

青藏高原复杂地层地质钻探低固相冲洗液试验研究

袁进科¹, 陈礼仪¹, 王军伟², 乔友浩¹

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

2. 陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 青藏高原由于地质条件的多样性, 分布有松散破碎地层、高应力地层、断层破碎带等复杂地层, 在地质钻探中经常遇到塌孔、漏浆、缩径、卡钻、埋钻等问题。同时配套使用的冲洗液形成的泥皮质量差、胶结能力较差、携岩粉能力较弱等不足。冲洗液的性能是实现复杂地层顺利钻进的关键。结合青藏高原复杂地层的地质特点, 研发了低固相聚合物新型冲洗液, 该冲洗液以钠质膨润土和微泡剂等外加剂为基础, 具有流动性好、胶结性强、降失水量适中的特点, 适宜在青藏高原复杂地层地质钻探中使用。

关键词: 青藏高原; 复杂地层; 钻探; 低固相; 聚合物; 冲洗液

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)04-0079-06

Experimental study on low solid flushing fluid for geological drilling in complex metamorphic of Qinghai-Tibetan Plateau

YUAN Jinke¹, CHEN Liyi¹, WANG Junwei², QIAO Youhao¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: Due to the diversity of geological conditions, distributed in complex formation such as loose and broken formation, high stress formation, faults broken zone in the Qinghai-Tibet Plateau. In geological drilling, we often suffer problems such as hole collapse, slurry leakage, diameter reduction, stuck drill, buried drill, etc. At the same time, the mud cake formed by the mud is thin, the cementing ability is poor, and the rock carrying ability is weak. Therefore, flushing fluid is the key to achieve drilling smoothly in complex formation. Combining the geological characteristics of the complex formation of the Qinghai-Tibet Plateau, developed a new flushing fluid for low solid phase polymers. The flushing fluid based on sodium bentonite and additives such as micro foaming agent, etc. It has the characteristics of good fluidity, strong cementation, and moderate water loss, suitable for use in geological drilling of complex formation in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; complex metamorphic; drilling; low solid; polymer; flushing fluid

0 引言

我国青藏高原成矿地质环境优越, 矿产资源丰富, 是我国最具大型、超大型矿床的找矿远景区域, 也是21世纪国家经济建设、社会发展的战略性矿产

资源基地。同时“世纪工程”川藏铁路和川藏高速建设全面启动, 在拟建的川藏线地质勘察、工程施工以及沿线地质灾害防治需要大量的地质钻探工作, 而青藏高原复杂的地质条件给地质钻探施工带

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-02-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.04.011

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“纤维素类固化剂加固砂土边坡作用机理及抗冲蚀效应研究”(编号: 41702318); 成都理工大学珠峰科学研究计划“青藏高原深部找矿快速绿色智能钻进关键技术研究”(编号: 80000-2020ZF11411)

作者简介: 袁进科, 男, 汉族, 1982年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 长期从事冲洗液及胶凝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, yuanjingke@163.com。

引用格式: 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.

来了困难。青藏高原具有的松散破碎地层、高应力地层、断层破碎带等复杂地层给地质找矿和钻探施工带来了挑战,因此确保青藏高原复杂地层地质钻探的顺利实施,对确保我国青藏地区的发展后劲具有十分重要的意义^[1-4]。在青藏高原复杂地层钻探中经常会遇到孔内坍塌、浆液漏失、钻孔缩径、卡钻、埋钻等问题,导致被动停钻甚至钻孔报废,严重影响工程进度并造成经济损失^[5-7]。而复杂地层钻孔中冲洗液是保证钻探顺利实施的关键,尤其是在水平钻探中更加重要。水平钻探在遇到复杂地层时由于孔壁应力分布的不均匀性极易发生塌孔、卡钻、埋钻事故,并且采用的普通冲洗液润滑效果差导致钻柱摩擦阻力更大,孔内岩粉无法及时排出,使得钻孔事故风险更高^[8-9]。目前在青藏高原地区地质钻探中由于施工场地地形高陡,并且当地生态环境脆弱使得钻探工作多处于无行车道路地区,因此模块化设计,质量轻,体积小,易搬运的英格尔等便携式钻机开始得到应用,同时与之配套的泥浆材料也得到运用,比如G3370、G4480、S5480型等^[10]。对于青藏高原地质钻探中遇到孔内坍塌、浆液漏

失、钻孔缩径、卡钻、埋钻等问题的复杂地层,冲洗液的性能是实现顺利钻进的关键,具体表现为:(1)采用超低固相的冲洗液;(2)具有良好的流变性、防塌性和润滑性能;(3)绿色、环保,对生态环境无影响。因此,结合青藏高原复杂地层的特点以及英格尔钻机配套泥浆的性能,研发了新型低固相聚合物冲洗液。

1 冲洗液基浆配方研究

冲洗液基浆主要是由造浆粘土(通常为膨润土)在水中充分水化而成。膨润土在冲洗液体系中主要起着提高粘度、切力,改善钻孔的净化能力,形成致密的泥饼,降低滤失量,提高孔壁的稳定性,同时也为各种冲洗液处理剂提供吸附基础,以至于充分发挥其相应作用^[11-13]。因此,造浆粘土的好坏直接决定了基浆的质量,也更决定了冲洗液体系质量优劣。造浆粘土质量主要通过相同浓度配制出的基浆性能体现,主要包括粘度、失水量、胶体率等。室内试验主要选用4种不同的钠质膨润土并结合英格尔4381型堵漏剂作为冲洗液基浆进行对比试验,各体系具体配方及性能指标如表1所示。

表1 不同冲洗液基浆配方性能

Table 1 Performance index of different base flushing fluid

冲洗液配方	性能指标				
	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	漏斗粘度 FV/s	API滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
清水+5% I型膨润土	1.015	17	28	0.4	8
清水+7% I型膨润土	1.024	17.5	18	0.3	8
清水+9% I型膨润土	1.03	17.2	28	1.2	8
清水+5% II型膨润土	1.02	18	16	0.2	8
清水+7% II型膨润土	1.031	20	20	0.2	8
清水+9% II型膨润土	1.05	22.4	14	0.7	8
清水+5% III型膨润土	1.01	17	13	0.3	8
清水+7% III型膨润土	1.037	17.5	17	0.5	8
清水+9% III型膨润土	1.045	18.3	15	0.5	8
清水+5% IV型膨润土	1.01	17	12	0.9	8
清水+7% IV型膨润土	1.022	17.8	11	0.6	8
清水+9% IV型膨润土	1.036	18.4	11	0.4	8
清水+0.8% 英格尔 4381	1.027	17.2	16	—	8
清水+1.0% 英格尔 4381	1.031	19.5	14	—	8
清水+2.5% 英格尔 4381	1.038	23	11	—	8

通过表1可以看出,单纯的使用英格尔4381型材料虽然漏斗粘度和降失水量适当,但是由于形不成泥皮,说明胶结程度较差,易导致携带岩粉以及排渣能力的不足。同时针对不同膨润土的试验看出Ⅱ型膨润土性能指标较好。英格尔4381型属于防塌系列,具有润滑减阻、抑制缩径的功能。材料以0.8%~2.5%比例掺入水中,流动性较好。结合在青藏高原复杂地层地质钻探过程中采用的便携式钻机(英格尔型)以及配套的钻探堵漏剂,同时为了提高钻进效率,降低孔内复杂情况,需要对冲洗液润滑性有较高要求。因此,经过实验研究选择以英格尔钻机配套的4381型堵漏剂作为润滑剂,基浆配方为:清水+5%Ⅱ型钠质膨润土+0.25%4381。

2 冲洗液外加剂性能研究

2.1 封堵剂

在青藏高原的地质钻探中,由于地层复杂,地

层具有岩体结构破碎、裂隙发育等特点。因此,针对该类地层的主要措施是提高冲洗液体系的胶结防塌性能。室内选用磺化沥青和乳化沥青作为封堵剂进行研究。磺化沥青是在常规沥青分子中引入了 $-SO_3H$,由于含有磺酸基,水化作用很强,并能起到填充裂缝的封堵作用,改善泥饼质量,降低滤失量^[14-15]。乳化沥青是指把沥青加热熔融,在机械搅拌作用下,以细小的微粒分散于含有乳化剂及其助剂的水溶液中形成的水包油型乳液,拉伸、抗弯和撕裂强度高,断裂伸长率大约为0.02%^[16]。在基浆基础上采用2种沥青按不同比例进行试验,具体配方及性能指标如表2所示。

从表2可以看出随着沥青加量的增多导致密度过高,同时粘度过高呈近似不流动状态。基浆加磺化沥青后泥皮较厚流动性较差,因此基浆加1%乳化沥青的冲洗液性能较好。

表2 基浆加不同沥青配方指标

Table 2 Performance index of base flushing fluid with different asphalt

冲洗液配方	性能指标				
	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	漏斗粘度 FV/s	API滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
基浆+1%乳化沥青	1.01	19	22	0.3	8
基浆+2%乳化沥青	1.025	18.8	30	0.3	8
基浆+3%乳化沥青	1.03	17.2	37	0.5	8
基浆+4%乳化沥青	1.04	—	—	—	8
基浆+1%磺化沥青	1.03	17	22	0.7	8
基浆+2%磺化沥青	1.04	17.8	27	0.7	8
基浆+3%磺化沥青	1.05	18.4	—	—	8
基浆+4%磺化沥青	1.06	19.2	—	—	8

2.2 微泡剂

微泡冲洗液是把某些表面活性剂与聚合物结合在一起产生的一种微泡^[17-18]。微泡具有特殊结构,具有优良的护壁防漏性能,携带岩屑能力强,还能够保持孔底干净,高剪切稀释性好,井底压力低,有利于提高碎岩效率、岩心采取率和钻探质量^[19-20]。对于青藏高原复杂地质钻探中,在渗透性、强漏失地层中这些微泡能聚集形成坚韧的具有弹性的屏障,从而阻止冲洗液的漏失。添加了微泡剂的冲洗液具有携岩粉能力强、钻进效率高、保护岩心等优点^[21-22]。为了研究微泡剂对冲洗液性能的影响,以所配的基浆为基础,采用WH型微泡剂按照不同加

量配比加入到基浆中进行冲洗液性能试验,具体配方及性能指标如表3所示。

从表3可以看出,加入微泡剂后使得冲洗液的密度降低,密度在0.92~0.96 g/cm³之间;粘度都在20 s左右,浆液的流动性适当;pH值在8左右,均呈弱碱性。同时失水量较小,泥皮厚度在0.3 mm左右,胶结性能较好。失水量较小,泥皮厚度增加。微泡剂掺量在1%~4%较为合适。

2.3 封堵剂+微泡剂

通过对不同沥青的冲洗液试验看出,乳化沥青的胶结性能较好,同时在浆液中也易于分散,采用的微泡剂粘度适当,并且流动性较好。因此将封堵

表3 基浆加不同掺量微泡剂性能指标

Table 3 Performance index of base flushing fluid with different dosage of microfoam

冲洗液配方	性能指标				
	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	漏斗粘度 FV/s	API滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
基浆+1%WH型微泡剂	0.96	20.9	8	0.2	8
基浆+2%WH型微泡剂	0.96	20.8	8	0.3	8
基浆+3%WH型微泡剂	0.95	20.7	7	0.3	8
基浆+4%WH型微泡剂	0.95	20.5	6	0.4	8

剂和微泡剂相结合,即采用的乳化沥青和WH型微泡剂按照不同的加量配比,在基浆的基础上进行试

验,获得的不同加量配比下的冲洗液性能如表4所示。

表4 基浆加不同掺量封堵剂和微泡剂配方指标

Table 4 Performance index of base flushing fluid with different dosage of formation sealant and microfoam

冲洗液配方	性能指标				
	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	漏斗粘度 FV/s	API滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
清水+5%Ⅱ型膨润土+0.25%4381+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂	1.02	20.4	22	0.5	8
清水+7%Ⅱ型膨润土+0.25%4381+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂	1.08	29	30	0.3	8
清水+9%Ⅱ型膨润土+0.25%4381+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂	1.13	40	37	0.3	9

通过试验可以看出,钠质膨润土加量在5%~9%,密度在1.02~1.13 g/cm^3 之间,粘度在20~40 s之间,pH值在8左右,呈弱碱性,并且泥皮厚度增加。但是随着钠土掺量增加,冲洗液的粘度显著提升,失水量也随之增加,因此选择5%的钠质膨润土掺量作为基础液比较合适。

2.4 增粘剂

在青藏高原复杂地层钻进过程中,为了提高钻孔冲洗液的携粉能力以及改善冲洗液的流变性,提高松散、破碎地层的孔壁稳定性,往往需要添加适量增粘剂,通常增粘剂也具有一定的降失水效果。增粘剂种类较多,本实验选用CMC聚合物作为增

粘剂。CMC为纤维素经过烧碱处理,再在一定温度下与氯乙酸钠进行醚化反应后老化干燥制成的聚合物。由于其较高的聚合度,在水溶液中粘度较高,能较大幅度提高冲洗液体系的粘切力^[23]。此外,由于CMC长链分子中的羟基与醚氧基能与钠土颗粒边缘处的 Al^{3+} 之间形成配位键使其吸附在钠土表面,从而提高了钠土颗粒的聚结稳定性,有利于形成致密的泥饼,降低体系的滤失量^[24-25]。在选用的封堵剂和微泡剂基础上,结合CMC聚合物进行增粘性试验,以增强材料的胶结能力,具体配方及性能指标如表5所示。

根据试验可以看出,CMC聚合物作为增粘剂

表5 基浆加不同掺量外加剂配方指标

Table 5 Performance index of base flushing fluid with different dosage of admixtures

冲洗液配方	性能指标				
	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	漏斗粘度 FV/s	API滤失量/m	泥皮厚度/mm	pH值
基浆+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.1%CMC	1.02	20	22	0.3	8
基浆+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.2%CMC	1.022	20.3	20	0.3	8
基浆+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.3%CMC	1.025	21	18	0.3	8
基浆+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.4%CMC	1.027	21.5	18	0.3	8
基浆+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.5%CMC	1.03	22	14	0.2	8

具有较强增粘作用,降失水效果好。

在青藏高原复杂地层进行地质钻探,遇到垮孔严重、浆液漏失的地层,应从控制失水量和提高流动性来考虑,冲洗液配方可以选用:清水+5%钠质膨润土+0.25%4381+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.2%~0.5%CMC。

3 结论

(1)青藏高原复杂地层具有松散破碎、高压高应力、断层发育等特点。在青藏高原复杂地层钻探中经常遇到孔内坍塌、浆液漏失、钻孔缩径、卡钻、埋钻等问题,实现复杂地层顺利钻进宜采用超低固相冲洗液,同时具有良好的流变性、防塌性和润滑性能,并且绿色、环保,对生态环境无影响。

(2)目前模块化设计、质量轻体积小、易搬运的便携式钻机在青藏高原地区的地质钻探中得到推广应用,同时与之配套使用的冲洗液属于防塌系列,具有润滑减阻、抑制缩径的功能。但是在复杂地层钻探中形成的胶结能力较差,携岩粉能力较弱。

(3)通过室内试验对比,研发了低固相聚合物新型冲洗液,该冲洗液以钠质膨润土和微泡剂等外加剂为基础,并结合英格尔便携式钻机的配套泥浆,该冲洗液的优化配方为:清水+5%钠质膨润土+0.25%4381+0.7%乳化沥青+1%WH型微泡剂+0.2%~0.5%CMC。研发的该新型冲洗液流动性好、胶结能力强,并且滤失量适中,适宜在青藏高原复杂地层地质钻探中使用。

参考文献(References):

- [1] 赵文辉.川藏铁路复杂地层水平孔钻探护壁堵漏研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):19-24.
ZHAO Wenhui. Wellbore protection and sealing for directional drilling in complicated formation at the Sichuan-Tibet Railway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):19-24.
- [2] 李国志,杨树伟,徐景株.浩布高矿区复杂地层钻进护壁堵漏技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(8):23-26.
LI Guozhi, YANG Shuwei, XU Jingzhu. Wall protection and leakage control technical measures for drilling in the complex formation of Haobugao Ming Area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(8):23-26.
- [3] 李振学.高原地区钻探施工组织与技术管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):82-84.

- LI Zhenxue. Drilling construction organization and technical management in the plateau area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(10):82-84.
- [4] 张少林,苏延鹤,鲍海山,等.高原高寒地区复杂地层小口径岩心钻探冲洗液固控系统研究[J].中国煤炭地质,2020,11(2):79-82.
ZHANG Shaolin, SU Yanhe, BAO haishan, et al. Study on the solid control system of small caliber core drilling flushing fluid in complex formations in high altitude region [J]. China Coal Geology, 2020,11(2):79-82.
- [5] 刘志峰.无固相冲洗液在变质岩系复杂地层绳索取心钻进中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):14-18.
LIU Zhifeng. Application of solid phaseless flushing fluid in the core drilling of complex formations of metamorphic rocks [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(4):14-18.
- [6] 吴德军,朱小锋,刘树华,等.松辽盆地松南页岩地质调查井绳索取心钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):44-48.
WU Dejun, ZHU Xiaofeng, LIU Shuhua, et al. Wire-line core drilling for Songnan oil shale survey in the Songliao Basin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):44-48.
- [7] 刘凯.川藏铁路板块结合带应力-形变特征及工程效应研究[D].成都:成都理工大学,2018.
LIU Kai. Study on stress-deformation characteristics and engineering effects of the suture zone in Sichuan-Tibet Railway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [8] 郭林强,肖祖未,武成周.探矿工程中地质资源勘探技术的应用研究[J].世界有色金属,2020,11(1):96-97.
GUO Linqiang, XIAO Zuwei, WU Chengzhou. Application of geological resource exploration technology in prospecting engineering [J]. World Nonferrous Metals, 2020,11(1):96-97.
- [9] 李占锋.地表近水平孔绳索取心工艺钻探实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):48-50.
LI Zhanfeng. Drilling practice of near-horizontal hole rope core drilling process [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(1):48-50.
- [10] 杨培智,郑明珠.EP600便携式全液压钻机在广西良结新寨矿区钻探中的应用[J].科技经济导刊,2016(7):87-88.
YANG Peizhi, ZHENG Mingzhu. Application of EP600 portable all hydraulic rig in drilling in Liangjie Xinzhai mining area, Guangxi [J]. Science and Technology Economics Guide, 2016(7):87-88.
- [11] 张世轩,严学宁,王翠英.TRD水泥土搅拌墙在基坑工程中的应用[J].湖北工业大学学报,2019,34(1):38-43.
ZHANG Shixuan, YAN Xuening, WANG Cuiying. Application of TRD to foundation pit engineering in Wuhan Forte of Hanzheng Street [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2019,34(1):38-43.

- [12] 袁进科,陈礼仪,牛文林,等.低固相钻井液体系在古叙煤田勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(1):21-23.
YUAN Jinke, CHEN Liyi, NIU Wenlin, et al. Application of low solid drilling fluid system in prospecting in Guxu Coal Field [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(1): 21-23.
- [13] 张晨辰,刘斯宏,张学峰.膨胀土水泥改性掺灰量测定的龄期效应研究[J].南水北调与水利科技,2012(5):76-79.
ZHANG Chenchen, LIU Sihong, ZHANG Xuefeng. Effect of ageing on determination of cement content in cement-modified expansive soil [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2012(5): 76-79.
- [14] 于得水,徐泓,吴修振,等.满深1井奥陶系桑塔木组高性能防塌水基钻井液技术[J].石油钻探技术,2020,48(5):49-54.
YU Deshui, XU Hong, WU Xiuzhen, et al. High performance anti-sloughing water based drilling fluid technology for Well Manshen 1 in the Ordovician Sangtamu Formation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 49-54.
- [15] 李钟,罗石琼,罗恒荣,等.多元协同防塌钻井液技术在临盘油田探井的应用[J].断块油气田,2019,26(1):97-100.
LI Zhong, LUO Shiqiong, LUO Hengrong, et al. Application of multivariate collaborative collapse-proof drilling fluid technology in Linpan Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(1): 97-100.
- [16] 杨航,曹晓春.阳离子乳化沥青对水基钻井液流变性的影响[J].当代化工,2015,44(10):2297-2299.
YANG Hang, CAO Xiaochun. The effect of cationic emulsification asphalt on fluid rheology of water-based drilling [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(10): 2297-2299.
- [17] 董震堃,胥虹,聂洪岩,等.微泡沫泥浆在贵州岩溶裂隙地层钻探施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):5-8.
DONG Zhenkun, XU Hong, NIE Hongyan, et al. Application of micro-foam mud for drilling construction in karst fractured formation of Guizhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(10): 5-8.
- [18] 陈礼仪,孙涛,朱宗培.植物胶冲洗液的性能及新型植物胶QM的开发研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(4):44-46.
CHEN Liyi, SUN Tao, ZHU Zongpei. Research on the properties of plant glue flushing fluid and the development of new plant glue QM [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(4): 44-46.
- [19] 万里平,孟英峰,王存新,等.泡沫循环钻井理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2016.
WAN Liping, MENG Yingfeng, WANG Cunxin, et al. The theory and practice of foam circulating drilling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [20] White, Adrian, Catalin, et al. Aphron based drilling fluid: Novel technology for drilling depleted formations in the North Sea [J]. SPE79840, 2003, 12(9): 33-37.
- [21] 崔文青.可循环泡沫钻井液性能及应用现状[J].西部探矿工程,2010,22(11):46-48.
CUI Wenqing. Performance and application status of circulating foam drilling fluid [J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(11): 46-48.
- [22] 翟育峰.西藏甲玛3000m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.
- [23] 宋军,陈礼仪,张统得.若尔盖铀矿田复杂地层泥浆技术研究与应[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(12):1-5.
SONG Jun, CHEN Liyi, ZHANG Tongde. Research and application of mud technology in complex formation of Ruergai Uranium Mining Field [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(12): 1-5.
- [24] 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.
- [25] 蔡知,蒋杰.低固相泥浆体系在煤田绳索取芯钻探工艺的应用[J].西部探矿工程,2020,32(6):75-78.
CAI Zhi, JIANG Jie. Application of low solid phase mud system in coal field rope core drilling process [J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(6): 75-78.

(编辑 荐华)