

抗高温环保水基钻井液研究进展

李旭方¹, 熊正强²

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

摘要:为更好地服务国家生态文明建设及绿色勘查开发, 环保型水基钻井液将成为发展方向。随着钻探深度增加, 地层温度越来越高, 对环保钻井液的抗温能力提出了更高的要求。本文介绍了国内外近 10 年来抗高温环保水基钻井液研究与应用的进展情况, 包括高性能水基钻井液、甲酸盐钻井液、有机盐钻井液、聚合醇钻井液、硅酸盐钻井液及甲基葡萄糖苷钻井液等。总结了现有抗高温环保水基钻井液体系存在的不足, 并分析了抗高温环保水基钻井液的发展趋势。

关键词:水基钻井液; 抗高温钻井液; 环保钻井液; 绿色勘查

中图分类号: TE254; P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)09-0032-08

Research progress on high temperature resistant and environment friendly water-based drilling fluids

LI Xufang¹, XIONG Zhengqiang²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Environment friendly water-based drilling fluids will become a development direction to meet the requirements of the national ecological civilization construction and green exploration and development. With increase in drilling depth, the formation temperature becomes higher and higher; therefore, higher requirement is placed on the temperature resistance of environment friendly drilling fluids. In this paper, the new progresses on high temperature resistant, environment friendly water-based drilling fluids at home and abroad are introduced, including high performance water-based drilling fluid, formate drilling fluid, organic salt drilling fluid, polymeric alcohol drilling fluid, silicate drilling fluid, methyl glucoside drilling fluid. The shortcomings of the existing high temperature resistant, environment friendly water-based drilling fluid system are summarized, and the development trend of high temperature resistant, environment friendly water-based drilling fluids is analyzed.

Key words: water-based drilling fluid; high temperature resistant drilling fluid; environment friendly drilling fluid; green exploration

0 引言

由于对环境保护问题的日益重视, 对钻井液的环保性能提出了新的、更严格的要求, 要求钻井液无毒、可降解, 不污染周围环境。相对于油基钻井液, 水基钻井液具有环保性好、成本低的显著优势。统计表明, 80% 的钻井工程中应用的都是水基钻井液^[1]。随着我国油气资源向深部勘查开发以及干热

岩钻探、深部科学钻探工程的实施, 钻遇地层温度越来越高, 对钻井液的抗高温能力提出了更高的要求。因此, 抗高温环保型水基钻井液成为水基钻井液一个重要的发展方向, 也是钻井液研究的热点之一。本文结合国内外有关文献资料, 就抗高温环保水基钻井液研究与应用情况进行简要介绍。

目前, 环保型水基钻井液体系主要有高性能水

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-08-21 DOI: 10.12143/j.tkgc.2019.09.002

基金项目: 国家重点研发计划课题“绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术”(编号: 2018YFC0603406); 国土资源部深部地质钻探技术重点实验室开放基金项目(编号: KF201810)

作者简介: 李旭方, 男, 汉族, 1993 年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 13121919453@163.com。

通信作者: 熊正强, 男, 汉族, 1985 年生, 工程师, 硕士, 从事钻井液材料研究与应用工作, 北京市海淀区学院路 29 号探工楼, xiongzq1012@126.com。

引用格式: 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.

基钻井液、甲酸盐钻井液、聚合醇钻井液、硅酸盐钻井液及甲基葡萄糖苷钻井液。

1 高性能水基钻井液

高性能水基钻井液又称胺基钻井液,主要由页岩抑制剂、包被剂、分散剂和降滤失剂组成。该钻井液体系是一种环保型钻井液,被认为是替代油基钻井液且又能安全钻进的一类性能更高的水基钻井液,并于 2006 年被列为一种新的钻井液体系分类。国外 3 大钻井液服务公司均拥有自主知识产权的高性能水基钻井液,如 M-I SWACO 公司研制的 ULTRADRIL™体系、Baroid 公司研制的 Hydro-Guard 体系及 Baker Hughes 公司研制的 PERFORMAX 体系等^[2-4]。国内 3 大石油公司下属研发机构也均研发了各种高性能水基钻井液,如中国石油集团钻井工程技术研究院研制的高润滑强抑制高性能钻井液体系、中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司研制的 KPF 高性能钻井液体系、中海油能源发展股份有限公司工程技术湛江分公司研制的高性能深水钻井液体系等^[5-7]。

高性能水基钻井液在国外不同海域上千口井及我国南海海域多口深水井都得到了应用。例如,2009 年巴西国家石油公司 Petrobras 第一次在哥伦比亚加勒比海泰罗娜区块使用耐温 150 °C 的高性能钻井液完成深水钻探^[8];Halliburton 公司^[9]研发了耐温达 160 °C 的高性能水基钻井液,并在埃及地中海 KARAM-1 井取得了良好的应用效果;中国海洋石油公司研制的高性能水基钻井液 HEM 体系于 2013 年首次在中国南海海域 LH26-2-1 井成功应用,之后陆续在数十口深水井中得到应用^[10]等。此外,高性能水基钻井液也已经成功应用于一些特殊地层钻探,如焦油层、Khafji 和 Ahmadi 高度分散的构造应力页岩层等^[11-12]。

针对深海钻探需求,中国石油大学(华东)赵欣等^[13]以研制的聚胺强抑制剂 SDJA 为关键处理剂,考虑天然气水合物抑制性与低温流变性等因素,构建了 1 套适用于深水钻井且耐温达 150 °C 的聚胺高性能水基钻井液。其配方为:3% 海水膨润土浆 + 0.15% 增粘剂 XC + 3% 抑制剂 SDJA + 4% 降滤失剂 SD-101 + 1% 降滤失剂 JLS-1 + 1.5% 封堵剂 FT-1 + 1% 润滑剂 SD-505 + 0.1% 包被剂 CPAM + 20% 氯化钠。针对深水钻井作业过程中钻遇地层

越来越复杂及要求的温度与密度越来越高等问题,中海油服油田化学事业部郭磊等^[14]在现有高性能水基钻井液 HEM 体系基础上,通过进一步优选抗温材料,研制了 1 套适用于 180 °C、1.8 g/cm³ 条件下的深水 HEM 高温高压钻井液体系,并在中国南海海域进行了现场应用。

针对库车山前构造超深、超高压、高温、高含盐地层使用常规高密度水基钻井液井下复杂情况频发的问题,塔里木油田公司李家学等^[15]研发了分别用于盐上地层、盐膏层及盐下地层钻进的 3 套高性能水基钻井液配方,其中用于盐下地层的高性能水基钻井液抗温可达 180 °C。研制的高性能水基钻井液在库车山前构造带某区块 X 井现场成功应用,从开钻起一直使用高性能水基钻井液,钻井液抗温抗盐性能好,钻进过程中井壁稳定,钻进效率高,完钻井深 7006 m,井底温度 168 °C。

针对塔里木盆地南部天山前缘区块超高温、超高压、超厚盐石膏复合地层和高坍塌压力地层分布广泛的特点,江西科技师范大学李龙等^[16]以高性能稳定剂、纳米成膜封堵剂和润滑剂为基础,研制了 1 套具有较强抗盐、抗钙和抗钻屑能力且耐温达 160 °C 的高性能钻井液。其配方为:饱和盐水 + 1% K₂CO₃ + 0.2% NaOH + 1.4% 润湿剂 ND-288 + 1% 降滤失剂 ND-258 + 0.5% 增粘剂 ND-259 + 1.5% 抑制剂 HM + 1% 润滑剂 ND-253。

2 有机盐钻井液

2.1 甲酸盐钻井液

甲酸盐钻井液是 1980 年开始发展起来的新型钻井液体系,其最初是为了减少小井眼钻井中摩擦压力损失而设计的。甲酸盐钻井液具有密度可调性强、腐蚀性低、不污染环境、抗高温能力强等优点。同时,甲酸盐钻井液可以与页岩稳定剂、天然气水合物抑制剂等兼容,也可以作为抗氧化剂提高黄原胶 XC 等生物聚合物的抗高温能力^[17-20]。甲酸盐钻井液作为一种具有抑制性强和环保性好等诸多优点的抗高温钻井液体系得到了大量应用,例如俄罗斯天然气工业股份公司 Gazprom 在陆地 Yuzhno-Priobskoye 油田和海上 Prirazlomnoye 油田均使用了甲酸盐钻井液体系^[21];印度尼西亚近海储层平均温度为 157 °C 的 Belanak 油田应用甲酸钠钻井液体系完成了 6 口井的钻探^[22]等。

针对高密度钻井液的储层损害问题,科威科石油公司(KOC)^[23]通过运用四氧化锰和赤铁矿研制了适用于甲酸盐钻井液体系的加重剂 Micromax,研制了1套抗温能力为150℃的高密度甲酸钾钻井液体系,在深水高温高压井侏罗纪地层获得了突出的应用效果。研制的甲酸钾钻井液体系有效减小了储层损害,提高了生产效率,降低了钻井成本。

为了克服常规钻井液固相含量高、抑制性不足等问题,东北石油大学张延鹤^[24]通过优选处理剂,研制出了抗温达200℃的无固相甲酸盐钻井液体系。其配方为:甲酸盐水+3%降滤失剂 HHJL-1+0.5%增粘剂 HHTN-1+3%储层保护剂 HHYB-N,并在吉林省龙深区块成功应用。

为提高甲酸盐钻井液体系的抗高温能力,英国索尔福德大学 Akpan 等^[25]以膨润土、生物胶 Diutan Gum、甲酸钾、异抗坏血酸钠及聚乙二醇(分子量8000)等为主要材料配制钻井液,详细探究了甲酸盐、异抗坏血酸钠、聚乙二醇及pH值对钻井液抗高温能力的影响。研究发现:(1)单纯的甲酸盐钻井液抗温能力不超过150℃;(2)通过复配聚乙二醇和抗氧化剂异抗坏血酸钠,能大幅提高甲酸盐钻井液的抗温能力至232℃;(3)较高的pH值有助于避免甲酸盐钻井液在高温下凝胶强度过高的问题。

2.2 Weight系列有机盐钻井液

国内使用的有机盐主要有OS-100、PRT、YJS和Weight等系列产品。其中,Weight系列钻井液获得了较为广泛的应用。

针对海域地区地层坍塌压力高,易发生坍塌掉块等问题,中国石油集团海洋工程有限公司钻井事业部侯岳等^[26]通过对有机盐钻井液抑制性、润滑性、抗高温能力的探究,研制了1套抗150℃高温的海水有机盐钻井液体系。其配方为:海水+2%钠土浆+0.3%Na₂CO₃+0.1%NaOH+1.5%降滤失剂 Redul+0.1%XC+2%流型调节剂 Viscol+2%白沥青+1%封堵剂 LPF+3%细目钙+30%有机盐 Weigh2+1.5%润滑剂 PGCSl+重晶石,成功应用于迈陈凹陷洋浦地区洋1井。

针对费尔干纳盆地深部井段高压、高盐、高硫等问题,西部钻探工程有限公司艾贵成等^[27]通过现场试验和室内评价,运用有机盐 Weight4 研制了1套抗温达220℃的超高密度有机盐钻井液体系,钻井液最高密度可达3.0g/cm³。该钻井液体系具有良

好的抑制性和储层保护能力,而且在高密度下仍具有良好的润滑性。

根据钻探现场情况,渤海钻探泥浆技术服务分公司^[28]针对塔里木油田克深15井的窄泥浆密度窗口及高温高盐等难题,将Weight1和Weight2复合使用,研制了能够抗170℃高温的复合有机盐水基钻井液体系。其配方为:水+0.3%~0.5%Na₂CO₃+2%~3%抗盐降滤失剂 BZ-KJS-1+3%~6%抑制防塌剂 BZ-YFT+2%~4%抗盐提切剂+2%~5%抑制润滑剂 BZ-YRH+60%~90%复合有机盐+加重剂。

3 聚合醇钻井液

聚合醇又称多元醇或复合醇。聚合醇钻井液是20世纪80年代出现的以聚合醇为主剂的环保水基钻井液。聚合醇的浊点效应使得聚合醇钻井液具有较强的页岩抑制能力和润滑性能^[29]。早在20世纪90年代,国外便已经发展出了聚乙二醇共聚物(COP/PPG)钻井液、聚乙二醇钻井液等钻井液体系^[30-31]。

针对塔里木盆地深井、超深井对钻井液抗高温能力的高要求,中石油塔里木油田公司邹盛礼等^[32]以聚合醇PEG作为防塌剂,通过优选降滤失剂和包被剂,研制了1套耐温160℃的聚合醇钻井液。其配方为:土浆+0.1%NaOH+0.2%包被剂 CX-215+1.0%防塌剂 CX-508+1.0%成膜降滤失剂 CMF+1.0%降滤失剂 JMP-2+2.0%聚合醇防塌剂 PEG+2.0%润滑剂 TYRF-1+2.0%提切剂 PF-PRD+3.0%KCl+1.0%屏蔽暂堵剂 YX-1+1.0%屏蔽暂堵剂 YX-2+石灰石,并成功应用于塔中高温深井721-5井。

针对水平井钻探摩阻和扭矩较大等技术难点,大庆钻探钻井工程技术研究院邹大鹏等^[33]合成了1种环保抗高温润滑剂,并以此为基础探索出了1套适用于水平井钻进、耐温160℃的抗高温聚合醇钻井液。其配方为:3%土浆+2%~3%多元醇抑制剂 JY-2+2%~3%磺化褐煤树脂 SPNH+1%~3%聚酯物封堵剂 DYFD-200+1%~2%泥饼改善剂 NBG-2+1%~2%超细碳酸钙+2%~4%脂肪酸合成酯 SN-2+0.5%~1%包被剂 KPAM,实现了裂缝性火山岩地层的安全环保钻井施工。

针对环境敏感性海域高温深井钻探需求,刘晓

栋等^[34]通过合成一种抗高温抗盐降滤失剂 BDF-100S,研制了 1 套抗温达 200 °C 的聚合醇海水钻井液体系,并在井底最高温度达 204 °C 的环渤海油田现场应用中取得了良好效果。通过合成高温增粘剂 HIVS,研制了 1 套在 200 °C 高温环境下热稳定时间更长的聚合醇钻井液体系,钻井液主要由聚合物降滤失剂 BDF-100S、聚合物增粘剂 HIVS 和乙二醇抑制剂等组成,改进的聚合醇钻井液体系适用于淡水和海水^[35]。

4 硅酸盐钻井液

硅酸盐钻井液是一种防塌效果突出、抑制性强、成本较低的环保钻井液体系,同时,硅酸盐在盐水钻井液中还可作为缓蚀剂保护钻具^[36]。20 世纪 30 年代,将可溶性硅酸盐引入钻井液中,并成功在墨西哥沿海地区钻探了 100 多口井^[37]。近年来国内外逐渐发展出了多种硅酸盐钻井液体系,如 Halliburton 公司的硅酸钾钻井液体系^[38]、PQ 公司的高比硅酸盐钻井液体系^[39]、四川仁智石化公司的 WDX 硅酸盐钻井液体系^[40]、青海核工业地质局的硅酸盐聚乙烯醇钻井液体系^[41]、西部钻探吐哈钻井公司的有机硅醇-硅酸盐钻井液体系^[42]等。硅酸盐钻井液在国内外石油钻井现场均得到了广泛应用,如非洲乍得南部 Bongor 盆地 Prosopis E1-1 井^[43]、江汉盆地鄂深 6-侧井^[44]及苏丹 6 号区块 Moga-8 井^[45]等。

但是,硅酸盐钻井液体系作为抗高温环保钻井液也存在着一些较为明显的缺点,如流变性和滤失量难以控制、储层损害等。

为解决超深井地层塌陷、卡管等井下复杂情况,提高硅酸盐钻井液体系的抑制性能和抗高温能力,西南石油大学王平全等^[46]利用聚合醇的浊点效应研制了 1 套耐温 150 °C 的硅酸钾-聚合醇钻井液体系。其配方为:4% 土浆+适量 NaOH+0.4% 降滤失剂 JT888+4% 硅酸钾 FP-V+0.4% 高粘羧甲基纤维素 HV-CMC+3% 聚合醇 JLX-B-S+1% KCl。该钻井液体系在流变性、抗温能力、抗污染能力及润滑性等方面均优于硅酸盐钻井液。

为进一步提高硅酸盐钻井液的抗温能力,斯伦贝谢公司^[47]研制了 1 套抗温 160 °C 的硅酸盐钻井液体系。其配方为:1.4% KCl+0.07% Na₂CO₃+0.28% 常规 PAC+0.84% Ulpac+4.2% 抗高温聚

合物+0.28% XC+2.28% 硅酸钠+改性沥青+1.14% 胺基高温稀释剂+重晶石。

为减少致密气储层钻井过程中水锁效应的损害,Jararov 等^[48]通过对地层损害机理和液态硅酸钠凝胶作用的研究,以硅酸钠含量为单一变量,详细探究了硅酸钠加量对钻井液流变性、尤其是滤失量和滤饼质量的影响,研制了 1 套能够有效提高致密气藏产能、抗温达 150 °C 的硅酸钠钻井液体系。

5 甲基葡萄糖苷钻井液

甲基葡萄糖苷钻井液又称为仿油基钻井液,可以通过形成半透膜防止页岩水化,具有较好的润滑性和相容性,对环境友好,流变性能稳定,能有效携带岩屑和清洁井筒^[49-50]。甲基葡萄糖苷钻井液广泛应用于钻井现场中,如我国南海地区 WZ-6-9 油田^[51]、大港油田滨 26X1 井^[52]、墨西哥湾 Tick 钻井平台^[53]等。

针对甲基葡萄糖苷在钻井液中加量大、抑制性不足等问题,中原石油勘探局钻井工程技术研究院司西强等^[54]引入季铵盐结构合成了阳离子甲基葡萄糖苷钻井液 CMEG,研制了 1 套抗 150 °C 高温的阳离子甲基葡萄糖苷钻井液体系。其配方为:2% 基浆+0.4% NaOH+0.6% 复合离子聚丙烯酸盐 SD-17+0.6% 低粘羧甲基纤维素 LV-CMC+0.3% 高粘羧甲基纤维素 HV-CMC+3% 阳离子甲基葡萄糖苷 CMEG+1.0% 无渗透剂。该钻井液体系具有良好的抑制性和润滑性,相对回收率达到 99.01%。

针对深井钻探时膏盐及盐水污染、压差卡钻等问题,川庆钻探工程有限公司欧阳伟等^[55]通过优选处理剂,研制了 1 套抗温 170 °C 的甲基葡萄糖苷钻井液体系,并成功应用于剑门 1 井中,解决了压差卡钻等井下复杂问题,在井底温度达到 175 °C 的超深井中完成了 2000 多米小井眼钻探任务。

为了提高烷基葡萄糖苷钻井液的抗高温能力,渤海钻探钻井工艺研究院刘艳等^[56]合成了磺甲基乙基葡萄糖苷作为抗高温抑制剂,研制了 1 套抗温 180 °C 的磺甲基乙基葡萄糖苷钻井液体系,磺甲基乙基葡萄糖苷的加入使得钻井液在抗温、润滑、抑制等方面的性能都有所提高。

6 其它钻井液体系

6.1 无固相钻井液

无固相钻井液又称无粘土钻井液,具有能够提高钻速、减薄泥饼、减轻油气层损害等优点。为保护深井储层,中国石油大学(华东)黄维安等^[57]开发了1套抗温达200℃的无固相水基钻井液体系。其配方为:水+1%降粘剂 HTVS+0.5%高温稳定剂 Na_2SO_3 +1.5%降滤失剂 TRS+2%润滑剂 EPL+0.3%防水锁剂 FCS。

针对钻井液抗高温能力不足的缺点,大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院李建军等^[58]通过对抗高温增粘剂、降滤失剂的研究,设计了1套抗温220℃的无固相钻井液体系,并成功应用于涩北1号气田24井。

为满足恶劣高温环境下钻井需求, Galindo 等^[59]设计并合成了一种新型聚合物增粘降滤失剂,并构建了1套抗温达204℃的超高温井用无固相水基钻井液体系,研制的钻井液对页岩有良好的抑制作用,在陆地和海洋钻探都可应用,同时具有HSE效益好、成本低等优点。

6.2 无铬钻井液

铬木质素磺酸盐是抗高温钻井液的常见组分,但由于环保要求日趋严格,低毒性的铁铬木质素磺酸盐已不提倡使用,无铬钻井液体系应运而生,且已在南美、东非、东欧等地获得应用。为去除钻井液中的含铬材料, Tehrani 等^[60]用丙烯酰胺共聚物和类似于磺化单体的物质合成聚合物作为分散剂,构建了1套抗温达232℃的无铬钻井液体系,研制的无铬钻井液有效解决了高温高压水基钻井液常见的高温凝胶问题。

为提高无铬钻井液性能, Fernandez 等^[61]用 CHROME-BASED 稀释剂替代铬木质素磺酸盐,研制了1套抗204℃高温的无铬高密度钻井液体系,并成功应用于匈牙利东南部页岩气藏钻探。

6.3 有机硅钻井液

有机硅具有热稳定性好、防塌能力好、无毒等优点。针对深部地层钻探需求,西南石油大学褚奇等^[62]利用有机硅作为降滤失剂,研制了1套抗温达220℃的有机硅水基钻井液体系。其配方为:4.0%粘土+0.5% Na_2CO_3 +0.1%KOH+0.6%~1.0%有机硅降滤失剂+2.0%~3.0%磺化褐煤 SMC+0.1%~0.3%磺化沥青 WFT-101+0.4%~0.6%

有机硅降粘剂 GCYZ-1+0.5%封堵剂 GFD+3.0% CaCO_3 +0.2%~0.4%包被剂 PAC-141+1.0%抗高温保护剂 GBH。研制的有机硅钻井液悬浮稳定性好,具有一定的抗盐和抗钙能力。

6.4 纳米硅铝基钻井液

纳米钻井液具有流变性好、热稳定性高等优点。纳米材料能够改善水基钻井液的润滑性、减少滤失量。使用纳米硅、纳米石墨烯等纳米材料提高钻井液性能的研究已经成为热点^[63-67]。为替代含KCl聚合物钻井液, Taraghikhah^[68]等研制了1套耐温150℃的纳米硅铝基钻井液,研制的纳米硅铝基钻井液可以将成本降低20%~30%,能够有效降低泥饼摩擦系数,与KCl聚合物钻井液、阳离子聚合物钻井液等钻井液体系相比具有更强的页岩抑制性,抑制能力达到90%~99%。

7 发展趋势

国内外在抗高温环保水基钻井液研究与应用方面开展了大量的工作,并取得了一些重要成果。但是,现有抗高温环保水基钻井液体系还普遍存在以下问题:

(1)研发的环保型处理剂抗温能力不够强,一定程度上制约了环保水基钻井液应用温度范围。

(2)抗高温环保钻井液体系多数要与环保性能较差的处理剂(如磺化类处理剂)复配,才能达到更好的性能,这使钻井液整体的环保性能受到一定程度的影响。

抗高温环保水基钻井液研究的发展趋势主要包括以下几个方面:

(1)研制低成本环保处理剂,降低抗高温环保水基钻井液的成本,推动环保钻井液的广泛应用。

(2)探究环保处理剂抗高温机理研究,并开展新型耐温150℃以上的环保聚合物结构设计与合成,实现抗高温环保水基钻井液用处理剂全部环保化。

(3)随着国家深地探测战略与深海探测战略实施,钻遇地层温度将越来越高,需进一步加强超200℃高温环保水基钻井液体系的研究。

参考文献(References):

- [1] Davoodi S, Ahmad R S A, Jamshidi S, et al. A novel field applicable mud formula with enhanced fluid loss properties in high pressure-high temperature well condition containing pistachio shell powder[J]. Journal of Petroleum Science & Engi-

- neering, 2018,162:378-385.
- [2] 孔庆明,常锋,孙成春,等.ULTRADRIL™水基钻井液在张海502FH井的应用[J].钻井液与完井液,2006,23(6):71-74.
KONG Qingming, CHANG Feng, SUN Chengchun, et al. Application of ULTRADRIL™ water base mud in Well Zhanghai 502FH [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(6):71-74.
- [3] Thomas Pope, Richard Borstmayer, Andy Reseigh, et al. An innovative approach to development drilling in the deepwater Gulf of Mexico[J]. World Oil, 2004,225(1):41-48.
- [4] Richard Leaper, Nels Hansen, Mike Otto, et al. Meeting deepwater challenges with high performance water based mud [R]. Houston: American Association of Drilling Engineers, 2006:1-10.
- [5] 闫丽丽,李丛俊,张志磊,等.基于页岩气“水替油”的高性能水基钻井液技术[J].钻井液与完井液,2015,32(5):1-6.
YAN Lili, LI Congjun, ZHANG Zhilei, et al. High performance water base drilling fluid for shale gas drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015,32(5):1-6.
- [6] 中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司.KPF高性能水基钻井液:CN201610802401.8[P].2017-02-22.
Southwest Drilling Company of Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd. KPF high performance water based drilling fluid: CN201610802401.8[P]. 2017-02-22.
- [7] 程朋,崔应中,陈洪,等.高性能深水钻井液体系研究[J].化学工程与技术,2019,9(2):132-136.
CHENG Peng, CUI Yingzhong, CHEN Hong, et al. Research on high performance deepwater drilling fluid system [J]. Chemical Engineering and Technology, 2019,9(2):132-136.
- [8] Bybee, Karen. First deepwater well successfully drilled in colombia with a high-performance water-based fluid[J]. Journal of Petroleum Technology, 2009,61(11):68-71.
- [9] Mohamad Attia, Wael Elsofarfy. New engineered approach to replace oil-based fluids with high performance water-based fluids in mediterranean sea[C]//Society of Petroleum Engineers North Africa Technical Conference, 2010.
- [10] 罗健生,李自立,罗曼,等.深水钻井液国内外发展现状[J].钻井液与完井液,2018,35(3):1-7.
LUO Jiansheng, LI Zili, LUO Man, et al. Status quo of the development of deep water drilling fluids worldwide[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018,35(3):1-7.
- [11] Mohamed Hegazy, Sunil Sharma, Khaled Fares, et al. High-performance water-based system proved an environmentally-friendly alternative for time-sensitive shales in saudi arabia [C]// SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium, 2018.
- [12] Abdullah Abahussain, Rafael Pino, Saudi Aramco, et al. Successful application of specialized high-performance water based drilling fluid to drill a TAR section[C]// International Petroleum Technology Conference, 2019.
- [13] 赵欣,邱正松,石秉忠,等.深水聚胺高性能钻井液试验研究[J].石油钻探技术,2013,41(3):35-39.
ZHAO Xin, QIU Zhengsong, SHI Bingzhong, et al. Experimental study on high performance polyamine drilling fluid for deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3):35-39.
- [14] 郭磊,李怀科,罗健生.深水 HEM 高温高压钻井液体系研究与应用[J].钻采工艺,2017,40(1):99-101,11.
GUO Lei, LI Huaik, LUO Jiansheng. Research and application of HEM drilling fluid for HTHP deepwater drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(1):99-101,11.
- [15] 李家学,张绍俊,李磊,等.环保型高性能水基钻井液在山前超深井中的应用[J].钻井液与完井液,2017,34(5):20-26.
LI Jiaxue, ZHANG Shaojun, LI Lei, et al. Application of environmentally friendly high performance water base muds in ultra deep well drilling in Piedmont Area[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017,34(5):20-26.
- [16] Long L, Lei L, Zihang Y, et al. Application of innovative high density high-performance water-based drilling fluid technology in the efficient development and production of ultra-deep complicated formations in the Tian Mountain front block in China[C]//Offshore Technology Conference Asia, 2018.
- [17] 陈乐亮,汪桂娟.甲酸盐基钻井液完井液体系综述[J].钻井液与完井液,2003,20(1):31-36.
CHEN Leliang, WANG Guijuan. An overview of formate base drilling and completion fluids system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2003,20(1):31-36.
- [18] 张猛,贺连啟.甲酸盐钻井液体系的作用机理[J].中国化工贸易,2013(9):181.
ZHANG Meng, HE Lianqi. Mechanism of action of formate drilling fluid system [J]. China Chemical Trade, 2013(9): 181.
- [19] Howard, S. K. Formate brines for drilling and completion: State of the art [C]//SPE Annual Technical Conference, 1995.
- [20] Howard S, Kaminski L, Downs J. Xanthan stability in formate brine-formulating non-damaging fluids for high-temperature applications [C]//SPE European Formation Damage Conference, 2015.
- [21] Ryabtsev P L, Khomutov A Y, et al. The First experience of formate based drilling fluids application in Russia[C]//SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2018:15-17.
- [22] Bybee K. Formate-based reservoir-drilling fluid meets high-temperature challenges[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006.
- [23] Al-salali Yousef Zaid, Ayyavoo M, Al-ibrahim Abdullah Reda, et al. Paradigm shift in reducing formation damage: application of potassium formate water based mud in deep HPHT exploratory well[C]//SPE Kuwait International Petroleum Conference, 2012.
- [24] 张延鹤.无固相甲酸盐钻井液体系在龙深区块的研究与应用[D].大庆:东北石油大学,2017.
ZHANG Yanhe. Research and application of recyclable micro-foam drilling fluid in Qian'an Area[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [25] Emmanuel Udofia Akpan, Godpower C, Enyi, et al. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water sensitive and dispersible shale formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019(175):1028-1038.
- [26] 侯岳,杨金龙,蔡玮国.洋1井有机盐钻井液技术[C]//中国

- 石油集团海洋工程有限公司,中国石油集团海洋工程有限公司 2013 青年科技论坛论文集,2013:107-112.
- HOU Yue, YANG Jinlong, CAI Weiguo. Organic salt drilling fluid technology in Yang 1 [C]//China National Petroleum Corporation Offshore Engineering Co., Ltd. Proceedings of Youth Science and Technology Forum 2013 by China Petroleum Group Ocean Engineering Co., Ltd., 2013: 107-112.
- [27] 艾贵成,田效山,兰祖权,等.超高温超高密度有机盐钻井液技术研究[J].西部探矿工程,2010,22(9):47-49.
- AI Guicheng, TIAN Xiaoshan, LAN Zuquan, et al. Research on ultra high temperature resistant and ultra high density organic salt drilling fluid technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2010,22(9):47-49.
- [28] Zhang M, Zhengqing A I, Wang W, et al. Drilling fluid technology for well keshen - 15 penetrating highly deep HTHP gypsum formations[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(5):25-29.
- [29] 王亮,吴正权,曾建,等.聚合醇在钻井液中浊点变化规律研究及应用[J].钻采工艺,2009,32(6):85-87,144.
- WANG Liang, WU Zhengquan, ZENG Jian, et al. Research on the regularity of polyalcohol cloud point variation in drilling fluid and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2009,32(6):85-87,144.
- [30] Enright D P, Dye W, Smith M. An environmentally safe water-based alternative to oil muds[C]//SPE Drilling Engineering, 1992.
- [31] Bland R, Smith G L, Eagark P, et al. Low salinity polyglycol water-based drilling fluids as alternatives to oil-based muds [C]//SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology, 1996.
- [32] 邹盛礼,吴晓花,杜小勇,等.抗高温环保钻井液体系研究[J].油气田环境保护,2011,21(5):51-53,71.
- ZOU Shengli, WU Xiaohua, DU Xiaoyong, et al. On anti-high temperature environment-friendly drilling fluid[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2011,21(5):51-53,71.
- [33] 邹大鹏,盖大众.大庆油田深层致密气抗高温防塌水平水基钻井液技术[J].西部探矿工程,2018,30(5):55-58.
- ZOU Dapeng, GAI Dazhong. Deep tight gas high temperature anti-collapse horizontal well water-based drilling fluid technology in Daqing Oilfield[J]. West-China Exploration Engineering, 2018,30(5):55-58.
- [34] 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.
- [35] Liu X, Gao Y, Hou W, et al. Non-toxic high temperature polymer drilling fluid significantly improving marine environmental acceptability and reducing cost for offshore drilling [C]//International Petroleum Technology Conference, 2019.
- [36] Fernando B Mainier, Anne A M. Figueiredo, Alan Eduardo R de Freitas, et al. The use of sodium silicate as a corrosion inhibitor in a saline drilling fluid: a nonaggressive option to the environment [J]. Journal of Environmental Protection, 2016,7(13): 2025-2035.
- [37] Van Oort, Ripley D, Ward I, et al. Silicate-based drilling fluids; competent cost-effective and benign solutions to wellbore stability problems [C]//SPE/IADC Drilling Conference, 1996.
- [38] Fritz B, Jarrett M. Potassium silicate treated water-based fluid: an effective barrier to instability in the Fayetteville shale [C]// IADC/SPE Drilling Conference, 2012.
- [39] McDonald M J. A novel potassium silicate for use in drilling fluids targeting unconventional hydrocarbons[C]//SPE Canadian Unconventional Resources Conference, 2012:30.
- [40] 杨勇,赵誉杰,汪廷洪,等.WDX 硅酸盐钻井液的强抑制性和 HSE 优越性[J].钻井液与完井液,2010,27(5):38-40,90.
- YANG Yong, ZHAO Yujie, WANG Tinghong, et al. High inhibition and HSE advantages of WDX silicate drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010,27(5): 38-40,90.
- [41] 刘维鹏,许青海,白白云.硅酸盐聚乙烯醇冲洗液在新疆砂岩性铀矿钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(7):21-23,27.
- LIU Weipeng, XU Qinghai, BAI Baoyun. Application of silicate polyvinyl alcohol washing fluid in sandstone Uranium deposit drilling in Xinjiang[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(7):21-23,27.
- [42] 刘丹,张增福,马世清,等.有机硅醇-硅酸盐钻井液在吐哈油田的研究与应用[C]// 中国石油学会.中国石油学会第六届青年学术年会论文集,2009:1-5.
- LIU Dan, ZHANG Zengfu, MA Shiqing, et al. Research and application of organo-silicone-silicate drilling fluid in Tuha Oilfield[C]//China Petroleum Institute. Proceedings of the 6th Annual Youth Academic Conference of China Petroleum Institute, 2009:1-5.
- [43] 代礼杨,李洪俊,苏秀纯,等.硫酸钾/硅酸盐钻井液在乍得 Bongor 盆地的应用[J].钻井液与完井液,2011,28(2):36-38,97.
- DAI Liyang, LI Hongjun, SU Xiuchun, et al. Application of K_2SO_4 /silicate drilling fluid in Chad Bongor Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(2):36-38,97.
- [44] 黄尚德,叶诗均,彭本甲,等.鄂深 6-侧钻井硅酸盐防塌钻井液技术[J].江汉石油科技,2006,16(4):34-36,59.
- HUANG Shangde, YE Shijun, PENG Benjia, et al. Silicate anti-collapse drilling fluid technology for Well Eurasonic - 6 [J]. Jianghan Petroleum Science and Technology, 2006,16(4):34-36,59.
- [45] Guo Jiankang, Yan Jienian, Fan Weiwang, et al. Applications of strongly inhibitive silicate-based drilling fluids in troublesome shale formations in Sudan[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006,50(3-4):195-203.
- [46] WANG Pingquan, BAI Yang, QIAN Zhiwei, et al. On the development and performance evaluation of potassium silicate polyol drilling fluid[J]. Advanced Materials Research, 2012(524-527):1496-1502.
- [47] El Essawy W M, bin Hamzah R, Malik M, et al. Novel application of sodium silicate fluids achieves significant improve-

- ment of the drilling efficiency and reduce the overall well costs by resolving borehole stability problems in east africa Shale[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, 2004.
- [48] Jafarov T, Mahmoud M, Al-Majed A, et al. Improving well productivity of tight gas reservoirs by using sodium silicate in water-based drill-in fluid[C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, 2018.
- [49] Zhao J, Sun Y, Zhang X. Environmentally friendly MEG drilling fluid system for horizontal well of Daqing Oil Field [C]//American Society of Civil Engineers International Conference, 2011.
- [50] Sun YX, Xie YN, Xiao C. MEG and its application in drilling fluid[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, (287-290): 2088-2093.
- [51] Peng C, Feng W, Yan X, et al. Offshore benign water-based drilling fluid can prevent hard brittle shale hydration and maintain borehole stability [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, 2008.
- [52] 黄达全, 宋胜利, 王伟忠, 等. MEG 钻井液在滨 26X1 井的应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2008, 25(3): 36-38, 86. HUANG Daquan, SONG Shengli, WANG Weizhong, et al. The application of MEG drilling fluid in Well Bin 26X1 [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008, 25(3): 36-38, 86.
- [53] Headley J A, Walker T O, Jenkins R W. Environmental safe water-based drilling fluid to replace oil-based muds for shale stabilization[C]//Society of Petroleum Engineers, 1995.
- [54] 司西强, 王中华, 魏军, 等. 钻井液用阳离子甲基葡萄糖苷 [J]. *钻井液与完井液*, 2012, 29(2): 21-23, 90-91. SI Xiqiang, WANG Zhonghua, WEI Jun, et al. Study on cation methyl glucoside used in drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(2): 21-23, 90-91.
- [55] 欧阳伟, 杨刚, 贺海, 等. MEG 钻井液技术在剑门 1 井超长小井眼段的应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2009, 26(6): 21-23, 93. OUYANG Wei, YANG Gang, HE Hai, et al. The application of MEG drilling fluid in the long slim hole section of Well Jianmen-1 [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2009, 26(6): 21-23, 93.
- [56] 刘艳, 刘学玲, 袁丽霞, 等. 新型抗 180℃ 高温抑制剂 SEG [J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(2): 20-22, 88. LIU Yan, LIU Xueling, YUAN Lixia, et al. A new high temperature shale inhibitor for use at 180℃ [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(2): 20-22, 88.
- [57] Weian Huang, Binqiang Xie, Zhengsong Qiu, et al. Bentonite-free water-based drilling fluid with high-temperature tolerance for protecting deep reservoirs [J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2016, 51(6): 652-662.
- [58] 李建军, 王中义. 抗高温无固相钻井液技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2017, 34(3): 11-15. LI Jianjun, WANG Zhongyi. High temperature solid-free drilling fluid technology [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(3): 11-15.
- [59] Galindo K A, Zha W, Zhou H, et al. Clay-free high performance water-based drilling fluid for extreme high temperature wells [C]//SPE/IADC Drilling Conference, 2015.
- [60] Tehrani A, Young S, Gerrard D, et al. Environmentally friendly water based fluid for HT/HP drilling [C]//SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2009.
- [61] Fernandez J, Young S. Environmentally acceptable water based fluids for HTHP applications [C]//Offshore Mediterranean Conference, 2011.
- [62] 褚奇, 罗平亚, 苏俊霖, 等. 抗高温环保型有机硅钻井液的研究 [J]. *石油化工*, 2012, 41(4): 454-460. CHU Qi, LUO Pingya, SU Junlin, et al. Environmental-friendly temperature-resistant organosilicon drilling fluid [J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 41(4): 454-460.
- [63] Ekunsanmi, Ekundotun S. Evaluation of lubricants used in water-based drilling fluids [D]. Texas A & M University - Kingsville, 2012.
- [64] Boul P J, Reddy B R, Zhang J, et al. Functionalized nanosilicas as shale inhibitors in water-based drilling fluids [C]//Offshore Technology Conference, 2017.
- [65] Taha N M, Lee S. Nano graphene application improving drilling fluids performance [C]//International Petroleum Technology Conference, 2015.
- [66] 王宝堂. 纳米钻井液技术现状 [J]. *非常规油气*, 2016, 3(5): 134-138. WANG Baotang. Status of nano drilling fluid technology [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2016, 3(5): 134-138.
- [67] 蒋卓, 邢希金, 王荐. 环保型纳米材料在钻井液体系中的研究与应用 [J]. *内蒙古石油化工*, 2018, 44(2): 21-23. JIANG Zhuo, XING Xijin, WANG Jian. Research and application of environment-friendly nanomaterials in well-drilling liquid systems [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2018, 44(2): 21-23.
- [68] Taraghikhah S, Mohammadi M K, Nowtaraki K T. Now it is the time to forget potassium based shale inhibitors by developing nano silica-Alumina based drilling fluid; laboratory study proves improvement in shale inhibition and temperature stability [C]//SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference, 2017.

(编辑 韩丽丽)