

抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议

庞少聪¹, 安玉秀^{1*}, 田野²

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司, 河北任丘 062552)

摘要: 深部钻探是获取深部油气资源以及精准探测地球深部的必要手段, 随着深井、特深井井深的不断增加, 面临的高温环境对钻井液体系提出了更严格的要求。近年来, 经过研究人员持续不断的研究, 抗高温钻井液体系取得了新的进展。本文分析总结了国内外各种抗高温钻井液体系的研究与应用情况, 并指出了不同体系的优势和应用场景, 主要包括抗高温聚磺钻井液、高密度钻井液、低密度钻井液等抗高温水基钻井液体系, 抗高温纯油基钻井液、水包油、油包水钻井液以及可逆油基钻井液体系, 海上深水无固相、甲酸盐钻井液、泡沫钻井液以及弱凝胶钻井液等抗高温无固相钻井液体系; 有机硅钻井液体系和生物质钻井液体系。未来的发展方向包括环境友好型、提高抗高温性能、降低成本和增强多功能性。这将需要不断的技术创新和合作, 推动钻井行业向更可持续和高效的方向发展, 促进抗高温钻井液体系的开发与应用。

关键词: 抗高温钻井液; 特深井; 研究进展; 发展建议

中图分类号: TE254; P634 **文献标识码:** C **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0082-11

Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad

PANG Shaocong¹, AN Yuxiu^{1*}, TIAN Ye²

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Downhole Operation Branch, CNPC Bohai Drilling, Renqiu Hebei 062552, China)

Abstract: Deep drilling is a necessary means of obtaining deep oil and gas resources and accurately detecting the deep earth. As the increase of the depths in deep wells and extra-deep wells, the high-temperature environment poses stricter requirements on drilling fluid systems. In recent years, new progress has been made in anti-temperature drilling fluid systems through continuous research. This paper summarizes the research and application of various high-temperature drilling fluid systems at home and abroad, and highlights the advantages and application scenarios of different systems, including high-temperature resistant water-based drilling fluid systems of high-temperature resistant polysulfide drilling fluid, high-density drilling fluid, low-density drilling fluid; high-temperature resistant oil-based drilling fluid, water-in-oil, oil-in-water and reversible oil-based drilling fluid systems; high-temperature resistant solid-free drilling fluid systems such as offshore deepwater solid-free, formate drilling fluid, foam drilling fluid, and weak gel drilling fluid; organosilicon drilling fluid systems and biomass drilling fluid systems. The future development directions is environment friendly, improved high-temperature resistance performance, cost reduction and enhanced multifunctionality, which requires continuous technological innovation and cooperation to promote the development and application of high-temperature drilling fluid systems in the drilling industry towards sustainability and efficiency.

Key words: high temperature resistant drilling fluid; extra-deep well; research progress; development suggestion

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-05-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.011

基金项目: 国家自然科学基金项目“二维石墨烯自组装响应材料调控钻井液性能及作用机理研究”(编号: 52274011)

第一作者: 庞少聪, 男, 汉族, 1998年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 研究方向为地质工程, 北京市海淀区学院路29号, P7426cong@163.com。

通信作者: 安玉秀, 女, 汉族, 1981年生, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 研究方向为钻井工程、钻井液与完井液、油田化学, 北京市海淀区学院路29号, anyx@cugb.edu.cn。

引用格式: 庞少聪, 安玉秀, 田野. 抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 82-92.

PANG Shaocong, AN Yuxiu, TIAN Ye. Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 82-92.

0 引言

为满足能源需求,迫切需要开采深层超深层油气资源,钻探技术正处于快速发展阶段,深井和特深井钻探已成为业界热点^[1-2]。一般来说,井底深度超4500 m定义为深井,井底深度超6000 m为超深井,井底深度超9000 m为特超深井^[3]。高温高压按孔底温度(BHT)和压力(BHP)定义,当BHT介于150~205 ℃或BHP介于69~138 MPa时是高温高压(HTHP),当BHT介于205~260 ℃或BHP介于138~241 MPa时为超高温高压(ultra-HTHP)^[4]。深井、特深井面临深部复杂地质条件地层难钻以及故障频发、高温高压条件下工具仪器以及钻井液可靠性差等技术难题^[5]。其中,钻井液在高温、高盐、高压条件下受到了严峻挑战,面临深部井壁失稳机理复杂、钻进摩擦高、漏失概率高高性能与环保性难以兼得等技术难题^[6]。比如高温环境造成膨润土高温分散、聚结或钝化现象,导致钻井液流变性恶化,严重影响钻井工程进展^[7]。

因此,为了更好地进行深部油气资源勘探开发,不仅需更强大、更高效的设备和工艺,还对钻井液性能和质量提出更高要求。钻井液在钻探过程中扮演重要角色,需满足润滑、冷却和清洁井壁等需求,以及应对高温、高压和复杂地质条件等挑战^[8]。为了保证深井、特深井钻井作业的安全和高效,需要不断研发和改进钻井液技术,以提高钻井液在高温和超高温条件下的性能稳定性,因此,逐步研究形成了一系列抗高温以及抗超高温钻井液体系。根据目前国内外抗高温钻井液体系研究现状,可分为抗高温水基钻井液体系、抗高温油基钻井液体系、抗高温无固相钻井液体系、抗高温有机硅钻井液体系和抗高温生物质钻井液体系。

本文旨在分析抗高温钻井液体系在深井和超深井钻探中的应用和挑战,探讨近年来国内外不同类型抗高温钻井液体系的钻井液性能及现场应用状况,并提出了发展建议。鉴于未来深井,尤其是特深井钻探的深度拓展,现有钻井液体系的抗温性能将难以满足需求,因此有必要研发更高抗温性能的处理剂,以配套超高温钻井液体系。

1 抗高温水基钻井液体系

1.1 抗高温聚磺钻井液体系

抗高温聚磺钻井液体系的一大特点是抗温性

优异,目前此类钻井液体系还是普遍适用于国内深井钻进工程,如表1所示。

表1 国内采用抗高温聚磺钻井液体系的深井^[9]

Table 1 Domestic deep wells using high-temperature resistant polysulfone drilling fluid system

井名	完钻深度/m	最高温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	钻井液体系
莫深1井	7500	173	2.1	聚磺氯化钾体系
沁深1井	6005	236	1.3	聚磺钻井液体系
胜科1井	7026	235	1.86	聚磺钻井液体系
秋男1井	7003	150	2.28	欠饱和盐水高密度聚磺钻井液
濮深16井	5440	200	2.2	聚磺饱和盐水钻井液体系

另外,中国松辽盆地大陆科学钻探项目的主井松科-2井,钻探深度达到了7018 m,孔底温度>240 ℃。为了确保钻井液能够承受高温环境的要求,Zheng等^[10]选用聚合物降滤失剂和磺化防塌剂,形成具有良好的热稳定性、抗污染能力和页岩抑制性能的钻井液体系。

在四川盆地部分深部钻井地区,高温和地温梯度大导致井壁失稳和钻井液抗温能力不足。因此,张帆等^[11]研发了新型高温聚磺钻井液配方,其中钠土和凹凸棒土混合确保其具备一定粘土胶粒浓度,提高了护胶性能和粘度效果。

针对我国新疆塔里木盆地顺托果勒地区顺北区复杂地形条件下的油气勘探开发中遇到的问题,郭文艳^[12]通过加入复合盐水和一系列抗盐性能较好的高温聚合物HPL-3、磺化褐煤树脂、乳化沥青、聚胺HPA等,得到了抗温性达180 ℃的钻井液配方,具有较好的流变性和防塌封堵性,且具有一定抗钙和钻屑污染能力,抗CaCl₂污染能力达0.6%,抗钻屑污染能力达9%。

1.2 抗高温高密度钻井液体系

深井钻进通常面临温度高、压力高的问题,需要使用抗高温高密度钻井液体系来维持井壁稳定以及平衡地层压力,保障钻井安全。李雄等^[13]研发了超高温封堵降滤失剂、超高温高密度分散剂等核心处理剂,最终研发出了抗温达220 ℃、密度>2.40 g/cm³、具有良好流变性能和沉降稳定性能的超高温高密度钻井液体系SMUTHD,性能评价结果见

表2。潘谊党^[14]研制了一种耐温200℃、密度2.4 g/cm³的抗高温高密度水基钻井液配方,具有流变性和滤失造壁性好、热稳定性高以及沉降稳定性良好的特性,能够满足高温深井的钻井需求。

表2 220℃老化前后钻井液体系SMUTHD性能评价结果^[13]

Table 2 Evaluation results of SMUTHD performance of drilling fluid system before and after aging at 220℃

实验条件	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Gel/Pa	PV/(mPa·s)	YP/Pa	FL _{HTHP} /mL	pH
常温		6.5/12.0	62	10.0		
220℃、16 h	2.20	5.0/9.0	36	11.0	7.6	9
220℃、65 h		4.5/10.0	37	12.0	7.8	9
常温		3.5/13.0	92	20.0		
220℃、16 h	2.31	11.0/17.0	56	24.5	9.8	9
220℃、65 h		12.0/20.0	58	28.0	10.2	8
常温		5.5/22.0	98	47.0		
220℃、16 h	2.40	12.0/22.0	76	24.0	11	8
220℃、65 h		14.0/25.0	96	40.0	11.8	8

吴建华^[9]通过研究加重材料在高密度钻井液中的形态、粒径级配以及复配对钻井液流变性和滤失性的影响,以及对关键处理剂进行优选。最终,筛选出了降滤失剂PFL-L、高温稳定剂SMGWW等处理剂,研发了抗温达到200℃的超高温高密度水基钻井液体系,确立了在2.20、2.30和2.40 g/cm³密度下的相应配方,并且在这三个密度下均满足了对沉降稳定性、流变性和高温高压滤失量协同控制的需求。

针对新疆塔中地区顺托区块钻井工程中面临的储层埋藏深、压力高、地层温度高、天然裂缝发育等问题,郑志成^[15]优化了抗高温高密度钻井液体系配方,见表3。

1.3 抗高温低密度钻井液体系

一些高温地层压力中等偏低,这时需要抗高温低密度钻井液体系来减轻对地层的压力,此类钻井液体系除了要求抗高温性能好外,通常密度可调,对流变性的稳定性要求高。针对华北油田杨税务潜山地区储层温度极高、压力中等偏低、存在大段非均质碳酸盐的问题,田惠等^[16]研究了一种低固相超高温钻井液体系。该体系密度在1.10~1.20 g/cm³可调,抗温可达220℃,流变性良好,具有较强的

表3 钻井液主要处理剂的作用^[15]

Table 3 Role of the main treating agents in drilling fluids

名称	作用
ZNJ-3	调节流变性
WSG-3	降低钻井液高温滤失量及分散
SMP-3、PAN-4	降低钻井液高温滤失量
纳米封堵剂、抗温封堵剂	封堵微孔隙及微裂缝、调节流变性
HBV-1、亚硫酸钠	提高钻井液的抗温性
页岩抑制剂YY-1	抑制泥页岩水化膨胀
白油	提高钻井液体系的润滑性
SF-28	降低钻井液体系的粘度、保持钻井液流变性

包被抑制性和封堵造壁性。

梅春桂^[17]通过室内实验配制了密度为1.2 g/cm³的抗高温钻井液体系,并优选出了性能更佳的抗200℃高温的钻井液配方。何丽等^[18]研发一种新型的高性能高温水基钻井液,该体系在高温下具有良好的粘度和滤失可控性,并且可以根据现场需求在1200~2040 kg/m³范围内调节钻井液密度。

1.4 抗高温饱和盐水钻井液体系

抗高温饱和盐水钻井液体系能适应高温环境、抵抗地层盐分的侵蚀、保持井壁稳定、提高钻井效率和环保性能,是钻井作业中不可或缺的重要部分。Huang等^[19]研发了一种具有很好的抗聚电解质效应的弱交联离子聚合物降滤失剂,形成了一种抗高温高密度抗饱和盐水钻井液体系。该钻井液体系在200℃高温和高压下,流失量<15 mL,静置5 d后的沉降因子<0.52,具有良好的封堵和润滑性能。

为了解决元坝地区钻井液在高温条件下稳定性差、流变性和失水性难以调控等问题,刘虎等^[20]通过优选抗高温处理剂,开发了抗超高温高密度饱和盐水钻井液体系。该体系抗温达220℃,密度2.00~2.50 g/cm³,沉降系数<0.52。

1.5 海上深水抗高温钻井液体系

海上抗高温钻井液体系主要用于满足海上油田钻井作业的需求,而高温会使海水钻井液中的各种组分产生增稠、降解、交联和胶凝等影响,导致钻井液性能恶化,并且该类钻井液体系一般固相含量低,对流变性和防塌护壁性能要求高^[21]。

针对南海西部深水高温高压地层环境的问题,李炎军等^[22]构建了一套适用于220℃深水高密度钻

井液体系。该体系具有良好的流变性能、抗污染能力、水合物抑制能力和储层保护性能。邹星星等^[23]通过优选和评价水合物抑制剂、抗高温增粘剂和抗高温降滤失剂,成功构建了该钻井液体系。该钻井液体系在低温到高温变化过程中能够保持稳定的流变性能,粘度和切力变化幅度较小,并且滤失量低,抑制性强,具有良好的抗污染性能。姚倩^[24]介绍了一种适合深水高温高压地层的恒流变水基钻井液体系,该体系具备了在各种温度下的流变性恒定的特征。

高温高压井作业面临着更加严苛的地层条件,包括增加的地层压力和井底温度。娄益伟^[25]研发的 Devirithm HT 钻井液体系抗温能力可达到 210 °C,密度可达到 2.30 g/cm³。肖平等^[26]针对南海西部高温高压井目的层井段钻井液存在的问题,研发了一种新型的抗高温钻井液(ENVIROTHERM NT),相比于现场常规钻井液,ENVIROTHERM NT 钻井液更适用于目的层井段的电测作业。该钻井液成功应用于南海莺歌海盆地 LD-X 井,具有较强的高温稳定性、良好的降失水性能和润滑性能,在应用井段的电测过程中没有发生阻卡情况。

为了满足东海地区日益增加的高温深井钻井需求,减少复杂情况发生,并更好地保护低孔渗油气储层,研究人员对深水抗高温钻井液体系进行了一系列研究。朱胜等^[27]优化了 PEM 钻井液体系,在 150 °C 下,滚动回收率达到 92.5%,润滑系数为 0.087~0.11。该体系在现场应用中取得了良好的效果,通过测井资料计算,钻井液侵入储层的深度 < 30 cm,保护效果良好。蔡斌等^[28]研发了一种名为 HTV-8 的抗高温流型调节剂,在无粘土或低固相钻井液中具有强大的提切能力,抗温性能达到 200 °C,能使钻井液在高温下具有良好的流变性能,并且具有良好的抗岩屑污染能力、抗盐污染能力、抑制性和储层保护等性能。

为了满足海上高温深井钻探对环保的要求,刘涛等^[29]研发了一套抗温 200 °C 的环保型防塌钻井液体系,具有良好的流变性能,并且滤失量控制在 15 mL 以内,页岩滚动回收率 > 85%。

针对深水高温高压井作业中存在的气体水合物、高温和井漏等问题,刘俊彦等^[30]通过室内实验构建和评价了一套深水高温高压钻井液体系,能够承受高达 200 °C 的温度,具有良好的封堵性能,在模

拟地层条件下不会生成水合物,同时具有良好的高低温流变性能、抗污染能力和水合物抑制能力。邹志飞等^[21]考虑到海水中高价金属离子的存在,所以选择钠膨润土搭配抗盐粘土作为造浆材料,解决钻井液分层问题,提高了钻井液悬浮稳定性,与此同时,pH 调节剂氢氧化钠的引入促进粘土分散和处理剂作用的发挥。通过抗高温降滤失剂、防塌剂和高温稳定剂组成一套抗 230 °C 的海水钻井液体系。

1.6 其他抗高温水基钻井液体系

1.6.1 抗高温地热水基钻井液

针对目前地热钻井高温钻井液体系存在配制过程复杂、抗高温性能差等迫切现实问题,巩如华^[31]通过研究常见粘土高温造浆特性,优选高温造浆性能良好的造浆矿物累托土并进行有机改性,研发了一种适于地热钻井的新型高温钻井液体系(H-LT):5% 改性累托土+4% Na₂CO₃+1.5% 降滤失剂 FLC-02+1.5% 防塌剂 SAS,该体系抗温达 240 °C,具有稳定的流变性,滤失量 < 20 mL,具有良好的润滑性和抑制能力。

1.6.2 抗高温干热岩钻井液体系

随着传统油气资源的不断衰竭,急需开发新型清洁能源。干热岩存在于井下超高温环境中,因此,抗高温干热岩钻井液体系的研究显得尤为重要^[32]。刘畅等^[33]通过常规性能测试和热滚老化实验,筛选出钻井液的组分和含量,得到了一种耐 240 °C 高温的钻井液体系,该体系具有较好的稳定性、抗钻屑污染能力和润滑性。

1.6.3 抗高温环保型钻井液体系

地质取心钻探中常需要采用环保型钻井液,目前常用的环保型钻井液体系耐温性能不足,抗温一般 > 130 °C,这并不能满足更高温地层的钻探需求。田志超等^[34]通过对不同种类粘土以及环保型处理剂比如增粘剂、高温稳定剂、降滤失剂、抑制剂以及封堵剂进行优选,然后对钻井液配方进行优化,最终形成了一套可抗 150 °C 高温的抗高温环保型钻井液体系。由于这套体系环保且抑制能力强,可适用于水敏性地层,因此其在西藏甲玛 3000 m 科学深钻中成功应用。

1.7 国外抗高温水基钻井液体系

根据井内温度数据,前苏联科拉 3 井的井底温度达到 220 °C,美国索尔顿湖高温地热科学钻探井深 3200 m,温度达到 353 °C,德国 KTB 科学钻探的

井温为 275 °C,而日本葛根田地热区 WD-1A 井使用温度指示材料记录的孔底温度高达 500 °C^[1],国外典型抗高温水基钻井液体系研究概况见表 4^[35]。近年来,在乌兹别克斯坦苏尔汗地区的卡拉库尔特 4 井设计中,井深达到 6400 m。为解决高密度饱和盐水聚磺钻井液体系在高温条件下的流变性及稳定性问题,常胜利等^[36]优选出一款能抵抗 200 °C 高温的高密度饱和盐水聚磺钻井液体系。

2 抗高温油基钻井液体系

2.1 抗高温全油基钻井液体系

全油基钻井液油水比 > 95:5,相比于油包水乳化钻井液具有可进一步提高机械钻速、稳定井壁和保护储层的优点,但由于其在高温下的悬浮稳定性

和流变性控制难度大,所以对增粘剂和提切剂性能要求高,全油基钻井液一般用于钻进地质构造特征复杂地层^[37-39]。针对涠洲 W 油田地段泥页岩水化分散的问题,郭永宾等^[40]通过优化复合粒径封堵材料、提高油水比,建立了全油基强封堵钻井液体系。此体系抗温 150 °C、乳化稳定性强、储层保护效果好,并且由于油水比提高,水含量减少,滤失量较小,不易于使地层中泥页岩发生水化分散。在陈浩东等^[41]的研究当中,当油水比确定为 95:5 时,也可以使全油基钻井液体系实现有效抑制泥页岩水化,并且比传统油基钻井液有更强的封堵能力、更高的钻速。针对全油基钻井液体系的沉降稳定性问题,汪胜等^[42]利用 VST 技术重点对体系动态沉降展开了评价,构建了一套抗 200 °C 的全油基钻井液体系。

表 4 国外抗高温水基钻井液体系概况^[35]

Table 4 Overview of foreign high-temperature resistant water-based drilling fluid systems

钻井液名称	配 方	抗温/°C	应用	主要特点
SIV 钻井液体系	150 L 淡水 + 1.35 kg SIV + 9.45 kg KCl + 0.45 kg Na ₂ CO ₃ + 0.95 kg Na ₂ SO ₃ + 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	德国大陆深钻项目 KTB-HB	在 230 °C 以下可保持很好的性能,但经过长时间钻井后,核心处理剂受高温影响导致流变性难以控制,最后事故完钻
高性能水基钻井液 (HP-WBM) 体系	膨润土 + NaOH + CaCl ₂ + 聚丙烯酰胺 + 羧甲基纤维素 + 改性淀粉 + 铝酸盐络合物 + 可变形聚合物封堵剂 + 聚铵盐 + 快钻剂	233	墨西哥湾及美国大陆等	可以更好地抑制粘土和岩屑的分散,减少钻头泥浆充填
TSD/TSF 聚合物钻井液	暂无	232	莫比尔湾地区	TSD、TSF 结合配制出来的钻井液不仅热稳定性高,而抑制性能也比较高
高温聚合物钻井液体系	(4%~5%) 膨润土 + (0.2%~0.3%) NaOH + 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% 改性褐煤树脂 + 重晶石	210	美国 Baroid 公司研制	抗温能力强
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 + 氯化钠等	212.8	密西西比海域	抗温能力强、抗污染能力强、抑制性较强
EHT 抗高温无毒水基钻井液体系	(0.86%~3.50%) 膨润土 + NaOH + NaCl + (0.29%~0.86%) 纤维素增粘剂 + (0.57%~1.71%) 合成聚合物高温降粘剂	215	莫尔比湾某油气井	耐高温、环保
高温低密度聚合物钻井液体系	(15%~25%) 高岭土 + (0.15%~0.20%) 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	前苏联科拉半岛 SG-3 井	抗温能力强、低密度特性减少对地层的污染
D-HT/HOE/Pyrodrill 体系	3.6% 膨润土 + 0.15% 粘封剂 + 0.15% 高温稳定剂 (SSMA) + 0.5% 抗温剂 + (1%~1.5%) Pyrodrill-HT (原浆) + 1.50% Hostadrill 3188 (原浆)	275	德国 KTB 科学钻探	泥浆低剪粘度提高,高温失水降低,携屑能力改善

2.2 抗高温油包水钻井液体系

油包水乳化钻井液对乳化剂和润湿剂的性能需求相较于纯油基钻井液更为严格。普遍观点认为,引入水分使得油包水乳化钻井液在安全性和环保性能上优于纯油基钻井液^[37]。针对超高温深井和超深井钻井液体系存在的抗温能力不足、低密度和动态沉降稳定性差等问题,王星媛等^[43]研制出了抗温220℃,破乳电压可达1201~1856 V的油基钻井液体系。该钻井液体系具有良好的热稳定性、流变性、沉降稳定性和高温高压滤失量等性能。

针对油基钻井液在施工过程中流变性难以调控、动静切力低、易发生沉降等问题,孙伟等^[44]开发了一种抗高温油基钻井液用提切剂FPR-1,显著增强了油基钻井液的动静切应力和电稳定性。它能够将动切力从6 Pa提高到12 Pa,破乳电压高达1496 V,显著改善钻井液的降滤失效果,滤失量仅为2.4 mL,滤饼厚度较薄,改善了泥饼质量。

刘鸿武等^[45]通过对处理剂的优选,形成了一种抗高温高密度油基钻井液体系,经过200℃的老化测试后,钻井液体系的流变性能保持稳定,高温高压滤失量<5 mL,破乳电压值可达到1000 V以上,表现出良好的沉降稳定性。同时,该体系抑制性能好,具有良好的抗污染性能,对储层具有较好的保护效果。

范胜等^[46]研究了一种新型有机土MZ,用于配制抗220℃高温低密度油基钻井液体系,在高温热滚前后粘度变化不大,保持较高的切力,220℃老化后的高温高压下的滤失量<3 mL。

2.3 抗高温水包油钻井液体系

抗高温水包油钻井液体系可以通过调节油水比来改变钻井液的密度,满足欠平衡钻井的需要。白锋军等^[47]研究利用电导率测定法、静止观察法、临界胶束浓度测定法和分散稳定性法对处理剂进行类型和加量的优选,最终确定了最佳的具有低密度和抗高温性能的水包油钻井液配方。冯硕^[48]使用具有抗温性和强乳化能力的表面活性剂作为乳化剂,并配套抗高温增粘剂和流型调节剂,成功开发出抗220℃高温的钻井液体系。

2.4 抗高温可逆油基钻井液体系

可逆油基钻井液体系具有抗高温、高密度的性能要求,同时易于水洗,具有低油水比和简单组分的优点。任妍君等^[49]研究了一种针对高温深井钻

井需求的可逆油基钻井液体系,该体系在CO₂或HAc的诱导下可以从油包水转变为水包油,并且可以通过CaO或NaOH的诱导再次转变回油包水相。该体系使用了非离子表面活性剂CN-2和纳米颗粒OTS-KH550/SiO₂,其中,CN-2与OTS-KH550/SiO₂协同稳定的乳状液性能较好,抗温性能可达到250℃。纳米颗粒OTS-KH550/SiO₂的加入不会影响体系的可逆性能,反而能够显著改善体系的抗高温性能,在低油水比、高密度和高温条件下都表现出良好的流变性能和滤失性能。

2.5 国外抗高温油基钻井液体系

巴基斯坦北部区块,地层重复反转,油气埋藏深,井底高温高压,同时存在易吸水膨胀、垮塌的长段页岩层和易缩径、卡钻的盐膏层。对这些问题,黎凌等^[50]通过优选处理剂形成了一种柴油基钻井液体系,该柴油基钻井液体系具有良好的性能。它在高温条件下抗温性能达到180℃,最高密度为2.20 g/cm³,老化前后的破乳电压>1200 V,具有良好的沉降稳定性。

各类抗高温油基钻井液体系的主要特点汇总见表5。

3 抗高温无固相钻井液体系

3.1 抗高温甲酸盐钻井液体系

甲酸盐钻井液具有较好的抗温性能和储层保护性能,能够满足钻井作业的需要。张健^[51]通过优选加重材料、降滤失剂和流型调节剂,并添加抑制剂、润滑剂和封堵剂,最终开发出了新型的抗高温高密度有机盐钻井液体系。

为解决钻井液在高温条件下流变性能难以控制和重晶石等惰性材料堵塞地热储层的技术难题,李晓东等^[52]通过优选造浆材料、高温增粘剂和高温降滤失剂等抗高温材料,开发了一套抗高温甲酸盐钻井液体系。该钻井液具有良好的高温流变稳定性、滤失造壁性、悬浮稳定性、高温封堵性能和抗岩屑污染性能,能够满足200℃以上深部高温地热钻探的需求。

3.2 抗高温泡沫钻井液体系

抗高温泡沫钻井液体系的需求主要源于地热井钻探的需要。泡沫钻井液体系具有密度低、粘度小、切力低等特点,能够有效地减小环空压差和减轻对储层的伤害。此外,泡沫钻井液还具有良好的

表5 各类抗高温油基钻井液体系主要特点汇总

Table 5 Summary of main characteristics of various high-temperature resistant oil-based drilling fluid systems

钻井液名称	配 方	抗温/°C	主要特点
全油基钻井液体系	白油+有机土+主乳化剂+辅乳化剂+润湿剂+乳 化沥青防塌剂+超细碳酸钙+防塌树脂,	150	油水比>95:5,相比常规油包水乳化钻 井液可进一步抑制泥页岩水化分散、 提高钻速、稳定井壁和储层保护
抗高温油包水 钻井液体系	白油+25%CaCl ₂ 盐水+超高温乳化剂SD-HTPE+辅 乳化剂SD-HTSE+润湿剂+降粘剂SD-ORV+增 粘剂SD-OIV+有机土+CaO+油溶性沥青+重晶 石	220	具有抗污染能力强、润滑性能优越、动态 沉降稳定性好的优点,对乳化剂和润 湿剂的性能需求相较于纯油基钻井液 更为严格,环保性和安全性高
抗高温水包油 钻井液体系	淡水:5号白油=7:3+纯碱+烧碱+增粘剂+主乳+辅 乳+提切剂+润湿剂+降失水剂+高温稳定剂	220	可以通过调节油水比来改变钻井液的 密度,满足欠平衡钻井的需要
抗高温可逆油 基钻井液体 系	3号白油+25%CaCl ₂ 盐水+非离子表面活性剂CN- 2+改性纳米颗粒+自制油基稳定剂+有机土+重 晶石油水比为50:50~60:40	250	乳状液可从油包水转相为水包油,易于 水洗,具有低油水比和简单组分的优 点

抗温性能和稳定性,能够适应高温地热井的钻探需要。任小庆等^[53]通过对发泡剂、稳泡剂和抗温土的优选,形成了针对高温地热钻井中泡沫钻井液体系。其中,通过实验优选了抗高温表活剂DC-1作为泡沫体系发泡剂,并选择MD-D作为抗高温稳泡剂,对抗温土进行优选时发现,含有凹凸棒粉的体系的泡沫具有更高的稳定性。经过230℃老化2h和4h后的体系仍然具有良好的泡沫稳定性和发泡能力,表明优选的泡沫体系具有抗230℃高温和抗污染的能力,HTHP失水量≤20 mL,具有较好悬浮携带能力的地热井抗高温环保钻井液体系。

3.3 抗高温弱凝胶钻井液体系

弱凝胶钻井液是一种新型的钻井液体系,具有较好的抗温性能和储层保护性能,能有效地提高钻井作业的安全性和效率。

针对顺北油气田奥陶系一间房组和鹰山组碳酸盐岩储层中微裂缝发育、气层活跃以及钻井液受气侵的情况,赵海洋等^[54]研制出了一套抗高温的弱凝胶防气侵钻井液体系,该体系的抗温性能可达180℃,密度可达1.8 g/cm³,具有良好的流变性、降滤失性和抗污染性。

3.4 国外抗高温无固相钻井液体系

国外在抗高温无固相钻井液体系的研究方面起步较早,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^[55]。早在1990年代初,哈里伯顿公司就成功研发了一种耐高温钻井液体系(HTDF),能够在180℃的高温条件下工作,克服

了无固相钻井液在高温环境下难以保持稳定的技术难题。在1990年代中旬,德国利用甲酸盐钻井液体系成功钻成了一口小井眼气井,并实现了循环性使用,极大地减少了对环境的污染^[56]。无固相聚合物体系代替掉造成污染的磺化钻井液体系在伊拉克艾哈代布区块ADRu3-3-2H井四开钻进期间成功应用,带来更好的流变稳定性、润滑性,携砂能力强^[57]。德国KTB科学钻探先导孔使用的Dehydrill HT无固相硅酸盐钻井液,但存在性能恶化,井壁坍塌,携屑困难的问题,在后期高温环境下因粘度过高而引发流变性失控^[1]。Galindo等^[58]成功研制出的无粘土高性能水基钻井液已应用于218℃的超高温井中。该钻井液配方中含有创新性的合成聚合物型增粘剂、流型调节剂及降滤失剂等成分,保证了良好的流变性能及悬浮稳定性。

各类抗高温无固相钻井液体系的主要特点汇总见表6。

4 其它抗高温钻井液体系

4.1 抗高温有机硅钻井液体系

抗高温有机硅钻井液体系通过采用有机硅等高分子材料作为主要成分,在高温下不易发生胶凝、性能恶化等现象。Zhao等^[59]开发出一种具有高达220℃耐热性和良好性能的有机硅钻井液体系,该体系具有出色的页岩抑制、润滑和良好的井筒稳定性,液体成分无毒、无荧光,非常适合深层钻井。

张立权^[60]通过筛选抑制剂和降滤失剂,研制了

表6 各类抗高温无固相钻井液体系主要特点汇总

Table 6 Summary of the main characteristics of various high-temperature resistant solid-free drilling fluid systems

钻井液名称	配 方	抗温/°C	主要特点
抗高温甲酸盐 钻井液体系	50% 甲酸钾溶液+3% 海泡石+1.5% 抗高温增粘剂 ZN-D1+5% 复合降滤失剂 FH-101+0.8% 流型调节剂 LTX-3+2% 抑制剂 LYP-1+4% 封堵剂 FDP+2% 润滑剂 FRH-105,以改性铁矿粉 加重至 2.0 g/cm ³	180	具有较好的抗温性能和储 层保护性能
抗高温泡沫钻 井液体系	0.5% 凹凸棒粉+0.2% 抗高温表活剂 DC-1+0.5% 高温稳定剂 MD-D	230	密度低、粘度小、切力低,能 有效减轻对储层的伤害
抗高温弱凝胶 钻井液体系	水+60% 甲酸钠+250% HCOOK+1% NaOH+0.5% Na ₂ CO ₃ + 0.5% 消泡剂 Desil+1% 高温稳定剂 MG-HT+1% PCD165+ 0.5% 抗高温流型调节剂 JHVIS+2% 抗高温降滤失剂 JHFLO+ 耐高温封堵剂 JHSEAL+JQWY+重晶石(1.8 g/cm ³)	180	较好的抗温性能和储层保 护性能

一种抗高温有机硅钻井液,该钻井液在高温下具有稳定的流变性,线性膨胀率<6%,且高温高压滤失量仅为 13 mL 左右。

4.2 抗高温生物质钻井液体系

抗高温生物质钻井液体系具有无毒、可生物降解等优点,能够有效地减少对环境的污染。周启成等^[61]通过使用自主研发的生物质合成树脂作为降滤失剂、抑制剂和润滑剂的核心处理剂,成功构建了这种抗高温高密度生物质钻井液体系,性能评价结果显示,该体系抗温性能可达到 200 °C,能够抵抗 1.0% CaCl₂ 污染,岩屑滚动回收率达到 94.3%,润滑系数≤0.128,生物毒性 EC₅₀ 为 89230 mg/L。

5 结论

本文总结了国内外在抗高温钻井液体系方面的研究进展。研究结论如下:

(1) 目前,国内高温水基钻井液体系的抗高温性能普遍可达 180~240 °C。聚磺钻井液体系由于磺化物聚合物的抗温能力而被广泛应用,但在环保要求方面仍有改进空间。使用高密度钻井液体系可以平衡地层压力并保持井壁稳定,而解决加重材料沉降是一个挑战;一些地层可能存在中底地层压力,因此需要低密度且可调密度的钻井液体系来确保钻井安全。为了应对盐分侵蚀问题,抗高温饱和盐水钻井液体系得到了发展。由于高温的影响,海上钻井液体系一般固相含量低,对流变性和防塌护壁性能要求高。

(2) 油基钻井液在抗温性能方面通常更为优越,在需要更高抗温能力的场合中广泛应用,具有

较强的抗污染能力和润滑性能;油包水、水包油和可逆油基钻井液体系使得抗高温油基钻井液具备更好的应用前景。

(3) 抗高温无固相钻井液体系具备良好储层保护性能和出色的抗温性能。

(4) 有机硅钻井液体系以有机硅等高分子材料为主要成分,具有卓越的抗高温性能。

然而,尽管取得了一些进展,仍存在一些问题,如在环保问题以及成本效益的制约下,抗温性能难以满足未来深井钻探的需求等。未来抗高温钻井液体系的发展方向包括环境友好性、提高抗高温性能、降低成本和增强多功能性。这意味着将注重开发更环保的抗高温钻井液体系,减少对环境影响;提高钻井液在极端高温条件下的稳定性和性能;通过优化配方和工艺降低成本,提高经济效益;同时发展具备多种功能的综合型钻井液体系,以提高钻井作业的效率 and 安全性。这将需要不断的技术创新和合作,推动钻井行业向更可持续和高效的方向发展。

参考文献(References):

- [1] 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,2012,48(1):155-159.
HU Jiliang, TAO Shixian, SHAN Wenjun, et al. Overview of ultra-deep well high-temperature drilling fluid technology and discussion of its research direction [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1): 155-159.
- [2] 吴雪鹏.耐高温多元插层膨胀石墨材料及其应用研究[J].钻探工程,2023,50(3):66-73.
WU Xuepeng. Introduction and application of high temperature resistant multi-component intercalated expanded graphite material [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 66-73.

- [3] 罗平亚,王路一,白杨. 深井超深井钻井液技术应用现状及发展展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2):10-18.
LUO Pingya, WANG Luyi, BAI Yang. A review of technical status and development expectation of drilling fluids for deep and ultra-deep wells[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2):10-18.
- [4] Barry M M, Jung Y, Lee J-K, et al. Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127:338-346.
- [5] 赵金海,张洪宁,王恒,等. 中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2):28-34.
ZHAO Jinhai, ZHANG Hongning, WANG Heng, et al. Key technical challenges and prospects of drilling and completion in ultra-deep reservoirs, Sinopec[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2):28-34.
- [6] 刘锋报,孙金声,王建华. 国内外深井超深井钻井液技术现状及发展趋势[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(2):34-39.
LIU Fengbao, SUN Jinsheng, WANG Jianhua. A global review of technical status and development trend of drilling fluids for deep and ultra-deep wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2):34-39.
- [7] 庞少聪,安玉秀,马京缘. 近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):96-103.
PANG Shaocong, AN Yuxiu, MA Jingyuan. Research progress of domestic drilling fluid viscosity reducer in recent ten years[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):96-103.
- [8] 王中华. 国内钻井液技术进展评述[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3):95-102.
WANG Zhonghua. Review of progress on drilling fluid technology in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3):95-102.
- [9] 吴建华. 超高温高密度钻井液体系配方与优化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
WU Jianhua. Formulation and optimization of ultra-high temperature and highdensity drilling fluid system[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [10] Zheng W L, Wu X M, Huang Y M. Research and application of high-temperature drilling fluid designed for the continental scientific drilling project of Songliao Basin, China [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(1):2075-2087.
- [11] 张帆,傅相友,严福寿,等. 深部取心钻探井超高温聚磺钻井液体系的研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(5):139-140.
ZHANG Fan, FU Xiangyou, YAN Fushou, et al. Study on ultra-high temperature poly-sulfon drilling fluid system for deep core drilling wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(5):139-140.
- [12] 郭文艳. 顺北工区高温高密度钻井液体系优选与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
GUO Wenyan. Optimization and evaluation of high temperature and highdensity drilling fluid system in Shunbei Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [13] 李雄,董晓强,金军斌,等. 超高温高密度钻井液体系的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(6):694-700.
LI Xiong, DONG Xiaoqiang, JIN Junbin, et al. Study and application of an ultra-high temperature high density drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(6):694-700.
- [14] 潘谊党. 抗高温高密度水基钻井液体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
PAN Yidang. Research on high temperature and high density water based drilling fluid [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [15] 郑志成. 新疆塔中地区高温高压井钻井液体系优化实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
ZHENG Zhicheng. Study on drilling fluid of high temperature and highpressure well in Tazhong Area, Xinjiang [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [16] 田惠,张克正,史野,等. 低固相超高温钻井液的研究及应用[J]. 石油化工应用, 2020, 39(10):35-39.
TIAN Hui, ZHANG Kezheng, SHI Ye, et al. Study and application of low-solid and ultra-high temperature drilling fluid [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(10):35-39.
- [17] 梅春桂. 抗高温降滤失剂合成及钻井液体系配制[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(18):136-137.
MEI Chungui. Synthesis of anti-temperature filter loss reducer and formulation of drilling fluid system [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(18):136-137.
- [18] 何丽,李伟波. 新型抗温水基石油钻井液体系研究[J]. 当代化工, 2020, 49(12):2676-2678, 2682.
HE Li, LI Weibo. Study on new temperature resistant water-based drilling fluid system [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(12):2676-2678, 2682.
- [19] Huang XB, Sun JS, Lü KH, et al. A high-temperature resistant and high-density polymeric saturated brine-based drilling fluid [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5):1215-1224.
- [20] 刘虎,罗平亚,陈思安,等. 元坝区块超高温高密度饱和盐水钻井液体系优化与现场试验[J]. 钻采工艺, 2023, 46(5):124-132.
LIU Hu, LUO Pingya, CHEN Sian, et al. Optimization and field test of ultra-high temperature high destiny saturated brine drilling fluid system in Yuanba Area, Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(5):124-132.
- [21] 邹志飞,熊正强,李晓东,等. 耐230℃高温海水钻井液室内实验研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):49-56.
ZOU Zhifei, XIONG Zhengqiang, LI Xiaodong, et al. Laboratory research on 230℃ high temperature-resistant seawater-based drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):49-56.
- [22] 李炎军,吴志明,徐一龙,等. 抗220℃深水高密度钻井液体系构建及性能评价[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(7):42-46.
LI Yanjun, WU Zhiming, XU Yilong, et al. Construction and performance evaluation of deepwater high density drilling fluid system resistant to 220℃ [J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(7):42-46.
- [23] 邹星星,李佳旭,刘彦青,等. 深水钻井抗高温水基钻井液体系研究及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2):99-102, 6.
ZOU Xingxing, LI Jiayu, LIU Yanqing, et al. Research and application of high temperature resistant water-based drilling

- fluid system used in deep water drilling[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(2):99-102,6.
- [24] 姚倩. 深水高温高压恒流变水基钻井液体系研究[D]. 荆州: 长江大学, 2020.
YAO Qian. Study on high temperature and high pressure constant rheological water-based drilling fluid system in deep water [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.
- [25] 娄益伟. 一种海上高温高压钻井液体系的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(21):139-141.
LOU Yiwei. Application of an offshore high temperature and high pressure drilling fluid system [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(21):139-141.
- [26] 肖平, 韩成. 海上耐高温封闭液体系性能评价与现场应用[J]. *内江科技*, 2021, 42(9):24-25.
XIAO Ping, HAN Cheng. Performance evaluation and field application of offshore high temperature resistant sealing fluid system [J]. *Neijiang technology*, 2021, 42(9):24-25.
- [27] 朱胜, 张海山, 徐佳, 等. 东海低孔渗地层的钻井液体系优化与应用[J]. *海洋石油*, 2021, 41(1):65-72.
ZHU Sheng, ZHANG Haishan, XU Jia, et al. Optimization and application of drilling fluid system for low porosity and low permeability formation in the East China Sea [J]. *Offshore Oil*, 2021, 41(1):65-72.
- [28] 蔡斌, 张海山, 王荐, 等. 东海抗高温低自由水钻井液体系构建与应用[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(5):147-153.
CAI Bin, ZHANG Haishan, WANG Jian, et al. Construction and application of high temperature resistance and low free water drilling fluid system in the East China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(5):147-153.
- [29] 刘涛, 张杰, 于建立, 等. 海上环保型抗高温防塌钻井液体系研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2023, 46(5):173-177.
LIU Tao, ZHANG Jie, YU Jianli, et al. Research and application of offshore environment-friendly high-temperature and anti-collapse drilling fluid system [J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(5):173-177.
- [30] 刘俊彦, 周家雄, 黄凯文, 等. 深水高温钻井液体系研究[J]. *石油化工应用*, 2020, 39(2):67-69, 73.
LIU Junyan, ZHOU Jiaxiong, HUANG Kaiwen, et al. Research on high temperature and high pressure deep water drilling fluid system [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2020, 39(2):67-69, 73.
- [31] 巩如华. 常用黏土高温造浆特性及累托土高温钻井液体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
GONG Ruhua. Study on the characteristics of high-temperature pulp of commonly used clays and the high-temperature drilling fluid system of reclaimed soil [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [32] 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.
- [33] 刘畅, 许洁, 冉恒谦. 干热岩抗高温环保水基钻井液体系[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(4):412-422.
LIU Chang, XU Jie, RAN Hengqian. An environmentally friendly high temperature water based drilling fluid for hot-dry-rock well drilling [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(4):412-422.
- [34] 田志超, 翟育峰, 林彬, 等. 耐高温环保型冲洗液体系在西藏甲玛3000 m科学深钻中的应用研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(11):15-21.
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin. Application research of high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system in 3000m scientific deep drilling in Jiama, Tibet [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(11):15-21.
- [35] 徐蒙, 王璐, 王李昌, 等. 高温水基钻井液研究及应用进展[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(4):901-908.
XU Meng, WANG Lu, WANG Lichang, et al. Research and application progress of high-temperature water-based drilling fluid [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(4):901-908.
- [36] 常胜利, 黄健勇, 薛伟强, 等. 抗高温高密度饱和盐水聚磺钻井液体系[J]. *化学工程与装备*, 2020, (12):167-168.
CHANG Shengli, HUANG Jianyong, XUE Weiqiang, et al. High-temperature-resistant, high-density brine-saturated polysulfone drilling fluid system [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2020, (12):167-168.
- [37] 王中华. 国内钻井液技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4):114-123.
WANG Zhonghua. Current situation and development suggestions for drilling fluid technologies in China [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4):114-123.
- [38] 刘晓燕, 毛世发, 史沛谦. 国内油基钻井液技术进展评述[J]. *石化技术*, 2020, 27(5):259, 255.
LIU Xiaoyan, MAO Shifa, SHI Peiqian. Review of domestic oil-based drilling fluid technology progress [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(5):259, 255.
- [39] 黄津松, 张家旗, 王建华, 等. 国内油基钻井液研发现状与思考[J]. *化工管理*, 2020, (33):130-133.
HUANG Jinsong, ZHANG Jiaqi, WANG Jianhua, et al. Current situation and suggestion of domestic oil-based drilling fluid [J]. *Chemical Engineering Management*, 2020, (33):130-133.
- [40] 郭永宾, 管申, 刘智勤, 等. 涠洲W油田全油基强封堵钻井液技术[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(4):117-123.
GUO Yongbin, GUAN Shen, LIU Zhiqin, et al. Full oil-based strong sealing drilling fluid technology in Weizhou W Oilfield [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(4):117-123.
- [41] 陈浩东, 李龙, 郑浩鹏, 等. 北部湾盆地全油基钻井液技术研究与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(12):1-4.
CHEN Haodong, LI Long, ZHENG Haopeng, et al. Development and application of full oil-based drilling fluids in Beibu Gulf Basin [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(12):1-4.
- [42] 汪胜, 夏迎春, 谢小东. 抗高温高密度全油基钻井液及沉降稳定性分析[J]. *清洗世界*, 2021, 37(9):48-49.
WANG Sheng, XIA Yingchun, XIE Xiaodong. High-temperature-resistant, high-density, all-oil-based drilling fluids and sedimentation stability analysis [J]. *Cleaning World*, 2021, 37(9):48-49.
- [43] 王星媛, 陆灯云, 吴正良. 抗220℃高密度油基钻井液的研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(5):550-554, 560.

- WANG Xingyuan, LU Dengyun, WU Zhengliang. Study and application of a high density oil base drilling fluid with high temperature resistance of 220°C[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5):550-554,560.
- [44] 孙伟,彭洁,王倩,等.抗高温油基钻井液用提切剂的研制及性能评价[J].*精细石油化工*,2020,37(4):19-24.
SUN Wei, PENG Jie, WANG Qian, et al. Development and performance evaluation of cutting agent for high temperature oil-based drilling fluid[J]. *Speciality Petrochemicals*, 2020, 37(4):19-24.
- [45] 刘鸿武,苏琪,韩立,等.抗高温高密度油基钻井液体系研究及性能评价[J].*当代化工*,2021,50(5):1167-1170.
LIU Hongwu, SU Qi, HAN Li, et al. Research and performance evaluation of high temperature resistance and high-density oil-based drilling fluid system[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021,50(5):1167-1170.
- [46] 范胜,周书胜,方俊伟,等.高温低密度油基钻井液体系室内研究[J].*钻井液与完井液*,2020,37(5):561-565.
FAN Sheng, ZHOU Shusheng, FANG Junwei, et al. Laboratory study on high temperature low density oil base drilling fluids[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020,37(5):561-565.
- [47] 白锋军,曹莉洁,王创业,等.低密度抗高温水包油泡沫钻井液体系研发[J].*当代化工*,2021,50(12):2918-2922.
BAI Fengjun, CAO Lijie, WANG Chuangye, et al. Development of low-density and high-temperature resistant oil-in-water foam drilling fluid system[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021,50(12):2918-2922.
- [48] 冯硕.抗高温水包油钻井液体系评价及应用[J].*石油化工应用*,2023,42(9):29-33.
FENG Shuo. Evaluation and application of high temperature resistance oil-in-water drilling fluid system[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2023,42(9):29-33.
- [49] 任妍君,翟玉芬,路岩岩.抗高温高密度可逆油基钻井液体系[J].*石油学报*,2023,44(5):841-851,861.
REN Yanjun, ZHAI Yufen, LU Yanyan. Reversible oil-based drilling fluid with high-temperature resistance and high density[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023,44(5):841-851,861.
- [50] 黎凌,吉永忠,许期聪,等.巴基斯坦北部区块抗高温高密度柴油基钻井液体系[J].*钻井液与完井液*,2020,37(5):572-577.
LI Lin, JI Yongzhong, XU Qicong, et al. A high temperature high density diesel oil base drilling fluid used in north block in North Pakistan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5):572-577.
- [51] 张健.新型抗高温高密度有机盐钻井液体系研究[J].*能源化工*,2021,42(6):62-66.
ZHANG Jian. Study on a new high temperature resistance and high density organic salt drilling fluid system[J]. *Energy Chemical Industry*, 2021,42(6):62-66.
- [52] 李晓东,熊正强,万汉平,等.深部地热抗高温甲酸盐钻井液体系研究[J].*地质与勘探*,2022,58(5):1091-1098.
LI Xiaodong, XIONG Zhengqiang, WAN Hanping, et al. Anti-high temperature formate drilling fluid system for deep geothermal resources[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5):1091-1098.
- [53] 任小庆,高小荣,孙彩霞,等.抗高温泡沫钻井液体系评价研究[J].*地质与勘探*,2021,57(2):423-429.
REN Xiaoqing, GAO Xiaorong, SUN Caixia, et al. Evaluation of high temperature resistant foam drilling fluid system[J]. *Geology and Exploration*, 2021,57(2):423-429.
- [54] 赵海洋,范胜,连世鑫,等.顺北油气田用抗高温弱凝胶防气侵钻井液体系[J].*钻井液与完井液*,2023,40(3):332-339.
ZHAO Haiyang, FAN Sheng, LIAN Shixin, et al. Study on high temperature gas-cut resistant weak gel drilling fluid in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023,40(3):332-339.
- [55] 张雁,屈沅治,张志磊,等.超高温水基钻井液技术研究现状及发展方向[J].*油田化学*,2022,39(3):540-547.
ZHANG Yan, QU Yuanzhi, ZHANG Zhilei, et al. Research progress and development direction of technologies for water-based drilling fluid in ultra-high temperature[J]. *Oilfield Chemistry*, 2022,39(3):540-547.
- [56] 徐明磊,佟乐,杨双春,等.环保型耐高温无固相钻井液体系研究进展[J].*应用化工*,2020,49(8):2063-2067,2074.
XU Minglei, TONG Le, YANG Shuangchun, et al. Research progress on environmentally friendly high temperature resistant solid-free drilling fluid system[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020,49(8):2063-2067,2074.
- [57] 王明国.无固相聚合物体系泥浆在艾哈代布油田 ADRu3-3-2H井应用[J].*西部探矿工程*,2018,30(11):56-57,60.
WANG Mingguo. Application of solid-free polymer system mud in ADRu3-3-2H well of Ahadeeb Field[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018,30(11):56-57,60.
- [58] Galindo K A, Zha W, Zhou H, et al. High temperature, high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells[C]. *Proceedings of the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, F, 2015.
- [59] Zhao F, Sun Y, Ma S, et al. Interior research of resistance to high 220 degrees heat resistance drilling fluid system[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 381(1):012094.
- [60] 张立权.抗高温有机硅钻井液体系研究[J].*广东化工*,2022,49(3):43-45.
ZHANG Liqun. Study on high temperature resistant silicone drilling fluid system[J]. *Guangdong Chemical industry*, 2022, 49(3):43-45.
- [61] 周启成,梁应红,单海霞,等.抗高温高密度生物质钻井液体系研究及应用[J].*石油钻探技术*,2022,50(6):78-84.
ZHOU Qicheng, LIANG Yinghong, SHAN Haixia, et al. Research and application of a high-temperature resistant and high-density biomass drilling fluid system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022,50(6):78-84.

(编辑 王文)