

南极冰下基岩热水驱动快速取心钻具研究

杨阳^{1,2}, 范晓鹏^{1,2}, 达拉拉伊^{1,2}, 刘安^{1,2}, 杨巍³

(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. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司扶余采油厂, 吉林 松原 138000)

摘要: 南极大陆冰下基岩岩心对研究南极大陆地质构造及成因具有重要意义, 目前尚没有任何一个国家在南极内陆成功钻取冰下基岩样品, 研制可快速钻至冰岩界面并完成基岩采样的钻进设备迫在眉睫。针对极地冰下基岩取样技术难题, 提出了一种可结合热水钻系统使用的采用热水驱动的冰下基岩取心钻具概念设计。该钻具系统采用常规热水钻完成南极大陆上覆冰层钻进, 然后更换热水取心钻具穿过已有钻孔快速到达冰岩界面, 完成冰下沉积物和基岩取心钻进, 大大缩短基岩取心时间, 提高钻进效率。结合中国自主研发的热水钻系统参数, 对螺杆马达压力损失和输出扭矩进行理论计算, 提出了螺杆马达选择依据。该技术有望在未来极地冰下基岩取心钻进中发挥重要作用。

关键词: 冰下基岩; 取心钻进; 孔底动力; 热水钻; 南极

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)07-0048-04

Research on Rapid Coring Drill by Hot Water Driving for Subglacial Bedrock in Antarctic/YANG Yang^{1,2}, FAN Xiaopeng^{1,2}, Pavel TALALAY^{1,2}, LIU An^{1,2}, YANG Wei³ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan Jilin 138000, China)

Abstract: Subglacial bedrock core in Antarctic region is of great importance to the research on geologic structure and formation of Antarctic continent, no subglacial bedrock samples has been obtained in current global history, the development of rapid coring technology for subglacial bedrock in Antarctic becomes increasingly urgent. According to technological problems of subglacial bedrock coring, a conceptual design of rapid coring drill by hot water driving for subglacial bedrock in Antarctic is put forward in this paper, the ice cover on the Antarctic continent is drilled using this system with conventional hot water drilling, then replaced by hot water coring drill through the ice hole rapidly to ice rock interface in order to carry out the coring drilling of subglacial sediments and bedrock, the bedrock coring time is greatly shortened with high drilling efficiency. Based on the testing parameters of China independent researched and developed hot water drilling system, the theoretical calculation is made on the pressure loss and output torque of positive displacement motor (PDM) to provide the choice basis for PDM motor. This type of coring drill is hopeful to play an important role in future subglacial bedrock coring drilling in polar region.

Key words: subglacial bedrock; coring drilling; downhole driving; hot water drilling; Antarctic

1 概述

南极大陆是地球上最古老的大陆之一, 它不仅保存有多种多样的古老克拉通陆块, 还是探索地球早期演化的理想场所, 其科学意义非常突出。获取冰盖下基岩岩心并对其进行深入分析, 可以推断地壳形成和演变过程、大陆互相碰撞和挤压的历史过程、板块构造理论等, 从而了解南极内陆地质构造历史, 研究南极冰层的冻融、滑移和变形速度, 以及冰川动力学及气候变化都具有非常重要的意义^[1-2]。

目前, 尚且没有任何一个国家在南极内陆成功钻

取冰下基岩样品^[3]。由于极地地表及冰川极低的温度, 交通困难, 物资贫乏, 天气恶劣, 地层环境复杂等不利条件, 给钻进工作带来了很大的难度。而南极每个工作季的时间短暂, 采用常规方法钻进想要钻穿冰盖到达基岩界面往往需要几年甚至几十年时间, 想要获得多个孔位的岩心更是难上加难。研制可快速钻至冰岩界面并完成基岩采样的钻进设备迫在眉睫。本文针对极地冰下基岩取样技术难题, 提出了一种可结合热水钻系统使用的采用热水驱动的冰下基岩取心钻具概念设计, 并进行了相关计算, 该技术

收稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“热水钻快速取芯孔内流场研究”(编号: 41506216)

作者简介: 杨阳, 女, 回族, 1986年生, 地质工程专业, 博士, 从事极地钻探技术研究, 吉林省长春市西民主大街938号, 57364627@qq.com。

通讯作者: 范晓鹏, 男, 汉族, 1986年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 从事极地钻探技术研究, 吉林省长春市西民主大街938号, fxp@jlu.edu.cn。

有望在未来极地冰下环境研究中发挥重要作用。

2 南极冰下基岩快速取心系统总体设计

热水钻系统,是20世纪80年代兴起的被看作最高效的快速钻进方法,其工作原理为在地表将水加热至80~90℃,采用高压泵送系统通过管路将热水泵送至钻头部位,并从钻头喷嘴高速喷出,钻头下冰层将在高压高温热水作用下融化,进而形成钻孔,

钻进产生的融水和喷嘴喷出的热水混合后一同上返至副孔位置,并被潜水泵泵送回地表,经再次加热后重新注入孔内,从而形成热水流动回路^[4-6],如图1所示。热水钻钻进速度可达30~40 m/h,相比传统机械钻进手段,钻进效率高,且该钻进方式无需钻井液,有效避免了钻井液对南极环境的污染^[7-8],为目前最快速的冰层钻进手段。

截至目前,美国、英国等国家已成功采用热水钻

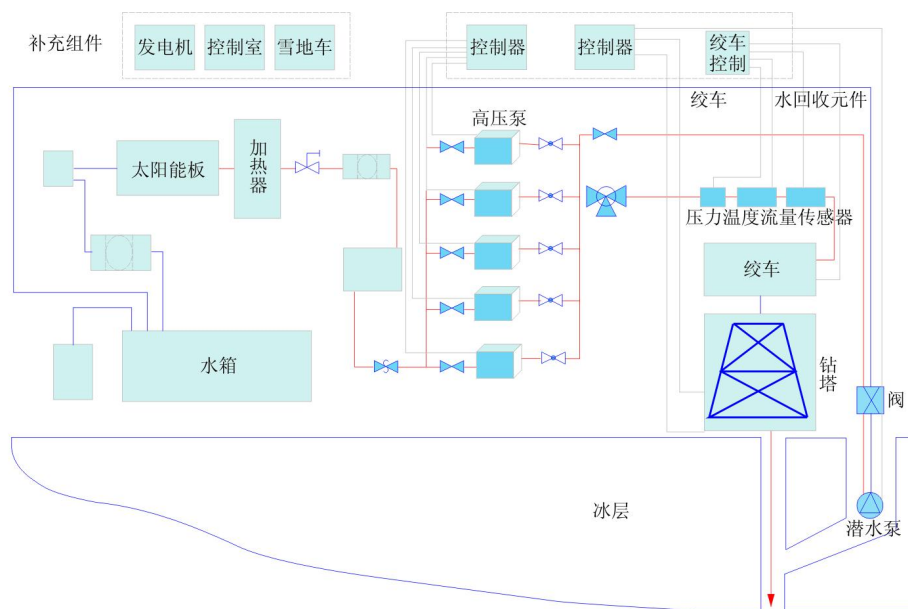


图1 热水钻系统工作原理图

钻进了多个钻孔^[9-12],2017年4月由中国自主研发的热水钻机在吉林大学国土资源部重点实验室完成联调联试,标志着我国具备了在南极完成1500 m钻进能力的热水钻机系统,如图2所示,该系统将在未来的极地科学研究中发挥重要作用^[13-15]。本文设计的南极冰下基岩快速取心系统采用热水驱动的冰下基岩取心钻具与热水钻系统相结合,前期采用常规热水钻系统完成南极大陆上覆冰层钻进,然后更换热水取心钻具穿过已有钻孔快速到达冰岩界面,完成冰下沉积物和基岩取心钻进,这将大大缩短基岩取心时间,提高钻进效率。且采用该方法进行钻进可最大限度地利用现有的热水钻钻进系统,仅需将热水取心钻具上端管路接头与现有系统对接,即可实现钻具切换。

3 冰下基岩热水取心钻具概念设计

借鉴石油钻探水平井施工已成功应用的孔底动力钻具设计理念,采用热水作为动力介质驱动孔底

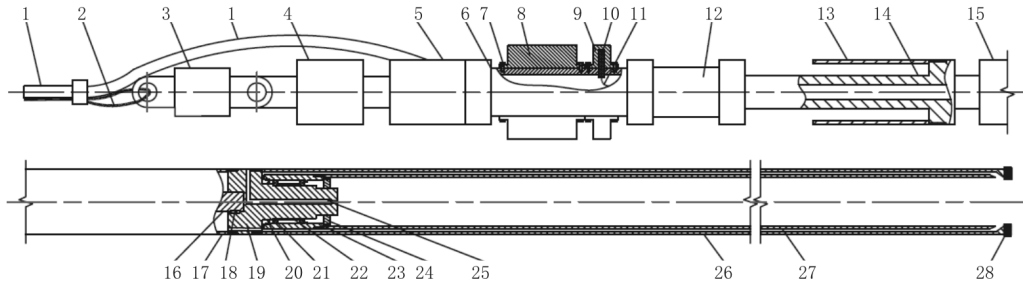


图2 我国自主研发的热水钻机系统

钻具回转进而完成基岩取心钻进,孔底动力装置可为螺杆马达,利用热水钻系统主管路将热水输送至孔底钻具,当热水流经螺杆马达时,其将热水流的液体压力转化为螺杆旋转的扭矩,从而驱动岩管及钻头一起旋转,图3为极地冰下基岩热水取心钻具结构示意图。冰下基岩钻进采用仿生金刚石钻头,通过回转磨削向下钻进,同时钻进产生的岩屑被热水带离孔底。由于钻进采用正循环钻进,岩屑从环空间隙随热水流体上返,但是由于岩屑的密度远大

于热水的密度,因此,在流动过程中必然导致岩屑沉降,为了防止岩屑回流到孔底,在螺杆马达上方设置了岩屑室,用来收集沉降下来的岩屑,该装置利用流

体力学理论进行设计,岩屑收集装置上部钻具直径变小,当携带有岩屑的热水流经岩屑收集装置,热水流速降低,岩屑依靠重力下落至岩屑收集装置内。



1—热水管;2—电缆;3—电缆终端;4—触底检测机构;5—分水接头;6—反扭装置;7—螺钉;8—反扭片;9—热熔片;10—加热元件;11—加热元件电缆;12—电气舱;13—岩屑管;14—岩屑管固定座;15—螺杆马达;16—螺杆马达输出轴;17—螺杆马达外管;18—平键;19—旋转接头;20—密封圈;21—轴承;22—轴承挡环;23—单动接头;24—锁紧螺母;25—单向球阀;26—钻具外管;27—岩心管;28—钻头

图3 极地冰下基岩热水取心钻具结构示意图

采用此钻具进行取心钻进,需在钻具上方设计反扭装置,防止上部钻具在钻头钻进时发生转动,但由于岩心钻探反扭装置需克服较大钻进扭矩,因此,需设计大扭矩反扭装置。范晓鹏等人对反扭装置进行了系统研究,并针对冰下基岩钻进提出了滑刀式反扭装置^[16],但由于采用热水钻成孔孔径较大,且孔壁呈不规则圆形,常规反扭装置很难满足钻进需求。该钻具拟采用板型反扭装置,由前置加热元件在孔壁热熔出一定深度长槽,反扭翼板可在弹簧作用下沿径向进入长槽内,并为基岩钻进提供足够的反扭矩。

冰下基岩热水取心钻具具体工作原理如下:

向下钻进时,首先利用地表绞车将钻具放入孔内,并连续下放,下放过程中随时观察触底检测机构反馈的触底压力数值,当触底压力持续增大至与钻具质量相当,表明钻具已到达孔底,此时停止下放,并通过热水管向钻具内泵送热水开始钻进。

热水从分水接头处进入钻具内部,流经上反扭装置、电气舱、岩屑管固定座到达螺杆马达,并驱动螺杆马达回转,为钻进提供动力。从螺杆马达流出的热水继续经过旋转接头内部水道进入钻具外管和冰心管之间间隙,并从钻头底位喷出。

钻进时,螺杆马达输出轴通过旋转接头带动钻具外管和钻头进行回转切削完成钻进,钻进产生的岩屑由喷出的热水将其带离孔底并沿钻具与孔壁环状间隙上返,从而保证孔底清洁,为高效取心钻进提供可能,携带有岩屑的热水流经岩屑管时,由于钻具直径减小,热水流速降低,导致热水对岩屑携带力降低,岩屑在重力作用下将沉降于岩心管内,实现收集

岩屑的目的。钻进产生的岩心样品进入岩心管内,为了防止岩心管内存水对岩心产生静水压力,降低钻进速度,在旋转接头中心设置有单向阀。当岩心管内存水压力达到某一数值,单向球阀打开,岩心管内存水通过旋转接头中心水道排出钻具。

4 螺杆马达参数计算

螺杆马达作为提供冰下基岩热水取心钻具回转动力的关键部件,其参数需根据现有热水钻系统可提供的热水流量和压力进行选择确定。

中国极地研究中心研发的热水钻系统高压泵可提供的热水流量最大200 L/min,泵出口压力最大为9 MPa,热水主管路内径38 mm,长度为2200 m,热水缠绕圈数为440圈。

根据以上参数对热水钻管路总沿程压力损失进行计算:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (1)$$

式中: ΔP ——热水管路总沿程压力损失,MPa;
 ΔP_1 ——热水流动时的沿程压力损失,MPa;
 ΔP_2 ——热水流动时的局部压力损失,MPa。

$$\Delta P_1 = (\lambda l / d) \cdot (\rho v^2 / 2) \quad (2)$$

式中: λ ——沿程阻力系数,与雷诺数 Re 有关,无量纲; l ——主管路长度,2200 m; d ——主管路直径,0.038 m; ρ ——水密度,1000 kg/m³; v ——水在主管路中的流速,m/s。

其中,水在主管中的流速可用下式计算:

$$v = Q / A \quad (3)$$

式中: Q ——热水流量,200 L/min; A ——软管横截

面面积, m^2 。

由于冰下基岩热水取心钻具需采用热水进行钻进,水温约为 $50\text{ }^\circ\text{C}$,查表可知,水的动力粘度 μ 为 $5.494 \times 10^{-7}\text{ }m^2/s$,将此值及以上已知量带入下式可得雷诺数:

$$Re = vd/\mu = 23400 \quad (4)$$

因为 $10^5 < Re < 3 \times 10^6$,管中热水处于光滑管湍流区,其沿程阻力系数可按照下式计算^[8]:

$$\lambda = 0.0032 + (0.221/Re^{0.237}) = 1.54 \times 10^{-2} \quad (5)$$

将以上数值带入公式(1),可得当热水流量为 200 L/min ,水温 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,管路沿程压力损失 ΔP_1 为 3.85 MPa 。

由于热水主管路长 2200 m ,盘绕在主绞车卷盘上约 440 圈,根据弯管局部压力损失计算公式可得:

$$\Delta P_2 = \zeta v^2 / (2g) \quad (6)$$

其中,局部压力损失系数 ζ 可按下式进行计算^[17]:

$$\zeta = \theta [0.131 + 1.847(r/R)^{3.5}] / 90^\circ \quad (7)$$

式中, θ ——软管弯曲角度,为 $440 \times 90^\circ = 39600^\circ$; r ——软管半径, 0.019 m , R ——软管缠绕半径,为 $1 \sim 2\text{ m}$,由于 $r/R \ll 0.131$,因此:

$$\zeta \approx 0.131\theta / 90^\circ = 230.6 \quad (8)$$

将上述已知量带入公式(6)可得 $\Delta P_2 = 0.99\text{ MPa}$ 。

将 ΔP_1 和 ΔP_2 代入公式(1)可得:热水钻管路总沿程压力损失 ΔP 为 4.84 MPa ,由于水泵出口压力最大为 9 MPa ,因此,选择的螺杆马达压力损失 $\geq 4.16\text{ MPa}$,否则螺杆马达将不能正常工作。

同时根据吉林大学极地研究中心冰下基岩钻进试验表明,采用不同金刚石钻头纯钻进扭矩为 $28.8 \sim 51.6\text{ N}\cdot\text{m}$ ^[18],考虑到机械传动机构及孔内摩擦产生的附加扭矩,因此,要求螺杆马达输出扭矩应 $\leq 80\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

根据以上计算,最终选择北京石油机械厂生产的 $5LZ73 \times 7.0$ 型螺杆钻具,该钻具工作压降 3.45 MPa ,流量为 $78 \sim 306\text{ L/min}$,钻头转速 $140 \sim 360\text{ r/min}$,输出扭矩 $275\text{ N}\cdot\text{m}$,可满足冰下基岩热水取心钻具需求。

5 结论

(1)采用热水驱动的孔底动力钻具,结合热水钻系统,可以快速穿透南极冰盖,并完成对冰下基岩的取心钻进。

(2)设计的冰下基岩热水取心钻具结构简单,

通过更换上部接头,可适应于不同热水钻系统,具有一定的通用性。

(3)通过对热水钻系统主管路沿程压力损失进行计算,确定用于冰下基岩热水取心钻具的螺杆马达压力损失应 $< 4.16\text{ MPa}$,输出扭矩 $\leq 80\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

(4)建议加工钻具,并建立相应的试验台对设计的取心钻具进行试验研究。

参考文献:

- [1] 胡建民,刘晓春,赵越,等. 南极普利兹造山带性质及构造变形过程[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 343 - 354.
- [2] J. W. Govoni, W. B. Tucker III. An update on Portable Hot-water Sea Ice Drilling [J]. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16(2): 175 - 178.
- [3] Talalay P. G. Subglacial Till and Bedrock Drilling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86(2): 142 - 166.
- [4] J. P. Poplin, T. D. Ralston. A thermal Ice Drill for Profiling Thick Multiyear Ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(1): 1 - 11.
- [5] B. Koci. Hot-water Drilling on Crary Ice Rise, Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 1989, 12: 214 - 215.
- [6] W. B. Tucker III and J. W. Govoni. A portable hot-water ice drill [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(1): 57 - 64.
- [7] Chester C. L. The History of Early Polar Ice Cores [J]. Cold regions research and Engineering Laboratory, 2008, 52(2): 101 - 117.
- [8] Jean - G rard P. Napol oni, Garry K. C. Clarke. Hot Water Drilling in a Cold Glacier [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1978, 15(2): 316 - 321.
- [9] T. Benson, J. Cherwinka, M. duvernois, et. al. IceCube Enhanced Hot Water Drill functional description [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 105 - 114.
- [10] Keith MAKINSON, Paul G. D. ANKER. The BAS ice-shelf hot-water drill: design, methods and tools [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 44 - 52.
- [11] Keith Markinson. Future Hot Water Drilling on Rutford Ice Stream 2004/05 [J]. FRISP Report, 2003.
- [12] Bruce Koci. Wotan: a drill for ice cube [J]. National Institute of Polar Research. Spec. Issue, 2002, 56: 209 - 216.
- [13] Shun TSUTAKI, Shin SUGIYAMA. Development of a Hot Water Drilling System for Subglacial and Englacial Measurements [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2009, 27: 7 - 14.
- [14] Shin SUGIYAMA, Shun TSUTAKI, Daisuke NISHIMURA et. al. Hot Water Drilling and Glaciological Observations at the Terminal Part of Rhonegletscher, Switzerland in 2007 [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2008, 26(26): 41 - 47.
- [15] Shin SUGIYAMA, Pedro SKVARCA, Nozomu NAITO, et al. Hot-water Drilling at Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia Icefield [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2010, 28: 27 - 32.
- [16] 范晓鹏, Talalay P. G, 郑治川, 等. 冰下基岩电动机机械取心钻具反扭装置设计 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, (3): 946 - 952.
- [17] 张也影. 流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 273 - 284.
- [18] Pinlu Cao, Cheng Yang, Zhichuan Zheng, et al. Low-load diamond drill bits for subglacial bedrock sampling [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 124 - 130.