

文章编号:1000-4092(2022)03-540-08

超高温水基钻井液技术研究现状及发展方向*

张雁,屈沅治,张志磊,王 韧,程荣超,杨 峥

(中国石油集团工程技术研究院有限公司,北京 102206)

摘要:随着油气钻井不断向深部发展,钻遇深部超深部地层温度也越来越高,对钻井技术特别是钻井液技术提出了更高要求。在结合超高温钻井实际需求的基础上,分析了水基钻井液在超高温下的技术壁垒、超高温对水基钻井液效能影响作用,综述了超高温水基钻井液的关键处理剂及其所构建的水基钻井液体系的研究现状,并探讨了超高温水基钻井液的未来发展方向。

关键词:超高温;水基钻井液;研究现状;发展方向;综述

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.03.027

中图分类号:TE357

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



深部油气资源是十余年来各国探明储量的增长主力,不断突破有效资源保持深度下限。近十年来全球新增油气探明储量中有234亿吨油当量处于四千米以深地层,约为同期新增储量的六成以上,油气钻探最大深度为12869 m^[1]。随着我国塔里木、准噶尔、川渝、松辽、柴达木以及南海西部等重点油气区块开发不断向深层进军,高效开发利用深层超深层油气资源,对提升我国能源保障水平,缓解能源对外依存压力,保障国家能源安全具有重大意义。实现深层超深层油气资源的高效勘探与效益开发是油气产业可持续发展的必由之路。

超高温钻井液技术是实现深层超深层钻井的关键核心技术之一。超高温钻井液通常分油基、水基、合成基3种,虑及减少污染及降低成本等方面的需求,本文主要讨论水基钻井液。在超高温(205~260 °C)环境下^[2],水基钻井液往往面临抗温能力不足,无法安全钻井的难题,亟需厘清现今超高温水基钻井液存在的技术壁垒,加快研制性能

优良的关键处理剂,构建高效超高温水基钻井液体系。

1 水基钻井液超高温工况下面临的技术挑战

水基钻井液主要由造浆黏土、处理剂、钻屑及水组成,其效能优劣与钻井液中的黏土、处理剂及其相互作用紧密相关。聚合物类关键处理剂(如降滤失剂等)在超高温作用下易发生高温降解、交联等作用,而黏土矿物易发生高温聚结、表面钝化等作用,另外,超高温还会削弱处理剂在黏土表面的吸附作用,影响处理剂效能发挥。

研究人员针对超高温(240 °C)环境对10种国内外最新研制的抗高温聚合物类处理剂产品基本性能影响进行了研究,具体结果见图1^[3]。在处理剂及造浆黏土超高温性能失稳的综合影响下,基于处理剂及黏土矿物类型和含量的不同,钻井液会发生高温增稠、减稠、胶凝、固化、滤失量增加、

* 收稿日期:2022-03-16;修回日期:2022-04-12。

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“抗温240 °C以上的环保井筒工作液新材料”(项目编号020A-3913),“海陆过渡相页岩气钻完井技术研究”(项目编号2021DJ2003)。

作者简介:张雁(1989—),女,工程师,中国地质大学(北京)石油与天然气工程专业博士(2019),从事钻井液技术研究,通讯地址:102206北京市昌平区黄河街5号院1号楼,电话:010-80162070, E-mail: zhangyandr@cnpc.com.cn。

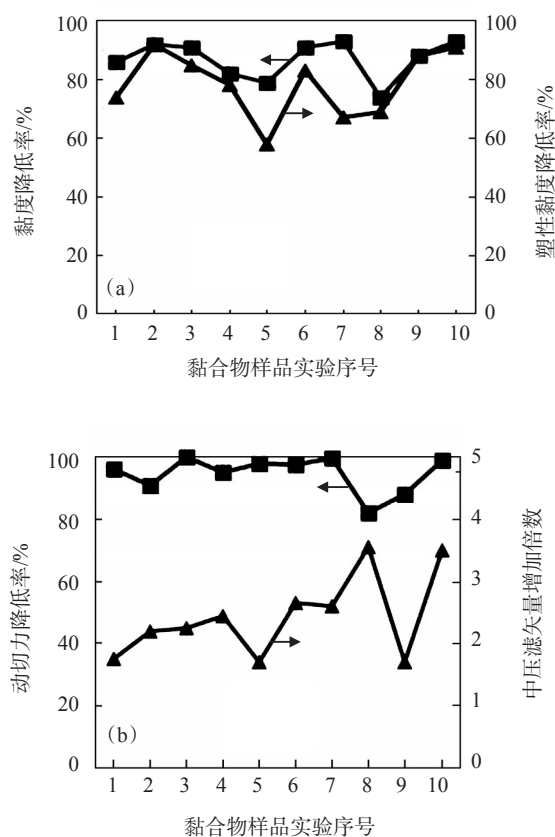


图1 240 °C老化前后抗高温聚合物类产品在4%基浆中性能^[3]

pH值失稳等变化,进而导致钻井液效能变弱甚至完全失效。

为保证在超高温钻井过程中钻井液发挥必要的效能,与浅层常规钻井相比会耗费更大量的处理剂,且随着温度的升高及钻进时间的延长,处理剂消耗增多,深井超深井钻井液的技术问题也越难以解决,高效勘探与效益开发难以实现。

2 超高温对水基钻井液效能影响作用

水基钻井液解决抗超高温的难点在于如何调节并保障钻井液在超高温工况下稳定发挥效能,要解决钻井液抗超高温这一技术难题,需厘清超高温对水基钻井液效能影响作用机理。

2.1 处理剂在超高温下的降解作用

对无机处理剂而言,超高温作用可通过增强无机离子热运动而提升其穿透能力,但超高温作用对有机处理剂的影响则较为复杂。在超高温作用下,钻井液的有机处理剂易发生降解作用^[4],聚合物分

子链断裂包括主链断裂、亲水基团与主链联结链的断裂两种,示意图见图2。高分子主链断裂使处理剂的相对分子质量减小,高分子性能变弱或消失,进而部分甚至全部失效;亲水基团与主链联结链的断裂削弱了处理剂的亲水性,处理剂的抗盐、抗钙能力因此降低,大大影响其效能发挥。

以降滤失剂为例^[5],聚合物降滤失剂在超高温下发生降解作用,聚合物分子结构变化严重影响钻井液的滤失造壁性能,高温高压滤失量大幅增加,生成的泥饼厚而虚。处理剂热稳定性差会极大地限制其在超高温水基钻井液中效能的发挥。

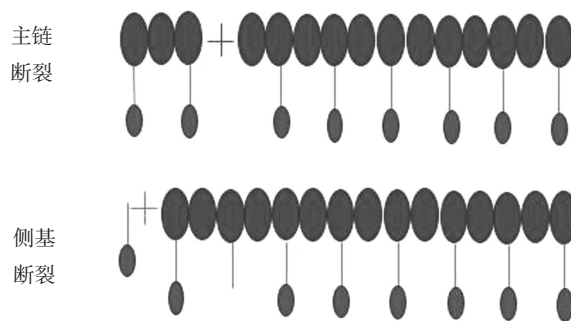


图2 超高温降解作用示意图^[4]

2.2 处理剂在超高温下的交联作用

在超高温下,聚合物类处理剂水溶性分子因不饱和键及活性基团的存在通常会发生交联或自由基聚合反应,使相对分子质量增大。温度超过200 °C时,钻井液处理剂分子中羟甲基与活泼氢发生脱水缩合生成亚甲基桥,导致部分钻井液处理剂发生高温交联,且随着矿化度的升高、离子强度的增加而愈加严重^[6]。结合前述处理剂超高温降解作用,钻井液性能受处理剂超高温交联作用影响有正、反两种可能^[7]。若适度交联,聚合物的相对分子质量适当增加,可部分抵消超高温下降解作用的破坏性,甚至聚合物处理剂会发生改性增效;但若过度交联,则会形成超大分子或体型交联高分子,影响聚合物的水溶性,严重时发生胶凝,丧失钻井液的流动性及水溶性处理剂的功效,从而影响钻井液效能的发挥。

超高温引起的处理剂降解、交联反应,对水基钻井液性能影响是双面的。在减缓和防止超高温对处理剂发生破坏作用的同时,应进一步适度调

控,合理利用超高温对处理剂的增效作用,更好地调整优化钻井液效能。

2.3 黏土颗粒表面处理剂在超高温下的解吸附作用

处理剂吸附在黏土颗粒表面是其效能有效发挥的前提,通过多点吸附于黏土颗粒改善体系原有空间架构,增强护胶能力,从而发挥作用^[8]。吸附为放热反应,温度上升促使平衡向解吸附方向进行,另外温度升高,处理剂分子及黏土颗粒热运动加剧,也不利于吸附。超高温下,分子热运动加剧,黏土表面吸附的处理剂量显著减少,解吸附作用导致处理剂的护胶能力明显下降,黏土颗粒更为分散,钻井液热稳定性及其效能受显著影响,从而导致超高温滤失量骤增,钻井液流变性变差。

以聚合物类降黏剂为例^[9],其降黏作用主要有两方面:一是降黏剂吸附在黏土矿物颗粒表面,增加黏土矿物胶体分散体的Zeta电位,降低其形成空间网架结构的可能性,实现降黏;二是降黏剂与大分子聚合物形成络合物,从而削弱聚合物同钻井液中黏土颗粒间形成的桥联结构,或使聚合物分子链受降黏剂影响而收缩,进而调节钻井液流变性。

2.4 黏土颗粒超高温去水化作用

随着工况温度升高,水中的黏土颗粒会发生水化分散、高温钝化、去水化等作用。在超高温条件下,黏土颗粒去水化作用占据主导地位,其表面和处理剂分子中亲水基团的水化能力急剧变差,水化膜变薄,导致处理剂的护胶能力减弱,出现高温聚结、滤失量增大等情况,严重时高温胶凝、高温固化同时发生,使得钻井液体系性能变差甚至完全失效^[10]。

因此,要破解水基钻井液抗超高温难题,解决黏土的超高温去水化问题是关键。去水化程度除受温度影响外,一定程度上取决于亲水基团类型。由离子基团水化形成的水化膜,高温去水化作用一般较弱;而通过极性键或氢键水化的基团,高温去水化作用相对较强。将抗超高温处理剂加入钻井液中,这些处理剂分子结构本身抗超高温的同时,一般还具有超高温下易与黏土吸附的磺酸基、羧基、胺基等强水化基团。

2.5 热致相分离作用

超高温下聚合物处理剂水溶液的相态变化直接影响钻井液的性能。理论上讲,水基钻井液中各类型聚合物或化合物在超高温下极有可能发生相

分离,其中一相为聚合物或化合物含量较低的“稀相”,另一相为含量较高的“浓相”,即出现热致相分离现象。具有低临界溶解温度(LCST)的聚合物随温度变化发生分子链的伸展与卷曲,直接影响其在固体表面的吸附状态。随着温度逐渐升高,伸展溶解在水溶液中的聚合物逐渐发生卷曲变形,当温度超过LCST时发生相分离。当聚合物吸附在固体表面上时,在较低温度下聚合物分子链一端吸附于固体表面,另一端伸展在水溶液中;而温度超过LCST时,伸展在水溶液中的分子链发生卷曲变形,导致功效大大减弱^[11-12]。

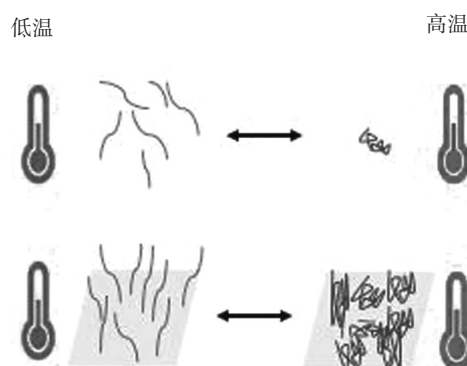


图3 不同温度下聚合物处理剂的溶解特征及在固体表面的吸附状态^[11]

3 超高温水基钻井液技术

深井超深井钻探中钻井液是关乎钻井成败的关键,本文从关键处理剂及其构建的水基钻井液体系进行了综述。

3.1 超高温水基钻井液处理剂

处理剂决定了超高温水基钻井液的效能优劣。近年来,各国研究人员在超高温降滤失剂、降黏剂、增黏剂、储层保护剂等钻井液关键处理剂研发方面开展了大量的研究。

3.1.1 降滤失剂

降滤失剂是油气钻井中需求量最大的钻井液处理剂之一,其对维护钻井液性能稳定、确保安全高效钻进起到重要作用。在抗超高温降滤失剂研发方面,国外研究人员已取得丰硕成果。Dickert等^[13]以AM、AMPS及N-乙烯基-N-烷基酰胺(NVNAAM)等为原料研发的耐高温降滤失剂,在超过200℃时仍具有很好的降滤失效果,所构建的钻井液体系在

弱碱性环境下性能最佳。Patel^[14]以 AMPS 为聚合单体、MBA 为交联剂研制了一种抗高温水基钻井液降滤失剂, 该剂在 200 °C 以上仍具有较好的抗温、抗钙镁性能。Thaemlitz 等^[15]利用自制的新型聚合物构建了一套环保型抗高温水基钻井液体系, 该体系的流变、降滤失性能出众, 耐温 230 °C 以上, 组成简单, 淡水、海水均可配制, 环境适应性强。Soric 等^[16]以乙烯基胺(VA)和乙烯基磺酸(VS)为原料制备了一种抗温 230 °C 以上的降滤失剂 Hostadrill 4706, 该剂的抗盐性能突出, 降滤失效果好。以下介绍几种抗超高温降滤失剂代表产品^[17]: 德国巴斯夫公司推出了抗温达 260 °C 的降滤失剂 Polydrill, 该剂为一种相对分子质量约 20×10^4 的磺化聚合物, 超高温下降滤失效果好, 可抗盐至饱和, 抗钙、镁含量可达 $4.5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \mu\text{g/g}$, 在业内被广泛应用。ARCO 公司生产的一种由磺化苯乙烯(SS)和马来酸酐(MA)共聚制得的降滤失剂 Mil-Tem, 抗温达 229 °C, 相对分子质量为 1000~5000。贝克休斯公司的专利产品 Pyro-Trol 和 Kem Seal 均为抗高温降滤失剂, 前者由 AMPS 和 AM 共聚所得, 后者由 AMPS 与 *N*-烷基丙烯酰胺(NAAM)共聚所得, 两者可配合使用于 260 °C 的超高温地层。

国内研究人员针对超高温水基钻井液降滤失剂也做了大量工作。常晓峰等^[18]合成了抗温 260 °C 的降滤失剂 PDANV, 该剂以 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 和 NaHSO_3 为氧化还原体系, 由 4-乙烯基吡啶、*N*, *N*-二甲基丙烯酰胺、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸、*N*-乙烯基己内酰胺进行自由基共聚制得。王中华等^[19]合成的由丙烯酰胺、丙烯酰氧丁基磺酸、*N*, *N*-二甲基丙烯酰胺三元共聚而成的降滤失剂, 在淡水钻井液、盐水钻井液和饱和盐水钻井液中均具有较强的降滤失和流型调节能力, 在 240 °C 仍具有较好的降滤失性能。杨小华等^[20]合成了抗温 220 °C, 抗 NaCl 达 36% 的降滤失剂 PFL-L, 该剂热稳定性好, 相对分子质量低, 高温高盐情况下的降滤失性能良好, 在徐闻 X-3 井三开长裸眼井段开展的现场应用中取得了良好的应用效果。罗明望等^[21]以 AMPS、DMAM、NVP、DMDAAC 为共聚单体, 以 AIBA 为链引发剂, 通过使用链转移剂, 制备了一种抗温达 230 °C、抗盐 20% 的低相对分子质量的聚合物降滤

失剂 PANAD。黄维安等^[22]以 AMPS、DMDAAC、NVP 及 DEAM 等共聚得到的超高温抗盐降滤失剂 HTP-1, 抗温达 240 °C, 已成功在胜科 1 超深井和泌深 1 超深井进行了应用试验。苏俊霖等^[23]研制的一种含有二氧化硅纳米颗粒的降滤失剂 NFL-1, 加入钻井液后可以改善高分子化合物特性。在 3% 膨润土基浆中添加 3% NFL-1 降滤失剂, 在 220 °C 下热滚 16 h 后的 API 滤失量保持在 8 mL 以下, 具有良好的降滤失效果。

3.1.2 润滑剂

国外抗超高温水基钻井液润滑剂产品丰富, 比如 Alpine 化学公司开发的适用于高温高压水基钻井液的 QUICK SLIDE(润滑悬浮微珠)、BHI 公司的 LATILUBE 润滑剂、Roquette 公司的 POLYSORB 75/05/75 系列高温高压钻井液润滑剂。

国内研究人员也作了大量工作, 杨芳等^[24]研究发现纳米碳球表面光滑、强度高, 不易破碎, 具有良好的润滑作用, 纳米碳球在 250 °C 下仍具有很好的润滑效果, 当加量为 0.4% 时润滑系数的下降率最大达 22.8%, 润滑效果良好。孙金声等^[25]研制的一种含高分子脂肪酸和脂化剂的聚酯化合物的高效润滑剂 GXRH, 具有高耐磨性, 抗温达 200 °C。李斌等^[26]以多元醇合成酯为主剂、与极压添加剂复配而成的水基钻井液用润滑剂 SDL-1, 抗温 180 °C 并能抵抗 30% NaCl、30% CaCl_2 的污染。邱正松等^[27-28]研制了纳米润滑剂 SD-NR 和润滑剂 SDR, 前者通过硅烷偶联剂 KH570 对纳米二氧化硅进行超声表面改性, 再与表面活性剂 S1、菜籽油等复配制得, 后者通过在植物油提取物中引入硫、磷、硼等活性元素合成出一种钻井液用极压抗磨添加剂, 再与表面活性剂、基础油等复配而成。SD-NR 与 SDR 均可抗温 180 °C 以上, 极压润滑持效性强, 极压膜强度高。Tian 等^[29]选用十二烷基苯磺酸钠(SDBS)改性石墨烯为耐高温润滑剂, 在 SDBS/石墨烯的辅助下钻井液在 240 °C 老化后仍具有较高的稳定性。

3.1.3 降黏剂

国外的抗超高温降黏剂代表产品有: Anchor 公司的高温稳定的聚合物类降黏剂 ANCO THIN HTL, Ava 公司的 AVALIG 改性褐煤及 AVATHIN 木质素磺酸盐处理剂, Baroid 公司的 THERMA-THIN、BASF 公司的 ALCOMER 74L 及 POLYTHIN、

Coatex公司的COATEX FP 30 S、Ecofluids公司的ECOSULFONATE、M-I SWACO公司的SPERSENE I、NOV公司的LIQUI-THIN D、Scomi公司的HYDRO-THIN HT等。

贾敏等^[30]合成的超高温抗盐低分子聚合物HTP-2,经240℃老化16h后的降黏效果优于国外的Descofl,优于国内经220℃老化16h的聚合物降黏剂xy-28,耐温抗盐能力强。王富华等^[31]研制了抗温240℃的水溶性两性离子聚合物降黏剂JNL-1,该剂的相对分子质量为6000~8000,分子主链为碳碳键、碳硫键及高价阳离子螯合键。赵晓非等^[32]研制的由苯乙烯、衣康酸等共聚磺化而成的超高温水基钻井液降黏剂SSHIA,抗温260℃,加量0.3%时可使淡水钻井液在260℃老化16h后的表观黏度由59 mPa·s降至32 mPa·s。杜俊涛等^[33]以丙烯酸、衣康酸、2-丙烯酸酰胺基-2-甲基丙磺酸和苯乙烯为单体合成的两种降黏剂,降黏剂加量为0.5%时,淡水基浆于260℃老化16h后的降黏率分别为76.81%和59.54%。樊泽霞等^[34]研制的由磺化苯乙烯、水解马来酸酐共聚而成的降黏剂SSHMA,耐温230℃以上,具有抗盐性,淡水钻井液中加入0.3% SSHMA时,在230℃老化16h后的降黏率大于56%。王飞龙等^[35]以St和MA为原料制备苯乙烯-马来酸酐聚合物(SMA),采用氯磺酸进一步磺化后得到低相对分子质量的水基钻井液降黏剂磺化苯乙烯-马来酸酐(SSMA),在289℃的热稳定性良好。

3.1.4 增黏剂

除了发挥增黏作用外,增黏剂通常还起到调控钻井液动静切力、改善黏弹性、降低滤失量及优化泥饼质量的作用,从而利于稳定井壁和保护储层。国外代表产品主要有:意大利Ava公司的VISCO-TRON、哈里伯顿Baroid公司的THERMA-VIS、贝克休斯BHI公司的MAGMA-GEL等,均可作为增黏剂用于高温高压水基钻井液。Shanmugam等^[36]研究发现两种超高相对分子质量支化嵌段共聚物(UHMW-BCP)微凝胶能耐受淡水、氯化钾盐水和石灰泥浆等不同的水基钻井液,且具有出色的增黏效果和温度稳定性。

邱正松等^[37]以NVCL和SSS为单体、MBA为交联剂合成的增黏剂SDTP,加入在淡水基浆及盐水基浆后经220℃老化16h后的表观黏度保持率均

在90%以上,以此剂为基础的水基钻井液体系已在冀东油田深部潜山储层成功进行了现场应用。谢彬强等^[38]以NaAMPS、VCL及DVB为单体,采用自由基胶束聚合法制备了抗高温聚合物增黏剂SDKP,该剂在2.5%低膨润土钻井液中抗温达230℃,在无固相钻井液中抗温达190℃,具有良好的耐温及增黏性能,效果优于国外同类代表产品HE300。闫丽丽等^[39]以AMPS、DMAM和AN为单体,与其他材料进行复配,通过反相微乳液聚合制得了增黏剂PADA,其热分解温度为350℃,在饱和盐水钻井液中抗温达170℃,表现出良好的增黏、降滤失性能,以该剂为主处理剂的低固相钻井液体系在乍得Mongo W-1井成功开展了现场先导试验。张现斌等^[40]以AMPS、AM、NVP和DMAM共聚合成的耐温抗盐聚合物增黏剂ANAD,初始分解温度为328℃,在淡水基浆中抗温达230℃,在15%盐水基浆中抗温达180℃。Xiong等^[41]对合成锂皂石作为水基钻井液超高温增黏剂进行了研究,合成锂皂石具有优良的增黏能力和热稳定性,可在260℃下起作用,且高温增黏效果优于国际上使用的高温增黏剂。Sun^[42]等以丙烯酰胺、对苯乙烯磺酸钠、马来酸酐和甲基丙烯酸月桂酯为单体合成了一种疏水缔合特性显著、耐温耐盐突出的新型增稠降失水添加剂ASML,该剂通过疏水缔合作用增加网络结构,同时还会吸附在膨润土表面,给膨润土带来更多的负电荷,保持胶体均匀分散,使得黏度更高、泥饼更致密、流体损失更低。在200℃、30% NaCl的情况下,加入ASML后的钻井液滤失量仅为5 mL,比羧甲基纤维素基钻井液的低94.3%。

3.1.5 防塌封堵剂

为了解决超高温地层钻井过程中井壁失稳的难题,国内外围绕封堵防塌展开了大量研究。钻井液领域常用的封堵剂主要分为沥青类(乳化沥青、磺化沥青和氧化沥青等)、硅酸盐类及聚合醇类,其中,沥青类处理剂的封堵防塌效果最为突出。国外代表产品^[43]主要有:Chevron公司的沥青磺酸钠盐和沥青磺酸钾盐等Soltex系列产品、AVA公司的AVATEX和AVOIL FR/HT沥青防塌处理剂、KMC公司的CONFI-TROL HT PLUS高软化点沥青产品、BH DF公司的CARBO-TROL HT沥青处理剂和Progress公司的PRO-TEX等。此外,贝克休斯公司开发的MAX-PLEX铝基防塌处理剂可通过电性中

和、离子吸附和化学沉淀作用,抑制泥页岩膨胀。

暴丹等^[44]通过耐热高分子及无机矿物材料研制了抗高温高强度的刚性架桥颗粒(SDHTP-1)及堵漏纤维(SDHTF-1),这两种堵漏材料在220℃、高温老化48h后仍保持原貌,质量损失率小。王伟吉^[45]等以苯乙烯(St)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)为单体采用乳液聚合法研制了纳米聚合物微球封堵剂SD-seal,该剂的分解温度在400℃以上。谢刚等^[46]将哌嗪、二乙烯三胺溶解在水或有机溶剂中,按比例加入二乙烯基砜,经沉淀、洗涤、真空干燥后制得了一种抗温250℃的水基钻井液用纳米聚合物封堵剂,该剂可有效阻碍钻井液滤液侵入地层。孔勇等^[47-48]研发了具有刚性结构的抗温200℃的封堵防塌剂SMNA-1,该剂在高温下仍具有强黏滞性,可滞留于微裂缝处,有效封堵微裂缝。该研究团队还以沥青为基础研发了抗温200℃高温的封堵剂FT-200,在新疆顺北1-1H井三开井段成功开展现场应用。

3.2 超高温水基钻井液体系

目前,国内外研究人员通过研制各种抗超高温新材料,已形成多种超高温水基钻井液体系。Ava公司的AVAGELTERM、Baroid公司的THERMA-DRIL、Ecofluids公司的ECOTHERM、Scomi公司的HYDRO-THERM及威德福公司的WEL-DRILL PLUS均是较成熟的高温水基钻井液体系。Witthayapanyanon等^[49]研制的新型钻井液已在东南亚最高温井(井底温度为253℃的勘探气井)成功应用,试验过程中未见重晶石沉降,96h静态老化试验,流变性稳定。Elward等^[50]研发的环保型超高温水基钻井液,流变性稳定,在246℃的莫比尔湾超高温井的现场应用效果良好。Galindo等^[51]研制的无黏土高性能水基钻井液已被成功应用于205℃的超高温井,该钻井液中包括新型合成聚合物型增黏剂、流型调节剂、降滤失剂等,流变性能稳定。该团队^[52]还研制了抗温218℃的高性能水基钻井液,新型超高温聚合物处理剂的加入使其具有良好的增黏性、降滤失性及悬浮稳定性。

国内针对抗高温水基钻井液也进行了长期攻关,目前超高温淡水钻井液体系基本能够抗温达240℃。孙金声等^[53]研制了一种主要由抗高温保

护剂、高温降滤失剂、封堵剂、增黏剂等组成的抗温240℃的水基钻井液体系,该体系具有良好的高温稳定性、流变性、抑制性和抗钻屑污染能力,已在准噶尔、塔里木等地深井成功应用。邱正松等^[54]以自主研发的降滤失剂HTP-1及降黏剂HTP-2为基础构建了抗温245℃的超高温水基钻井液,有效满足了河南油田泌深1井深层钻井需求。杨文权等^[55]以降滤失剂BH-HFL及纳米润滑防塌剂BH-RDJ为主剂构建的抗230℃的低固相钻井液,在超高温下流变性能良好,可有效携岩,已在杨税务区块成功开展7口井现场应用。许洁等^[56]针对松科二井不同高温井段分别确定了3套钻井液配方,即抗温180℃的氯化钾聚磺钻井液、抗温230℃的超高温聚合物钻井液及抗250℃超高温的甲酸盐聚合物钻井液,这3种体系均具有良好的高温稳定性和剪切稀释性,且高压滤失量低,抗温能力突出。胡小燕等^[57]以抗高温聚合物降滤失剂HR-1和改性腐植酸HS-1与抗高温封堵剂、高温稳定剂进行配伍性研究,构建了抗温270℃钻井液体系。郝少军等^[58]构建了柴达木盆地第一超高温井碱探1井用抗240℃超高温有机盐水基钻井液,该钻井液在老化72h后,高温高压滤失量保持在10mL以内、润滑系数小于0.1、砂床侵入深度小于12cm,顺利完成了碱探1井的钻探保障任务。

4 认识与展望

油气勘探开发的持续深入对超高温钻井提出了更高要求,需要各方配合,协同发展,其中,对性能的提升与调控为超高温水基钻井液技术发展的关键。

(1)深入研究超高温水基钻井液技术基础理论。加强探究水基钻井液抗超高温作用机理及性能调控技术,细化钻井液抗超高温机理认识,与高分子材料、胶体界面化学、物理化学等交叉学科融会贯通,多维度进行钻井液微观机理探究。

(2)研制新型超高温水基钻井液处理剂。超高温处理剂是水基钻井液发挥效能的基础,在优化升级传统钻井液处理剂的同时,积极探索仿生材料、纳米材料等新型材料在钻井液领域的应用,有望实现性能提升。

(3)构建新型超高温水基钻井液体系。随着深

层超深层油气勘探开发业务的不断开展及日益深入,钻井液体体系的构建在考虑抗温能力的基础上,还需充分考虑储层友好、安全环保、多功能高效能等多个方面。

参考文献:

- [1] 马永生. 加强多学科交叉融合研究推动中国海相深层油气勘探开发新突破[N]. 中国科学报, 2020-5-27.
- [2] AHMAD L, AKIMOV O, BOND P, et al. Drilling operations in HP/HT environment [C]// Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur, Malaysia, March 25–28, 2014.
- [3] 毛惠. 超高温超高密度水基钻井液技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [4] MAO H, YANG Y, ZHANG H, et al. A critical review of the possible effects of physical and chemical properties of subcritical water on the performance of water-based drilling fluids designed for ultra-high temperature and ultra-high pressure drilling applications [J]. J Pet Sci Eng, 2020, 187(C): 106795–106795.
- [5] QIAO D Y, YE Z B, TANG L, et al. Synthesis of a novel filtrate reducer and its application in water-based drilling fluid for ultra-high temperature reservoirs [J]. Geofluids, 2021, 2021: 7643826.
- [6] LIU X D, XIE B Q, GAO Y H, et al. Development of low toxicity and high temperature polymer drilling fluid for environmentally sensitive offshore drilling [C]// IADC/SPE190967, Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Bangkok, Thailand, August 24, 2018.
- [7] LIU J P, DAI Z W, XU K, et al. Water-based drilling fluid containing bentonite/ poly (sodium 4-styrenesulfonate) composite for ultrahigh-temperature ultra deep drilling and its field performance [J]. SPE J, 2020, 25(3): 1193–1203.
- [8] PANAMARATHUPALAYAM B, MANZOLELOUA C, SEBELIN L, et al. Multifunctional high temperature water-based fluid system [C]// Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain, March 18–21, 2019.
- [9] XIONG Z Q, FU F, LI X D. Experimental investigation on laponite as ultra-high temperature viscosifier of water-based drilling fluids [J]. SN Appl Sci, 2019, 1(11): 1–8.
- [10] 许洁. 超高温水基钻井液技术及其流变模型研究: 以松科二井为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2015.
- [11] WARD M A, GEORGIU T K. Thermoresponsive terpolymers based on methacrylate monomers: Effect of architecture and composition [J]. J Polym Sci Part A Polym Chem, 2010, 48(4): 775–783.
- [12] MAO H, YANG Y, ZHANG H, et al. A critical review of the possible effects of physical and chemical properties of subcritical water on the performance of water-based drilling fluids designed for ultra-high temperature and ultra-high pressure drilling applications [J]. J Pet Sci Eng, 2020, 187(C): 106795.
- [13] DICKERT J J, HEILWEIL I J. Vinyl sulfonate amide copolymer and terpolymer combinations for control of filtration in water based drilling fluids at high temperature: US 4 608 182 [P]. 1986-08-26.
- [14] PATEL A D. Water-based drilling fluids with high temperature fluid loss control additive: US 5 789 349 [P]. 1998-08-04.
- [15] THAHAEMLITZ C J, PATEL A D, COFFIN G, et al. New environmentally safe high-temperature water-based drilling fluid system [J]. SPE Drill Completion, 1999, 14(3): 185–189.
- [16] SORIC T, HUELKE R, MARINESCU P. Uniquely engineered water-base high temperature drill-in fluid increases production, cuts costs in Croatia campaign [C]// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands, February 19–21, 2003.
- [17] 徐同台, 赵忠举. 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.
- [18] 常晓峰, 孙金声, 吕开河, 等. 一种新型抗高温降滤失剂的研究和应用 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(4): 420–426.
- [19] 王中华, 周乐群, 王旭. AM/AOBS/DMAM 共聚物超高温钻井液降滤失剂合成 [J]. 精细与专用化学品, 2009, 17(19): 21–22.
- [20] 杨小华, 钱晓琳, 王琳, 等. 抗高温聚合物降滤失剂 PFL-L 的研制与应用 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(06): 8–12.
- [21] 罗明望, 张现斌, 王中秋, 等. 超高温低黏聚合物降滤失剂的研制及作用机理 [J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5): 585–592.
- [22] 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.
- [23] 苏俊霖, 蒲晓林, 任茂, 等. 高温无机/有机复合纳米降滤失剂 NFL-1 研究 [J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 75–78.
- [24] 杨芳. 纳米碳球耐高温钻井液润滑剂的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [25] 孙金声, 潘小镛, 刘进京. 新型钻井液用润滑剂 GXRH 的研制 [J]. 钻井液与完井液, 2002(6): 18–19.
- [26] 李斌, 蒋官澄, 王金锡, 等. 水基钻井液用润滑剂 SDL-1 的研制与评价 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2): 170–175.
- [27] 邱正松, 王伟吉, 黄维安, 等. 钻井液用新型极压抗磨润滑剂 SDR 的研制及评价 [J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(2): 18–21.
- [28] 王伟吉, 邱正松, 钟汉毅, 等. 钻井液用新型纳米润滑剂 SD-NR 的制备及特性 [J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 113–116.
- [29] TIAN X, SONG N N, YANG G B, et al. Organic-sulfonate functionalized graphene as a high temperature lubricant for efficient antifriction and antiwear in water based drilling fluid [J]. Tribol Lett, 2022, 70(2): 1–8.
- [30] 贾敏, 黄维安, 邱正松, 等. 超高温 (240 °C) 抗盐聚合物降滤失剂的合成与评价 [J]. 化学试剂, 2015, 37(12): 1067–1072.
- [31] 王富华, 王瑞和, 王力, 等. 钻井液用抗高温抗盐钙聚合物降黏剂 JNL-1 的研制与评价 [J]. 油田化学, 2009, 26(1): 1–4.

- [32] 赵晓非, 胡振峰, 张娟娟, 等. 磺化苯乙烯-衣康酸共聚物超高温钻井液降黏剂的研制[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 105-108.
- [33] 杜俊涛, 刘立新, 陈娟娟, 等. 两种2-丙烯酸酰胺基-2-甲基丙磺酸类抗高温钻井液降黏剂的合成与评价[J]. 精细石油化工, 2015, 32(2): 16-20.
- [34] 樊泽霞, 王杰祥, 孙明波, 等. 磺化苯乙烯-水解马来酸酐共聚物降黏剂 SSHMA 的研制[J]. 油田化学, 2005, 22(3): 195-198.
- [35] 王飞龙, 杨泽星, 刘泽. 本体聚合法制备低相对分子质量水基钻井液降黏剂[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 875-878.
- [36] SHANMUGAM S, ROSS G, MBUNCHA C Y, et al. High performance-branched microgels as universal viscosifiers for water-based drilling fluids[J]. MRS Commun, 2021, 11(6): 755-761.
- [37] 邱正松, 毛惠, 谢彬强, 等. 抗高温钻井液增黏剂的研制及应用[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 106-113.
- [38] 谢彬强, 邱正松, 郑力会. 水基钻井液用抗高温聚合物增黏剂的研制及作用机理[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(1): 96-102.
- [39] 闫丽丽, 孙金声, 王建华, 等. 新型抗高温抗盐钻井液增黏剂 PADA 的制备与性能[J]. 石油学报(石油加工), 2013, 29(3): 464-469.
- [40] 张现斌, 李欣, 陈安亮, 等. 钻井液用抗高温聚合物增黏剂的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 1-6.
- [41] XIONG Z Q, FU F, LI X D. Experimental investigation on laponite as ultra-high-temperature viscosifier of water-based drilling fluids[J]. SN Appl Sci, 2019, 1(11): 1-8.
- [42] SUN J S, ZHANG X F, LV K H, et al. Synthesis of hydrophobic associative polymers to improve the rheological and filtration performance of drilling fluids under high temperature and high salinity conditions[J]. J Pet Sci Eng, 2022, 209: 109808.
- [43] Drilling, Completion & Workover Fluids. World Oil, 2015, 6: 3-34.
- [44] 暴丹, 邱正松, 邱维清, 等. 高温地层钻井堵漏材料特性实验[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 846-857.
- [45] 王伟吉, 邱正松, 黄维安, 等. 纳米聚合物微球封堵剂的制备及特性[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 33-36.
- [46] 谢刚, 罗平亚, 邓明毅. 一种水基钻井液用纳米聚合物封堵剂及其制备方法[P]. CN104 927 051 A.
- [47] 孔勇, 杨小华, 徐江, 等. 抗高温强封堵防塌钻井液体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 17-22.
- [48] 孔勇, 杨小华, 徐江, 等. 抗高温防塌处理剂合成研究与评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2): 17-21.
- [49] WITTHAYAPANYANON A, NASRUDIN K A, WAHID F, et al. Novel drilling fluids enable record high-temperature, deep-gas exploration well offshore peninsula of Malaysia [M]. 2014.
- [50] ELWARD J, DARBY J B. Rheologically stable, nontoxic, high-temperature, water-based drilling fluid [J]. SPE Drill Completion, 1997, 12(3): 158-162.
- [51] GALINDO K A, ZHA W B, ZHOU H, et al. Clay-Free high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells [C]// SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. London, United Kingdom, March 17-19, 2015.
- [52] GALINDO K A, ZHA W B, ZHOU H, et al. High temperature, high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells [C]// SPE International Oilfield Chemistry Symposium. Texas, USA, April 13-15, 2015.
- [53] 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.
- [54] 邱正松, 黄维安, 何振奎, 等. 超高温水基钻井液技术在超深井泌深1井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 35-36.
- [55] 杨文权, 张宇, 程智, 等. 超高温钻井液在杨税务潜山深井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 298-302.
- [56] 许洁, 乌效鸣, 朱永宜, 等. 抗240℃超高温水基钻井液室内研究[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(1): 10-13.
- [57] 胡小燕, 王旭, 张丽君, 等. 超高温270℃水基钻井液体系研究[J]. 精细石油化工进展, 2016, 17(6): 8-12.
- [58] 郝少军, 安小絮, 韦西海, 等. 碱探1井超高温水基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(3): 292-297.

Research Progress and Development Direction of Technologies for Water-based Drilling Fluid in Ultra-high Temperature

ZHANG Yan, QU Yuanzhi, ZHANG Zhilei, WANG Ren, CHENG Rongchao, YANG Zheng
(CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, P R of China)

Abstract: With the continuous development of oil/gas drilling to the deep, the temperature of deep and ultra-deep formations drilled are getting higher and higher, which puts forward more requirements for drilling technology, especially technology of drilling fluid. In combination with the actual requirements of ultra-high temperature drilling, the technical barriers of water-based drilling fluid under ultra-high temperature and the effect of ultra-high temperature on water-based drilling fluid performance were analyzed. Research progress of key additives for water-based drilling fluid under ultra-high temperature and water-based drilling fluid system they constructed was described, and the future development direction of water-based drilling fluid under ultra-high temperature was discussed.

Keywords: ultra-high temperature; water-based drilling fluid; research progress; development direction; review