

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.118>



南极冰下及大洋地质科学钻探新进展与展望

赵凯歌¹, 王文涛^{1*}, 刘敬平², 邵宇宾¹, 彭天玥³

1. 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038
2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580
3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 511458

摘要: 南极冰下及大洋地质样品对于认识南极地质构造演化、南极冰盖稳定性、南大洋对全球气候环境的影响机制等世界前沿科学问题至关重要。科学钻探是获取南极冰下及大洋地质样品的唯一技术手段。近年来, 美国研发了系列南极冰下及大洋科学钻探装备与钻具, 并实施了大量科学钻探工程。我国虽然也开展了南极冰下基岩取心钻探装备的研发, 并成功在南极进行了应用, 但与美国相比, 仍有较大差距。系统梳理了国内外南极冰下基岩钻探、冰架下地质钻探和南大洋地质钻探所涉及的钻探技术和钻探工程。提出了适合我国国情的南极冰下及大洋地质科学钻探发展建议, 主要为发展冰层/冰下基岩快速钻探技术、南极冰架下地质科学钻探技术和南极冰区大洋科学钻探技术, 并开展相关钻探工程, 以期为我国极地科技规划制订提供参考。

关键词: 南极; 冰下基岩; 冰架; 南大洋; 地质科学钻探; 海洋地质学。

中图分类号: P634.5

文章编号: 1000-2383(2026)07-2915-12

收稿日期: 2025-06-27

Progress and Prospects of Geological Scientific Drilling beneath Antarctic Ice Sheet and in Southern Ocean

Zhao Kaige¹, Wang Wentao^{1*}, Liu Jingping², Shao Yubin¹, Peng Tianyue³

1. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China

Abstract: Geological samples beneath the Antarctic ice and in the Southern Ocean are crucial for understanding the evolution of the Antarctic geology, the stability of the Antarctic ice sheet and the influence mechanisms of the Southern Ocean on global climate and environment. Scientific drilling is the only technical means to obtain such samples. In recent years, the United States has developed a series of scientific drilling equipment and tools for drilling beneath the Antarctic ice and in the Southern Ocean, and has carried out a large number of scientific drilling projects. Although China has also carried out the research and development of drilling equipment for subglacial bedrock coring and successfully applied it in Antarctica, there is still a considerable gap compared with the United States. This paper systematically reviews the drilling technologies and projects at home and abroad involved in drilling beneath the Antarctic ice, beneath the ice shelves, and in the Southern Ocean, and proposes development suggestions for scientific drilling beneath the Antarctic ice and in the Southern Ocean that are suitable for China's national conditions with the aim of providing a reference for the formulation of China's polar science and technology plans.

作者简介: 赵凯歌(1994—), 女, 助理研究员, 主要从事海洋科技政策、可持续发展与循环经济战略研究。ORCID: 0009-0000-2929-1081.
E-mail: zhaokg@acca21.org.cn

* 通讯作者: 王文涛, E-mail: wangwt@acca21.org.cn

引用格式: 赵凯歌, 王文涛, 刘敬平, 邵宇宾, 彭天玥, 2026. 南极冰下及大洋地质科学钻探新进展与展望. 地球科学, 51(7): 2915—2926.

Citation: Zhao Kaige, Wang Wentao, Liu Jingping, Shao Yubin, Peng Tianyue, 2026. Progress and Prospects of Geological Scientific Drilling beneath Antarctic Ice Sheet and in Southern Ocean. *Earth Science*, 51(7): 2915—2926.

Key words: Antarctica; subglacial bedrock; ice shelf; Southern Ocean; geological scientific drilling; marine geology.

南极一般指南极大陆及其周边的陆缘冰、岛屿与南大洋,是地球系统的重要组成部分.南极大陆面积约 $1\,239\times 10^4\text{ km}^2$,终年为冰雪覆盖,仅有约 0.3% 的基岩出露.冰架是指从大陆冰盖或冰川延伸到海洋上方、并漂浮在海水中的厚冰体.南极冰架总面积约 $154.2\times 10^4\text{ km}^2$,厚度在几米到上千米之间,是南极冰盖物质损失的主要出口.南大洋环绕南极大陆,是世界上唯一完全环绕地球却未被大陆分割的大洋.目前,人类对南极冰下及大洋地质环境知之甚少.开展南极冰下及大洋地质科学钻探,钻取南极冰下及大洋地质样品,对于研究南极地质构造、评估冰盖不稳定性、反演古气候信息、获取南极洋流的形成和演化规律、揭示南极对全球气候环境的影响机制以及探索未知生命等均具有重要意义(Talalay *et al.*, 2013; 牛雄伟等, 2016; 王汝建等, 2017; 李冰等, 2021; Albert *et al.*, 2024).

进入 21 世纪以来,美国和中国等国家围绕极地冰盖下地质、冰架下地质和南大洋地质开展了大量科学钻探工作,主要包括美国在西南极开展的冰下基岩钻探、我国在东南极拉斯曼丘陵开展的冰下基岩科学钻探、美国与新西兰等国在罗斯冰架开展的冰架下地质科学钻探、美国等国在阿蒙森海等海域开展的南大洋地质科学钻探,如图 1 所示.本文旨在梳理相关技术与工程的最新进展,以期为我国开展南极 PANDA 断面冰下及大洋地质科学考察提供参考.

1 南极冰下基岩科学钻探

南极冰盖下地质科学钻探(即冰下基岩科学钻探)主要面临两个技术难题.一是如何安全高效钻穿复杂冰层、冰岩界面和冰下岩层;二是如何确保钻探设备在低温、暴风雪、强辐射等恶劣自然环境下安全高效运行.截止目前,仅俄罗斯、美国和中国 3 个国家在南极钻取了冰下基岩岩心(张楠等, 2020).

1.1 南极冰下基岩科学钻探技术

目前,冰下基岩科学钻探技术主要有两类:一是地表回转动力式;二是孔底回转动力式(Boeckmann *et al.*, 2021; Goodge *et al.*, 2021; Kuhl *et al.*, 2021; Talalay *et al.*, 2021).地表回转动力式钻机通过钻杆将动力传递至钻头来切削地层,并通过钻井流体循环将切屑传输至地表,最后通过上提钻取心钻具或绳索取心钻具回收冰下基岩岩心.孔底回转动力式钻机通过铠装电缆将电力输送至孔底来驱动孔内动力钻具,每钻进一定深度后,通过上提钻具来回收冰下基岩岩心和清除切屑.

1.1.1 地表回转动力式钻机 地表回转动力式冰下基岩钻机主要由美国研发.截至 2024 年,共形成三款冰下基岩钻进系统,可满足浅层(Winkie 钻机)、中深层(ASIG 钻机)和深层(RAID 钻机)冰下基岩取心需求(李冰等, 2021).其中,RAID 钻机系统如图 2 所示.三款钻机系统的主要技术特点如下:(1)采用地表回转动力驱动钻杆柱,

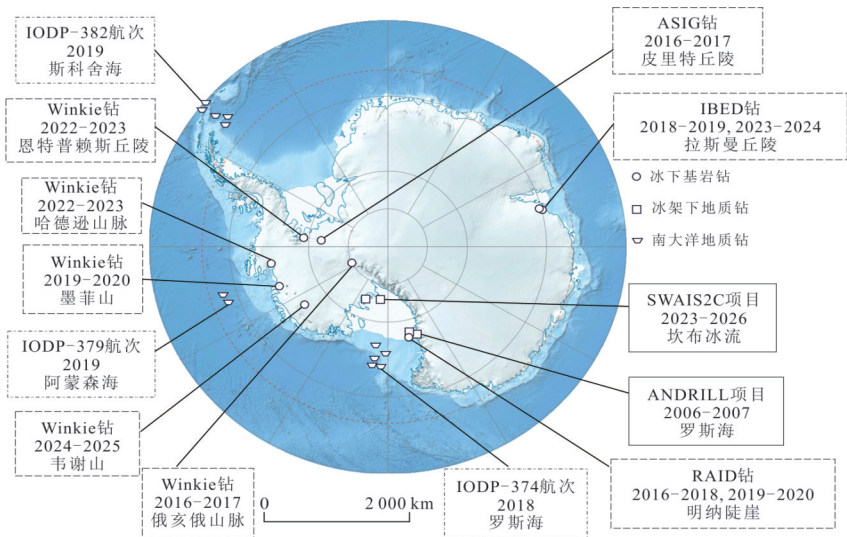


图 1 近年来南极冰下及大洋地质科学钻探工程位置

Fig.1 Drilling locations of Antarctic subglacial and Southern Ocean geological drilling projects

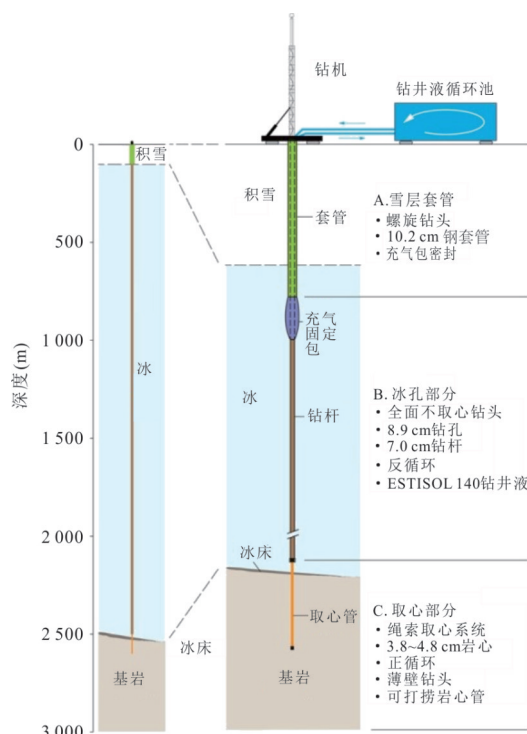


图2 RAID钻机系统原理设计图(李冰等,2021)

Fig.2 Principle design diagram of RAID drilling rig system

Winkie 钻机采用电机驱动,ASIG 钻机和 RAID 钻机采用液压驱动;(2)采用钻井液循环与固液分离系统,实现冰屑/岩屑收集与钻井液循环利用,并调节钻井液循环压力以避免钻孔发生水力压裂;(3)采用膨胀封隔器密封套管,避免钻井液在粒雪层漏失;(4)采用全面钻头快速穿透冰层直至基岩层,提高冰层钻进效率,其中 RAID 钻机采用螺旋钻进行粒雪层钻进;(5)采用绳索取心钻具与孕镶金刚石钻头进行冰下基岩取心钻探;(6)钻井液为 ESTISOL™140 等有机化合物,具有较好的耐低温能力;(7)采用模块化设计,便于现场组装、调试与使用,并设计专用帐篷以应对低温和暴风雪等恶劣自然环境。地表回转动力式钻机的钻进速度快、作业时间短,可在南极恶劣自然环境下快速钻穿复杂冰层、冰岩界面和冰下岩层,可解决大部分冰下基岩钻探面临的难题,但也存在钻探设备系统复杂、后勤保障需求大等问题。

1.1.2 孔底回转动力式钻机 孔底回转动力式冰下基岩钻机主要由我国研发,主要包括铠装电缆悬吊式孔底电动机械钻具和可移动工作舱两大部分。该系统英文名为 Ice and Bedrock Electromechanical Drill(简称 IBED)(张楠等,2020)。铠装电缆悬吊式孔底电动机械钻具采用模块化设计

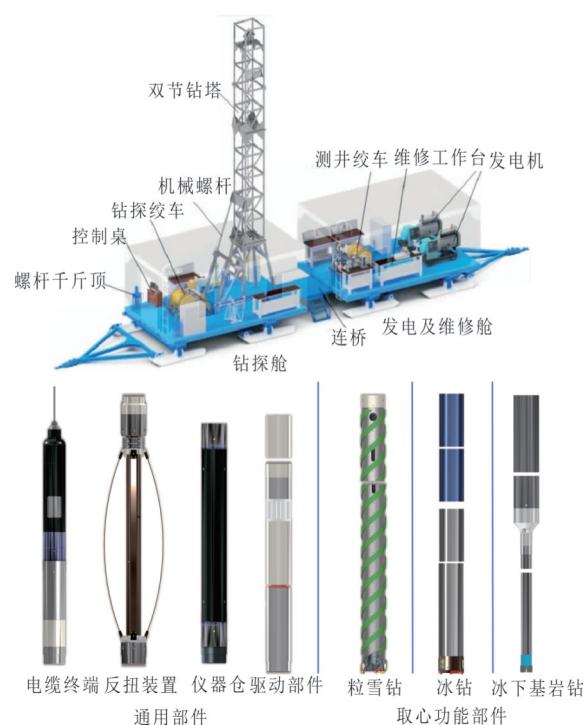


图3 IBED孔底回转动力式钻机系统结构示意图(张楠等,2020)

Fig.3 Schematic diagram of IBED bottom rotary power drilling rig system

(Talalay *et al.*, 2021),如图3所示。通用部件包括电缆终端、反扭装置、仪器舱和驱动部件。取心功能部件和钻头针对不同地层进行相应选择:(1)粒雪层采用螺旋取心钻具;(2)冰层采用孔底局部反循环取心钻具;(3)冰岩夹层采用金刚石复合片取心钻头;(4)基岩采用孕镶金刚石取心钻头。孔底钻具最大输出功率为3 kW,可有效降低现场后勤支撑需求及能耗。为应对南极恶劣自然环境,将钻塔、绞车、控制系统和发电系统等集成在两个雪橇上,作为可移动工作舱,如图3所示,以便于营地搭建与孔位挪移。该方法易出现冰下基岩钻进钻压不足的问题,可通过优化钻头结构、增加配重或施加冲击载荷等方式进行解决。

1.2 南极冰下基岩科学钻探工程

1.2.1 美国冰下基岩钻探工程 自2016年起,为探寻南极冰盖演变的证据,进而预测未来海平面上升速度及幅度,美国使用 Winkie 钻机、ASIG 钻机、RAID 钻机开展了多次冰下基岩钻探科学工程。各钻探工程施工地点、钻探工艺如表1所示(Boeckmann *et al.*, 2021; Goodge *et al.*, 2021; Kuhl *et al.*, 2021; Braddock *et al.*, 2025)。

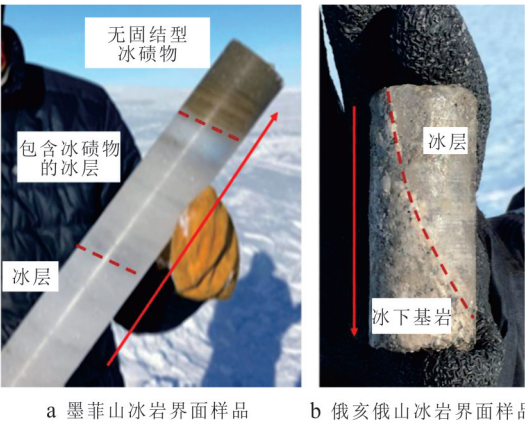


图 4 Winkie 钻机在墨菲山(a)和俄亥俄山脉(b)钻取的冰岩界面样品(Braddock *et al.*, 2024)

Fig.4 The ice-bedrock interface samples from Mount Murphy (a) and Ohio Range (b) obtained by Winkie drill

(1)浅层冰下基岩钻探工程(Winkie 钻机). 自 2016 年起,美国 Ice drilling Program (IDP)采用 Winkie 钻机在西南极开展了 4 次冰下基岩科学钻探工程,并在 2024/2025 工作季在韦谢山(Mount Waesche)开展冰下基岩钻探(Braddock *et al.*, 2025).2016/2017 工作季,在西南极俄亥俄山脉(Ohio Range)所钻冰层为蓝冰层,因此无需采用套管封隔,最终获取了 6 个冰下地质体样品,包括 5 根基岩岩心(花岗岩)以及 1 根沉积物样品,岩心长度达到 0.67 m.2019/20 工作季,在西南极墨菲山(Mount Murphy)完成了 4 个浅层透底钻孔(最大钻进深度 40.9 m),获得了 4 根基岩岩心(黑云母片麻岩)以及 1 根冰岩夹层样品.如图 4 所示,样

品长度达到 1.37 m.在本次钻探工程中,还验证了套管+封隔器方案防止钻井液在粒雪层漏失的有效性,然而本次钻探工程中也遇到由于钻井液温度升高导致钻进过程中钻具在孔底冻结和卡钻的问题.2022/2023 工作季,IDP 在恩特普赖斯丘陵(Enterprise Hills)钻取了 4 根冰下基岩岩心(石英岩),样品最大长度为 0.47 m.

(2)中深层冰下基岩钻探工程(ASIG 钻机).2016/2017 工作季,ASIG 钻机首次在南极使用,如图 5 所示,钻探地点位于西南极皮里特丘陵(Pirrit Hills)区域.第一个钻孔因水力压裂导致钻井液漏失而失败,第二个钻孔通过精细控制钻井液压力,顺利钻穿 149.8 m 冰层,并通过 PDC 钻头获得了 5 m 长的冰下基岩岩心(Boeckmann *et al.*, 2021).2023 年,IDP 使用 ASIG 钻机在格陵兰普拉德霍冰穹(Prudhoe Dome)钻穿 516 m 冰层,并获取了 7.4 m 的冰下样品,其中包括 4.5 m 长的基岩岩心.

(3)深层冰下基岩钻探工程(RAID 钻机).RAID 钻机的设计目的是快速穿透冰层,形成冰下基岩的钻孔通道,获取目标层位冰层与冰下基岩样品以及冰盖底部地热参数(Goodge *et al.*, 2021).2016—2020 年,经过 3 次南极现场野外试验与改进,RAID 钻机最终于 2019/2020 工作季在西南极明纳陡崖(Minna Bluff)完成了 4 个钻孔,其中最大孔深 681 m.如图 6 所示,RAID 钻机共钻穿 677 m 冰层,并钻取了 2 m 冰岩夹层样品和 2 m 冰下基岩岩心.

RAID 钻机通过南极现场测试得出了以下经



图 5 ASIG 钻机南极野外钻探现场(Boeckmann *et al.*, 2021)

Fig.5 ASIG drill in the Antarctica field drilling site

表 1 美国冰下基岩钻探工程主要技术参数 (Boeckmann *et al.*, 2021; Goodge *et al.*, 2021; Kuhl *et al.*, 2021; Braddock *et al.*, 2025)

Table 1 Main technical parameters of United States subglacial bedrock drilling projects												
冰下基岩钻具名称	应用地点/初始地层/时间	设计钻进深度 (m)	最大钻进冰层厚度 (m)	基岩取心目标 (m)	单孔最大岩心长度 (m)	岩心直径 (mm)	粒雪层钻进方式	钻井液	钻井液防漏措施	冰层钻进方式	冰岩夹层钻进方式	基岩层钻进方式
Winkie 钻	西南极俄亥俄山脉 蓝冰 2016/ 2017		28.3		0.67		无粒雪层			Kovacs 螺旋钻	聚晶金刚石复合片 钻头	地质取心 钻头
	西南极墨菲山 粒雪+冰层 2019/2020	120	40.9	1.5	1.37	33.4	Badger-Eclipse 钻	Isopar K	套管+封隔器	Badger-Eclipse 钻	地质取心 钻头	
	西南极哈德逊山脉 粒雪+冰层 2022/2023		49.6		0		Badger-Eclipse 钻			Badger-Eclipse 钻	阶梯型孕镶 金刚石钻头	孕镶 金刚石 钻头
	西南极恩特普赖斯丘陵 蓝冰 2022/ 2023		29.5		0.47		无粒雪层			改进版 Kovacs 螺旋钻		
ASIG 钻	西南极皮里特丘陵 粒雪+冰层 (2016/2017)		150	10	5		螺旋取心钻	Isopar K	套管+封隔器	全面 钻头	聚晶金刚石复合片 钻头 阶梯型孕镶 金刚石钻头	孕镶 金刚石 钻头
		700				39						
	格陵兰岛冰穹普拉德霍 2023		509.4	4	4.4		螺旋取心钻	Isopar K	套管+封隔器	全面 钻头	聚晶金刚石复合片 钻头 阶梯型孕镶 金刚石钻头	孕镶 金刚石 钻头
RAID 钻	西南极明纳陡崖 2019/2020	3 300	680	3	3	38.4	螺旋钻取心钻	ESTI-SOL™ 140	套管+封隔器	全面 钻头	工具钢 取心钻头 聚晶金刚石复合片 钻头	孕镶 金刚石 钻头

验:①粒雪层钻进过程中,通过降低钻具转速可有效避免冰屑因切削热升温融化,进而导致冻结钻具;②钻头的冰屑运移结构应合理,否则极易出现钻具被冰屑堵塞在冰孔内,引发卡钻事故;③钻孔动载液柱压力导致的冰层压裂必须严谨计算和评估,其中一个钻孔在 0.7 MPa 压差条件下发生了冰层压

裂事故,导致钻井液漏失;④除钻探工程之外,RAID 团队还基于钻孔开展了冰盖基底测温、基底冰分析、激光粉尘测径、光学摄影测量等系列探测作业.

1.2.2 中国冰下基岩钻探工程 IBED 钻机目前共开展两次南极现场钻探项目.2018—2019 南极工作季,吉林大学钻探团队在距中山站 12 km 处的达尔

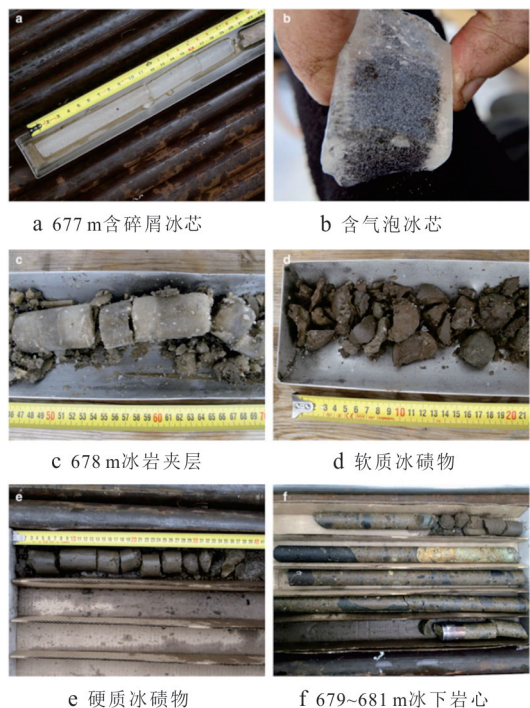


图6 RAID 钻机获得的冰下地质样品 (Goode *et al.*, 2021)
Fig.6 The subglacial geological samples obtained by RAID drill

克冰川区对 IBED 钻机进行了测试. IBED 钻机钻穿了 196.4 m 冰层, 获取了完整的透底冰芯和约 6 cm 的冰下基岩岩心. 这是我国在南极钻取的首支冰下基岩岩心 (张楠等, 2020). 2023—2024 南极工作季, 为了探究东南极伊丽莎白公主地兰伯特裂谷地堑东西两侧存在的高磁异常, 在距中山站 25 km 处, 完成了一个 545 m 深的钻孔, 并获取了连续的冰芯和 0.48 m 的冰下基岩岩心 (Talalay *et al.*, 2025) (图 7).

2 南极冰架下地质科学钻探

南极冰架下地质科学钻探的主要目的是获取冰架下海洋沉积物样品, 以重建古气候环境, 揭示南极冰架、大气与海洋相互作用和评估南极冰盖稳定性. 开展南极冰架下地质科学钻探首先需要采用热水钻钻穿冰架, 从而为冰下地质取样钻具的下入提供通道. 南极冰架下地质科学钻探主要存在三大技术难题: 一是如何高效获取复杂冰下沉积物; 二是如何维持钻孔开放, 热水钻孔一般最多可保持 2~3 天的开放时间 (Kellogg *et al.*, 1986; Hemer *et al.*, 2003); 三是如何维持立管在潮汐和冰架运动共同作用下保持安全运行.

2.1 南极冰架下地质科学钻探技术

2.1.1 冰架下浅层沉积物取样技术 冰架下浅层沉积物取样技术通常通过缆绳或电缆将取样器从热水钻孔中下入至海底进行沉积物取样, 根据工作原理主要可分为重力取样器、锤击取样器和振动取样器三种. 重力取样器是获取沉积物样心最常用的方法 (Hodgson *et al.*, 2016), 其工作原理通常与传统重力取样器相同, 但由于热水钻孔尺寸限制, 冰下重力取样器无法安装触底释放系统, 取样器通常由地面绞车控制在沉积物表面以上 5~25 m 处释放, 之后自由下落并插入沉积物地层内. 锤击取样器配备有冲击锤. 冲击锤可通过地表绞车或人工反复拉起, 并在自由下落时对取样器进行锤击, 进而使取样器实现比重力取样器更深的贯入. 目前, 应用较为广泛的锤击取样器为 UWITEC 取样器, 其取心直径为 59.5 mm, 最大取样长度为 3 m (Hodgson *et al.*, 2016). 振动取样器利用沉积物振



2018—2019 南极工作季冰下基岩样品 2023—2024 南极工作季冰下基岩样品
图 7 IBED 钻机钻取的冰下基岩样品 (张楠等, 2020; Talalay *et al.*, 2025)
Fig.7 The subglacial geological samples obtained by IBED drill

动液化机理进行钻进的方法,通过在取样管上方加装高频振动装置,使取样管和钻头在钻进时处于高频振动状态,与之接触的沉积物地层在高频振动下发生液化现象,从而使取样管和钻头仅需较小轴向力即可轻松贯入.目前成功应用于南极的振动取样器为我国吉林大学研制的JLU-1(宫达,2017),其取心直径为106 mm,最大取心长度为6 m.

以上沉积物取样器从20世纪80年代开始先后应用于南极几十个冰架下沉积物钻探项目,获取了大量的沉积物样品,长度大部分在1.5 m以内,其中最长的沉积物样品为2.9 m(Hodgson *et al.*, 2016).

2.1.2 冰架下深层地质科学钻探技术 冰架下深层地质科学钻探技术通常需要地表钻机通过钻杆将取样器下入孔底进行取心钻进.目前国际上共研发了两款钻机用于冰架下深层地质科学钻探,分别为ANDRILL(ANtartic geological DRILLing)钻探项目和AIDD(Antarctic Intermediate Depth Drill)钻探项目(Harwood *et al.*, 2006;Huston *et al.*, 2006;Falconer *et al.*, 2007;Naish *et al.*, 2007;Patterson *et al.*, 2022).

ANDRILL钻机能够在冰层及水深达1 000 m深的海底下钻取超过1 200 m深的软沉积物和岩心样品,其主要包括地表钻机、隔水管、井下钻具和热水钻机,如图8所示.地表钻机为定制的顶驱钻机,与常规钻机不同的是,其主绞车吊重可达30 t,具有升沉补偿装置以适应冰架或海冰平台高达1.5 m的垂向潮汐运动(Naish *et al.*, 2007).同时,为了防止隔水管因洋流载荷和冰面浮动平台的水平移动而屈曲或发生故障,隔水管顶部采用充气浮力模块或液压补偿系统来施加张力,使其始终保持张紧.井下钻具采用PQ、HQ和NQ三种口径的绳索取心钻具,取心直径分别为83 mm、61 mm和45 mm,岩心采取率超98%,其中NQ系列取心钻进能力可达2 500 m.

为了维持冰架钻孔开放,同时防止海水对锅炉产生腐蚀,ANDRILL钻机设计了具有两级回路结构的热水钻系统.锅炉加热回路和热水喷射回路通过管壳式换热器进行热量交换.此外,还设计了内外径为450 mm/600 mm的环形喷嘴,定期对热水钻孔进行扩孔,以保持隔水管在冰架钻孔内的自由移动.

AIDD钻机是为西南极冰盖2℃敏感性项目(Sensitivity of the West Antarctic Ice Sheet to 2℃, SWAIS 2C)研发,其地表钻机采用MP1000型轻便金刚石取心钻机,钻进能力为1 603 m(BQ系列)、1 285 m(NQ系列)和876 m(HQ系列).钻机采用液

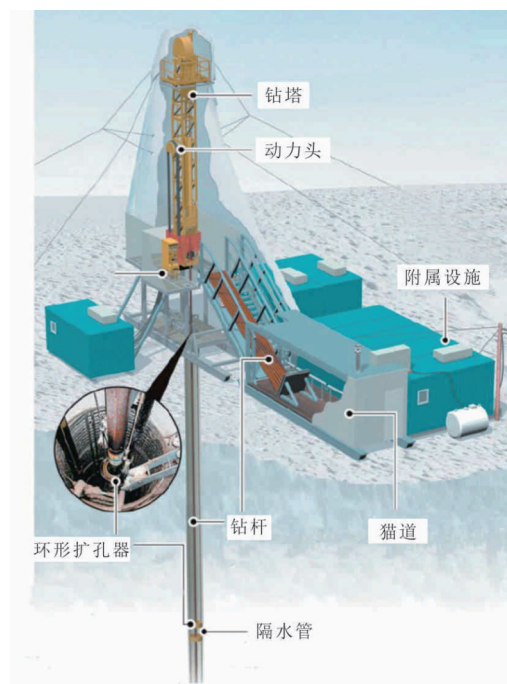


图8 ANDRILL钻机(Naish *et al.*, 2007)

Fig.8 Schematic diagram showing the main elements of ANDRILL drill

压马达驱动,转速为1 400 rpm,扭矩可达2 800 N·m,整机重量约为1 800 kg.钻机适用冰层/水深达1 000 m,冰架下取心能力超200 m.隔水管由玻璃纤维增强环氧树脂制成,每根隔水管长度为3 m.海底沉积物取样钻具有3种,软弱沉积物采用液压活塞取样器和压入式取样器;硬质沉积物则采用金刚石回转取心,如图9所示(Patterson *et al.*, 2022).

2.2 冰架下地质科学钻探工程

2.2.1 ANDRILL钻探工程 为了获取罗斯冰架海床下方约1 300 m深度的地质样品,研究南极在过去6 500万年中在全球环境变化中发挥的作用,2006年末,ANDRILL项目组在麦克默多冰架搭建了钻探场地,如图10所示. ANDRILL钻机成功穿透了82 m厚的冰架和860 m水深,获取了海床以下1 284.87 m的沉积物样品(Falconer *et al.*, 2007).隔水管底部插入海床以下17.18 m,之后采用水泥进行固井.软弱沉积物层采用压入式取样器和超前鼻式软沉积物取样组合钻具,成功取样至海床下41.88 m深度,之后更换为PQ钻杆钻进至海床以下238.04 m深度,并在此深度完成了二次固井.随后更换HQ钻杆钻进至海床以下700.65 m深度,但在此深度下,由于孔内钻井液漏失导致钻具发生卡钻.在确认无法处理该事故的情况下,钻探人员在该深



图9 AIDD 钻机使用的海底沉积物取样钻具 (Patterson *et al.*, 2022)

Fig.9 Ocean sediment samples drilling tool used by AIDD drill

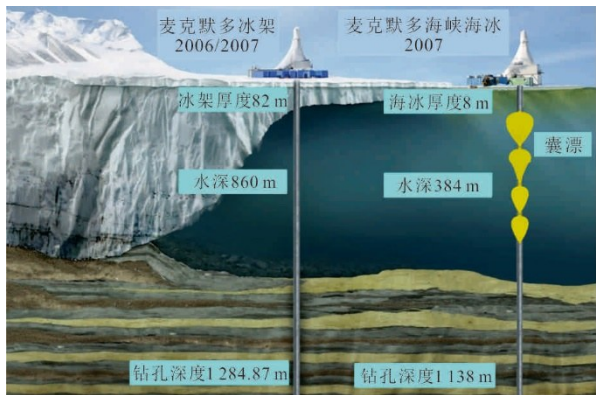


图10 ANDRILL 钻探工程

Fig.10 Schematic diagram of ANDRILL drilling projects

度进行了第三次固井,并更换为NQ钻杆,裸眼钻进至1 284.87 m的终孔深度.钻进结束后,通过机械切割和爆破切割的方法回收了套管和隔水管.根据GPS监测数据,从2006年10月31日布放隔水管到2007年1月11日切割回收,隔水管井口共漂移了约21.93 m.2007年9月底,ANDRILL项目钻探人员在南麦克默多海峡约8 m厚的海冰上采用相同的钻机穿过384 m水深获取了海床以下1 138 m的沉积物样品 (Falconer *et al.*, 2008).与麦克默多冰架钻探项目不同的是,钻探人员在隔水管上增加了2个5 t浮力和2个10 t浮力的囊漂浮系统(图10),用于支撑和张紧隔水管,以减轻海冰平台负载.

2.2.2 SWAIS 2C 钻探工程 为了更好地了解和预

测当全球平均气温达到或超过2℃时,西南极冰盖将如何影响未来的海平面上升,新西兰、美国和日本等国共同实施的SWAIS 2C项目计划于坎布冰流(Kamb Ice Stream)和克拉里冰隆(Crary Ice Rise)分别钻取200 m深度的沉积物样品 (Patterson *et al.*, 2022).2023年11月下旬至12月初,由12名科学家、10名钻工和4名后勤人员组成的SWAIS 2C团队在坎布冰流搭建了钻探营地,并于当年12月18日在厚度586 m的冰架上形成了直径约35 cm的热水钻孔,随后在热水钻孔上方安装了AIDD钻机系统,并将约80 m长的隔水管和重型钢底座下入井内.但最终因为技术原因,该工作季并未完成所有隔水管下放,最终所有隔水管均被回收至地表.仅利用重力取样器通过热水钻孔获取了最长1.92 m的沉积物样品.2024年,该项目团队重新在该地点进行钻探,并尝试钻取海床以下200 m的沉积物样品.2024年12月17日,再次在厚度587.96 m的冰架上形成了直径约35 cm的热水钻孔,并于2024年12月20日采用重力取样器获取了1.1 m沉积物样心,随后将AIDD钻机挪至钻孔,并成功下放所有隔水管;但遗憾的是,在下放钻杆时再次遇到严重的技术问题,导致无法继续钻进,不得不于2024年12月27日结束本工作季钻探工作.2025—2026南极工作季,该项目钻穿523 m冰层后,成功下入超过1 300 m长的隔水管和钻柱,最终于2026年1月6日成功钻取229 m沉积物样品.

3 南极大洋地质科学钻探

自1972年以来,在南极周边海域和南大洋已实施了19次大洋钻探工程,王汝建等(2017)对2018年以前实施的南极大洋科学钻探进行了梳理,本文重点梳理2018年以来实施的IODP 374 (2018)、IODP 379 (2019)和IODP 382 (2019)航次的大洋钻探成果 (McKay *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2021a).南大洋科学钻探涉及的主要技术包括钻探船、钻孔重入和沉积物取心技术.

3.1 南大洋地质科学钻探技术

大洋钻探船是实施南大洋钻探的基础,近年来南大洋钻探均由“决心”号钻探船完成(拓守廷等, 2016).“决心”号钻探船长143 m,宽21 m,排水量18 636 t,钻塔高61.5 m,圆形月池直径7 m,随船配备9 150 m的钻杆,最大钻探水深8 235 m,海底以下最大钻探深度可达4 000 m,能在海上连续航行

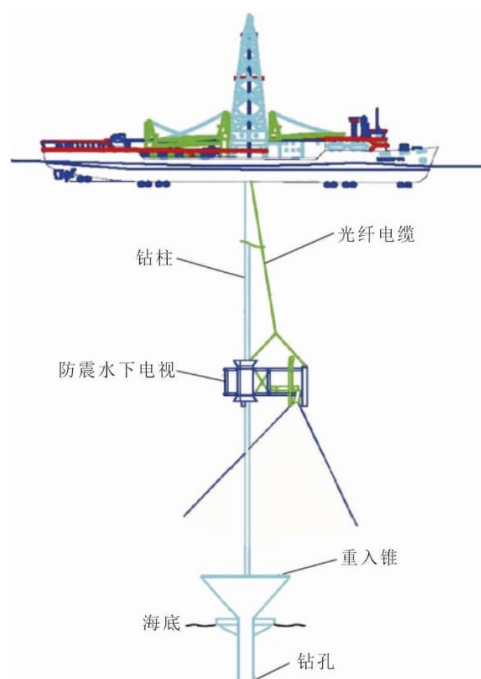


图11 “决心”号钻探船防震水下电视系统(朱芝同等,2020)
Fig.11 The Seismic-Resistant Underwater TV System of
“Jordis Resolution” drilling vessel

45天,可在50节风速和8 m浪高的海况下持续作业。“决心”号钻探船配备12个动力定位的强力推进器和400 t的升沉补偿装置,可保证钻探作业时钻杆柱的相对稳定,且配备有孔口防喷装置,可在含油气区开展钻探作业(拓守廷等,2016)。

“决心”号采用无隔水管钻进技术,如图11所示,一般采用海水配置泥浆。泥浆从船上泵送到井底后,通过钻杆柱和孔壁的外环空,携带岩屑返回海床。由于无隔水管,为了保证提钻后还能重新进入钻孔,其配备有钻孔重入技术(朱芝同等,2020)。在重入钻孔时,通过安装在钻头上的声呐扫描器和重入锥附近的声呐反射器来精确定位钻头相对于重入锥的距离和方位,然后通过动力定位系统来移动钻头从而实现重入钻孔,同时配备有防震水下电视系统(图11),能实时传输视频图像,提高了重入钻孔时目标识别的效率和可靠性。

“决心”号钻探船配备适用不同地层条件的取心钻具,主要包括先导式活塞取心钻具(APC)、延伸取心钻具(XCB)和回转取心钻具(RCB)(Weber *et al.*, 2021b)。APC钻具主要用于海底上部软泥层的钻进取心,通过泵送泥浆可将连接内管和外管的剪切销钉剪断,使内管沿着活塞杆向下运动切入地层(图12),形成一个直径为66 mm的

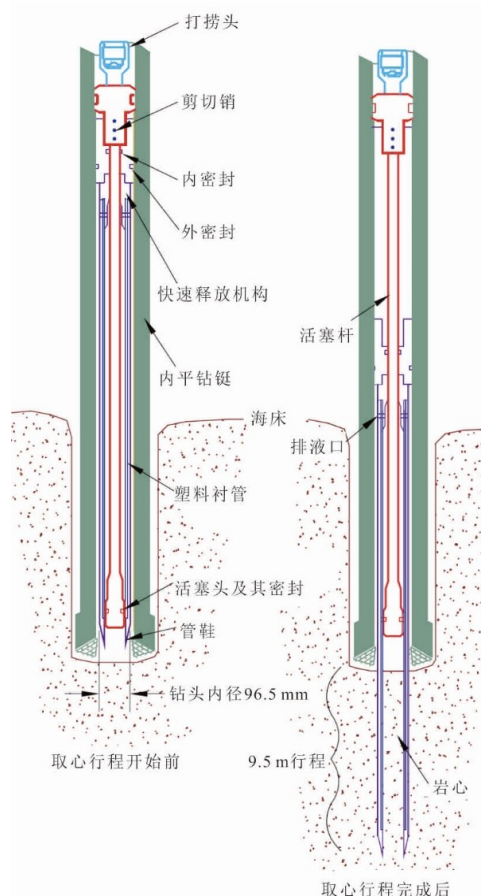
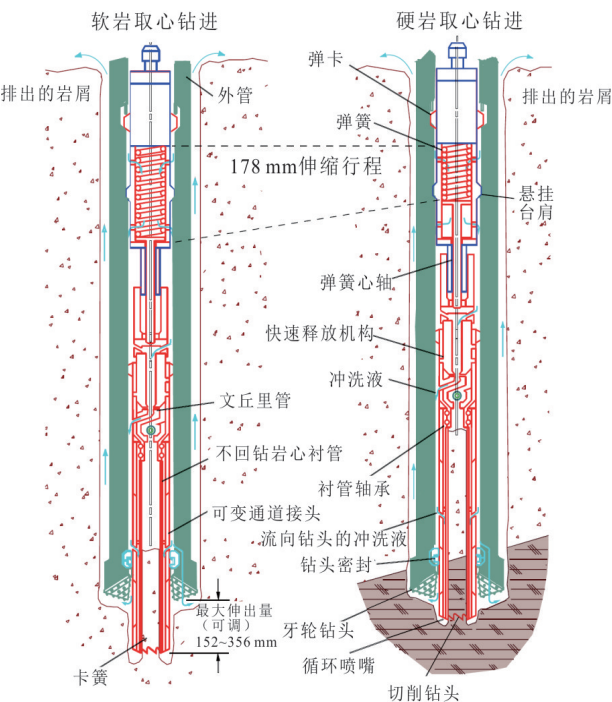


图12 APC钻具结构原理图(Weber *et al.*, 2021b)
Fig.12 Schematic diagram of APC drilling tool structure

岩心。APC钻具单次最大钻进行程为9.5 m。取心完成的APC钻具可通过绳索绞车进行打捞。

当地层太硬导致APC钻具无法钻进或地层太软导致APC钻具起拔力过大时,需采用延伸取心钻具(XCB)开始钻进。XCB钻具是一套底部带切削钻头的回转钻进系统(图13),适用于砂层和软硬交错地层的钻探取心。其切削钻头外径小于外侧牙轮钻头内径,能够以较小扭矩和较低钻井液排量钻取中等硬度以下的岩石,取心直径为58 mm。在软岩中钻进时,XCB钻具切削钻头超前伸出距离一般为152~356 mm;在硬岩中钻进时,其切削钻头则完全缩回牙轮钻头内。XCB钻具和APC钻具使用同一孔底钻具组合,因此二者可在不提钻的情况下切换使用。

RCB钻具(图14)为硬岩钻进使用,属于传统的回转取心钻具。RCB钻具采用无磁岩心管,能钻取58 mm直径的岩心,其单次取心长度一般为9.6 m。RCB钻具为单动双管钻具,钻进时,外管跟随钻头转动,而内管则保持不动。值得注意的是,RCB



在软岩中切削钻头伸出 在硬岩中切削钻头缩回
图 13 XCB 钻具结构原理图(Weber *et al.*, 2021b)

Fig.13 Schematic diagram of XCB drilling tool structure

钻具和 XCB 钻具均可开展不取心的全面钻进。

为了减少起下钻次数,节省钻探时间,南极大洋科学钻探均采用绳索取心方法打捞钻具。绳索取心钻杆为内平、外加厚结构,内径为 105 mm,长度为 9.65 m,可以满足不同取心钻具及测井仪器的下放和提升需求。大洋科学钻探技术经过几十年的发展已经趋于成熟,目前主要存在的问题是岩心采取率低,整个大洋钻探的平均岩心采取率仅为 62.2%。

3.2 南大洋科学钻探工程

2018 年以来,IODP 先后在南极罗斯海(IODP 374)、阿蒙森海(IODP 379)、斯科舍海(IODP 382)开展了南大洋科学钻探航次,如附表 1 所示(McKay *et al.*, 2019; Weber *et al.*, 2021a)。每个航次均在不同站位开展了钻探作业。受冰情和地层条件影响,部分站位实施多个钻孔,以获取目标层所有岩心。

2018 年 1 月至 3 月,为探索南极冰盖动态、海平面变化及其与全球气候的关系,“决心”号钻探船在罗斯海的 5 个站位采用取心钻进和全面钻进两种方式完成了 11 个钻孔的施工,最大作业水深 2 394.39 m,钻探总进尺 3 006.8 m,共钻取 1 292.7 m 岩心,岩心采取率仅为 52.2%,平均钻速为 4.67 m/h。2019 年 1 月至 3 月,为研究西南极冰盖的过去行为及其对气候变

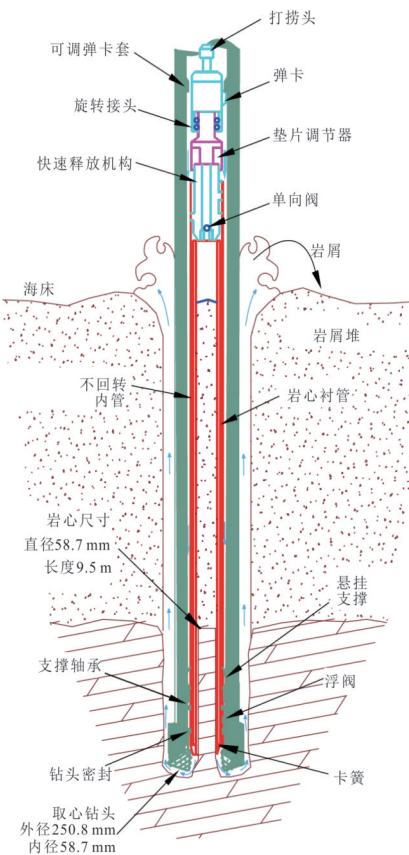


图 14 RCB 钻具结构原理图(Weber *et al.*, 2021b)

Fig.14 Schematic diagram of RCB drilling tool structure

化的反应,“决心”号在阿蒙森海的 2 个站位施工了 11 口钻孔,最大作业水深 4 190.1 m,共钻取 1 086.46 m 的岩心,岩心采取率达到了 85%,平均钻速降低到 3.77 m/h。同年 3 月至 5 月,为重建过去气候条件、探索冰盖历史与大气和海洋循环之间的关系,“决心”号在斯科舍海 5 个站位完成 18 口钻孔,共进尺 3 715.4 m,钻取岩心 2 809.38 m,岩心采取率高达 92.6%,平均机械钻速达到了 4.13 m/h。

4 展望

开展科学钻探工程是破解南极冰下与周边大洋地质环境诸多未解之谜的重要手段。近年来,世界各国陆续开展了冰下基岩、冰架下地质和南极大洋地质科学钻探工程,在钻探技术与装备、科学认知上均取得了较好成果。但我国仅开展了孔底回转动力式冰下基岩钻具的研发和工程应用,虽然开展了地表回转动力式冰下基岩钻机研发,但尚未在南极成功应用。我国中山站和秦岭站分别紧邻埃默里冰架和罗斯冰架(南极三大冰架之二),可为开展冰架下地质科学钻探

提供后勤保障,但我国尚未开展相关钻探技术与装备研发。“梦想”号钻探成功下水标志着我国已具备大洋钻探的能力,但尚未开展大洋科学钻探工程,更未前往南极开展南大洋冰区地质科学钻探。为响应习近平总书记提出的“认识极地、保护极地、利用极地”的号召,聚焦该世界科技前沿问题和国家“探亮冰盖行动”等国家战略需求,不断提升我国的极地话语权和影响力,我国应在南极冰下及大洋地质科学钻探领域进一步开展研究工作,相关建议如下。

(1)发展冰层/冰下基岩快速钻探取样技术。围绕南极冰下地质地球物理探测与快速取样需求,突破冰层井底动力钻具、智能感知与智能控制、多功能连续管、全电驱非金属连续管下放与回收等关键技术,形成连续管式南极冰下地质多介质快速钻探装备体系,并开展现场示范工程,为区域化开展南极冰下地质研究提供支撑。比如在南极甘布尔采夫山实施冰下基岩科学钻探工程,有望打开南极内陆奥秘的天窗,在1~2个南极工作季内完成1 000 m冰层钻探,并获取不少于10 m的冰下基岩岩心。

(2)发展南极冰架下地质科学钻探技术。围绕南极冰架下地质取样需求,突破快速冰流条件下钻探装备横漂补偿技术、大直径冰层钻孔成孔和防冻技术、高强度轻量化耐低温隔水管等关键技术,形成南极冰架下地质科学钻探装备体系并开展极地现场示范工程,为南极冰盖演化与大洋相互作用研究提供支撑。比如在罗斯冰架开展钻探工程,揭示西南极冰盖演化与气候变化之间的关系,在2~3个南极工作季内沿着剖面完成若干点位冰层钻探和冰架下沉积物取样。

(3)发展南极冰区大洋科学钻探技术。依托我国“梦想”号大洋钻探船,围绕南极冰区大洋科学钻探地质取样需求,突破大洋钻探船极区配套钻探装备、耐低温环保型海水基钻完井液、低温海域泥浆连续循环钻井技术和复杂地层高效高质量取心技术等关键技术,形成南极冰区大洋科学钻探工艺与装备体系,并在南大洋普里兹湾陆架及深水区、罗斯海陆架及深水区或南极半岛开展示范工程,为南大洋南极底层水形成、南极海冰与冰盖扩张的历史记录及其与全球气候变化的关系研究提供支撑。

附表1见<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.118>。

References

Albert, M. R., Slawny, K., Johnson, J., et al., 2024. Drilling Ice and Subglacial Rock Cores for Scientific Discov-

ery in a Changing Climate. *Glaciers—Recent Research, Importance to Humanity and the Effects of Climate Change*. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004695>

Boeckmann, G. V., Gibson, C. J., Kuhl, T. W., et al., 2021. Adaptation of the Winkie Drill for Subglacial Bedrock Sampling. *Annals of Glaciology*, 62(84): 109—117. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.73>

Braddock, S., Venturelli, R. A., Nichols, K., et al., 2025. Lessons Learned from Shallow Subglacial Bedrock Drilling Campaigns in Antarctica. *Annals of Glaciology*, 65(18):1—11. <https://doi.org/10.1017/aog.2024.12>

Falconer, T., Pyne, A., Olney, M., et al., 2007. Operations Overview for the Andrill Mcmurdo Ice Shelf Project, Antarctica. *Terra Antartica*, 14(3): 131—140.

Falconer, T., Pyne, A., Wilson, D., et al., 2008. Operations Overview for the Andrill Southern Mcmurdo Sound Project, Antarctica. *Terra Antartica*, 15(1): 41—48.

Gong, D., 2017. Design and Experimental Study of Self-Synchronous Vibration Sampler for Subglacial Sediments (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).

Goode, J. W., Severinghaus, J. P., Johnson, J., et al., 2021. Deep Ice Drilling, Bedrock Coring and Dust Logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 62(85—86): 324—339. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>

Harwood, D., Levy, R., Cowie, J., et al., 2006. Deep Drilling with the ANDRILL Program in Antarctica. *Scientific Drilling*, 3: 43—45. <https://doi.org/10.5194/sd-3-43-2006>

Hemer, M., Harris, P., 2003. Sediment Core from beneath the Amery Ice Shelf, East Antarctica, Suggests Mid-Holocene Ice-Shelf Retreat. *Geology*, 31(2): 127—130. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0127:SCFBTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0127:SCFBTA>2.0.CO;2)

Hodgson, D. A., Bentley, M. J., Smith, J. A., et al., 2016. Technologies for Retrieving Sediment Cores in Antarctic Subglacial Settings. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2059): 20150056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0056>

Huston, M., Gilbert, N., Newman, J., 2006. Final Comprehensive Environmental Evaluation (CEE) for ANDRILL, McMurdo Sound Portfolio. In: Huston, M., Gilbert, N., Newman, J., eds., ANDRILL-McMurdo Sound Portfolio. International Antarctic Centre, Christchurch.

- Kellogg, D. E., Kellogg, T. B., 1986. Diatom Biostratigraphy of Sediment Cores from beneath the Ross Ice Shelf. *Micropaleontology*, 32(1): 74–94. <https://doi.org/10.2307/1485703>
- Kuhl, T., Gibson, C., Johnson, J., et al., 2021. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill Development and Pirrit Hills Field Project. *Annals of Glaciology*, 62(84): 53–66. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.59>
- Li, B., Han, L. L., Li, Y. Z., et al., 2021. Scientific Objective Analysis and Drilling Technology Progress of Polar Drilling in the United States. *Drilling Engineering*, 48(9): 10–25 (in Chinese with English abstract).
- McKay, R. M., De Santis, L., Kulhanek, D. K., et al., 2019. Expedition 374 Summary. In: McKay, R. M., De Santis, L., Kulhanek, D. K., and the Expedition 374 Scientists, Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 374: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.374.101.2019>
- Naish, T. R., Powell, R. D., Levy, R. H., et al., 2007. A Record of Antarctic Climate and Ice Sheet History Recovered. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 88(50): 557–558. <https://doi.org/10.1029/2007eo500001>
- Niu, X. W., Gao, J. Y., Wu, Z. C., et al., 2016. Lithosphere Anisotropy of Prydz Bay, Antarctica: From Ocean Bottom Seismometer Long Term Observation. *Earth Science*, 41(11): 1950–1958 (in Chinese with English abstract).
- Patterson, M. O., Levy, R. H., Kulhanek, D. K., et al., 2022. Sensitivity of the West Antarctic Ice Sheet to +2 °C (SWAIS 2C). *Scientific Drilling*, 30: 101–112. <https://doi.org/10.5194/sd-30-101-2022>
- Talalay, P. G., 2013. Subglacial Till and Bedrock Drilling. *Cold Regions Science and Technology*, 86: 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.08.009>
- Talalay, P. G., Leitchenkov, G., Lipenkov, V., et al., 2025. Rare Ice-Base Temperature Measurements in Antarctica Reveal a Cold Base in Contrast with Predictions. *Communications Earth & Environment*, 6(189): 1–7. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02127-1>
- Talalay, P., Li, X. C., Zhang, N., et al., 2021. Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part II. Ice and Bedrock Electro-mechanical Drill (IBED). *Annals of Glaciology*, 62(84): 12–22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>
- Tuo, S. T., Jian, Z. M., 2016. Scientific Ocean Drilling Vessels: Review and Prospect. *Journal of Engineering Studies*, 8(2): 155–161 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., Xiao, W. S., Zhang, T. L., et al., 2017. Geological Drilling in Polar Regions: Progress and Perspectives. *Advances in Earth Science*, 32(12): 1236–1244 (in Chinese with English abstract).
- Weber, M. E., Raymo, M. E., Peck, V. L., et al., 2021a. Expedition 382 Summary. In: Weber, M. E., Raymo, M. E., Peck, V. L., Williams, T., and the Expedition 382 Scientists, Iceberg Alley and Subantarctic Ice and Ocean Dynamics. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 382: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.382.101.2021>
- Weber, M. E., Raymo, M. E., Peck, V. L., et al., 2021b. Expedition 382 Methods. In: Weber, M. E., Raymo, M. E., Peck, V. L., Williams, T., and the Expedition 382 Scientists, Iceberg Alley and Subantarctic Ice and Ocean Dynamics. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 382: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.382.102.2021>
- Zhang, N., Wang, L., Talalay, P., et al., 2020. Advances in Research on Key Technology for Ice Drilling in the Polar Regions. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(2): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. T., Liu, X. L., Tian, L. Y., et al., 2020. Development and Application of the Reentry Drilling Technology and System in Ocean Drilling. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(7): 8–15 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 宫达, 2017. 自同步式冰下沉积物振动取样器设计与实验研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 李冰, 韩丽丽, 李亚洲, 等, 2021. 美国极地钻探科学目标分析与钻探技术进展. *钻探工程*, 48(9): 10–25.
- 牛雄伟, 高金耀, 吴招才, 等, 2016. 南极洲普里兹湾岩石圈各向异性: 海底地震仪观测. *地球科学*, 41(11): 1950–1958.
- 拓守廷, 翦知湔, 2016. 科学大洋钻探船的回顾与展望. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 8(2): 155–161.
- 王汝建, 肖文申, 章陶亮, 等, 2017. 极地地质钻探研究进展与展望. *地球科学进展*, 32(12): 1236–1244.
- 张楠, 王亮, Pavel Talalay, 等, 2020. 极地冰钻关键技术研究进展. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 47(2): 1–16.
- 朱芝同, 刘晓林, 田烈余, 等, 2020. 大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 47(7): 8–15.