

极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究

韩俊杰, 韩丽丽, 徐会文, 于达慧, 曹品鲁, Pavel· Tatalay

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 南极冰层取心钻进的关键之一是钻井液的耐高温能力。根据南极冰层钻进的特点及对钻井液的特殊要求, 在综合分析国内外冰层钻进钻井液应用经验的基础上, 对有机硅、氟代烃、一元脂肪酸酯及二元脂肪酸酯进行了理论上的分析研究, 测试了各自在不同温度条件下的粘度和密度, 分析了粘度与密度变化的机理。确定出分子间相互作用中无氢键形成的物质的粘温系数最小, 脂肪酸酯的粘温系数受到分子间氢键的数量影响最大, 指出了介质密度的增加是由于体积收缩所致, 与介质的分子结构与形态无关。所得到的结论对于极地冰层取心钻进钻井液的选择与确定具有重要的理论与实际意义。

关键词: 极地钻探; 冰钻取心; 超低温钻井液; 粘度; 密度

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2013)06-0023-04

Theoretical and Experimental Research on the Ultra-low Temperature Drilling Fluids for the Polar Ice Coring Drilling/HAN Jun-jie, HAN Li-li, XU Hui-wen, YU Da-hui, CAO Pin-lu, Pavel Tatalay (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: The low temperature resistance of drilling fluid is one of the keys for core drilling in Antarctica ice sheet. According to the characteristics of ice core drilling and the special requirements for drilling fluids in Antarctic, based on the comprehensive analysis on the application experience of ice drilling fluids both in China and abroad, theoretical study was made on organosilicon, fluohydrocarbon, aliphatic monocarboxylic acid ester and aliphatic dibasic acid ester, their viscosity and density were tested under different temperatures and the mechanism of changes in viscosity and density were also analyzed. The result indicates that the hydrogen bond strongly influences the viscosity temperature coefficient of the fatty acid ester, and the lowest viscosity temperature coefficient of drilling fluid could be obtained if there is no hydrogen bond formation. Besides, the increase of the density mainly depends on the shrinking volume of the drilling fluid; the chemical structure and morphology have nothing to do with the change of density. These results have theoretical and practical significance for the selection and optimization of the ultra-low temperature drilling fluid system for ice core drilling in Polar Regions.

Key words: polar drilling; ice coring; ultra-low temperature drilling fluid; viscosity; density

0 引言

目前世界许多国家已经将极地研究作为发展战略之一。无论是对全球气候变化过程与规律研究, 还是对冰盖结构、冰下地质构造的研究, 以及对极地矿产资源的勘探与开发都离不开冰层取心钻探。为此在极地冰层取心钻探工作就显得尤为重要, 它是获取冰心以及冰层下部的基岩样品的重要手段之一。而这些样品可以提供没有污染的远古年代的气体, 进而获得准确的古气候信息, 这是研究气候变化、预测未来气候变迁、古生物标本、生命起源与进化的重要依据; 同时也是获得极地地质结构、矿产资源储备与分布的重要依据^[1,2]。开展极地对气候变化影响的研究内容已列入我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》。在2011年

冬季至2012年春季进行的中国第28次南极科考工作中, 在中国的昆仑站进行了120 m的先导孔施工, 取得了良好的效果。随着深度的增加, 维持冰层稳定就成为一个突出的问题。相对于常规钻井而言, 南极深部冰层取心钻进对钻井液的要求更高, 不仅要求钻井液在超低温条件下(南极极点附近温度最低可达 $-89.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不同地区地表年平均温度不同, 在 $-50\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$)具有良好的流变特性, 能起到常规钻井液冲洗钻孔和保护孔壁的作用, 而且要求其具有安全、环保以及应对所钻冰层和所取冰心无污染等特性。针对目前在极地冰层钻进中已经使用过的钻井液类型与特点进行研究分析, 发现它们都存在各种安全、环保或其它技术问题, 不能完全满足南极科学钻探的要求。因此, 寻找一种新型安全、环保

收稿日期: 2013-03-05; 修回日期: 2013-05-07

基金项目: 本文受国家自然科学基金面上项目“极地钻探钻井液及其对环境的影响研究”(41276189)资助

作者简介: 韩俊杰(1989-), 男(汉族), 吉林桦甸人, 吉林大学硕士研究生, 地质工程专业, 吉林省长春市西民主大街6号, ahinrich@126.com。

的耐低温钻井液是开展极地冰层取心钻进最紧迫的任务之一^[3,4]。

1 极地冰层取心钻进的特点与钻井液的作用

1.1 南极科学钻探的地层特点与钻进方法

南极科学取心钻探的地层主要包括积雪层钻进、冰层钻进和冰下岩层钻进。南极积雪层厚度一般在100 m左右,密度 $<830 \text{ kg/m}^3$ 。由于积雪层的渗透性非常高,钻进难度不大,通常采用干钻取心,待钻孔钻达预定的深度后,下入套管进行隔离。冰是一种具有非线性的流变介质的特殊地层,在上覆岩层压力的作用下,将产生比较大的侧向压力,在这种侧向压力的作用下,当应力较小时也可使其产生屈服而蠕变,过大的变形将导致钻孔的缩径甚至塌孔。同时,随着钻孔深度的增加,冰层的温度逐渐上升,蠕变特性也越明显^[5]。在这种地层钻进时,国内外多采用孔底马达取心钻进的方法,使用特定密度的耐低温钻井液平衡冰层压力,维持孔壁的长期稳定。在南极冰层下,在水的长期作用下,不可避免地存在着风化破碎层,可能导致钻孔的漏失。在完整的岩层,其可钻性等级可达9~10级,可采用孔底马达孕镶金刚石取心钻进^[6]。

1.2 钻井液在极地冰层钻进中的主要作用

由于南极地表与所钻冰层的特点和所采用的钻进方法,为保证钻进工作的顺利进行,钻井液的主要作用是:

- (1) 保证获取具有高的完整性、代表性和纯洁性的冰心(或岩心);
- (2) 平稳冰层压力,保护孔壁稳定;
- (3) 清洗孔底,冷却钻头;
- (4) 悬浮和携带冰屑等^[7]。

2 极地冰层取心钻进对钻井液的要求

根据南极冰层取心钻进地层的特点及科学钻探的内容,用于冰层取心钻进钻井液应该满足以下要求:

(1) 为保证孔壁的稳定及获取高质量的冰心样品,所使用的钻井液应具有非水溶性;

(2) 南极冰层温度为 $-30 \sim -60 \text{ }^\circ\text{C}$,此时冰层的密度应在 $830 \sim 925 \text{ kg/m}^3$ 。同时由于冰层具有比较强的蠕变性,为维护钻孔的孔壁稳定,钻井液密度应该接近于所钻冰层的密度,且钻井液的密度可在一定范围内调整,既维护孔壁稳定,也不会影响钻具

的下放和钻进效率;

(3) 在 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时条件下,粘度应在 $10 \sim 15 \text{ mm}^2/\text{s}$,由于采用铠装电缆钻具,因此在保证携带冰屑的条件下,过大的粘度不利于钻具的提升和下放;

(4) 钻井液的凝固点应低于 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$;

(5) 钻井液对钻具和电缆组件无腐蚀性;

(6) 在储存、运输和使用过程中性质稳定,不易燃、易爆;

(7) 应对人体无毒副作用,并可生物降解,不污染环境;

(8) 钻井液来源广泛,价格低廉^[8]。

3 极地冰层取心钻进钻井液类型的理论分析

根据南极冰层取心钻进的特点,综合国内外在极地冰层取心钻进所使用的钻井液的经验,可供选择的物质主要有4大类型。

3.1 烃类的石油钻井液

在此类钻井液中,使用得最多的是添加有加重剂的航空煤油,并已应用于前苏联的东方站的冰层取心钻进。由于此类物质为非极性的烃类,分子间的作用力很小,决定了此类物质具有流动性好、密度比较小等特点。但仅靠其自身的密度不能完全满足钻井液对密度的要求,需要添加加重剂。目前所采用的加重剂毒性很大,或者由于蒙特利尔协议限制的环保内容停止使用。

3.2 氟代烃类钻井液

在氟代烃类中使用的有饱和和烃(包括氟醚)、非饱和和烃两大类。这种物质与非取代的烃类非常相似,不具有极性,完全不溶于水。由于氟代后所形成的物质的摩尔质量的增加,其密度通常比较大。但由于不能在分子中形成氢键,分子间的作用力比较小,决定了此类钻井液的粘度比较小,挥发性比较强,低分子量的物质还具有一定的毒性,需要与其它物质配合使用。

3.3 脂肪酸酯类钻井液

脂肪酸酯类具有不水溶性。低分子量的酯类通常用作食品香精,少量添加时对人体是无害的,但浓度过大时,对人体的危害性就比较大了。对于低分子量的酯类,特别是一元酸酯,由于在分子间形成的氢键的能力较差,使之具有比较大的挥发性与刺激性,对人体是非常有害的。如乙酸正丁酯已经在南极冰层取心钻进中使用过了,证明不能满足对人体无害及环境保护的要求。脂肪酸酯的密度与粘度主

要取决于酯的分子量大小与酯基数量的多少,随着分子量的增加,其粘度和密度增大,同时其挥发的能力也将逐渐下降。对于二元酸酯来说,由于在分子中羰基中 α 氢的增加,在分子间形成的氢键的能力增大,数量也增多,因此与相同分子量的一元酸酯相比,其粘度要高得多,但其密度相关并不是太大。可以通过复合的方法,将不同分子量的一元酸酯和二元酸酯配合在一起,满足极地冰层取心钻进对钻井液的粘度和密度的要求。

3.4 有机硅类钻井液

有机硅类最常见的是硅油,有机基团全部为甲基的称甲基硅油(或二甲基硅油),其化学结构式



为: $\text{H}_3\text{C}-\text{Si}-\text{O}[\text{Si}-\text{O}]_n-\text{Si}-\text{CH}_3$ 。



甲基硅油是一种无味、无色、无毒的可流动性透明液体,具有粘温系数小、耐高低温、闪点高、抗氧化、绝缘性好、表面张力小、挥发性小、比较高的表面活性、对金属及塑料橡胶等无腐蚀、化学稳定性好、润滑性能好等特点。此外,甲基硅油还具有生理惰性。溶解性方面,甲基硅油不溶于水、甲醇、乙醇等极性溶剂之中,可与苯、煤油或二甲醚互溶,稍溶于丙酮和丁醇。

在甲基硅油中,与硅原子相连甲基上的氢是 α 氢,可以与分子中的 $-\text{O}-$ 形成氢键而得到屏蔽,使分子内的氧不易与极性溶剂中的氢结合形成氢键,决定甲基硅油不能溶解与水等极性溶剂之中。二甲基硅油分子内氢键结构见图 1。同时,由于结构中的体积限制效应,决定了在分子之间也不可能形成氢键,使之具有比较低的粘度和密度。甲基硅油的粘度与密度主要取决于其聚合度的大小,只要调整好聚合度,就能满足极地地层取心钻进对钻井液的要求。

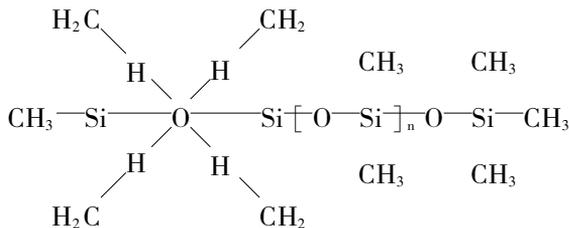


图 1 二甲基硅油分子内氢键形成结构示意图

4 钻井液基础介质的性能试验

在对可能用作极地冰层钻井液进行理论分析的

基础上,对所选定的 4 类 5 种基础物质的粘度与密度进行了不同温度条件下性能测试,以证实理论分析的可靠性,并从中发现其变化的机理,为最终选定钻井液类型奠定理论与试验基础。

4.1 钻井液基础介质的粘度测试

钻井液的粘度主要测试了钻井液的基本组分在不同的温度条件下粘度的变化规律,为钻井液的复配奠定理论上的基础。在试验中分别选取了某聚合度的二甲基硅油、某一元酸酯、某二元酸酯及复合酯,测试了各自在不同温度条件下的粘度的变化情况,分别见图 2、图 3。

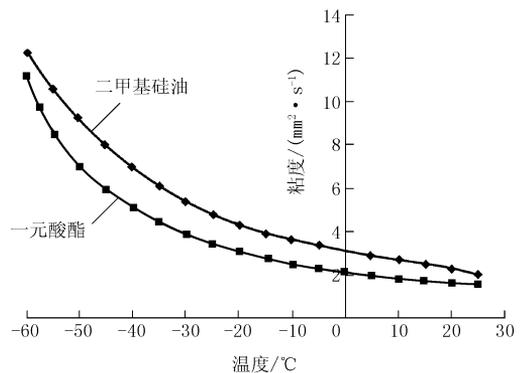


图 2 二甲基硅油和一元酸酯的粘度 - 温度曲线

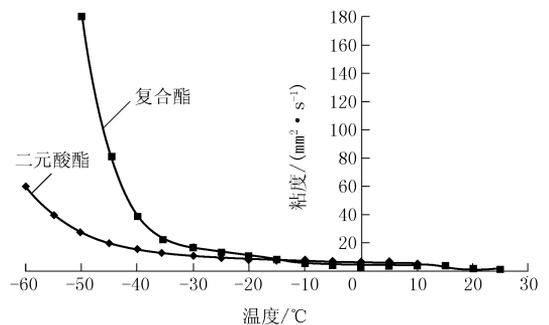


图 3 二元酸酯和复合酯的粘度 - 温度曲线

由图 2 可以看出,在某聚合度的二甲基硅油在在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 之前,其粘度变化呈直线关系。随着温度的降低,表现出粘度呈曲线变化,但其变化的幅度比较小,在 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,粘度也仅为 $12.3\text{ mm}^2/\text{s}$ 。这种变化说明,由于在二甲基硅油分子间没有形成氢键,仅存在着分子间力,粘度的增加主要是由于温度下降所引起的分子间距离的减少和柔顺性下降所致。

由图 2、图 3 可以看出,对于酯类物质,粘度的变化受分子量与分子间氢键影响,而且分子间氢键的影响要大于分子量。粘度的这种变化,主要是由于温度降低后,分子的热运动下降,分子在分子间力和分子间氢键的共同作用下,使分子间的距离减小。

温度的降低,也将使分子的柔顺性下降,刚性增强,导致粘度的增大。

4.2 钻井液基础介质的密度测试

对上述所选定的介质也进行了密度的测试,见图4。由图4可以看出,介质的密度大小主要取决于分子量和分子间作用力的大小,介质的密度随着温度的降低呈线性增大。这种变化主要是由于温度的降低所造成的体积收缩,使分子间的距离减小,使密度增大,与分子的结构形态没有关系。

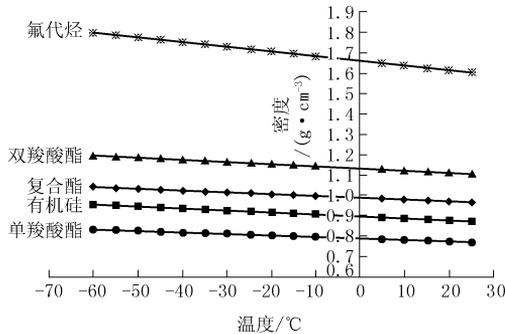


图4 多种介质的密度-温度曲线

5 结论

(1) 理论分析与试验证明,仅存在着分子间力,无分子间氢键形成的物质粘温系数小。如低分子量二甲基硅油与氟代烃类。

(2) 在脂肪酸酯类中,分子间氢键数量的增加时,介质的粘温系数增大,且氢键的影响要大于分子量的影响。二元酸酯的粘温系数大于一元酸酯。

(3) 介质密度随温度的降低呈线性增大。体积收缩所引起的密度增大与介质的分子结构形态无关。

参考文献:

- [1] 王士猛, 效存德, 谢爱红, 等. NEEM 计划 2537.36 m 透底深冰芯的钻取与成果概述[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 589-594.
- [2] 杨藏, 杨阳, 徐会文. 冻土区天然气水合物勘探低温钻井液理论与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(7): 29-31.
- [3] O. ALEMANY, H. MITYAR. Viscosity and Density of a Two-phase Drilling Fluid[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 141-146.
- [4] 秦大河, 任贾文. 南极冰川学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] P. G. Talalay. Subglacial Till and Bedrock Drilling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 142-166.
- [6] P. G. TALALAY, N. S. GUNDERSTRUP. Hydrostatic Pressure and Fluid Density Profile in Deep Ice Bore-holes[J]. National Institute of Polar Research. 2002, 56: 171-180.
- [7] P. G. TALALAY. Dimethyl Siloxane Oils as an Alternative Bore-hole Fluid, USA[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47(1): 82-88.
- [8] P. G. TALALAY, N. S. UNDERSTRUP. Hole Fluids for Deep Ice Core Drilling[J]. National Institute of Polar Research, 2002, 56: 148-170.

SYZX75 绳索取心液动锤钻深超过 4000 m

本刊讯 2013年5月28日,由中国地质科学院勘探技术研究所研制的SYZX75型绳索取心液动锤钻具在“中国岩金勘查第一深钻”施工中经受了4000m深度的考验,钻深达4006.17m,创国内外小口径绳索取心液动锤钻进最深纪录。

中国岩金勘查第一深钻ZK96-5钻孔位于山东省莱州市三山岛矿区,设计孔深4000m,终孔孔深4006.17m,终孔口径75mm。

莱州位于郯庐断裂以东的隆起区,是一个主要由前寒武纪基底岩石为主、中生代构造与岩浆强烈发育的内生热液金矿成矿集中区,裂隙发育明显,含有多个较长破碎带,岩石较坚硬,对深部钻进影响较大。在ZK96-5钻孔施工中,破碎地层岩心堵塞严重,极大影响钻进效率,特别是遇较厚的破

碎地层,每天钻进1~2个回次,进尺只有0.1~0.3m。针对这一难题,施工方选用勘探技术研究所研制的SYZX75型绳索取心液动锤,采用低泵压、小排量、低冲击功的工艺进行施工。经过约600m的连续钻进,回次进尺平均提高约30%~50%,在特别破碎地层回次进尺提高150%~220%,钻头寿命平均延长20m,效率提高60%,台月效率提高56%。

SYZX75型绳索取心液动锤在深孔中的成功应用,表明绳索取心液动锤在深孔硬、脆、碎地层中应用,具有提高回次进尺、增加钻头寿命、减少辅助工作时间等优势,再次证明了勘探技术研究所液动潜孔锤的研究与应用方面处于国际领先水平!