

# 极地深冰心钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策

曹品鲁<sup>1,2</sup>, 陈宝义<sup>2</sup>, 刘春朋<sup>3</sup>, 杨成<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup>

(1. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 辽宁省有色地质局一〇八队, 辽宁 沈阳 110121)

**摘要:** 极地冰心分辨率高、记录时间尺度长、信息包容量大, 直接记录着远古时期的大气组成, 蕴藏着珍贵的古气候和古环境信息, 获得年代久远的深冰心, 对于重建地球的历史演化以及预测全球气候、环境的变迁具有重要意义。因此, 世界各国都在竞相寻找年代久远的冰心, 开展深冰心钻探工程。实践表明, 由于极地冰盖深部“暖冰”层冰的熔点低而温度高, 某些冰层的温度接近甚至达到冰的压力熔点, 以至钻进速度慢、取心率低、卡钻事故频发。详细介绍了极地深冰心钻探“暖冰”层钻进实践, 深入分析了“暖冰”层钻进存在的技术问题, 对钻具回转切削产生的切削热对钻进的影响进行了探讨, 据此提出了“暖冰”层钻进技术对策以及今后的研究方向, 以期为我国即将开展的深冰心钻探工程和冰下基岩取心钻探工程提供一定借鉴。

**关键词:** 极地; 深冰心钻探; 暖冰; 电动机械取心钻进

**中图分类号:** P634.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0058-05

**Analysis of the Technology Difficulties and Countermeasures in Warm Ice Deep Core Drilling/CAO Pin-lu<sup>1,2</sup>, CHEN Bao-yi<sup>2</sup>, LIU Chun-peng<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup>** (1. Polar Research Center of Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. College of Construction Engineering Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. 108 Team, The Bureau of Non-ferrous Geology of Liaoning Province, Shenyang Liaoning 110121, China)

**Abstract:** The ice core in Polar regions contains precious ancient climate and environment information, records the ancient atmospheric composition, and have characteristics of higher resolution, long time scale and amount of information and so on. It is very important to obtain ancient deep ice core to reconstruction the earth evolution and to predict the global climate changing. Therefore, the scientists in world are looking for ancient ice core and planning to carry out new deep ice core drilling projects. However, there are lots of problems when drilling in warm ice since the ice having lower melting point and higher temperature such as the slowly drilling speed, the lower core recovery and more sticking accidents and so on. So the warm ice drilling practices in Polar Regions are reviewed in this paper. And the technology problems drilling in warm ice are analyzed. At the same time, the influences of the cutting heat generated in the rotary drilling on drilling process are discussed. Based on these analyses, the research directions in future and the technical countermeasures for warm ice drilling are also put forward in this study, which may be provide some reference for our coming deep ice core drilling project and the subglacial bedrock core drilling project in Antarctica.

**Key words:** Polar regions; deep ice core drilling; warm ice; electro-mechanical drilling technology

## 1 概述

极地冰盖约占全球陆地面积的1/10, 其自然环境对人类具有重要价值。极地冰盖和冰川包含着几百万年前随雪花下落而有序聚集的古代冰层, 其中包含的尘埃颗粒、可溶性化学物质以及冰中包裹的气体是研究过去气候变化、预测未来气候和环境变迁的重要依据<sup>[1]</sup>。目前, 在南极获取的深冰心已帮助人们恢复了地球80万年来的气候变化情况, 发现了全新世以来的以10万年为主导周期的冰期~间冰期旋回。不过, 对于之前以4万年为主导周期的

冰期~间冰期旋回的了解还非常有限, 因此世界各国都在竞相寻找包含更长时间尺度的深冰心, 计划开展新的深冰心钻探项目<sup>[2,3]</sup>。通过深部冰层取心钻探技术, 获取高质量冰心已成为极地科学的重要研究方向之一。

铠装电缆式电动机械取心钻进技术因其具有钻具质量轻、消耗功率低、钻进效率高等优点, 在极地深冰心钻探中得到了广泛应用, 目前已在极地冰盖成功钻进了一些深孔, 最大孔深已达3769.3 m<sup>[4]</sup>。然而实践表明, 采用该技术进行冰盖深部“暖冰”层钻进时, 取心率低、钻进速度慢、卡钻事故频发, 钻进

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41006158); 教育部博士点基金(2011006112007)

作者简介: 曹品鲁(1979-), 男(汉族), 山东曹县人, 吉林大学副教授、吉林大学极地研究中心副主任, 地质工程专业, 博士, 从事复杂条件钻探技术研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, jlucl@jlu.edu.cn。

风险大。本文详细介绍了极地深冰心钻探“暖冰”层钻进工程实践,深入分析了“暖冰”层钻进存在的技术问题,据此提出了一些对策和建议,以期我国的深冰心钻探和冰下基岩钻探工程提供一定借鉴。

## 2 铠装电缆式电动机械钻具工作原理

现代冰川钻进技术开始于20世纪中期,主要采用回转钻机和热力钻具进行冰层钻进,如1948~1951年法国在格陵兰岛开展的钻探活动,1958年苏联在南极和平站附近进行的钻探活动等等<sup>[5,6]</sup>。1964年,美国CRREL(美国寒区研究与工程实验室)钻探专家对常规电钻进行了改进,采用铠装电缆代替传统钻杆进行起下钻作业,拉开了铠装电缆式电动机械取心钻进的先河,被视为当代冰川钻进的转折点<sup>[7]</sup>。自此,铠装电缆式电动机械取心钻具得到了普遍应用,目前已在极地冰盖成功进行了多项深冰心钻探工程,最大深度已达3769.2 m,如表1所示。

表1 电动机械取心钻具在极地冰盖钻孔情况部分统计<sup>[8-14]</sup>

| 年代        | 孔深/m    | 位置                | 主要国家机构            | 钻具类型            |
|-----------|---------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1996~2003 | 3085    | 格陵兰<br>NorthGRIP  | 丹麦哥本哈根大学          | Hans Tausen     |
| 1999~2005 | 3270.2  | 南极<br>Dome C-2    | 欧洲南极冰层取心计划(EPICA) | NGRIP<br>/EPICA |
| 2000~2006 | 2774    | 南极<br>Dronning ML | 欧洲南极冰层取心计划(EPICA) | NGRIP<br>/EPICA |
| 2003~2006 | 3035    | 南极 Dome Fuji      | 日本国家极地研究所         | JARE            |
| 2007~2011 | 2537.36 | 格陵兰分冰岭            | 丹麦哥本哈根大学          | Hans Tausen     |
| 1990~2012 | 3769.2  | 南极 Vostok 站       | 俄罗斯圣彼得堡国立矿业学院     | KEMS132         |
| 2006~2011 | 3405    | 南极 WAIS           | 美国威斯康辛-麦迪逊大学      | DISC            |

铠装电缆式电动机械钻具主要采用铠装电缆将钻具输送到孔底,并将动力输送至孔内马达,驱动钻

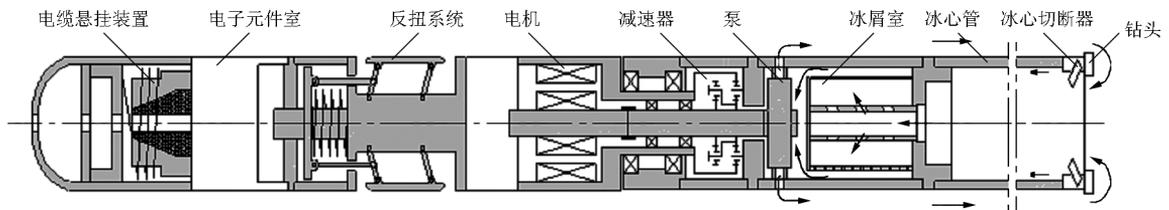


图1 铠装电缆式电动机械钻具

在1996~2003年进行的格陵兰冰盖NorthGRIP深冰心钻探项目中,在孔深2931 m处遇到“暖冰”层,冰层温度为 $-7.1^{\circ}\text{C}$ ,融化的冰屑粘附在钻头切削具和水槽内,阻碍钻井液的正常循环,发生了多次卡钻事故。随后采用乙二醇溶液溶解冰屑,并润滑

具回转钻进。钻具上部设计反扭系统,用于平衡钻具回转切削时产生的扭矩,避免电缆随钻具回转而导致电缆扭结或断裂。其结构组成如图1所示,主要由钻头、冰心管、冰屑室、水泵、减速器、电动马达、反扭系统、电子元件室和电缆悬挂装置等组成。钻具下放到井底后,电动马达带动水泵高速旋转,在水泵的抽吸作用下,钻井液携带冰屑经冰心管内部、冰屑室中心通道进入冰屑室,冰屑留在冰屑室内,钻井液经冰屑室外壁上的滤孔进入冰屑室与外管之间,最后由水泵泵送到钻孔环形空间,形成井下反循环。电动马达经减速器减速后带动冰心管和钻头回转钻进。回次结束后,利用铠装电缆将钻具提到地表处理冰心和冰屑。

由于采用铠装电缆代替传统钻杆,除早期设计的CREEL钻具质量达到了1.2 t、孔底钻具功率为13 kW之外,其它钻具的质量一般只有150~300 kg,功率 $\geq 3$  kW。因此,电动机械钻具具有重量轻、功耗小、效率高、运输及安装方便等优点,特别适用于极地恶劣的自然环境。

## 3 极地“暖冰”层钻探技术实践

虽然深冰心钻探技术得到了快速发展,但深部“暖冰”层钻进难题一直没有解决。一般情况下,冰的熔点随压强的升高而降低,冰层的温度随孔深的增加而升高。因此,在上部冰层重力和基底地热温度的作用下,冰盖底部的冰层熔点低而温度高,某些冰层的温度接近甚至达到冰的压力熔点,该类冰层通常称为“暖冰”层。此时,冰的脆性小而粘弹性大,可钻性差,回转切削作用下可能导致冰屑处于熔融状态,融化产生的水在钻具局部位置会再次结冰,造成卡钻等孔内复杂事故。

钻头和钻具,虽然有效降低了卡钻风险,但机械钻速较低。而且冰屑和冰心冻结在钻具内,地表处理极为困难,且易对冰心产生附加应力而降低冰心质量。此外,乙二醇溶液对冰心和孔壁有一定的溶解作用,致使对冰心的某些分析无法进行,钻孔最终在3085

m 处终止<sup>[8,15]</sup>。

1999~2005年,在处理南极 Dome C 第1次深冰心钻探卡钻事故失败后,在其附近进行了第2次深冰心钻探工作。在孔深 3119 m 处遇到“暖冰”,冰层温度为  $-5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冰层压力约为 28 MPa,钻进速度急剧下降,几乎停滞不前,改变钻具转速、钻头切削具结构未见明显效果,起钻后大量冰屑粘附在切削具和钻头上,如图 2 所示<sup>[10,16,17]</sup>。随后,采用乙醇水溶液防止冰屑粘附在刀具上,钻进速度有所提升。但在地表处理冰心和冰屑时发现冰心和冰屑都冻结在钻具上,加热处理时,冰心直径缩小且表面出现了诸多裂纹,冰心质量受到较大的影响。继续钻进至孔深 3270.2 m 处发生卡钻事故,被迫终止钻进。

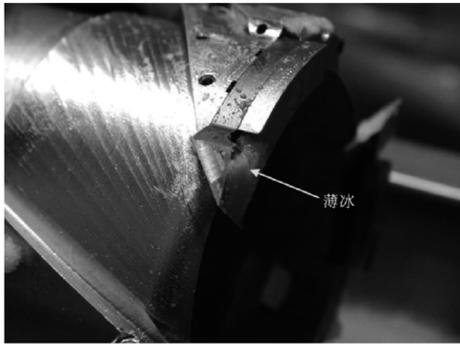


图2 冰屑粘附在钻头上(Dome C)

2006年,在南极 Dronning Maud Land 深冰心钻探工程中,于孔深 2670 m 处钻遇“暖冰”,冰层温度约为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,机械钻速开始降低,回次进尺变短。为防止卡钻,在每一个回次前向孔内注入了乙醇溶液,但效果不佳,钻孔在孔深 2774 m 处终止<sup>[10]</sup>。

2006年,在南极 Dome Fuji 进行的深冰心钻孔中,于孔深 3000 m 处钻遇“暖冰”层,冰层温度约为  $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,采用具有聚四氟乙烯涂层的钻具代替常规钻具以缓解卡钻现象,每个回次只能钻取 10 cm 左右的冰心,钻速较低且不稳定,为避免发生孔内复杂事故,最后终止了钻进,终孔深度为 3035.22 m<sup>[9,10]</sup>。

2007~2010年,由丹麦主导十余个国家参与的 NEEM 计划(The North Greenland Eemian Ice Core Drilling Project),在格陵兰分冰岭处进行了深冰心钻探。在第 729 钻次中,钻具电流和电机转速均出现异常,反复数次操作未见好转。提升钻具时发现钻头的一个刀靴处粘附了一层薄冰,如图 3 所示<sup>[18]</sup>。为提高钻进效率、防止卡钻等事故,在钻头各刀靴上涂抹了一层防冻膏,取得了良好的效果。

2012年,经过近20年的不懈努力,俄罗斯在

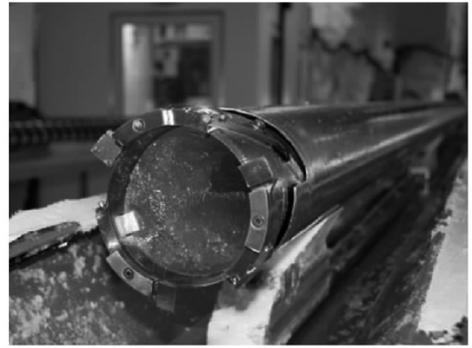
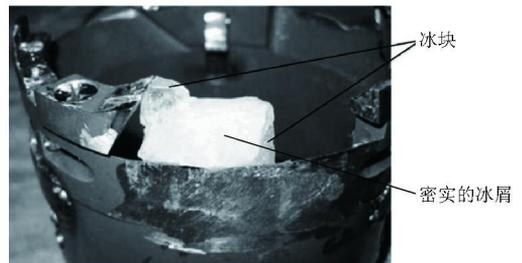
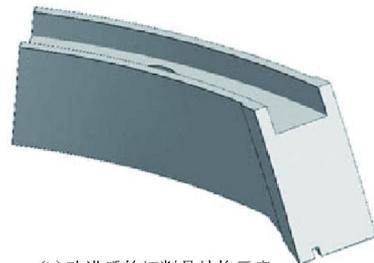


图3 刀靴上覆盖了一层薄冰(NEM)

Vostok 站 5G-1 孔钻透了厚达 3700 多米的南极冰盖,获取了冰下湖的水样。该孔在孔深 3480 m 左右曾遇到“暖冰”,冰层温度为  $-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,钻进速度大幅降低,冰屑聚结严重(如图 4 所示),多次出现提钻遇卡现象,钻具性能急剧恶化,钻进曾多次被迫停止<sup>[19~21]</sup>。此后,对钻头切削具结构参数进行了调整,钻进过程开始稳定,但回次取心长度降低到 0.7~0.8 m 左右,并于 2007 年在孔深 3658 m 处发生了卡钻事故。此后经过不断地探索,2012 年终于钻穿南极冰盖,获取了东方湖水样,终孔深度达到 3769.2 m。



(a) 冰屑粘附在钻头上



(b) 改进后的切削具结构示意图

图4 5G-1 孔钻头及切削具示意图

在总结和综合分析极地冰盖深冰心“暖冰”层钻进实践经验的基础上,美国 IDDO 委员会改进设计了 DISC 钻具,并在西南极 WAIS 进行了现场实验,取得了良好的效果。2011 年底,采用该钻具成功钻至孔深 3405 m,获取了高质量的冰心,“暖冰”层钻进毫无障碍,机械钻速基本不受影响,为解决“暖冰”层钻进技术难题带来了曙光<sup>[14,22]</sup>。

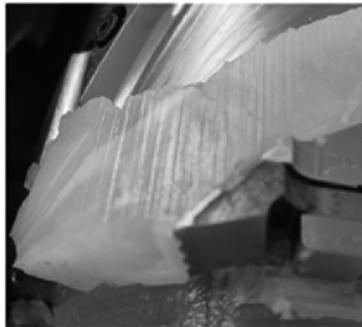
#### 4 “暖冰”层取心钻进技术难点分析及对策

如前所述,“暖冰”层冰的温度接近冰的压力熔点,采用铠装电缆式电动机械取心钻具钻进时,钻头回转切削会产生一定的切削热量,这些热量是导致“暖冰”层钻进机械钻速慢、取心率低、易发生卡钻等孔内复杂事故的主要原因。

(1) 钻头回转切削冰层时会产生一定的切削热量,在切削热作用下冰屑和冰心处于熔融状态,融化



(a) 冰屑粘附在切削具上



(b) 钻头周边冻结的冰



(c) 钻头周边冻结的冰

图 5 冰屑融化后再次在钻头附近冻结

(3) 融化的冰屑还可能会在钻头冰心卡断器附近再次冻结,致使冰心卡断器失效而无法取心。

(4) 切削热量传递给冰心,将引起冰心融化致使冰心直径缩小,严重时融化的水将冰心冻结在岩心管内,致使冰心取出困难,在地表处理冰心时易对冰心产生附加应力而降低冰心质量。热量传递给冰心还会产生热应力,导致冰心产生裂纹或原有裂纹扩张甚至断裂,钻井液通过裂纹向冰心内部渗透,严重影响冰心质量<sup>[24,25]</sup>。

因此,避免由于切削热而导致冰屑或冰心融化是“暖冰”层安全钻进的重要保障。

(1) 采用热力钻进技术。热力钻进技术主要利用加热电阻产生的热能将冰融化而形成钻孔,融化产生的水收集到钻具储水管内,在钻进回次结束后提至地表处理。由于热力钻进直接将冰融化成水,并将融水收集到钻具内部,因此有效避免了融水在孔内的再次冻结而影响钻进安全。目前,受钻具结构及钻进工艺的局限性,热力钻进技术主要用于冰层浅孔和中深孔的干孔钻进。在深冰心钻探中为了平衡冰层压力,防止由于冰的蠕变而导致钻孔缩径等,需要采用低温钻井液。因此,热力钻进技术在深冰心钻探中的适用性还有待于验证,其钻具结构还需要进一步改进和优化。

(2) 优化回转切削钻进参数组合,降低切削产生的热量。钻头回转切削钻进过程是一个局部产生

产生的水在钻具局部位置会再次结冰,导致钻井液循环不畅、冰屑不能及时被带出、钻进效率低等问题,严重时甚至会造成卡钻等孔内复杂事故。

(2) 熔融状态的冰屑其物理力学性质发生较大的变化,呈黏稠状态,易相互粘附在一起不易被带出或粘附在钻头切削具上影响机械钻速,如图 5 所示<sup>[17,23]</sup>。

高温、高压和高应变的非线性动态随机过程,日本学者 Azuma N. 等人对回转钻进时产生的热量进行了简单计算,结果表明钻头切削具类型、钻压、转速、机械钻速以及冰层的物理力学性质等参数对切削热均有较大的影响<sup>[26]</sup>。因此,通过分析和计算钻头切削热的大小,查清切削热的影响因素及分布规律,据此改进钻具结构设计,优化钻进参数组合,可有效降低切削热量,保证钻进安全。

(3) 选择合理的低温钻井液,并增大钻井液上返流速。相对常规钻井而言,极地冰层取心钻探对钻井液的要求更高,不仅要求钻井液在超低温(-50 ~ -60 °C, 南极不同地区地表年平均温度不同)条件下具有良好的流变性能以保护孔壁、有效携带冰屑,而且要求钻井液安全、环保,对极地环境和冰心无污染。从“暖冰”层钻探实践看,利用乙二醇溶液将冰屑溶解,能够有效避免冰屑在钻头切削具附近的粘附,对提高机械钻速、降低卡钻风险具有重要作用,但其缺点在于乙二醇溶液不但溶解冰屑,还会溶解孔壁和冰心,影响后续的冰心分析。“暖冰”层钻进除了需要合理选择钻井液类型、提高钻井液对冰屑的悬浮能力外,还需要提高钻井液的上返速度,将熔融状态的冰屑或者相互粘附在一起的冰屑团及时携带至钻具冰屑室内,降低冰屑粘附在钻头上的风险。

(4) 对钻具表面进行防水处理:在钻头和钻具

表面喷涂一层憎水材料,防止冰屑或融水在钻头和钻具上粘附发生二次冻结。如前文所述的 Dome Fuji 深冰心钻探工程,在钻具表面喷涂了聚四氟乙烯涂层,有效缓解了卡钻现象;在格陵兰进行的 NEEM 项目中,在钻头切削具上涂抹了一层防冻膏,亦取得了良好的效果。

## 5 结论与建议

极地冰心分辨率高、记录时间尺度长、信息包含量大,不仅可以揭示过去气候的变化过程,而且可以揭示人类活动对于气候环境影响的各种信息,通过极地冰心研究已经取得了许多重大发现。为了获得年代更为久远的冰心,科学家们正在计划开展新的深冰心钻探项目。目前,我国已经在南极 Dome A 开展了深冰心钻探工作,计划钻取 3200 m 的深冰心以获得百万年以上的古老冰心。“十二五”期间,我国还将在 Doem A 开展甘布尔采夫冰下山脉基岩取心钻探,以探知南极冰盖底部的冰下环境,了解南极冰盖的形成及演变,进而研究全球气候的历史变化及预测未来气候的变迁。这些项目的开展均面临着冰盖深部“暖冰”层钻进的技术难题。为获取高质量冰心,提高“暖冰”层钻进效率、保证“暖冰”层钻进安全,建议加强以下方面的研究:

(1) 深入调研热力取心钻具的结构特点,对其在深冰心钻探工程中的适用性进行分析;

(2) 开展钻头回转钻进切削热研究,确定切削热与钻进参数之间的关系,分析切削热对冰屑和冰心的影响规律,从而优化钻具结构和钻进参数组合;

(3) 开展“暖冰”层钻进冰屑运输规律研究,确定冰屑运移速度与冰屑密度、冰屑浓度、钻进速度以及泵的压力、流量等参数之间的关系,为提高冰屑携带效率提供依据。

## 参考文献:

- [1] 侯书贵,李院生,效存德,等. 南极 Dome A 地区的近期积累率[J]. 科学通报,2007,52(2):243-245.
- [2] 任贾文,效存德,侯书贵,等. 极地冰心研究的新焦点:NEEM 与 Dome A[J]. 科学通报,2009,54(4):399-401.
- [3] 崔祥斌. 基于冰雷达的南极冰盖冰厚和冰下地形探测及其演化研究[D]. 浙江杭州:浙江大学,2010.
- [4] Kotlyakov V M. Deep Drilling by Russian Scientists Reaches Subglacial Lake Vostok[J]. The IUGG Electronic Journal,2012,12(4):1-3.
- [5] Langway C. C. . The History of Early Polar Ice Cores[Z]. ERDC/CRREL TR-08-1. 2008,1-57.
- [6] Chester C. L. . The History of Early Polar Ice Cores[R]. CREEL

- report TR-08-01,2008:1-45.
- [7] Ueda H. T. , Garfield D. E. . Drilling through the Greenland ice sheet[R]. USA CRREL Hanover,1968,1-15.
- [8] 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,2007,47:89-97.
- [9] Motoyama H. . The Second Deep Ice Coring Project at Dome Fuji, Antarctica[J]. Scientific Drilling,2007,(5):41-43.
- [10] Augustin L. , Motoyama H. , Wilhelms F. , et al. Drilling comparison in “warm ice” and drill design comparison[J]. Annals of Glaciology,2007,47:73-78.
- [11] Mulvaney R. , Alemany O. , Possenti P. . The Berkner Island (Antarctica) ice-core drilling project[J]. Annals of Glaciology,2007,47:115-123.
- [12] Eustes A. , Fleckenstein W. , Gerasimoff M. , et al. Comparison of ice coring options for the Antarctic inland core project[R]. ICDS report,2003,1-89.
- [13] Fujii Y. , Azuma N. , Tanaka Y. , et al. Deep ice coring at Dome Fuji station, Antarctica[J]. Antarctic Record,1999,43(1):162-210.
- [14] IDDO and IDPO. Long range drilling technology plan[R]. 2012:1-34.
- [15] Gow A J and 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.
- [16] Augustin L. , Panichi S. , Frascati F. . EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results[J]. Annals of Glaciology,2007,47:68-72.
- [17] Severinghaus J. , Albert M. , Anandakrishnan S. , etc. Recommendation of the ice core working group to the National Science Foundation on deep ice core drill options[R]. 2004,1-16.
- [18] 王士猛,效存德,谢爱红,等. NEEM 计划 2537.36m 透底深冰心的钻取与成果概述[J]. 冰川冻土,2011,33(3):589-594.
- [19] 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.
- [20] Vasiliev N. I. , Talalay P. G. , Bobin N. E. , et al. Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events[J]. Annals of Glaciology,2007,47:10-23.
- [21] Vasiliev N. I. , Talalay P. G. , et al. Twenty years of drilling the deepest hole in ice[J]. Scientific Drilling,2011,11:41-45.
- [22] [http://neem.dk/field\\_diaries\\_folder/uk\\_diaries\\_2010/2010-07-05](http://neem.dk/field_diaries_folder/uk_diaries_2010/2010-07-05)[DB/OL].
- [23] Augustin L. . Warm ice. <http://nicl-smo.unh.edu/IPICS/IPICS.html>[DB/OL].
- [24] Taylor K. , Wolff E. , Alley R. , etc. International Partnerships in Ice Core Sciences(IPICS) workshop report[R]. 2005,1-45.
- [25] Wilhelms F. , Sheldon S. G. , Hamann I. , et al. Implications for and findings from deep ice core drillings - an example: the ultimate tensile strength of ice at high strain rates[R]. Physics and Chemistry of Ice: proceedings of the 11th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice. Germany,2007,1-5.
- [26] Azuma N. , Tanabe I. , Motoyama H. . Heat generated by cutting ice in deep ice-core drilling[J]. Annals of Glaciology,2007,47:61-67.