

南极钻机的耐温材料和保温方式的优选

王宇哲¹, 张凯^{*1,2}, 杨甘生^{1,2}, 李亚洲^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 10083)

摘要: 为了满足南极科学钻探的需求, 获取南极内陆深冰层下的基岩样本, 需要从耐温和保温两方面提升南极钻机抵御极寒气候的能力。为了应对运输过程以及工作过程中裸露件面临的低温挑战, 需要对钻机传动轴、密封材料、钻井液进行耐低温材料的选择, 而钻机主体在工作过程中应处于一定保温载体和保温材料整体保温加热环境中。本文对南极钻机的耐温材料和保温方式进行了综述和优选, 认为应尽快设计建立低温地质钻机的系统保温方案和评价体系, 丁腈橡胶是一种适用于南极钻机的低温密封材料, 丁酸乙酯和丙酸丙酯等小分子酯是南极内陆钻探潜在的钻井液, 以保温集装箱为主体多种加热方式共同作用为保温加热形式。对保证钻机能够在南极内陆的恶劣工况下保持正常稳定的工作具有一定意义。

关键词: 南极钻机; 耐温材料; 密封材料; 钻井液; 保温方式; 丁腈橡胶; 小分子酯; 集装箱

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0082-08

Optimization of temperature resistant materials and insulation methods for Antarctic drill rigs

WANG Yuzhe¹, ZHANG Kai^{*1,2}, YANG Gansheng^{1,2}, LI Yazhou^{1,2}

(1. *China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, Beijing;*

2. *Key laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China*)

Abstract: In order to meet the needs of the Antarctic scientific drilling, to obtain the base rock sample under the deep ice in the Antarctica, it is necessary to improve the ability of the Antarctic drill rigs to resist the chills from the aspects of mild insulation. In order to cope with the low temperature challenges faced by naked parts during the transportation process and during the work process, the choice of low-temperature materials for the drill drive shaft, sealing material, and drilling fluid needs to be used. The drill rig body should be in an overall insulation and heating environment with a certain insulation carrier and insulation materials during the working process. This article reviews and preferred the temperature-resistant materials and thermal insulation methods of Antarctic drilling machine. It is believed that the system insulation solution and evaluation system of low-temperature geological rig should be designed as soon as possible. Small molecular esters such as ethyl ester and propionate are potential drilling fluids of Antarctic inland drilling. They use the insulation container as the main heating method as the main heating method as the preservation and heating form. It is of certain significance to ensure that it is normal and stable to maintain normal and stable work under the harsh conditions in the Antarctic inland.

Key words: Antarctic drill rig; temperature-resistant material; sealing material; drilling fluid; insulation method; diced rubber; small molecular ester; container

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.013

基金项目: 国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”项目(编号: 2021YFA0719100)课题四“多工艺极地钻探装备研发与系统集成”(编号: 2021YFA0719104); 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 42202346)

第一作者: 王宇哲, 男, 汉族, 2001年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为地质工程钻机, 北京市海淀区学院路29号, 1179763118@qq.com。

通信作者: 张凯, 男, 汉族, 1989年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 从事岩石破碎学、钻探机械与工具研发、超硬材料在地质工程中应用、摩擦学与表面工程等方面的研究工作, 北京市海淀区学院路29号, zhangkai66@cugb.edu.cn。

引用格式: 王宇哲, 张凯, 杨甘生, 等. 南极钻机的耐温材料和保温方式的优选[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 82-89.

WANG Yuzhe, ZHANG Kai, YANG Gansheng, et al. Optimization of temperature resistant materials and insulation methods for Antarctic drill rigs[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 82-89.

0 引言

广袤的南极大陆占地球陆地总面积的近1/10,蕴含着丰富的矿产资源和极高的科研价值。但南极大陆的冰层覆盖率达到95%以上,这使得人们对南极冰下地质环境的探索开展的十分困难。随着我国太空、深海、极地等领域科学研究的深入,对南极地层信息的研究更是被提升到了一个新的高度。开展南极地层信息研究,对于重建南极地区古气候和地层结构,探索南极地区的冰下矿藏等方面都具有重要意义^[1]。然而如何通过钻探获取南极冰层下的基岩样本,是开展这一系列科学活动的前提和基础。

目前,已开展的南极基岩钻探都位于距海岸带不远的地区,而在广袤的南极内陆均没有取到基岩样品,还远远不能满足南极科学研究的需求,必须前往南极内陆地区开展深冰层下的基岩钻探。而南极内陆地区相对海岸带地区气候环境更加恶劣,最低温度可达 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,烈风等级可达12级,现有的地质钻机不能满足在这种极端工况下的正常的运输和使用。因此,为了进一步开展南极内陆深冰层下的基岩科学钻探,必须开发一款成熟的、符合南极运输条件的轻便式模块化钻机。

为了使开发的轻便式模块化钻机能够满足在南极内陆地区极端恶劣工况下的正常稳定工作,需要在工作过程中对钻机整体采取一定的环境保温措施,但考虑到钻机在运输过程中同样受到低温条件的影响,还需对钻机的相关关键部件进行耐温材料的优选。由于南极钻机轻便化和模块化的需求,在进行钻机的耐温材料和保温方式的选择时,应依照钻机不同部分的保温耐温需求,综合考虑南极运输能力的大小来进行优选。

1 南极钻机简介

20世纪中期,以美国、苏联为首的各国开始对南极进行考察研究实验,使用商业回转钻机对南极冰盖进行钻探试验,早期的南极钻机代表有美国CRREL实验室设计研发的314型重装回转钻机和前苏联的KAM-500型常规钻机^[2]。这种老式回转钻机在南极科学钻探早期也取得了一定的成果,获取了质量较好的冰芯,但由于机械装置笨重、运输难度较大等问题,在后续的极地钻探活动中没有继续使用。

到了20世纪60年代,美国成功研制CRREL铠

装电缆式电动机械钻具,这种钻机具有体积小、质量轻、能源消耗少、便于运输和安装等优点。自此之后,钻井液孔底循环式的电缆式电动机械钻具成为一种开展南极钻探的常见工具形式,各国纷纷借鉴并研发了相同类型的钻具,代表性的有俄罗斯的KEMS-112型钻具,丹麦的ISTUK型钻具等^[3-4]。然而铠装电缆式钻具由于电动机功率小、循环液系统无法将岩屑及时带出、无法提供足够扭矩等问题,难以取得足够长的高质量冰下基岩样本。

为解决这一问题,轻便式模块化钻机拟采用成熟液压动力头式回转钻机的结构形式,以美国ASIG钻具(见图1)的钻机部分为例,液压动力头式回转钻机主要包括钻具模块、控制模块、液压模块、供电模块等几部分^[5-6]。为抵御南极地区的极端气候影响,除桅杆外的主体应处于一定条件的环境保温措施中,但考虑到运输过程及钻机工作过程中桅杆、传动轴等裸露件及受力较大件受到的低温影响,钻机的相关部件应采用耐温材料制造。本文将从此方面对钻机进行耐温材料和保温方式的优选。

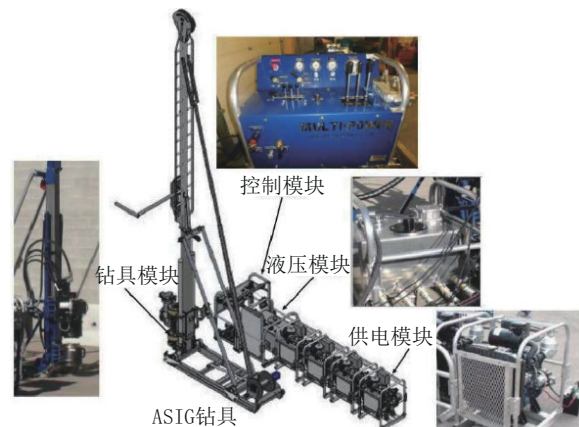


图1 ASIG钻具结构示意图

2 南极钻机耐温材料的优选

2.1 钻机用钢的选择

在钻机的设计过程中,首先要保证钻机在南极极低气温下工作的安全性,其次要遵循经济型原则,在满足工况的条件下尽可能节约制造成本。钻机用钢总体上可分为普通的低合金高强度钢材和低温钢材2种,常用的低合金高强度钢材有Q345和Q420等几种^[7-9]。针对钻机低温钢材的研究,汪金桃^[10]从 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下低温钻机的构造入手,对制造所用的材料及热加工工艺进行了分析、研究和试验,确定铸

钢件最终处理组织为索氏体+铁素体+大量的三次渗碳体,筛选低温性能较好的40CrNiMo和35CrMo钢作为轴类件用钢。赵旭平等^[11]根据低温石油钻机使用要求,开发了低温铸钢件材料ZG28CrNiMo,并通过对铸造工艺和铸造过程进行设计和控制、应用铸造CAE辅助设计模拟系统,保证了生产的低温铸钢件的质量。西安交通大学的陈威等^[12]针对极地石油钻机用大钩对材料的性能要求,设计了一种含Cr、Ni的低合金低温铸钢,采用扫描电镜、X射线衍射和透射电镜等手段分析了试样的微观结构,并考察了不同热处理工艺对材料组织、室温力学性能以及低温冲击韧性的影响。

在钻机用钢的具体选择上,一般的结构件以及具有保温措施的部件,如底座,结构件等可使用如Q345的低合金高强度材料。具体材料可以通过低温性能试验来筛选,只要其在使用的最低环境温度下,3个试样的低温冲击功平均值 $>27\text{ J}$,且单个值 $<20\text{ J}$,即可满足结构在低温下的使用要求^[10]。对于易于暴露部件以及受力较大的轴类零件等,为防止钢材在低温下出现的脆性断裂,可以选用低温性能较好的40CrNiMo和35CrMo钢制作。

2.2 钻机密封材料

南极的低温环境会对钻机的密封性能产生很大的影响,一般钻机中的橡胶密封材料会随着温度降低而逐渐变硬,拉伸、压缩变形后的恢复速度越来越慢,恢复程度也越来越低。从常用的橡胶密封材料中选择出合适的耐低温密封材料,将大大提高南极钻机的密封性能。本文选取了工程中常用的4种橡胶密封材料。

(1)三元乙丙橡胶。具有优异的耐老化性、较好的弹性和低温性能以及优异的压缩永久变形,同时还具有优异的耐水性和耐水蒸汽性。其使用温度范围也很广,一般可以在 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间长期使用。特殊的配方可以将低温性能降到 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;或者将高温上限提高到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。三元乙丙橡胶不耐脂肪烃和芳香烃等油类,在有矿物油、汽油、燃油等环境下,会很快溶胀,同时机械强度会大大降低。所以三元乙丙橡胶件无法作为润滑油的密封件。

(2)氟橡胶。具有高度的耐热性,优良的化学惰性(耐化学品、耐腐蚀、耐油),很好的物理机械性能,较为耐磨,并且还具有良好的耐低温性和抗老化性。普通氟橡胶一般可以在 $-25\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间使用,

低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就会变得脆硬,密封性能也大大降低。

(3)硅橡胶。其弹性体是由聚二甲基硅氧烷合成的,具有优异的耐水性、耐候性、耐臭氧性等性能,同时还有气味小、易加工成型等优点。普通硅橡胶可以在 $-55\sim 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间使用。缺点是抗拉伸强度不好,抗撕裂性和耐磨性也不好,价格也较高。

(4)丁腈橡胶。是由丁二烯和丙烯腈共聚而成的,是一种耐油性非常好的弹性体,在航空航天、汽车等行业中有着广泛的应用。同时其耐磨性和低温性能也很优异,采用优化配方制得的丁腈橡胶脆性温度超过 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,是一种较为常见的南极橡胶密封材料。

可用于极地地区的低温密封材料一直是近年来的研究热点。华北电力大学的张文文等^[13]就硅橡胶与氟硅橡胶的低温物理性能进行了研究,探究了2种材料在持续低温环境下邵氏A硬度与表面粗糙度的变化规律,证明了在低温环境下氟硅橡胶比硅橡胶的性能更加稳定。中国石油大学的陈远鹏等^[14]在 $20\sim -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境下对硅橡胶、丁腈橡胶材料进行了单轴拉伸和压缩永久变形试验,经过对比,优选出了低温下能更准确描述橡胶力学性能的本构模型,并列出了适合的极地橡胶密封材料。董超峰等^[15]研究了丙烯腈含量、增塑剂种类、硫化体系以及增塑剂的用量对制备耐低温、耐油丁腈橡胶复合材料性能的影响,得到了一种耐低温性更好的丁腈橡胶复合材料的制备方法。

各种密封材料的性能对比见表1。

表1 密封材料性能对比

材 料	脆性温 度/ $^{\circ}\text{C}$	硬度值/ (Shore A)	抗拉伸强 度/ MPa	耐油性
三元乙丙橡胶	-40	50~90	3~18	不耐油
氟橡胶	-25	70~80	2~7	耐油
硅橡胶	-55	30~70	4~12.5	较耐油
丁腈橡胶	-60	70~90	24~28	耐油

对比各种密封材料的低温特性,从拉伸强度、压缩永久变形、南极钻机具体工况等方面综合评价,认为丁腈橡胶是一种较为理想的南极钻机密封材料。其良好的耐低温性使其能够满足南极钻机在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下工作的需求,优异的机械性能能够保证其较长工作区间内工作的稳定性^[16-17]。同时丁

腈橡胶的耐油性使其可以制成液压系统的橡胶密封件。但在选用时应注意丁腈橡胶的丙烯腈成分适中,质量分数在18%~20%范围内,当该成分含量过高时,虽然能使丁腈橡胶产品的耐热性、耐油性、耐磨性等都有提高,但其耐低温性会下降。

2.3 低温钻井液

在进行钻探作业时,钻井液具有冷却钻头、带动切屑上返、维护孔壁稳定的重要作用。考虑到南极内陆地区的气候条件,首先要保证钻井液具有抵御外界最低气温的低凝点,要求凝点 $<-50^{\circ}\text{C}$ 。此外,钻井液在低温下要有合适的密度和粘度。根据哥本哈根大学报告中给出的南极地区低温钻井液的性能要求,参考南极地区冰层的密度为 $910\sim 925\text{ kg/m}^3$,因此在南极地区使用的低温钻井液密度应在 $920\sim 950\text{ kg/m}^3$ 。由于冰的密度小于钻井液的密度,因此不必考虑钻井液流变性对携岩能力的影响。此外,如果钻井液粘度过高会导致钻具升降速度减小,钻井总时间和钻井成本增加,因此,低温钻井液的粘度需低于 $23.75\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ^[18-19]。在此基础条件下在南极地区常用的低温钻井液类型主要包括石油基钻井液、醇基钻井液、硅油基钻井液、酯基钻井液等。

(1)石油基钻井液。一般由双组分构成,柴油、煤油、脱芳烃溶剂等石油产品作为其主体基液,但由于基液低温下的密度低于冰的密度,因此使用时需要将基液与密度明显大于冰的三氯乙烯、四氯乙烯等增重剂混合,以增大其低温下的密度,增强流动性。石油基钻井液是最早在南极地区使用的钻井液之一,但由于其存在的低温粘度大、毒性和腐蚀性强、易破坏南极脆弱的生态环境等问题,近些年来已经被逐渐取代。

(2)醇基钻井液。主要包括乙醇和乙二醇的水溶液。醇基钻井液也是南极钻探早期常用的钻井液类型之一,但由于其在低温下的粘度很大,在钻探过程中会产生很大的旋转阻力,降低钻探效率;并且醇基钻井液对冰有溶融性,在作业过程中会造成孔壁的腐蚀和堵塞^[20-21]。这两点特性使得醇基钻井液能够适用的最大作业深度受到限制,目前也正在被逐步淘汰。

(3)硅油基钻井液。主要代表是甲基硅油,这是一种无色、无味、无毒、不溶于水且不挥发的惰性溶剂,甲基硅油在 -50°C 低温下的密度和粘度能够满

足南极钻探作业的要求。同时它具有目前已开发钻井液中最好的粘温性,当温度变化时造成的粘度变化很小。但由于甲基硅油的制作成本较高,考虑到经济性原因并未成为绝大多数南极钻探工程钻井液的首选。

(4)酯基钻井液。主要包括乙酸丁酯、丁酸乙酯和丙酸丙酯。乙酸丁酯在低温下具有合适的密度和粘度,在 -50°C 的环境条件下密度接近 970 kg/m^3 ,粘度保持在 $3\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下,可以不添加增重剂而直接作为南极钻探作业的钻井液^[19]。因为其优异的低温特性,目前已被美国、澳大利亚等多个国家在南极钻探作业中使用。但乙酸丁酯也具有腐蚀性强的缺点,易对钻探装备中的橡胶密封件产生腐蚀,同时可能对现场工作人员的皮肤和眼睛等产生刺激,造成危害。丁酸乙酯和丙酸丙酯低温下的密度和粘度均能满足南极地区钻探的要求,也具有较好的低温性能,同时还大大降低了对橡胶制品的腐蚀性,但仍具有较强的刺激性,若长时间与皮肤接触会产生严重的灼伤,危害人身安全。

展嘉佳等^[22]对乙二醇复合聚合物钻井液的耐低温能力、流变性、失水特性以及钻井液的防塌能力进行了试验研究,确定了乙二醇及钻井液中其它聚合物的加量,使其满足低温条件下勘探的要求。宋佳宇等^[23]以二元脂肪酸二醇酯、低分子量饱和脂肪酸酯与甲基硅油为试验对象,研究了钻井液粘度与密度对钻进效率与孔壁稳定的影响,发现了低分子量饱和脂肪酸单酯,在 -60°C 条件下,具有较低的粘度与合适的密度,并以各种类型钻井液的试验数据为基础,确定了可用于极地冰层取心钻进的钻井液类型及其性能要求。吉林大学的王莉莉等^[24]以南极冰层取心钻探为背景,深入分析了一元脂肪酸酯与二元脂肪酸酯分子结构特点,对3种不同混合酯的耐低温性能进行了试验研究,测试了3种混合酯的粘度与密度随温度的变化。

总的来看,目前可用于南极钻探的钻井液种类很多,但缺少一种能够满足南极钻探各项具体要求的理想型钻井液。综合各类型低温钻井液的优缺点,将丁酸乙酯和丙酸丙酯等小分子酯选作潜在的南极内陆钻探钻井液,它们既在低温下具有合适的密度和粘度,同时还具有优异的低温性能,并且对钻探作业中橡胶制品的腐蚀较小,是一种较为合适的低温钻井液。但目前还未有过使用小分子酯作为低

温钻井液的工程实例,且在接触使用小分子酯时需注意严格按照操作规范,避免对工作人员的身体造成伤害。

3 钻机保温加热方式的确定

3.1 装备形式的选择

根据对已开展的南极冰下基岩钻探试验的调研,由于其钻探深度以及作业时间、作业地点的不同,导致其装备所需的保温加热要求不同,装备形式也不尽相同。目前常见的装备形式主要有露天式、帐篷式和集装箱式3种。美国 Winkie 钻探装备(如图2所示)于2016—2017工作季首次在南极 Ohio 山脉进行了测试,共钻进了8个12~54 m的钻孔,由于钻探深度较浅,作业时间短,仅采用了露天式的装备形式。美国 ASIG 钻探装备2016—2017工作季在南极 Pirrit 山进行了测试,共完成了2个钻孔,分别钻进至冰下90 m处和157.8 m处,最终钻取了8 m的基岩岩心。但这次钻探作业地点所在的 Pirrit 山位于南极洲西部的近海岸带地区的南奥克尼群岛,远离南极内陆,工作季气温较高,考虑到南极烈风气候的影响,ASIG 钻探装备采用了帐篷式的装备形式。吉林大学开发的 IBED 钻探装备(如图3所示)于2018—2019工作季在距中山站往南约12 km的南极冰盖上进行了钻探作业,其中钻探总工作量约801 m,最大钻深198 m。由于钻探深度较大,作业时间较长,IBED 钻探装备选择了集装箱式的装备形式。

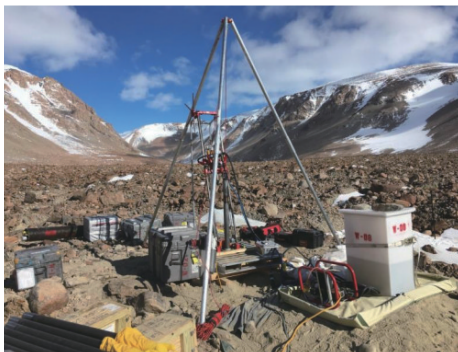


图2 美国 Winkie 钻探装备

不同装备形式的保温能力差异较大,适用于不同的环境工况。其中常见的南极帐篷的胚布采用涂塑PVC帆布,这种材质具有较强的防水及柔韧性,并且具有较好的耐用性。其结构为双层PVC帆



图3 吉林大学 IBED 钻探装备

布中间加保温材料缝合在一起而形成,目前常用的防寒帐篷的夹芯保温材料有纺织类、建筑类、新型柔性气凝胶保温材料3类。钱晶晶等^[25]对这3类隔热材料的制备及其隔热性能的研究进展进行了汇总,并对隔热帐篷夹芯隔热材料发展趋势进行了展望。糜娜等^[26]设计了一款适用于寒冷气候的充气PVC帐篷,并对其保温性能进行了研究,得出帐篷表面敷设铝箔能够提高保温性能,效果排序为内外敷设优于内敷设优于外敷设,内外表面敷设铝箔后综合传热系数可降至 $0.914 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。这种夹芯防寒帐篷的结构也能起到一定的保温作用,但尺寸一般较小,难以对钻机的整个模块起到环境保温作用,并且难以抵御南极地区的烈风气候。露天式将所有的钻探装备直接裸露在室外,不附加任何的保温加热和防风措施,也不适用于南极内陆地区的极端工况。

综合考虑南极内陆地区极寒、烈风等恶劣环境的要求,为保证作业安全,应采用集装箱式装备形式作为环境保温方式的主体,并对集装箱进行保温设计,加装保温材料,减少箱体内外热量交换。使用保温集装箱作为南极钻探作业时的钻探舱以及工作舱,既能保证在运输钻探装备过程中具有良好的密封效果,又能在钻探作业时具有良好的防风、防水和保温特性。

3.2 保温材料优选

目前常见的设备保温材料主要包括岩棉、玻璃棉、橡塑海绵、聚氨酯硬质泡沫塑料等几种。

(1)岩棉。是工业中较为广泛使用的保温材料,导热系数为 $0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,它以玄武岩为主要原料,经高温离心后与其它添加剂混合制成^[27-28]。它的生产成本较低,同时化学性质稳定,具有很好的保温性和防火性,但缺点是易吸湿腐蚀,产生对人体有

害的物质。

(2)玻璃棉。常用于建筑中的保温防火工程,它不燃且阻燃,具有一定的耐高温性。玻璃棉的密度较小,价格便宜,但保温性较其他材料稍差,导热系数为 $0.034\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[29]}$ 。它的最大缺点是防水性较差,玻璃棉易吸水,且在吸水后保温性能会产生不可逆的降低,不能在湿度较大的环境下使用。

(3)聚氨酯硬质泡沫塑料。聚氨酯硬泡在发泡后会在材料内部产生无数的封闭空气泡,依靠封闭空气泡内部的空气来实现保温,导热系数小,一般低于 $0.024\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。同时闭孔结构除了能够保温,还是一层天然的防水屏障,能很好地阻断水和水蒸气的渗透,使聚氨酯具有较好的防水性^[30-32]。因此,聚氨酯的使用寿命较长,不像传统的岩棉、玻璃棉一旦外护层受损,其开孔结构无法阻止水蒸气的渗透,一段时间后,就因受潮结露漏水而导致保温结构的失败。同时,聚氨酯硬泡使用喷涂注射的方法成型且粘附力强,适用于各种复杂截面,易于形成稳定连续的保温层。

(4)橡塑海绵。是由优质丁腈橡胶和聚氯乙烯为主体材料混合后加热挤压成。丁腈橡胶和聚氯乙烯分别赋予了橡塑海绵优异的耐油和耐热型、良好的耐磨性以及阻燃性和稳定的化学性能。同时橡塑海绵具有很好的弹性和拉伸强度,抗老化性强^[33-34]。橡塑海绵的保温原理与聚氨酯硬泡相似,材料本身也具有较好的保温性和防水性,导热系数为 $0.026\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,但由于其成本较高,仅在一些特殊的保温场合下被使用。

各种保温材料的性能对比见表2。

表2 保温材料性能对比

材 料	导热系数/ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	防水 性	化学 性能	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	制造 成本
岩棉	0.04	差	较稳定	150	低
玻璃棉	0.034	差	较稳定	100	低
聚氨酯硬泡	0.024	好	稳定	50	较高
橡塑海绵	0.026	好	稳定	45	高

这4种保温材料在建筑、工程等方面都有广泛的研究和应用实例。王肇嘉等^[35]研制了一种新型气凝胶岩棉保温材料,并明确了气凝胶含量、岩棉板厚度和密度对复合保温材料导热系数的影响,确定

了最佳生产工艺配方,对复合保温材料的微观形貌与元素种类进行了分析。王晓晖等^[36]研究了在不同情况下岩棉板、聚氨酯泡沫板等几种保温材料的导热系数和抗压强度的变化规律,并设计了耐久性试验来分析几种材料的耐久性能变化。同济大学的刘琳等^[37]使用不同极性的活化剂研究了表面活性剂的极性对聚氨酯硬质泡沫塑料表观密度、尺寸稳定性、流动性能、压缩强度、保温性能的影响,得到了一种更好性能的聚氨酯硬泡塑料的制备方法。其中聚氨酯硬质泡沫塑料是目前极地和寒地区石油钻机最常用的保温材料,国内华油一机、四川宏华等公司开发设计的石油钻机均选用了聚氨酯作为环境保温材料。

在选取南极钻机保温材料时,聚氨酯材料同样具有优越性,能够满足选材的几点原则:(1)尽可能采用热导系数小的高效保温隔热材料,这样既能减少热交换量,提高保温效率,又能尽可能减少保温层的厚度,提高室内使用面积;(2)在保证保温效果的前提下,尽可能的节约材料成本,选择经济性高的保温材料;(3)要求保温材料要轻便,由于南极地区的运输能力极为有限,基本只能依靠直升机吊装和极地雪橇车托运,减少保温材料质量可以大大节约运输资源的消耗。聚氨酯硬泡在几种保温材料中热导系数最低,保温效果好,并且聚氨酯在常见保温材料中密度相对更小,综合考虑选用聚氨酯作为集装箱内部的保温材料。因此,经过对比,将以聚氨酯作为内保温材料的集装箱式保温作为整套钻探装备的环境保温方式。

3.3 钻机关键部件的加热方式

针对低温环境下的钻机供暖系统加热,主要包括蒸汽加热、热空气加热、电伴热带加热等3种方式。

(1)蒸汽加热。进行蒸汽加热的蒸汽加热系统一般包括蒸汽发生器、自动补水管路、冷凝水回收管路以及蒸汽输送管路4大部分。蒸汽是一种传热系数很高的介质,它的压力和温度的关系稳定,可以通过施加确定的压强来获得想要的温度^[38]。它的循环输送过程简单,可以直接利用大气压差来实现蒸汽的快速流动和传热,同时蒸汽的获取十分容易,加热系统的加热成本较低。这些优点使得蒸汽加热方式在各种需加热设备上都有着广泛的应用前景,在南极钻机中蒸汽加热主要用于给罐内的钻井液

加热。

(2)热空气加热。主要用于给放置固控系统等相关钻探设备的集装箱内部加热,提高集装箱内的整体环境温度,保证钻机的正常稳定工作并为工作人员提供一个合适的工作温度。热空气加热通过加热器和风管实现,加热器以柴油为燃料将空气加热,由风管将热空气传输到各个集装箱内^[39]。每个集装箱均可作为一个独立的加热单元,可在集装箱内安装温控器和传感器来调节不同加热单元的热空气输送量。

(3)电伴热带加热。包括有限功率和自限温2种类型,其中自限温伴热带可根据管道温度调节输出功率,保持管道表面恒温^[40]。这种加热方式无需日常维护,安全且换热效率高,可实现远程调控,一般常选用自限温电伴热带作为管线加热的理想方式。这样能够有效避免在南极钻探的作业过程中,因运输钻井液或者水的管线暴露在极地环境中,而造成的管线内流体结冰,甚至冻裂管线的危险。在实际使用过程中通常是需要先在线管上缠绕敷设电伴热带加热,再在线管外侧加上聚苯乙烯等保温层进行保温^[41-44]。

针对南极钻机加热方式的选择,可以借鉴海洋石油平台较为成熟的加热系统模式,多种加热方式组合使用,根据具体部件选择与之相应的合适的加热方式。使用蒸汽加热的方式来加热钻井液罐中的钻井液,热空气加热来为各保温集装箱提供整体环境加热,电伴热带加热来为各裸露的管线进行加热,以得到最好的保温加热效果。

4 结论与展望

(1)目前还没有系统的针对地质钻机的低温保温方法,现有的保温方法大都借鉴于低温石油钻机。应尽快设计建立低温地质钻机的系统保温方案和评价体系,能够根据具体的施工条件来选取保温材料和方法。

(2)丁腈橡胶在-50℃低温下依旧能够保持良好的力学性能,是一种较为理想的,能够抵御南极内陆地区恶劣环境,适用于南极钻机的低温密封材料。

(3)现有的适合于南极地区钻探的低温钻井液类型较多,但都存在一定程度的缺点,还需要从研究低温钻井液作用机理出发,研发出在低温性能、环保性等各方面都具有优越性的新型低温钻井液基液及

相关添加剂,构建新型低温钻井液体系,并完善相关的施工工艺。丁酸乙酯和丙酸丙酯等小分子酯是南极内陆钻探潜在的钻井液。

(4)针对南极钻机的保温加热形式,可采用保温集装箱作为环境保温主体,多种加热方式共同作用的形式,以实现较好的保温效果,保证钻机控制系统等需保温部件的正常工作。

参考文献:

- [1] Andrew M. Smith, John Woodward, Neil Ross, et al. Evidence for the long-term sedimentary environment in an Antarctic subglacial lake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 504.
- [2] Igor A. Zotikov, Victor S. Zagorodnov, Yuriy V. Raikovskiy. Core drilling through the ross ice shelf (Antarctica) confirmed basal freezing[J]. *Science*, 1980, 207: 4438.
- [3] 李星辰. 深冰下基岩取心钻进模块的设计优化及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [4] 胡正毅. 空气孔底部局部反循环电动机机械冰层取心钻具研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [5] Akiyoshi Takahashi, Yoshiyuki Fujii, Hideki Narita, et al. Development of the JARE deep ice coring system III[J]. *Antarctic Record*, 1996, 40(1).
- [6] Bentley Charles R., Koci Bruce R. Drilling to the beds of the Greenland and Antarctic ice sheets: A review[J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 47.
- [7] 王高社, 王平怀, 张亚林, 等. 一种低温铸钢材料的研制[J]. *铸造技术*, 2021, 42(2): 105-107.
- [8] 王刚, 麻晓峰, 刘林等. 低温高强度钻机用LS9#铸钢的制备工艺开发[J]. *四川冶金*, 2022, 44(4): 40-43.
- [9] 赵旭平, 张正芳, 袁启波. 低温材料RW60E钢的线膨胀系数测定及其数学模型[J]. *金属热处理*, 2012, 37(11): 116-118.
- [10] 汪金桃. 低温钻机金属材料性能与工艺研究[J]. *石油机械*, 2008, 36(9): 117-120.
- [11] 赵旭平, 张良, 聂成, 等. 低温钻机用铸钢件铸造技术分析[J]. *石油机械*, 2009, 37(11): 46-47, 81.
- [12] 陈威, 高义民, 邢建东, 等. 一种低合金低温铸钢及其组织与性能[J]. *西安交通大学学报*, 2008(7): 875-879.
- [13] 张文文, 王胜辉, 律方成. 硅橡胶与氟硅橡胶材料的低温物理性能研究[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(12): 28-31.
- [14] 陈远鹏, 王志远, 孙宝江, 等. 极地钻井关键设备橡胶密封材料的优选[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 54-60.
- [15] 董超峰, 李东升, 李晓鹏, 等. 耐低温、耐油丁腈橡胶复合材料的制备[J]. *火箭推进*, 2016, 42(4): 84-89.
- [16] 王天骐, 马玉聪, 郑顺奇, 等. 耐低温橡胶的研究进展: 分子结构设计与化学改性[J]. *合成橡胶工业*, 2022, 45(6): 530-537.
- [17] 王杰, 张跃. 高低温环境对丁腈橡胶O形圈密封性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(8): 148-152.
- [18] Jinsheng S, Zonglun W, Jingping L, et al. Research progress

- and development direction of low-temperature drilling fluid for Antarctic region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1161-1168.
- [19] 孙金声, 王宗轮, 刘敬平, 等. 南极地区低温钻井液研究进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 1005-1011.
- [20] 陈舵, 张楠, 杨双春, 等. 低温钻井液研究和应用进展[J]. 应用化工, 2021, 50(7): 1998-2001, 2007.
- [21] 朱浩文. 寒带地区冬季钻井防冻保温技术探讨[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(5): 27-28.
- [22] 展嘉佳, 徐会文, 冯哲. 低温条件下乙二醇基钻井液体系的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(11): 17-19.
- [23] 宋佳宇, 徐会文, 韩丽丽, 等. 钻井液类型对南极冰层取心钻进工作的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(9): 13-17.
- [24] 王莉莉, 赵大军, 徐会文, 等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液抗低温性能试验[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 862-866.
- [25] 钱晶晶, 冯军宗, 姜勇刚, 等. 帐篷夹芯隔热材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 84-87.
- [26] 糜娜, 陈颜杰, 周翔, 等. 适用于寒冷气候的充气帐篷保温性能及优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(9): 6-9, 67.
- [27] 李晓光, 刘谨谨, 裴秀卫, 等. 岩棉复合型保温模板的设计及其性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1597-1603.
- [28] 周茗如, 詹先鹏, 王晨辉, 等. 岩棉保温板透湿性能影响因素分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(2): 106-110.
- [29] 胡验君, 苏振国, 杨金龙. 建筑外墙外保温材料的研究与应用[J]. 材料导报, 2012, 26(S2): 290-294.
- [30] 倪文静, 周长武. 海洋石油平台常用保温材料浅析[J]. 中国造船, 2009, 50(A11): 450-454.
- [31] 张坤, 雷少华, 齐贞光. 常见外墙保温材料优缺点分析[J]. 冶金丛刊, 2016(7): 116-117.
- [32] Jae-Young SHIN, Bong-Ki RYU. Structural, thermal, and chemical properties of boron oxide-doped molybdate glass for use as a lead-free low-temperature sealing material[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2017, 125(12).
- [33] 刘河敬, 席时春. 新型保温材料——橡塑海绵在海洋石油平台及FPSO上的应用[J]. 中国造船, 2007, 48(B11): 151-154.
- [34] 王芳. 保温材料导热系数影响因素试验研究[J]. 上海纺织科技, 2019, 47(6): 36-38.
- [35] 王肇嘉, 路国忠, 何光明, 等. 气凝胶岩棉复合保温材料的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(1): 124-126, 137.
- [36] 王晓晖, 张辉. 不同环境下四种保温材料的耐久性性能试验研究[J]. 低温工程, 2021(2): 83-88.
- [37] 刘琳, 汪绍礼. 硅类表面活性剂对聚氨酯硬泡性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 147-150.
- [38] 柴占文, 牟长清, 侯召坡, 等. 4000m低温车载钻机固控系统的研制[J]. 石油机械, 2011, 39(10): 57-60, 63.
- [39] 刘占鹏. 4000m低温钻机系统方案设计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [40] 田磊, 彭勇, 黎善猛, 等. 低温轮轨钻机加热保温系统设计分析[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(10): 54-58.
- [41] 罗诗伟. 钻机在高原高寒地带难启动的原因及对策[J]. 工业技术, 2014(29): 75-76.
- [42] 张东涛, 秦晓峰, 廖昌健, 等. ZJ50 / 3150DB型低温石油钻机设计[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(9): 84-87.
- [43] 郑凯波. 极地钻井关键设备保温方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [44] 董迎恺. 极地半潜式平台舱室及管路的防寒优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.

(编辑 周红军)