

## 国内钻井液技术进展评述

王中华

(中石化中原石油工程有限公司, 河南濮阳 457001)

**摘 要:** 随着深井、超深井以及特殊工艺井越来越多, 对钻井液性能的要求也越来越高。为满足安全、快速、高效钻井需要, 国内在钻井液开发与应用方面开展了大量研究与应用, 并不同程度地满足了钻井工程的需要。尤其是, 在抑制性钻井液、油基钻井液、超高温超高密度钻井液等方面取得了快速发展, 形成了一系列实用的钻井液技术, 逐步缩小了与国外的差距, 特别是超高密度钻井液技术已居于国际领先地位。为了更清楚、更全面地了解近年来国内钻井液技术的发展情况, 为国内钻井液的开发与应用提出有价值的建议, 从抑制性和环保型钻井液、油基钻井液、超高温超高密度钻井液、泡沫钻井液和合成基钻井液等方面, 对钻井液的开发、性能和应用情况进行了介绍, 在此基础上分析了国内钻井液存在的问题和发展方向, 并结合钻井实践, 提出了未来需要重点开展的工作。研究结果对国内钻井液的开发与应用具有参考价值和指导意义。

**关键词:** 水基钻井液; 油基钻井液; 超高密度钻井液; 超高温钻井液; 泡沫钻井液; 合成基钻井液; 技术进展  
**中图分类号:** TE254      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2019)03-0095-08

### Review of Progress on Drilling Fluid Technology in China

WANG Zhonghua

(Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China)

**Abstract:** Along with the continually increasing deep wells, ultra-deep wells and special process wells, higher standards were imposed on drilling fluids to meet the needs of safe, fast and efficient drilling. To evaluate the progress on the development of high-performance drilling fluids a great deal of research and test applications were carried out over the research and development of drilling fluids that satisfy the particular needs of drilling engineering in China. In particular, rapid development has been achieved in aspects of inhibitive drilling fluids, oil-based drilling fluids, ultra-high temperature and ultra-high density drilling fluids, etc., and a series of practical drilling fluid technologies were formed. They have gradually narrowed the gap with foreign counterparts, especially with respect to the ultra-high density drilling fluid technology of China which plays a leading role in the world. In order to better understand the new development of domestic drilling fluid technologies, and provide valuable suggestions for the development and application of drilling fluids in China, this paper introduces the development, performance and application of drilling fluids. The study focused on the characteristics of inhibitive/environment friendly drilling fluids, oil-based drilling fluid, ultra-high temperature and ultra-high density drilling fluids, foamed drilling fluid and synthetic-based drilling fluid. The study includes a comprehensive review of the problems and development trends of drilling fluid in China, and proposes the tasks that need to be carried out in the future in combination with drilling practices. The research results constitute and excellent reference and best practices for the development and application of domestic drilling fluids.

**Key words:** water based drilling fluid; oil based drilling fluid; ultra high density drilling fluid; ultra high temperature drilling fluid; foam drilling fluid; synthetic-based drilling fluid; technical progress

近年来, 为满足深井、超深井、特殊工艺井钻井及页岩气水平井钻井的需要, 国内逐步研究形成了聚合醇钻井液、抑制性胺基钻井液、有机盐钻井液和甲基葡萄糖苷钻井液等具有良好环保和抑制性能的钻井液, 以及超高温、超高密度钻井液。除此之外, 泡沫钻井液在低压层、易漏失层钻井中得到了

应用, 其性能也不断得到提高; 随着页岩气水平井

收稿日期: 2019-03-13。

作者简介: 王中华(1965—), 男, 河南柘城人, 1985年毕业于郑州大学高分子化学专业, 教授级高级工程师, 中国石化集团公司高级专家, 主要从事精细化工和油田化学方面的研究工作。系本刊编委。E-mail: zpebwzh@126.com。

的不断增多,油基钻井液技术有了长足进步;也针对油基钻井液使用中存在的环保问题,开展了合成基钻井液的研究与应用,使钻井液体系逐步完善,并形成了包括水基、油基和合成基的完整的钻井液类型。但是,现有钻井液在体系规范、性能控制、高温稳定性和处理剂质量等方面都还存在一些问题,不同程度地影响了钻井液的性能和应用效果,从而也在一定程度上制约了油气井钻井效果和技术发展。为便于系统了解近年来国内钻井液技术的现状,明确未来几年需要重点开展的工作,并为国内钻井液的开发与应用提出有价值的建议,笔者对国内钻井液技术进展进行了评述,结合现代钻井工艺和环保等对钻井液的要求,分析了国内钻井液存在的具体问题和钻井液未来发展方向。

## 1 抑制性钻井液

### 1.1 聚合醇钻井液

聚合醇钻井液作为高性能水基钻井液,利用聚合醇的浊点效应,通过优化加量和选择浊点,可以使钻井液具有良好的抑制性、润滑性和封堵性。例如,以多元醇为主处理剂与其他处理剂配伍组成的强抑制性多元醇海水钻井液,在埕岛油田进行了应用,较好地解决了钻井过程中的井眼失稳、摩阻大、井眼净化和油层保护效果差等问题,为聚合醇钻井液的发展奠定了基础<sup>[1]</sup>。胜利油田 80 余口井的应用表明,由聚合醇、MMH 及其他处理剂组成的聚合醇钻井液,其抑制性与封堵能力强,能有效稳定井壁,且润滑性能好,钻井液的表面张力、界面张力低,对油气层损害程度低,易生物降解、毒性极低,对环境影响小<sup>[2]</sup>。

为了进一步改善聚合醇钻井液的性能,通过引入  $\text{Ca}^{2+}$ 、有机盐和硅酸盐等,得到了钙-醇钻井液、有机盐聚合醇钻井液和硅酸盐聚合醇钻井液等一些强化型聚合醇钻井液,这些钻井液不仅保持了聚合醇钻井液的基本特点,其热稳定性、封堵性能和抑制性还进一步提高,能有效解决钻进强水敏性地层时的水化、弱水敏性地层时的垮塌掉块,以及钻屑水化引起的钻井液流变性不稳定等问题。

聚合醇钻井液用于水平井钻井,可以保持较好的流变性、悬浮稳定性和润滑性,且抑制能力较强,携岩性能较好,能够保证水平段施工顺利<sup>[3]</sup>。近年来,页岩气水平井钻井中也试验应用了该钻井液,但与油基钻井液相比,还存在诸如润滑、井壁稳定等难以克服的问题,故实际应用较少。聚合醇钻井

液用于海洋深水钻井,可在保证良好流变性、滤失性、润滑性、抑制性和封堵性的情况下,有效防止天然气水合物的生成,是有效的深水钻井液之一。

### 1.2 强抑制胺基钻井液

近年来,为满足环保要求和降低钻井液成本,国外一直在努力寻求能够在强水敏或页岩地层代替油基钻井液的水基钻井液,如:以胺基抑制剂为主剂的高性能水基钻井液(强抑制胺基钻井液),因其能满足环保要求,且效果与油基钻井液相当而深受重视,并广泛应用。国内也相继开展了该类钻井液的研究与应用,并见到初步效果,如:由胺基抑制剂、氯化钾与其他处理剂等组成的 ULTRADRILL 水基钻井液,抑制性和润滑性与油基钻井液相当,由于该钻井液无毒,钻屑可直接排入海中,完钻后钻井液可回收反复使用,大大降低了钻井成本<sup>[4]</sup>。现场应用表明,ULTRADRILL 钻井液性能稳定,具有独特的流变性能,滤失量低,滤饼坚韧、致密而光滑,钻井过程中悬浮携岩能力强,钻速快,井壁稳定。另外,在莫北油田莫 116 井区的应用也表明,由 NaCl、胺基抑制剂与其他处理剂组成的胺基钻井液,可有效解决钻井过程中常出现的井眼失稳、膏质泥岩造浆严重、钻头泥包、缩径卡钻、钻速慢等技术难题<sup>[5]</sup>。

研究发现,将胺基抑制剂与铝盐封堵防塌剂复配能显著阻缓孔隙压力传递,可以达到更好的抑制和防塌效果。如,添加铝盐形成的聚胺高性能水基钻井液,抑制性和清洁润滑性突出,在胜利油田 305 区块的应用表明,该钻井液可解决泥页岩井眼失稳问题<sup>[6]</sup>。由聚铝盐和胺基抑制剂与其他处理剂组成的聚铝胺盐防塌钻井液,在吉林油田伊通、大安等区块 14 口井的应用表明,其抑制性和封堵能力强,能有效防止泥岩坍塌,解决了泥岩地层钻井过程中因井壁坍塌掉块和缩径造成的起下钻遇阻等问题<sup>[7]</sup>。

由胺基抑制剂、甲酸钾与其他处理剂组成的聚胺有机钾盐钻井液性能稳定,抑制性和润滑性好,抗污染能力强,且无毒,能够满足当地的环境保护要求,特别针对 Umir 地层的强水敏性泥岩以及 LaLuna 地层上部易剥落掉块页岩有着显著效果,可保障井壁稳定和井下安全<sup>[8]</sup>。强抑制胺基钻井液用于深水钻井,还可以有效抑制天然气水合物的生成。

### 1.3 烷基糖苷钻井液

国外甲基葡萄糖苷(MEG)钻井液已经成熟,该钻井液具有良好的抑制性和润滑性及突出的储层和

环境保护特性,能够满足海上油气开发对储层及环境保护等的特殊要求。因此,MEG 钻井液已在一些环境敏感地区用以替代油基钻井液。

针对页岩气水平井钻井的需要,为进一步提高钻井液的抑制性,在 MEG 钻井液的基础上,开发应用了改性烷基糖苷钻井液,如:经室内评价表明,由阳离子烷基糖苷(CAPG)与其他处理剂或材料等组成的 CAPG 钻井液,不仅抑制性、润滑性等优于 MEG 钻井液,其环保性能也较好(半数效应浓度  $EC_{50}$  达到 126 700 mg/L)。现场应用表明,该钻井液具有良好的抑制防塌和井壁稳定效果,摩阻低,润滑性好,有利于提高机械钻速,固相含量低,有利于储层保护,同时由于可生物降解,无毒无害,符合绿色钻井液发展方向<sup>[9]</sup>。在 CAPG 钻井液的基础上,引入聚醚胺基烷基糖苷(NAPG),通过 CAPG 和 NAPG 复配形成的烷基糖苷衍生物钻井液,在昭通页岩气示范区进行了应用,结果表明:钻进过程中钻井液性能稳定,井壁稳定,起下钻畅通,下套管作业一次成功,未出现井下复杂情况<sup>[10]</sup>。基于上述研究形成的近油基钻井液也在现场应用中见到了明显效果,进一步完善后有望真正替代油基钻井液。

#### 1.4 有机盐钻井液

有机盐钻井液最初主要指甲酸钠、甲酸钾钻井液,之后诸如甲酸铯、乙酸钾、柠檬酸钾、酒石酸钾、乙酸铵、柠檬酸铵、酒石酸铵,有机酸的季铵盐以及它们的混合物等也逐渐得到应用。实践证明,有机盐钻井液特别适用于高温高压钻井、产层钻井、小井眼钻井、环境保护要求高的地区钻井、易水化膨胀和易坍塌泥页岩地层钻井、岩盐层和盐膏层钻井等。

作为最基本的有机盐钻井液,甲酸盐钻井液在生态保护、油层保护、抑制地层以及抗高温抗污染方面都有明显的优势。2000 年以来,甲酸盐钻井液在大庆油田开发井钻井中得到广泛应用,截至 2005 年底,已在 600 多口井进行了应用,有效保护了油气层,取得了很好的综合效果<sup>[11]</sup>。除此之外,新疆、渤海、胜利、冀东和中原等油田也大量应用了甲酸盐钻井液,均取得了明显效果。甲酸盐钻井液已成为公认的绿色钻井液。

由有机盐、降滤失剂、增黏剂和包被剂等形成的无固相钻井液,在克拉玛依油田五三东井区 57031 井的应用表明,其流变性好、抑制性强、造壁性能好,可提高机械钻速、保护油气层,且对钻具无腐蚀、对环境无污染<sup>[12]</sup>。高密度有机盐钻井液在准噶

尔盆地北天山山前冲断带阜康断裂带 T4031 井三开井段的应用表明,能够保持较低的黏切,流变性好、抑制性强、润滑性好,井眼稳定,井径规则,电测、下套管、固井等作业均一次完成<sup>[13]</sup>。有机盐钻井液在塔里木油田其他区块也进行了应用,整体效果良好,且有利于储层保护和环境保护<sup>[14]</sup>。在南海西部 HK29-1-2 井的应用表明,无固相有机盐钻井液具有较好的防水锁效应,滤液活度远远低于地层水,不容易侵入地层,抑制性好,可避免水敏现象的发生及固相对储层的伤害,抗温可达 180 ℃,机械钻速与邻井相比大幅度提高<sup>[15]</sup>。

## 2 油基钻井液

近年来,由于国内页岩气资源的大力开发和复杂地层钻井的增多,油基钻井液有了快速发展。油基钻井液包括全油基钻井液和油包水乳化钻井液。全油基钻井液,如在普通油基钻井液基础上,加入常规乳化剂、有机土、润湿剂和降滤失剂等形成的全柴油基钻井液,在非常规水平井钻井中的应用发现,性能稳定,易于维护,且稳定井壁能力强,润滑防卡效果好,循环压耗小,有利于提高机械钻速。以柴油为基油、密度 0.90~0.95 kg/L 的低密度全油基钻井液,通过强化封堵性,在塔中志留系低压储层钻井中进行了应用,表现出密度可控、钻速快、稳定性好、维护处理简单等特点,分析认为,这是由于该钻井液密度低,可最大限度地实现近平衡或微欠平衡钻井,降低钻井液对储层的伤害<sup>[16]</sup>。由白油、有机土、激活剂、降滤失剂、CaO、CaCO<sub>3</sub>、增黏提切剂、润湿剂和重晶石等组成的全白油基钻井液,在辽河油田沈平 1 井进行了应用,结果表明,该钻井液具有良好的流变性、抑制性、封堵性、抗污染性、润滑性及高温稳定性,能够控制油页岩水化膨胀,解决井眼失稳问题<sup>[17]</sup>。由 5 号白油、有机土、激活剂、降滤失剂、CaO、润湿剂、CaCO<sub>3</sub>、乳化剂、乳化封堵剂和重晶石组成的全白油基钻井液,在苏里格气田苏 53-82-50H 井泥岩段进行了应用,平均井径扩大率为 6.01%,钻进中未发生井眼失稳现象,尤其是在 2 200.00 m 长的长裸眼水平段钻进过程中,未出现井塌和掉块问题<sup>[18]</sup>。

与全油基钻井液相比,油包水乳化钻井液应用较多。如:针对页岩气水平井钻井的需要,在 0 号柴油与 20%CaCl<sub>2</sub> 组成的基液中加入主乳化剂、辅乳化剂、润湿剂、CaO、有机膨润土、降滤失剂、提切



剂、封堵剂和加重剂等组成的油包水乳化钻井液,在彭水地区彭页2HF井水平段钻进中进行了应用,创造了当时国内陆上页岩气水平井水平段和水平位移最长纪录<sup>[19]</sup>。在彭页2HF井应用的基础上,加入大分子乳化剂和提切剂等,进一步优化其性能,然后在彭页3HF井三开井段进行了应用,钻进期间钻井液性能稳定,表现出低黏高切的流变性,且封堵防塌能力强,无剥落、掉块现象,循环过程中钻井液消耗量小,井眼清洁、无岩屑床,摩阻、扭矩低<sup>[20]</sup>。在威远地区威201-H3井定向、水平段应用柴油基油包水乳化钻井液,较好地解决了泥页岩地层垮塌的问题<sup>[21]</sup>。目前,油基钻井液已在200多口页岩气水平井进行了应用,均取得了良好的效果。

由基油、有机膨润土、氧化沥青、磺化沥青、质量分数50%的CaCl<sub>2</sub>水溶液、氧化钙、UZEMUL-P(HLB值约9.5)、UZEMUL-S(HLB值约3.0)等组成的抗高温油包水钻井液,在大庆油田葡深1井的应用表明,其具有流变性优、稳定性好、滤失量低等特点,顺利完成了井深5 500.00 m、井底温度最高达220℃条件下的钻探任务,并达到预期目的<sup>[22]</sup>。

近年来,为降低储层污染,在页岩气水平井钻井中应用白油乳化钻井液已相当普遍。如:为防止页岩水化、分散、垮塌及长水平段黏卡,河南油田泌页HF1井三开水平段(长度达1 044.00 m)采用了由白油、质量浓度为28.0 g/L的CaCl<sub>2</sub>水溶液、主乳化剂、辅乳化剂、润湿剂、有机膨润土、降滤失剂、CaO、提切剂、树脂封堵剂、乳化封堵剂、纳米封堵剂和加重剂等组成的白油基钻井液,仅用时6.5 d就钻完了该水平段<sup>[23]</sup>。

在传统油基钻井液的基础上,用聚合物增黏提切剂代替有机膨润土,通过优选乳化剂、润湿剂和油分散聚合物降滤失剂种类等,形成了一种柴油基无土相油包水乳化钻井液,取得了良好的现场应用效果<sup>[24]</sup>。与柴油相比,以白油为连续相的无土相油包水乳化钻井液,在保持含土相油包水乳化钻井液优势的同时,具有良好的环境适应性<sup>[25]</sup>。

关于可逆转油包水乳化钻井液,目前国内在室内研究的基础上进行了应用探索,但还未见到现场应用的相关报道。

### 3 超高温超高密度钻井液

#### 3.1 超高温钻井液

近年来,国内井底温度高于200℃的深井、超深

井不断增加,针对现场需要,在超高温钻井液方面开展了一些研究工作。通过室内研究,先后形成了密度2.30 kg/L、盐含量10%~30%、抗温220℃的盐水钻井液<sup>[26]</sup>,抗温230℃的饱和盐水钻井液<sup>[27]</sup>和抗温270℃的淡水钻井液等<sup>[28]</sup>。从现场应用情况看:由PFL-L等处理剂形成的超高温钻井液,在徐闻X-3井三开长裸眼井段(温度210℃)应用中表现出良好的热稳定性,钻井顺利,满足了安全高效钻井需求<sup>[29]</sup>;一种无固相抗220℃超高温钻井液,在涪北1号气田24井的应用中井壁稳定,施工安全,表明悬浮携带性能可以满足井下携岩要求<sup>[30]</sup>;基于研制的抗高温抗盐聚合物降滤失剂和降黏剂,形成的抗温245℃的超高温水基钻井液,在泌深1井(完钻井深6 005.00 m,实测井底温度241℃)的应用表明,抗温能力、抑制能力和悬浮携岩能力强,摩阻系数小,整体效果非常好<sup>[31]</sup>;胜科1井井深超过7 000.00 m,井底温度为235℃,压力超过100 MPa,该井四开(井深4 155.00~7 026.00 m)钻进使用了聚磺封堵防塌钻井液、高密度聚磺非渗透钻井液和超高温钻井液,应用发现,这3种钻井液均具有良好的高温稳定性、润滑性和剪切稀释性,在高固相情况下仍具有良好的流变性、低高压滤失量、抗盐及高价离子污染能力,且配制和维护处理方便,钻井液转换顺利<sup>[32]</sup>。

超高温钻井液用于干热岩钻井的相关报道引发关注。干热岩主要是变质岩或结晶岩类岩体,基本不涉及水敏性地层,因此干热岩井钻井液重点考虑其抗温性能。在干热岩钻井时,除常规超高温水基钻井液外,还可采用泡沫钻井液,如:中国石油长城钻探公司曾采用高温泡沫钻井液在肯尼亚OLKARIA区块钻成一口地热井,地层温度高达350℃<sup>[33]</sup>。由HFL-A+5.0%特种油+0.5%~1.0%乳化剂+2.0%高温稳定剂HST-H+碳酸钙(加重至密度为1.10 kg/L)组成的抗高温钻井液,在260℃高温下老化后仍具有很好的流变性、稳定性和抑制性,且滤失量低,因此适用于干热岩钻井<sup>[34]</sup>。

#### 3.2 超高密度钻井液

一般来说,密度高于2.40 kg/L的钻井液称为超高密度钻井液,主要用于高压和异常高压地层钻井。国内钻遇高压或异常高压地层的井主要集中在西部和西南部地区。与国外相比,国内超高密度钻井液应用较多,如:塔里木油田迪那11井三开井段(井深4 185.00~5 042.00 m)使用密度2.41 kg/L的钻井液钻进高压盐层,顺利钻穿875.00 m厚的纯

石膏、盐岩、泥膏岩和泥岩段;旺南 1 井钻至井深 4 025.00 m(进入二叠系阳新统 2.00 m)时,发现压力系数为 2.67 的超高压气水层,用密度为 2.82 kg/L 的超高密度钻井液实施了压井;官 3 井在钻至井深 3 871.50 m 后将钻井液密度调至 2.80~2.85 kg/L,钻至井深 3 973.00 m 时完钻;官 7 井在钻至井深 3 049.19 m 时钻遇高压盐水气层并发生井涌,将钻井液密度提高至 2.64 kg/L,但因井底压力太高无法继续施工,固井封井底 500.00 m,提前完钻;官深 1 井应用密度 2.87 kg/L 的超高密度钻井液(配方为 1.0% 膨润土浆+3.0%SMS-19+2.0%SML-4+2.0% 辅助降滤失剂+1.0% 高温稳定剂+1.0% 防塌剂+0.5% 表面活性剂+0.5% pH 值调节剂+重晶石),成功完成了超高压地层的钻井施工,使密度大于 2.80 kg/L 且重晶石加重的超高密度钻井液实钻成为现实,为超高密度钻井液的研究与应用奠定了基础,该井创钻井液密度最高、超高密度钻井液钻进井段最长 2 项世界纪录<sup>[35]</sup>。

此外,由膨润土浆、抑制剂、主降滤失剂、辅助降滤失剂、润滑剂、降黏剂(碱液)、表面活性剂、除硫剂、NaCl 和重晶石等组成的超高密度饱和盐水钻井液,在土库曼斯坦阿姆河右岸气田 30 余口井进行了应用,基本解决了厚盐膏层钻进中盐膏层的蠕变和钻井液的抗盐、钙污染及高压盐水侵问题,满足了该区块安全快速钻井的要求<sup>[36]</sup>。

## 4 泡沫钻井液

泡沫钻井液属于气液混合钻井流体,它具有以下优点:可以降低储层损害,有效保护油气层,能够实时评价地层,及时发现产层;显著提高机械钻速,延长钻头使用寿命;防止或减少井漏、卡钻等。

国内泡沫钻井液,尤其是水基泡沫钻井液已比较成熟。泡沫钻井液包括可循环泡沫钻井液和空气(或氮气)泡沫钻井液,前者不需要特殊设备即可实施,而后者需要空气压缩机和专门的泡沫发生器等设备。近年来空气泡沫钻井液应用较多。如:由基浆、发泡剂、稳泡剂、调节剂、降滤失剂和增黏剂等组成的泡沫钻井液,在常温下静止 24 h 或在 120 °C 静态老化 20 h 后,再搅拌后其性能仍能恢复,表现出良好的稳定性。在河坝地区的应用中平均机械钻速为常规钻井液钻井的 7.6 倍,大大缩短了钻井周期,降低了单井综合钻井成本<sup>[37]</sup>。隆 14 井是青西油田窟窿山构造的一口重点工程探索井,该井应用了泡沫钻井液,结果发现:其抑制性能好,携岩能力

强,无钻屑沉积;机械钻速高,该井空气泡沫钻井时的平均机械钻速为 4.16 m/h,是邻井隆 10 井相同井段常规钻井液钻井的 2.11 倍<sup>[38]</sup>。

实践表明,油基泡沫钻井液密度低,在枯竭储层、高渗透地层和微裂缝地层使用可以防漏,可以解决泥页岩井眼失稳问题,还可以有效抑制页岩水化膨胀、地层造浆,防止储层发生水敏性伤害。如:针对吐哈油田胜北区块致密强水敏低压油气藏的地层特点,6 口井在钻进储层井段时应用了可循环油基泡沫钻井液,结果发现,该钻井液密度低且可调,性能易控制,施工工艺简单,可以多次循环使用,能够满足携岩要求,在钻进油层期间,密度始终控制在设计范围之内,从而实现了近/欠平衡压力钻进,机械钻速与采用常规钻井液的邻井相比提高了 30.54%,钻井综合效益也得到了提高<sup>[39]</sup>。

针对开发枯竭地层需要而研制的微泡沫钻井液,能减少钻井液向渗透性地层或微裂缝性地层的侵入量,具有密度低、可循环使用、不影响钻井泵上水及 MWD 等井下工具的使用、不添加空气压缩机等空气注入设备、保护油气层等特点。循环后性能很容易维护,同时具有最佳的井眼清洁和钻屑悬浮效果。在吐哈油田马 703 井的应用表明,微泡沫钻井液抗温、抗污染能力强,密度低且范围可调、稳定性好,能够有效防止漏失,保护油气层,提高机械钻速,实现近平衡钻井<sup>[40]</sup>;在胜利油田郑 7-平 2 井三开井段的应用表明,微泡沫钻井液现场配制简单,易于维护,能够满足油层保护、岩屑录井、井眼轨迹控制及保障井下安全的需要<sup>[41]</sup>;在吉林油田乾安易漏井区进行近平衡钻井时也发现,微泡沫钻井液能够满足钻井要求,保障井下安全,提高钻井速度<sup>[42]</sup>;乍得潜山地层微裂缝发育丰富,地层压力系数在 1.0 以下,采用常规钻井液常常发生恶性漏失,而 Baobab C1-13 井在裂缝发育的潜山油层采用微泡钻井液钻进,不仅钻井液性能稳定,还具有较好的携岩和储层保护性能,利于井下工具信号传输,解决了钻井过程中潜山地层恶性漏失的问题<sup>[43]</sup>。

## 5 合成基钻井液

合成基钻井液在国内应用较少,但该类钻井液热稳定性好,可用于超高温钻井。其中,恒流变合成基钻井液可以用于深水钻井。

以线性  $\alpha$ -烯烃为基液的合成基钻井液,属于第二代合成基钻井液。实践证明,由线性  $\alpha$ -烯烃、质

量分数为 10% 的  $\text{CaCl}_2$  水溶液与多种处理剂组成的线性  $\alpha$ -烯烃合成基钻井液, 具有钻速快、井下复杂情况少的特点, 可以有效缩短钻井周期, 提高钻井效率。如: 莺琼盆地 YC21-1-4 井井深 5 250.00 m, 井底温度 200  $^{\circ}\text{C}$ , 该井 4 960.00~5 250.00 m 井段钻进中应用了以线性  $\alpha$ -烯烃为基油、铁矿粉为加重剂的 ULTIDRILL 合成基钻井液, 应用表明, 该钻井液具有良好的抑制性和井壁稳定性, 抗高温能力强、滤失量低<sup>[44]</sup>。

以气制油为基液的气制油合成基钻井液近年来也有应用。2005 年, 中国海油在渤中 25-1 油田开始使用气制油钻井液, 并成功钻完 3 口井的  $\phi 215.9$  mm 井段, 平均机械钻速 22.8 m/h, 比邻井采用常规钻井液的相同井段提高了 30%, 且当量循环密度较低。气制油钻井液对储层岩心污染小, 形成的滤饼容易清除, 储层保护效果好, 岩心渗透率恢复率大于 90%, 投产后产量高。对比发现, 密度为 1.54 kg/L 的油基钻井液和气制油合成基钻井液的当量循环密度分别为 1.638~1.667 kg/L 和 1.630~1.637 kg/L, 气制油合成基钻井液的当量循环密度较低<sup>[45]</sup>。另外, 由气制油、钙皂型表面活性剂、质量分数为 20% 的  $\text{CaCl}_2$  水溶液和其他处理剂等形成的气制油合成基钻井液, 在胜利油田超稠油井郑 41-平 2 井、曲 8-侧斜 11 井的强水敏性地层进行了应用, 结果表明, 该钻井液性能稳定, 润滑性和抑制性好, 同时具有良好的储层和环境保护性能<sup>[46]</sup>。

酯基钻井液一般在 140  $^{\circ}\text{C}$  以内能够保持良好的高温流变性和高温高压滤失性, 润滑性能好, 抑制性和抗污染能力强, 同时还具有良好的储层保护和环保性能。如: 由生物柴油(油酸甲酯)、有机膨润土、SP-80、有机褐煤、油酸、油溶性树脂、质量分数 20% 的  $\text{CaCl}_2$  溶液等组成的酯基钻井液, 在胜利油田渤页平 1-2 井进行了应用, 结果表明, 该钻井液性能稳定, 在高密度情况下流变性能良好, 钻井过程中起下钻通畅, 完井管柱下入顺利<sup>[47]</sup>。

## 6 钻井液技术发展建议

通过以上评述可知, 经过几十年的发展, 我国钻井液技术已基本满足各种复杂条件下现代钻井的需要, 但与发达国家相比, 许多方面都有差距, 主要体现在: 体系的规范、处理剂质量、储层保护和环保性能等方面, 均存在一定差距; 井内高温条件下长期静置能保持良好悬浮稳定性的钻井液、海洋深水恒

流变钻井液、适用于环境敏感地区的绿色钻井液, 以及用来解决页岩气水平井井壁稳定的水基钻井液, 仍然不太成熟; 在优化钻井液中固相及颗粒分布, 通过有效控制固相而改善钻井液的润滑性、流变性、滤失性、封堵及防塌、防漏能力, 减少处理剂的消耗量, 降低钻井液维护处理次数、减少处理费用等方面, 也存在许多不足。

结合现场实践可以看出, 今后钻井液的发展方向是围绕安全、快速、环保钻井的目标要求, 重点解决以下问题: 如何保持深井超深井钻井液在井底静止状态下的长期稳定性; 如何保持低黏土相钻井液高温下的悬浮稳定性; 如何有效降低钻井液循环压耗(小井眼更突出); 如何解决强水敏性地层, 特别是页岩气水平井水基钻井液条件下的井壁稳定问题。为此, 我国钻井液的发展需要重点开展以下工作:

1) 完善高性能水基钻井液, 强化钻井液的抑制和封堵能力, 尤其是发展与油基钻井液性能相近的近油基钻井液, 以尽可能减少在页岩气水平井钻井中使用油基钻井液, 减轻环保压力。完善适用于井底温度高于 200  $^{\circ}\text{C}$  的具有长期老化悬浮稳定性的高温高密度钻井液。

2) 发展无芳烃油基或植物油基钻井液, 合成基和可逆乳化钻井液, 特别是生物质合成基钻井液。为满足保护生态环境的需要, 围绕绿色环保目标, 开发综合性好的水基环保钻井液。

3) 减少组成钻井液的处理剂品种和用量, 减少由于钻井液液相黏度增加而带来的循环压耗升高、剪切稀释能力变差和钻具泥包等现象。提高对钻井液中低密度固相控制的认识, 通过控制低密度固相、减少抑制剂或其他处理剂在钻井液中固相颗粒表面的吸附与消耗, 提高钻井液的井壁稳定能力。

4) 科学选择和合理使用钻井液。要认识到, 对于一些特殊地层, 水基钻井液永远无法替代油基钻井液, 在不适用于水基钻井液的情况下, 要毫不犹豫地选用油基钻井液或合成基钻井液。在钻井液选择方面, 结合岩性分析、地层稳定性分析, 重点考虑如何确定坍塌周期、延长坍塌周期, 以便在坍塌周期内完成钻井作业。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 吕开河, 邱正松, 徐加放. 强抑制性多元醇海水钻井液研究及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(3): 59-62, 66. LYU Kaihe, QIU Zhengsong, XU Jiafang. Study and application of polyglycol seawater drilling fluids with strong inhibitory[J]. Journal



- of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 59–62, 66.
- [2] 李公让, 薛玉志, 乔军, 等. 胜利油区聚合醇钻井液技术的应用[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(1): 71–73.  
LI Gongrang, XUE Yuzhi, QIAO Jun, et al. Application of polyol drilling fluid technology in Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(1): 71–73.
- [3] 迟建功. 高性能聚合醇钻井液体系在水平钻井中应用研究[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(6): 64–66.  
CHI Jianguo. Study on the application of high performance polyol drilling fluid system in horizontal drilling[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018, 30(6): 64–66.
- [4] 黄浩清. 安全环保的新型水基钻井液 ULTRADRILL[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(6): 4–7.  
HUANG Haoqing. An environmentally safe water-base drilling fluid ULTRADRILL[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2004, 21(6): 4–7.
- [5] 屈沉治, 戎克生, 黄宏军, 等. 胺基钻井液在新疆油田莫 116 井区的应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6): 24–26.  
QU Yuanzhi, RONG Kesheng, HUANG Hongjun, et al. Application of amine-based drilling fluid system in Area Mo-116 of Xinjiang Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2011, 28(6): 24–26.
- [6] 钟汉毅, 邱正松, 黄维安, 等. 聚胺高性能水基钻井液特性评价及应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2803–2807.  
ZHONG Hanyi, QIU Zhengsong, HUANG Weian, et al. Properties evaluation and application of polyamine high performance water-based drilling fluid[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(10): 2803–2807.
- [7] 马超, 赵林, 宋元森. 聚铝胺盐防塌钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 55–60.  
MA Chao, ZHAO Lin, SONG Yuansen. Research and application of anti-sloughing drilling fluid of poly aluminum-amine salt[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1): 55–60.
- [8] 张捷, 许根. 聚胺钾盐钻井液在哥伦比亚南部区块的应用[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(4): 86–88.  
ZHANG Jie, XU Gen. Application of polyamine potassium salt drilling fluids in Southern Colombia Block[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(4): 86–88.
- [9] 赵虎, 司西强, 雷祖猛, 等. 阳离子烷基糖苷钻井液在长南水平井的应用[J]. 精细石油化工进展, 2015, 16(1): 6–9, 23.  
ZHAO Hu, SI Xiqiang, LEI Zumeng, et al. Application of cationic alkyl glucoside drilling fluid in Changnan horizontal wells[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2015, 16(1): 6–9, 23.
- [10] 赵虎, 龙大青, 司西强, 等. 烷基糖苷衍生物钻井液研究及其在页岩气井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 23–27.  
ZHAO Hu, LONG Daqing, SI Xiqiang, et al. Study on alkyl Polyglucoside derivative drilling fluid and its use in shale gas drilling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(6): 23–27.
- [11] 耿晓光. 甲酸盐钻井液体系在大庆开发井的推广应用[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(2): 77–78, 82.  
GENG Xiaoguang. Application of formate drilling fluids in development wells in Daqing Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2007, 24(2): 77–78, 82.
- [12] 姚少全, 汪世国, 谢远灿, 等. 有机盐钻井液的研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 43–45.  
YAO Shaoquan, WANG Shiguo, XIE Yuancan, et al. Research and application of organic salt drilling fluid[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2001, 29(5): 43–45.
- [13] 刘志良, 戎克生. 有机盐钻井液在 T4031 井三开井段的应用[J]. 新疆石油天然气, 2009, 5(1): 38–40.  
LIU Zhiliang, RONG Kesheng. Application of organic salt drilling fluid in the third opening section of Well T4031[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2009, 5(1): 38–40.
- [14] 周建东, 李在均, 邹盛礼, 等. 有机盐钻井液在塔里木东河油田 DH1-8-6 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(4): 21–23.  
ZHOU Jiandong, LI Zaijun, ZOU Chengli, et al. Application of organic salt drilling fluid in Well DH1-8-6 of Donghe Oilfield in Tarim[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2002, 19(4): 21–23.
- [15] 程玉生, 杨洪烈, 张明, 等. 无固相有机盐钻井液在南海西部 HK29-1-2 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6): 27–29.  
CHENG Yusheng, YANG Honglie, ZHANG Ming, et al. Application of solid-free organic salt drilling fluid in Well HK29-1-2 in Western South China Sea[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2011, 28(6): 27–29.
- [16] 肖怡, 陈林, 张绍俊. 封堵性低密度全油基钻井液在低压储层保护中的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(5): 89–91.  
XIAO Yi, CHEN Lin, ZHANG Shaojun. Application of plugging low density oil-based drilling fluid in low pressure reservoir protection[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(5): 89–91.
- [17] 李建成, 钱志伟, 杜兴国, 等. 辽河油田油页岩地层全油基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(4): 9–12.  
LI Jiancheng, QIAN Zhiwei, DU Xingguo, et al. Full oil-based drilling fluid technology for oil shale formation in Liaohe Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(4): 9–12.
- [18] 李建成, 关键, 王晓军, 等. 苏 53 区块全油基钻井液的研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 62–67.  
LI Jiancheng, GUAN Jian, WANG Xiaojun, et al. Research and application of oil-based drilling fluid technology in Block Su 53[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 62–67.
- [19] 王显光, 李雄, 林永学. 页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 17–22.  
WANG Xiangguang, LI Xiong, LIN Yongxue. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(2): 17–22.
- [20] 何恕, 李胜, 王显光, 等. 高性能油基钻井液的研制及在彭页 3HF 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(5): 1–4.  
HE Shu, LI Sheng, WANG Xiangguang, et al. Development of high performance oil-based drilling fluid and its application in Pengye 3HF Well[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013, 30(5): 1–4.
- [21] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 1–5.  
HE Tao, LI Maosen, YANG Lanping, et al. Application of oil-based drilling fluids in shale gas horizontal wells in Weiyuan Area[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(3): 1–5.
- [22] 于兴东, 姚新珠, 林士楠, 等. 抗 220℃ 高温油包水钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 45–47.  
YU Xingdong, YAO Xinzhu, LIN Shinan, et al. The study and application of water in oil drilling fluids resisting 220℃ high temperature[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2001, 29(5): 45–47.
- [23] 何振奎, 泌页 HF1 井油基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 32–37.  
HE Zhenkui. Oil base drilling fluid technology applied in Well Biye HF 1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 32–37.
- [24] 李振智, 孙举, 李晓岚, 等. 新型无土相油基钻井液研究与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 33–38.  
LI Zhenzhi, SUN Ju, LI Xiaolan, et al. The development and application of a clay-free oil-based drilling fluid[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 33–38.
- [25] 凡帆, 王京光, 蔺文洁. 长宁区块页岩气水平井无土相油基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 34–39.  
FAN Fan, WANG Jingguang, LIN Wenjie. Clay-free oil based drilling fluid technology for shale gas horizontal wells in the

- Changning Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(5): 34-39.
- [26] 王中华, 王旭, 杨小华. 超高温钻井液体系研究(IV): 盐水钻井液设计与评价[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(6): 1-5.  
WANG Zhonghua, WANG Xu, YANG Xiaohua. Study on ultra-high temperature drilling fluid system(IV): design and evaluation of saltwater drilling fluid[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(6): 1-5.
- [27] 陶士先, 张丽君, 单文军. 耐高温(230 ℃)饱和盐水钻井液技术研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(1): 21-26.  
TAO Shixian, ZHANG Lijun, SHAN Wenjun. Research on ultra high temperature (230 ℃) saturated brine drilling fluid technology[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(1): 21-26.
- [28] 张丽君, 王旭, 胡小燕, 等. 抗温270 ℃钻井液聚合物降滤失剂的研制[J]. *石油化工*, 2017, 46(1): 117-123.  
ZHANG Lijun, WANG Xu, HU Xiaoyan, et al. Development of the polymer filtrate reducer used for 270 ℃ ultra-high temperature drilling fluid[J]. *Petrochemical Technology*, 2017, 46(1): 117-123.
- [29] 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(6): 8-12.  
YANG Xiaohua, QIAN Xiaolin, WANG Lin, et al. Development and application of an high temperature resistant polymer PFL-L as fluid loss additive[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(6): 8-12.
- [30] 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.
- [31] 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.  
QIU Zhengsong, HUANG Weian, HE Zhenkui, et al. The application of high temperature drilling fluid technology in Well Bishen-1[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2009, 26(2): 35-36.
- [32] 李公让, 薛玉志, 刘宝峰, 等. 胜利1井四开超高温高密度钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2009, 26(2): 12-15.  
LI Gongrang, XUE Yuzhi, LIU Baofeng, et al. High temperature high density drilling fluid technology for the forth interval of Well Shengke-1[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2009, 26(2): 12-15.
- [33] 刘伟莉, 马庆涛, 付怀刚. 干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J]. *石油机械*, 2015, 43(8): 11-15.  
LIU Weili, MA Qingtao, FU Huaigang. Drilling difficulties and solutions for hot dry rock geothermal development[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(8): 11-15.
- [34] 颜磊, 蒋卓, 王大勇, 等. 干热岩抗高温钻井液体系研究[J]. *化学与生物工程*, 2015, 32(7): 55-58.  
YAN Lei, JIANG Zhuo, WANG Dayong, et al. Study on hot dry rock high temperature resistant drilling fluid system[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2015, 32(7): 55-58.
- [35] 林永学, 杨小华, 蔡利山, 等. 超高密度钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(6): 1-5.  
LIN Yongxue, YANG Xiaohua, CAI Lishan, et al. Ultra-high density drilling fluid technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(6): 1-5.
- [36] 刘伟, 李华坤, 徐先觉. 土库曼斯坦阿姆河右岸气田复杂深井超高密度钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(3): 33-38.  
LIU Wei, LI Huakun, XU Xianjiao. The application of ultra high density drilling fluids in complex deep wells in the Amu Darya Right Bank Gas Field, Turkmenistan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3): 33-38.
- [37] 邓明杰, 朱化蜀, 廖忠会. 泡沫钻井在河坝地区的应用[J]. *天然气技术*, 2010, 4(2): 27-29.  
DENG Mingjie, ZHU Huashu, LIAO Zhonghui. Application of foam drilling to Heba Area[J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2010, 4(2): 27-29.
- [38] 李丽红, 杨万成, 李玉泉. 欠平衡泡沫钻井液技术在隆14井的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2006, 23(3): 8-11.  
LI Lihong, YANG Wancheng, LI Yuquan. Application of underbalanced foam drilling fluid in Long-14 Well[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006, 23(3): 8-11.
- [39] 王广财, 熊开俊, 曾翔宇, 等. 可循环油基泡沫钻井液在胜北油田的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(6): 17-20.  
WANG Guangcai, XIONG Kaijun, ZENG Xiangyu, et al. Application of circulating oil based foam drilling fluid in Shengbei Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(6): 17-20.
- [40] 刘登峰, 郭建春, 张荣志, 等. 可循环微泡沫钻井液在吐哈油田马703井的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2005, 27(6): 34-36.  
LIU Dengfeng, GUO Jianchun, ZHANG Rongzhi, et al. Application of pumpable micro: foamed drilling fluid in Ma 703 Well of Tuha Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27(6): 34-36.
- [41] 郑述培, 李文明. 可循环微泡沫钻井液在郑7-平2井的应用[J]. *钻采工艺*, 2012, 35(4): 107-108.  
ZHENG Shupe, LI Wenming. Application of recyclable micro foam drilling fluid in Well 7-Ping 2[J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(4): 107-108.
- [42] 王占林, 冯水山, 王昱涵, 等. 可循环微泡沫钻井液技术在易漏失地层钻井施工中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2014, 26(11): 69-72.  
WANG Zhanlin, FENG Shuishan, WANG Yuhuan, et al. Application of recyclable micro foam drilling technology in the construction of leaky formations[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2014, 26(11): 69-72.
- [43] 罗淮东, 石李保, 左京杰, 等. 可循环微泡沫钻井液研究及其在乍得潜山地层的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2017, 34(5): 8-13.  
LUO Huaidong, SHI Libao, ZUO Jingjie, et al. Recyclable micro foam drilling fluid: its study and application in burial hill structure in Chad[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(5): 8-13.
- [44] 彭放. YC21-1-4井钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2000, 17(3): 44-46.  
PENG Fang. YC21-1-4 Well drilling fluid technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2000, 17(3): 44-46.
- [45] 耿铁, 张岩, 吴彬, 等. 新型合成基钻井液体系的研制与应用[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(2): 299-300, 321.  
GENG Tie, ZHANG Yan, WU Bin, et al. Development and application of new synthetic base drilling fluid system[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(2): 299-300, 321.
- [46] 万绪新, 张海青, 沈丽, 等. 合成基钻井液技术研究与应[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(4): 26-29.  
WAN Xuxin, ZHANG Haiqing, SHEN Li, et al. Research and application of synthetic-based drilling fluid technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(4): 26-29.
- [47] 孙明波, 乔军, 刘宝峰, 等. 生物柴油钻井液研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2013, 30(4): 15-18.  
SUN Mingbo, QIAO Jun, LIU Baofeng, et al. Research and application of biodiesel drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013, 30(4): 15-18.