

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。本文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

中图分类号: P634.5

收稿日期: 2025-6-27

Progress and Prospects of Geological Scientific Drilling beneath Antarctic Ice Sheet and in the 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, Qingdao 266580, China

基金项目:

第一作者简介: 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。E-mail: zhaokg@acca21.org.cn, ORCID: 0009-0000-2929-1081

*通讯作者简介: 王文涛(1982-), 男, 研究员, 主要从事海洋科技政策、可持续发展与全球气候变化战略研究。E-mail: wangwt@acca21.org.cn

作者贡献度说明: 作者 1 撰写初稿; 作者 2 审阅与修改, 资助; 作者 3 文献调研; 作者 4 审阅与修改; 作者 5 文献调研。

³ Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China

* Corresponding author: Wang Wentao, wangwt@acca21.org.cn

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 influences 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.

Keywords: Antarctica, Subglacial bedrock, Ice shelves, Southern Ocean, Geology scientific drilling

引言

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 $1239 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，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; 李冰 等, 2021; 王汝建 等 2017; 牛雄伟 等 2016; 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。

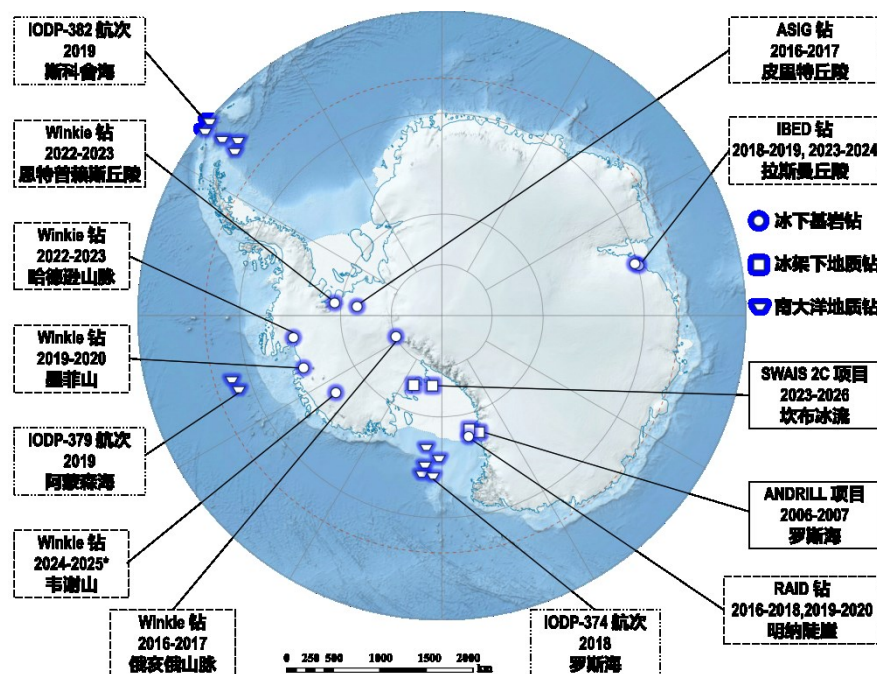


图 1 近年来南极冰下及大洋地质科学钻探工程位置

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

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; Kuhl *et al.*, 2021; Goodge *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, 并通过上提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, 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, 并调节孔内钻井液压力以避免钻孔水力压裂; (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芯钻探; (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。

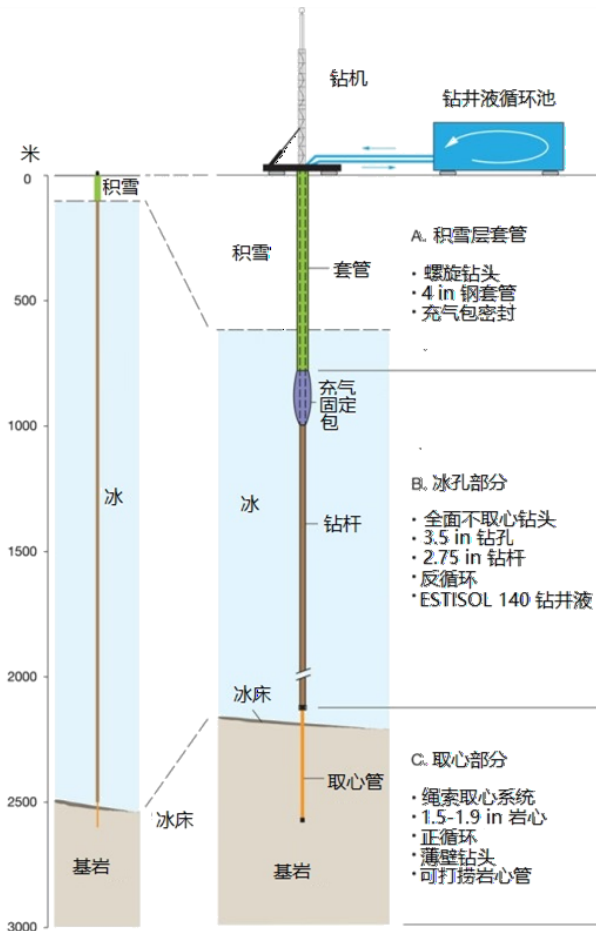


图 2 RAID 钻机系统原理设计图 (李冰 等, 2021)

Fig 2 Principle design diagram of RAID drilling rig system

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 (简称为 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 (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) 粒雪层采用螺旋取芯钻具; (2) 冰层采用孔底局部反循环取芯钻具; (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。

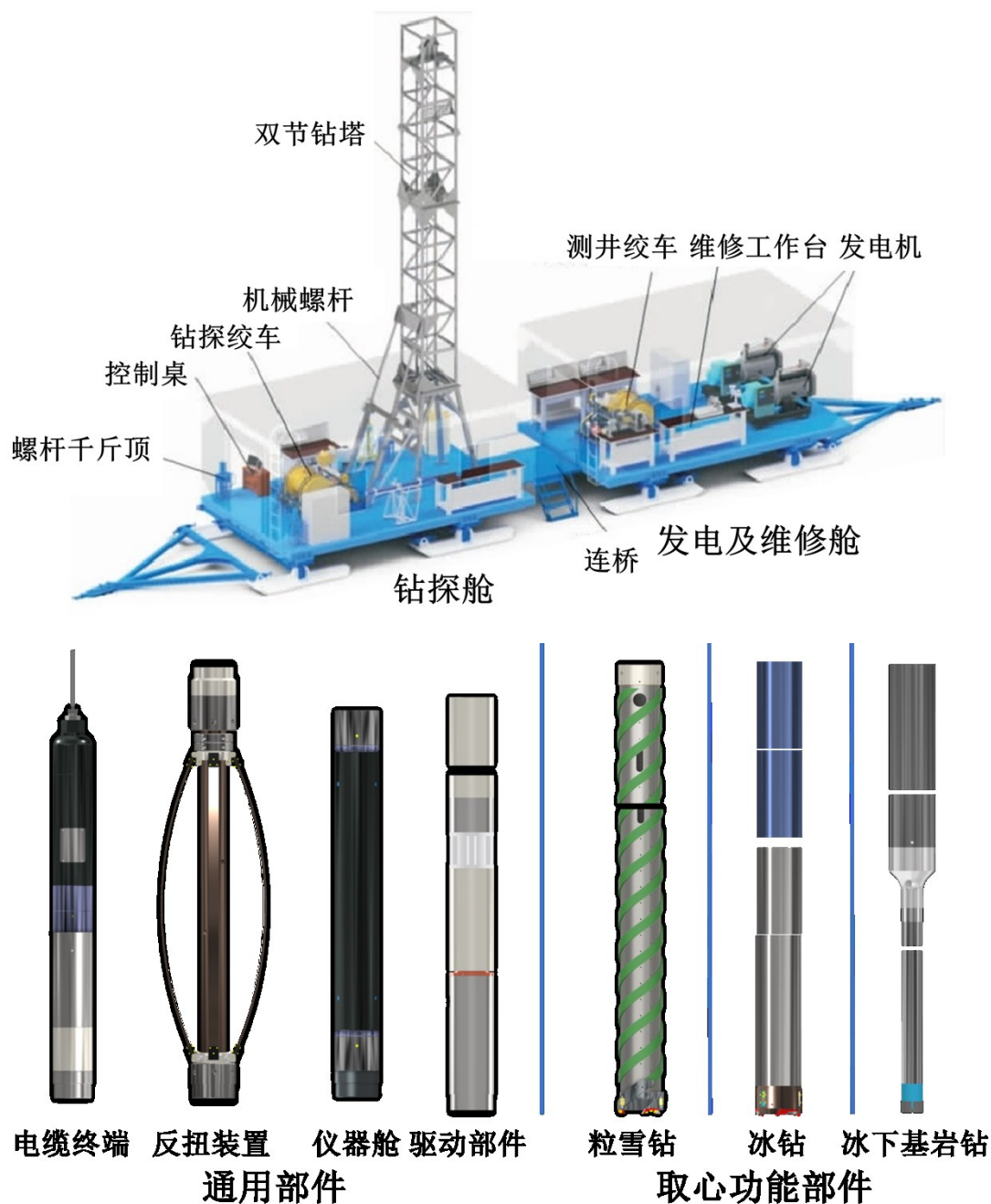


图 3 IBED 孔底回转动力式钻机系统结构示意图 (张楠 等, 2020)

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

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; Kuhl *et al.*, 2021; Goodge *et al.*, 2021; Braddock *et al.*, 2024)。

(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四次冰下基岩科学钻探工程, 并预计在 2024/25 工作季在韦谢山 (Mount Waesche) 开展冰下基岩钻探 (Braddock *et al.*, 2024)。2016/17 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, 岩心长度达到了 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, 样品长度达到了 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。

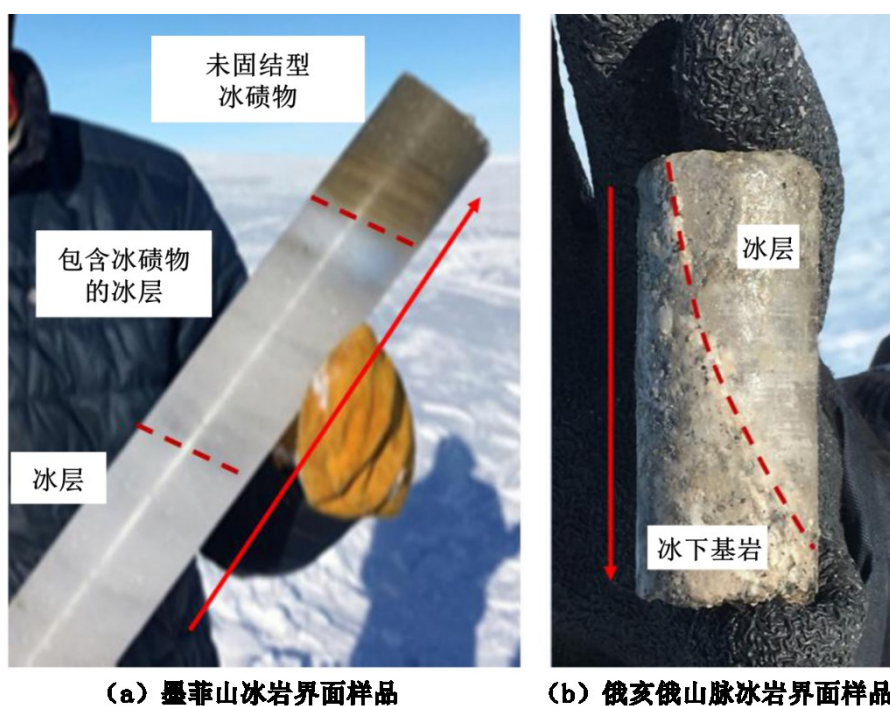


图 4 Winkie 钻机在墨菲山和俄亥俄山脉钻取的冰岩界面样品 (Braddock *et al.*, 2024)

Fig 4 The Ice-bedrock interface samples from Mount Murphy and Ohio Range obtained by Winkie drill

(2) 中深层冰下基岩钻探工程 (ASIG 钻机)

2016/17 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。



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

(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，经过三次南极现场野外试验与改进，RAID 钻机最终于 2019/20 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。



图 6 RAID 钻机获得的冰下地质样品 (Goodge *et al.*, 2021)

Fig 6 The subglacial geological samples obtained by RAID drill

表 1 美国冰下基岩钻探工程主要技术参数 (Boeckmann *et al.*, 2021; Kuhl *et al.*, 2021; Goodge *et al.*, 2021; Braddock *et al.*, 2024)

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 2016/17	120	28.3	1.5	0.67	33.4	无粒雪层	Isopar K	套管+封 隔器	Kovacs 螺旋钻	聚晶金刚石 复合片钻头	地质 取心钻头 孕镶 金刚石 钻头		
	西南极墨菲山 粒雪+冰层 2019/20		40.9		1.37		Badger- Eclipse 钻						Badger-Eclipse 钻	地质取心钻 头
	西南极哈德逊山脉 粒雪+冰层 2022/23		49.6		0		Badger- Eclipse 钻							
	西南极恩特普赖斯丘陵 蓝冰 2022/23		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 (2016/17)	700	150	10	5	39	螺旋取 芯钻	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		
	格陵兰岛冰穹普拉德霍 2023		509.4	4	4.4		螺旋取芯 钻						Isopar K	套管+封 隔器
RAID 钻	西南极明纳陡崖 2019/2020	3300	680	3	3	38.4	螺旋钻 取芯钻	ESTISO L™ 140	套管+封 隔器	全面钻头	工具钢 取芯钻头 聚晶金刚石 复合片钻头	孕镶 金刚石 钻头		

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 外的达尔克冰川区对 IBED 钻机进行了测试。IBED 钻机钻穿了 196.4m 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）。

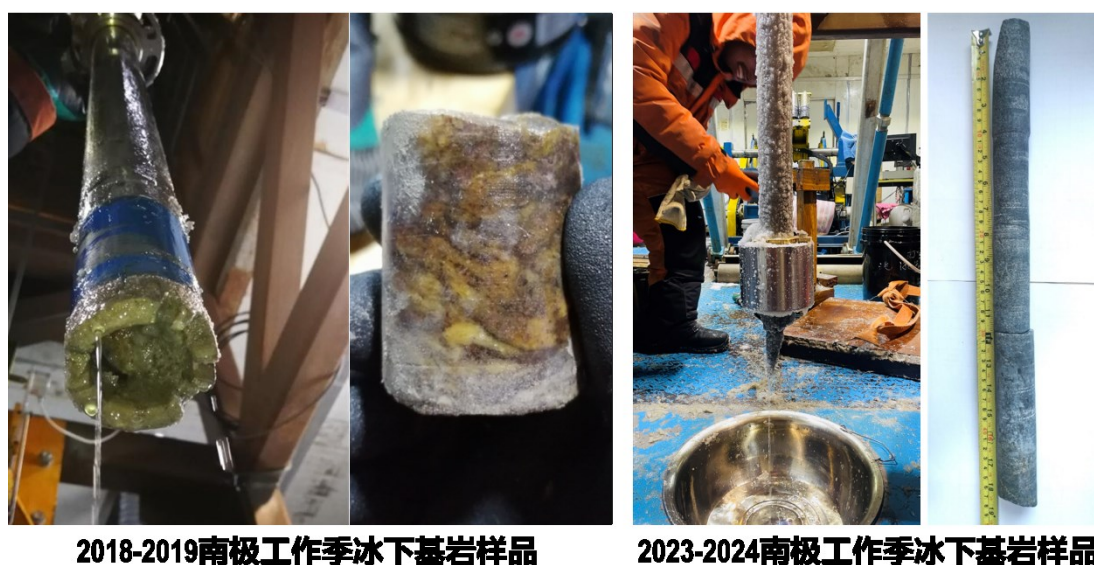


图 7 IBED 钻机钻取的冰下基岩样品（张楠 等，2020；Talalay *et al.*, 2025）

Fig 7 The subglacial geological samples obtained by IBED drill

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芯最常用的方法 (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, 其取芯直径为 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), 其取芯直径为 106 mm, 最大取芯长度为 6 m。

以上沉积物取样器从上世纪 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 (ANtarctic geological DRILLing) 钻探项目和 AIDD (Antarctic Intermediate Depth Drill) 钻探项目 (Harwood *et al.*, 2006; Huston, *et al.*, 2006; Naish *et al.*, 2007; Patterson *et al.*, 2022; Falconer *et al.*, 2007)。

ANDRILL 钻机能够在冰层及水深达 1000 m 深的海底下钻取超过 1200 m 深的软沉积物和岩心样品, 其主要包括地表钻机、海洋立管、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, 具有升降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, 为了防止海洋立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, 海洋立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 2500 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，以保持海洋立管在冰架钻孔内的自由移动。

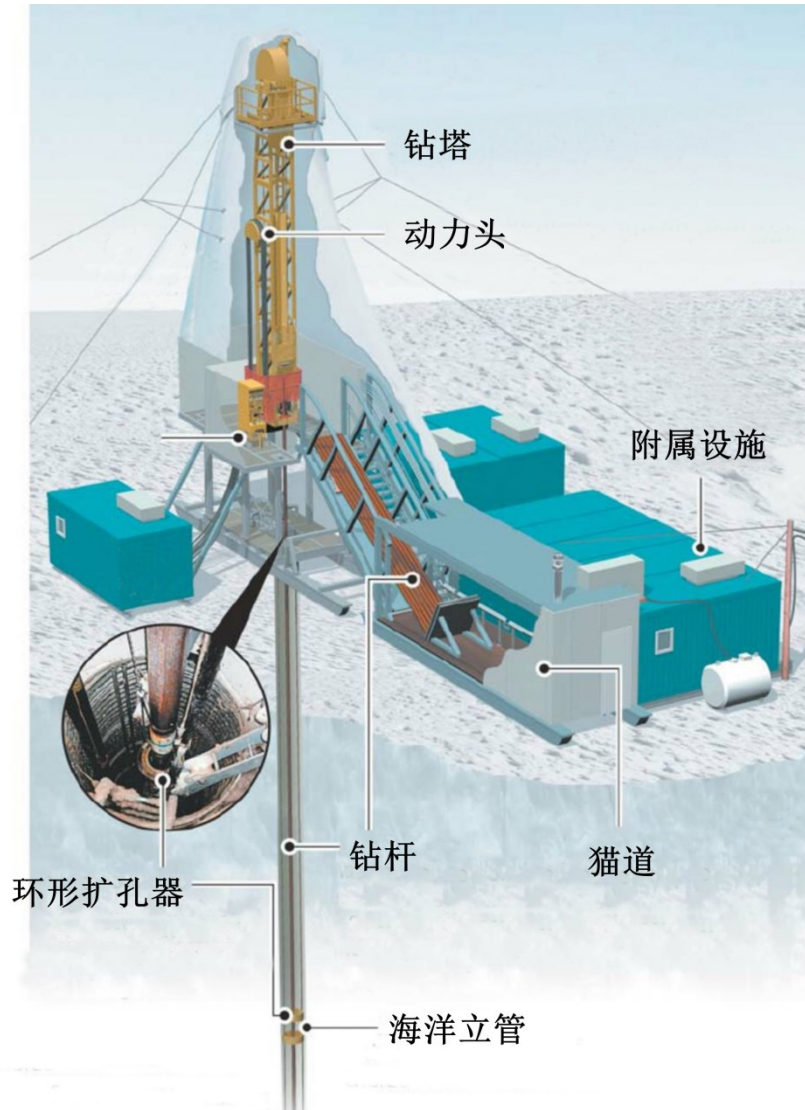


图 8 ANDRILL 钻机 (Naish *et al.*, 2007)

Fig 8 Schematic diagram showing the main elements of ANDRILL drill

AIDD 钻机是为西南极冰盖 2 °C 敏感性项目 (Sensitivity of the West Antarctic Ice Sheet to 2°C, 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 1603 m (BQ 系列)、1285 m (NQ 系列) 和 876 m (HQ 系列)。钻机采用液压马达驱动，转速为 1400 rpm，扭矩可达 2800 Nm，整机重量

约为 1800 kg。钻机适用冰层/水深达 1000 m，冰架下取心能力超 200 m。海洋立管由玻璃纤维增强环氧树脂制成，每根立管长度为 3 m。海底沉积物取样钻具有三种，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芯，如图 9 所示（Patterson *et al.*, 2022）。



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

2.2 冰架下地质科学钻探工程

（1）ANDRILL 钻探工程

为了获取罗斯冰架海床下方约 1300 m 深度的地质样品，研究南极在过去 6500 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 1284.87 m 的沉积物样品（Falconer *et al.*,

2007)。海洋立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，钻探人员在该深度进行了第三次固井，并更换为 NQ 钻杆，裸眼钻进至 1284.87 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海洋立管。根据 GPS 监测数据，从 2006 年 10 月 31 日布放立管到 2007 年 1 月 11 日切割回收立管，海洋立管井口共漂移了约 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 1138 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，钻探人员在海洋立管上增加了 2 个 5 t 浮力和 2 个 10 t 浮力的囊漂浮系统 (图 11)，用于支撑和张紧海洋立管，以减轻海冰平台负载。

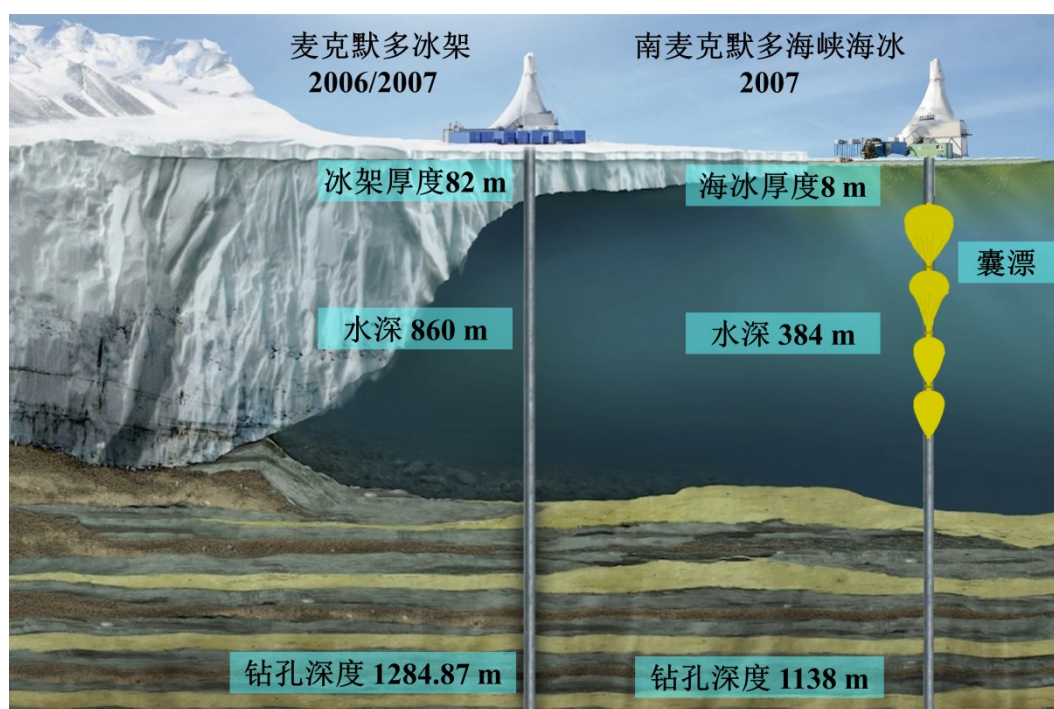


图 10 ANDRILL 钻探工程

Fig 10 Schematic diagram of ANDRILL Drilling Projects

(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

计划分别于坎布冰流（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 长的海洋立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立管下放，最终所有立管均被回收至地表。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 沉积物样芯，随后将 AIDD 钻机挪至钻孔，并成功下放所有立管，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^[27]。2025-2026 南极工作季，该项目钻穿 523m 冰层后，成功下入超过 1300 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，王汝建等在《极地地质钻探研究进展与展望》一文中对 2018 年以前实施的南极大洋科学钻探进行了梳理，本文重点对 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梳理（McKay *et al.*, 2019; Gohl *et al.*, 2021; Weber *et al.*, 2021a）。南大洋科学钻探涉及到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 18636 吨，钻塔高 61.5 m，圆形月池直径 7 m，随船配备 9150 m 的钻杆，最大钻探水深 8235 m，海底以下最大钻探深度可达 4000 m 左右，能在海上连续航行 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 的升降补偿装置，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，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。

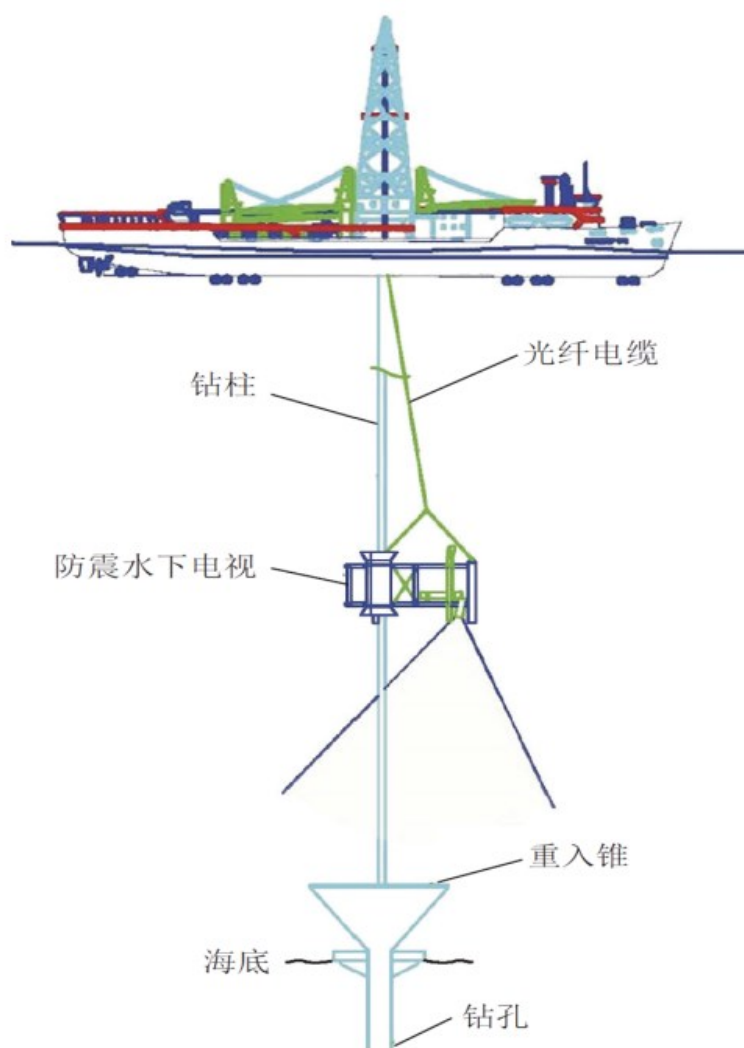


图 11 “决心号”钻探船防震水下电视系统（朱芝同等，2020）

Figure 13 The Seismic-Resistant Underwater TV System of "Jordis Resolution" drilling vessel

“决心号”钻探船配备适用不同地层条件的取心钻具，主要包括高级活塞取心钻具（APC）、伸缩式超前取心钻具（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 的岩心。APC 钻具单次最大钻进行程为 9.5 m。取芯完成的 APC 钻具可通过绳索绞车进行打捞。

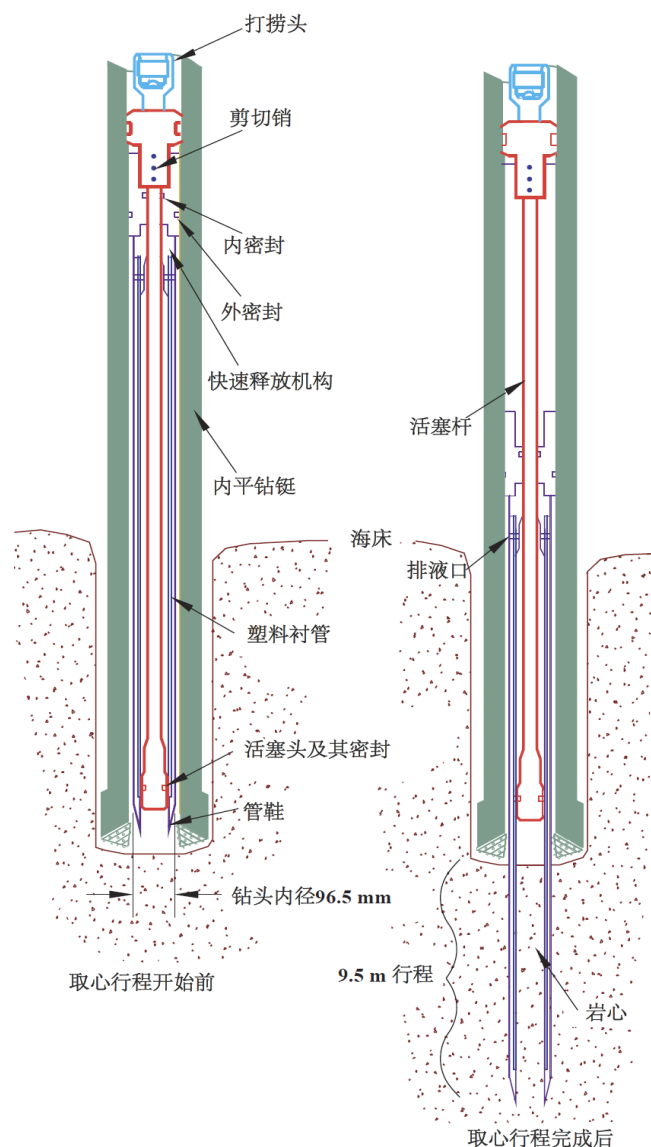


图 12 APC 钻具结构原理图 (Weber *et al.*, 2021b)

Fig12 Schematic diagram of APC drilling tool structure

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，需采用伸缩式超前取心钻具 (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，取芯直径为 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。

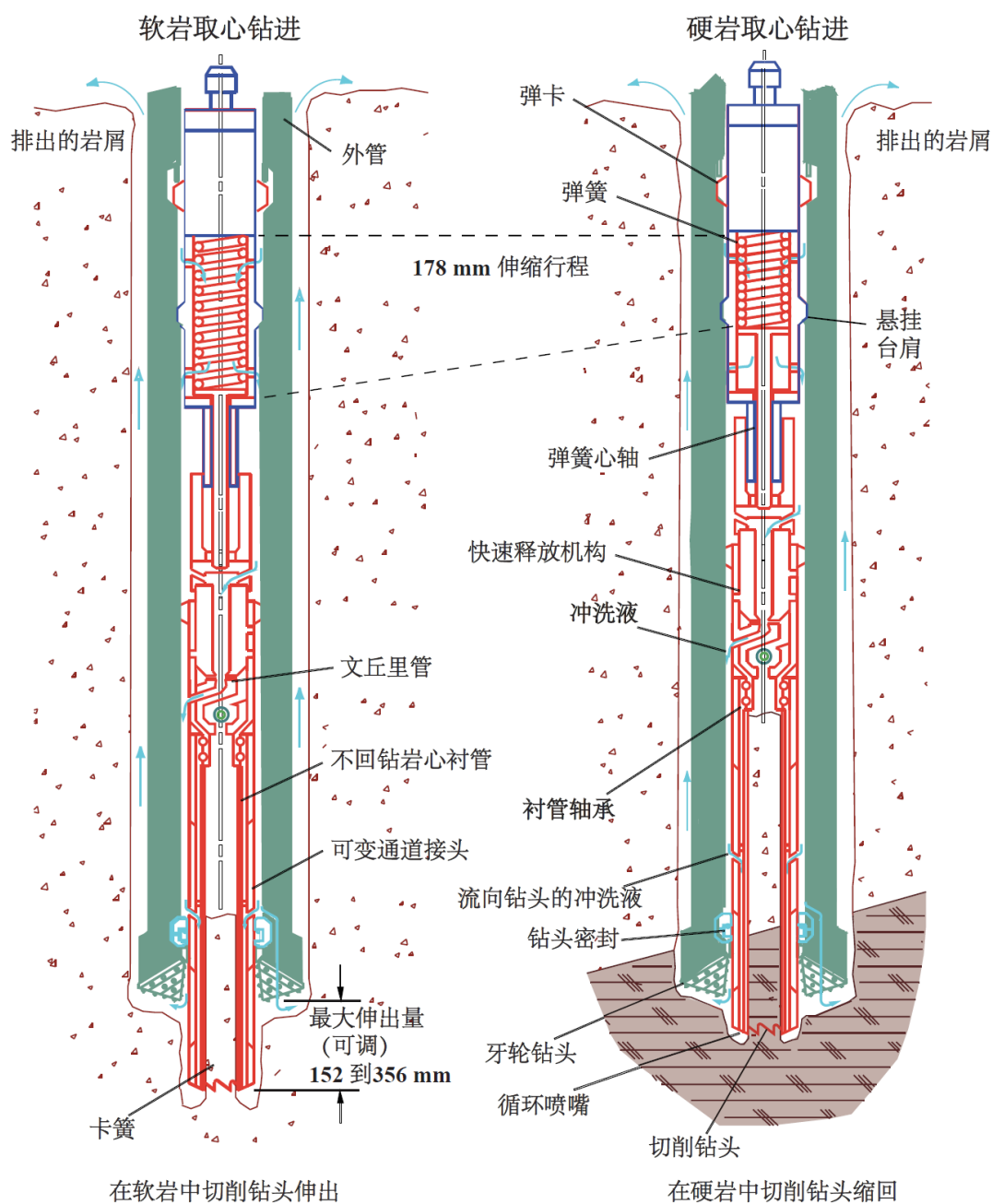


图 13 XCB 钻具结构原理图 (Weber *et al.*, 2021b)

Fig 13 Schematic diagram of XCB drilling tool structure

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 钻具和 XCB 钻具均可开展不取芯的全面钻进。

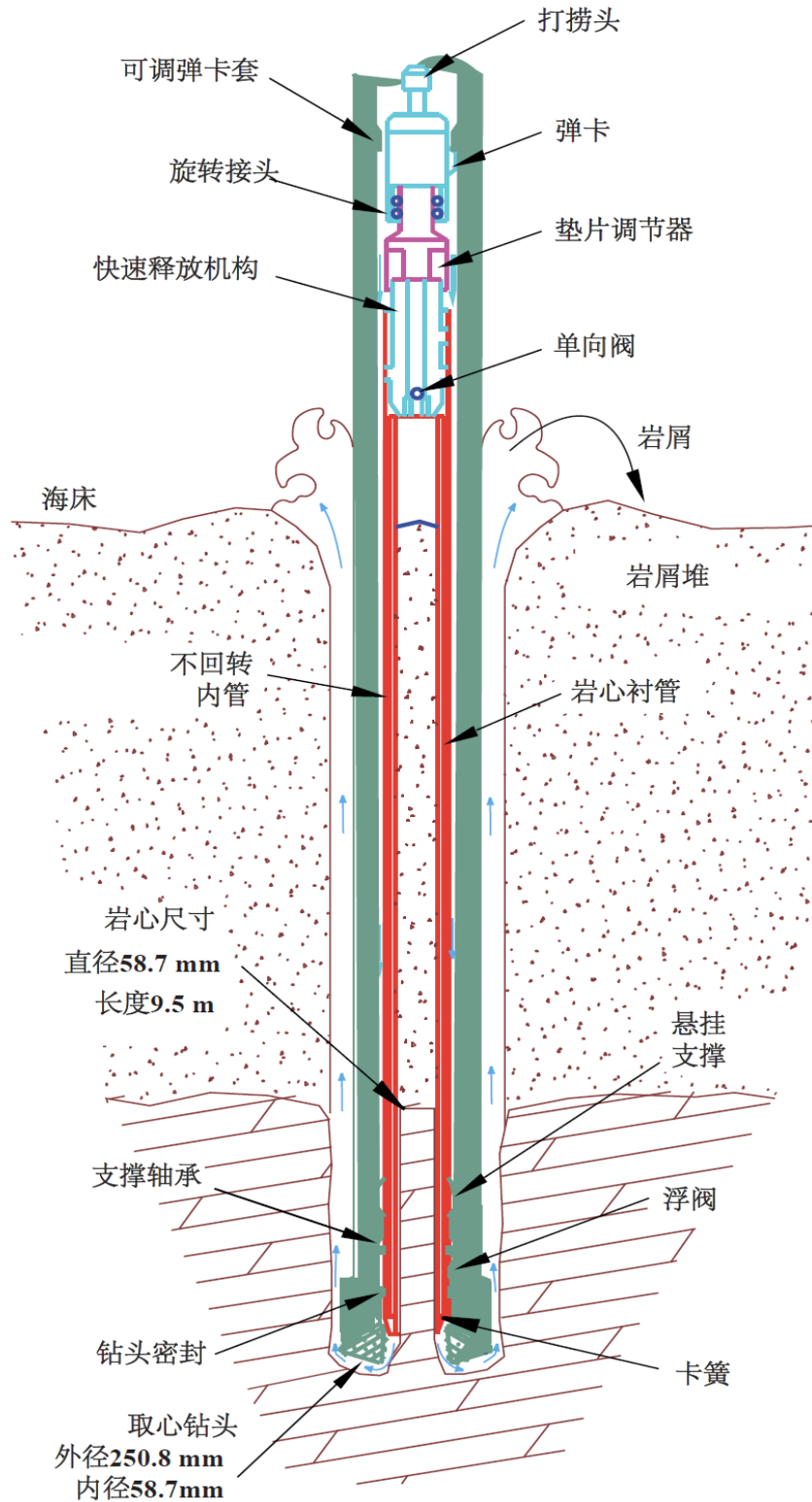


图 14 RCB 钻具结构原理图 (Weber *et al.*, 2021b)

Fig14 Schematic diagram of RCB drilling tool structure

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采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, 如表 2 所示 (McKay *et al.*, 2019; Gohl *et al.*, 2021; 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 2394.39 m, 钻探总进尺 3006.8 m, 共钻取 1292.7 m 岩心, 岩心采取率仅为 52.2%, 平均转速为 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 4190.1 m, 共钻取 1086.46 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 3715.4 m, 钻取岩心 2809.38 m, 岩心采取率高达 92.6%, 平均机械钻速达到了 4.13 m/h。

表 2 2018 年以来在南极海域开展的大洋科学钻探工程 (McKay *et al.*, 2019; Gohl *et al.*, 2021; Weber *et al.*, 2021a)

Table 2 Southern Ocean Scientific Drilling Projects Conducted Since 2018

时间	航次	海域	站位	钻孔	纬度	经度	水深/m	钻进总 进尺/m	取心钻 进进尺 /m	全面钻 进进尺 /m	岩心长 度/m	岩心采 取率/%	钻进 时间/ 天	平均钻 速/ $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$			
2018/01- 2018/03	374	罗斯海	U1521	U1521A	75°41.0351'S	179°40.3108'W	562.18	650.1	650.1	0	411.50	63.30	5.53	4.90			
			U1522	U1522A	76°33.2262'S	174°45.4652'W	557.60	701.8	701.8	0	279.57	39.84	6.26	4.67			
			U1523	U1523A	74°9.0172'S	176°47.7067'W	828.02	46.3	46.3	0	33.51	72.38	1.11	1.74			
				U1523B	74°9.0179'S	176°47.6660'W	827.99	164.4	121.2	43.2	45.13	37.24	1.53	4.48			
				U1523C	74°9.0288'S	176°47.6680'W	827.99	43.3	0	43.3	0	0	0.33	5.47			
				U1523D	74°9.0288'S	176°47.7087'W	827.97	307.8	172.8	135.0	0.90	0.52	2.05	6.26			
				U1523E	74°9.0290'S	176°47.7491'W	827.88	130.8	84.7	46.1	54.08	63.85	1.13	4.82			
			U1524	U1524A	74°13.0427'S	173°38.0185'W	2394.39	299.5	299.5	0	282.35	94.27	1.96	6.37			
				U1524B	74°13.0440'S	173°37.9834'W	2394.16	7.7	7.7	0	7.76	100.78	0.44	0.73			
				U1524C	74°13.0537'S	173°37.9338'W	2394.34	441.9	181.4	260.5	19.20	10.58	2.36	7.80			
			U1525	U1525A	75°0.0603'S	173°55.2028'W	1775.74	213.2	213.2	0	158.70	74.44	2.14	4.15			
			2019/01- 2019/03	379	阿蒙森海	U1532	U1532A	68°36.6833'S	107°31.5003'W	3961.5	100.6	100.6	0	103.04	102	1.5	2.79
							U1532B	68°36.6837'S	107°31.4696'W	3961.4	180.3	87.2	93.1	91.92	105	2.3	3.27
U1532C	68°36.6952'S	107°31.4721'W					3961.4	392.3	214	178.3	179.6	84	4.3	3.80			
U1532D	68°36.6953'S	107°31.5015'W					3961.5	381.9	19.2	362.7	17.42	91	2.2	7.23			
U1532E	68°36.4292'S	107°32.4613'W					3977.4	101.6	0	101.6	0	0	0.5	8.47			
U1532F	68°36.6833'S	107°31.5303'W					3961.4	321.4	0	321.4	0	0	2	6.70			
U1532G	68°36.6954'S	107°31.5299'W					3961.4	794	421.7	372.3	366.41	87	10.8	3.06			

			U1533	U1533A	68°44.0168'S	109°0.6014'W	4180.8	28.5	28.5	0	29.54	104	1.6	0.74
				U1533B	68°44.0994'S	109°3.0010'W	4190.1	382.6	357.1	25.5	250.78	70	8.6	1.85
				U1533C	68°44.0696'S	109°1.5103'W	4183.1	7.7	7.7	0	7.74	101	0.2	1.60
				U1533D	68°44.0727'S	109°1.4901'W	4183.9	40	40	0	40	100	1.3	1.28
2019/03- 2019/05	382	斯科 舍海	U1534	U1534A	53°11.3777'S	58°45.6479'W	605.09	266.3	265.3	1	270.84	102.09	2.5	4.49
				U1534B	53°11.3763'S	58°45.6298'W	605.07	1.5	1.5	0	1.51	100.67	0.2	0.37
				U1534C	53°11.3865'S	58°45.6296'W	606.27	159.2	159.2	0	159.55	100.22	0.9	7.37
				U1534D	53°11.3879'S	58°45.6259'W	606.07	28.5	28.5	0	29.64	104.00	0.2	7.92
			U1535	U1535A	53°11.4899'S	58°38.6048'W	646.86	117.3	117.3	0	112.47	95.88	1.0	5.03
			U1536	U1536A	59°26.4602'S	41°3.6596'W	3219.52	354.4	354.4	0	364.27	102.78	5.9	2.50
				U1536B	59°26.4608'S	41°3.6399'W	3220.06	226.1	224.1	2	230.71	102.95	1.3	7.20
				U1536C	59°26.4604'S	41°3.6191'W	3222.05	352.0	208.0	144	187.42	90.11	3.0	4.92
				U1536D	59°26.4501'S	41°3.6198'W	3221.72	6.9	6.9	0	6.86	99.42	0.5	0.53
				U1536E	59°26.4496'S	41°3.6392'W	3219.08	645.4	305.4	340	110.55	36.20	8.8	3.06
			U1537	U1537A	59°6.6458'S	40°54.3725'W	3712.91	264.0	264.0	0	268.86	101.84	2.7	4.12
				U1537B	59°6.6583'S	40°54.3516'W	3712.01	7.4	7.4	0	7.40	100.00	0.1	2.18
				U1537C	59°6.5197'S	40°54.0870'W	3713.61	15.3	15.3	0	11.92	77.91	0.2	4.25
				U1537D	59°6.6597'S	40°54.3677'W	3713.09	354.3	354.3	0	348.94	98.49	4.3	3.43
			U1538	U1538A	57°26.5248'S	43°21.4691'W	3130.58	676.0	676.0	0	476.43	70.48	6.6	4.29
				U1538B	57°26.5368'S	43°21.4454'W	3129.81	8.5	8.5	0	8.49	99.88	0.1	2.50
				U1538C	57°26.5387'S	43°21.4521'W	3130.21	105.9	105.9	0	98.92	93.41	0.8	5.52
				U1538D	57°26.5335'S	43°21.4723'W	3130.40	126.4	126.4	0	114.60	90.66	1.2	4.58

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”,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1000 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海洋立管等关键技术,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。

References

Albert, M. R., Slawny, K., Johnson, J., et al., 2024. Drilling Ice and Subglacial Rock Cores for Scientific Discovery in a Changing Climate. *Glaciers-Recent Research, Importance to Humanity and the Effects of Climate Change*. <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., 2024. 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 Antarctica*, 14(3): 131-140.

Falconer, T., Pyne, A., Wilson, D., et al., 2008. Operations overview for the andrill southern mcmurdo sound project, Antarctica. *Terra Antarctica*, 15(1): 41-48.

Gohl, K., Wellner, J.S., Klaus, A., et al. Expedition 379 summary. In Gohl, K., Wellner, J.S., Klaus, A., and the Expedition 379 Scientists, Amundsen Sea West Antarctic Ice Sheet History. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 379*: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.379.101.2021>

Gong, D., 2017. Design and Experimental Study on Self-synchronizing Subglacial Sediment Vibrocorer. Jilin University. (in Chinese with English abstract).

Goodge, 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., Cowie, J., Zealand, A. N., et al., 2006. Deep drilling with the andrill program in antarctica. *Scientific Drilling*, 3: 43-45, <https://doi.org/10.2204/iodp.sd.3.09.2006>
- 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., Bentley, M., Smith, J., 2016. Technologies for retrieving sediment cores in Antarctic subglacial settings. *Philosophical Transactions: 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). International Antarctic Centre, Christchurch, New Zealand.
- 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. Science goals analysis and technological progress of U.S. ice drilling. *Drilling Engineering*, 48(09):10-25. (in Chinese with English abstract).
- McKay, R.M., De Santis, L., Kulhanek, D.K., et al. 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., Levy, R., Kulhanek, D., 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., Li, X. C., Zhang, N., et al., 2021. Antarctic subglacial drilling rig: Part II. Ice and bedrock electromechanical drill (IBED). *Annals of Glaciology*, 62(84): 12-22.
- 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>
- 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., Shen, 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) [R]. <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) [R]. <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.382.102.2021>
- Zhang, N., Wang, L., Talalay, P. G. et al., 2020. Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions. *Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling*, 47(02): 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.自同步式冰下沉积物振动取样器设计与实验研究[D].吉林大学,2017.

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(09):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,翦知潜,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(02):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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),47(7):8-15.