

# 南极冰钻钻井液应用性试验研究

刘 宁<sup>1</sup>, 徐会文<sup>1</sup>, 韩丽丽<sup>2</sup>, 王莉莉<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 钻井液的性质及性能参数对于南极科学钻探有着重要的影响。钻井液除了必须要具备合适的粘度和密度, 以满足冷却钻头、平衡孔壁压力、携带冰屑、清洁孔底的要求外, 钻井液的性质如导电性、导热性及其腐蚀性对于保证钻具的正常工作、输送孔内信息也有着重要的影响。根据目前已经在南极使用的钻井液类型, 分别对 6 种介质(国产硅油-3cst、KF96 硅油-2cst、丁酸乙酯、丁酸丁酯、丁酸戊酯、丙酸丙酯)在不同温度下的电导率、导热系数和对密封件的腐蚀性进行了试验测试, 选出了适合南极应用的钻井液类型及在钻具中使用的密封件材质, 可供极地钻探选择钻井液类型及钻具设计提供重要的参考。

**关键词:** 南极钻探; 冰钻; 钻井液; 电导率; 导热系数; 腐蚀性

**中图分类号:** P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)08-0011-04

**Physicochemical Properties of Potential Ultralow-temperature Drilling Fluids for Antarctic Deep Ice Core Drilling/** LIU Ning<sup>1</sup>, XU Hui-wen<sup>1</sup>, HAN Li-li<sup>2</sup>, WANG Li-li<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup> (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Drilling fluid properties and performance parameters have significant influence on Antarctic scientific drilling. Drilling fluids should have appropriate viscosity and density to cool drill bit, balance hole wall pressure, carry ice chips and clean hole bottom; in addition, its properties, such as electrical conductivity, thermal conductivity and corrosion, also have important influence on drilling tools for normal operation and downhole information transmission. According to the types of drilling fluid used in Antarctic, experimental tests were made on the conductivity, thermal conductivity and corrosion on sealing components of 6 kinds of medium DSO-3.0cst, KF96 silicone oil-2.0cst, ethyl butyrate, n-butyl butyrate, n-amyl butyrate and n-propyl propionate respectively under different temperatures, the drilling fluids and sealing materials suitable for Antarctic are selected, which can be important reference for drilling fluid selection and drilling tools design.

**Key words:** Antarctic drilling; ice core drilling; drilling fluids; conductivity; thermal conductivity; corrosion

钻井液的类型对于在南极开展科学钻探至关重要, 选用的钻井液要有合适的粘度和密度, 以满足冷却钻头、排除冰屑、平衡冰层压力、保持孔壁的稳定等方面的要求。由于在南极冰层取样钻探工作中比较广泛地使用铠装电动机械钻具, 为避免钻井液的泄漏, 要求钻井液不得对密封元件产生破坏作用。同时, 还要求钻井液具有弱导电性, 不影响电子元器件的使用寿命与孔底各种信号的传输。高导热系数钻井液便于带走钻头产生的切削热, 以提高切削具的使用寿命。当前对于南极冰层取心钻进用钻井液的研究, 多集中在钻井液的类型与基本性能参数的研究方面, 对于介质的特殊性质, 如电导率、导热系数及对密封圈的腐蚀性等应用方面的研究未见报

导, 开展此方面的试验研究具有重要的理论与实际意义。

## 1 试验仪器与材料

(1) 上海雷磁 DDSJ-308F 电导率测试仪, 可以测量电导率、电阻率、TDS、盐度值、温度值等参数。其主要技术指标为: ①电导率的测量范围 0~199.9 ms/cm; ②测量误差  $\pm 0.5\%$  (FS); ③温度补偿手动或自动(-5.0~110.0 °C); ④出厂年份: 2009 年

(2) 上海方瑞仪器有限公司 DC-6506 低温恒温槽。其主要技术指标为: ①工作温度范围 -65~100 °C, 温度波动度  $\pm 0.05$  °C, 显示分辨率 0.1 °C; ②低温槽容量 6 L; ③循环流量 10 L/min; ④二级重

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目“极地钻探钻井液及其对环境的影响研究”(编号: 41276189)

作者简介: 刘宁, 女, 汉族, 1990 年生, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事极地冰钻钻井液研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, 1047103514@qq.com。

叠式压缩机制冷;⑤微机控温。

(3)上海雷磁 DSJ - 0.01C 钛合金电导电极。其主要技术指标为:①电极常数 0.01;②测量范围 0 ~ 2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ;③电极材质:钛合金。

(4)DRE - III 导热系数测试仪。①测试原理:瞬态平面热源法;②测量范围:0.005 ~ 100  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;③测量相对误差: $\leq 3\%$ ;④探头材质:金属镍,直径 15 mm,使用温度  $-50 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(5)环球 DTM - 280 探针数显温度计。其主要技术指标为:①探头材质:普通 201 不锈钢管;②测量范围  $-200 \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ ;③测量误差 0.5%;④分辨率 0.1  $^\circ\text{C}$ 。

(6)电子天平。①测量范围:10 mg ~ 1000 g;②测量精度:1 mg。

(7)4 种材质的密封圈:聚四氟乙烯、聚氨酯、氟橡胶和硅橡胶,外直径均为 20 mm,厚度均为 2 mm。

(8)国产硅油 - 3cst、KF96 硅油 - 2cst、丁酸乙酯、丁酸丁酯、丁酸戊酯、丙酸丙酯 6 种介质。

## 2 介质电导率的测试

在钻探过程中,钻井液可能会渗透到钻具的密封舱中,舱内设置有用于孔内信号输送的电子元件,如果钻井液与之相互接触,轻者会干扰孔内电子信号的传输,重者可能会造成电子元器件的损坏,影响钻具的使用寿命。在南极冰层取心钻进工作中,通常选用油基钻井液,油基钻井液本身并不导电,如在钻进过程中混入碎冰屑,可能会引起电导率的变化。为了解介质在混入冰屑后电导率的变化情况,试验测试了 6 种介质分别加入碎冰屑后不同温度下的电导率。

### 2.1 测试方法

(1)冰屑的制备。将装有介质的烧杯放入恒温槽中,冷冻至  $-60\text{ }^\circ\text{C}$ ,利用注射器将水逐滴滴入介质中,形成粗冰屑,再根据需要对冰屑进行再处理,制成与钻进所形成的冰屑尺寸相近的细冰屑。

(2)电导率的测试。在 350 mL 的 6 种介质中分别加入  $16\text{ cm}^3$  与  $48\text{ cm}^3$  的冰屑,在钻井液中冰屑的含量达到 4.57% 和 13.71%,基本达到了在南极冰层取心钻进时的最低与最高钻速所产生的冰屑量。再将 DSJ - 0.01C 钛合金电导电极插入,以  $5\text{ }^\circ\text{C}$  的间隔,分别测试了 6 种介质在  $-60 \sim 0\text{ }^\circ\text{C}$  之间的电导率,如图 1、图 2 所示。

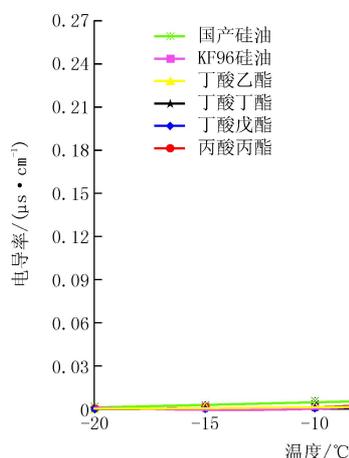


图 1 350 mL 介质中加入  $16\text{ cm}^3$  冰屑的电导率随温度变化曲线

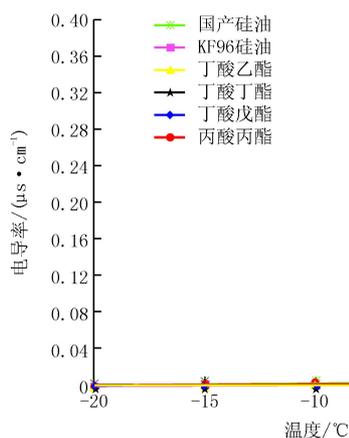


图 2 350 mL 介质中加入  $48\text{ cm}^3$  冰屑的电导率随温度变化曲线

### 2.2 试验数据分析

由图 1 和图 2 可以看出,6 种介质在温度低于  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  时,电导率为  $0\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$  且不受冰屑浓度的影响;在  $-20 \sim -5\text{ }^\circ\text{C}$ ,开始出现电导率,但其值较小,可能是与介质中混入其它的物质所造成的电导率的变化;温度在  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  时,电导率开始增大,但都不超过  $0.02\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ ;在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时,由于达到了冰与水的相变温度,介质中的冰开始出现融化,电导率也迅速的增大。其中以国产硅油的电导率最大,为  $0.256\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ ,其次是 KF96 硅油和丙酸丙酯,分别为  $0.085$  和  $0.032\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ ,其余 3 种介质的电导率都没有超过  $0.02\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ 。由图 2 可以看出,在  $-5 \sim 0\text{ }^\circ\text{C}$  区间,随着介质中冰屑浓度的增加,冰的融化量也在增大,6 种介质的电导率均有所上升,国产硅油的电导率增大到  $0.385\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ ,其次是丙酸丙酯、KF96 硅油,分别增大到  $0.197$ 、 $0.166\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ ,其余 3 种介质的电导率都没有超过  $0.02\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

乙酸丁酯已经在南极钻探中应用多次,而它的

电导率为  $0.02 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。当温度低于  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  时,6 种介质的电导率均  $< 0.02 \mu\text{s}/\text{cm}$ ,且南极甘布尔采夫山脉区的环境温度常在  $-60 \sim -40 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,6 种介质在此温度下的电导率为  $0 \mu\text{s}/\text{cm}$ ,所以在此温度下使用不会对钻具内部的电子元件及孔内信号的传输产生任何影响。

### 3 介质导热系数的测试

冰具有脆性,且随着温度的下降而不断增大。在南极实施的冰层取心科学钻探,多采用工具钢或者硬质合金材料作为切削具,以切削破碎为主,伴随有一定的剪崩破碎。随着钻进深度的增加,在地层压力的作用下冰的熔点降低,冰层表现出脆性小、粘弹性大的性质。在钻进过程中,钻头上的切削具在碎岩时会产生一定量的切削热,可能会使冰屑处于部分融化状态,而这种状态的冰屑会再次冻结在切削具、排屑通道等位置上,对钻进造成严重的影响。南极冰钻钻井液要具备良好的导热性,为此进行了介质导热系数的试验测试,以评价钻井液的冷却散热能力。

#### 3.1 测试方法

取  $350 \sim 400 \text{ mL}$  待测介质置于烧杯中(取样的体积以浸没测试探头为准),将烧杯置于低温恒温槽内,再将 DRE-III 导热系数测试仪的镍探头浸于待测介质之中,在  $-50 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$  之间以  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  的间隔分别对 6 种介质的导热系数进行测试,测试结果见图 3。

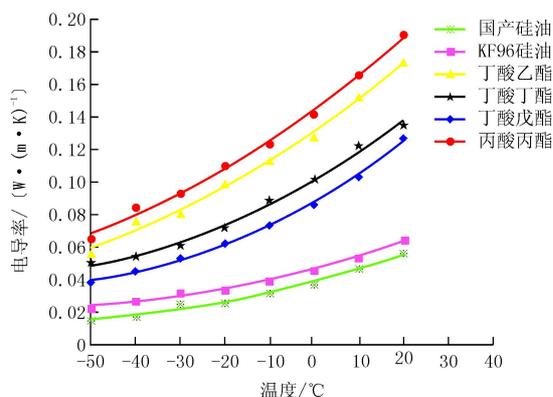


图3 6种介质的导热系数随温度变化的曲线

#### 3.2 试验数据分析

钻井液冷却钻头的的能力主要取决于介质的热容量与导热系数的大小。介质的导热系数则主要取决于介质的极性、密度及在一定温度下分子的热运动

能力。由于所选定的介质均为非极性的油基材料,此时介质的导热能力则主要取决于其密度与分子的热运动能力。6 种介质的密度随着温度的降低呈线性增大<sup>[1]</sup>,分子之间距离减小,更加致密,这有利于热量的传导。但在低温条件下,分子热运动的能力则会随着温度的降低而迅速下降,不利于热量的传导。从图 3 可以看出,6 种介质的导热系数均随着温度的降低呈下降趋势,所以对于 6 种介质来说,温度对导热系数的影响更大。

丙酸丙酯和丁酸乙酯的分子量相同,但结构不同,丙酸丙酯中  $\alpha$  氢的活泼性强于其它 3 种酯,所以丙酸丙酯的导热系数最大。丁酸乙酯、丁酸丁酯和丁酸戊酯的分子量依次增大,分子量越大,分子链长度越长,分子间的距离也越大,其热运动的能力也越小,不利于热量的传导,所以丁酸乙酯的导热系数较大,其次是丁酸丁酯和丁酸戊酯。硅油类介质各原子之间均为饱和的共价键,结构的对称性更强,其导热系数也最小。

水是导热性最好的液体,在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时,水的导热系数是  $0.604 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。相比较而言,6 种介质的导热性并不理想。通过实验我们只能确定,丙酸丙酯在 6 种介质中导热性最好。

### 4 密封圈在介质中的溶胀测试

密封元件是用来密封铠装电动机械钻具压力舱等。在钻具设计中可选用的密封元件材料为聚四氟乙烯、聚氨酯、氟橡胶和硅橡胶等材料。由于在南极钻探中多选用油性钻井液,如果钻具长时间浸泡在此类介质中,可能会造成密封元件的失效,对钻具工作的可靠性产生重要的影响。为此试验测试了 6 种介质对 4 种材质的密封圈的腐蚀性,选出最匹配的钻井液和密封件材料。

#### 4.1 测试方法

试验前,分别测量 4 种材质密封圈的外直径、截面直径和质量。取  $350 \text{ mL}$  待测介质于烧杯中,将烧杯置于温度可调的低温恒温槽中,将 4 种材质的密封圈放入待测介质中。4 h 后取出密封圈,再次测量其外直径、截面直径和质量,并计算出变化量。试验测试了  $25$ 、 $12.5$ 、 $0$ 、 $-12.5$  和  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  共 5 个温度条件下密封圈的变化情况,测试结果见图 4~6。

#### 4.2 试验数据分析

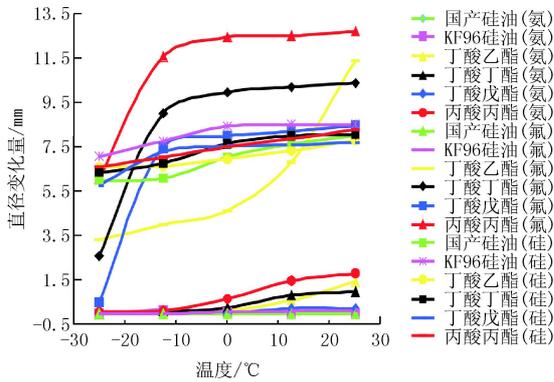


图4 直径变化量随温度变化的曲线

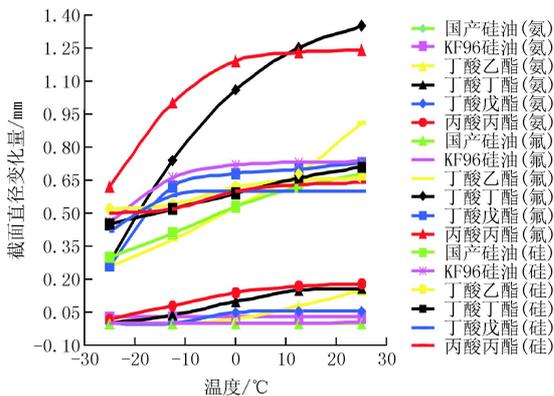


图5 截面直径变化量随温度变化的曲线

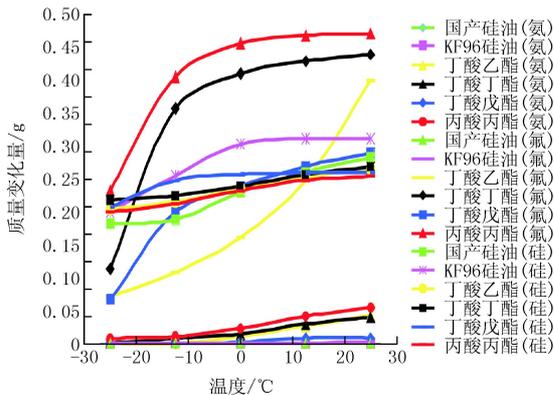


图6 质量变化量随温度变化的曲线

由于聚四氟乙烯在6种介质中没有变形量,所以图4~6中没有聚四氟乙烯的变化曲线。由图4~6可以看出,3种橡胶材质的密封圈均随着介质温度的升高,膨胀量逐渐增大,膨胀量达到极限后,不再膨胀保持稳定。硅橡胶由Si-O-Si键组成,硅油中也含有Si-O键,结构相似使得硅橡胶在硅油类介质中溶胀最为严重。硅橡胶的侧链上引入少量的不饱和基团,使得酯基小分子可以进入。从图4~6可以看出,硅橡胶在硅油类和酯基类介质中都

会溶胀,所以硅橡胶不适合作为南极冰钻的密封材料。

氟橡胶是指主链或侧链的碳原子上含有氟原子的合成高分子弹性体。氟原子的引入,赋予橡胶优异的耐热性、抗氧化性、耐油性、耐腐蚀性和耐大气老化性。从整体上看它属于一种饱和的高聚物,在差异性较大的介质中具有比较强的耐腐蚀性。从图4~6可以看出,在酯基介质中,氟橡胶溶胀明显,所以氟橡胶适合作为硅油类钻井液的密封件材料。

聚氨酯是主链上含有重复氨基甲酸酯( $-\text{NH}-\text{COO}-$ )基团的大分子化合物,4种酯基介质中也含有酯基官能团,根据相似相溶的原理,聚氨酯更易溶于酯基介质。丙酸丙酯与丁酸乙酯的分子量相同但结构不同,丙酸丙酯中 $\alpha$ 氢的活泼性比丁酸乙酯强,活泼的 $\alpha$ 氢更易于与聚氨酯发生反应。而丁酸乙酯和丁酸丁酯的 $\alpha$ 氢活泼性相同,但丁酸乙酯的分子量比丁酸丁酯小,小分子更易于进入聚氨酯。从图4~6也可以看出,聚氨酯在丙酸丙酯溶胀量最大,其次是丁酸乙酯和丁酸丁酯。由于聚氨酯与硅油的差异性较大,且分子中没有不饱和键,因而在国产硅油和KF96硅油中聚氨酯几乎没有任何变化,所以聚氨酯可以作为硅油类钻井液的密封件材料。

聚四氟乙烯( $-\text{C}_2\text{F}_4-$ )有C-F键,且C-F键能量大,键短,无伸缩性,使得聚四氟乙烯化学性质稳定且具有惰性。试验测试聚四氟乙烯耐腐蚀能力,在6种介质中不同温度条件下其直径、截面直径和质量均没有任何变化,可以认为聚四氟乙烯是最为理想的油基钻井液的密封件材料。

## 5 结论

通过试验测试和理论分析,可以得出南极冰钻钻井液的选择有以下几个结论。

(1) 试验证明了6种介质是否混入冰屑,导电性都很弱,均可作为南极冰钻钻井液使用。

(2) 低温条件下,非极性介质的导热性主要取决于温度的影响,密度的影响相对较小。试验证明,6种介质的导热性中,丙酸丙酯的导热性最好。

(3) 密封材料的溶胀性主要取决于密封材料的分子结构与介质分子结构的差异,差异性越小,密封材料的溶胀变形越大。试验证明,酯类介质的腐蚀性大于硅油;聚四氟乙烯的耐腐蚀能力大于聚氨酯、

(下转第43页)

能射流式液动锤的冲击功和冲击频率均增大,因此高能射流式液动锤的机械钻速增大。

#### 4 结论

本文通过 SC-86H 型高能射流式液动锤钻进对可钻性级别为 10 级花岗岩的全面钻进试验,得出以下结论。

(1) 根据试验可知,活塞行程、冲锤质量、泵量对 SC-86H 型高能射流式液动锤的机械钻速具有重要影响,通过增大 SC-86H 型高能射流式液动锤的活塞行程、冲锤质量、泵量,均能获得冲击功与机械钻速的提高。

(2) 在其他试验条件一定时,活塞行程由 80 mm 增加到 120 mm 时,机械钻速从 1.48 m/h 提高到 2.06 m/h,提高了 40%;质量为 4 kg 的冲锤更换为质量为 8 kg 的冲锤时,机械钻速由 3.15 m/h 提高到 5.19 m/h,提高了 65%;泵量由 180 L/min 增加到 220 L/min 时,机械钻速由 2.85 m/h 提高到 5.04 m/h,提高了 77%。

(3) 在现有试验条件下,利用该高能射流式液动锤进行地面钻进试验获得了 5.19 m/h 的机械钻速,较常规回转钻进机械钻速提升显著。

#### 参考文献:

[1] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技

术进展[J].科学导报,2012,30(32):42-45.

- [2] 蔺文静,刘志明,马峰,等.我国陆区干热岩资源潜力估算[J].地球学报,2012,33(5):807-811.
- [3] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):40-44.
- [4] 苏长寿.液动潜孔锤的现状及其用于石油钻井应注意的几个问题[J].探矿工程,2002,(6):30-31.
- [5] 王人杰,蒋荣庆.液动冲击回转钻进技术[M].北京:地质出版社,1988:97-104.
- [6] DeuschU, Marx C, Rischmuller H. Evaluation of hammer drilling potential for KTB in super-deep drilling and deep geophysical sounding[M]. Heidelberg:Springer-Veerlag, 1995:310-320.
- [7] 朴成哲,殷琨,蒋荣庆,等.KSC-127型射流式冲击器应用于大陆科学深钻的试验研究[J].世界地质,2000,19(3):295-298.
- [8] 王达,张伟,张晓西.中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M].北京:科学出版社,2007:209-233.
- [9] 菅志军,殷琨,蒋荣庆,等.油气勘探钻井用液动射流式冲击器的研究与应用[J].世界地质,1998,17(4):88-92.
- [10] 李贵宾,刘泳敬,柳耀泉,等.堡古1井花岗岩地层钻头优选与应用[J].石油钻采工艺,2011,33(6):106-109.
- [11] 沈建中,贺庆,韦忠良,等.YSC-1178型液动射流冲击器在旋冲钻井中的应用[J].石油机械,2011,39(6):52-54,94.
- [12] 杨红东,武国峰.高性能液动锤的试验与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(3):37-43.
- [13] 彭视明,殷其雷,赵志强,等.低速射流元件控制的高能液动锤研究[J].石油机械,2010,38(3):1-4.
- [14] 李世忠.钻探工艺学[M].北京:地质出版社,1992:199-200.
- [15] 王跃伟,杨泽英,谢文卫,等.YZX130型液动锤研究及其在WFSD-4孔中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):143-145.

(上接第14页)

氟橡胶和硅橡胶。

#### 参考文献:

- [1] 刘宁,徐会文,韩丽丽,等.脂肪酸酯分子结构对酯基钻井液性能的影响[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):63-66.
- [2] 刘春朋.冰层回转钻进切削热分析与实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2014.
- [3] Talalay, P. G., Fan, X., Xu, H., et al. Drilling fluid technology in ice sheets: Hydrostatic pressure and borehole closure considerations[J]. Cold Reg. Sci. Technol., 2014, 98, 47-54.
- [4] 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.
- [5] Talalay, P., Yang, C., Cao, P., et al. Ice-core drilling problems and solutions. Cold Reg. Sci. Technol., 2015, 120, 1-20.
- [6] Xu Huiwen, Han Lili, Cao Pinlu, et al. Low-molecular-weight, fatty-acid esters as potential low-temperature drilling fluids for ice coring[J]. Annals of Glaciology, 2014, 68.
- [7] 韩俊杰,韩丽丽,徐会文,等.极地冰层取心钻进超低温钻井液

理论与试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):23-26.

- [8] 王莉莉,徐会文,赵大军,等.南极冰层取心钻探钻井液对雪层影响的模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):1-4.
- [9] 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.
- [10] 张玉珂,赵俊廷.基于 Hot Disk 测定食用油的导热系数的研究[J].广州化工,2015,(2):31-33.
- [11] 廖彬,曾祥兵,潘晓霞,等.聚四氟乙烯密封圈密封性能研究[J].真空科学与技术学报,2015,35(1):69-73.
- [12] 李亦健,陈虹,高旭,等.以聚四氟乙烯为密封件的法兰结构低温密封性能研究[J].低温工程,2014,(4):31-34,60.
- [13] 韩丽丽.南极冰钻超低温钻井液技术研究[D].吉林长春:吉林大学,2013.
- [14] 张海明.油脂导热系数的测定及其传热性能的研究[D].河南郑州:河南工业大学,2014.
- [15] 徐会文,韩丽丽,韩俊杰,等.南极冰层取心钻探酯基钻井液的理论与试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):279-282.