

# 耐高温环保型冲洗液体系在西藏甲玛3000 m 科学深钻中的应用研究

田志超<sup>1,2</sup>, 翟育峰<sup>\*1,2</sup>, 林彬<sup>3</sup>, 刘振新<sup>1,2</sup>, 马云超<sup>2</sup>, 付帆<sup>4</sup>

(1. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台264004; 2. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台264004;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京100037;

4. 北京探矿工程研究所, 北京100083)

**摘要:** 西藏甲玛铜多金属矿床3000 m科学深钻是青藏高原固体矿产调查领域首个3000 m深钻, 终孔孔深3003.33 m, 终孔孔径98 mm, 创造了青藏高原小口径固体矿产勘查领域最新的孔深纪录。项目位于西藏甲玛海拔5200 m高山深切割区, 自然气候恶劣, 项目施工环保要求严格, 深部地层温度高, 地层复杂, 主要表现在水敏性强、破碎严重和地应力高, 施工难度极大。针对环保及地层问题, 通过对粘土、环保降滤失剂、环保增粘剂、环保抑制剂等处理剂进行实验对比, 采用正交实验的极差分析法得到了各项指标所对应的水平的影响大小和优化水平取值, 确定了冲洗液的优化配方范围, 成功研发了一套耐高温环保型冲洗液体系。现场应用取得了良好的效果。

**关键词:** 西藏甲玛; 科学深钻; 复杂地层; 耐高温环保型冲洗液体系

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)11-0015-07

## Application research of high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system in 3000m scientific deep drilling in Jiama, Tibet

TIAN Zhichao<sup>1,2</sup>, ZHAI Yufeng<sup>\*1,2</sup>, LIN Bin<sup>3</sup>, LIU Zhenxin<sup>1,2</sup>, MA Yunchao<sup>2</sup>, FU Fan<sup>4</sup>

(1. *Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;*

2. *No.3 Exploring Institute of Geo-mineral Resources, Shandong Province, Yantai Shandong 264004, China;*

3. *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;*

4. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** The 3000m deep scientific borehole for the Tibet polymetallic deposit is the first 3000m deep scientific borehole in the field of the investigation of solid mineral resources in the Qinghai-Tibet Plateau, and it has created the latest hole depth record in the field of small-diameter solid mineral exploration in the Qinghai-Tibet Plateau. The project is located in the high mountain and deep cut area at 5200m above the sea level in Jiama, Tibet, with harsh natural climate, strict environmental protection requirements for the drilling project, high temperature in the deep strata, and complicated strata characterized mainly by strong water sensitivity, serious breakage and high in-situ stress

收稿日期: 2021-02-23; 修回日期: 2021-05-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.11.003

基金项目: 国家重点研发计划——深地勘查开采专项“青藏高原重要矿产资源基地成矿系统深部探测技术与勘查增储示范”的课题“甲玛—驱龙铜多金属资源基地深部勘查与增储示范”(编号: 2018YFC0604101)

作者简介: 田志超, 男, 汉族, 1990年生, 勘查技术与工程专业, 山东省地矿局深部钻探工程技术创新团队成员、技术骨干, 工程师, 从事岩心钻探技术与生产管理工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, sdsdtzc@163.com。

通信作者: 翟育峰, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 硕士, 从事钻探技术研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, 282163880@qq.com。

引用格式: 田志超, 翟育峰, 林彬, 等. 耐高温环保型冲洗液体系在西藏甲玛3000 m科学深钻中的应用研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 15-21.  
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Application research of high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system in 3000m scientific deep drilling in Jiama, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 15-21.

which leads to extremely drilling difficulty. In view of the environmental protection and the stratum problem, through the experimental comparison of clay, the environmental protection fluid loss reducer, the environmental protection tackifier, the environmental protection inhibitor and so on, the treatment agents with the best performance were optimized; by using the method of range analysis of orthogonal experiment, the influence of each index corresponding to the level and the value of the optimum level were obtained, the range of the optimum formula of drilling fluid was determined; and a high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system has been successfully developed with good field application effects.

**Key words:** Jiama, Tibet; scientific deep drilling; complicated formation; high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system

## 1 概况

西藏甲玛铜多金属矿床 3000 m 科学深钻是青藏高原固体矿产调查领域首个 3000 m 深钻,是科技部国家重点研发计划项目——深地勘查开采专项“青藏高原重要矿产资源基地成矿系统深部探测技术与勘查增储示范”的课题“甲玛-驱龙铜多金属资源基地深部勘查与增储示范”的重点工作内容<sup>[1-2]</sup>。

钻孔位于西藏自治区墨竹工卡县甲玛乡辖区,地处冈底斯山脉东段郭喀拉日居山主峰果沙如则东北部高山深切割区海拔 5150 m 位置<sup>[3-6]</sup>。设计孔深 3000 m,设计顶角 3°,终孔孔深 3003.33 m,终孔孔径 98 mm<sup>[7]</sup>,创造了青藏高原小口径固矿勘查领域最新的孔深纪录,为国家深部资源勘查开采与技术装备研发提供了支撑,实现了深部资源勘查增储示范效果,为完善陆陆碰撞造山背景下斑岩铜矿勘查模型及成矿理论创新奠定了坚实基础。图 1 为钻探现场全景。



图 1 钻探现场全景

Fig.1 Panoramic view of the drilling site

由于钻孔位置属于青藏高原高寒植被分布区域,环保要求十分严格,要求采用对环境无害的环保冲洗液材料<sup>[8]</sup>,同时钻孔孔深 3000 m,根据以往经验,预计深部地层温度较高<sup>[9-10]</sup>,但目前常用的环保

冲洗液体系抗温能力一般不超过 130 °C,不能满足目前钻探需求。因此,针对西藏甲玛 3000 m 科学深钻需求,研发一套耐温 150 °C 环保冲洗液体系,不仅可以解决现有环保体系耐温性差的问题,还可以解决复杂地层护壁难题<sup>[11-12]</sup>。

## 2 西藏甲玛 3000 m 科学深钻地层特点

西藏甲玛 3000 m 科学深钻施工区域地层主要为被动陆缘火山沉积岩系,包括上三叠统麦隆岗组,中一下侏罗统叶巴组,上侏罗统却桑温泉组和多底沟组,下白垩统组林布宗组、楚木龙组、塔龙拉组,并以侏罗系、白垩系为主<sup>[4]</sup>。

在钻孔施工中存在的主要问题如下:

(1)上部第四系地层较松软,存在孔壁坍塌的风险;砂卡岩和花岗岩交界部位,地层较破碎<sup>[5]</sup>,存在坍塌掉块问题(参见图 2);部分地层存在水敏性蚀变地层,浸泡后易吸水分散,导致孔壁坍塌<sup>[6]</sup>(参见图 3)。



图 2 破碎地层岩心

Fig.2 Cores from the broken formation

(2)砂卡岩地层存在较多孔隙和裂缝,渗透性强,易发生漏失<sup>[7]</sup>(参见图 4)。

(3)深部花岗岩地层存在高地应力,冲洗液密度过大会导致粘卡、渗漏、流变性变差等不利影响(参见图 5)。



图 3 水敏性蚀变地层岩心

Fig.3 Cores from the water-sensitive altered formation



图 5 高地应力地层岩心

Fig.5 Cores from the high in-situ stress formation



图 4 易漏失地层岩心

Fig.4 Cores from the leaky formation

(4)矿区周边为牧区,对于环保要求较高,冲洗液不可以随意排放。

### 3 耐温 150 °C 环保冲洗液体系设计

耐温 150 °C 环保冲洗液体系组分及作用详见表 1。

#### 3.1 耐温 150 °C 环保冲洗液用处理剂优选评价

##### 3.1.1 粘土优选

表 1 耐温 150 °C 环保冲洗液体系组分及作用

Table 1 Composition and function of the environment-friendly drilling fluid system with temperature resistance of 150°C

试验采用的处理剂名称	处理剂类型	作用
钠膨润土	粘土	造浆材料,提高冲洗液粘度以及降低冲洗液滤失量 <sup>[13]</sup>
GLMC、GLAC、GSTP、GHMS	环保降滤失剂	降低冲洗液滤失量,提高孔壁稳定性
GZDJ、GHMC、GHAC、ZWXC	环保增粘剂	提高冲洗液粘度,保证冲洗液携带岩粉能力
CMBJ、GPNH、GBLQ、GBBJ	环保抑制剂	提高冲洗液抑制性能,保证冲洗液护壁能力
HGPC、HGFD、HGHB	环保封堵剂	封堵、填充破碎地层或裂隙,提高孔壁稳定性
GHTS、CGSJ、GMSJ	环保高温保护剂	提高冲洗液中聚合物处理剂的高温稳定性

本体系共收集 3 种市售膨润土样品,分别为山东钠膨润土、内蒙古钠膨润土和新疆钠膨润土<sup>[14]</sup>。通过对不同温度老化 16 h 后 3 种膨润土基浆进行性能测试,探究温度对粘土基浆性能的影响。

从图 6~图 9 可看出:

(1)随着温度增加,3 种膨润土基浆的表观粘度均呈先增加后逐渐降低趋势,在 90 °C 时均达到粘度最高,随后开始下降。(2)在温度高于 90 °C 时,山东钠膨润土和内蒙古钠膨润土基浆的表观粘度与动塑比明显降低,滤失量变大,说明这 2 种钠膨润土抗温性差。(3)新疆钠膨润土基浆动切力保持良好,这说明新疆钠膨润土在 150 °C 时仍能保持其性能,可以满足高温冲洗液要求。因此,优选新疆钠膨润土作为冲洗液体系用的造浆材料。

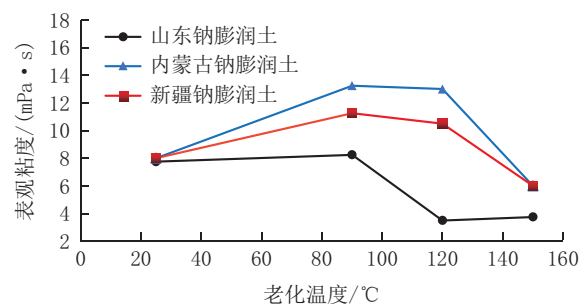


图 6 不同温度老化后粘土基浆表观粘度对比

Fig.6 Comparison of apparent viscosity of clay-based mud aging at different temperatures

##### 3.1.2 环保增粘剂优选

在 150 °C 条件下,对 GZDJ、GHMC、GHAC、ZWXC 等环保冲洗液增粘剂的增粘性能进行评价。采用 4% 新疆钠膨润土浆作为基浆,并在 25 °C 陈化

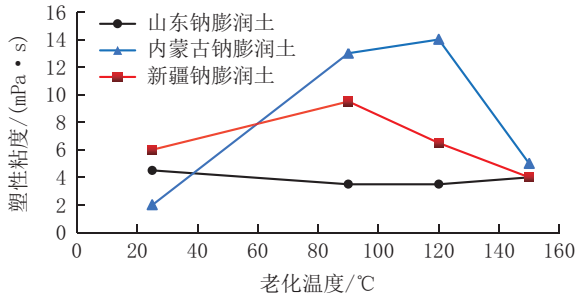


图7 不同温度老化后粘土基浆塑性粘度对比

Fig.7 Comparison of plastic viscosity of clay-based mud aging at different temperatures

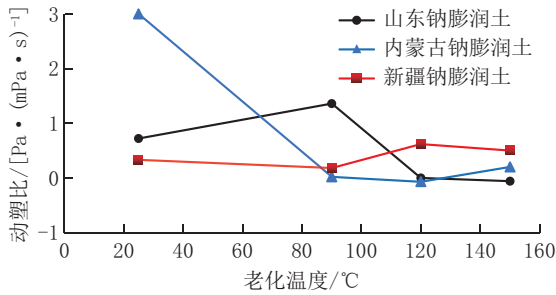


图8 不同温度老化后粘土基浆动塑比对比

Fig.8 Comparison of yield point and plastic viscosity ratio of clay-based mud aging at different temperatures

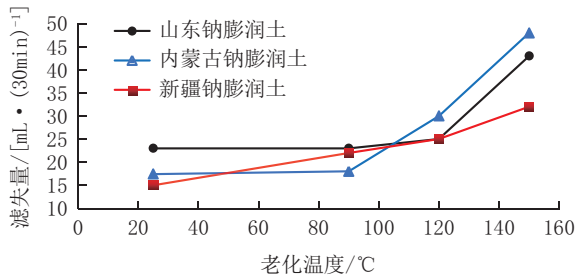


图9 不同温度老化后粘土基浆滤失量对比

Fig.9 Comparison of filtration loss of clay-based mud aging at different temperatures

16 h。陈化后的基浆中分别加入1%的增粘剂样品,测试加样后的基浆在不同温度老化16 h后的性能。

从图10~13可看出,虽然环保增粘剂GZDJ具有最优的抗高温增粘效果,但是基浆的动塑比明显增加,导致基浆的流动性很差,而且滤失量明显增大。对比另外3种环保增粘剂结果,可知GHMC具有最佳的增粘效果。因此,优选GHMC作为耐150℃环保水基冲洗液体系用环保增粘剂。

### 3.1.3 环保高温稳定剂优选

本体系收集了3种环保高温稳定剂样品,分别

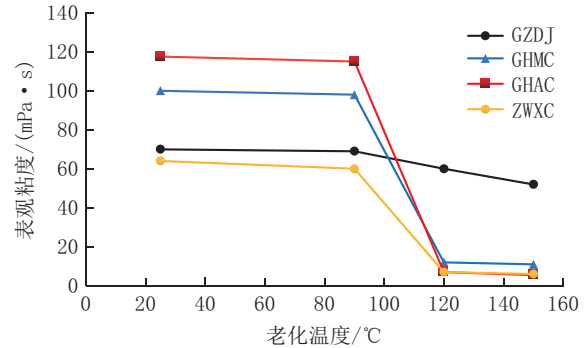


图10 不同温度老化后增粘剂表观粘度对比

Fig.10 Comparison of apparent viscosity of thickeners aging at different temperatures

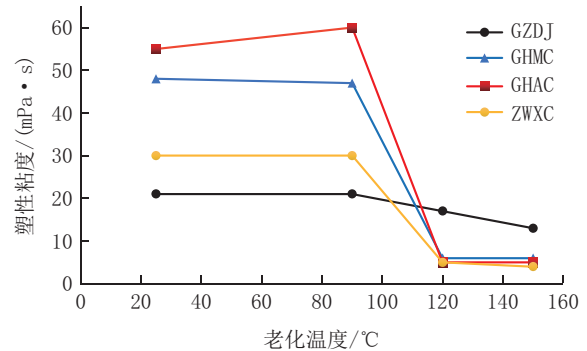


图11 不同温度老化后增粘剂塑性粘度对比

Fig.11 Comparison of plastic viscosity of thickeners aging at different temperatures

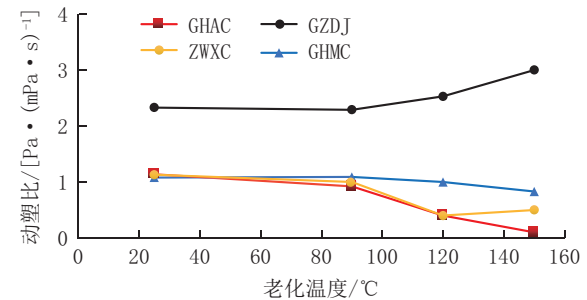


图12 不同温度老化后增粘剂动塑比对比

Fig.12 Comparison of yield point and plastic viscosity ratio of thickeners after aging at different temperatures

为GHTS、CGSJ和GMSJ。在配制好的基浆冲洗液(蒸馏水+4%钠膨润土+1%环保增粘剂GHMC)中分别加入1%样品,测试加样后的冲洗液在150℃高温老化16 h后的性能,试验结果见表2。

从表2可以看出,环保高温稳定剂GHTS在150℃环保下能很好地起到提高增粘剂和降失水剂的抗高温稳定性。因此,优选GHTS作为耐150℃

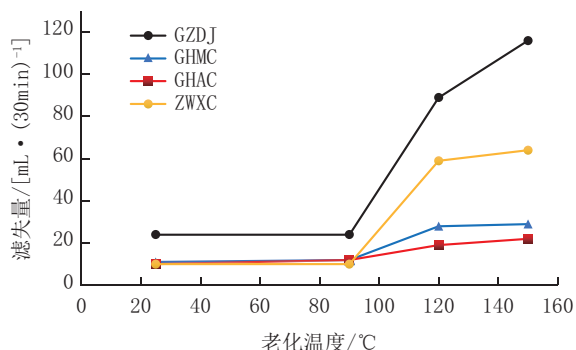


图 13 不同温度老化后增粘剂滤失量对比

Fig.13 Comparison of filtration loss of the thickeners after aging at different temperatures

表 2 环保高温稳定剂优选评价结果

Table 2 Optimal evaluation results of environment-friendly high temperature stabilizers

样品名称	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动塑比/ [Pa· (mPa·s) <sup>-1</sup> ]	HTHP 滤失量/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]
基浆	11	6	0.83	
环保稳定剂 GHTS	57	39	0.46	32
环保稳定剂 CGSJ	43	32	0.32	42
环保稳定剂 GMSJ	42	32	0.31	46

环保水基冲洗液体系用环保高温稳定剂。

### 3.1.4 环保降滤失剂优选

本体系收集了 4 种环保降滤失剂样品,分别为 GLMC、GLAC、GSTP、GHMS。在 150 °C 条件下评价了样品的降滤失性能。配制好的基浆冲洗液(蒸馏水 400 mL、钠膨润土 16 g 和 1% 环保增粘剂 GHMC、1% 高温稳定剂 GHTS)在 25 °C 陈化 16 h。在陈化后的基浆中分别加入 2% 降滤失剂样品,测试加样后的基浆在不同温度下老化 16 h 后的性能。

从图 14、图 15 可看出,在 150 °C 条件下,GSTP 的降滤失效果最好,其次是 GLAC。因此,这里选用环保降滤失剂 GSTP 和环保降滤失剂 GLAC 作为耐 150 °C 环保水基冲洗液体系用降滤失剂。

### 3.1.5 环保抑制剂优选

本体系收集了 4 种环保抑制剂样品,分别为 CMBJ、GPNH、GBLQ 和 GBBJ。在 150 °C 条件下评价了样品的抑制性能。配制好的基浆冲洗液(蒸馏水 400 mL、钠膨润土 16 g 和 1% 环保增粘剂 GHMC、1% 高温稳定剂 GHTS)在 25 °C 陈化 16 h。

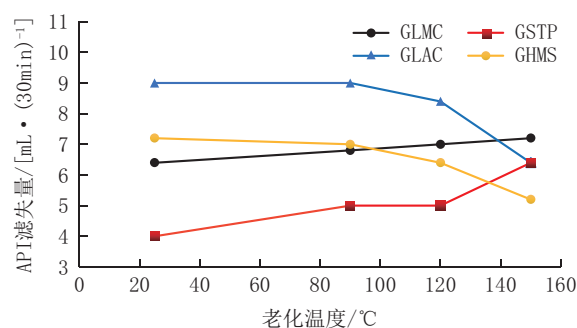


图 14 降滤失剂 API 滤失量对比

Fig.14 Comparison of API filtration loss of the filtration reducer

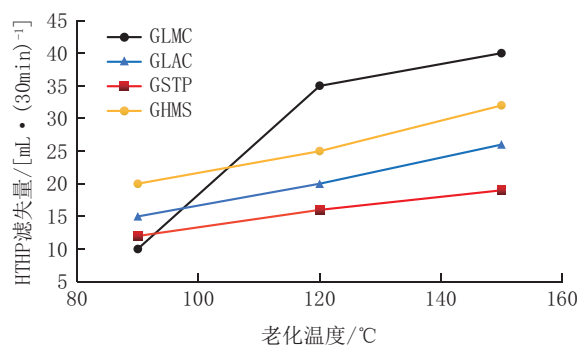


图 15 降滤失剂 HTHP 滤失量对比

Fig.15 Comparison of HTHP filtration loss of the filtration reducer

在陈化后的基浆中分别加入 0.5% 抑制剂样品,测试加样后的基浆在不同温度下老化 16 h 后的性能。

从图 16、图 17 可看出,在 150 °C 条件下,抑制剂 GBBJ 页岩膨胀降低率随着温度的增加而升高,可以达到 84.91%,HTHP 滤失量最低。因此,优选 GBBJ 作为耐 150 °C 环保水基冲洗液体系用抑制剂。

### 3.1.6 环保封堵剂优选

本体系收集了 3 种环保封堵剂样品,分别为

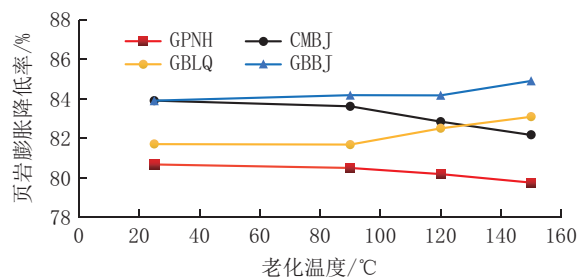


图 16 抑制剂页岩膨胀降低率对比

Fig.16 Comparison of shale expansion reduction rates of inhibitors

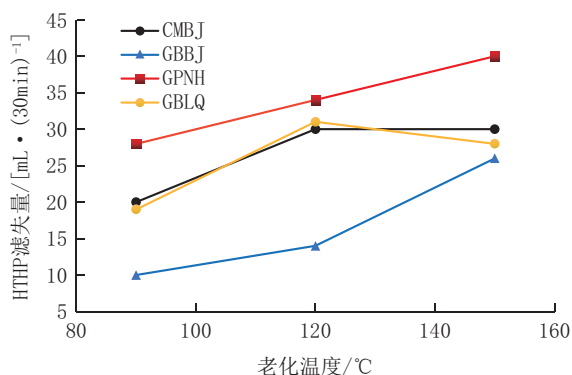


图17 抑制剂HTHP滤失量对比

Fig.17 Comparison of HTHP filtration loss of inhibitors

HGPC、HGFD、HGHB。它们的粒径大小不同,因此需要相互搭配使用。对它们搭配后在150℃条件下的冲洗液性能和抑制性能进行了评价,调配基浆(蒸馏水400 mL、钠膨润土16 g、1%环保增粘剂GHMC、1%高温稳定剂GHTS、0.5%抑制剂GBBJ和1%环保降滤失剂GSTP),在25℃陈化16 h。向陈化后的基浆中分别加入2%环保封堵剂样品,测试加样后的基浆在不同温度下老化16 h后的性能。

从图18、图19可看出,在150℃条件下,HGPC和HGFD的封堵效果最好。因此,优选封堵剂HG-PC和封堵剂HGFD作为耐150℃环保水基冲洗液体系用抑制剂。

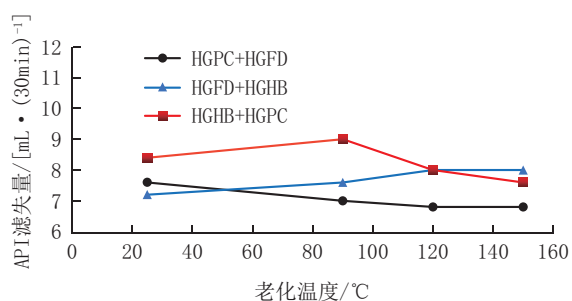


图18 封堵剂API滤失量对比

Fig.18 Comparison of API filtration loss of the plugging agent

### 3.2 耐温150℃环保冲洗液配方优化

经过优选试验,最终确定冲洗液体系中的泥浆材料为新疆钠膨润土、增粘剂GHCM、降滤失剂GLAC、降滤失剂GSTP、抑制剂GBBJ、封堵剂HG-PC、封堵剂HGFD和高温稳定剂GHTS。

采用正交试验法对配方进行优化研究,通过对每组正交试验结果中的主要因素,如HTHP滤失

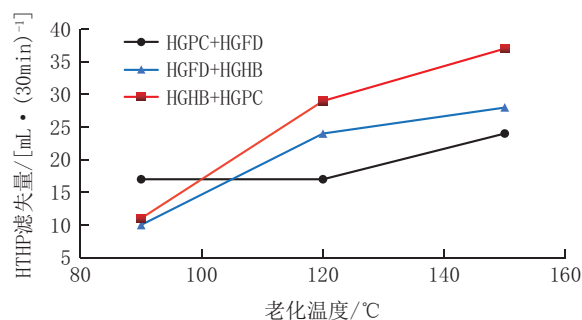


图19 封堵剂HTHP滤失量对比

Fig.19 Comparison of HTHP filtration loss of the plugging agent

量、表观粘度、塑性粘度及API滤失量进行极差分析,找出每个因素的最优水平组合。分析得到了各项指标所对应的水平的影响大小和优化水平取值,综合考虑各指标的影响因素的主次并结合体系目标性能确定冲洗液的优化配方范围为:水+4%~5%钠膨润土+0.5%~1%增粘剂GHCM+1%~2%降滤失剂GLAC+2%~3%降滤失剂GSTP+0.3%~0.5%抑制剂GBBJ+2%~3%封堵剂HGPC+2%~3%封堵剂HGFD+1%高温保护剂GHPS。

## 4 现场应用

西藏3000 m科学深钻现场采用的是环保冲洗液体系配方:水+3%~4%钠膨润土+0%~0.5%增粘剂GHCM+1%~2%降滤失剂GLAC+1%~2%降滤失剂GSTP+0.2%~0.3%抑制剂GBBJ+1%~2%封堵剂HGPC+1%~2%封堵剂HGFD。现场应用表明该冲洗液具有较强的抑制能力,起到了很好的护壁效果,顺利完成了在极易出现坍塌的第四系、破碎地层、水敏性蚀变地层钻探工作<sup>[15-16]</sup>,但钻孔深部温度较低,与设想有较大的差距,冲洗液体系的耐温性没有得到很好的应用验证。

## 5 结论

(1)通过对现有常用的环保处理剂进行性能优选评价,最终确定新疆钠膨润土、增粘剂GHCM、降滤失剂GLAC、降滤失剂GSTP、抑制剂GBBJ、封堵剂HGPC、封堵剂HGFD、高温保护剂GHPS作为该体系用处理剂。

(2)研究了1套耐150℃高温环保冲洗液体系配方:水+4%~5%钠膨润土+0.5%~1%增粘剂GHCM+1%~2%降滤失剂GLAC+2%~3%降

滤失剂 GSTP+0.3%~0.5% 抑制剂 GBBJ+2%~3% 封堵剂 HGPC+2%~3% 封堵剂 HGFD+1% 高温保护剂 GHPS。

(3)该冲洗液体系的现场应用表明其具有较强的抑制能力,起到了很好的护壁效果,顺利完成了在极易出现坍塌的第四系、破碎地层、水敏性蚀变地层钻探工作,对环境无害,绿色环保。

### 参考文献(References):

- [1] 唐菊兴,郑文宝,陈毓川,等.西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(4):1100-1110.  
TANG Juxing, ZHENG Wenbao, CHEN Yuchuan, et al. Prospecting breakthrough of the deep porphyry ore body and its significance in Jiama Copper Polymetallic Deposit, Tibet, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(4): 1100-1110.
- [2] 翟育峰.西藏甲玛3000 m科学深钻施工技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.  
ZHAI Yufeng. Technical proposal for the 3000m deep scientific drilling borehole in Jiama, Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 8-12, 53.
- [3] 张泽斌,唐菊兴,唐攀,等.西藏甲玛铜多金属矿床暗色包体岩石成因:对岩浆混合和成矿的启示[J].岩石学报,2019,35(3):934-952.  
ZHANG Zebin, TANG Juxing, TANG Pan, et al. The origin of the mafic microgranular enclaves from Jiama porphyry Cu polymetallic deposit, Tibet: Implications for magma mixing/mingling and mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(3): 934-952.
- [4] 林彬,唐菊兴,唐攀,等.斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型——以西藏甲玛超大型矿床为例[J].矿床地质,2019,38(6):1204-1222.  
LIN Bin, TANG Juxing, TANG Pan, et al. Polycentric complex mineralization model of porphyry system: A case study of Jiama superlarge deposit in Tibet[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(6): 1204-1222.
- [5] 唐攀,唐菊兴,郑文宝,等.西藏甲玛斑岩矿床系统地质、蚀变、矿化的三维地质模型[J].地质与勘探,2016,52(1):115-127.  
TANG Pan, TANG Juxing, ZHENG Wenbao, et al. The interpretation of three-dimensional model of geology, alteration and mineralization in Jiama porphyry deposit system, Tibet[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1): 115-127.
- [6] 郭文铂,郑文宝,唐菊兴,等.西藏甲玛铜多金属矿床流体、成矿物质来源的地球化学约束[J].中国地质,2014,41(2):510-528.  
GUO Wenbo, ZHENG Wenbao, TANG Juxing, et al. Geochemical constraints on the source of metallogenic fluids and materials in the Jiama polymetallic Cu deposit, Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 510-528.
- [7] DZ/T 022—2010,地质岩心钻探规程[S].  
DZ/T 022—2010, Geological core drilling regulations[S].
- [8] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.  
FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 129-133.
- [9] 翟育峰,王鲁朝,丁昌盛,等.西藏罗布莎科学钻孔冲洗液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):1-4.  
ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, DING Changsheng, et al. Flush fluid technique in scientific drilling hole situated in Luobusa of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(4): 1-4.
- [10] 刘振新,翟育峰,宋世杰,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):29-32.  
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, SONG Shijie, et al. Discussion on key technology for the 3000m deep scientific drilling project of Jiayika Lithium Mine in west Sichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 29-32.
- [11] 张统得,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻井液技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):139-142,145.  
ZHANG Tongde, CHEN Liyi, JIA Jun, et al. The drilling fluid technology and application of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 139-142, 145.
- [12] 孙丙伦,陈师逊,陶士先.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(5):13-16.  
SUN Binglun, CHEN Shixun, TAO Shixian. Discussion and practice on wall protection with slurry in deep-hole drilling in complicated formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(5): 13-16.
- [13] 李攀义,单文军,徐兆刚,等.成膜防塌无固相钻井液体系在金鹰矿区ZK1146井中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):26-30.  
LI Panyi, SHAN Wenjun, XU Zhaogang, et al. Research and application of solid free film-forming and anti-sloughing drilling fluid system in Well ZK1146 of Jinying Mining Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(10): 26-30.
- [14] 宋世杰,李晓东,陈师逊.南黄海大陆架科钻CSDP-2井第四系、新近系地层海水钻井液研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):10-13.  
SONG Shijie, LI Xiaodong, CHEN Shixun. Study on seawater flushing fluid and its application in Quaternary and Neogene Strata for CSDP-02[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 10-13.
- [15] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.  
WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological Drilling Handbook[M]. Changsha: Central South University Publishing House, 2014.
- [16] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Technology and Management in Deep Coring Drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

(编辑 荐华)