

天然气水合物钻井液研究进展

付帆,熊正强,陶士先,卢彤

(北京探矿工程研究所,北京 100083)

摘要:随着世界能源问题日渐突出,天然气水合物作为一种新型能源备受关注。由于天然气水合物的特殊性质,在冻土层或海洋环境下都对勘探和开采提出了极其严格的要求。钻井液对保障天然气水合物安全钻探发挥着重要的作用,因此对水合物钻井液的研究一直是天然气水合物勘探技术研究中的重要内容。本文重点介绍了水合物抑制剂和钻井液体系研究进展情况,并分析了天然气水合物钻井液研究发展趋势。

关键词:天然气水合物;热力学抑制剂;动力学抑制剂;防聚剂;水基钻井液

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0071-06

Research Progress in Drilling Fluid for Natural Gas Hydrate/FU Fan, XIONG Zheng-qiang, TAO Shi-xian, LU Tong (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: As the world's energy problems become more prominent, natural gas hydrates have received much attention as a new type of energy. Due to the special nature of natural gas hydrates, extremely stringent requirements are imposed on exploration and mining in the frozen soil or marine environment. Drilling fluid plays an important role in ensuring safe drilling of natural gas hydrate. Therefore, research on hydrate drilling fluid has been an important part of natural gas hydrate exploration technology research. This paper focuses on the research progress of hydrate inhibitors and drilling fluid systems, and analyzes the development trend of natural gas hydrate drilling fluids.

Key words: natural gas hydrate; thermodynamic inhibitor; kinetic inhibitor; anti-polymerization agent; water-based drilling fluid

0 前言

随着我国经济的迅猛发展,能源问题日渐突出,开发和利用新型替代能源是解决能源问题、保持能源可持续发展的重要途径之一。天然气水合物作为可以接替石油和天然气的新型能源,其勘探和开发的研究一直作为前沿课题备受关注。

天然气水合物是由水分子和天然气分子在一定温度和压力下形成的具有笼状结构的结晶化合物。天然气水合物性质和其赋存地层的特殊性决定了在此类地层钻井时将会面临更加复杂的井内问题,例如:由天然气水合物分解引发的井壁不稳、井喷和海床坍塌问题;由天然气水合物再生成导致的管线堵塞问题。上述问题发生的根本原因是在钻入天然气水合物层时,改变了井底压力和温度,破坏了天然气水合物赋存的相态平衡,诱发天然气水合物分解。解决上述问题的途径主要是两个方面:一是尽量减少地层压力和温度的变化,即通过降低井内钻井液循环温度、合理控制井底压力,减少天然气水合物大

量分解;二是通过增强钻井液抑制天然气水合物能力,减少或避免其在钻井液循环系统中再次生成。因此,钻井液技术是保障天然气水合物顺利钻探和安全钻探的核心。

20 世纪 70 年代开始,国外学者就已经开始了对天然气水合物钻井液的研究工作。我国在这方面的研究虽然起步较晚,但发展迅速。尤其最近十年,对天然气水合物钻井液的研究成果显著。特别是 2017 年 7 月 29 日在我国南海神狐海域成功完成了首次海域天然气水合物试采工作,创造了该领域的多个世界纪录。这说明我国的天然气水合物钻探技术研究已经跻身于世界前列。同时,也必将促进天然气水合物钻井液研究工作更加深入的进行,取得更好的成绩。

1 天然气水合物抑制剂研究现状

低温高压环境利于天然气水合物的生成,因此在钻井循环管路容易发生天然气水合物再生成,

收稿日期:2018-08-01

作者简介:付帆,女,锡伯族,1986 年生,工程师,硕士,从事钻井液材料和钻井液体系研究工作,北京市海淀区学院路 29 号探工楼 606 室,120953889@qq.com。

随着生成量的不断提高,会堵塞压井管汇,造成管路不通,严重时会导致安全事故。目前钻井作业过程中主要通过添加水合物抑制剂来减少或避免水合物的形成。

天然气水合物抑制剂主要分为3类:热力学抑制剂、动力学抑制剂和防聚剂。其中热力学抑制剂最早应用于钻井液中,但由于其用量大(质量分数可达到10%~60%)、部分醇类有毒性以及盐类溶液会产生具有腐蚀性污水等问题限制了该类抑制剂的应用范围。从20世纪90年代开始,对于抑制剂的研究转向了用量低的动力学抑制剂和防聚剂。

1.1 热力学抑制剂

热力学抑制剂的作用原理是通过降低水的活度系数,改变水分子和气体分子之间的热力学平衡条件,从而改变水溶液或水合物化学式,使水合物的分解曲线移向较低温度或较高压力的方向,从而避免水合物形成。或是直接与水合物接触,使水合物不稳定,从而使水合物分解而达到清除和抑制水合物形成的目的。

热力学抑制剂主要包括醇类和盐类,例如:甲醇、乙二醇、氯化钠及氯化钙等。其中,甲醇、乙二醇是应用最为广泛且时间最长的热力学抑制剂。

虽然乙二醇已经被广泛应用,但学者还未停止对它的抑制作用效果进行研究,最新发现,单独使用乙二醇时,使用量达到30%(质量百分比浓度,下同)可以有效的抑制天然气水合物晶体增长^[1]。同时,还发现乙二醇具备稳定天然气水合物的作用。在压力8.5 MPa条件下,对比不同浓度时聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙二醇(PEG)、羟乙基纤维素(HEC)、十二烷基硫酸钠(SDS)和乙二醇(EG)抑制剂溶液中天然气水合物的稳定情况,结果表明:PVP、PEG和HEC溶液不具备稳定天然气水合物的能力,SDS具有稳定和促进天然气水合物的能力,EG则明显具备稳定天然气水合物的作用^[2]。

1.2 动力学抑制剂

动力学抑制剂的作用原理是在水合物结晶成核和生长的初期,吸附于水合物颗粒表面,抑制剂的环状结构通过氢键与水合物的晶体结合,延迟水合物晶体成核时间或者阻止晶体的进一步成长,最终达到抑制天然气水合物生产的作用。

国外学者前期研究发现,动力学抑制剂主要成分为聚合物和表面活性剂两类,含有大量水溶性基

和长脂肪碳链,如PVP、甲基丙烯酸乙酯、N-酰基聚烯烃亚胺、N-乙基己内酰胺、N,N-烷基丙烯酰胺、聚异丙基甲基丙烯酰胺、2-丙基-2-咪唑啉等。在前期研究基础上,继续探索研究新型的动力学抑制剂、通过分子结构设计直接组合制备出新型的动力学抑制剂以及研究与热力学抑制剂的协同作用是目前学者们的重要研究方向。

1.2.1 新型动力学抑制剂研究

近些年,学者们采用溶液聚合法合成了多种新型动力学抑制剂,例如动力学抑制剂SDH^[3]、P(VCL-A)^[4]、DVP^[5]等。

动力学抑制剂SDH^[3]是通过分子结构优化研制出的新型动力学抑制剂,加量为1.0%时,抑制天然气水合物效果最佳。其作用机理是通过吸附在水合物表面,利用空间位阻作用达到有效抑制水合物生长的目的。

动力学抑制剂P(VCL-A)^[4]是一种聚N-乙基己内酰胺共聚物,代号中VCL为N-乙基己内酰胺,A为含酯基单体。对P(VCL-A)分别与甲醇、乙二醇复配后的水合物抑制效果进行的评价,实验结果表明当3%P(VCL-A)分别与5%甲醇和乙二醇复配时,诱导时间分别超过75h和60h,并且上述复合型抑制剂当过冷度超过10℃时还有具有明显的抑制效果。

动力学抑制剂DVP^[5]是用N-乙基己内酰胺、丙烯酸、甲基丙烯酸羟乙酯为原材料(质量比为5:1:1),在引发剂加量为0.5%、反应温度60℃、反应时间8h条件下制备得到的。采用四氢呋喃(THF)对其抑制性能进行了评价,发现DVP加量为0.5%时抑制效果最好。

气体动力学抑制剂HLA^[6]是采用甲基丙烯酸乙酯和N-乙基吡咯烷酮制备而成。对HLA进行的抑制性能评价结果表明:HLA能有效降低水合物的形成速率,延长使形成水合物晶核的诱导时间,改变晶体的聚集过程,但并不能改变气体水合物形成的相平衡。

周诗崇等^[7]以N-乙基吡咯烷酮为单体,双氧水为引发剂,在氮气保护下,合成了一种动力学抑制剂。在5℃、6MPa条件下,该种抑制剂添加量为1500mg/L时,诱导时间为213min;抑制剂溶液在过冷度为9.1℃时的诱导时间可达59min。

1.2.2 复合型动力学抑制剂研究

将不同类型的动力学抑制剂直接进行组合获得一种新的抑制剂,将不同动力学抑制剂效果更好的发挥出来是学者们一直研究的方向。

唐翠萍等^[8]研究了一种组合型天然气水合物动力学抑制剂 GHI1,该抑制剂是由 Inhibex157(聚乙烯吡咯烷酮)与二乙二醇丁醚 BCS 按质量 1:1 组合而成,在温度 4℃、压力 8.5~9.0 MPa 条件下,加量 0.5% 的 GHI1 抑制性能明显优于 Inhibex157,这是由于 Inhibex157 能阻止 CH₄ 分子进入水合物笼中,而 BCS 则阻止水分子进一步形成水合物笼,同时具备上述两种特性的 GHI1 可以大大延长水合物的生成时间。另外,他们还将 PVPK90(聚乙烯吡咯烷酮)与乙二醇苯醚按照 1:1 质量比组合成抑制剂 GHI,研究结果表明:GHI 的抑制性能明显优于 Inhibex501、Inhibex100、PVPK90 三种抑制剂。通过成本核算发现,与 Inhibex501 和 Inhibex100 相比,使用 GHI 的成本分别相对下降了 22.5% 和 34.7%,经济优势明显^[9]。

戴兴学^[10]用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚醚胺、乙二醇丁醚(质量比 1:1:1)组合成抑制剂 GHCI2,将其与动力学抑制剂 PVP 进行了比较。实验结果表明,当 GHCI2 和 PVP 的加量为 0.50% 时,GHCI2 的抑制效果明显优于 PVP。在加量为 0.20%~2.00% 时,GHCI2 的抑制效果随含量的增加呈先增强后减弱的趋势,加量为 0.75% 时抑制效果最好。在上述研究基础上,进一步开展了改变抑制剂 GHCI2 中各组分质量比对其抑制性能影响的研究^[11],发现当聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚醚胺、乙二醇丁醚质量比 2:1:1 时抑制效果最好,并且抑制性能优于 PVP 和 inhibex501。

Hu Jun 等^[12]开发出一种复合天然气水合物动力学抑制剂 HY-1,该抑制剂以 PVP 为主要成分,以醚醇为协同剂。室内评价结果发现,与 Inhibex501 相比,在相同条件下 HY-1 具有更好的抑制性能。随后还将该种抑制剂进行中试放大试验,并成功应用到中国石油长庆油田公司天然气生产中。现场实验证明,2% 动力学抑制剂 HY-1 可起到良好的天然气水合物抑制效果。通过经济性分析,动力学抑制剂 HY-1 的应用成本与甲醇相近,减少了甲醇运输、储存成本,且没有污水回收和处理的过程。与国外天然气水合物动力学抑制剂相比,成本降低了 22.5%。

1.2.3 与热力学抑制剂协同作用研究

对动力学抑制剂的研究还有很重要的方面就是与热力学抑制剂的协同抑制效果研究。目前研究发现,动力学抑制剂在热力学抑制剂的协同作用下,可以提高抑制效果。

Nagu D 等^[13]对抑制剂 Luvicap 分别与 PEO 和 NaCl 协同作用研究发现,PEO 和 NaCl 的加入能加强 Luvicap 的抑制能力,但进一步研究发现使用 Luvicap 会加快成核之后的水合物生长速度,而 PEO 不会影响水合物的增长,NaCl 具有能减缓增长速度的能力。

将动力学抑制剂 SDH^[3]与热力学抑制剂 NaCl 复配使用,表现出很好的协同作用。在模拟 3 km 水深条件下(2℃、30 MPa),将 1.0% SDH 与 10% NaCl 复配使用,可保证钻井液中 12 h 无水合物生成。

Zhao Xin 等^[14]研究了 NaCl、乙二醇和甘油三种热力学抑制剂对聚乙烯吡咯烷酮(PVP)抑制性能的影响,结果表明 NaCl 对 PVP 的抑制性能有很强的协同作用,而乙二醇和甘油则相对较差。具有表现为 NaCl 的存在增强了 PVP 的水合物成核抑制和生长抑制能力,延长了诱导时间。对于含有 0.5% PVP 的深水钻井液,在 2℃、10 MPa 条件下或相同的过冷度(14.2℃)下,添加 10% NaCl 后诱导时间是原来的 16.7 倍。在过冷度高达 16.4℃ 时这一效应仍然很明显。另外,他们还开发了一种新的高性能动力学抑制剂^[15],试验结果表明其性能比典型的动力学抑制剂效果更好。在此基础上完成了针对不同水深环境的最佳水合物抑制剂配方。

周诗崇等^[7]制备了一种新型动力学抑制剂,研究发现其与乙二醇复配后抑制剂性能明显得到提升,具体表现为,将 10000 mg/L 动力学抑制剂与 15% 乙二醇进行复配时,复合型抑制剂的诱导时间比纯动力学抑制剂的诱导时间延长了 234.0%。

1.3 防聚剂

虽然防聚剂也是一些聚合物和表面活性剂,但是其抑制机理明显与动力学抑制剂不同,它主要是起乳化剂的作用,当水和油同时存在时才可使用。向体系中加入防聚剂可使油水相乳化,将油相中的水分散成小水滴,尽管油相中被乳化的小水滴也能和气体生成水合物,但生成的水合物难以聚结成块,从而起到了抑制天然气水合物生成的效果。与动力

学抑制剂相比,防聚剂在过冷度较大的情况下仍具有较好的抑制效果。我国对于防聚剂的研究起步较晚,但近几年也取得了一些研究成果,有的产品还进行了现场试验。

穆亮等^[16]对一种复配型防聚剂进行了评价,考察了不同含水率下在具有柴油、水、防聚剂的体系中水合物的生成形态。结果表明,在过冷度为 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时该防聚剂的抑制效果良好,水合物生成后是以浆液形式均匀分在油相中。

闫柯乐等^[17]以天然气($\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8$)水合物为对象,考察了将动力学抑制剂 Inhibex501 和防聚剂 Span20 复合使用时在油水体系中的防聚效果,结果表明,复合使用时的防聚效果明显优于单纯使用 Span20 作为防聚剂的效果,且能承受 $4\sim 5\text{ K}$ 过冷度。

陈绍凯等^[18]针对防聚剂 HYA-1 在目标气田应用的配伍性进行了研究。结果表明 HYA-1 抑制性能稳定,对目标气田的防腐和结垢影响小,虽然对原油脱水和水处理工艺有一定的影响,但可以找到合适的化学药剂与之配伍从而解决问题,可在目标气田试用。

庞维新等^[19]对开发的水合物防聚剂进行实验室评价以及工业应用试验。室内评价结果表明,在含水率达 30% 时, 2.0% 防聚剂可有效防止水合物聚结。工业应用试验表明,在一定条件下防聚剂可有效抑制水合物的聚结,但还存在作用效果不稳定的问题,仍需继续改进。

余宏毅等^[20]对添加 TBAB、TWEEN 两种防聚剂前后是 CO_2 水合物浆防聚效果进行了比较,发现添加 TBAB 和 TWEEN 后能有效阻止水合物聚集成团,同时可以提高泥浆的稳定性和均匀性。另外还发现,如果提高 TBAB 质量分数,则泥浆流动效果改善明显;当 TWEEN 质量分数为 0.6% 时泥浆的流动特性最佳。

史博会等^[21]研究了蜡加入前后具有防聚剂的泥浆对天然气水合物抑制性能及流动特性的,结果表明:含蜡泥浆体系中水合物生成量较低,但是粘度会增加,流动性明显下降。

2 天然气水合物钻井液研究现状

以分解抑制法为基础,天然气水合物勘探使用的主要钻井液体系有用高盐/木质素磺酸盐水基钻

井液体系、高盐/部分水解聚丙烯酰胺聚合物加聚合醇水基钻井液体系、油基钻井液体系以及合成基钻井液体系,其中最常用的钻井液体系是高盐/部分水解聚丙烯酰胺聚合物加聚合醇钻井液体系和合成基钻井液体系。从抑制水合物效果、环保角度和成本控制综合考虑来看,水基钻井液体系仍是天然气水合物勘探的首选。所以,我国天然气水合物钻井液的研究成果主要集中在水基钻井液体系,主要研发的水基钻井液包括卤盐体系、聚合物体系、甲酸盐体系、聚合醇体系、稀硅酸盐体系^[22],另外还有部分学者对合成基钻井液体系进行了研究。

在墨西哥海湾的深水钻井中主要使用的是含 $20\%\text{NaCl}$ 和 PHPA(部分水解聚丙烯酰胺)钻井液体系^[23]。但在该地区的小井眼侧钻超深井中,则采用了合成基钻井液体系。在该深水区钻井时,最初选用的是盐水/淀粉/聚合醇水基钻井液体系,但因井下条件恶化并且发生了压差卡钻,最后改用了合成基钻井液体系,才顺利完成了钻井作业^[24]。

冯哲等^[25]研制了一种乙二醇复合聚合物抗低温钻井液体系,其配方为聚乙烯醇(125 mL) + 部分水解聚丙烯酰胺(50 mL) + 乙二醇(80 mL) + NaCl (35 g),研究表明该体系在低温条件下具有良好的流变性。同时研究发现在聚合物钻井液体系中加入乙二醇后,钻井液将一直保持牛顿流体特性,且与其加量无关。

王胜等^[26]在研制了一种以 $15\%\text{NaCl}$ 溶液作为基础液的无固相低温钻井液体系,其配方为 1000 mL 水 + $8\%\text{SW}$ + $0.5\%\text{NaOH}$ + $15\%\text{NaCl}$ + $5\%\text{FA}$,其中 FA 是为了解决高原冻土天然气水合物钻探而研发的特种高聚物增粘剂。

蒋国盛等^[27]研制了一种以改性淀粉为基本体系的甲酸盐钻井液,配方为海水 + $3.0\%\text{NaCOOH}$ + $3.0\%\text{SK-2}$ + $0.2\%\text{KPAM}$ + $0.1\%\text{LV-PAC}$ + 0.3% 改性淀粉。该体系在温度为 $-5\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下各项性能较为稳定,如果不添加天然气水合物抑制剂,在水深超过 1400 m 后,容易形成天然气水合物。当加入 0.5% 动力学抑制剂 PVP(K30)后能有效提高该钻井液的抑制性能。

涂运中等^[28]通过大量实验研究得到一种稀硅酸盐钻井液,其中同时含有无机盐热力学抑制剂和动力学抑制剂,其配方为:人造海水 + 2% 膨润土 + $1\%\text{LV-PAC}$ + $3\%\text{SMP-2}$ + 3% 硅酸钠 + (10%

~15%)NaCl+(0.5%~1%)PV。该钻井液不仅具备携带岩屑和清洁井眼的能力,还能有效抑制井壁岩层水化,抑制天然气水合物分解,以及控制天然气水合物的再生成。

刘天乐等^[29]研究了一种聚合醇钻井液,配方为:人造海水+3%膨润土+1%LV-PAC+4%SMP-2+10%聚乙二醇+20%NaCl+1%PVP(K90)+0.5%NaOH。对该钻井液体系的泥浆性能研究发现其具有很好的页岩抑制性和流变性,且密度适中,对其天然气水合物抑制性能研究发现,在热力学抑制剂 NaCl 加量为 10%、动力学抑制剂 PVP(K90)加量为 0.5%~1%时就可以确保在压力 18 MPa 的低温环境下、20 h 不会生成天然气水合物。随后,他们^[30]还结合现有的纳米材料,优选出一种纳米 SiO₂ 钻井液,配方为:海水+2%纳米 SiO₂+3%膨润土+1%Na-CMC+3%SMP-2+1%PVP(K90)+2%KCl。对其低温泥浆常规性能和水合物抑制性能评价表明,该钻井液密度适中,同时具有良好的低温流变性和泥页岩水化抑制性,并能够长时间有效抑制钻井液循环系统中水合物的再生成。

徐加放等^[31]研制分别适合于深水浅层和深部地层钻进的 2 套钻井液配方:深水浅层钻井液配方为:海水+膨润土+0.3%ZNJ-3 增粘剂+3%SDN-1 非渗透降滤失剂+25%NaCl(用 NaOH 调 pH 至 9);深部地层钻井液配方为:膨润土浆+0.3%ZNJ-2 增粘剂+0.5%JLS-7 降滤失剂+3%JNJ-2 降粘剂+3%JLS-2 降滤失剂+1%JNJ-4 降粘剂+25%NaCl(NaOH 调 pH 至 9)。室内实验结果表明,这 2 套钻井液配方均粘度适中、流变性好、携带岩屑能力强,属于环保型钻井液,在 15 MPa、4 °C 条件下能抑制水合物生成,可用于 1500 m 深水区进行钻井作业。在上述研究基础上,徐加放等^[32]进一步研究了使用动力学和热力学抑制剂复配的深水钻井液,配方为:海水(除钙镁)+0.3%ZNJ-3 增粘剂+3%SDN-1 非渗透降滤失剂+1.5%PVP+15%NaCl,该配方可延缓水合物分解 27 h。

邱正松等^[33]在前期研究基础上构建了一套无粘土相海水基钻井液体系,配方为:海水+0.25%纯碱+0.3%烧碱+0.3%亚硫酸钠+0.15%XC+0.2%LX(两性离子聚合物分散剂)+0.3%PAC-HV+0.3%PAC141+3%DYFT(降滤失剂)+2%SDJA(聚胺)。实验结果表明,该钻井液体系经 130

°C 老化后,仍能保持较好的低温流变性,同时具有较强的储层保护能力,在 15.0 MPa、4.0 °C 条件下(深水环境 1500 m)16 h 内无天然气水合物生成。

胡友林等^[34]配制了一种深水气制油合成基钻井液,其配方为:80%气制油+20%CaCl₂ 盐水+3%RHJ(钙盐和二聚酸复配的乳化剂)+3%有机土+3%HiFLO(降滤失剂)+2%CaO,该钻井液具有较好的低温流变性,当温度由 20 °C 降到 0 °C 时,动切力几乎不受温度影响。采用差示扫描量热法对抑制性能进行评价的结果是在 20 MPa 甲烷气体、0 °C 温度条件下能有效抑制天然气水合物的生成。

胡文军等^[35]研究了一套 FLAT-PRO 深水恒流变合成基钻井液体系,其配方为:Salaline 185V 气制油+(0.8%~1.0%)FSEMUL 乳化剂+(1.0%~1.2%)FSCOAT 乳化剂+1.2%FSWET+2%有机土 FSGEL+25%CaCl₂+2.5%PF-MOALK+2%PF-HFR 降滤失剂+0.1%FSVIS 流行调节剂+重晶石,其油水比为(70:30)~(85:15)。该钻井液在 4~65 °C 下流变性能稳定,具有恒流变特性,能有效保护储层,其渗透率恢复值大于 90%,能抗 10%海水和 15%钻屑污染,易降解,满足环保要求。并成功应用于南海 LS-A 超深水井。

3 总结

(1)天然气水合物抑制剂的研究和发展趋势体现在以下几个方面:①通过设计和改变动力学抑制剂的分子结构,提高其抑制性能;②为解决使用单一组分抑制剂存在的局限性,对复合型抑制剂的开发与研究成为了抑制剂研究的重要方向;③寻找和开发用量少、价格低、对环境友好的抑制剂成为发展趋势。

(2)我国天然气水合物钻井液研究的特点主要体现在以下两个方面:①主要借鉴国外的成功经验,在室内研究中取得了一定的研究成果;②钻井液体系的研究多是围绕水基钻井液体系展开,但多数仅限于室内研究阶段,还未投入到实际应用中。

(3)在天然气水合物钻井液技术研究中还存在一些问题,同时也是需要研究的方向:①动力学抑制剂抑制活性差,在高过冷度条件下容易失效;许多效果好的抑制剂成本较高,难以投入实际应用中;②我国的低剂量抑制剂还处于研发阶段,在抑制剂分子结构设计方面突破和创新较少;③欠缺对复合型抑

制剂协同抑制机理研究;④对新型抑制剂的研发仅重视抑制性能,对其与钻井液材料的配伍性研究,以及对钻井液流变性、悬浮性及稳定井壁等常规性能的影响研究较少。

参考文献:

- [1] Cha Minjun, Shin Kyuchul, Kim Juneyoung, et al. Thermodynamic and kinetic hydrate inhibition performance of aqueous ethylene glycol solution for natural gas[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 99: 184-190.
- [2] Schulz Anne, Strauß Heike. Ethylene glycol as gas hydrate stabilising substance[C]// Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE, 2015, 10.
- [3] 赵欣.深水钻井液高效水合物抑制剂研究[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 159-164.
- [4] 倪婷,王鹏飞,郝红,等.新型天然气水合物抑制剂的研究[J].石油化工, 2015, (9): 1057-1060.
- [5] 李欢.天然气水合物抑制剂 DVP 的合成及性能研究[J].应用化工, 2016, 45(3): 504-507.
- [6] 苏慕博文,周博宇.气体水合物抑制剂的研制与性能评价[J].当代化工, 2017, 46(1): 134-136, 140.
- [7] 周诗崇,李青岭,李乐,等.新型天然气水合物动力学抑制剂的制备及性能[J].石油化工, 2017, 46(4): 467-470.
- [8] 唐翠萍,杜建伟,梁德青,等.天然气水合物新型动力学抑制剂抑制性能研究[J].西安交通大学学报, 2008, 42(3): 333-336, 367.
- [9] 唐翠萍,李清平,杜建伟,等.组合天然气水合物抑制剂性能及经济性研究[J].西南石油学院学报, 2009, 31(2): 109-112.
- [10] 戴兴学,杜建伟,梁德青,等.组合型抑制剂对天然气水合物生成过程的影响[J].石油化工, 2010, 39(7): 766-770.
- [11] 戴兴学,杜建伟,唐翠萍,等.化学类添加剂抑制天然气水合物形成的实验研究[J].石油与天然气化工, 2011, 40(1): 11-14, 25, 7.
- [12] Hu Jun, Wang Yanhong, Lang Xuemei et al. Synthesis and application of a novel combined kinetic hydrate inhibitor[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(1): 1-7.
- [13] Nagu D, Christine M, Nicolas V S. Synergistic kinetic inhibition of natural gas hydrate formation[J]. Fuel, 2013, 08: 749-757.
- [14] Zhao Xin, Qiu Zhengsong, Zhou Guowei, et al. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 47-54.
- [15] Zhao Xin, Qiu Zhengsong, Zhou Guowei, et al. Proceedings of the ISOPE Ocean Mining Symposium, 2015, (1): 139-146.
- [16] 穆亮,李文志,陈光进,等.一种复配型水合物防聚剂[J].化工进展, 2012, (S1): 354-357.
- [17] 闫柯乐,孙长宇,申得济,等.联用型水合物抑制剂研究[C]//中国金属学会能源与热工分会.第七届全国能源与热工学术年会论文集, 2013: 250-255.
- [18] 陈绍凯,庞维新,姚海元,等.新型低剂量水合物防聚剂气田配伍性评价实验研究[J].海洋工程装备与技术, 2015, 2(5): 292-295.
- [19] 庞维新,姚海元,李清平,等.水合物防聚剂的性能评价和现场测试[J].石油化工, 2016, 45(7): 862-867.
- [20] 余宏毅,齐亚茹,由龙涛.添加剂对 CO₂ 水合物浆流动特性的影响[J].能源研究与信息, 2017, 33(2): 63-70.
- [21] 史博会,雍宇,杨柳,等.含蜡和防聚剂体系天然气水合物浆液生成及流动特性[J].化工进展, 2018, 37(6): 2182-2191.
- [22] 邢希金.中国天然气水合物钻井液研究进展[J].非常规油气, 2015, 2(6): 82-86.
- [23] Kelland M.A., T.M.Svartaa. Control of Hydrate Formation by Surfactants and Polymers[R]. SPE 28506, 431-438.
- [24] 盛杰.深水钻井液中天然气水合物抑制技术研究[D].山东青岛:中国石油大学(华东), 2009.
- [25] 冯哲,徐会文,展嘉佳.乙二醇复合聚合物抗低温钻井液体系的试验研究[J].世界地质, 2008, 27(1): 95-99.
- [26] 王胜,陈礼仪,张永勤.天然气水合物的钻探无固相低温钻井液的研制——用于青藏高原永冻层天然气水合物的钻探[J].天然气工业, 2009, 29(6): 59-62.
- [27] 蒋国盛,宁伏龙,张昊,等.海洋水合物钻井用甲酸盐钻井液体系研究[J].西南石油学院学报(自然科学版), 2009, 31(5): 125-129.
- [28] 涂运中,蒋国盛,张昊,等.海洋天然气水合物钻井的硅酸盐钻井液研究[J].现代地质, 2009, 23(2): 224-228.
- [29] 刘天乐,蒋国盛,涂运中,等.海洋水合物地层钻井用聚合醇钻井液研究[J].石油钻采工艺, 2009, 31(5): 52-55.
- [30] 刘天乐,李丽霞,蒋国盛,等.一种海洋水合物地层钻井用新型钻井液[J].地球科学(中国地质大学学报), 2015, (11): 1913-1921.
- [31] 徐加放,邱正松,毕波,等.深水水基钻井液的配方优选与性能评价[J].钻井液与完井液, 2011, 28(4): 4-7, 91.
- [32] 徐加放,邱正松,盛杰,等.防止深水钻井地层水合物分解的实验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2012, (3): 99-104.
- [33] 邱正松,李照川,黄维安,等.无粘土相海水水基钻井液低温流变特性[J].钻井液与完井液, 2016, 33(1): 42-47.
- [34] 胡友林,乌效鸣,岳前升,等.深水钻井气制油合成基钻井液室内研究[J].石油钻探技术, 2012, 40(6): 38-42.
- [35] 胡文军,向雄,杨洪烈. FLAT-PRO 深水恒流变合成基钻井液及其应用[J].钻井液与完井液, 2017, 34(2): 15-20.