

东乘公麻冻土地层低温冲洗液研究与应用

丁付利¹, 段晓², 皮建伟²

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁, 810000;
2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安, 710000)

摘要:结合东乘公麻金矿区地层特性和高原冻土环境实际, 钻进过程中存在冻土地层融化、孔壁膨胀崩塌、钻孔越打越浅、岩心采取困难、钻孔冻结等技术难题。通过对钻探施工设备、施工工艺和施工管理进行研究和分析, 重点研究了低温冲洗液性能对钻进过程的影响。通过正交试验对冲洗液配方在-5℃条件下对比, 优选出抗低温、散热系数小、粘度适中、滤失量低的最佳配方, 有效解决了高原冻土地层钻进技术难题。在CZK031和CZK4821两个钻孔进行现场应用, 冲洗液对孔壁保护较好, 未发生孔壁坍塌掉块和孔内冻结事故, 取得了较好的施工效果。低温冲洗液配方的研究应用, 对其他地区高原冻土地层施工具有参考意义。

关键词:冻土地层; 冲洗液; 低温; 工业盐; 钻进效率

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)01-0104-06

Research and application of low-temperature drilling fluid for permafrost strata in the Dongchenggongma area

DING Fuli¹, DUAN Xiao², PI Jianwei²

(1. Xining Natural Resources Integrated Survey Center, Party of China Geological Survey,
Xining Qinghai 810000, China;

2. Xi'an Mineral Resources and Geological Survey Center, Party of China Geological Survey,
Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: Drilling problems, such as melting permafrost strata, expansion and collapse of hole walls, less drilling depth, core taking difficulty, borehole freezing, are encountered in the process of drilling due to the characteristics of strata and the fact of the plateau permafrost environment of Dongchenggongma. Drilling equipment, drilling technology and drilling management was investigated with the focus on the effect of low-temperature drilling fluid properties on drilling process. Orthogonal experiment was conducted to compare the formulation of flushing fluid at -5℃ to select the optimum formulation with low temperature resistance, small heat dissipation coefficient, proper viscosity and low filtration loss, and it effectively solved the drilling problem in plateau permafrost strata. Field use in two boreholes of CZK031 and CZK4821 showed the hole wall was well protected by the drilling fluid, and no collapse and freezing accidents occurred, achieving good drilling effect. The research and application of low-temperature drilling fluid formulation can provide reference for drilling in plateau permafrost strata in other areas.

Key words: permafrost strata; drilling fluid; low temperature; industrial salt; drilling efficiency

1 矿区概况

东乘公麻金矿区位于青海省甘德县西北部, 与

甘德县城直距约 50 km, 隶属于青海省果洛藏族自治州甘德县柯曲镇管辖。地处青藏高原东南部, 阿

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-06-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.01.014

基金项目: 中央财政项目“青海省都兰—同德—甘德地区金及多金属资源调查评价”(编号: 1212011220665)

第一作者: 丁付利, 男, 汉族, 1985年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 长期从事钻探施工技术研究与管理工作, 陕西省西安市长安区凤栖西路7号(710000), 378266878@qq.com。

引用格式: 丁付利, 段晓, 皮建伟. 东乘公麻冻土地层低温冲洗液研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 104-109.

DING Fuli, DUAN Xiao, PI Jianwei. Research and application of low-temperature drilling fluid for permafrost strata in the Dongchenggongma area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 104-109.

尼玛卿山的南侧,海拔高度为4500~5100 m,相对高差400~600 m。这里具高原冰蚀地形地貌特点,属中深切割高山区,区内冻土发育较好,覆盖深度在2~20 m之间,碎石流广布。该区气候属高原大陆性气候,一年无四季之分,只有寒暖之别,具高寒湿润的特点,年平均气温为-2~4℃,年降水量500~600 mm。每年的5—8月为暖季,气候温和湿润,经常有雨雪冰雹天气;9月至次年4月为寒季,天气情况恶劣,天寒地冻,常有大雪封山的情况发生,野外施工困难。

2 冻土地层的钻进特点及困难

2.1 冻土地层的钻进特点

冻土地层的钻进主要是指在冻结岩层或冻土地层中的钻进。冻结岩层是由多种矿物颗粒、未冻结的水、冰块以及充满水蒸气的空气等在长期的低温和压力条件下形成的多成分岩系^[1]。钻进时,由于外部温度和压力条件发生变化,进而引起永冻层自身物理性质发生本质变化,对地层原有平衡造成破坏^[2]。

钻进时,冲洗液沿钻柱向下流动和返回孔中时,孔段内部不同孔深温度变化,冲洗液与地层不断进行的热交换,造成冲洗液温度发生变化。井内温度的变化主要因素有:

- (1)钻柱内冲洗液灌入时的初始温度。
- (2)井眼周围孔壁岩石的温度。
- (3)钻头在孔底破碎岩石过程中产生的热量。
- (4)冲洗液的性能特征和数量。
- (5)冲洗液循环时间。
- (6)其他影响因素^[3]。

冻土层的钻进过程是一个非绝热的过程,并且冻土地层又是多孔介质体,冲洗液和冻土层地层会发生传热和传质作用,主要表现为冲洗液向孔壁地层渗透使冻土层受热发生分解作用,渗透和分解的耦合作用造成孔壁围岩孔隙水压力增加,有效应力失衡,从而使孔壁发生力学失稳^[4]。要在冻土地层钻进时保证安全、持续的钻进作业环境并保证钻井质量,必须对井内温度变化和孔壁压力平衡进行严格的控制,从而保持孔壁的稳定和钻孔施工安全。

冻土地层钻进中使用的冲洗液体系与常用的冲洗液不尽相同,冲洗液的性能除具备良好的冷却钻头作用、悬浮排出岩屑、清洁孔底、稳定孔壁的能力

外^[5],还要在冻土层钻孔中满足高压、低温下具有良好的流变性能^[6]。

根据室内的试验研究和现场实践来看,认为高压在一般情况下对水基冲洗液的性能并没有显著的影响,因此本文对冻土层冲洗液的研究,需要解决的核心问题是低温下冲洗液仍然具有良好的流变特性。

2.2 冻土地层钻进存在的主要困难

(1)在冻土地层孔段施工时,由于冲洗液在进口时与钻孔中温度不同,产生钻孔上下温度不均匀和对冻土层的浸泡;同时钻杆回转摩擦时产生的热量,造成钻孔孔壁局部溶蚀,致使冻土地层膨胀并不断融化崩塌,开孔难度增大并引发各种次生钻井事故^[7]。

(2)在冲洗液配制过程中,受矿区昼夜温差大、温度变化较快的影响,冲洗液配制困难^[8]。冲洗液在低温环境下发生冻结,流变性变差,影响钻进的正常使用。在遇到停电、机械故障等问题时,钻杆未能及时提出,容易造成整个钻孔冻结,极易引发钻孔冻结事故^[9]。

(3)在钻进永冻层及局部蚀变严重的孔段,岩心易水化产生膨胀,使用的冲洗液对孔壁的护壁效果不佳。不但对采取岩心造成困难,而且容易引起孔壁坍塌、憋泵、钻孔越打越浅等问题,无法保证正常钻进,给施工整体进度造成较大影响。

3 冻土地层问题的解决及冲洗液配方的优选

3.1 解决问题的研究方向

针对存在的诸多问题,结合现场实践,从以下几个方面对解决问题的方向进行简单分析。

(1)施工工艺方面:目前我们采用的施工工艺为地质岩心钻探的绳索取心工艺,工艺流程相对成熟,应用也较为广泛。

(2)钻进设备方面:施工设备主要为体型轻、分体式、运输要求低的CSD500C型全液压钻机和XY-44A型立轴式钻机,两种钻机在以往的钻探生产应用中表现稳定,能够满足各类地层钻进要求。

(3)施工管理方面:施工技术人员和操作人员都有比较丰富的钻探施工经验,在施工的机械操作、流程管理上严格按照规范施工,没有产生因为施工管理不当而引起的施工问题。

综合上述分析来看,在冻土区钻探施工遇到的

问题并不是由设备和人员造成的。因此,在查阅了大量文献之后,排除施工工艺、施工设备和施工管理等方面原因,解决上述问题的方向重点在冲洗液,从冲洗液的低温性能研究方面入手,根据矿区前期的施工实践,因地制宜,节约成本,通过在冲洗液中添加工业盐来降低冲洗液凝固点^[10-11],从而防止冻结事故的发生。

3.2 NaCl溶液及低温性能

通过在现有冲洗液配方中添加NaCl得到盐水冲洗液,可以有效降低冲洗液的冰点。对NaCl溶液进行冰点试验,得到NaCl溶液的冰点数据如表1所示。

表1 NaCl溶液冰点测试结果

Table 1 Test freezing temperature of NaCl solution

质量分数/%	凝固点/°C
5	-4
10	-7.5
15	-12
20	-17
25	-21
30	-24

3.3 冲洗液配方优选

3.3.1 冻土层冲洗液的技术指标

根据俄罗斯冻结岩层钻进经验,抗低温、散热系数小、粘度适中、滤失量低的冲洗液在冻土层钻进中是最有效的^[12-13]。在冻土层钻进中除了考虑冲洗液的抗低温性能和适合的密度外,冲洗液对井壁稳定和井内安全控制的作用也是冲洗液体系设计必须考虑的重点^[14-15]。在冻土地层冲洗液体系设计时,塑性粘度、表观粘度、动切力和滤失量4项指标是影响冲洗液性能的主要因素。

3.3.2 冲洗液配方的试验室优选

在取得NaCl溶液的凝固点数据之后,为了确定各个组分较好的加量结果,委托北京探矿工程研究所对配方进行优选试验,采用四因素三水平正交试验设计,在“正交表”指导下安排试验^[16]。在正交试验中,选择NaCl作为抗冻剂,钠膨润土作为造浆材料,多功能剂MBM作为增粘剂和降滤失剂,聚丙烯Na-HPAN作为降滤失剂,设计NaCl的加量分别为10%、15%、20%,Na膨润土的加量为2%、

3%、4%,Na-HPAN的加量为0.3%、0.6%、0.9%,MBM的加量为3%、4%、5%,通过塑性粘度、表观粘度、动切力和滤失量指标比对,选择出冻土层低温冲洗液体系的最佳配方。正交试验设计的因素与水平见表2。

表2 低温冲洗液体系因素与水平

Table 2 Low temperature drilling fluid factor and level

水平/因素	NaCl/ %	Na膨润土/ %	Na-HPAN/ %	MBM/ %
1	10	2	0.3	3
2	15	3	0.6	4
3	20	4	0.9	5

按照四因素三水平正交试验的规则,冲洗液组成配方及正交规则见表3。分别按照配方设计的处理剂含量配制冲洗液,以备测试。

表3 冲洗液配方设计

Table 3 Formulation design of drilling fluid

配方	A	B	C	D	NaCl/ %	Na膨润 土/%	Na-HPAN/ %	MBM /%
1	1	1	1	1	10	2	0.3	3
2	1	2	2	2	10	3	0.6	4
3	1	3	3	3	10	4	0.9	5
4	2	1	2	3	15	2	0.6	5
5	2	2	3	1	15	3	0.9	3
6	2	3	1	2	15	4	0.3	4
7	3	1	3	2	20	2	0.9	4
8	3	2	1	3	20	3	0.3	5
9	3	3	2	1	20	4	0.6	3

测试了低温冲洗液配方在常温下的性能之后,为了考察其抗冻性能是否满足要求,需要在低温条件下对其性能进行测试。在-5℃条件下,老化24h后,所有配方均没有冻结,流动性良好,在低温时测试各个配方的性能。测试结果如表4所示。

按照正交试验数据处理规则,分别对-5℃条件下表观粘度、塑性粘度、动切力和滤失量的试验数据进行计算处理,根据极差值大小确定该因素对冲洗液性能影响严重程度。极差越大,因素对冲洗液性能的影响越大。计算结果见表5。

根据数据处理结果,在-5℃条件下,处理剂对表观粘度的影响程度顺序依次是:MBM>Na-

表 4 冲洗液性能测定结果(-5℃)

Table 4 Test results of drilling fluid performance(-5℃)

配方	旋转粘度计读值						表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	API滤失量/ mL	泥饼厚/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)
	R600	R300	R200	R100	R6	R3						
1	39	24	18	12	3	2	19.5	15	4.6	10	1	1.11
2	28	17	13	8	2	1.5	14	11	3.1	14	2	1.11
3	75	50	40	27	6	4.5	37.5	25	12.8	1.2	4	1.12
4	44	37	21	13	3	2	22	7	15.3	9	3	1.13
5	28	17	12	8	2	1.5	14	11	3.1	12	4	1.13
6	25	16	11	7	2	1.5	12.5	9	3.6	13	5	1.14
7	42	27	21	14	4	3	21	15	6.1	9	3	1.15
8	29	18	14	9	3	2	14.5	11	3.6	12	4	1.16
9	28	16	12	7	2	1.5	14	12	2.0	11	4	1.15

表 5 冲洗液体系流变性及滤失量处理结果

Table 5 Data processing results of rheology and fluid loss of the drilling fluid system

因素	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	滤失量/ mL
NaCl	7.5	8.0	3.4	2.9
Na膨润土	7.2	4.3	5.5	4.3
Na-HPAN	8.7	7.0	3.4	4.3
MBM	8.8	2.7	7.3	4.6

HPAN>NaCl>Na膨润土;对塑性粘度的影响程度顺序依次是:NaCl>Na-HPAN>Na膨润土>MBM;对动切力的影响程度顺序依次是:MBM>Na膨润土>NaCl>Na-HPAN;对滤失量的影响程度顺序依次是:MBM>Na膨润土>Na-HPAN>NaCl。

在-5℃低温条件下,根据表观粘度、塑性粘度和滤失量较小,动切力较大的原则,结合极差值的大小,得到了最佳因素条件的选择结果。在-5℃低温时冲洗液体系可选择配方为:A₂B₃C₂D₁和A₂B₁C₃D₃两组配方,综合考虑低温和加量的关系,确定配方为A₂B₃C₂D₁,即选择的配方组成为:15%NaCl+4%Na膨润土+0.6%Na-HPAN+3.0%MBM。

继续调节冰箱温度至-12℃,观察9组配方的冲洗液的流动性,老化24h后,9组冲洗液中的1、2、3号配方有局部冻结,如图1所示,图片为3号配方在-12℃时的性状,4~9号配方流动性较好。

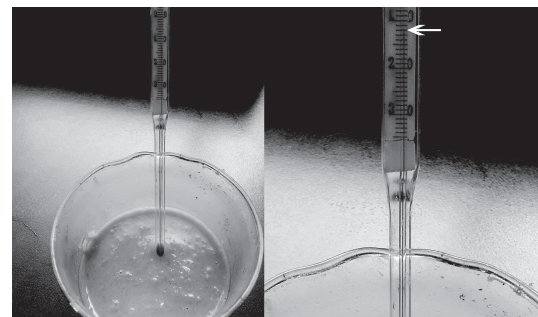


图 1 3号配方在-12℃条件下的性状

Fig.1 Properties of the NO.3 formula at -12℃

3.3.3 冲洗液试验室配方的改进与性能

根据试验室取得的试验数据,结合矿区实际情况,在现有冲洗液的基础上加入工业盐,从而解决冻土地层钻进和防止孔内冲洗液冻结等问题。为了避免重新购置冲洗材料造成浪费,采用同类型冲洗材料替换的原则进行矿区冲洗液的配制,利用工业盐代替食盐作为抗冻剂,利用聚丙烯酰胺钾盐代替聚丙烯腈Na-HPAN作为降滤失剂,利用羧甲基纤维素钠代替MBM作为增粘剂,按照15%工业盐+4%Na膨润土+0.1%聚丙烯酰胺钾盐+0.3%羧甲基纤维素钠+0.2%碳酸钠的配方配制冲洗液。

对冲洗液的性能进行测定,配方的凝固点为-12.5℃,冲洗液的其他性能如表6所示。

4 冲洗液配方的现场应用

在CZK031孔孔内冻结处理完毕之后,立即对冲洗液进行更换,按照新配方进行配制,选择在0~10m永冻层和63.66~70.03m破碎蚀变带进行重点

表6 配方在不同温度条件下的性能

Table 6 Formulation performance at different temperature

配方	温度/ °C	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	API滤失量/ mL	泥饼厚/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)
	20	7.5	6.5	1.0	15.5	0.2	
15% NaCl+4% Na膨润土+0.1% 聚丙烯酰胺钾盐+0.3% 羧甲基纤 维素钠+0.2% 碳酸钠	10	11	7.5	3.6	10.5	0.2	1.12
	0	14.5	11	3.6	8	0.2	
	-5	18.5	13	5.6	6.8	0.1	
	-12	62	49	13.3	5	0.1	

观察,平均回次进尺在1.12 m以上,冲洗液对孔壁保护较好,未发生孔壁坍塌和掉块事故,岩心采取率在90%以上。

在总结应用的基础上,继续在CZK4821钻孔应用新配方进行钻进,全孔施工进度顺利,未发生孔内冻结等事故,单孔台月效率达到972.88 m,取得了较好的施工效果。

5 结论

(1)通过对冻土层钻进的持续施工,研究了冻土地层钻进的特点,对容易发生的钻进事故进行了总结,为开展试验研究指明了方向。

(2)通过大量室内试验,优选出性能较好的冲洗液配方:15%NaCl+4% Na膨润土+0.6% Na-HPAN+3.0% MBM。为配方的现场应用提供了借鉴。

(3)结合矿区实际,对试验配方进行改进,得到配方:15% NaCl+4% Na膨润土+0.1% 聚丙烯酰胺钾盐+0.3% 羧甲基纤维素钠+0.2% 碳酸钠,并测定配方的不同温度条件下的性能,在现场进行了较好的应用。

(4)通过新配方的应用,证明工业盐加入冲洗液能够防止孔内冻结事故,对冲洗液的其它性能没有太大影响,有效提高了钻进效率,为下一步在高原冻土地层施工提供了技术保障。

参考文献(References):

- [1] 张祖培,殷琨,蒋荣庆,等.岩土钻掘工程新技术[M].北京:地质出版社,2003:6.
ZHANG Zupei, YIN Kun, JIANG Rongqing, et al. New Technology of Drilling & Tunneling Engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:6.
- [2] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,

2001:3,34.

XU Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen Soil Physics[M]. Beijing: Science Press, 2001:3,34.

- [3] 蒋国盛,周刚,汤凤林.冻土钻孔内的温度分布——冻土钻探专题之一[J].探矿工程,2002(1):41-43.
JIANG Guosheng, ZHOU Gang, TANG Fenglin. Temperature distribution in the borehole drilled in frozen formation—Part I of the subject on drilling in frozen formation[J]. Exploration Engineering, 2002(1):41-43.
- [4] 张永勤,孙建华,赵海涛,等.高原冻土水合物钻探冲洗液的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):16-19.
ZHANG Yongqin, SUN Jianhua, ZHAO Haitao, et al. Study on drilling fluid for hydrate in plateau permafrost[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(9):16-19.
- [5] 张凌,蒋国盛,蔡记华,等.低温地层钻进特点及其钻井液技术现状综述[J].钻井液与完井液,2006,23(4):69-72.
ZHANG Ling, JIANG Guosheng, CAI Jihua, et al. Overview of low temperature formation characteristics while drilling and available drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(4):69-72.
- [6] 孙涛,陈礼仪,朱宗培.天然气水合物钻探钻井液低温特性的研究[J].探矿工程,2003(3):35-37.
SUN Tao, CHEN Liyi, ZHU Zongpei. Research on the properties of drilling fluids at low temperatures used in the gas hydrate exploration[J]. Exploration Engineering, 2003(3):35-37.
- [7] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000:47.
ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000:47.
- [8] 李振学,张延同.青海省祁连县红川矿区钻探施工初探[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):13-16.
LI Zhenxue, ZHANG Yantong. Discussion of drilling construction in Hongchuan mining area of Qinghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(5):13-16.
- [9] 刘海波.祁连山区永冻地层钻探工程施工方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(12):12-14.

- LIU Haibo. Construction technology of drilling engineering in permanent frozen soil of Qilian Mountains[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(12): 12-14.
- [10] 王松,曾科,袁建强,等.抗盐抗高温水基钻井液体系研究与应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006(3): 105-108.
- WANG Song, ZENG Ke, YUAN Jianqiang, et al. Research and application of salt-resisting and high temperature resisting and water base drilling fluid system[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006(3):105-108.
- [11] 陈礼仪,王胜,张永勤,等.高原冻土天然气水合物钻探低温泥浆基础液研究[J].地球科学进展,2008(5):469-473.
- CHEN Liyi, WANG Sheng, ZHANG Yongqin, et al. Low temperature mud basis liquid of gas hydrate drilling in plateau permafrost[J]. Advances in Earth Science, 2008(5):469-473.
- [12] 汤凤林,Б.Б.库德里亚绍夫.俄罗斯南极冰上钻探技术[J].地质科技情报,1999(18):3-6.
- TANG Fenglin, B. B. Kudriashov. Russian drilling technology in antarctica[J]. Geological Science and Technology Information, 1999(18):3-6.
- [13] 鄢捷年,黄林基.钻井液优化设计与实用技术[M].东营:石油大学出版社,1993:75.
- YAN Jienian, HUANG Linji. Optimal Design and Practical Technology of Drilling Fluid[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1993:75.
- [14] 王胜.天然气水合物勘探用盐基低温无固相钻井液研究[J].地球,2013(4):120,122.
- WANG Sheng. Study on salt base low-temperature and non-solid drilling fluid used in the nature gas hydrate exploration [J]. The Earth, 2013(4):120,122.
- [15] 袁进科,陈礼仪,王军伟,等.青藏高原复杂地层地质钻探低固相冲洗液试验研究[J].钻探工程,2021,48(4):79-84.
- YUAN Jinke, CHEN Liyi, WANG Junwei, et al. Experimental study on low solid flushing fluid for geological drilling in complex metamorphic of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):79-84.
- [16] 冯哲.抗低温钻井液性能的试验研究[D].长春:吉林大学,2008.
- FENG Zhe. Experimental study on drilling fluids for low temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2008.

(编辑 荐华)