

封堵型钻井液用防塌剂的研究进展

刘文堂^{*1,2}, 刘昱彤^{1,2}, 桂芳^{1,2}

(1. 中石化中原石油工程有限公司, 河南 濮阳 457001;

2. 中石化石油工程钻井液技术中心, 河南 濮阳 457001)

摘要: 封堵型钻井液防塌剂通过封堵地层微孔隙, 阻滞流体渗入地层, 降低地层坍塌压力从而起到稳定井壁的作用, 封堵型防塌剂因大多作为防塌钻井液中的必要组分, 应用范围日益广泛。对几种主要的封堵型防塌剂, 沥青类、硅酸盐类、聚合醇类、铝基及纳微米类的作用机理进行了简要介绍, 对其研究应用的发展历程做了阐述, 并提出了各类封堵防塌剂的发展方向。

关键词: 封堵; 防塌剂; 综述

中图分类号: TD254 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5716(2025)05-0023-05

近年来, 随着勘探开发的加速, 特别是对页岩气开发的勘探开发力度不断加强, 钻遇复杂地层数量越来越多, 井壁失稳复杂频发。提高钻井液的封堵防塌能力成为解决井壁失稳的主要手段, 为此, 钻井液封堵防塌剂的应用日益广泛。

目前, 对引起井壁失稳的原因主要有两个方面的认识, 一方面为钻井液密度过低, 液柱压力难以支撑力学不稳定的地层; 另一方面为钻井液或滤液进入地层孔隙, 导致地层孔隙压力增大, 强度降低, 而后一方面的原因已被公认为主要的井壁失稳原因, 通过封堵微孔隙阻滞流体渗入地层成为保证井壁稳定的关键措施之一, 也成为封堵型钻井液用防塌剂的主要作用机理。本文对几种主要类型封堵防塌剂的作用机理进行了简述, 阐述了其研究应用的发展历程, 在此基础上, 探讨了封堵型钻井液用防塌剂的研究方向。

1 发展历程

1.1 沥青类封堵防塌剂

沥青类封堵防塌剂是现阶段应用最广泛的封堵防塌剂, 利用沥青的软化变形作用封堵微孔微裂缝, 起到致密滤饼, 降低漏失及滤失量、防塌的作用, 主要包括天然沥青、改性沥青、磺化沥青及乳化沥青等。

天然沥青在20世纪90年代得到了广泛应用, 其产品的研究和应用主要集中在沥青产品粒径和软化点与井壁失稳地层物性的匹配度上, 例如塔里木石油利用适宜软化点沥青在塔参1井破碎性白云岩地层进行了

应用等^[1]。但天然沥青的应用受限于其软化点(大都40℃~140℃), 对深井, 特别是160℃以上地层及长裸眼段的一段温度范围内, 难以有效封堵漏层。

进入21世纪后, 如何提高沥青在钻井液中的分散性, 更有利于形成致密的泥饼, 为此改性沥青、磺化沥青的研究、生产和应用得到了迅猛的发展; 例如新疆石油研发的阳离子改性沥青防塌剂KFT-1^[2], 提高了沥青的水分散能力。新星石油公司研发的改性磺化沥青FT-1在塔河油田进行了应用, 起到了较好的封堵防塌效果^[3,4]。但磺化沥青类防塌剂因荧光性较强, 限制了其应用, 其含有的稠环芳烃等有毒物质, 可对环境造成污染, 随着对环保要求的提高, 我国学者对低荧光、无荧光仿沥青类防塌剂进行了研究。例如中国石油大学研制的植物沥青类改性产品及胜利石油研制的仿沥青NFA-25具有磺化沥青类似的封堵防塌性能, 但荧光级别低、无毒^[5-6]。沥青类封堵防塌剂近30年的发展历程见表1。

表1 沥青类封堵防塌剂发展历程

时间	研究的主要内容
1991~2000	天然沥青, 产品粒径、软化点与地区地层物性适应性研究, 对地层温度适应性较差
2001~2010	改性沥青、磺化沥青等研究与应用, 提高温度适应性和分散性, 但具有环保局限性
2011~至今	低荧光、无荧光仿沥青类防塌剂的研究与应用

* 收稿日期: 2024-05-27 修回日期: 2024-05-31

第一作者简介: 刘文堂(1979-), 男(汉族), 河南南阳人, 副研究员, 现主要从事钻井液助剂研发和应用的管理及研究工作。

1.2 硅酸盐类封堵防塌剂

硅酸盐类防塌剂一方面可在水中形成胶体和纳米级颗粒封堵井壁微孔微裂缝,另一方面其硅酸盐离子能与岩石表面或与钻井液中的钙、镁离子反应生成硅酸盐沉淀,也有良好的封堵作用,且硅酸盐类产品成本低、无毒、无污染,因而日益得到钻井界的重视。

早在20世纪60年代前苏联尝试在钻井液中加入模数在2.8~3.4之间的硅酸钠用以稳定井壁,取得了一定的防在塌效果。进入20世纪80年代后,将硅酸盐与聚合物结合起来使用其效果有了进一步的提高,例如我国在北海中部渐新世、始新世的高地应力页岩层钻井过程中,采用含水54%~56%的液体硅酸钾钠与部分水解聚丙烯酰胺,提高了泥页岩的井壁稳定。

至20世纪90年代起,我国开始对硅酸盐进行系统研究,开发出多种复合硅酸盐,在防塌作用的同时兼顾

降滤失、润滑等效果。郭健康等人将无机硅酸钠与KCl复配用以提高泥页岩稳定性,并成功应用于苏丹六区Moga-8井和FN-29井^[7-9]。

近10年来,开发出有机硅复合封堵防塌剂,在保持硅酸盐防塌性能的基础上,提高了其与钻井液的配伍性,降低了钻井液的维护难度。李东平等人用DMDAAC、AM、NVP、KH570合成有机硅抑制封堵剂ADNK,抗温200℃以上,具有增黏和降滤失的双重作用,能有效提高泥页岩回收率,与水基钻井液及其处理剂配伍性良好^[10]。在材料开发的同时,我国对硅酸盐的防塌作用机理、阻滞压力传递机理及处理剂的应用工艺方面也有了较系统的认识。目前,硅酸盐防塌剂的应用有逐步扩大的趋势,我国大庆油田、胜利油田、中原油田等地区均有应用^[11-12]。硅酸盐类封堵防塌剂近30年的发展历程见表2。

表2 硅酸盐类封堵防塌剂发展历程

时间	研究的主要内容
20世纪60年代	硅酸钠(模数2.8~3.4),具有一定的防塌效果
20世纪80年代	硅酸盐与聚合物结合,作为页岩稳定剂首次应用(川南),提高了井眼规则性
1990~2010	开发出系列复合硅酸盐,同时兼顾降滤失、润滑等效果
2011~至今	稳定页岩作用机理、使用条件(发泡消泡、低密度钻井液应用、易失稳地层)应用研究、配方研究

1.3 聚合醇类封堵防塌剂

聚合醇是20世纪90年代初发展起来的一种新型水基钻井液防塌剂,该类产品主要利用其浊点温度效应起到封堵防塌作用,聚合醇类处理剂在保护油层和环境等方面也有很好的作用,能够满足地质录井和环境保护的要求。

20世纪90年代初研究开发的聚合醇产品,采用乙二醇、丙三醇丙二醇类聚合物,但因其加量大、价格昂贵,仅用于海洋等环境较敏感的地区,我国于1995年首次在渤海油田进行了应用^[13]。

进入21世纪后,在减少用量、降低成本的思路指导下,采用与乙二醇和丙二醇具有相似化学结构的乙氧

基或丙氧基齐聚物,即低聚的聚氧乙烯醚和聚氧丙烯醚,大幅降低了成本。

近年来,聚合醇类防塌剂扩展至以多种功能团为起始基的环氧乙烷环氧丙烷共聚物,在保持低成本、低加量的同时,降低了钻井液维护难度、提高了稳定井壁的能力、抗温能力和抗盐能力,使用领域也由海洋拓展至陆地。例如吕开河研发出的聚醚型多元醇防塌剂SYP-1,已在胜利油田、塔里木油田及吐哈油田推广应用,很好地解决了井壁坍塌和摩阻高的问题^[14]。现聚合醇类防塌剂已在辽河、江苏、中原、新疆、大庆等地区推广应用。聚合醇类封堵防塌剂近30年的发展历程见表3。

表3 聚合醇类封堵防塌剂发展历程

时间	研究的主要内容
20世纪90年代	乙二醇、丙三醇类聚合物,加量大、价格高,仅用于海洋等环境敏感地区
2001~2010	低聚的聚氧乙烯醚和聚氧丙烯醚,大幅降低了成本
2011~至今	环氧乙烷环氧丙烷共聚物,降低钻井液维护难度、提高井壁稳定能力、抗温性和抗盐性,使用领域拓展至陆地

1.4 铝基封堵防塌剂

铝基防塌剂主要通过电性中和、离子吸附和化学

沉淀作用增强井壁稳定性,经室内实验证明,铝酸盐和硅酸盐类封堵剂具有最高效率的阻滞压力传递性能,

同时有机铝类封堵防塌剂是一种环保的钻井液处理剂,因此成为较有发展前景的钻井液防塌处理剂之一。

20世纪90年代,国外利用偏铝酸盐和廉价有机酸合成出铝基防塌剂,利用氢氧化铝在页岩孔喉内或微裂缝内的沉积、封堵作用,增强页岩的稳定性,21世纪初我国在钻井液中引入 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 NaAlO_2 等铝无机盐以增强钻井液的封堵防塌功能,但无机铝与钻井液的配伍性较差,对钻井液的维护带来很大困扰。为解决该问题,开发出铝基络合物防塌剂,例如木质素磺酸铝络合物、柠檬酸—草酸类铝络合物,如AOP-1、DLP-1、PAL、OCL-IV B等,提高了铝化合物防塌剂与钻井液的配伍性,并在哥伦比亚、厄瓜多尔、秘鲁、玻利维亚等地区进行了应用,有效地解决了页岩地层的井壁失稳问题^[15-17]。

但络合铝的溶解度有限,且需要大量的碱溶液调节pH值,限制了该化学品的应用,继而开发了低成本的环保型铝络合物,新型的有机酸配位铝类防塌剂,与其它处理剂的配伍性好,可以有效维持页岩地层的井壁稳定。进入2010年以来,利用铝化合物与有机酸等螯合反应研发出一批铝聚合物,部分产品已得到了应用,例如以有机铝为主要成分的防塌剂LFT在中原地区得到了应用,表现出较强的防塌封堵性能,井径扩大率与临井相比显著减少^[18]。近年来,无机化合物的研究越来越受到重视,El-Monier等研发出100%纯无机铝/锆化合物,在兼顾铝基封堵防塌剂性质的同时,具有非常低的毒性,既不会产生任何有毒分解物,也不会通过皮肤吸收^[19-20]。铝基类封堵防塌剂近30年的发展历程见表4。

表4 铝基类封堵防塌剂发展历程

时间	研究的主要内容
20世纪90年代~21世纪初	偏铝酸盐和廉价有机酸合成物、简单铝无机盐的应用,但与钻井液的配伍性较差,维护成本高
2001~2010	木质素磺酸铝、柠檬酸—草酸类等铝络合物,提高了配伍性但溶解度有限且需要大量的碱溶液调节pH值
2011~至今	低成本的环保型铝络合物,新型的有机酸配位铝类防塌剂、纯无机铝/锆化合物,低毒且与其他处理剂配伍性好

1.5 微纳米封堵防塌剂

纳微米封堵防塌剂是随着近年来页岩气开发进程加快而应运而生的新型封堵防塌剂。页岩孔缝小(多为100~200nm)而常规封堵防塌剂粒径过大(0.1~100 μm)难以封堵页岩气微孔喉,造成页岩水化坍塌,而微纳米材料与页岩地层孔喉匹配性更强,因此微纳米封堵防塌剂成为近几年的研究热点。

目前一般采用无机纳微米颗粒或有机纳微米级颗粒进行封堵防塌。无机纳微米级封堵防塌剂为刚性封堵,主要有纳米 SiO_2 、纳米碳酸钙、纳米 ZnO 等,岳秋地等制备出 Fe_3O_4 纳米封堵剂,该材料的粒径在10nm左右,在人造泥饼模拟的岩芯中的封堵效果良好^[21]。

有机纳米材料具有一定的弹性,可在压力作用下发生形变进入岩石孔缝,最常用的有聚合物类和乳液类等。例如中原石油工程有限公司以AM、AA、AMPS反相乳液聚合而成的纳微米级球状凝胶MPA,在西南、新疆工区的油基钻井液中现场得到广泛应用,井漏概率降低31.4%,平均进尺渗漏减少0.03 m^3/m 以上。

无机纳米材料为刚性材料,不可发生形变,对复杂的孔缝形状的封堵适应力差,有机粒子弹性好但强度较低。为此,近年来,提出刚性和柔性材料复合封堵的

思路,将无机纳米材料和有机单体聚合或对无机纳米颗粒进行修饰形成的新型纳微米封堵防塌剂,同时发挥刚性封堵和柔性填充双重作用,显著提高钻井液封堵防塌能力。张县民等以改性纳米碳酸钙为内核,以亲油/亲水有机聚合物为外壳,研制出粒径为0.05~45 μm 的核壳聚合物,抗温达180 $^{\circ}\text{C}$,与油基和水基钻井液的配伍性均良好。

随着智能材料的快速发展,能够根据外界条件的变化而做出响应的微纳米材料也为未来封堵防塌剂的发展提供了一种新思路。王伟吉等研制出纳米级核壳结构温敏型智能封堵剂,该封堵剂在温度高于其最低共溶温度值时,可以同时起到物理封堵和化学抑制的双重作用^[22]。

2 发展方向

(1)目前沥青类产品的质量参差不齐,如何准确选择、鉴别沥青成为应用过程中至关重要的环节之一,为此应建立科学有效的检测方法,保证沥青类产品的质量;应研发适用于高温(>150 $^{\circ}\text{C}$)地层且在较宽泛温度范围内起作用的材料,拓宽其使用范围。

(2)硅酸盐作为封堵型的防塌材料,具有环保、无荧光、价格低廉等优势,但从整体来说,硅酸盐类防塌

剂室内研究较多但现场应用较少,主要有以下原因:加入硅酸盐对钻井液的整体性能有所影响;对pH值较敏感,如遇CO₂易引起钻井液黏度升高;硅酸盐易与地层水中多价金属离子形成凝胶或沉淀而导致储层损害。因此应从储层保护性和解除凝胶或沉淀的方法进行深入研究,研发出相匹配的降滤失剂、润滑剂、降黏剂,拓宽在高温高密度钻井液中的应用范围,优化硅酸盐钻井液的配制及维护。

(3)聚合醇类封堵防塌剂具有环保性能好、稳定井壁、封堵和防漏效果较好等优点,但仍存在一些难以克服的问题:因其作用机理的不明晰,对产品的评价产生不利影响;目前聚合醇与添加剂之间的相互作用机理还不明确,导致配制出的钻井液性能稳定性欠佳、维护困难。因此需对聚合醇的作用机理、聚合醇与各种添加剂间的相互作用进行深入研究,另外,多元醇易发泡,如何降低发泡率或聚合醇钻井液消泡剂的研制也是研究的方向之一。

(4)铝盐类封堵防塌剂在现场应用中还较少,这是由于铝离子易引起高价金属离子污染问题,如何维持钻井液的稳定性成为今后铝基处理剂研究的重点。现有铝基化合物封堵防塌处理剂的抗温性大都低于160℃,无法满足深井特别是200℃以上超深井井壁稳定的需求,如何提高铝基处理剂的抗温能力也是今后研究的方向之一。

(5)由于微纳米材料比表面积大、表面活性强,易团聚,应解决纳微米材料的团聚和吸附处理剂问题。现有的封堵评价方法用于评价纳微米级微裂缝封堵存在一定偏差,因此需建立合适的纳微米孔缝封堵评价方法,为研发纳微米级封堵剂提供支撑。

3 结束语

(1)针对泥页岩井壁失稳问题,已开发出多种钻井液封堵防塌剂。沥青类封堵防塌剂因其效果好、价格低廉成为应用最广泛的封堵防塌剂;硅酸盐类及聚合醇类封堵防塌剂因存在膜效应而具有最佳的阻滞压力传递效率,同时与环境友好程度较高;聚合醇类封堵防塌剂能够稳定井壁、可生物降解、低毒或无毒,且与盐类聚合物钻井液处理剂配伍性好;纳微米级封堵剂是针对泥页岩微孔隙而开发的新型封堵防塌剂,可渗入致密岩石表面、改善滤饼质量、有效阻滞压力传递,维持井壁稳定。

(2)沥青类、铝基、纳米封堵防塌剂的抗温大都低于160℃,需进一步研发抗高温封堵防塌剂,支撑深地

工程的发展。

(3)加强机理方面的认识,明确封堵防塌剂与钻井液处理剂之间的作用机理。研选与之相匹配的降滤失剂、润滑剂、降黏剂等,提高封堵防塌钻井液性能的稳定性并拓宽其应用范围。

(4)室内封堵防塌剂的评价方式还不完善,无论在微观的孔隙封堵上还是在宏观的井壁强化情况上都无法进行精细化定量评价,特别是在纳微米材料的封堵评价上还暂未形成有效的方法,应建立符合封堵剂机理的、可定量评价封堵防塌效果的评价方法,支撑产品的研发和应用。

参考文献:

- [1] 朱金智,邹盛礼,等.塔参1井破碎性白云岩地层防塌技术[J].石油钻探技术,1999,27(2):35-37.
- [2] 马世昌.阳离子改性沥青防塌剂KFT-1的研究与应用[J].钻井液与完井液,2000,17(1):10-12.
- [3] 卢虎,张斌,兰霞.钻井液用沥青类处理剂防塌性能评价方法探讨[J].钻采工艺,2006,29(1):96-98.
- [4] 马文英.中国石化沥青类处理剂标准探析[J].石油工业技术监督,2015,31(1):29-33.
- [5] 陈晓华,邱正松,暴丹,等.鄂尔多斯盆地富县区块强抑制强封堵防塌钻井液技术[J].钻井液与完井液,2021,38(4):462-468.
- [6] 孙德强,姚少全,李研媛.钻井液用无荧光仿沥青NFA-25的性能评价与应用[J].钻井液与完井液,2005,22(3):9-11.
- [7] 万绪新,苏辉,王爱民,等.硅酸盐聚合物泥浆在塔参1井中的应用[J].石油钻探技术,1999,27(6):24-26.
- [8] 边继祖,张献丰,张全明,等.聚合醇的研究与应用[J].精细化工,2001,18(8):448-449.
- [9] 郭健康,等.强抑制性硅酸盐钻井液体系及其在苏丹六区的应用[J].钻井液与完井液,2005,22(1):14-18.
- [10] 李东平,赵贤正,王子毓,等.新型有机硅聚合物抑制封堵剂性能及作用机制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2020,44(4):135-141.
- [11] 梁利喜,王光兵,刘向君,等.页岩水化特征及其井壁稳定分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(9):77-83.
- [12] 张艳娜,孙金声,耿东士.杂化硅防塌剂的合成与性能评价[J].油田化学,2016,33(3):396-400.
- [13] 宋瑞宏,潘义军,高维宏,等.大庆油田深探井钻井液体系应用现状[J].钻井液与完井液,2002,19(3):38-40.
- [14] 吕开河.多功能聚醚多元醇防塌剂SYP-1的性能评价及现场应用[J].钻井液与完井液,2004,21(5):15-18.
- [15] M.A.ramirez,D.claper,P.Kenny,etc.Drilling Fluid Design For Challenging Wells in the Andean Mountain Region[J].SPE102206-MS-P,2006.

- [16] M.A.ramirez,D.K.claper,G.Sanchez,etc.Aluminum- based HP-WBM Succesfully Replace Oil-based Mud to Drill Exploratory Wells in Environmentally Sensitive Area[J].SPE(94437),2005.
- [17] M.A.Ramirez,SaddokBenaissa,etc.Aluminum-based HPWBM Succesfully Replace Oil-based Mud to Drill Exploratory Wells in the Magelan Strait,Argentina[J].SPE/IADC(108213),2007.
- [18] 李旭东,王旭,孙举,等.地荧光强封堵型防塌剂 LFT 的研究与应用[J].钻井液与完井液,2007,24(1):8-12.
- [19] El-Monier I A,Nasr-El-Din H A,Harper T L,et al.A New Environmentally Friendly Clay Stabilizer[C]//SPE 136061,2013.
- [20] Clarke TA,Nasr-El-Din H A.Application of a Novel Clay Stabilizer to Mitigate Formation Damage Due to Clay Swell-ing[C]//SPE 173625,2015.
- [21] 岳秋地,武元鹏,吴江,等. Fe_3O_4 纳米封堵剂的制备、表征及封堵性能[J].油田化学,2014,31(3):322-325.
- [22] 王伟吉,邱正松,钟汉毅,等.页岩储层温敏型 P(NIPAm-co-AA)/nano- SiO_2 复合封堵剂的制备及特性[J].石油学报,2015,36(3):378-384.

(上接第 22 页)

- [3] 刘欣颖,胡平.水平井开采含夹层底水油藏三维物理试验研究[J].石油天然气学报,2011,33(8):129-130.
- [4] 姜超.水平井开采聚驱后侧积夹层剩余油数值模拟研究[D].东北石油大学,2013.
- [5] 王丽丽.水平井开采聚驱后侧积夹层剩余油的实验研究[D].东北石油大学,2013.
- [6] 王娜.水平井化学驱挖潜聚驱后侧积夹层剩余油研究[D].东北石油大学,2015.
- [7] 李强.水平井化学驱开采聚驱后侧积夹层剩余油效果的研究[D].东北石油大学,2016.
- [8] Chen Taoping,Wang Na,He Ru. Experimental Research On Using Horizontal Well with Chemical Flooding to Exploit Remaining Oil of Side Interlayer after Polymer Flooding[C].Resources and Sustainable Development III,Part 1,Switzerland:Trans Tech Publications,Advanced Materials Research,2014,Vol.962- 965: 484-488.

Experimental study on Horizontal Well and Foam Flooding for remaining Oil in lateral accretion layers after polymer flooding

CHEN Tao-ping, LI Qiang

(Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Ministry of

Education, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

Abstract: To investigate the effectiveness of combining horizontal wells with foam flooding in recovering remaining oil from lateral accretion layers after polymer flooding, an indoor experimental study was conducted using a three-dimensional lateral accretion layer core physical model (60 cm $\times$ 30 cm $\times$ 5.3 cm). On the basis of vertical well injection and production for water flooding and polymer flooding, a combined injection method of vertical wells (for water and oil) and horizontal wells (for production) was implemented, involving three alternating injections of 0.1 PV foam system, 0.1 PV gas, and followed by 0.2 PV ultra-low interfacial tension binary system. The results show that, for the experimental core model with a water flooding recovery rate of 38.2% and a polymer flooding recovery rate of 10.4%, horizontal well-foam flooding increased the recovery rate by 24.3%. This method outperformed polymer-alternating flooding (22.5%), variable-concentration polymer flooding (18.0%), and high-concentration polymer flooding (18.0%) under vertical-horizontal well joint deployment, making it the optimal approach for chemically enhanced recovery of remaining oil in lateral accretion layers after polymer flooding.

Key words: lateral accretion layer; remaining oil; horizontal well; polymer flooding; foam flooding