

# 干热岩用耐高温钻井液关键技术及进展

单文军, 陶士先, 蒋睿, 李艳宁

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**干热岩(HDR)是一种可再生绿色清洁能源,其勘探开发具有埋藏深,地层破碎,压力异常,井温梯度高,孔底温度高(通常大于 200 ℃)等特点,在钻井过程中易出现钻井液漏失量大,孔壁失稳掉块卡钻等问题。本文通过分析干热岩耐高温钻井液关键技术难点:处理剂及体系抗温问题、起泡问题、漏失、井壁失稳等问题。同时通过对国内外目前干热岩用耐高温钻井液体系进展及应用情况介绍,开展干热岩钻探耐高温钻井液技术发展方向研究,以期对推动我国干热岩资源勘探开发提供有效的技术支持。

**关键词:**干热岩钻井;抗高温钻井液;井壁稳定;流变性能

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0052-05

**Key Technology and Progress in High Temperature Resistant Drilling Fluid for Hot Dry Rock/SHAN Wen-jun, TAO Shi-xian, JIANG Rui, LI Yan-ning** (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Hot dry rock (HDR) is a renewable green clean energy source; however its exploration and development is characterized with great burial depth, broken strata, abnormal pressure, high temperature gradient, high temperature at the bottom of the hole (usually >200℃), and there are many problems during drilling, such as circulation loss, unstable wellbore, falling stones, pipe sticking. This paper analyzes the key technical difficulties on high temperature drilling fluids; temperature resistance of agents and systems, foaming, circulation loss, wellbore stability etc. At the same time, with introduction of the development and Application of high temperature drilling fluids in domestic and foreign countries, research is conducted on the development trend of the high temperature drilling fluids so as to provide effective technical support to promote the exploration and development of dry-hot rock resources in China.

**Key words:** hot dry rock drilling; high temperature resistant drilling fluids; wellbore stability; rheological property

干热岩(HDR)是一种内部不存在流体或仅有少量地下流体的热岩体,主要是各种变质岩或结晶岩类,埋藏于距地表 2~6 km 的深处,其温度在 150~350 ℃。较常见的岩石有黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等。目前主要是用来提取岩体内部的热量,其主要工业指标是岩体内部的温度,是未来一种可再生的清洁的新能源。国内对于干热岩的勘查开发利用目前尚处于起步和探索阶段,近年来国土资源部、中国地质调查局出台了一系列支持地热、干热岩等清洁能源开发利用的政策,将有力地促进干热岩清洁能源的开发利用。

## 1 干热岩耐高温钻井液关键技术难点

### 1.1 抗温问题

收稿日期:2018-06-26

基金项目:油气基础性公益性地质调查“陕西-晋西地区气钾兼探战略调查(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20179624);国土资源部公益性行业科研专项“干热岩高温钻探关键器具及工艺研究—干热岩钻探耐高温钻井液技术研究”(编号:201411094-2)

作者简介:单文军,男,汉族,1985年生,工程师,应用化学专业,从事钻井液技术与钻井工艺研究工作,北京市海淀区学院路29号,82675667@qq.com。

通信作者:陶士先,女,汉族,1964年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,从事冲洗液技术研究与应用工作,北京市海淀区学院路29号, Taosx@bjiee.com.cn。

### 1.1.1 高温对钻井液中膨润土的作用

(1)高温分散。在高温作用条件下,钻井液的膨润土颗粒分散度增强,即水化分散,温度越高分散性越强,从而引起钻井液增稠,流动性较差,高温高压(HTHP)失水量增加。

(2)高温聚结作用。钠基膨润土在高温作用条件下,高度分散的膨润土颗粒降低分散的趋势,从而促进粘土颗粒端一面和端一端结合形成卡片房子结构,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。

### 1.1.2 高温对钻井液中有有机处理剂的作用

(1)高温条件下有机处理剂氧化降解。

高温对钻井液有机处理剂最主要的作用是一方面会使有机处理剂分子链发生断裂,降低高分子处

理剂的相对分子质量,使其失去原有的特性,同时降低处理剂的亲水性,减弱其抗污染能力,可能会导致钻井液性能恶化;另一方面会使处理剂分子中不饱和键和活性基团之间发生各种反应,发生高温交联,使得整个钻井液体系变成凝胶,失去流动性。抗高温降滤失剂,由于存在 C-O-C、C-C、C-N、C-S 等化学键而极易在高温条件下氧化分解,目前解决的办法主要是适用抗高温氧化剂。

#### (2) 高温条件下有机处理剂交联。

有机处理剂分子中存在发生交联反应的不饱和化学键和活性基团,在高温下容易发生交联反应而使分子量增大,失去处理剂原有的性能,造成钻井液性能难以控制。室内研究和现场试验可看出,适当交联有助于改善高温钻井液的性能,通常表现为高温后粘度、切力、滤失量降低,例如:磺化褐煤和磺化酚醛树脂复配使用时降滤失效果较好。但是如果交联过度,易于形成网状结构,钻井液性能严重破坏,严重时整个体系变成凝胶,丧失流动性。

#### (3) 高温条件下有机处理剂去水化。

高温对水分子和处理剂的亲水基团之间的氢键有很强的破坏作用,极易导致高温处理剂水溶性下降,从而导致失去处理剂原有的性能。常规的解决办法:一是用高温稳定剂,增加聚合物分子的亲水基团亲水性,从而提高有机处理剂的抗温能力;二是增强高温处理剂的亲水性能,引入较强的亲水基,亲水基团越多,其抗温抗盐能力越强。如磺酸基、磺甲基等基团。

### 1.2 沉降稳定性

高温高密度钻井液体系属于较稠的胶体悬浮体系,具有自身固相含量大、颗粒分散度高、自由水量少、钻屑侵入和积累不易清除等特点,使得高密度钻井液流变性和稳定性较差。高密度高温导致膨润土含量难以确定,存在高温增稠及减稠的双重危险,从而影响体系的流变性和沉降稳定性。存在的潜在风险就是高温钻井液悬浮稳定性不好,导致重晶石沉降严重,上部密度过低,易发生坍塌、掉块,底部密度局部变高,易压漏地层。

### 1.3 起泡问题

随着井深增加,地层中可溶性盐类( $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ )及气井中的烃类气体溢出,会不断污染高温钻井液。同时为了解决深井高温问题,降滤失、泥皮质量及抗污染等问题需要使用大量的磺化

类的材料,易在高温环境下生成  $\text{SO}$ 、 $\text{CO}$  等气体,造成钻井液中泡沫较多,使钻井液起泡严重,钻井液泵上水率差,不能正常钻进。由于钻井液中存在大量的泡沫,钻井液密度降低,易导致井眼垮塌,造成井下复杂事故。

### 1.4 井壁稳定

干热岩体钻遇变质岩或结晶岩,会有大量破碎地层,易发生坍塌、掉块等孔壁不稳定现象。井壁失稳主要由两方面的原因引起:一是钻井液密度过低,钻井液液柱压力难于支撑力学不稳定的地层;二是钻井液液柱压力高于地层孔隙应力,驱使钻井液滤液(滤失量)进入泥页岩孔隙,产生压力穿透效应,井壁稳定强度降低。

### 1.5 漏失

干热岩上部地层通常为沉积岩,下部为火山岩,变质岩或结晶岩,存在大量破碎地层,易发生漏失、坍塌、掉块等复杂情况。如 OR-POWER 构造带,地层岩性主要为:流纹岩、粗面岩和玄武岩,凝灰岩次之,夹有少量的燧石和黄铁矿。具有典型的高温地热(蒸汽型)特点:地层压力低,漏失较严重。裂隙和溶洞非常发育,无漏层和漏点规律可寻,漏失量大。

### 1.6 高温流变性

在高温高压条件下保证钻井液具有很好的流动性、携带和悬浮岩屑至关重要。对于高温高密度钻井液,应加强对无用固相处理(配备固控设备),并严格控制膨润土含量( $\leq 4\%$ )以避免高温增稠。必要时可通过加入耐高温聚合物材料等改进流型,提高携屑能力,通过加入耐高温稀释剂控制静切力。

## 2 干热岩耐高温钻井液国内外研究现状

### 2.1 国外高温钻井液体系研究方面

国外典型高温钻井液体系组成及其耐温等情况见表 1。

从表 1 可以看出,目前国外研发的高温钻井液的抗温能力达到  $200\text{ }^\circ\text{C}$  以上,个别达到  $275\text{ }^\circ\text{C}$ ,实际应用中孔内温度一般不超过  $240\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 国内高温钻井液体系研究方面

国内典型高温钻井液体系组成及其耐温等情况见表 2。

从表 2 可以看出,目前国内研发的高温钻井液抗温能力最高达到  $260\text{ }^\circ\text{C}$ ,除地热井外,现场最高

表1 国外典型高温水基钻井液体系耐温情况

序号	钻井液名称	配 方	抗温能力/℃	应用情况
1	高温低密度聚合物钻井液体系	15%~25%高岭土+0.15%~0.2%丙烯酸类二元共聚物+0.01%~0.05%磷酸钠+1%~3%润滑剂+1.5%~2%石墨	220	俄罗斯斯科拉半岛 SG-3, 井深 12262 m, 井底温度 215 ℃
2	D-HT/HOE/Pyrodrill 体系	3.6%膨润土+0.15%粘附剂(AMPS/AAM)+0.15%高温稳定剂(SSMA)+0.5%抗温剂+1%~1.5%Pyrodrill-HT(原浆)+1.5%Hostadrill3188(原浆)	275	德国 KTB 主孔, 井深 9101 m, 井底温度 289 ℃
3	抗高温 DURATHERM 水基钻井液体系	0~172%M-I BAR+0.29%~2.90%M-I GEL+0.14%~0.43%烧碱+4.28%~5.71%XP-20(改性褐煤)+0.14%~0.43%POLYPAC+0~3.42%THERMEX+0~1.71%RESINEX(特殊树脂)	260	美国 Magcobar 公司, 井深 6089 m, 井底温度 236 ℃
4	高温聚合物钻井液	4%~5%膨润土+0.2%~0.3%烧碱+0.2%PAC+0.56%褐煤钠盐+0.32%聚丙烯酸钠+0.24%丙烯酸-丙烯酰胺共聚物+0.04%木质素磺酸盐+0.56%改性褐煤巧脂+重晶石	210	美国 Baioid 公司, 未见相关应用报道
5	EHT 体系	0.86%~3.5%膨润土+烧碱(调节 pH 值 9.5~11)+NaCl(控制 Cl <sup>-</sup> 浓度)+0.29%~0.86%纤维素增粘剂+0.57%~1.71%合成聚合物高温降粘剂+高温解絮凝剂(按需加入)+消泡剂(按需加入)	215	埃克森公司, 未见相关应用报道
6	超高温油基钻井液 RHADIANT	配方不详	260	斯伦贝谢 MI-SWACO 公司, 在泰国湾应用, 井底温度 222 ℃
7	分散性褐煤-聚合物钻井液体系	PAC+褐煤-聚合物分散剂+聚合物降滤失剂+树脂降滤失剂+铬褐煤+天然沥青+低分子量聚合物解絮凝剂+阴离子型磺化聚合物降滤失剂+氯化钠	212	密西西比海域, 井深 7178.04 m, 井底温度 212.8 ℃
8	皂石-海泡石聚合物钻井液体系	7.14%皂石-海泡石+1.43%高聚物降滤失剂+0.86%低聚物解絮凝剂(稀释剂)	260	美国
9	木质磺酸盐钻井液	3%~10%膨润土+烧碱(调节 pH 值 10~11)+3%~4%铁铬木素磺酸盐+1%~2%铬褐煤+Therma Vis+G-500S	210	日本, “三岛”基地, 井深 6300 m, 井底温度 225 ℃
10	SIV 钻井液体系	150 L 淡水+1.35 kg SIV+9.45 kg KCl+0.45 kg 纯碱+0.95 kg 亚硫酸钠+4.5 kg 超细碳酸钙+3.6 kg 三元共聚物降滤失剂+0.045 kg 消泡剂+4.5 kg 粘土混合物+重晶石	232	未见相关应用报道
11	海泡石钻井液体系	海泡石+烧碱+褐煤类处理剂+丙烯酸钠+钻屑	238	未见相关应用报道

表2 国内研发的典型高温钻井液耐温情况

序号	钻井液名称	配 方	评价温度	应用情况
1	超高温水基钻井液	4%膨润土+1%SDT-108+3%SD-101+2%SD-202+5%SDT-109+2.5%LQ-10+1.2%SF-260+0.5%QS-2+0.2%LNW+3%白油	250 ℃ 老化, HTHP 滤失量测试温度为 200 ℃	泌深 1 井, 井深 6055 m, 井底温度 236 ℃
2	超高温高密度钻井液	3%钠膨润土+0.2%KPAM+0.1%PAC-141+1%乳化剂+2%SR-1+3%SD-102+4%KFT+3%DYWD+6%白油+2%聚合醇+Driscal D 抗高温(260 ℃)聚合物降滤失剂+Desco 单宁+磺化沥青 Soltex	250 ℃ 老化, HTHP 滤失量测试温度为 200 ℃	胜利 1 井, 井深 7026 m, 井底温度为 235 ℃
3	分散性抗高温钻井液体系	5%膨润土+3%地热 93	329.8 ℃	西藏羊八井 ZK4002 地热井, 井底温度为 329.8 ℃
4	超高温水基钻井液	2%~4%钠膨润土+3%~8%CGW-6+1%~2%MP488+3%~7%HTASP-C+1%NaOH+0.05%~0.5%CaCl <sub>2</sub>	260 ℃	未见相关应用报道
5	高温油基钻井液	配方不详	黑龙江古龙 1 井, 四开(4495~6300 m)高温井段, 井底温度 226 ℃	

使用温度为 236 ℃。

### 3 干热岩用高温钻井液的发展方向

#### 3.1 高温处理剂的研制

高温水基钻井液处理剂研究主要包括: 耐 260 ℃ 以上降滤失剂、增粘剂、润滑剂、堵漏剂、消泡剂及保护剂等;

高温泡沫流体钻井液处理剂研究主要包括: 耐 260 ℃ 以上发泡剂、增粘剂、稳定剂、封堵剂及保护

剂等。

#### 3.2 高温钻井液体系研究

耐高温钻井液体系研究包括: 耐 260 ℃ 以上高温、2.0 g/cm<sup>3</sup> 高密度钻井液体系, 耐 260 ℃ 高温泡沫钻井液体系, 耐 260 ℃ 高温油基钻井液体系等。

#### 3.3 高温仪器的研制

耐高温仪器的研制包括: 耐 300 ℃ 以上高温高压流变仪、耐 260 ℃ 以上高温高压失水仪、耐 260 ℃ 以上高温滚子炉、耐 260 ℃ 以上高温堵漏仪、耐 260

℃以上润滑仪等。

#### 4 耐高温钻井液在干热岩井中的应用

##### 4.1 耐 240 ℃ 高温钻井液在青海共和 GR1 井中的应用

###### 4.1.1 高温钻井液现场试验

现场使用配方:水+2%~4%钠膨润土+0.2%~0.5%高温增粘剂Ⅱ+1%~2%降失水剂+1%~4%高温防塌剂Ⅱ+0.5%~1%高温保护剂 GHTS+2%~4%高温封堵剂 GFD-1+0.2%~0.5%包被剂+重晶石。试验结果显示,高温防塌钻井液性能为:漏斗粘度 45~60 s,密度 1.20~1.25 g/cm<sup>3</sup>,API 滤失量 5~10 mL,泥皮厚 0.2~0.5 mm,pH 值 9~10。

###### 4.1.2 高温钻井液现场应用效果

现场原先采用的是双聚防塌钻井液体系,主要使用的材料有钠土、烧碱、高粘纤维素、改性沥青、随钻防塌堵漏剂、碳酸钙、包被剂、降失水剂等。抗温低于 150℃,粘度较高(80~120 s),失水量较大(15~20 mL)。3100 m 后转换成高温防塌钻井液体系,共完成钻井工作量 605 m。取得的效果如下。

(1)抗温能力强。原钻井液稠化严重,见图 1。调整后的耐高温钻井液未出现明显增稠(或胶凝)及减稠现象,最高使用温度 236 ℃。



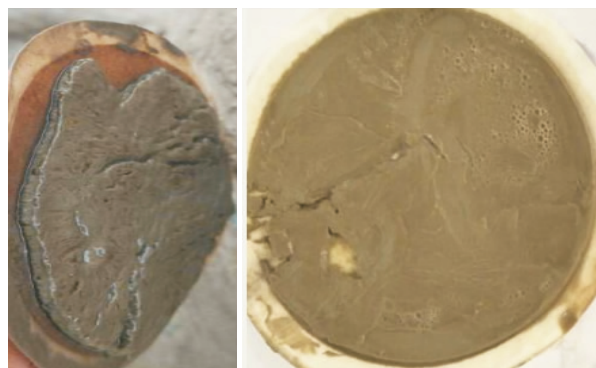
(a) 调整前钻井液流变性能(稠化严重)



(b) 调整后钻井液流变性能

图 1 高温钻井液调整前后流变性能

(2)护壁效果显著。GR1 井裸眼井段达 1800 m,裸露时间达 100 d,钻至 3100 m 后转化为耐高温钻井液,造壁性能好,井壁稳定,无遇阻,保证了后续作业顺利进行。钻井液转化前后泥皮质量见图 2。



(a) 原钻井液泥皮质量 (b) 调整后钻井液泥皮质量

图 2 转化前后钻井液的泥皮质量变化

(3)流变性能好。具有良好的流变性能,泵压稳定,岩屑携带效果好,地表利用振动筛即可较好的清除钻井液中的岩粉,钻井液密度保持相对稳定,见图 3。



(a) 井口返出的钻井液状态



(b) 振动筛分离出的岩粉

图 3 耐高温钻井液现场情况

(4)泡沫显著减少。高温井段钻进时,产生大量的泡沫,但该钻井液加入消泡剂后,泡沫更容易清除。

##### 4.2 耐 180 ℃ 高温钻井液在山西晋中榆次地热井中的应用

###### 4.2.1 配方及性能

配方:3%~4%钠土+2%改性沥青 GLA+1%

~2%封堵剂 GFD-1+1%~2%降失水剂 GPNH+1%~2%随钻防塌堵漏剂+0.1%~0.5%增粘剂+0.1%~0.2%包被剂+重晶石。实验性能为:温度 180℃,漏斗粘度 100~120 s,密度 1.30~1.35 g/cm<sup>3</sup>,API 失水量 4~5 mL,泥皮厚 1~2 mm。

#### 4.2.2 高温钻井液现场应用效果

(1)护壁效果好。该孔钻进至 2800~3100 m 时,坍塌掉块较严重(见图 4),在原钻井液基础上增加防塌剂和封堵剂,后续钻进过程中无坍塌、掉块现象。

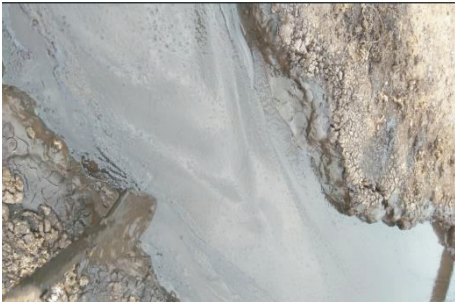


图 4 2800~3100 m 扫孔带出的掉块

(2)流变性好。通过补充包被剂及高温增粘剂,调整后的钻井液具有良好的流变性能(见图 5),泵压稳定(8~10 MPa)。



(a) 调整前钻井液流变性能



(b) 调整后钻井液流变性能

图 5 180℃高温钻井液调整前后流变性对比

(3)除砂效果好。原钻井液粘度比较高(200~300 s),岩粉基本不沉降,导致粘度虚高,密度变化幅度大。调整后的高温钻井液,通过加入包被剂及合理使用固控设施,清除钻井液中的岩粉,密度稳定

(参见图 6)。



图 6 振动筛清除的岩粉

## 5 结语

国内外耐高温钻井液技术发展迅速,研制了大量的高温处理剂和配方,但是目前国内处理剂抗温能力不超过 200℃。因此,在耐高温钻井液作用机理、造浆材料、处理剂、配方、仪器等方面需要开展大量的研究工作,为未来深井和超深井钻探以及未来准备实施的万米科学钻探提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].山东东营:中国石油大学出版社,2005.
- [2] 高德利,等.复杂地质条件下深井超深井钻井技术[M].北京:石油工业出版社,2004.
- [3] 闫磊,蒋卓,王大勇,等.干热岩抗高温钻井液体系研究[J].化学与生物工程,2015,32(7):55-58.
- [4] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘查的有关技术问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.
- [5] 尤新军,王敏生.高温地热高效开发钻井关键技术[J].地质与勘探,2016,52(4):718-724.
- [6] 孙知新,李百祥,王志林.青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J].水文地质工程地质,2011,38(2):119-124.
- [7] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):1-6.
- [8] 蒋官澄,姚如钢,李威,等.高温高密度盐水基钻井液性能[J].东北石油大学学报,2014,38(2):74-79.
- [9] 胡继良,陶士先,单文军,等.超深井高温钻井液技术概况及研究方向的探讨[J].地质与勘探,2015,48(1):155-159.
- [10] 单文军,陶士先,付帆,等.抗 240℃高温钻井液技术[J].钻井液与完井液,2014,31(4):10-13.
- [11] 孙金声,杨泽星.超高温(240℃)水基钻井液体系研究[J].钻井液与完井液,2006,23(1):15-18.
- [12] 张斌.超深井、超高温钻井液技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
- [13] 赖晓晴,楼一珊.超高温地热井泡沫钻井流体技术[J].钻井液与完井液,2009,26(2):37-38.
- [14] 沈炎,刘俊,程晓年,等.泡沫流体钻井技术在肯尼亚 OW904 超高温地热井的应用[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2009,11(4):16-18.