

高温海水钻井液现状及关键技术研究

单文军¹, 呼和满都拉², 陶士先¹, 刘文武¹, 刘娜¹

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:在重点介绍国内外抗高温海水钻井液处理剂及钻井液体系的研究与应用情况的基础上,提出了几点针对高温海水钻井液未来研究方向的建议,抗 200 °C 以上抗盐关键处理剂(如抗盐降滤失剂、增粘剂、防塌抑制剂、润滑剂等)、海水体系、检测仪器、高温环保等是超高温海水钻井液技术研究的方向。

关键词:海水钻井液;高温;环保;抗盐;抗钙

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0013-06

Research on status and key technologies of high-temperature seawater drilling fluids

SHAN Wenjun¹, HUHE Mandula², TAO Shixian¹, LIU Wenwu¹, LIU Na¹

(1.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

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

Abstract: This paper focuses on the research and application of anti-high temperature seawater drilling fluid additives and systems at home and abroad with some suggestions put forward for the future research directions in key technologies of high temperature seawater drilling fluids, including key salt resistant additives at above 200°C (such as: salt-resistant filtration reduction agent, tackifier, anti-collapse inhibitor, lubricant), seawater systems, testing instruments, environmental friendliness, etc.

Key words: seawater drilling fluids; high temperature; environmental friendliness; anti-salt; anti-calcium

随着国家深海战略的实施和南海天然气水合物的试采成功,我国未来可能(必然)实施深海钻探。以南海为例,实施深海钻探,井底温度预计达到 200 °C 以上,抗高温海水钻井液是深海钻探关键技术之一。高温海水钻井液将面临超高温高压环境,良好的流变性、低滤失量、环保等是目前亟待解决的关键技术问题。

1 国外高温海水钻井液技术研究现状

1.1 钻井液处理剂

国外一直在研究抗污染的高温、高电解质乙烯

基磺酸、丙烯酰胺及乙烯基乙酰胺等合成的多元共聚物类钻井液处理剂,并在深井、超深井钻探中得到了良好的应用^[1-2]。例如: BASF 公司开发了 Polydrill 高温磺化聚合物降滤失剂,耐温可达 260 °C,抗 KCl 和 NaCl 至饱和,抗 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量达 7.5%~10%; 贝克休斯公司开发了由 AMPS 和 AM 共聚合成的 Pyro-Trol 和 AMPS 与 N-烷基丙烯酰胺(NAAM)共聚合成的 Kem Seal 等 2 种高温降滤失剂,适用于 260 °C 高温地层的海洋钻井中; ARCO 公司研制的抗高温降滤失剂 Mil-Tem,主要是由磺化苯乙烯(SS)和马来酸酐(MA)共聚而

收稿日期:2019-01-21; 修回日期:2019-04-16 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.05.003

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“高温钻井液多因素钻具腐蚀机理及评价方法研究”(编号:41802196);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20190586)

作者简介:单文军,男,汉族,1985 年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事钻井液、钻井工艺相关领域的研究工作,北京市海淀区学院路 29 号探工楼 606,82675667@qq.com。

通信作者:呼和满都拉,男,蒙古族,1994 年生,中国地质大学(北京)在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事钻井液、钻井工艺相关领域的研究工作,北京市海淀区学院路 29 号探工楼,huhe12404@163.com。

引用格式:单文军,呼和满都拉,陶士先,等.高温海水钻井液现状及关键技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):13-18.

SHAN Wenjun, HUHE Mandula, TAO Shixian, et al. Research on status and key technologies of high-temperature seawater drilling fluids[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):13-18.

成,抗温达 229 °C,其粘均相对分子量在 1000 ~ 5000 之间。上述处理剂产品存在的主要问题是抗盐效果有限,不能避免矿化度增大条件下溶液粘度下降的缺陷。

MI-SWACO 公司研制的高温聚合物降滤失剂 Calovis FL^[3-5] 主要是由丙烯酰胺(AM)、磺化单体(AMPS)、N-乙基吡咯烷酮三元共聚合成,抗温 232 °C,控制在高温高压条件下的流变性能和滤失量;由丙烯酰胺、磺化单体(AMPS)合成的聚合物 Calovis HT,抗温达 260 °C;页岩抑制包被剂阴离子丙烯酸共聚物 Calothin,抗温达 232 °C;有机共聚物无铬稀释剂 Calosperse,抗温达 204 °C;页岩封堵剂 Poroseal 和高温钠蒙脱石粘土 Gel Supreme。

PERRICONE A C 等^[6] 研制了乙烯磺酸共聚物降滤失剂 COP-1 和 COP-2,并在现场取得成功应用。COP-1 应用于部分井温超过 260 °C 的钻井中,可与褐煤类物质协同控制。COP-2 应用于井温超过 177 °C,并与木质素磺酸和褐煤协同作用。

Halliburton 公司^[7] 研制了一种新型聚合物添加剂 FLA,抗温达 180 °C,所配制的钻井液具有极低的塑性粘度、较高的动切力,解决了岩屑携带及井眼清洁问题。

Chevron Phillips 公司研制的超高温盐水体系用聚合物,其中 HE[®] 100 合成聚合物(>170 °C,甲酸盐体系中>230 °C)、HE[®] 150 合成聚合物(>170 °C,甲酸盐体系中>250 °C)、Driscal[®] D(提粘、降失水剂 170~260 °C)和 EXP-S192 合成聚合物(提粘、提切剂>260 °C)。

Carl Thaemlitz 等人^[8] 通过丙烯酰胺、磺酸盐单体、交联剂单体,研制了一种降滤失剂,抗温达 232 °C,抗氯离子 12.6 g/L,抗钙离子 0.344 g/L。将加量 3% 的该降滤失剂加入 KCl、石灰泥浆和海水,在 232 °C 下老化 16 h,其滤失量分别为 17.6、25.2、23.2 mL,降滤失效果显著。

Clapper 等人研制了一系列抗高温抗盐降滤失剂,主要由丙烯酰胺、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸、N-乙基吡咯烷酮以及各自的衍生物为单体共聚而成,抗温达 260 °C,抗 NaCl 达 10%。该降滤失剂经 260 °C/16 h 老化后的 API 滤失量依旧控制在 3.0 mL 以内。

1.2 高温海水钻井液体系

1.2.1 高温聚合物钻井液体系

近些年,国外油田化学品公司在环境友好的高温聚合物水基钻井液方面开展了一系列研究工作,主要围绕以下几个方面开展工作:低钻井液毒性、提高关键处理剂的抗温性、增强钻井液的抑制防塌性能等。

M-I 公司^[9] 研制了两种环保型高性能水基钻井液体系:Ultradrill 和 HydraGlyde,主要处理剂有低分子量聚丙烯酰胺、ROP 增速润滑剂和聚胺抑制剂,该环保型高性能水基钻井液体系性能接近油基钻井液体系,在井眼净化、井壁稳定和提高机械钻速方面效果相当。

EXXON 公司^[10] 合成了一种高温聚合物处理剂,形成了无生物毒性的抗高温海水体系(EHT),在某井井底最高使用温度达 215 °C,高温海水泥浆在 204 °C 老化(16 h)后,生物毒性通过美国环保署(EPA)检测,无毒,可排放。

斯伦贝谢公司研制的 Envirotherm NT 钻井液体系^[11],抗温达 232 °C,密度 2.20 g/cm³,无铬,低毒性、海洋环境接受性好。

卡博特公司^[12-13] 采用 Dristemp 增粘降滤失剂、甲酸铯加重剂等形成一种无固相耐高温钻井液体系,现场应用抗温达到 215 °C,密度达到 2.25 g/cm³。

Halliburton 公司研制了高温聚合物增粘提切剂 FLA,形成了一种抗 204 °C 高温环保无固相聚合物钻井液体系,无毒性,可直接排放。

英国 MGS 公司^[14] 研制了一种纳米水溶性增粘降滤失剂 Pure-Bore,形成了 Pure-Bore 高性能水基钻井液,配方:0.75% Pure-Bore + 1.0% Pure-Bore LV + 1.7% 封堵剂 + 5% KCl + 25% NaCl + 重晶石。该体系具有高剪切稀释性,井眼清洁能力强,环境友好,易生物降解,可直接排放。

1.2.2 甲酸盐钻井液体系

Shell 开发的甲酸钠钻井液体系 SFX-1 抗温达 150 °C^[15],甲酸钾钻井液体系 PFX-1 在 170 °C 条件下表现出较好热稳定性。典型配方为:350 mL 甲酸盐盐水 + 0.5 g 黄原胶 + 2 g 高粘 PAC + 1 g 低粘 PAC + 20 g 碳酸钙 + 0.5 g 碳酸氢钾或碳酸钾。可以用甲酸铯将钻井液密度调至 2.3 g/cm³,但甲酸铯价格昂贵。

1.2.3 钙盐钻井液体系

Halliburton 公司^[16] 研制了一种能提高产能的

高密度 $\text{CaBr}_2-\text{CaCl}_2-\text{CaCO}_3$ 钻井液,并应用在埃及地中海海上气田。基于实验室研究结果,添加捕氧剂可将该体系的抗温能力提高至 $162\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2.4 高密度低固相钻井液体系

Halliburton 公司研制的抗 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 高温无固相钻井液体系,主要处理剂是一种新型聚合物添加剂 FLA,配方为:135.15 L 甲酸铵+22.26 L Glycol+1.59 L 水+0.22 g 柠檬酸+1.11 g 聚合物 FLA+0.47 g 聚合物 C+1.11 g 聚合物 D+0.95 g 聚合物 E+4.45 g 碳酸钙($5\text{ }\mu\text{m}$)+1.91 g 碳酸钙($25\text{ }\mu\text{m}$)+0.08 g MgO+0.08 g 抗氧化剂。该体系经过 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 热滚 20 h,流变性能稳定;动态循环模拟测试温度超过 $232\text{ }^\circ\text{C}$,粘度维持稳定。

1.2.5 高温油基钻井液体系

斯伦贝谢 MI-SWACO 公司^[17-20]新研发了一种抗温 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 、密度可达 2.04 g/cm^3 的超高温油基钻井液 RHADIANT,适用于所有油基和合成基钻井液,主要处理剂有 3 种,高温主乳化剂 MULXT,配浆加量 $2\%\sim 3\%$,抗温 $260\text{ }^\circ\text{C}$;高温主降滤失剂胺化单宁 ONE-TROL HT,加量 $1\%\sim 3\%$,抗温 $260\text{ }^\circ\text{C}$;辅助降滤失剂合成聚合物 ECOTROLHT,加量 $0.5\%\sim 1\%$,抗温 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2.6 氟基逆乳化钻井液体系

Halliburton 公司^[21]研制了氟基逆乳化超高温钻井液,该体系以氟基聚醚油、氟基乳化剂等组成,油水比 $60:40\sim 80:20$,抗温达到 $315\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,具有良好的热稳定性、抑制、润滑、抗污染和抗腐蚀性。该体系目前还处于室内基础理论研究阶段,现场应用还需要大量的研究工作。

2 国内高温海水钻井液技术研究现状

2.1 钻井液处理剂

中海油能源发展有限公司采油技术服务公司王仲广等人^[22],以 AA、AM、AMPS、DMDAAC 为单体,合成了两性离子聚合物抗高温抗海水降滤失剂,该聚合物在海水中的降滤失效果显著,在海水浆中的抗温能力在 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,解决了聚合物在高温高盐情况下易降解的问题,能够满足海洋高温钻井对降滤失剂的需求。

白秋月^[23]研制了一种耐温耐盐钻井液降滤失剂,主要由 MAA/AMPS/DMDAAC/NVP 四元共聚而成,抗温达 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

中国石油集团工程技术研究院^[24],合成出了抗 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的磺酸盐共聚物降滤失剂 DSP。

全红平等人^[25]合成了一种抗高温抗盐聚合物降滤失剂,抗温达 $200\text{ }^\circ\text{C}$,抗 NaCl 达 30% 和抗 CaCl_2 达 10% 。

黄维安等人^[26]以 N,N-二乙基丙烯酰胺(DEAA)、AMPS、NVP、二甲基二烯丙基氯化铵为单体,合成了超高温聚合物降滤失剂 HTP-1,抗盐超过 20% ,抗温达 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 。

王松^[27]以 2-甲基丙烯酰氨基-2-甲基丙磺酸等主要单体为基本单体,配合其它几种特定的乙烯基单体,合成了一种抗温达 $210\text{ }^\circ\text{C}$ 、抗 $4\%\text{CaCl}_2$ 、抗盐至饱和的降滤失剂。将该降滤失剂分别在淡水泥浆、饱和盐水泥浆、含钙泥浆($4\%\text{CaCl}_2$) $210\text{ }^\circ\text{C}$ 高温老化 24 h,其塑性粘度分别为 13.5 、 26.0 、 $9.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$,滤失量分别为 9.5 、 19.5 、 40.5 mL 。

王中华^[28]以丙烯酰胺、AMPS、丙烯腈为原料,合成了一种降滤失剂,在盐水钻井液中抗温达 $200\text{ }^\circ\text{C}$,在 $1\%\text{CaCl}_2$ 钻井液中抗温达 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 。以丙烯酰氧丁基磺酸、2-丙烯酰氧-2-甲基丙磺酸钠和 N,N-二甲基丙烯酰胺与丙烯酰胺、丙烯酸为原料合成了一种降滤失剂,抗盐 $10\%\sim 30\%$,抗温达 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 。将 0.5% 该降滤失剂加入淡水泥浆、盐水泥浆($4\%\text{NaCl}$)、饱和盐水泥浆、含钙泥浆($10\%\text{CaCl}_2$)中,其塑性粘度分别为: 24 、 11 、 12.5 、 $4.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

国内近些年针对抗高温海水钻井液处理剂的研究主要集中在抗高温、抗盐性能上,目前国内可以满足 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以内的高温深井钻井需求。但对耐温超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、耐盐至饱和的高温聚合物、降滤失剂、防塌剂、润滑剂、抑制剂、消泡剂等研究仍有不足。

2.2 钻井液体系

(1)中海石油(中国)有限公司湛江分公司张万栋等人^[29],针对南海西部东方区域中深层高温高压气田开发钻井过程中下部地层使用水基钻井液钻井过程中容易出现井壁失稳、摩阻扭矩大的技术难题,从多方面来评价 MEGADRIL 油基钻井液,该油基钻井液热稳定性好,耐温达 $150\text{ }^\circ\text{C}$,具有较高的润滑性,储层保护效果好。

MEGADRIL 油基钻井液配方:O/W($7:3$, $25\%\text{CaCl}_2$)+ $0.855\%\text{Versagel HT}$ + $4.3\%\text{ONE-MUL}$ + $2.85\%\text{CaO}$ + $1.43\%\text{Versatrol HT}$ + $0.285\%\text{Ecotrol RD}$ + $1\%\text{VERSAWET}$ +优质重晶

石(密度 1.9 g/cm^3)。

(2) 中国石油集团工程技术研究院刘晓栋等人^[30], 针对大港滨海地区高温地层存在的井壁稳定、漏失、坍塌、钻井液维护困难等施工难点, 研制了抗 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的磺酸盐共聚物降滤失剂 DSP, 通过室内试验优选出抗 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温海水基钻井液。该体系在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温条件下具有良好的高温流变性、热稳定性, 抑制性和润滑性; 抗盐达 $8.0 \times 10^4 \text{ mg/L}$, 抗钙达 $5.0 \times 10^3 \text{ mg/L}$, 可满足大港滨海区块探井高温高效、提速钻井、海上环境保护的要求。

(3) 聚磺钻井液可应用于 $150 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温深井, 但磺化类抗高温处理剂生物毒性高(SMP-1、磺化沥青, 生物毒性值分别为 $36050, 8000 \text{ mg/kg}$), 色度大, 不能满足排放要求, 与国外低毒性高温聚合物水基钻井液性能有一定差距。

(4) 长城钻探工程公司工程技术研究院杨鹏等人^[31], 以丙烯酰胺、丙烯酸、磺酸基共聚物、阳离子单体等合成了可抗 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温的磺酸盐共聚物增粘降滤失剂 SSDP。通过对抗高温抗盐增粘剂、润滑剂、降滤失剂和防塌抑制剂等处理剂的优选和复配, 研制了一种抗高温海水无粘土相钻井液, 耐高温能力达 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

抗高温无粘土相钻井液配方: 海水 + $0.2\% \text{ Na}_2\text{CO}_3$ + $0.6\% \text{ SSDP}$ + $0.8\% \text{ DDL}$ + $0.8\% \text{ PAM}$ + $0.5\% \text{ JL-8}$ + $3.0\% \text{ SL-II}$ + $3.0\% \text{ 超细碳酸钙}$ + $1.0\% \text{ HL-8}$ + $2\% \text{ AP-1}$ 。

(5) 中海石油(中国)有限公司湛江分公司吴江等人^[32], 研制了一种新型抗温高密度油基钻井液体系。配方: $5 \text{ 号白油}(85:15 \text{ 油水比})$ + $4.28\% \text{ 乳化/润湿剂}$ + $0.285\% \text{ 降失水剂}$ + $2.85\% \text{ 石灰}$ + $1.5\% \text{ 有机土}$ + $2\% \text{ 抗高温降失水剂}$ + 水相($26\% \text{ CaCl}_2$ 溶液) + 重晶石, 密度加重至 2.0 g/cm^3 。

(6) 西南石油大学朱宽亮等人^[33], 研制了一种抗 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温的海水钻井液, 具有良好的流变性和热稳定性, 高温高压失水量低。配方: $5\% \text{ 海水基浆}$ + $1.5\% \sim 2.0\% \text{ SMP-II}$ + $2\% \sim 3\% \text{ SPNH}$ + $2\% \text{ DSP}$ + $5\% \text{ 甲酸钾}$ + $2\% \text{ 超低渗成膜封堵剂}$ + $0.1\% \text{ 热稳定剂 A-20}$ + $2\% \text{ 聚合醇}$ + $0.3\% \text{ SP-80}$ + $0.4\% \text{ 亚硫酸钠}$ + 重晶石。实验流变性能见表 1。

表 1 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温海水钻井液流变性能

Table 1 Rheological properties of high temperature seawater drilling fluids at $200 \text{ }^\circ\text{C}$

实验条件	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	PV/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	YP/ Pa	Gel/ Pa/ Pa	FL/ mL	泥饼 厚/mm	FL _{HTHP} / mL
热滚前	1.47	82	23	3.5/7.5	2.4	0.1	11.8
热滚后	1.47	47	12	6.5/19.5	4.0	0.1	11.2

3 高温海水钻井液关键技术研究

(1) 研制高温高密度高矿化度条件下抗盐处理剂(高温抗盐降滤失剂、抗盐抑制防塌剂、抗盐增粘剂、环保型润滑剂、消泡剂等)及其在高温条件下作用机理研究; 重点研究处理剂关键官能团、分子量、聚合度等在高温、高矿化度条件下性能变化规律研究。

(2) 研制或优选适合于高矿化度钻井液抗氧化保护剂, 提高整体抗温性能。

(3) 超高温、超高压、高矿化度地层井壁稳定技术。

(4) 高温、高密度、高矿化度新型无毒、环保型海水钻井液体系。

(5) 高温海水钻井液缓蚀剂、评价方法及腐蚀机理研究。

(6) 高温海水钻井液评价仪器研究。

4 结论

综上所述, 国内外对高温海水钻井液的研究有很大进展, 但是关于高温海水钻井液中的多电解质在高温条件下的相互作用机理研究较少。针对多电解质高矿化度条件处理剂及体系高温失效问题, 以及高温高压高矿化度深海钻探面临处理剂耗量大的问题, 应在抗高温海水钻井液的造浆材料、处理剂、体系等方面开展大量的研究工作, 开发配伍性能优良的海水钻井液高温、抗盐等处理剂的研制, 进一步研制耐 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温海水钻井液体系, 可为深海钻探、天然气水合物钻探及深部油气钻探提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] 王显光, 杨小华, 王琳, 等. 国内外抗高温钻井液降滤失剂研究与应用进展[J]. 中外能源, 2009, 14(4): 37-42.

- WANG Xianguang, YANG Xiaohua, WANG Lin, et al. Advances in researching and applying filtrate reducers with resistance to high temperature at home and abroad[J]. *Sino-Global Energy*, 2009, 14(4): 37-42.
- [2] 徐同台, 赵文举. 21 世纪初国外钻井液和完井液技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- XU Tongtai, ZHAO Wenju. Foreign drilling fluid and completion fluid technology in the early 21st Century[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [3] TEHRANI A, YOUNG S, GERRARD D, et al. Environmentally friendly water based fluid for HT/HP drilling [R]. SPE121783, 2009.
- [4] 刘晓栋, 朱红卫, 高永会. 海洋超高温高压井钻井液设计与测试方法及国外钻井液新技术[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(5): 47-52.
- LIU Xiaodong, ZHU Hongwei, GAO Yonghui. Drilling fluid design and test method for offshore ultra-HTHP wells and new drilling fluid technology abroad[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(5): 47-52.
- [5] 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.
- [6] PERRICONE A C, ENRIGHT D P, LUCAS J M. Vinyl sulfonate copolymers for high-temperature filtration control of water-based muds[R]. SPE 13455, 1986.
- [7] EZELLRG, HARRTSON D J. Design of improved high-density, thermally-stable drill-in fluid for HTHP applications[R]. SPE 115537, 2008.
- [8] THAEMLITZ C J, PATEL A D, GEORGE C, et al. New environmentally safe high-temperature water-based drilling-fluid system[R]. SPE 57715, 1999.
- [9] HODDER M H, POPPLESTONE A, GWYNNE P, et al. High-performance water-based drilling fluid helps achieve early oil with lower capital expenditure[C]//SPE Program Committee, Special for the Offshore Europe, 2005.
- [10] ELWARD - BERRY J, DARBY J B. Rheologically stable nontoxic high-temperature water-base drilling fluid[J]. SPE 24589, 1997.
- [11] FERNANDEZ J, YOUNG S. Environmentally acceptable water based fluids for HTHP applications[C]//OMC 2011 Program Committee, Special for the Tenth Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, 2011.
- [12] DOWNS J D. Drilling and completing difficult HP/HT wells with the aid of cesium formate brines-a performance review [C]//IADC/SPE Program Committee, Special for the IADC/SPE Drilling Conference, 2006.
- [13] BERG P C, PEDERSEN E S, LAURITSEN Å, et al. Drilling and completing high-angle wells in highdensity, cesium formate brine-the kvitebjørn experience [C]//IADC/SPE Program Committee, Special for the IADC/SPE Drilling Conference, 2009.
- [14] GALINDO K A, ZHA W, ZHOU H, et al. High temperature, high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells[C]//SPE Program Committee, Special for the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2015.
- [15] 夏小春, 赵志强, 郭磊, 等. 国外 HTHP 水基钻井液的研究进展[J]. *精细石油化工进展*, 2010, 11(10): 1-8.
- XIA Xiaochun, ZHAO Zhiqiang, GUO Lei, et al. Progress of research on HTHP water-base drilling fluid overseas[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2010, 11(10): 1-8.
- [16] Ezzat, A. M., Gamal Medhat, D' Angelo S. High density brine-based drill-in fluid improved reservoir producibility in gas field offshore egypt[C]// Paper SPE112950 presented at the 2008 North Africa Technical Conference and Exhibition, Morocco, 2008: 12-14.
- [17] Per Cato Berg, Erik Sandtorv Pedersen, Åshild Lauritsen, et al. Drilling and completing high-angle wells in high-density, Cesium Formate Brine—the Kvitebjørn Experience, 2004-2006[J]. *SPE DRILLING and COMPLETION*, 2009, 24(1): 15-24.
- [18] LEE J, SHADRAVAN A, YOUNG S. Rheological properties of invert emulsion drilling fluid under extreme HPHT conditions[R]. SPE 151413, 2012.
- [19] STAMATAKIS E, YOUNG S, De STEFANO G. Meeting the ultra HTHP fluids challenge[R]. SPE 153709, 2012.
- [20] T AUGBOL K, GUNNAR F, PREBENSEN O, et al. Development and field testing of a unique high temperature and high pressure (HTHP) oil based drilling fluid with minimum rheology and maximum sag stability[R]. SPE 96285, 2005.
- [21] DEVILLE J, PASQUIER D, ROVINETTI S, et al. Fluorinated-based drilling fluid for ultra-high temperature wells [R]. SPE 166126, 2013.
- [22] 王仲广, 唐红霞, 王涛, 等. 抗高温抗海水降滤失剂的研究与性能评价[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(2): 14-15.
- WANG Zhongguang, TANG Hongxia, WANG Tao, et al. Study and evaluation of a high temperature seawater filtration reducer[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(2): 14-15.
- [23] 白秋月. DMAA/AMPS/DMDAAC/NVP 四元共聚耐温耐盐钻井液降滤失剂的研制[J]. *油田化学*, 2017, 34(1): 1-5.
- BAI Qiuyue. Preparation of DMAA/AMPS/DMDAAC/NVP quaternary copolymer anti-temperature and salt resistant filtrate reducer for drilling fluids[J]. *Oilfield Chemistry*, 2017, 34(1): 1-5.
- [24] 刘晓栋, 徐鸿志, 王宇宾. 大港滨海区块磺酸盐共聚物高温海水基钻井液[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(6): 30-33.
- LIU Xiaodong, XU Hongzhi, WANG Yubin. Study on high temperature sulphonate copolymer sea water based drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(6): 30-33.
- [25] 全红平, 吴洋, 黄志宇, 等. 抗高温耐盐型钻井液用降滤失剂的合成与性能评价[J]. *化工进展*, 2015, 34(5): 1427-1432.
- QUAN Hongping, WU Yang, HUANG Zhiyu, et al. Synthesis and performance evaluation of fluid loss additive for high temperature resistant and salt tolerant drilling fluid[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(5):

- 1427-1432.
- [26] 黄维安,邱正松,徐加放,等.超高温抗盐聚合物降滤失剂的研制及应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):155-158.
HUANG Weian, QIU Zhengsong, XU Jiafang, et al. Development and application of ultra-high temperature anti-salt polymer fluid loss reducer[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(1):155-158.
- [27] 王松.抗高温钻井液降滤失剂 JHW 的评价与应用[J].精细石油化工进展,2001,2(8):10-12.
WANG Song. Evaluation and application of high temperature-resisting filtrate loss reducer JHW for drilling fluid[J]. Advances In Fine Petrochemicals, 2001,2(8):10-12.
- [28] 王中华.钻井液降滤失剂 P(AMPS-IPAM-AM)的合成与评价[J].钻井液与完井液,2010,27(2):10-13.
WANG Zhonghua. The synthesis and evaluation of P(AMPS-IPAM-AM) as a filtration reducer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010,27(2):10-13.
- [29] 张万栋,吴江,蒋官澄,等.MEGADRIL 油基钻井液在南海西部高温高压气田的适用性研究[J].长江大学学报(自科版),2018,15(1):43-49.
ZHANG Wandong, WU Jiang, JIANG Guancheng, et al. Applicability analysis of MEGADRIL oil-base drilling fluid in HTHP gas field in the west of South China Sea[J]. Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit), 2018,15(1):43-49.
- [30] 刘晓栋,高永会,谷卉琳,等.低生物毒性高温聚合物钻井液体系研发及应用[J].中国海上油气,2018,30(2):138-144.
LIU Xiaodong, GAO Yonghui, GU Huilin, et al. Development and application of low biotoxic and high temperature polymer drilling fluid system[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018,30(2):138-144.
- [31] 杨鹏,吕开河,隗虎,等.抗高温海水无黏土相钻井液研究[J].钻井液与完井液,2012,29(6):21-23.
YANG Peng, Lü Kaihe, KEI Hu, et al. Research on high temperature seawater base clay-free drilling fluid system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012,29(6):21-23.
- [32] 吴江,李炎军,张万栋,等.南海西部高温高压小井眼水平井钻完井储层保护技术研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):18-22.
WU Jiang, LI Yanjun, ZHANG Wandong, et al. Research and practice of reservoir protection technology in high temperature and high pressure slim horizontal well drilling and completion in Western South China Sea[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(8):18-22.
- [33] 朱宽亮,卢淑芹,徐同台,等.南堡 5-4 井抗 200℃ 高温钻井液的研究及应用[J].钻井液与完井液,2009,26(2):49-51.
ZHU Kuanliang, LU Shuqin, XU Tongtai, et al. A study and application of high temperature drilling fluid for Well Nanpu5-4[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(2):49-51.

(编辑 韩丽丽)