

复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇 绿色防塌冲洗液研究

李冰乐¹, 王胜^{1*}, 袁长金², 张洁¹, 吴丽钰¹,
宋礼勇², 徐正宣³, 陈明浩³, 解程超¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059;

2. 四川蜀都地质工程勘察有限公司, 四川成都 610100;

3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要:在西部艰险山区相关隧道及地下工程的勘察施工中,与传统垂直孔相比,水平定向绳索取心钻进勘察效率更高。在地质条件复杂、生态环境脆弱区,钻进过程中易出现塌孔、漏失等问题,要求所用冲洗液在保证流变性能的同时需具备抑制性强、无毒无害、绿色环保等特点。针对绳索取心水平定向钻进冲洗液性能问题,选择环保易降解、抑制性强的聚合物多元醇为主要研究对象,选择环保纤维素及纳米SiO₂,以提升其自身流变性能。所研制的聚合醇防塌冲洗液体系:2% PVA+0.5% 甲基纤维素 MC-9+0.5% 纤维素羟烷基醚 LE-5+0.1% SiO₂+0.3% 淀粉类降滤失剂 DD-1+0.2% 有机硅消泡剂 DS-957+0.8% KCl,由环保型材料构成,流变性能良好,防塌抑制能力也可达到定向取心钻进工程要求,为解决水平绳索取心定向钻进中的冲洗液工艺技术难题提供了新思路,对类似工程具有借鉴意义与参考价值。

关键词:水平绳索取心;水平定向钻进;绿色环保;聚合醇;防塌冲洗液;复杂山区;生态环境脆弱区

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)06-0085-07

Research on polymer alcohol anti-collapse flushing fluid for directional drilling of horizontal wire-line coring in complex mountain areas

LI Bingle¹, WANG Sheng^{1*}, YUAN Changjin², ZHANG Jie¹, WU Liyu¹,
SONG Liyong², XU Zhengxuan³, CHEN Minghao³, XIE Chengchao¹

(1. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environmental Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Sichuan Shudu Geological Engineering Exploration Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610100, China;

3. China Railway Second Institute Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Compared with traditional vertical drilling, horizontal directional wire-line core drilling has higher investigation efficiency due to its technological characteristics in the investigation of tunnels and underground engineering in the difficult mountainous areas in western China. However, due to the complex geological conditions and fragile ecological environment in this area, hole collapse, leakage and other accidents are easy to occur in the drilling process, which requires that the flushing fluid used should have strong inhibition, non-toxic and harmless characteristics while ensuring rheological properties. In view

收稿日期:2023-03-01; 修回日期:2023-05-27 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.06.011

基金项目:珠峰科学研究计划项目“青藏高原深部找矿快速绿色智能钻进关键技术研究”(编号:80000-2022ZF11411)

第一作者:李冰乐,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质资源与地质工程专业,从事钻井工程相关方向研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,1508021804@qq.com。

通信作者:王胜,男,土家族,1982年生,教授,主要从事钻探新技术与新材料方面的研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,158588951@qq.com。

引用格式:李冰乐,王胜,袁长金,等.复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J].钻探工程,2023,50(6):85-91.

LI Bingle, WANG Sheng, YUAN Changjin, et al. Research on polymer alcohol anti-collapse flushing fluid for directional drilling of horizontal wire-line coring in complex mountain areas[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 85-91.

of the performance problems of horizontal directional drilling fluid in wire-line coring, polymer polyols, which are environmentally friendly and easy to degrade and have strong inhibition, are selected as the main research object, and environmentally friendly cellulose and nano-SiO₂ are selected to improve their rheological properties. The developed polyalcohol anti-collapsing flushing fluid system: 2% PVA+0.5% MC-9+0.5% LE-5+0.1% SiO₂+0.3% DD-1+0.2% DS-957+0.8% KCl, composed of environmentally friendly materials, has good rheological property, anti-collapse inhibition ability can also meet the requirements of directional core drilling engineering. It provides a new idea to solve the technical problem of flushing fluid in horizontal wire-line coring directional drilling and has reference significance and value for similar projects.

Key words: horizontal wire-line coring; horizontal directional drilling; environmental protection; polymer alcohol; anti-collapse flushing fluid; complex mountainous areas; vulnerable ecological environment area

0 引言

随着西部大开发等一系列国家发展战略的不断深入,西部艰险山区相关隧道及地下工程进入高速发展期^[1]。该区域地质条件复杂、生态环境脆弱,在勘察过程中,水平定向绳索取心钻进技术相对传统垂直孔更具优势^[2-4]。同时,还需要特别注意在勘察过程中出现的塌孔、漏失等问题而导致的严重污染^[5]。

与常规垂直孔不同,水平孔中钻具与下孔壁接触面积较大,摩阻和扭矩增大,孔内岩屑清洁度较低,大量岩屑对钻进效率的负面影响、地层污染能力等因素都严重影响绳索取心定向钻进效率^[5-6]。因此,水平定向钻进冲洗液在性能、用途及组成上与常规冲洗液有所区别,应更强调携带岩屑能力及对孔壁的抑制能力等。

20世纪80年代末以来,多元醇体系以其突出的抑制性能逐渐出现在人们的视野,国内外学者对其聚合物在钻孔冲洗液方面的运用展开了大量的试验。研究发现聚合醇冲洗液抑制性能好、毒性低、生物降解性优良,且加量少成本低,可大范围应用推广,是环保型水基冲洗液研究领域的重要方向^[7-9]。此外,聚合醇因强极性基团的存在,应用于冲洗液可直接提高体系的润滑性能^[10]。但其流变性差、抑制性能与油基冲洗液仍有一定差距,其综合性能问题还有待进一步发展研究。

本文从环保型原材料入手,选择无毒、强抑制、使用方便的聚合多元醇,对其流变性能进行优化,并通过聚合物、纳米材料及环保处理剂的协同作用,开展适用于水平绳索取心定向钻进的聚合醇环保型防塌冲洗液体系研究,为构建安全、绿色、高效的绳索取心定向钻进技术提供新的解决方案。

1 聚合醇环保型防塌冲洗液研制

1.1 聚合醇优选

聚合醇包括聚乙二醇、聚乙烯醇等多种形式的多元醇。聚合醇由于其自身差异,在不同溶解环境下,溶解性受一定影响的同时,性能也将随之改变。溶解性差的聚合醇因为其不能在粘土表面吸附,而失去其抑制水化膨胀的作用^[11]。为选出性能优异、经济适用的聚合醇类别,综合选用均可于常温冷溶的不同聚合醇:聚乙二醇(PEG、PEO)、聚乙烯醇(PVA1788、PVA1799)^[12-13]。为保证最终结果可靠,采用苏氏漏斗粘度计测定的漏斗粘度为第一评价指标,控制其数值结果于18~20 s间确定聚合醇加量并进行溶液制备,室温静置2 h后对其流变参数进行测试,具体试验数据见表1。

分析表1中数据可知,不同类型聚合醇流变性能差异明显,在一定浓度内均为近牛顿的假塑性流体。PEG流变性能受分子量影响显著,其中,PEG-2k动塑比较高,剪切稀释性较好,但相较于其他类型聚合醇其加量过大,不利于成本控制。PEO性能优异,但由于分子量过大性能极不稳定,试验过程爬杆现象显著,材料配制及试验较为困难。PVA在相同聚合度下性能差异较小,PVA-1799虽动切力表现更优,但其醇解度大,致使水溶性很差,试验耗时较长。因此,选取加量为2%的PVA-1788作为基浆进行研究(后续文中如无特殊说明,PVA均指PVA-1788)。

1.2 纤维素处理剂优选

考虑与PVA的适用性以及材料性能需求,选用无毒、易溶,且稳定性强的聚合物^[14]:改性甲基纤维素(MC-9)、改性乙基纤维素(OC-7)、纤维素羟烷基醚(LE-5)进行流变性及其抑制性能试验研究。其性能变化趋势见图1。

表 1 不同种类聚合醇流变性能表

Table 1 Rheological properties of different polyols

| 材料 | 加量/% | 漏斗粘度 FV/ s | 表观粘度 AV/ (mPa·s) | 塑性粘度 PV/ (mPa·s) | 动切力 YP/ Pa | 动塑比 τ_0/μ_p | 流形指数 n |
|----------|------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|--------------------|--------|
| PEG-2k | 5 | 16.0 | 1.3 | 0.7 | 0.56 | 0.80 | 0.48 |
| PEG-1w | 5 | 18.0 | 2.5 | 2.0 | 0.51 | 0.26 | 0.74 |
| PEO-1 | 0.05 | 18.0 | 2 | 1.2 | 0.82 | 0.68 | 0.51 |
| PVA-1799 | 2 | 16.5 | 2.5 | 1.5 | 1.02 | 0.68 | 0.52 |
| PVA-1788 | 2 | 19.0 | 4.0 | 3.0 | 1.02 | 0.34 | 0.68 |

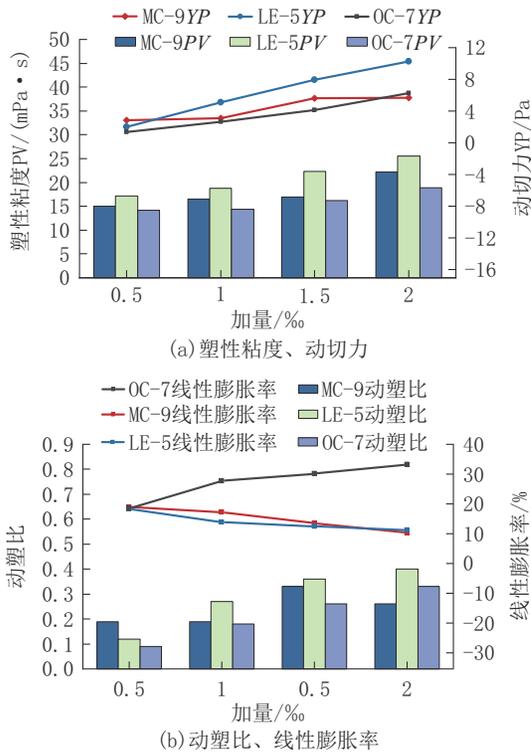


图 1 纤维素聚合物对 PVA 溶液性能影响

Fig.1 Effect of cellulose polymer on properties of PVA solution

通过上述试验与分析,常用的纤维素聚合物材料均能有效改善原基础溶液流变性能,但也可能给复合溶液的抑制性能带来一定的负面影响:

(1)溶液体系粘度均随加量增大而持续增大,其中 LE-5 粘度值与变化幅度最为显著。

(2)MC-9 与 LE-5 加入后体系动塑比总体呈增长趋势,抑制性能提升。为便于井筒内部压力控制且不影响冲洗液循环,动塑比应控制在 0.4 以下,因此,MC-9 适宜加量范围不宜超过 1.5‰,而 LE-5 适宜加量范围为 1‰~1.5‰。

(3)OC-7 线性膨胀率随加量增大其抑制性能

显著降低,予以排除。

1.3 纤维素处理剂复配试验研究

为便于冲洗液性能的后续调控,结合上文试验确定 LE-5 加量 0.5‰、1‰ 较佳。以 0.2‰ 梯度将 MC-9 由 0.3‰ 增至 0.9‰,通过对比试验确定两者最佳配比。性能变化趋势见图 2。

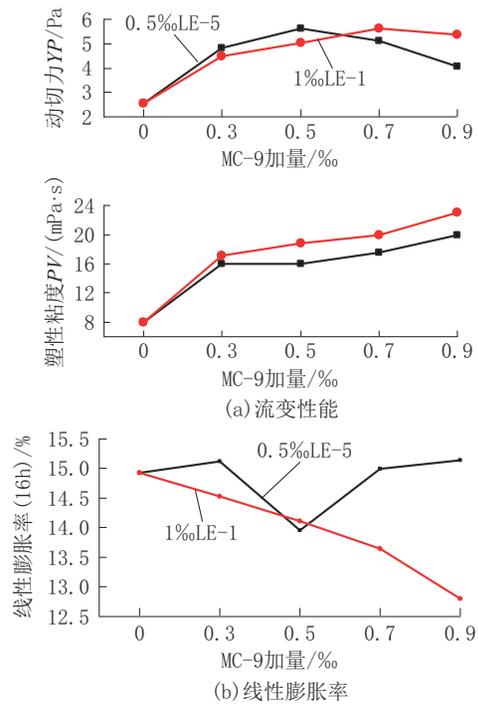


图 2 纤维素聚合物复配性能参数变化趋势

Fig.2 Change trend of composite performance parameters of cellulose polymer

通过对比 LE-5 两种不同加量下,PVA 复合溶液随 MC-9 加量变化的性能差异可发现,在 LE-5 加量为 1‰、MC-9 加量在 0.7‰ 时动切力达峰值,抑制性能也有很大程度降低,线性膨胀率为 13.64%,优于另一浓度 LE-5 下任意梯度抑制性能,但其粘度

过高,高剪切速率下体系粘滞性强,阻力大;低剪切速率下不利于悬浮并携带岩屑。故综合考虑,MC-9与LE-5加量均为0.5‰时对PVA溶液体系性能改善最佳。

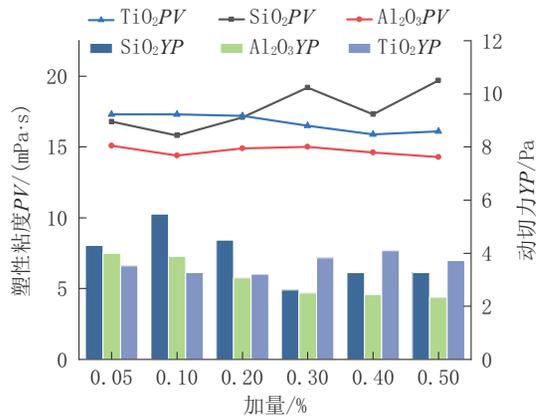
1.4 纳米材料优选及加量优化

纳米材料粒径小、活性高,可有效提升冲洗液流变、滤失、封堵及稳定性能。同时,由于纳米材料大多具有无毒的特性,适用于环保型冲洗液研制^[15-16]。

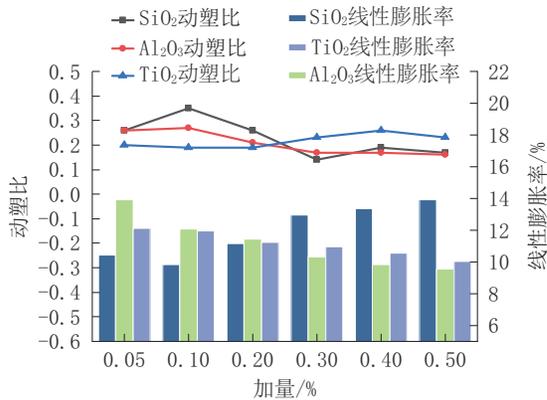
结合使用便捷程度、成本高低以及在冲洗液中应用可行性3方面,选用纳米二氧化硅(SiO_2)、纳米三氧化二铝(Al_2O_3)及纳米二氧化钛(TiO_2)来改善冲洗液的各项性能。

3种纳米材料加量范围均为0.05%~0.5%,加量梯度为0.1%,结果见图3。

分析图3可知,3种纳米材料均能一定程度上降低体系线性膨胀率,可有效提升抑制性能,但同时还存在以下问题:



(a) 塑性粘度、动切力



(b) 动塑比、线性膨胀率

图3 纳米材料复配后性能参数变化趋势

Fig.3 Change trend of performance parameters of nano materials after compounding

(1)随纳米 SiO_2 加量增大,体系粘度总体持续增长,体系动塑比为先增后减。

(2)纳米 Al_2O_3 加入原体系溶液后粘度、动切力均有所降低。

(3)纳米 TiO_2 线性膨胀率数值持续减小,性能优异,可有效抑制页岩水化。

综合实验结果分析,纳米 SiO_2 最优加量为0.1%,纳米 TiO_2 最优加量为0.4%,最优加量下二者性能差异不大,故此选择加量更少的纳米 SiO_2 作为防塌冲洗液体系的组成部分,可形成性能较优异的PVA/缔合纳米共聚复合材料。

1.5 环保型防塌冲洗液优化配方

聚合醇及纳米共聚复合材料的流变及抑制性能已达到预期改善效果,但仍存在以下问题:搅拌时易出现大量气泡、粘度较高以及滤失量略大。针对以上问题,同时考虑到环保需要,选用绿色、无毒的处理剂对相应性能进行调整。以改性淀粉DD-1作为降滤失剂,有机硅DS-957作为消泡剂,氯化钾KCl作为防塌抑制剂设计三因素三水平正交试验^[17-19],正交试验因素水平设计及试验结果见表2、表3。

表2 正交试验因素水平表

Table 2 Orthogonal test factor level table

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------|-----------|--------|
| | DD-1(A) | DS-957(B) | KCl(C) |
| 1 | 0.1‰ | 0.15% | 0.8% |
| 2 | 0.2‰ | 0.20% | 1.0% |
| 3 | 0.3‰ | 0.25% | 1.2% |

表3 正交试验数据

Table 3 Orthogonal test data

| 序号 | 性能指标 | | | |
|----|---------------------|---------------|--------------|-------------|
| | 塑性粘度 PV/ (mPa·s) | 动切力 YP/ Pa | 滤失量 FL/mL | 线性膨胀 率/% |
| 1 | 17.2 | 3.47 | 24 | 6.46 |
| 2 | 14.9 | 4.27 | 27 | 6.23 |
| 3 | 15.5 | 3.73 | 22 | 6.15 |
| 4 | 16.4 | 3.96 | 22 | 5.24 |
| 5 | 16.9 | 3.07 | 19 | 5.64 |
| 6 | 13.3 | 4.10 | 29 | 6.17 |
| 7 | 15.2 | 2.43 | 22 | 6.04 |
| 8 | 14.5 | 4.89 | 16 | 4.68 |
| 9 | 15.1 | 2.76 | 32 | 6.39 |

通过对试验结果的置信度分析,即可最终得出水平绳索取心聚合醇环保型防塌冲洗液体系LY-W优化配方为:2%PVA+0.5%MC-9+0.5%LE-5+0.1%SiO₂+0.3%DD-1+0.2%DS-957+0.8%KCl。

2 环保型防塌冲洗液性能评价

2.1 冲洗液环保性能

为测试LY-W冲洗液体系优化配方对于环境

的危害,参考《水质急性毒性的测定发光细菌法》(GB/T 15441—1995)评估其生物毒性^[20],将配方送检所获测试数据其EC₅₀值>10000 mg/L,无毒。

2.2 冲洗液流变性能

根据对环保冲洗液体系的设计,参考常规测试条件,对LY-W冲洗液在80℃热滚16h前、后的粘度等流变性能指标进行试验,进而讨论其流变性,具体试验数据见表4。

表4 LY-W冲洗液体系流变性能测试数据

Table 4 Rheological property test data of LY-W flushing fluid system

| LY-W | 密度 ρ /(g·cm ⁻³) | 漏斗粘度 FV/s | 表观粘度 $AV/$ (mPa·s) | 塑性粘度 $PV/$ (mPa·s) | 动切力 YP/Pa | 动塑比 τ_0/μ_p |
|------|----------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------|--------------------|
| 老化前 | 1.10 | 41.2 | 20.6 | 14.3 | 5.02 | 0.35 |
| 老化后 | 1.10 | 39.6 | 18.2 | 13.5 | 4.61 | 0.34 |

分析表4可知,冲洗液在老化前后表观粘度稍有差异,在18.2~20.6 mPa·s之间,而塑性粘度满足冲洗液性能要求,动切力在老化后仍维持4.61 Pa,动塑比为0.34,携岩能力较好,冲洗液流变性能并未受到严重影响。综合流变参数数据表明,LY-W优化配方流变性能优异。

2.3 冲洗液滤失性能

冲洗液防塌性能要求冲洗液具有良好的抑制粘土水化膨胀、封堵水分子向孔壁渗透及平衡孔内地层压力的能力^[21]。为改善冲洗液滤失、滤饼质量,使其具备抑制水敏性地层水化膨胀的能力,加强井壁稳定,要求其失水量≤20 mL/30 min(可接受范围≤30 mL/30 min),16 h线性膨胀率≤8%,岩心回收率≥75%。

采用API滤失仪对冲洗液体系在80℃热滚16 h老化前、后进行滤失量的测试,测试结果见表5。

表5 LY-W冲洗液体系滤失性能测试数据

Table 5 Filtration performance test data of LY-W flushing fluid system

| LY-W | 滤失量 FL_{API}/mL | 滤饼质量/g |
|------|-------------------|--------|
| 老化前 | 24 | 1.856 |
| 老化后 | 21 | 1.403 |

由表5可知,LY-W体系在热滚前滤失量为24 mL,高温16 h后滤失量降低至21 mL,基本满足水基冲洗液性能要求。这一现象出现的原因是因为老

化温度接近于体系中聚合醇浊点,部分聚合醇分子会逐渐析出,在滤失实验过程中能够填充滤纸孔隙,同时聚集形成的塑性膜能在部分区域形成封堵,故表现为滤失量的减少^[21]。此外,单位体积内聚合醇塑性膜密度小于水,滤饼质量明显减轻,由1.856 g减小至1.403 g。综合而言,LY-W冲洗液体系具备优秀的降滤失能力,基本满足取心钻进施工的需要。

2.4 冲洗液防塌性能

为测试冲洗液抑制性能,对岩心试样及页岩岩屑进行适当处理后,进行线性膨胀、岩心回收率试验。试验数据见表6。

表6 LY-W冲洗液体系抑制性能测试数据

Table 6 Suppression performance test data of LY-W flushing fluid system

| 试样 | 线性膨胀率/% | | 岩心回收率 $R/\%$ | | |
|------|---------|-------|--------------|-------|-------|
| | 2 h | 16 h | R_1 | R_2 | R_3 |
| 清水 | 14.69 | 47.92 | 37.70 | 37.22 | 36.94 |
| LY-W | 1.07 | 7.03 | 85.21 | 85.54 | 84.60 |

分析表6可知,LY-W冲洗液体系2 h线性膨胀率为1.07%,16 h线性膨胀率稳定在7.03%,远小于清水的膨胀量,说明体系具备较强防塌抑制性能。此外,结合3次连续岩心滚动回收试验数据分析,该冲洗液体系第一次岩屑回收率可达85.21%,同时可观察到体系在岩屑表面均匀附着包被,回收的岩屑完整;第三次回收率为84.60%,表明冲洗液体系能

较好维持井壁稳定,抑制性强,对预防井下复杂事故的发生有一定的积极作用。

LY-W 其性能评价结果表明该体系流变性能良好,动塑比等参数满足要求,防塌抑制能力强,且其抗温性能能够满足高原山区工程建设需要^[22],体系无毒,环保性能优异。

3 冲洗液现场应用

应用现场为四川西部某县城的一个水平孔,地层岩性为碳质泥岩,水敏性较强。开始采用普通水基冲洗液,受岩性影响在钻进至 75 m 时钻孔缩径及钻头泥包,严重影响钻进效率。后更换为 LY-W 冲洗液,提高了冲洗液的抑制性能。现场应用情况见图 4。



图 4 LY-W 冲洗液现场应用

Fig.4 Field application of LY-W flushing fluid

经现场应用,该冲洗液配方能够满足西部山区水平绳索取心钻进要求,在实际运用中具有良好的增粘提切效果,保证及时排除岩屑,并且其抑制性强,能够保证孔壁稳定,大幅提高了生产效率。

4 结论

结合国内外在环保防塌冲洗液体系、高分子聚合醇等领域的相关研究,从原材料即环保的思路出发,采用理论分析、试验研究相结合的方法,对聚合醇环保型防塌冲洗液体系进行了系统研究,并得出以下 3 方面结论:

(1) 试验研究发现不同类型聚合醇中聚乙烯醇具有良好的增粘提切效果,流变性能良好,环保无毒。

(2) 以聚合醇产物为研究主体,试验优选缔合

纤维素聚合物与产物协同作用;与此同时,0.1% 纳米二氧化硅的加入能够有效提升防塌抑制性能。

(3) 优选出环保性较好,并起到有效性性能调控作用的处理剂,确定绳索取心聚合醇环保型防塌冲洗液体系 LY-W 优化配方: PVA+0.5%MC-9+0.5%LE-5+0.1%SiO₂+0.3%DD-1+0.2%DS-957+0.8%KCl。

参考文献 (References):

- [1] 周福军,杜世回,孟祥连,等.高原山区铁路勘察多角度钻探和测试技术研究[J].铁道工程学报,2021,38(12):1-6.
ZHOU Fujun, DU Shihui, MENG Xianglian, et al. Research on multi-angle drilling and testing technology of railway survey in plateau mountain area [J]. Journal of Railway Engineering, 2021,38(12):1-6.
- [2] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):1-8.
- [3] 周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):136-143.
ZHOU Mengdi, LIU Huan, HAN Lili, et al. Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering investigation [J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):136-143.
- [4] 肖华,刘建国,徐正宣,等.川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J].钻探工程,2021,48(5):18-26.
XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):18-26.
- [5] 邹玉亮.软弱土层穿越的稳壁防偏钻井液技术研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
ZOU Yuliang. Research on wall-stabilizing anti-deflection drilling fluid technology for soft soil crossing [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [6] 赵大军,吴金发.隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):12-18,24.
ZHAO Dajun, WU Jinfa. Analysis of movement and force of horizontal drilling tools for tunnel engineering investigation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):12-18,24.
- [7] Bland R G, Waughman R R, Tomkins P G, et al. Water-based alternatives to oil-based muds: do they actually exist? [C]//Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [8] Bland R Q. Quality criteria in selecting glycols as alternatives to oil-based drilling fluid systems [C]//Society of Petroleum Engi-

- neers, 1994.
- [9] Reid P I, Elliott G P, Minton R C, et al. Reduced environmental impact and improved drilling performance with water-based muds containing glycols [C]//Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [10] 杨小敏, 睢文云, 郑伟. 聚醚醇钻井液在花X39井的应用[J]. 新疆石油天然气, 2020, 16(3): 38-41, 3.
YANG Xiaomin, SUI Wenyun, ZHENG Wei. Application of polyether alcohol drilling fluid in Well Hua X39 [J]. Xinjiang Oil and Gas, 2020, 16(3): 38-41, 3.
- [11] 秦国川, 许明标, 何森, 等. 聚合醇在钻井液中的应用研究进展[J]. 高分子通报, 2021(5): 65-73.
QIN Guochuan, XU Mingbiao, HE Miao, et al. Research progress of polyol application in drilling fluid [J]. Polymer Bulletin, 2021(5): 65-73.
- [12] 苏力才, 谢健全, 李永卫, 等. PVA1788无固相冲洗液体系的研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 68-73.
SU Licai, XIE Jianquan, LI Yongwei, et al. Research and application of PVA1788 solid-free drilling fluid system [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 68-73.
- [13] 苏力才, 蒙学礼, 李永卫, 等. PVA1788成膜体系无固相冲洗液在桂柳地1井的应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 57-63.
SU Licai, MENG Xueli, LI Yongwei, et al. Application of PVA1788 film-forming system solid-free drilling fluid in Well Guiludi-1 [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 57-63.
- [14] 万里平, 张小龙, 张力, 等. 渤海X油田无土相水基钻井液室内研究[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 605-610.
WAN Liping, ZHANG Xiaolong, ZHANG Li, et al. Laboratory study on clay-free water-based drilling fluid in X Oilfield of Bohai Sea [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 605-610.
- [15] 张星元. 可膨胀复合微球的制备及其在钻井液中的应用[D]. 雅安: 西南石油大学, 2019.
ZHANG Xingyuan. Preparation of expandable composite microspheres and their application in drilling fluid [D]. Ya'an: Southwest Petroleum University, 2019.
- [16] Rajat J, Vikas M, Sharma V P. Evaluation of polyacrylamide-grafted-polyethylene glycol/silica nanocomposite as potential additive in water based drilling mud for reactive shale formation [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 526-537.
- [17] 李佳琦, 杨海彤, 葛兵, 等. 一种耐高温交联淀粉钻井液降滤失剂的制备与评价[J]. 特种油气藏, 2022, 29(4): 164-168.
LI Jiaqi, YANG Haitong, GE Bing, et al. Preparation and evaluation of a high temperature resistant fluid loss reducer for starch drilling fluid [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2022, 29(4): 164-168.
- [18] 王雅新, 卢景峰, 谢富强. 钻井液用高效有机硅消泡剂的研制[J]. 天津化工, 2011, 25(4): 37-38.
WANG Yaxin, LU Jingfeng, XIE Fuqiang. Development of efficient silicone defoamer for drilling fluid [J]. Tianjin Chemical Industry, 2011, 25(4): 37-38.
- [19] 顾雪凡, 王棚, 高龙, 等. 我国天然高分子基钻井液体系研究进展[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(5): 83-91.
GU Xuefan, WANG Peng, GAO Long, et al. Research progress of natural polymer based drilling fluid system in China [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(5): 83-91.
- [20] GB/T 15441—1994, 水质 急性毒性的测定 发光细菌法[S].
GB/T 15441—1994, Water quality—Determination of the acute toxicity—Luminescent bacteria test [S].
- [21] 司西强, 王中华, 吴柏志. 中国页岩油气水平井水基钻井液技术现状及发展趋势[J]. 精细石油化工进展, 2022, 23(1): 42-50.
SI Xiqiang, WANG Zhonghua, WU Baizhi. Current situation and development trend of water-based drilling fluids technology for shale oil and gas horizontal wells in China [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2022, 23(1): 42-50.
- [22] 陈佐林, 苗永旺, 朱胥仁, 等. 高原、高地温隧道施工造价的分析、研究[J]. 城市建设理论研究, 2019(2): 129-130.
CHEN Zuolin, MIAO Yongwang, ZHU Xuren, et al. Analysis and research on the construction cost of Plateau and high ground temperature tunnel [J]. Urban Construction Theory Research, 2019(2): 129-130.

(编辑 荐华)