

干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势

刘畅^{1,2}, 冉恒谦¹, 许洁¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:在如今传统能源储量日益减少的趋势下,干热岩这类新型地热资源的开发显得尤为重要,而干热岩钻井由于其井下的超高温环境,对传统钻井液系统提出了非常严格的要求。传统钻井液在高温作用下滤失量大大增加,钻井液开始增稠,普通的辅助添加剂往往不能发挥出功效。常用的以“三磺材料”为核心的钻井液虽然具有令人满意的耐温效果,但因其含有大量有毒物质,污染程度十分严重,需要开发新的环保型耐高温钻井液体系。国外干热岩项目早于国内30余年,拥有很多重要的耐高温钻井液经验与技术;作为刚起步的国内干热岩研究,也有着青海“共和盆地恰不恰干热岩”这样十分重要的项目工程。本文首先介绍了当前干热岩钻井概况以及对钻井液的性能要求,并结合国内外学者对耐高温钻井液与环保钻井液的研究进展,了解其配方组分与设计思路,结合干热岩特点探讨干热岩耐高温钻井液发展趋势,旨在为干热岩钻井液技术研究提供支持。

关键词:干热岩;耐高温钻井液;环保型钻井液

中图分类号:P634.6;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0008-08

Research progress and development trend of high-temperature drilling fluid in hot dry rock

LIU Chang^{1,2}, RAN Hengqian¹, XU Jie¹

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With decline in traditional energy reserves, the development of new geothermal resources such as hot dry rock is particularly important. The requirements of hot dry rock drilling are very demanding for traditional drilling fluid systems due to ultra-high temperature downhole environment. Filtration loss of traditional drilling fluids increases greatly at high temperature, and common additives often cannot perform well. Although common drilling fluids based on “three sulfonate materials” have satisfactory temperature resistance, they contain a large amount of toxic substance, leading to serious pollution; therefore, it is necessary to develop a new environment-friendly drilling fluid system with high temperature resistance. Research on hot dry rock in foreign countries is more than 30 years earlier than that in China, and very important experience and technology has been obtained on high temperature resistant drilling fluids. Though domestic research on hot dry rock just started, a very important research project “Qinghai Gonghe Basin Qiapuqia Hot Dry Rock Project” has already been initiated. This article introduces the current situation of hot dry rock drilling and the performance requirements for drilling fluids, explains their components and design approaches in light of the research progress of domestic and foreign scholars on high temperature resistant drilling fluids and environmentally friendly drilling fluids, and discuss the development trend of hot dry rock high temperature resistant drilling fluids in reference to the characteristics of hot dry rocks so as to provide support for the research of hot dry rock drilling fluid technology.

收稿日期:2020-01-08; **修回日期:**2020-08-23 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.02.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“共和盆地恰不恰干热岩试验性开发与评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20190136)

作者简介:刘畅,男,汉族,1995年生,硕士研究生在读,研究方向为钻井液技术,河北省廊坊市金光道77号,1945595307@qq.com。

引用格式:刘畅,冉恒谦,许洁.干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势[J].钻探工程,2021,48(2):8-15.

LIU Chang, RAN Hengqian, XU Jie. Research progress and development trend of high-temperature drilling fluid in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 8-15.

Key words: hot dry rock; high temperature drilling fluid; environment-friendly drilling fluid

0 引言

随着工业与科技的进步,以常规化石燃料为核心的能源结构,已经对环境产生了巨大的负面效应,为了缓解人类与环境的矛盾问题,必须改善能源结构,开发清洁能源作为能源结构的核心势在必行。其中,地热资源是地球内部的可再生能源,包括水热型地热资源与干热岩型地热资源等,而在已探明的地热资源中,我国干热岩型地热资源约合856万亿t标准煤,占世界资源量的1/6。所谓干热岩(Hot Dry Rock, HDR)是埋深超过2 km,内部没有水或仅存少量流体,温度高于180 °C的异常高温岩体,其蕴藏的可利用热能相当于全球石油、天然气、煤炭所含能量的30倍^[1]。因此,大力开发干热岩型地热资源,不仅可以有效解决当今能源紧缺的全球性问题,对生态改善和文明进步更具有重要意义。

目前钻井仍是干热岩勘探开发的唯一手段,主要的钻采方法是沿用较为成熟的石油钻采设备与技术,通过开采注水井与出水井,利用天然和压裂手段形成的裂隙使两口井之间连通,从地表注入冷水与地下干热岩高温层段进行换热从而获取热量资源(参见图1)。一般而言,井下温度超过150 °C即认为是高温井。干热岩其内高温高压的恶劣环境对井下钻具与钻井液系统提出了挑战,在高温高压的环境下易导致随钻测量仪器的性能不稳定、钻井液高温失效等问题。

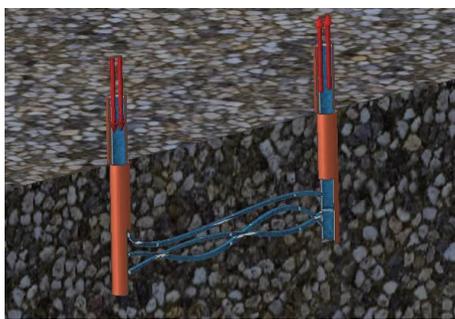


图1 干热岩开发示意

Fig.1 Schematic diagram of HDR development

如何提高钻井液的耐高温性能,往往通过提高粘土和处理剂的高温稳定性2个大的方向来考虑。无论是用来提高粘土高温稳定性的“粘土保护剂”,

还是其他抗高温的处理剂,想要达到200 °C左右理想的耐温温度,“三磺”体系以及“聚磺”体系都是当今各大钻井工程的主流选择,从20世纪80年代起,该类体系已广泛应用于各油田深井钻井工程中。然而磺化体系的钻井液中含有大量甲醛、苯酚等有毒物质,浆液与泥饼均呈现黑色,在高温作用下还伴随着强烈的刺激性气味,对周边环境造成了严重的污染。

除了考虑钻井液辅助钻进效果,其对环境产生的副作用也不容忽视。钻井液处理剂种类丰富多样,各类试剂之间化学反应复杂,加大了处理废弃钻井液的难度,同时考虑到工程经费问题,无论用哪种处理方法,废弃钻井液的处理往往是耗时耗力、“徒添成本”,人们并不愿意进行善后工作,再加之遇到地层裂隙较多的孔段,发生钻井液大量漏失的井下事故,环境污染便无法避免。因此,本着治本的原则,从源头改善钻井液的环保问题,必须开发新的耐高温环保钻井液体系,保证钻井液达到应有的辅助钻进效果。同时可以响应国家号召,建立环境友好型社会、进行可持续性资源开发,不给当地人民留下环境污染所造成的安全隐患。

1 耐高温钻井液技术难点

1.1 高温对钻井液性能的影响

高温环境有时易使膨润土颗粒分散度增强,而引起钻井液增稠、流动性变差、高温高压失水量增加的情况^[2],而对于纳基膨润土会造成聚结作用,使得静切力和动切力增加,进一步促使网架结构的密度和强度增强^[3],加剧了钻头、钻杆等井下器具的磨损情况。

高温环境对于一部分有机处理剂来说,一方面会使其分子链发生断裂,降低高分子处理剂的相对分子质量,使其失去原有活性,降低亲水性,减弱其抗污染的能力,另一方面会使其不饱和键和活性基团之间发生高温交联,使分子量增大,导致整个钻井液体系失去流动性^[4]。

1.2 干热岩抗高温水基钻井液的性能要求

1.2.1 抗高温能力与基础性能要求

要求在进行配方设计时,必须优选出各种能够

抗高温的处理剂,例如褐煤产品(抗温 200 °C左右)比木质素类产品(抗温 150 °C左右)、淀粉及其衍生物(抗温 130 °C左右)、CMC(抗温 140~180 °C)等产品有更好的抗温性能。通常干热岩井下温度在 200 °C左右,不符合要求的处理剂在 200 °C高温作用下,会出现动切大幅降低,静切甚至为 0 的情况,导致钻井液无法携带、悬浮岩屑,因此常见的淀粉类、纤维素类处理剂通常难以满足井底高温要求。

膨润土的选择也十分重要。在热稳定性方面,海泡石、凹凸棒土、纳土等粘土比高岭石、伊利石有更好的表现,而且来自不同产地的同一土粉也会表现出不同的耐温能力,因此在购买膨润土时应充分了解其产地与生产标准,选择与处理剂最适配的膨润土类型。如若膨润土与处理剂不适配或者耐温能力不够,高温环境下钻井液就会出现沉淀、絮凝、结块等现象,导致钻井液粘度不稳定、滤失量增加。

干热岩地层大部分是花岗岩,属硬岩,要求钻井液有一定的粘度和润滑性来悬浮岩屑和保护钻头。在注水井与出水井之间充满了裂隙,因此要根据地层压力设计合适的钻井液密度来保持地层压力平衡,同时要求泥饼质量要均匀、光滑、紧致,避免出现裂隙持续发育导致井壁坍塌的事故。为了获取更大的换热面积,出水井设计为直井与定向井相结合,对钻井液的护壁性与悬浮岩屑的能力又有了更高的要求。

1.2.2 环境要求

在美国,环境保护署(EPA)发布了有关钻井泥浆材料及其废料的严格规定。而国内固相治理主要参考《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)、《农用污泥污染物标准》(GB 4284—84)和当地环保部门的相关规定,浸出液主要参考《污水综合排放标准》(GB 12356—2018)。由于没有明确的统一指标,执行起来差异较大,对当地的环境影响各不相同^[5]。目前常用的“三磺”、“聚磺”体系钻井液,其抗高温、辅助钻进的表现能力已被认可,然而在工程结束之后,废弃钻井液的善后措施往往被疏忽,从而对环境造成相当大的污染。三磺钻井液化学成分复杂,碱性浓度大,固相含量高,含油量高,如若不采取妥善有效的处理措施,废弃后的钻井液进入地表水系、河流,污染地下水源,将改变土壤通透性,使得有毒物质在动植物体内积聚,最终影响人类生活。因此,要求钻井液体系不仅要满足高温高

压的恶劣环境,也要采用环保性能好的钻井液原材料,包括原料无毒、与其他处理剂适配不产生有毒物质,废弃后易降解易处理等。

2 国内外耐高温钻井液研究进展

GALINDO K A 等^[6]研究了一种密度为 16.0~20.0 lb/gal(1 lb/gal=119.826 kg/m³,下同)的新型含氟钻井液。含氟材料是由高度饱和的氟原子碳骨架组成,在 600 °F(315 °C)以上依然具有热稳定性,能在恶劣的化学和热环境中发挥出相应的作用,包括提高页岩稳定性、热稳定性、耐腐蚀性、润滑性、抗污染性和防止卡管等。由于含氟流体具有不混溶性,所以要求含氟添加剂提供含氟外部反相乳化液,因此他们用全氟聚醚基钻井液、全氟乳化剂与氯化钙盐水和重晶石制备了 F-IEF,并讨论了 F-IEF 的基本配方(见表 1)、含氟油水比、乳化剂浓度、流体密度、内相组成的影响,以及全氟化合物在制备功能性含氟乳化液(F-IEF)体系中的应用。

表 1 F-IEF 配方
Table 1 F-IEF formula

样 品	含量/(lb·bbl ⁻¹)
PFPE(全氟聚醚)	0.74
乳化剂	2.4
氯化钙盐水	43.1
重晶石	112.0

注:1 lb/bbl=2.853 kg/m³,下同。

南澳大利亚的库珀-埃罗曼加盆地钻了几口井底温度超过 400 °F(约 200 °C)的井,两口前期钻的井使用的是木质素磺酸盐钻井液,两口后期钻井使用新引进的高温聚合物体系。Aung T. H.^[7]对这些高温井进行了简要的对比。第一口井在 5600 feet(约 1707 m)处由凝胶泥浆转换为木质素磺酸盐体系,当井温达到 360 °F(约 180 °C)时开始添加褐煤(褐煤与木质素磺酸盐的比例为 1:1)以控制高温流体损失,加入 5% 的柴油提高高温性能。当钻进深度达到 10400 feet(约 3170 m)以后,开始产生严重的絮凝与脱水,添加其他化学处理剂效果也并不理想,最终该井被废弃封井。第二口井使用了较为分散的木质素磺酸盐泥浆,同样为了滤失与抗温效果,在 7800 feet(约 2377 m)处加入改性褐煤,对参数配比进行不断调整,在 11000 feet(约 3353 m)到

12200 feet(约3719 m)之间,泥浆密度达14.2 lbm/gal(1 lbm/gal = 1.197 kg/m³,下同),粘度为50~60 s,滤失量4~6 mL。第三口井使用了高温聚合物体系(改性褐煤树脂、丙烯酸钠聚合物、阴离子型丙烯酸酯-聚丙烯酰胺降失水剂),其组分如表2所示。第四口井在第三口井的成分含量上进行变动。后两口井采用丙烯酸钠聚合物体系,井底温度为400~420 °F(204~215 °C),对比显示丙烯酸钠型聚合物钻井液体系比其他水基体系更具成本效益,与常规褐煤木质素磺酸盐泥浆相比,丙烯酸钠聚合物体系降低了井下胶凝的几率。

表2 高温聚合物钻井液组分

Table 2 Components of high temperature polymer drilling fluid

组 分	含量/ppb
重晶石	203
膨润土	18~20
苛性钠	1.3
纤维素聚合物	0.54
木质素磺酸盐	0.88
苛化褐煤	0.63
改性褐煤树脂	4.74
丙烯酸钠聚合物	0.85
丙烯酸酯-聚丙烯酰胺聚合物	0.41

注:1 ppb=1 ug/L,下同。

国内“胜科一井”井深7026 m,井底温度235 °C,采用了水基钻井液钻井。从4155 m开始,井段内分别采用聚磺酸盐封堵防塌钻井液(4155~4598 m)、高密度聚磺酸盐钻井液(4598~5800 m)和超高温超高密度钻井液(5800~7026 m)^[8]。聚磺酸盐封堵防塌钻井液具有较强的抑制性、热稳定性、抗塌性和地层伤害控制能力,配方为:3% 膨润土+0.2% KPAM+0.1% PAC-141+1% 乳化剂+2% SR-1+3% SD-102+4% KFT+3% DYWD+6% 润滑剂+2% 乙二醇。高密度聚磺酸盐钻井液加入了乙二醇防塌添加剂、硅氟稳定剂增强缓蚀性,腐殖酸和磺酸盐树脂降滤失剂控制滤失量,抑制剂有效封堵页岩微裂缝,减少钻井液进入页岩。超高温超高密度钻井液是为“胜科一井”专门研制的一种适用于超高温(260 °C)条件下的水基钻井液,其中主要的降滤失剂Driscal D在260 °C的高温下依然

能保持稳定。

“松科二井”是松辽盆地大陆深部科学钻探工程的主孔,目的是穿透白垩纪地层,恢复近完整的白垩纪陆相沉积记录。井底温度约180 °C,为了满足“松科二井”的高温取心钻井,Wenlong ZHENG等按表3配方进行了尝试^[9]。通过室内试验及在“松科二井”的应用结果表明,该体系综合性能优良,有利于深部取心,其中HCOOK作为抑制剂除了具有很强的缓蚀作用外,还具有一定的高温防护作用,而膨润土含量对高温钻井液的制备至关重要,部分凹凸棒石与膨润土配合使用有助于粘度控制。最终回收岩心1683.17 m,平均岩心采取率达98.88%。

表3 “松科二井”钻井液组分

Table 3 SK-2 drilling fluid components

产 品	代 码	功 能
膨润土	NV-1	携带岩屑,控制滤失
苛性钠	NaOH	调节pH值
纯碱	Na ₂ CO ₃	提高稳定性
增粘剂	RHTP-2	流变控制
聚合物降滤失剂	SO-1	滤失控制
磺化降滤失剂	LOCKSEAL	滤失控制
防塌剂	FT-1	高温高压过滤控制,润滑剂
润滑剂	RH-1	润滑性
堵漏剂	QS-2	堵孔密封
抑制剂	HCOOK, AP-1	高温下抑制分散作用
重晶石	BaSO ₄	加重材料

位于青海省共和恰卜恰镇河谷内的GR1井,是青海干热岩计划的一口井,完钻深度3705.42 m,井底温度236 °C。GR1井高温段主要为花岗岩,未涉及水敏性地层,因此钻井液重点考虑高温下的流变性与滤失控制,采取了耐高温聚合物防塌钻井液体系^[10](见表4)。该钻井液体系在240 °C老化16 h后,其性质表现为表观粘度19 mPa·s、塑性粘度15 mPa·s、API滤失量6.5 mL、HTHP(230 °C、3.45 MPa)滤失量40 mL/30 min。

3 抗高温钻井液环保性的研究进展

Villafortuna/Trecate是意大利的主要油田,位

表4 耐高温聚合物防塌钻井液配方

Table 4 Formula of high temperature resistant anti-collapse polymer drilling fluid

成分	含量/%
钠膨润土	4
HPS	2
0.5% 高温增粘剂(GDP)	0.5
降滤失剂(GJA)	2
4% 高温封堵剂(GPA-200)	4
高温保护剂(GHTS)	1

于波谷的提契诺河国家公园,井底温度高于 170 °C。要开发这一区域,不仅要解决深井的极端钻井条件,由于在国家公园内,还需要进行全面污染防治。对于任何要使用的钻井液,其性能必须与严格的环境控制相协调。使用油基钻井液虽然往往能达到钻进要求,但为了更好的钻井性能和最低的环境风险,最终选择了水基钻井液。Cesaroni R. 等^[11]考虑到在保证钻井液性能最优化的同时,充分保护环境的必要性,采用一种新的方法开发了钻井液体系,并将其应用于波谷 Villafortuna/Treccate 油田。Cesaroni R. 根据此次实验提出固相含量是控制流变性的关键因素,应维持在最低限度,因此还增加了振动筛的目数,使用固体控制设备和有效的助凝剂可以获得非常低的塑性粘度。

Kay A. Galindo 等^[12]开发了一种具有良好的粘度、降滤失性能和悬浮能力的多功能高温聚合物,并因此提出了一种无膨润土的高温(>200 °C)水基钻井液体系。膨润土由于其良好的增粘效果且十分廉价,成为水基钻井液的长期依赖对象,然而盐分的增加会导致膨润土膨胀和絮凝无效,从而降低粘度,而且高温环境下粘土易发生热絮凝和凝胶化。Kay A. Galindo 在此基础上提出了将生物聚合物添加剂的性能与合成聚合物的热稳定性相结合,通过加入热稳定单体(如 AMPS 和 AM),在不影响粘度的情况下提供有效的滤失控制,形成了一种新型的无膨润土的钻井液添加剂。此高温聚合物通过了陆地、墨西哥湾和北海对藻类、鱼类和无脊椎动物的生态毒性试验,结果表明适合陆上和海上钻井。常用的无粘土高温水基钻井液配方见表5。

在海域钻井工程中同样存在高温敏感的环境,根据环境保护法律法规要求,钻井液生物毒性值

表5 密度为 14.0 lbm/gal 的无粘土高温水基钻井液配方

Table 5 Formula of clay-free high temperature water-based drilling fluid at 14.0 lbm/gal density

成分	用量
水/bbl	0.79
pH 缓冲液/(lbm·bbl ⁻¹)	4.5
KCl/(lbm·bbl ⁻¹)	8.0
流变改性剂/(lbm·bbl ⁻¹)	1.0
高温聚合物/(lbm·bbl ⁻¹)	7.0
稀释剂/(lbm·bbl ⁻¹)	3.0
重晶石/(lbm·bbl ⁻¹)	311.0

注:1 bbl=0.159 m³,1 lbm=0.45359 kg,下同。

LC50>3000 mg/L、汞含量<1 mg/L、镉含量<3 mg/L,因此油基钻井液、聚磺酸盐和其他有毒钻井液已被严格限制使用。为了满足高温深井作业和环境保护的要求,刘晓栋等^[13]研制了一种生物毒性值满足第一类海域排放标准、且可以大大降低成本的耐温 200 °C 的新型无毒高温聚合物钻井液。该钻井液体系组成为:2%~3% 高温聚合物降滤失剂 BDF-100S、0.25%~0.5% 高温增粘剂 HVIS、高温稳定剂、一种特殊的纳米堵漏剂、乙二醇页岩抑制剂、润滑剂、重晶石或甲酸盐加重材料等。经测试渤海高温深井井底 204 °C,井深 6066 m,该钻井液在高温热滚炉 200 °C 下热滚 72 h 性能依然稳定,高温高压失水量 15~25 mL,具有良好的环保性,可显著降低废弃钻井液的处理成本。

以美国当地牧草为原料,Abo Taleb Tuama Al-Hameedi 等^[14]人制作了一种草粉降滤失剂,草料利用率高、生态友好、成本低、制备草粉的方法简单,可以替代传统的降滤失材料。与淀粉类添加剂相比较,草粉的滤失量降低了 44%。使用标准 API 压滤机在 100 psi(1 psi=6.89 kPa,下同)下进行测量,将同浓度的草粉和淀粉材料与参考流体(淡水膨润土泥浆)对比如表 6 所示。

与参考流体相比,草粉和淀粉都呈现出薄且不渗透的滤饼,且草粉有更好的滤失效果。虽然草粉无毒、可降解、细纤维,但文中并未讨论其耐温性能,也未做相关实验研究。

国内张永青等^[15]开发了一套 HL-FFQH 环保型钻井液,有 5 种无毒原料配制,基本配方如表 7 所示。对该钻井液的生物毒性、可降解性以及重金属含量进行了测定,均满足水溶性油田化学剂环境保

表6 草粉、淀粉材料与参考流体滤失量和泥饼厚度对比
Table 6 Comparison of filtration loss and mud cake thickness between grass powder and starch materials, and reference fluid

浆液材料	滤失量/ [mL·(7.5 min) ⁻¹]	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	滤饼厚度/ mm
淡水膨润土泥浆	6	12.5	3
1%草粉	3.5	7	2
1%淀粉	3.25	7.5	2.4

护技术要求和建设用地土壤污染风险管控标准中筛选值第二类用地标准测试。经过150℃热滚16h后测试滤失量控制在4.2 mL,有较好的滤失控制性能。通过实地应用,认为该钻井液抑制防塌性优于聚磺钻井液,钻井效率高,成本低,然而耐高温性能需要进一步提高。

表7 HL-FFQH 环保型钻井液配方

Table 7 HL-FFQH environment-friendly drilling fluid formula

成分	含量/%
膨润土	4
包被剂 HLBE-2	0.3
降滤失剂 HLJ-1	2
固壁剂 HLGB-3	3
封堵剂 HLF-1	1
润滑剂 HLR-2	2
重晶石	

4 干热岩耐高温钻井液发展趋势

经过高温作用后,钻井液滤失量通常会增加。为了降低滤失量,就需要加入降滤失剂来保证钻井液“够粘”,但钻井液越“粘”,切力就会越大,加剧钻具磨损,因此加入降粘降失水剂可有效解决这一问题,库珀-埃罗曼盆地使用了褐煤树脂,“松科二井”使用了磺化降滤失剂等,但这一类体系的钻井液对环境有非常大的负面作用,不符合持续发展的要求。Kay A. Galindo等^[12]学者意识到环保这一问题,开始尝试无毒类处理剂,然而耐高温环保体系钻井液大多使用的生物聚合物添加剂以及有机聚合物,虽达到了环保要求,但无法在200℃高温下保持稳定。刘晓栋等^[13]将甲酸盐等材料运用到钻井

液中,有着良好的抗温性能和环保能力,但因其成本过高,对工程预算较少的项目易造成压力,无法普及使用。除此之外,众多高校院所也做出了巨大的贡献^[16],例如中国石油大学(北京)发明了采用液氮作为钻井液进行干热岩钻井,由于液氮温度极低,在钻井液中加入液氮避免了钻井液温度过高导致性能失效的问题。但实际工程中运用较少,缺乏可靠数据。

根据以上观点,耐高温钻井液发展过程^[17]可以简单概括为:

(1)由最初单纯满足井底高温环境,忽视了环保问题。

(2)到环保问题逐渐被重视,但耐高温能力较差。

(3)之后为了同时满足耐高温和环保要求,使用昂贵的钻井液材料导致成本也随之增加。

(4)与此同时高校院所也一直在研发新型耐高温环保材料,但由于其制作过程复杂,获取途径较难,缺乏实际运用。

由此可见,耐高温能力、环保性能、成本控制是未来耐高温钻井液需要考虑的3个主要因素,结合干热岩特点,干热岩耐高温钻井液的设计需要考虑以下几个方面^[18]:

(1)选择热稳定性(至少200℃)较好的处理剂是最节省成本的方向。使用成熟的钻井液处理剂,可使成本与风险降至最小。考虑到环保型与耐高温性,利用现有材料如何设计出最优性能的配方是一大难点,要想使钻井液达到理想的性能,往往需要多种处理剂进行复配,因此需要进行大量的配方实验。

(2)合成新型处理剂。干热岩井通常在3000 m以深,其井底越深,地层压力越大,高密度的钻井液才能与地层压力平衡,维持孔壁安全,但粘度与切力也随密度的增加而增大。目前降粘降失水剂主要包括FCLS、SMT、SMK、SMC等等一系列磺化材料,其成分均含有不同程度的有毒物质,而其他相对环保的降粘降失水剂,例如水解聚丙烯腈铵盐在200℃以上的高温环境下又无法保持稳定。如果可合成无毒类耐高温降粘降失水剂,满足高温、高密度、低切力的要求,既保证了较小的滤失量,也解决了钻井液高密度动切值太高磨损钻具的情况,但创新难度较高。

(3)增加处理净化装置,减少污染。磺化体系

的钻井液目前仍被广泛使用,在后期处理废浆时增加净化装置,将废浆净化后再排出可有效减少污染。也可以增加冷却循环装置,使钻井液始终保持较低的温度,避免高温失效的问题。由于机械装置可重复使用,从长远角度来看,增加装置成本在可接受范围内。

(4)围岩稳定性差、拥有发育的裂隙,直井与定向井的组合是干热岩井的特点。因此除了以上提到的耐温能力、环保性能,井壁的保护也至关重要。尤其是在高温环境下,泥饼由于失水产生龟裂(见图2)或泥饼太厚、松软(见图3),无法有效维护井壁稳定,很可能发生井漏、掉块卡钻等井下事故。所以在高温下保持井壁稳定,也是难点之一。



图2 泥饼裂纹多,易掉块

Fig.2 Mud cake: many cracks and prone to spall



图3 泥饼松软,不均匀

Fig.3 Mud cake: soft and uneven

5 结语

耐高温钻井液是辅助开发干热岩的关键技术,随着社会的进步,钻井液体系整体趋势都在朝着环境友好型方向发展,并不断提高其抗温性能。我国对于干热岩钻井液体系研究仍处于起步阶段^[19-20],虽然各院所研发的成果种类丰富,但应用范围较

小,应进一步加强推广工作,形成一套专用于干热岩的钻井液体系。

参考文献(References):

- [1] 付亚荣,李明磊,王树义,等.干热岩勘探开发现状及前景[J].石油钻采工艺,2018,40(4):526-540.
FU Yaron, LI Minglei, WANG Shuyi, et al. Present situation and prospect of hot dry rock exploration and development [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4):526-540.
- [2] 卜海,徐同台,孙金声,等.高温对钻井液中黏土的作用及作用机理[J].钻井液与完井液,2010,27(2):23-25,88.
BU Hai, XU Tongtai, SUN Jinsheng, et al. The effect of high temperature on clays in drilling fluids [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(2):23-25,88.
- [3] 单文军,陶士先,蒋睿,等.干热岩用耐高温钻井液关键技术及进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):52-56.
SHAN Wenjun, TAO Shixian, JIANG Rui, et al. Key technology and progress in high temperature resistant drilling fluid for hot dry rock [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):52-56.
- [4] 孙金声,黄贤斌,吕开河,等.提高水基钻井液高温稳定性的方法、技术现状与研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):73-81.
SUN Jinsheng, HUANG Xianbin, LÜ Kaihe, et al. Methods, technical progress and research advance of improving high-temperature stability of water based drilling fluids [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5):73-81.
- [5] 卢俊锋.废弃聚磺钻井液固液相分离及处理研究[D].成都:西南石油大学,2018.
LU Junfeng. Study on solid liquid separation and treatment of waste polysulfonate drilling fluid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [6] GALINDO K A, DEVILLE J P, J-LESPAGNE B, et al. Fluorine-based drilling fluid for ultra-high temperature wells [R]. SPE 166126, 2013.
- [7] Aung T. H. High temperature drilling fluids in the Cooper-Eromanga Basin, Australia [C]//6th SPE Offshore South East Asia Conf. Singapore: 1986:411-421.
- [8] 李公让,薛玉志,刘宝峰,等.胜利1井四开超高温高密度钻井液技术[J].钻井液与完井液,2009,26(2):12-15.
LI Gongrang, XUE Yuzhi, LIU Baofeng, et al. High temperature high density drilling fluid technology for the fourth interval of Well Shengke-1 [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(2):12-15.
- [9] Wenlong ZHENG, Xiaoming WU, Yuming HUANG, et al. Research and application of high-temperature drilling fluid for scientific core drilling project [C]//Abu Dhabi: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 2017.

- [10] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. Qinghai republican hot dry rock GR1 well drilling technology [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [11] Cesaroni R., Repetti U. Solved problems of high-density and high-temperature drilling fluid in an environmentally sensitive area[C]//Society of Petroleum Engineers SPE/IADC Drilling Conference. Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference, 1993.
- [12] Kay A. Galindo, Weibin Zha, Hui Zhou, et al. temperature-High, high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells [C]//Society of Petroleum Engineers SPE/IADC Drilling Conference. Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference, 1993.
- [13] 刘晓栋,谷卉琳,马永乐,等.高性能抗高温聚合物钻井液研究与应用[J].钻井液与完井液,2018,35(1):13-20.
LIU Xiaodong, GU Huilin, MA Yongle, et al. Study and application of a high performance high temperature polymer drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(1): 13-20.
- [14] Abo Taleb Tuama Al-Hameedi, Husam Alkinani, Shari Dunn-Norman, et al. Experimental investigation of bio-enhancer drilling fluid additive: Can palm tree leaves be utilized as a supportive eco-friendly additive in water-based drilling fluid system? [J]. August 2019 Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020(10):595-603.
- [15] 张永青,胡景东,许朋琛,等.HL-FFQH环保型水基钻井液体系的构建及应用[J].钻井液与完井液,2019,36(4):437-441,448.
ZHANG Yongqing, HU Jingdong, XU Pengchen, et al. Development and application of the environmentally friendly HL-FFQH water base drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(4):437-441,448.
- [16] 张森琦,文冬光,许天福,等.美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型EGS场地勘查现状对比[J].地学前缘,2019,26(2):321-334.
ZHANG Senqi, WEN Dongguang, XU Tianfu, et al. The U. S. frontier observatory for research in geothermal energy project and comparison of typical EGS site exploration status in China and U. S. [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26 (2) : 321-334.
- [17] 梁文利.干热岩钻井液技术新进展[J].钻井液与完井液,2018,35(4):7-13.
LIANG Wenli. Progress on drilling fluid technology for hot dry rock drilling [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35 (4):7-13.
- [18] 秦耀军,李晓东,赵长亮,等.耐240℃高温钻井液在青海共和盆地高温干热岩钻探施工中的应用[J].地质与勘探,2019,55(5):1302-1313.
QIN Yaojun, LI Xiaodong, ZHAO Changliang, et al. Application of high temperature(240℃)-resistant fluid to a HDR drilling project in the Gonghe Basin, Qinghai povince [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5):1302-1313.
- [19] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报,2018,92(9):1936-1947.
XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: international progresses and research status of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9):1936-1947.
- [20] 李旭方,熊正强.抗高温环保水基钻井液研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):32-39.
LI Xufang, XIONG Zhengqiang. Research progress on high temperature resistant and environment friendly water-based drilling fluids [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(9):32-39.

(编辑 荐华)