冰下湖的方案^[13]。

8年后的2005年,重启5G-1孔钻探工作,采用KEMS-135型钻具继续钻进,至2007年钻进至3666 m,但冰芯管突然掉落孔底,随后尝试采用特制的打捞工具进行打捞,但最终失败。此后在约3600 m深度处,钻进了5G-2分支孔,并于2012年初钻穿冰下湖,深度为3769.3 m。穿透冰盖瞬间,冰下湖水在压力驱动下,沿钻孔上升至3385 m,随后下降至3424 m,并重新冻结。随后沿5G-1孔进行湖冰钻进,但在钻至3458 m深度处,形成了5G-3分支孔,此次钻进共获取了34.1 m湖冰样品。2015年5G-3孔钻至3769.15 m,重新穿透至冰下湖,湖水沿钻孔上升了约71 m,并再次结冰。随后,2015/2016考察季中,再次下钻并获取了12 m长的含湖冰和由钻井液加重剂与湖水气体形成的水合物的冰芯^[4-5],钻探至3731.4 m时,湖冰从冰芯中消失,说明井下已形成分支孔5G-4孔,如图4所示,随即停止了钻探作业^[14]。2018/2019考察季,在3266~3291 m深度内进行了分支孔5G-5钻进,以重复获取年龄约120万年的古老冰芯,但在此之后,5G-1孔几无可能再次进入。

2 东方站深冰钻探装备

东方站深冰钻探采用的钻具主要有4种型号的

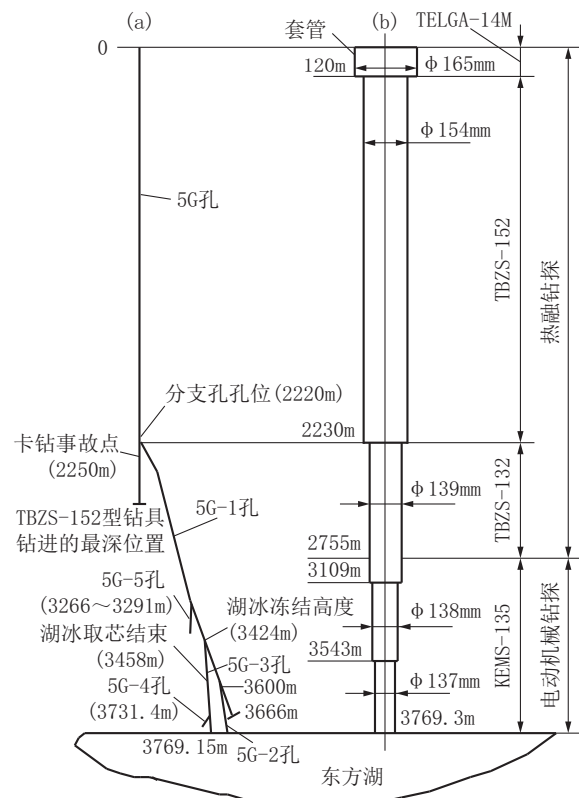


图4 东方站5G钻孔结构

Fig.4 5G structure at Vostok Station

取芯钻具,包括热融钻具和机械式钻具,如图5所示。

2.1 浅层干孔钻进用TELGA-14型热融钻具

TELGA-14型热融取芯钻具是利用电加热环状热融钻头加热冰层从而实现融冰钻进,如图5(a)所示。该钻具采用的热融钻头内外径分别为130 mm和178 mm,由一个铜体组成,铜体内包含1个直径为1.1 mm的镍铬合金线元件,采用陶瓷珠绝缘。热融钻头的导线电阻为15 Ω。钻进产生的融水被固定在冰芯管外表面上的6根吸水管从孔底运移至钻具储水腔内,在回次钻进结束后,冰芯和储水腔内融水将随钻具一同被提拉至地表,并进行清除,因此钻孔内始终保持为“干孔”。安装在钻具储水腔内的两级真空泵在储水腔内形成负压,孔底融水在内外压差作用下随空气流依次通过吸水管、连接器和中心管进入储水腔内。为防止水在吸水管内结冰,沿管路固定了功率为200 W的电热丝。在提钻期间,电热丝以最大功率工作,而热融钻头以较小的功率工作。储水腔还配备了加热器,以使水温保持在5~

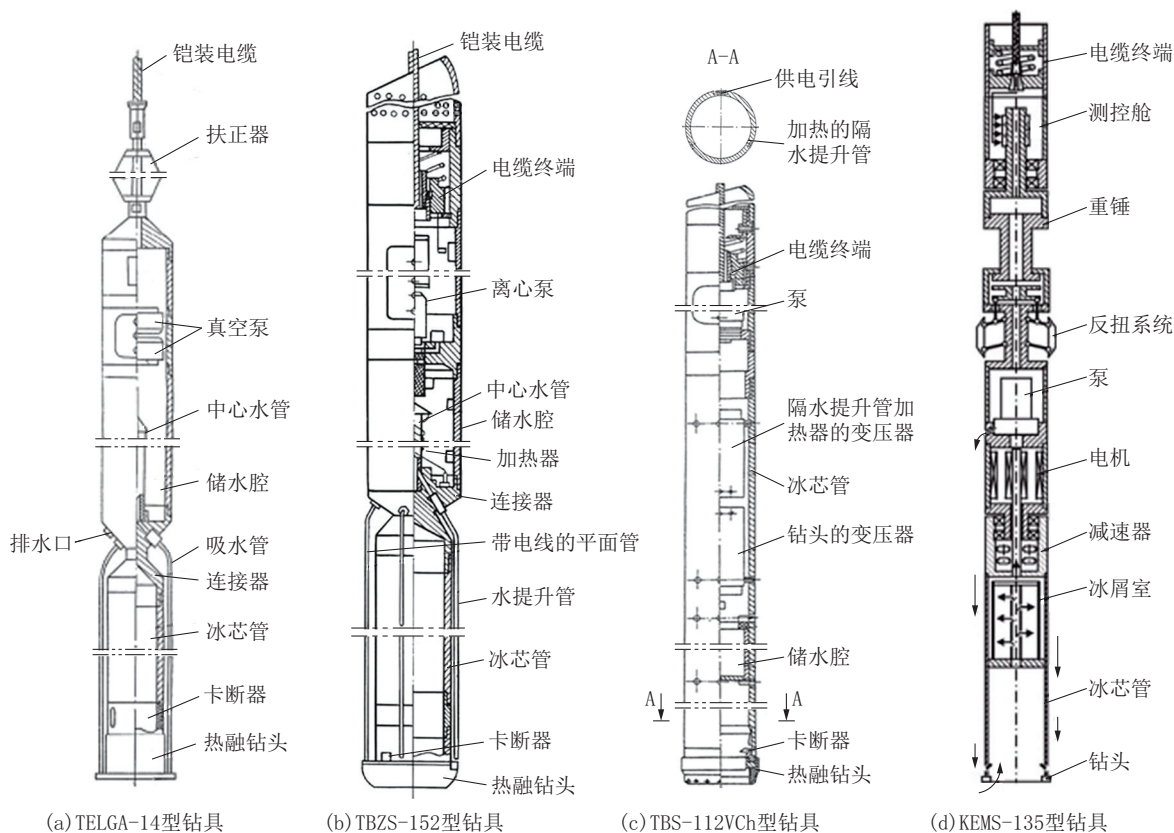


图5 东方站深冰钻采用的钻具及其结构^[2,5,8]

Fig.5 Drilling stem structure for deep ice drilling at Vostok Station

10℃范围内。连接器同时预留了1个排水口,在提钻后将储水腔内融水放出^[8]。TELGA-14型钻具冰芯管的长度为2 m,通过技术改进,并将冰芯管延长至2.5 m,在钻具名称上添加了字母M,使其成为TELGA-14M型^[15]。

尽管采用该钻具在东方站1号钻孔成功钻进至952.5 m,创造了干孔钻进的最深记录,但由于钻孔始终开放,受冰温、上覆压力和钻进时间的影响,钻孔逐渐缩径,从而造成钻具卡堵。因此,该钻具主要用于冰层浅孔钻进。

2.2 使用钻井液的TBZS和TBS-112VCh型热融取芯钻具

列宁格勒矿业学院于1973年开发了TBZS-152型热融钻具(TBZS为俄语中“用于充满流体钻孔的热融取芯钻具”的缩写,数字152表示取芯钻头的外径)^[8,16],其结构如图5(b)所示。TBZS-152型钻具的钻头内包含2个被铸入铜环或铝环中的总功率为2.5~3.2 kW的盘管式加热器^[17]。钻头的内外径分别为114 mm和152 mm。热融钻头和3个卡断

器用螺栓固定在短套管和钢制冰芯管上。在冰芯管的外表面固定有3根吸水管(外径为10 mm)和1根布有电线的扁平管。冰芯管通过连接器连接到容积约为35 L的钢制储水腔(内/外径分别为136 mm和146 mm)上。储水腔中心的输水管长度比储水腔的长度短0.5 m。ETsN-91B型离心泵由水下直流电机驱动并固定在储水腔的顶部。直流电机的电压可以在15~27 V范围内变化,其最大电流为8 A。储水腔中的流体成分通过重力分离,水被收集在储水腔底部,钻井液被泵回钻孔。泵的最大流量为30 L/min。TBZS-152M型钻具总长度为7.5 m,冰芯管长度为3 m,质量为180 kg,总功耗(包括输水管和储水腔的加热器)为5~6 kW^[8]。

在4G孔中,TBZS-152M型钻头的平均钻速为1.8~2.2 m/h,冰芯长度为2.25~2.8 m,钻头功率为3.6~3.9 kW,输水管和储水腔的总功率为3.5 kW^[8]。TBZS-132型和TBZS-152型钻具主要区别是钻头的内外径以及冰芯管和储水腔的管道^[18]。

采用此类钻具钻进时,孔内需填充密度足够高

的钻井液来平衡冰层上覆压力,以维持钻孔直径。2号钻孔前期钻井液采用了乙醇水溶液,但乙醇水溶液对孔壁有强烈的融化腐蚀作用,导致孔内乙醇水溶液浓度降低,形成冰浆,进而钻进受阻。1975年将钻井液更换为TS-1型航空煤油,并成功将2号钻孔钻进至450.4 m。在3G钻孔中,则使用了TS-1型航空煤油和CFC-11型混合液。4G-2钻孔由于钻井液密度不足,导致钻孔缩径和钻具卡钻,钻孔被迫停止。在5G钻孔钻进中,同样由于钻井液密度不足,造成钻具在提钻过程中卡钻。5G-1孔后续钻进中采用了航空煤油和HCFC141b的混合液,密度为 900 kg/m^3 。

TBS-112VCh型钻具(TBS是俄文中“高频电热钻具”的缩写,112表示钻头外径)使用高频电流供电,从而减小钻具中变压器尺寸,其结构如图5(c)所示。该钻具由直径为12 mm的同轴KG2-59-90型铠装电缆悬吊,拉断力为58 kN。地表供电为 $800\sim 1000\text{ V}/2500\text{ Hz}$ 。经过电缆损耗后,井底电压降为 $700\sim 900\text{ V}$ 。在钻具内部,使用变压器将电压进一步降压至 $20\sim 25\text{ V}$ 。融水将被收集在一个未设置加热的储水腔内并允许其在里面冻结,钻具提至地表后,需将装满冻结融水的储水腔取下并换上空储水腔。冰芯管由厚壁管做成,吸水管和电线则隐藏在厚壁管的管壁内。该钻具钻头内外径分别为92 mm和112 mm,长度为7.1 m,质量为120 kg。

1981年,在3G孔1500 m以深使用了TBS-112VCh型钻具。与TBZS-152M型钻具相比,4.5 kW的钻头加热功率使TBS-112VCh型钻具的钻速增加了1倍,达到了 $3.5\sim 4\text{ m/h}$ 。输水管加热器的功率为3 kW,冰芯长度在 $1.6\sim 2.2\text{ m}$ 之间,冰芯直径为 $87\sim 90\text{ mm}$ ^[8]。

2.3 KEMS-135型铠装电缆式电动机机械取芯钻具

KEMS-135型钻具于20世纪80年代初由苏联列宁格勒矿业学院设计(KEMS是“取芯机电钻”的俄文缩写)^[5,19]。KEMS钻具由带切削刀头的冰芯管、带齿轮减速器的驱动电机、泵、反扭系统、重锤、测控舱和电缆终端组成,如图5(d)所示。冰芯管由带有0.315 mm孔眼的过滤网制成,冰芯管内外径为 $117/127\text{ mm}$,长度为3 m,钻头内外径为 $107/135\text{ mm}$ 。该钻具内部2.2 kW的交流电机用于驱动冰芯管和刀头回转,转速为220 r/min。钻进时,钻井液携带冰屑通过冰芯与冰芯管间隙上返至冰屑室内,

冰屑被滤网阻挡留滞,干净的钻井液则继续上返经过泵后流入钻具和钻孔间隙,实现循环。钻具反扭装置采用滑刀式结构,下方布置有行程为300 mm的锤击结构,可辅助拔断冰芯。根据冰芯管长度不同,钻具整体长度在 $7\sim 12\text{ m}$ 之间,质量为 $120\sim 180\text{ kg}$ 。该钻具整体由直径16.5 mm的8芯KG7-95-180电缆悬吊,其中6芯用于供电,2芯用于通讯,电缆拉断力为95 kN,空气中质量为 0.865 kg/m 。

KEMS-132型钻具主要在5G钻孔2755.3 m深度以下进行了应用。钻进初始,平均回次进尺可达 2.8 m/h ,但在2930 m深度以下,钻进变得异常困难,回次进尺大幅下降。但与其他深孔常见的暖冰钻进难题不同,东方站在3000 m深度处的冰温仍接近 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,并不属于暖冰层,冰温并不是影响回次进尺的主要原因^[2]。通过对比冰芯和钻进回次进尺数据,发现回次进尺和冰晶尺寸呈现很好的负相关,如图6所示。当冰晶尺寸变小时,回次进尺变大,而在3480 m以下,冰晶尺寸超过20 mm,钻进速度几乎停滞。同时通过切削试验发现,采用相同转速和切削参数,当冰晶尺寸变大时,冰屑粒径变小。细粒冰产生的冰屑粒径在 $1\sim 2\text{ mm}$,而单晶冰冰屑粒径 $<0.5\text{ mm}$ 。过小的冰屑颗粒将在冰屑室内形成致密的堆积物,从而增大了钻井液流道阻力,严重的甚至会阻断循环,从而使冰屑在刀头处堆积,阻碍钻进^[20]。

从这一机理出发,在深度3000 m以下冰层中提高钻进速度的最优方法是增大钻井液循环流量,优化钻井液流道,同时增大刀头切削产生的冰屑粒径。为此俄罗斯工程师设计了阶梯型刀头,每个刀头切削深度增加为原来的3倍,有助于增加冰屑粒径,同时将钻具内钻井液流量增大至 120 L/min 。随后在5G-3孔钻进中,在相同的冰层条件下,采用该技术获得了比5G-1孔高2~3倍的回次进尺(图7),充分说明了该技术的可行性,但在3650 m以深,尽管采用了阶梯型刀头和大钻井液流量,回次进尺再次持续下降,这与冰温逐渐升高有关(3650 m处冰温为 $-5\text{ }^\circ\text{C}$,压力熔点为 $-2.5\text{ }^\circ\text{C}$)。高冰温导致冰屑极易压实形成冰塞,从而堵塞了钻井液通道,导致回次进尺降低^[20]。

暖冰钻进一直是深冰芯钻探的难题,格陵兰NGRIP项目在2931 m钻遇暖冰,冰温为 $-7.1\text{ }^\circ\text{C}$,发

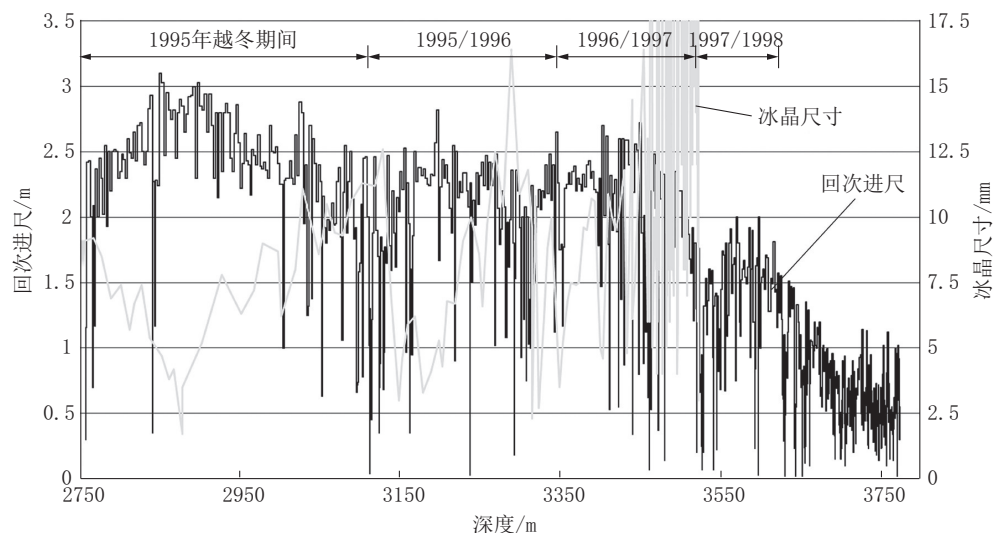


图6 东方站5G-1钻孔回次进尺和冰晶尺寸随深度变化曲线^[20]

Fig.6 Curves of footage per run and ice crystal size vs depth of 5G-1 hole at Vostok Station

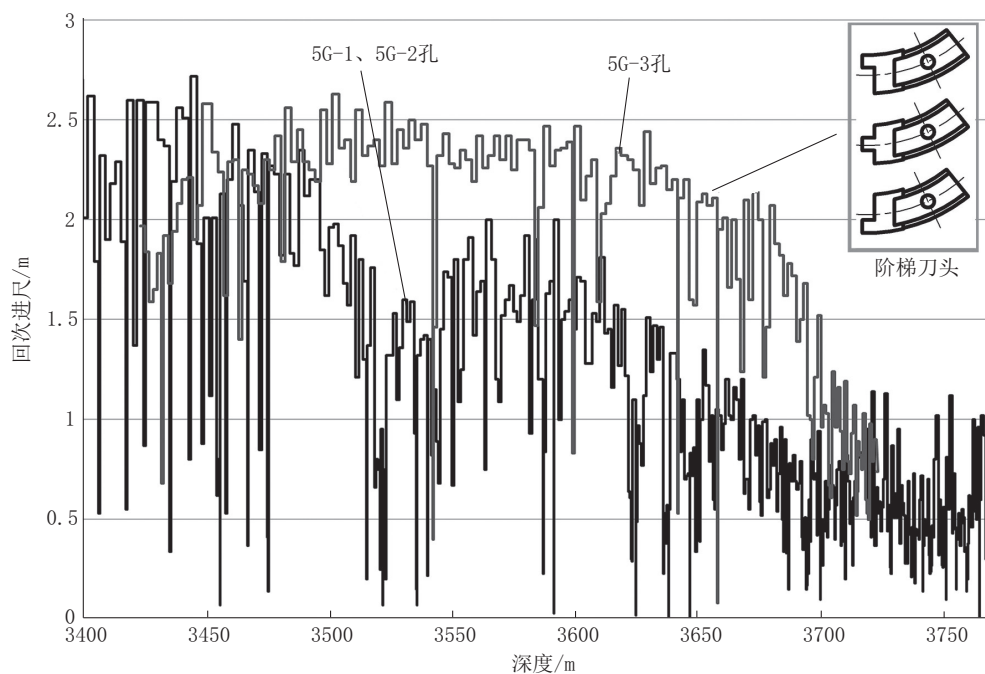


图7 采用阶梯刀头和大钻井液流量前后回次进尺对比^[20]

Fig.7 Comparison of footage per run before and after using the stepped bit and large drilling fluid flow rate

生多次卡钻^[21-22]；Dome C 深冰钻探在 3119 m 钻遇暖冰，冰温为 $-5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，几乎无法进尺^[23-24]；Dome Fuji 深冰钻探在 3000 m 钻遇暖冰，冰温为 $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，每回次仅能进尺约 10 cm^[23,25]；格陵兰 NEEM 计划^[26]、西南极 WAIS 计划^[27]等都遇到暖冰钻进困难的问题。曹品鲁等人对暖冰钻探难题进行了剖析，并建议通过优化钻具结构和钻进参数以降低切削热，从

而减轻刀具在暖冰层钻进中结冰，提高钻进效率^[28]，但该理论尚需工程实践的验证。

3 东方湖未来研究计划

东方站冰芯计划已经取得巨大成功，获取了完整的透底冰芯，但对于东方湖的研究才刚刚拉开帷幕，获取的部分湖冰样品也仅仅揭开了东方湖的冰山一角，如何在不污染东方湖生态环境的前提下增

进人类对东方湖的理解是目前急需攻克工程难题。目前,已见于文献发表的研究计划仅有以下3种。

3.1 基于5G钻孔的冰下湖水探测器

2014年Valery V. LUKIN提出了采用现有的5G钻孔研究冰下湖的方案,该方案计划采用直径 ≥ 135 mm的运载设备通过5G钻孔将湖水采样器、水文物理探测器和生物化学探测器等科学载荷放入冰下湖内进行科学观测,其结构如图8所示^[13]。该运载设备外部安装有加热元件,可保证进入钻孔内的湖水不冻结,其内部安装有绞车系统,可将上述科学载荷放入冰下湖内进行纵深探测。

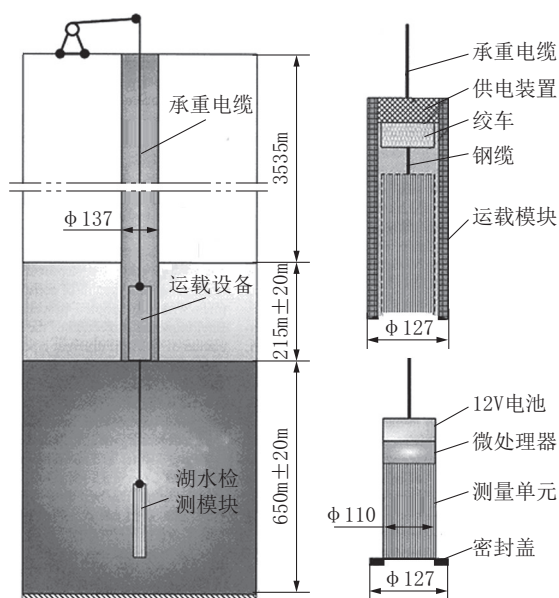


图8 利用5G钻孔进行冰下湖水参数测量示意

Fig.8 Vostok lake water parameter measurement in 5G hole

采用该技术的难点在于如何精确控制钻井液柱压力,以使钻井液和湖水界面保持在孔内一定高度,避免钻井液进入湖水造成对东方湖的污染。同时该界面高度不能太高,否则将需要较大功率才能维持孔内湖水不重新冻结。理想的孔内湖水液面高度为10 m左右,此时钻具仅需要150 W加热功率即可保持钻孔开放。但按照目前5G孔采用的 $\Phi 16$ mm电缆计算,当钻具和电缆下入和提出孔内将造成钻井液柱约25 m的高度变化,这将严重威胁探测安全。为此,Valery V. LUKIN建议在冰下湖上方200 m内冰层中利用水力压裂创建裂缝通道,当上方钻井

液柱变化造成裂缝位置钻井液压力大于上覆地层压力时,钻井液将流入裂缝,从而补偿钻具和电缆引起的钻井液柱变化。采用这种方法可大大提高对冰下湖研究的安全性。但该计划自2014年后未见后续报道。

3.2 冰下湖沉积物取样器

2020年,V. S. Litvinenko指出东方湖沉积物包含了南极洲中部环境和气候变化的独特记录,获取湖底表层样品,也将为评估湖泊环境和模拟沉积过程提供非常重要的信息^[29]。他同时指出俄罗斯最初考虑使用5G钻孔来继续探测东方湖时,曾计划在穿透冰盖前立即注入一种生态安全的缓冲液(有机硅流体),以形成一个缓冲层,将孔底的水和钻井液分开,但在分析了5G钻孔第一次和第二次穿透冰下湖的现象后,认为无法继续使用5G钻孔探测东方湖,因为钻孔中充满了煤油和氟利昂的混合物,无法在作业期间防止钻井液污染冰下湖水。他提出有必要使用有机硅流体重新进行钻孔以确保东方湖调查期间的生态安全。

V. S. Litvinenko建议采用如图9所示的取样技术进行东方湖沉积物钻探,运载设备基本原理与图8类似,但绞车内部需包含约700 m $\Phi 2$ mm的电缆,以穿过约600 m深的东方湖到达湖底。他建议采用动态平衡钻具进行取样^[29-30]。2017年Vasilyev N. I.首次提出了动态平衡钻具的概念^[31],具有2个自由度的双质量机电振荡交替运动系统,可使钻具在不设置反扭系统情况下正常旋转钻进。该系统电力依靠电池提供,可获得长度等于取芯管长度的沉积物样芯。室内试验结果表明,该动态平衡钻具具备复合载荷下共振稳定性和对地层动态参数变化的宽范围适应性。但该技术只能获取冰下湖沉积物表层样品,如何获取大深度的沉积物样品仍是一个难题。

3.3 冰下湖无污染钻进采样与观测系统

2016年吉林大学极地研究中心提出了一种新的热融钻具设计理念——可回收型全自动冰下环境探测器^[30,32],为东方湖等冰下水环境的无污染取样和探测提供了一种选择。为保证钻进过程中冰下湖与外界环境的隔绝,实现无污染钻进,该探测器采用电力热融式钻进方式,前面热融钻进、后面冻结闭合,如图10所示。

用于探测器下放和回收的绞车和电缆均安装在探测器内部,向下钻进时,开启下部热融钻头,在内

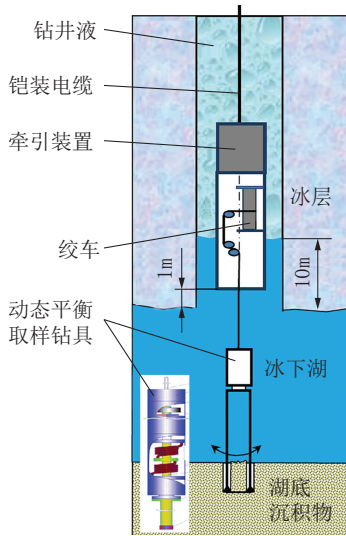


图9 东方湖沉积物钻探取样示意

Fig. 9 Sample drilling from bottom sediment of Vostok lake

嵌式绞车控制下探测器自行热融向下钻进,探测器通过区域的冰层融水会在周围冰层作用下重新冻结,实现钻孔与外界环境隔离;该探测器在钻至冰下湖完成湖水采样后,开启上部热融钻头,绞车回收电缆即可促使探测器向上热融钻进,直至到达地表。采用该设计理念可最大程度地降低对南极冰下湖的

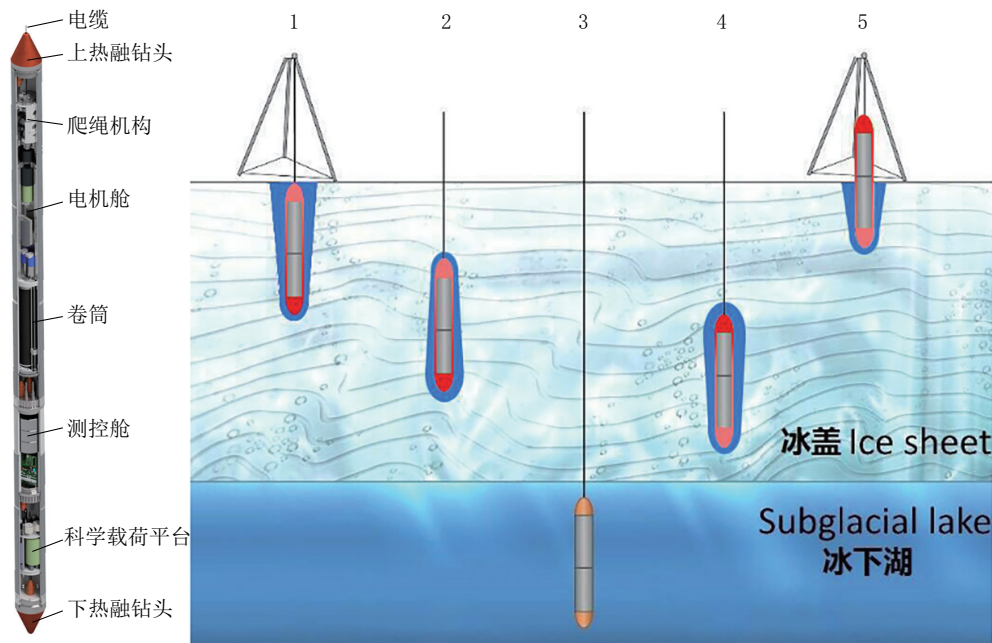
污染,实现无污染取样。该探测器目前已经完成原理样机和工程样机的研制和试验。

目前针对东方湖的后续研究计划尚处于设计阶段,距离南极现场工程实践仍尚需一定时间。但持续关注 and 深入思考极地冰下环境探测技术,共同促进人类对冰下极端环境生命起源和演化的理解已成为各国科学界的共识。

4 结语和建议

前苏联和俄罗斯钻探团队通过在东方站近50年的冰层钻探活动,先后攻克了包含粒雪层、冰层、冰岩夹层和湖水冻结冰的复杂冰层钻进难题,逐渐形成了一套集热融取芯钻探、电动机械取芯钻探和分支孔钻探等为一体的深冰芯钻探技术,最深钻孔达3769.3 m,累计进尺达13000 m,并获取了总长超46 m的含湖冰样品的冰芯,为人类进行深冰芯钻探和冰下湖探测积累了宝贵的经验。通过对俄罗斯东方站深冰钻探的系统梳理,我们可得到如下启示:

(1)从东方站实施的5个钻孔来看,无论热融钻探或电动机械钻探,一旦孔底融水清除不充分或孔内钻井液柱压力不足以平衡上覆冰层压力,极易发生卡钻事故。分支孔钻进是在充分利用原钻孔基础上实现继续钻进的良好解决办法。我国也应在充分



1—开孔钻进;2—一向下钻进;3—冰下湖水采样;4—向上钻进;5—返回至地表

图10 可回收型全自动冰下环境探测器概念设计及工作原理

Fig.10 Conceptual design and working principle diagram of the recoverable autonomous sonde

借鉴其他钻孔钻探经验的基础上,发展自己的分支孔钻进技术和装备,为可能出现的卡钻事故做好技术储备。

(2)东方站5G透底钻孔的施工共耗时约85个月,其中前3650m耗时67个月,而最后的186m耗时将近总时间的21%,充分说明了近底部冰层钻探的复杂性,针对暖冰层和冰岩夹层的钻进机理和方法应进行深入研究,以提高近底部冰层的取芯钻进效率。

(3)近底部大冰晶冰层钻进,宜采用阶梯状刀头增大冰屑粒径,并采用大钻井液流量以保证钻井液的良好循环和携屑能力。

(4)无论热融钻探还是铠装电缆电动机械取芯钻探,在大深度冰盖取芯钻进中都存在施工周期长的问题,普遍需要建立越冬考察站以保证后勤补给,极大地限制了钻探作业范围,因此有必要研发冰层快速取芯钻进技术,保证在1~2个度夏工作季即可完成施工。

(5)针对东方湖等冰下水环境的无污染探测和取样技术仍是一大技术难题,需要在无污染钻进、湖水理化参数测量及湖底沉积物取样等方面继续开展深入研究。

参考文献(References):

- [1] Vladimir Litbinenko. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic subglacial lake exploration and Arctic natural resource development[J]. *Geochemistry*, 2020,80(3):125652.
- [2] Vasiliev N. I., Talalay P. G., Bobin N. E., et al. Deep drilling at Vostok Station, Antarctica: History and recent events[J]. *Ann. Glaciol.*, 2007,47:10-23.
- [3] Kapitsa A., Ridley J. K., Robin G., et al. Large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica[J]. *Nature*, 1996,381:684-686.
- [4] 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.
- [5] Pavel G. Talalay. *Mechanical Ice Drilling Technology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [6] Nan ZHANG, Chunlei AN, Xiaopeng FAN, et al. Chinese first deep ice-core drilling project DK-1 at Dome A (2011-2013)[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68): 88-98.
- [7] Xiangbin Cui, Shinan Lang, Jingxue Guo, et al. Detecting and searching for subglacial lakes through airborne radio-echo sounding in Princess Elizabeth Land (PEL), Antarctica[C]// IV Vinogradov Conference, E3S Web of Conferences 163, 04002 (2020):1-6.
- [8] Pavel G. Talalay. *Thermal Ice Drilling Technology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.
- [9] Ueda H. T., Talalay P. G. Fifty years of Soviet and Russian drilling activity in Polar and Non-Polar ice. A chronological history[R]. USA CRREL Tech. Rep., ERDC/CRREL TR-07-20, 2007.
- [10] Kudryashov B. B., Bobin N. Y., Slyusarev N. I., et al. Teoriya i praktika bureniya-protaivaniya v Antarktide [Theory and practice of thermal drilling in Antarctica][J]. *Mater. Glyatsiol. Issled.* 2007,22: 71-77. (In Russian with English summary)
- [11] Tchistiakov V. K., Kracilev A., Lipenkov V. Ya., et al. Behavior of a deep hole drilled in ice at Vostok Station[J]. *Mem Natl Inst Polar Res Spec*, 1994,49:247-255.
- [12] Kudryashov B. B., Vasiliev N. I., Vostretsov R. N., et al. Deep ice coring at Vostok Station (East Antarctica) by an electromechanical drill[J]. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, 2002,56: 91-102.
- [13] Valery V. LUKIN, Nikolay I. VASILIEV. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68): 83-89.
- [14] Manakov A. Yu., Ildyakov A. V., Lipenkov V. Ya., et al. Formation of clathrate hydrates of hydrochlorofluorocarbon 141b in the deep borehole at Vostok Station (Antarctic) in the course of the unsealing of subglacial lake Vostok[J]. *Earth's Cryosphere*, 2017,3:32-40. (In Russian)
- [15] Kudryashov B. B., Chistyakov V. K., Litvinenko V. S. Burenie skvazhin v usloviakh izmeneniia agregatnogo sostoianiia gornyx porod [Drilling wells under changes in the aggregate state of rocks][Z]. Nedra, Leningrad, 1991. (In Russian)
- [16] 陈晨,张祖培.冰层电缆热熔法取芯钻进[J]. *长春科技大学学报*, 1998(2):3-5.
CHEN Chen, ZHANG Zupei. Cable suspended thermal ice coring drilling[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998(2):3-5.
- [17] Kudryashov B. B. Soviet experience of deep drilling in Antarctic. In international symposium mining in the Arctic[Z]. Fairbanks, Alaska. Proceedings. Rotterdam, A. A. Balkema. 1989:113-122.
- [18] Kudryashov B. B. Drilling equipment and technology for deep ice coring in Antarctica[Z]. In Hall, J., ed. Proceedings of Seventh Symposium on Antarctic Logistics and Operations, Cambridge, UK. Cambridge, British Antarctic Survey, 1998: 205-210.
- [19] 陈晨,张祖培.南极冰层电缆式机械取芯钻进[J]. *长春地质学*

- 院学报,1997(4):96-100.
- CHENG Chen, ZHANG Zupei. Cable suspended electromechanical ice coring drilling in Antarctic[J]. Journal of Changchun Institute of Geology, 1997(4):96-100.
- [20] Litvinenko V. S., Vasiliev N. I., Lipenkov V. Ya., et al. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok Station, Antarctica[J]. Ann. Glaciol., 2014, 55(68): 173-178.
- [21] Johnsen S. J., Hansen S. B., Sheldon S. G., et al. The hansen drill: Design, performance, further developments and some lessons learned[J]. Ann. Glaciol., 2007, 47:89-97.
- [22] Gow A. J., Meese D. A. Nature of basal debris in the GISP2 and Byrd ice cores and its relevance to bed processes[J]. Ann. Glaciol., 1996, 22:134-140.
- [23] Augustin L., Motoyama H., Wilhelms F., et al. Drilling comparison in "warm ice" and drill design comparison [J]. Ann. Glaciol., 2007, 47:73-78.
- [24] Eustes A., Fleckenstein W., Gerasimoff M., et al. Comparison of ice coring operations for the Antarctic Inland Core Project [R]. ICDS Report, 2003:1-89.
- [25] Motoyama H. The second deep ice coring project at Dome Fuji, Antarctic[J]. Scientific Drilling, 2007(5):41-43.
- [26] 王士猛, 效存德, 谢爱红, 等. NEEM计划2537.36m透底深冰芯的钻取和成果概述[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.
- [27] IDDO and IDPO. Long range drilling technology plan [R]. 2012:1-34.
- [28] 曹品鲁, 陈宝义, 刘春朋, 等. 极地深冰心钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 58-62.
- CAO Pinlu, CHEN Baoyi, LIU Chunpeng, et al. Analysis of the technology difficulties and countermeasures in warm ice deep core drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):58-62.
- [29] V. S. Litvinenko, G. L. Leitchenkov, N. I. Vasiliev. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling [J]. Geochemistry, 2020, 80(3): 125652.
- [30] 孙友宏, 李冰, 范晓鹏, 等. 南极冰下湖钻进与采样技术研究进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(S1):16-22.
- SUN Youhong, LI Bing, FAN Xiaopeng, et al. Research progress of drilling and sampling technologies in Antarctic subglacial lake [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(S1):16-22.
- [31] Vasilyev N. I., Leychenkov G. L., Zagrivny E. A. Prospects of obtaining samples of bottom sediments from subglacial lake Vostok [J]. Proc. Min. Inst., 2017, 224: 199-208.
- [32] P. G. Talalay, V. Zagorodnov, A. Markov, et al. Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(65):23-30.

(编辑 荐华)