

疏水改性纳米材料在油田化学领域研究进展

李思航, 秦灶均, 段芑杉, 杨 淞, 王渐双, 徐建根*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年5月6日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年7月10日

摘 要

岩石表面亲水特性会导致页岩发生剧烈水化作用, 引起井壁失稳; 此外, 水分的侵入也会在储层中形成水相圈闭, 造成含水饱和度升高, 从而降低原油采收率。在油田化学领域, 通过开发疏水改性纳米材料, 可以改变井壁或储层岩石表面的润湿性, 降低岩石表面的亲水性。从而达到抑制页岩水化、稳定井壁、提高储层油气渗流能力的目的, 有效提高油气田的开发效果。本文将对疏水改性纳米材料的制备及其疏水原理进行分析, 并详细阐述了疏水改性纳米材料在提高钻井液润滑性、稳定井壁、抑制页岩水化、提高原油采收率四个关于油田化学领域方面的研究进展。最后, 随着对深地油气藏、非常规油气藏以及老油田等开发力度的不断加大, 针对目前存在的挑战, 展望了疏水改性纳米材料在未来发展方向, 以满足其在油田化学领域中不断增长的需求。

关键词

纳米材料, 疏水改性, 井壁稳定, 钻井液, 提高采收率

Research Progress of Hydrophobically Modified Nanomaterials in Oilfield Chemistry

Sihang Li, Zaojun Qin, Pengshan Duan, Song Yang, Jianshuang Wang, Jiangen Xu*

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Received: May 6th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jul. 10th, 2025

Abstract

The hydrophilic property of the rock surface can lead to intense hydration of shale, causing

*通讯作者。

文章引用: 李思航, 秦灶均, 段芑杉, 杨淞, 王渐双, 徐建根. 疏水改性纳米材料在油田化学领域研究进展[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 721-728. DOI: 10.12677/me.2025.134082

instability of the wellbore. In addition, the intrusion of moisture will also form water phase traps in the reservoir, resulting in an increase in water saturation and thereby reducing the crude oil recovery rate. In the field of oilfield chemistry, by developing hydrophobic modified nanomaterials, the wettability of the wellbore or reservoir rock surface can be changed, and the hydrophilicity of the rock surface can be reduced. So as to achieve the purpose of inhibiting shale hydration, stabilizing the wellbore and improving the seepage capacity of oil and gas in the reservoir, and effectively enhancing the development effect of oil and gas fields. This paper will analyze the preparation of hydrophobic modified nanomaterials and their hydrophobic principles, and elaborate in detail the research progress of hydrophobic modified nanomaterials in four aspects related to oilfield chemistry: improving the lubricity of drilling fluid, stabilizing the wellbore, inhibiting shale hydration, and enhancing crude oil recovery rate. Finally, with the continuous increase in the development efforts of deep underground oil and gas reservoirs, unconventional oil and gas reservoirs, and old oil fields, in view of the current challenges, the future development directions of hydrophobic modified nanomaterials are expected to meet their growing demands in the field of oilfield chemistry.

Keywords

Nanomaterials, Hydrophobic Modification, Wellbore Stability, Drilling Fluids, Enhanced Recovery Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在油气勘探开发中, 油气田工作液在提升原油采收率与井壁稳定性等方面起着关键作用。油气田工作液中的重要成分水, 在高毛细血管力的作用下, 会导致其与储层岩石中亲水性的微纳米孔隙结构接触, 并产生一些复杂问题: 一是钻井液或压裂液的侵入, 使井壁岩层发生剧烈的水化作用, 使原有的地应力平衡受到破坏, 导致井壁失稳; 二是, 水分侵入会导致油气藏中形成持续不断的水相圈闭, 使含水饱和度升高, 油气流动效率得到显著抑制[1][2]。针对岩石表面亲水的特性, 通过研究与开发憎水性材料, 在提高钻井液润湿性、稳定井壁、抑制页岩水化作用以及提高原油采收率等方面取得了明显的技术突破, 油气田开发效果得到了全面提升[3]。

纳米材料以尺寸小、比表面积大和表面活性好等优点, 在油田化学领域拥有巨大的应用潜力。通过对纳米材料的疏水改性, 改善其界面相容性以及在水相中分散度, 不仅拓宽了纳米材料的应用范围, 而且提升了纳米材料在油田化学领域中的综合性能。针对页岩储层中广泛发育的纳米级微孔隙和微裂缝, 疏水改性后的纳米颗粒通过高效封堵作用, 在孔喉处构建结构性桥接网络, 有效控制岩石水化膨胀, 避免井下复杂事故的发生。将疏水改性纳米材料添加到驱油体系中, 可以在驱油过程中产生结构分离压力, 实现对残余油的有效驱替, 并降低油水界面张力, 降低注入压力, 增强泡沫稳定性, 改善原油流动性, 进而提高原油采收率[4][5]。应春业[6]等用疏水改性纳米二氧化硅作为页岩封堵剂来减缓页岩的水化膨胀, 封堵了页岩的孔隙并在页岩表面形成疏水层, 从而阻止水分子侵入。

本文将对疏水改性纳米材料的制备及其疏水原理进行分析, 并详细阐述疏水改性纳米材料在提高钻井液润滑性、稳定井壁、抑制页岩水化、提高原油采收率等油田化学领域的应用进展, 最后展望了疏水改性纳米材料在油田化学领域的发展前景。

2. 疏水改性纳米材料的制备及原理

2.1. 疏水改性纳米材料的制备

(1) 物理吸附法

物理吸附是指通过静电力、范德华力和氢键等作用力,将表面活性剂、季铵或共聚物等修饰剂吸附到纳米材料表面,从而改善纳米材料的疏水性。这种方法简单环保,但表面改性后纳米材料存在的不稳定性,可能导致吸附的疏水性物质脱落[7][8]。Youm [9]等使用阳离子表面活性剂、阴离子表面活性剂和非离子表面活性剂制备成三种炭黑溶液,然后将每种溶液浸涂在纤维素纳米纤维上并干燥,形成一种疏水改性纳米材料。Hoxha [10]等利用阳离子对纳米二氧化硅颗粒进行表面改性,改性后的纳米颗粒可以有效封堵页岩孔隙,同时还可以通过静电力相互作用增强岩石表面的疏水性,从而提高井壁稳定性。

(2) 化学改性法

纳米颗粒的表面电荷决定了纳米颗粒与储层岩石之间以及单个纳米颗粒之间的静电排斥或吸引力程度,也是决定纳米颗粒分散性能的一个关键因素。化学改性方法主要是通过共价键或离子键等方式将更多的离子团引入到纳米材料表面,提高其电荷排斥力,防止它们在储层条件下团聚。包括硅烷偶联剂改性、烷酰化改性和酯化改性等方法,在纳米粒子表面引入疏水性基团,减少表面羟基含量,实现对纳米材料的疏水性能的有效增强[11][12]。相较于物理吸附法,化学改性法制备的纳米材料结合力强、稳定性高,改性效果持久。Sonn [13]等使用二甲基二氯硅烷(DMDCS)对二氧化硅纳米颗粒表面改性,接触角测量表明,随着 DMDCS 浓度的增加,二氧化硅纳米颗粒表面变得更加疏水。张馨[14]将纳米二氧化硅烘干,经超声分散使其分散在甲苯溶剂中,然后在高温、搅拌的条件下,加入硅烷偶联剂,再经洗涤、离心、真空干燥及研磨后得到疏水改性纳米颗粒。

(3) 聚合物接枝法

纳米材料表面分布着丰富的羟基官能团,聚合物接枝法可通过共价键或离子键以及氢键作用,在纳米材料表面接枝疏水性聚合物层,这种结构可以改善纳米材料的疏水性以及与疏水性聚合物基质的界面相容性,为纳米复合材料综合性能的增强提供保障[15]。张馨[14]通过两步改性法,即第一步是使用硅烷偶联剂对纳米二氧化硅进行表面改性,第二步是使用选定的超支化聚合物进行接枝改性,首先取一定量硅烷偶联剂改性二氧化硅和三氯甲烷,经水浴加热、高速搅拌后,通入氮气和冷凝水一定时间,加入超支化聚合物 HPA-800 进行接枝,然后使用无水乙醇洗涤、离心以及真空干燥,最后通过研磨制备出了新型泥页岩稳定剂(S-O-SiO₂)。Liu [16]等利用乙烯基三甲氧基硅烷对纳米二氧化硅进行表面改性,再将聚合物接枝到改性纳米二氧化硅表面,制备出一种新型核壳聚合物,可以有效提高水基钻井液降滤失性能。

2.2. 疏水改性纳米材料的疏水原理

把液滴放置在一个理想的固态面上,若其中一相为气态,此时,通过固-液-气三相周界面、液-气界面的切线方向和固-液界面的切线方向所形成的夹角称为接触角度(θ)。接触角可以用来衡量物体表面的润湿性能,一般认为,水滴在材料表面的接触角 $\theta < 90^\circ$ 时,物体表面呈现亲水性;相反,若 $\theta > 90^\circ$,则物体表面呈现疏水性。但是,接触角只对静态物体有效,对于在运动状态下的物体,必须考虑滚动角(α)的影响。滚动角是指当没有其它外力影响的情况下,当一滴水刚好从斜面上滚动下来时,斜面和水平面之间产生的夹角。当 α 值较小时,表明液滴在物体表面的粘附力较差,更容易发生滚动,表面的疏水性也就越强[17]。

现有研究表明,固体表面的润湿特性由其表面能量和粗糙度结构共同影响。通常来说,材料的表面自由能越低,液滴在其表面形成的接触角就越大。然而,对于表面自由能极低的含氟材料,水滴在其表

面的接触角通常仅能达到约 120° 左右。因此, 要实现超疏水性能, 除了减少表面能之外, 还需要构建适当的粗糙结构以进一步提升疏水效果。

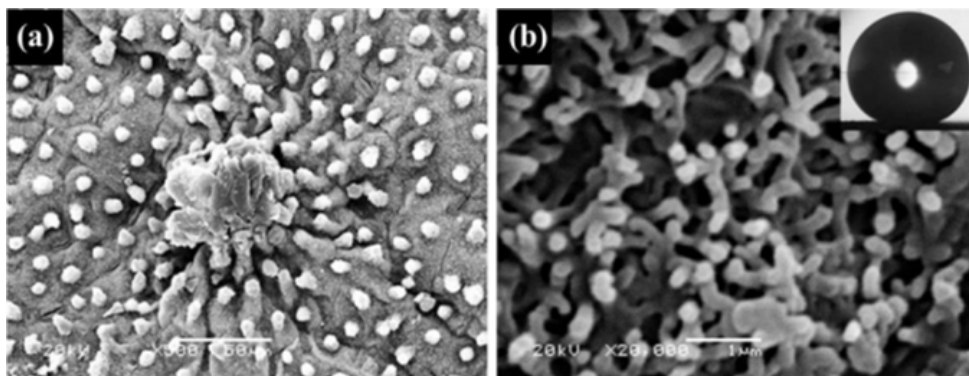


Figure 1. Scanning electron micrographs of the surface of a lotus leaf, (a) low magnification, (b) high magnification, the small figure in (b) shows the water-connected tentacles on the surface of the lotus leaf

图 1. 荷叶表面扫描电镜图, (a) 低放大倍数, (b) 高放大倍数, (b)中的小图为液滴在荷叶表面的接触角

自然界中荷叶因其独特自清洁功能, 也展现出了显著的超疏水性能, 这种现象被称为“荷叶效应”, 即当水滴在荷叶表面滚动时, 会形成球状形态, 并在运动过程中吸附污染物颗粒。见图 1, 研究人员通过扫描电镜观察荷叶表面, 发现荷叶表面纹理分布均匀, 有许多凸起和凹槽结构, 这些微米级大小的凸起和凹槽的表面装饰着大量的纳米级颗粒。因此, 荷叶表面是由大量纳米级和微米级结构组成的多级物理结构(见图 2)。而形成“荷叶效应”的主要原因也是由于这种特殊的多级物理结构的影响, 导致水滴在荷叶表面上表现出高接触角和低滚动角的超疏水性能[18][19]。利用“荷叶效应”可以开发智能响应型超疏水抑制剂, 通过温度或 pH 触发润湿性转变, 从而降低井壁失稳风险; 此外, 针对凝析气藏的裂缝性储层, 可以根据这一原理, 在裂缝表面构建仿生疏水网络, 有效抑制水锁效应, 提高采收率。荷叶独特的自清洁功能使得叶面保持清洁并有很强的疏水性, 这种仿生学特性在油田化学领域引发广泛关注, 并为开发新型超疏水自清洁材料提供了重要启示。

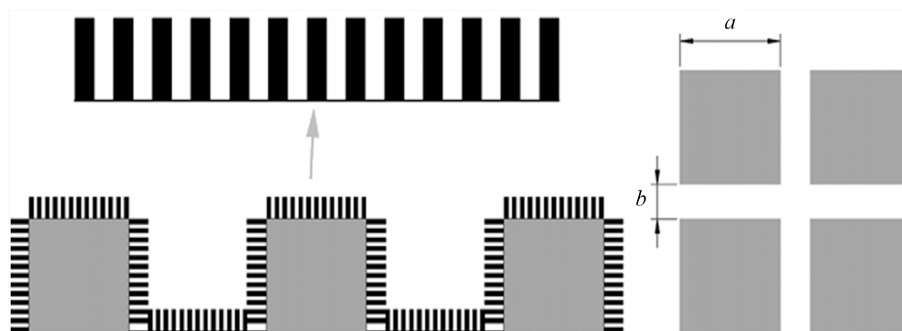


Figure 2. Modeling the multilevel physical structure on the surface of a lotus leaf

图 2. 荷叶表面上具有的多级物理结构模型图

此外, 由于纳米颗粒尺寸较小, 且在一定的压差下, 易在孔隙中聚集, 使得岩石表层变得更为致密, 从而有效降低了储层的渗透率, 减少水分的进入, 保持井壁稳定(见图 3)。无机纳米材料由于刚性太强而无法进行变形, 很难在复杂孔隙中实现紧密封闭。有机纳米颗粒多数为柔性材料, 在封堵过程中, 聚合

物会变形并粘合在孔隙裂缝上形成致密膜,阻挡水分的渗入,但有机纳米颗粒的强度小,在地层压力作用下,很容易被压入孔隙裂缝深部,降低封堵作用。复合纳米材料由无机纳米材料和有机纳米材料复合而成,通过对岩石孔隙裂缝进行填充、强化封堵,最终在岩石表层形成致密的封堵层,阻止滤液的渗入,从而保持井壁的稳定[20]。

疏水改性纳米材料在提高采收率方面也具有广阔前景,其疏水原理主要分为以下几点:一是利用其疏水亲油性能,消除孔道内壁上的水膜,增大通道半径。其次,它具有极强的疏水性,可以大大降低水在通道内的流动阻力,从而增加了水相渗透率;最后,将储层油水界面隔离开来,防止粘土颗粒的水化膨胀、扩散,减少注入压力,达到降压增注的目的,以提高原油采收率[21]。

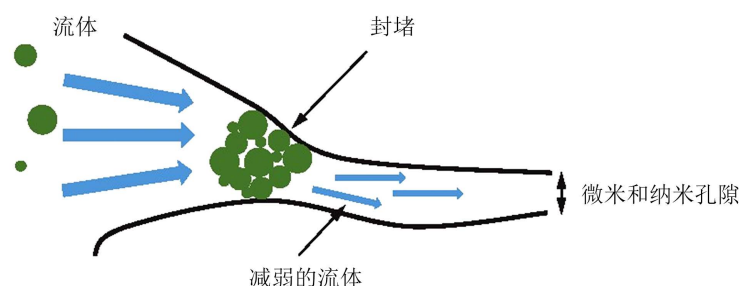


Figure 3. Schematic diagram of the blocking effect of nanoparticles
图 3. 纳米颗粒封堵作用示意图

3. 疏水改性纳米材料在油田化学领域研究进展

3.1. 提高钻井液的润滑性

油基钻井液在降摩减阻等方面比传统的水基钻井液显著提高,同时还具有很好的抑制防塌能力,能够有效地保持井壁的稳定。传统的水基钻井液润滑性不佳,作业过程中摩擦扭矩大,而油基钻井液环境治理难度大,因此,为减轻环境污染,降低成本,在高难度复杂作业中尽量使用水基钻井液。目前水基钻井液普遍存在着润滑性较差的问题,对其润滑性提出了更高要求,添加润滑剂可以极大地改善其润滑性[22]。

纳米材料润滑剂基于其纳米级颗粒尺寸和较大的比表面积,近年来应用也越来越广泛,纳米材料类润滑剂通过多种作用方式共同发挥降磨减阻效果:(1) 保护膜效应:较软或具有层状结构的纳米材料能够吸附在摩擦表面,形成一层可移动的润滑薄膜,避免金属与岩石直接接触,转而通过薄膜内部的分子滑动降低摩擦,例如石墨烯、硫化物等。(2) 滚动效应:球形纳米颗粒在摩擦过程中像微型滚珠一样运动,将滑动摩擦转化为滚动摩擦,减少能量损耗,如碳纳米管、二硫化钼。(3) 修复效应:当材料表面的凹槽大于纳米颗粒尺寸时,这些微小颗粒能够渗透到表面的微小缺陷中,填补并修复损伤区域,从而降低粗糙度;(4) 抛光效应:当材料表面的凹槽较小时,高硬度纳米材料则通过持续打磨使接触面更光滑、更坚硬,进一步减少摩擦阻力,如金刚石、二氧化硅等。这些机制相互配合,在不同摩擦条件下动态调整,最终在钻井等高磨损环境中实现长效润滑和高效减阻[23] [24]。

王伟吉[25]等采用硅烷偶联剂对纳米 SiO_2 进行超声表面改性,然后将其与表面活性剂按一定比例添加到菜籽油中制备出一种纳米润滑剂,热稳定性能好,具有一定的降滤失性和抑制性,当润滑剂加量为1%时,润滑系数降低率大于85%,对钻井液流变性无明显影响,荧光级别在1~2级。张帅[26]通过表面活性剂和纳米石墨烯合成一种润滑剂,该产品能使常规盐水基浆的润滑系数下降70%~80%,显著优于传统酯基润滑剂。此外,在300℃高温环境仍保持稳定,且纳米石墨烯可以实现生物降解,符合相关环保要求。

3.2. 增强井壁稳定

页岩地层发育较多微裂缝、微孔隙,水基钻井液与其接触并发生相互作用是导致井壁失稳的重要原因,即在水基钻井液钻进页岩地层时,水分会通过微裂缝、孔隙渗透进页岩中,并与页岩发生强烈的水化作用,促进次生裂缝的产生,进而形成更复杂的网络结构,使得页岩强度降低,导致井壁失稳。纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等无机纳米材料作为钻井液封堵材料,可减弱微裂隙的发育,有效降低页岩的水化作用,提高井壁稳定性,但仍面临着分散稳定性差和易团聚等问题,目前普遍采用的方法是通过无机纳米材料进行表面改性来解决,疏水改性的纳米材料可以明显改善其在钻井液中的应用效果。

李新建[27]利用纳米二氧化硅,通过溶胶制备、烘干与煅烧、超声处理得到一种纳米封堵材料,经现场应用表明:漏失量从 $12\text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $4\text{ m}^3/\text{h}$,减少了 66.7%,滤失率也有明显改善,从 $15\text{ mL}/30\text{ min}$ 降至 $10\text{ mL}/30\text{ min}$ 。此外,井壁的侵蚀面积从 20%降至 5%,井壁坍塌事件从 3 次减少至 0 次,井径从 5%减至 1%,改善了 80%,显著增强了井壁的稳定性。于庆河[28]研制了一种聚合物纳米封堵剂,与有机盐钻井液配伍性良好,且能够有效加强对微孔隙、微裂缝的封堵,减少钻井液侵入地层引起微孔隙、微裂缝的延伸。贾永红[29]等以 KH570 改性纳米二氧化硅为“核”,通过加成反应将聚合物接枝在改性 SiO_2 表面,制备了一种抗高温的自适应强封堵剂。

3.3. 抑制页岩水化

由于页岩本身的亲水特性,水分子很容易以氢键的方式吸附于岩石表面,使其发生水化作用,从而降低其强度,造成井壁坍塌。通过疏水材料对页岩进行低表面能改性,提高其表面疏水性能,达到抑制岩石水化的目的。在对岩石进行低表面能处理时,虽然可以有效地提高岩石的疏水性,但是水相接触角的增大是有限的。基于疏水作用原理,构建微纳米级粗糙结构,可进一步实现对岩石表面疏水性能的有效增强。通过降低表面能、构建微纳米级粗糙结构的方式对纳米材料进行疏水改性,使其吸附于岩石表面,有效抑制页岩水化作用。

倪晓晓[30]利用五种硅烷偶联剂通过溶胶-凝胶法合成无氟超疏水纳米流体,在流体浓度达到 3%时,岩心表面水相接触角至 155° ,滚动角降低至 1° ,此外通过线性膨胀、滚动回收、毛细管实验等实验表明,超疏水纳米流体能够有效抑制粘土水化膨胀,且其抑制性能优于氯化钾和聚醚胺。Liu [31]等使用硅烷偶联剂对纳米二氧化硅进行了化学改性,研制一种纳米二氧化硅/阳离子聚合物复合材料作为新型页岩抑制剂,其滚动回收率高达 70.06%,此外,根据扫描电子显微镜显示,由于抑制剂的氢和离子键合与粘土的强烈吸附,能有效抑制页岩的水化膨胀。不同于纳米二氧化硅吸附在泥饼上形成纳米颗粒隔水层,纳米碳酸钙更侧重于物理封堵孔隙来抑制页岩水化,王宇昊[32]等利用聚乙烯醇对纳米碳酸钙进行接枝改性,并将其填补在泥饼和泥页岩中的微孔隙中,二者的协同作用可以有效增强对页岩水化的抑制作用。

3.4. 提高原油采收率

储层的润湿性对储层中油、气、水三相的渗流规律、微观分布和相对渗透率有显著影响。因此,对储层进行“界面修饰”可以有效提高储层的开采效率。疏水改性纳米材料对储层孔隙介质表面的影响在提高原油采收率方面也表现出优异的性能。疏水改性纳米材料在提高原油采收率的作用机理主要分为以下几点:(1) 产生结构分离压力:纳米流体在油-水-固三相接触区形成楔形薄膜,通过分子间静电排斥和布朗运动产生垂直于界面的结构分离压力,推动油滴从岩石表面剥离;(2) 降低界面张力:通常油水界面张力越小,油的流动性越好,原油采收率越高,纳米颗粒吸附于油水界面,形成稳定的纳米界面膜,显著降低界面张力;(3) 增强泡沫稳定性:泡沫驱在提高波及效率、增加原油产量等方面具有巨大潜力,但是泡沫注入储层后稳定性较差,而通过表面活性处理的纳米颗粒可以有效提高泡沫的稳定性,增加液

膜厚度与机械强度,延缓泡沫破裂。(4) 降低注入压力:在低渗致密储层,纳米颗粒能减弱水分子间的氢键缔合作用,改变水分子的网络结构,提高波及面积,显著降低注入压力[33]。

刘炳圻[34]等利用改性 SiO_2 制备一种新型 AAMC-S1 纳米复合材料,其性能评价结果表明,该纳米复合材料在增稠性、耐温性、耐盐性和抗剪切性等方面表现良好,此外,EOR 测试表明,AAMC-S1 可以显著提高采油率 13.25%,在提高采收率方面有巨大潜力。Giraldo [35]等利用改性 SiO_2 制备出一种 NiO/SiO_2 Janus 纳米溶液,其研究表明,即使在 100 mg/L Janus 的极低浓度纳米颗粒下,界面张力也会降低,毛细管数急剧增加,从而提高原油采收率。

4. 总结与展望

疏水改性纳米材料以其尺寸小、比表面积大和表面活性好等优点,在提高钻井液润滑性、稳定井壁、抑制页岩水化以及提高原油采收率等油田化学领域方面应用潜力巨大。但是,随着对深地油气藏、非常规油气藏以及老油田等开发力度的不断加大,我们仍面临着成本高、配伍性差、对环境产生危害等挑战。基于目前研究进展,在油田化学领域,疏水改性纳米材料的未来发展可以关注以下几个方面:

(1) 重点突破疏水改性纳米材料的低成本制备方法。选择可以替代昂贵的含氟原料,包括木质素、纤维素等生物基疏水材料或其他工业副产品,既保护环境又降低成本;通过调整反应过程,使反应过程更加简单,从而降低能源消耗、降低处理费用;利用模块化生产装置,实现连续化生产,完成批量制备效率的提高;此外,开发具有多功能性的疏水改性纳米材料,进一步降低生产成本,让制备方法更容易被油田现场接受。

(2) 强化疏水改性纳米材料与油田化学体系的配伍性。在颗粒表面添加同时亲水和亲油的分子链,调整颗粒的亲水-疏水比例,使其在钻井液中均匀分散,避免在高温或高盐环境下发生团聚;深入研究疏水改性纳米材料与常用添加剂的配伍性,保证同时添加不会减弱作用效果,以提升疏水改性纳米材料等油气田工作液的综合性能。

(3) 开发可利用疏水改性纳米材料的智能油气井工作液体系。设计遇高温自动增强疏水性的纳米颗粒,或根据地层 pH 值变化实时调整综合性能,并与现有添加剂形成互补;建立不同储层的物性数据库,匹配不同纳米材料特性,避免盲目使用导致孔喉堵塞等问题发生。

(4) 提升疏水改性纳米材料对环境的友好性。改用无溶剂的水基反应体系或生物酶催化合成,减少有毒溶剂和催化剂的使用,可选用天然原料制备低毒疏水材料,替代传统含重金属材料;探索循环技术,实现纳米材料从生产到废弃全流程的循环利用,实现油气田绿色勘探开发。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划(项目编号:202411551016)。

参考文献

- [1] 陆冲,韩兴威,郭帅,等.氧化石墨烯及其复合材料的应用研究进展[J].辽宁化工,2025,54(1):142-145.
- [2] 杨力铭,高凤鸣,高雪,等.新型水合物抑制剂 HAY 的研制与性能评价[J].辽宁化工,2025,54(2):248-251.
- [3] 李娇,樊旭阳,建伟伟,等.含碳纳米管混合纳米流体的热物性研究进展[J].辽宁化工,2025,54(2):299-303.
- [4] 张立,张卫东,沙鸥,等.改性纳米颗粒在提高原油采收率中的研究进展[J].石油化工,2021,50(9):967-973.
- [5] 李家豪,范海明,魏志毅,等.纳米材料在低渗透油藏中的研究进展及展望[J].化工进展,2025,44(3):1485-1495.
- [6] 应春业,李新亮,杨现禹,等.基于疏水型纳米二氧化硅的页岩气盐水平液[J].钻井液与完井液,2016,33(4):41-46.
- [7] 刘明辉,马瑞廷,魏莉. SiO_2 气凝胶绝热涂料的制备与绝热性能研究[J].辽宁化工,2025,54(2):244-247.

- [8] 李鑫林, 任永忠, 田佳苑, 等. 超疏水玉米秸秆粉末的制备及其油水分离性能[J]. 辽宁化工, 2024, 53(10): 1524-1527.
- [9] Youm, J., Lee, S., Cho, I., Jeong, D., Bang, J., Park, H., *et al.* (2023) Highly Increased Hydrovoltaic Power Generation via Surfactant Optimization of Carbon Black Solution for Cellulose Microfiber Cylindrical Generator. *Surfaces and Interfaces*, **38**, Article ID: 102853. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102853>
- [10] Hoxha, B.B., van Oort, E. and Daigle, H. (2019) How Do Nanoparticles Stabilize Shale? *SPE Drilling & Completion*, **34**, 143-158. <https://doi.org/10.2118/184574-pa>
- [11] 张亚, 吴宇, 侯珊珊. 多功能纳米材料在钻井液中的应用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2024, 41(1): 13-20.
- [12] 信瑶, 黄艳茹. 基于溶胶凝胶法的超疏水纺织物的制备及其性能[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2025, 45(1): 41-49.
- [13] Sonn, J.S., Lee, J.Y., Jo, S.H., Yoon, I., Jung, C. and Lim, J.C. (2018) Effect of Surface Modification of Silica Nanoparticles by Silane Coupling Agent on Decontamination Foam Stability. *Annals of Nuclear Energy*, **114**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.12.007>
- [14] 张馨. 超支化聚合物接枝纳米二氧化硅的泥页岩稳定剂研制[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
- [15] 谷一鸣, 刘晗, 齐程远, 等. 疏水改性阳离子絮凝剂的制备及其对含污泥废水絮凝性能研究[J]. 辽宁化工, 2025, 54(1): 14-18.
- [16] Liu, F., Yao, H., Liu, Q., Wang, X., Dai, X., Zhou, M., *et al.* (2021) Nano-Silica/Polymer Composite as Filtrate Reducer in Water-Based Drilling Fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **627**, Article ID: 127168. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127168>
- [17] 黄昱昊, 徐建根, 步文洋, 等. 钻井液用纳米封堵剂的研究与进展[J]. 辽宁化工, 2023, 52(3): 436-438+449.
- [18] 郭淼, 杨广彬, 张玉娟, 等. 纳米 SiO₂ 在钻井液中的应用研究进展[J]. 化学研究, 2020, 31(4): 283-289+377.
- [19] 孙金声, 李贺, 吕开河, 等. 纳米材料提高水基钻井液页岩稳定性研究进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 74-82.
- [20] 龙海锋, 王平全, 李前贵, 等. 纳米材料在水基钻井液中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(S1): 274-277.
- [21] 孙德, 王平全, 李早元, 等. 纳米材料在页岩钻井工作液中的应用进展[J]. 当代化工研究, 2023(19): 5-7.
- [22] 刘云鹏, 杨清海, 石白茹, 等. 仿生超疏水材料在石油化工中的应用进展[J]. 油田化学, 2023, 40(2): 374-379.
- [23] 齐美瑛. 基于改性纳米 SiO₂ 复合驱油剂的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2023.
- [24] 崔帅东, 田晓雨, 任慧敏, 等. 溶胶-凝胶法制备超疏水玻璃及性能研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53(10): 1528-1532.
- [25] 王伟吉, 邱正松, 钟汉毅, 等. 钻井液用新型纳米润滑剂 SD-NR 的制备及特性[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 113-116.
- [26] 张帅. 石墨烯基固体润滑剂的制备及摩擦学性能探究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [27] 李新建. 基于纳米封堵材料的钻井液漏失控制技术[J]. 化学工程与装备, 2025(2): 83-86.
- [28] 于庆河, 刘涛, 吴文兵. 钻井液用纳米复合封堵剂的研制[J]. 石油工程建设, 2024, 50(S1): 76-80.
- [29] 贾永红, 吴家乐, 张蔚, 等. 一种自适应纳米封堵剂的研制在水基钻井液体系中的应用研究[J]. 石油科学通报, 2024, 9(6): 1034-1043.
- [30] 倪晓骁. 超疏水/双疏纳米流体的制备及其在岩石表面的自清洁特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [31] Liu, F., Zhang, C., Li, X., Zhang, Z., Wang, X., Dai, X., *et al.* (2022) Investigation of the Inhibition Mechanism of Polymer/Nano-Silica Composite as Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **636**, Article ID: 128099. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128099>
- [32] 王宇昊, 谭慧静, 罗龙, 等. 改性纳米 CaCO₃/PVA 钻井液体系的构建与性能评价[J]. 应用化工, 2025, 54(3): 717-724+735.
- [33] 蒲万芬, 杨帆, 任豪, 等. 纳米颗粒驱油机理研究进展[J]. 特种油气藏, 2024, 31(6): 1-9.
- [34] 刘炳圻, 张春生, 张审琴, 等. β -环糊精功能化聚丙烯酰胺纳米复合材料的制备及其在提高采收率中的应用[J]. 当代化工, 2021, 50(4): 795-798.
- [35] Giraldo, L.J., Gallego, J., Villegas, J.P., Franco, C.A. and Cortés, F.B. (2019) Enhanced Waterflooding with NiO/SiO₂ 0-D Janus Nanoparticles at Low Concentration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **174**, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.007>