

油气田钻井用提切材料研究进展



魏艳¹, 张博文^{2,3}, 张洁^{4,*}

¹ 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西西安 710000

² 中国石化石油工程技术研究院德州大陆架石油工程技术有限公司, 山东德州 253000

³ 西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西西安 710065

⁴ 西安石油大学陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室, 陕西西安 710065

摘要: 目前中国陆地平均钻井深度超过 3000 m, 具有低粘度、高切力、高动塑比、高抗温性的钻井液对深井和超深井十分关键, 低粘度的钻井液在循环过程中能够产生较小的摩擦阻力, 从而降低循环能耗和减小循环压力损失。同时钻井液需要较高的切力, 以便有效地清除岩屑和保持井壁稳定。低粘度高切力的钻井液能够在高温高压环境下保持稳定性, 且能够更快速地从井眼中排出, 降低钻井液对井壁的侵蚀和对地层的污染。针对以上要求, 国内外对低粘度、高切力环保型钻井液处理剂进行了广泛研究, 包括纳米颗粒、聚合物类、木质素纤维素类、盐等类型。本文对上述几种不同类型处理剂的研究现状进行分析对比, 其中纳米颗粒和木质素纤维素类最符合环保抗高温的要求, 并对纳米混合金属氢氧化物、多元正电胶代替膨润土应用于钻井液基浆及木质素纤维素的应用进行了展望。

关键词: 钻井液; 环保; 抗高温; 低粘; 高切力

DOI: 10.57237/j.mater.2023.03.002

Research Progress in Rheology Modifier for Oil and Gas Field Drilling Fluid

Wei Yan¹, Zhang Bowen^{2,3}, Zhang Jie^{4,*}

¹Changqing Drilling Company of CCDC, Xi'an 710000, China

²SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd, Dezhou 253000, China

³Shaanxi University Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry, Xi'an Shiyou University, Xi'an 170065, China

⁴Shaanxi Province Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Reservoir Protection Technology of Oilfields, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: At present, the average drilling depth on land in China is over 3000 m. Drilling fluid with low viscosity, high yield value, high ratio of dynamic shear force and high temperature resistance are very critical for deep and ultra-deep wells. Low viscosity drilling fluid can generate less frictional resistance during circulation, thus reducing circulation energy consumption and circulation pressure loss. At the same time, drilling fluid require high yield value to effectively remove rock chips and maintain well wall stability. Low viscosity and high yield value drilling fluid can maintain stability under high temperature and pressure, and can be discharged from the borehole more quickly, reducing the

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-05); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目 (21JY035).

*通信作者: 张洁, zhangjie@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-31; 接受日期: 2023-07-06; 在线出版日期: 2023-07-24

<http://www.materialsrd.com>

erosion of the drilling fluid on the well wall and contamination of the formation. In view of the above requirements, low viscosity, high yield value drilling fluid additives have been widely studied at home and abroad, including nanoparticles, polymers, lignocellulose, salt and other types. This paper analyzes and compares the research status of these different types of treatment agents. Nanoparticles and lignocellulose were the most suitable for environmental protection and high temperature resistance, and outlooks the research direction of nano-mixed metal hydroxide, multi-positive gel instead of bentonite in drilling fluid base slurry and lignocellulose.

Keywords: Drilling Fluid; Environmental Protection; High Temperature Resistance; Low Viscosity; High Yield Value

1 引言

随着钻井技术的不断提高,目前钻井液已经到达了很大的深度,根据中国石油天然气公布的数据,中国陆地平均钻井深度超过 3000 m [1],同时超过 5000 m 的井口数量也显著增加随着油气资源的逐步枯竭和技术难度的加大,未来油气勘探开发的主要方向将是深层、复杂油气藏的勘探开发,这将促进钻井深度的进一步提高。钻井液是制约钻井深度的重要因素,钻井液在钻井过程中十分关键,不仅可以作为润滑剂,还可以起到冷却、清洗井壁、支撑井壁,防止井壁塌陷等多种作用[2]。如果钻井液性能不佳,如润滑性能不足、清洗效果不好、支撑井壁能力弱等,就会导致井壁塌陷、卡钻、固井不牢等问题,严重的甚至会导致井口坍塌、事故发生。而钻井液的耐高温性能是制约钻井深度的重要因素之一,特别是在高温地区或高温井眼中,钻井液要经受高温高压环境的考验,如果钻井液不能很好地承受高温环境,就会导致液相变稠、失去润滑性能等问题,从而影响钻井深度和效率。因此,研发抗高温环保水基钻井液对于保障钻井质量和安全具有重要意义[3]。同时,传统的钻井液中含有大量的有毒有害物质,对环境造成严重污染,抗高温环保钻井液材料可以有效降低有毒有害物质的排放,保护环境有利于推进可持续发展。

具有低粘度、高切力、高动塑比、高抗温性的钻井液对深井和超深井十分关键[4],钻井液在循环过程中需要克服摩擦阻力和地层阻力,使其在井筒中形成一个稳定的循环体系。低粘度的钻井液在循环过程中能够产生较小的摩擦阻力,从而降低循环能耗和减小循环压力损失。同时钻井液需要较高的切力,以便有效地清除岩屑和保持井壁稳定。低粘度高切力的钻井液能够在高温高压环境下保持稳定性,且能够更快速地从井眼中排出,降低钻井液对井壁的侵蚀和对地层

的污染。在横向钻井中,钻井液需要具有良好的流变性和携带岩屑,以便有效地清除岩屑和维持井壁稳定。低粘度高切力的钻井液能够在横向井眼中保持流动性,同时也能够很好地控制井壁稳定性。总的来说,低粘度、高切力的钻井液具有流动性好、清洗性能好、稳定性好等特点,适用于各种复杂的钻井环境,对于提高钻井效率和成功率具有重要的意义。

2 抗高温环保低粘高切钻井液

2.1 技术要求

水基钻井液可以使用地表清水,相比较油基钻井液的成本更低。抗高温环保水基钻井液还可以降低钻井过程中的能耗和物料消耗,减少成本[5]。但是对于抗高温环保型钻井液有着一下的技术要求:

- (1) 环保性:当前抗高温环保钻井液的研发方向是低毒、低污染的水基钻井液,尽量减少对环境的影响,其要求如表 1 所示。
- (2) 抗高温性:主要通过添加抗高温剂、抗氧化剂、稳定剂等改性剂以增强钻井液的抗高温能力。
- (3) 流变性:钻井液在井下要满足一定的流变性能要求,如良好的泵送性、输送能力、持液能力等。因此,研发抗高温环保钻井液要兼顾其流变性能。
- (4) 稳定性:钻井液在井下要受到高压、高温、高剪切力等复杂的地层环境的影响,需要具有一定的稳定性。
- (5) 经济性:抗高温环保钻井液的研发应该不仅关注技术性能,还应注重经济效益,如降低成本、提高可靠性、延长使用寿命。

同时,在中国油气田面临着诸多的困难,中国的

油气井环境较恶劣，油气井普遍存在高温、高压、高硫、高盐等恶劣环境，这对水基钻井液的稳定性和性能提出了更高的要求。深井的钻井液成本较高，主要在于大多的抗高温环保型钻井液助剂需要进口，国内尚未形成完整的供应链和生产线，导致进口的原材料和设备价格较高。水基钻井液的技术难度较大水基钻井液在高温、高压、高盐环境下的表现更为复杂，其稳定性、性能和可靠性的保障需要具备较高的技术水平。且水基钻井液的整体研发周期较长，需要大量的

现场实验及现场应用[6]。

但是水基钻井液的优势明显大于其劣势，油基钻井液可能含有有毒有害物质，对环境和生态造成严重影响[7]。而水基钻井液具有可降解性和可回收性，可以有效减少对环境的影响。抗高温环保水基钻井液则可以进一步降低钻井过程对环境的影响。水基钻井液可以使用普通自来水，相比较油基钻井液的成本更低。抗高温环保水基钻井液还可以降低钻井过程中的能耗和物料消耗，减少成本。综合考虑，发展水基钻井液是最环保经济的钻井方式。

表 1 钻井液和钻屑排放浓度限值

排放污染物类型	污染参数	等级	排放值要求
水基钻井液和水基钻井液钻屑	含油量	一级	除渤海不得排放钻井油层钻屑和钻井油层钻井液外，其他一级海区要求含油量≤1%
		二级	≤3%
		三级	≤8%
	Hg（重晶石中最大值）	一级、二级、三级	≤1mg/kg
	Cd（重晶石中最大值）	一级、二级、三级	≤3mg/kg
非水基钻井液钻屑	含油量	一级	除渤海禁止排放非水基钻井液钻屑，其他一级海区要求含油量≤1%
		二级	≤3%
		三级	≤8%
	Hg（重晶石中最大值）	一级、二级、三级	≤1mg/kg
	Cd（重晶石中最大值）	一级、二级、三级	≤3mg/kg

2.2 国内外解决方案

针对水基钻井液在高温下粘度增加的问题，美国科学家 Daniel E. Giametta [8]和 George E. King 等，通过改变钻井液的组成和结构，在钻井液中加入氧化铝等颗粒物质可以增加钻井液的热稳定性和耐高温性能。美国科学家 Lundberg R D [9]以高温、高压、高盐度油藏为研究对象，研制出一种基于的钻井液该液体的主要成分为离子液体和氯化钾溶液，具有优异的高温稳定性和低毒性环保性能。瑞士科学家 Flavio Deflorian [10]研发出一种基于纳米技术的抗高温水基钻井液，其采用碳纳米管和硅纳米颗粒等纳米材料制备而成，具有优异的高温稳定性、低毒性、高效性能和环保性能。Thomas David [11]以天然黏土和植物纤维素为基础，通过改进天然黏土的结构和性能，利用植物纤维素增强其高温稳定性，制备出了一种环保、低毒性、高效的钻井液。

国内也有很多学者在抗高温环保钻井液处理剂上做出了，陈刚[12]等利用镁铝水滑石和纳米二氧化硅制备了一种高效降失水剂。张洁[13]等以木质素为研究对象研发了一种抗高温改性木质素处理剂。沈忠厚[14]等以超临界二氧化碳为研究对象，研究了具有良好高

温稳定性和环保性的超临界二氧化碳钻井液体系。杨志明[15]等研发出一种高温高压下具有优异性能的环保型钻井液。该钻井液通过添加纳米氧化铝和纳米氧化硅等纳米粒子，增强了其高温稳定性和流变性。

综上所述，国内外在解决抗高温水基环保钻井液处理剂的难题时，大多选用纳米颗粒及植物纤维素及木质素。

2.3 提切材料类型

低粘度高切力的钻井液具有流动性好、清洗性能好、稳定性好等特点，适用于各种复杂的钻井环境，特别是在超深井及水平钻井过程中，钻井液需要具有良好的流变性和悬浮性，以便有效地清除岩屑和维持井壁稳定。低粘度高切力的钻井液能够在横向井眼中保持流动性，同时也能够很好地控制井壁稳定。目前所应用的钻井液材料主要有以下几种：

- (1) 聚合物类[16]，目前常用的具有低粘度高切力的钻井液聚合物材料主要有，羧甲基纤维素（CMC）、硫酸盐型聚丙烯酰胺（HPAM）、氢化淀粉等。聚合物类材料具有抗高盐、加量低，抗温极限位于 150℃-180℃，对环境友好等优势。但聚合物类同时存在溶解度差，且性

能单一需要配合其他处理剂共同使用，在 180 ℃ 上聚合物会发生降解和失效影响钻井效率。

- (2) 木质素纤维素类[17]，木质素纤维素是天然植物材料，不含有害化学物质，符合环保要求，木质素纤维素来源广泛，可通过植物材料的再生利用得到。木质素纤维素的的生产成本相对较低，可大规模应用于钻井液领域，木质素纤维素具有较好的抗高温性能，能够适应高温下的作业环境。但木质素纤维素的物理性质和化学性质较为复杂，需要通过特殊的处理工艺才能制备成为适用于钻井液的材料，处理难度较大。
- (3) 纳米颗粒[18]，常用的纳米颗粒有纳米氧化铝、纳米硅粉、纳米正电胶和纳米黏土，纳米颗粒

具有具有较小的粒径和高比表面积，因此在钻井液中的分散性好，可提高流变性能，同时具有较高的热稳定性和抗盐性能，适用于高温高压井下环境。可以根据需要进行表面修饰，调节微球的亲水性或疏水性，以实现所需的物理和化学性质。但纳米微球的生产成本高，生产工艺复杂，导致其难以大规模应用。

- (4) 其他处理剂[19]，如表 2 所示，如钠、钾和钙等盐都可以用于低粘度高切力钻井液；常用的阴离子表面活性剂有十二烷基苯磺酸钠（SDBS）和十二烷基硫酸钠（SDS）等可以降低钻井液的表面张力，从而提高其渗透性和切变应力；乙酸和甲酸等有机酸可以增加钻井液的酸度，从而降低其黏度和表面张力。

表 2 钻井液生物毒性测试表

处理剂及代号	质量分数/%	EC ₅₀ /(mg/L)	毒性等级
包被剂 PAC141	0.5	>10000	无毒
强力包被剂 HXB-1	0.3	>8000	低毒
大分子包被剂 HB-1	0.3	32000	无毒
强力包被剂 FA-367	1	>50000	无毒
黄原胶 XC	0.6	>100000	无毒
改性淀粉 DFD	1.5	>200000	无毒
改性淀粉 LYS	1.5	163000	无毒
改性淀粉 FL-W20	0.4	201000	无毒
酯基润滑剂	3	>7000	低毒
无荧光润滑剂 HFT-1	0.3	>20000	无毒
铁铬盐 FLCS	1	<100	高毒
磺化腐植酸铬 SPC	2	>4000	低毒
流型调节剂 80A51	1	>300000	无毒
阳离子磺甲基酚醛树脂 SPNP	0.5	>100000	无毒
聚合醇 PGCS-1	5	>70000	无毒
增粘剂 PMNK	1	>30000	无毒
高温增粘剂 LYZN	0.5	37000	无毒
降滤失剂 JT-888	1	196000	无毒
增粘降失水剂 HBJ-2	0.5	>30000	无毒
降滤失剂 YN-1	0.5	>76000	无毒
聚丙烯酸钾 KPAM	0.5	>50000	无毒
磺化沥青 SAS	3	>8000	低毒
无荧光沥青 NFX-25	1.5	>8000	低毒

综上所述，聚合物类钻井液处理剂虽然性能不错，但是抗温性不够好，且不够环保。其他类型的处理剂也不符合环保的要求。但纳米颗粒可以在 180 ℃ 以上

的温度使用，同时纤维素和木质素成本低，环保性强。

3 抗高温环保低粘高切钻井液用材料

3.1 纳米混合金属氢氧化物

混合金属氢氧化物 (MMH)，又被称作混合金属羧基盐，在中国的油气田领域内又被称作正电胶。20 世纪 80 年代，首次被 Burba [20] 等人提出将 MMH 用于钻井液抑制剂，MMH 和钻井液泥浆结合会形成抑制性很强的钻井液体系。它是由八面体堆叠组层的层状或三围网状结构，其结构如图 1 所示。

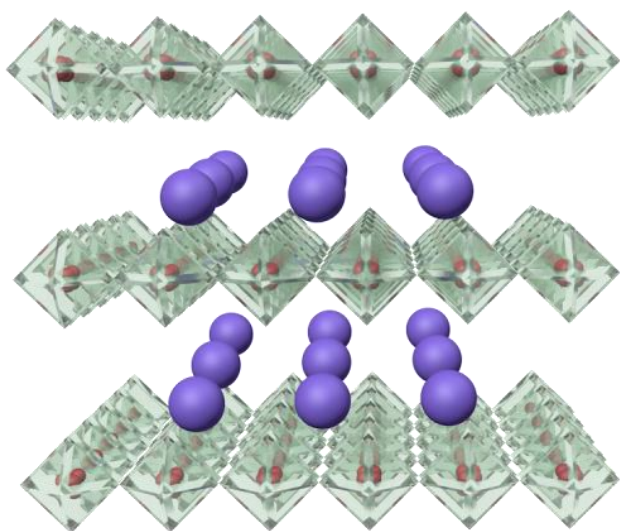


图 1 MMH 晶体图

水溶性过渡金属盐催化剂一般是金属、金属氧化物、金属盐，在实际应用中大部分以溶液形式注入地下油层，而水溶性过渡金属盐催化剂本身带有极性，很难溶于非极性油藏，导致在反应过程中只在油水交界面发生部分非均相反应，大大降低催化剂的催化效率；另外过渡金属盐（如氯化铁、氯化镍、硝酸钴等）在水中易受到水质尤其是 pH 值的影响，而油田注入水一般为中性至弱碱性，在此 pH 值范围内这些金属离子容易形成沉淀而起不到催化作用。

MMH 的晶体结构中，层状结构的通过氢键和离子键相互作用堆积形成晶体，层与层之间的空隙可以容纳水分子和其他分子。这种层状结构能够在高温下保持稳定，且具有很好的热稳定性，可以抵抗高温环境下的物理化学变化。MMH 具有较强的离子交换能力，混合金属氢氧化物中的金属离子能够与其他离子（如钾离子、钠离子等）发生交换作用，使其表面带有较

强的正电荷，在粘土层中会紧紧的吸附在粘土层的表面，拉近粘土的层状结构减少水分子的进入。混合金属氢氧化物表面具有较大的比表面积和一定的孔隙结构，可对钻井液中的有机物质和重金属离子等进行吸附和去除，从而减少钻井液中的污染物质含量[21]。

目前的混合金属氢氧化物多为镁铝金属构成，王伟[22]等对镁铝金属的比例进行研究，随着镁铝的比例增加，MMH 的性能逐渐变好，且 MMH 在 180 ℃ 老化 16 h 后仍保持稳定。但对于多元金属对钻井液抑制性的研究还不完善，多元金属氢氧化物 (M-MMH) 通常具有更复杂的晶体结构，因为它们包含多种金属离子和氧化物离子。这些离子可以在不同的位置上排列，形成多种结构，从而导致更复杂的物理和化学性质。多元金属氢氧化物具有较高的稳定性，能够在较宽的 pH 范围内保持稳定，而两元金属氢氧化物则易受到环境的影响而失去稳定性。多元金属氢氧化物在物理化学性质上具有更好的表现，如更高的热稳定性、化学稳定性和抗氧化性能，能够更好地适应高温、高压和极端环境下的钻井作业。

但多元金属氢氧化物和两元金属氢氧化物都存在分散性差的缺点，而纳米颗粒是一种分散性很好的材料，把多元金属氢氧化物制备为纳米颗粒存在着诸多优势[23]。

- (1) 更好的分散性：纳米级的多元金属氢氧化物可以更好的在水中均匀分散，很好的避免了团聚导致的沉淀。
- (2) 更强的稳定性：纳米级的多元金属氢氧化物颗粒较为均，表面较为平滑，在高温高压下不容易发生物理化学变化。
- (3) 更大的比表面积：纳米级的多元金属氢氧化物粒径较小，比表面积更大，更容易与粘土层接触，从而具有更好的抑制性。

3.2 多元正电胶代替膨润土应用于钻井液基浆

膨润土主要由蒙脱石构成，是油田应用最广泛的水基钻井液基浆，蒙脱石由两个硅氧四面体和一个铝氧八面体组成，具有很好的水化膨胀能力，在水中膨润土的层间距离由 0.96 nm 上升至 4.0 nm，它的良好膨胀性使得泥浆构成了一种较为稳定的胶体[24]。但是膨润土的抗温极限在 150 ℃-200 ℃，所以膨润土成为了

限制提高水基钻井液抗温极限的重要因素。多元正电胶的抗温性可达 220 ℃-250 ℃, 且正电胶具有独特的流变性, 具有低粘度、高切力的特点[25]。韩书华[26]等人发现镁铝正电胶在高温高压的条件下有很好的稳定性和降失水性, 并可以有效的降低钻井液的粘度。正电胶的胶体性能良好, 可以形成坚实的壁膜, 能够有效地控制井壁稳定性, 减少钻头的磨损和井壁塌陷等问题。降低井壁与地层的接触带宽度, 提高钻井液的回收率, 减少钻井液的损失, 降低环境污染风险。

3.3 木质素纤维素的应用

木质素、纤维素[27-30]是一种来源广泛且可再生

的生物质材料, 由木素、纤维素和半纤维素组成。在钻井液中, 木质素纤维素作为一种新型的可再生生物质材料被广泛研究, 其应用主要有以下两个方面:

(1)作为钻井液中的填充剂和增稠剂, 木质素纤维素可以通过化学处理、机械处理等方法制备为纳米级的纤维素, 用作钻井液中的填充剂和增稠剂。其处理方式如图 2 所示。研究表明, 添加木质素纤维素可以有效地提高钻井液的粘度、稳定性和流变性能, 从而提高钻井液的性能和钻井效率。同时, 由于木质素纤维素是天然可再生的生物质材料, 其应用还可以减少环境污染和资源浪费。

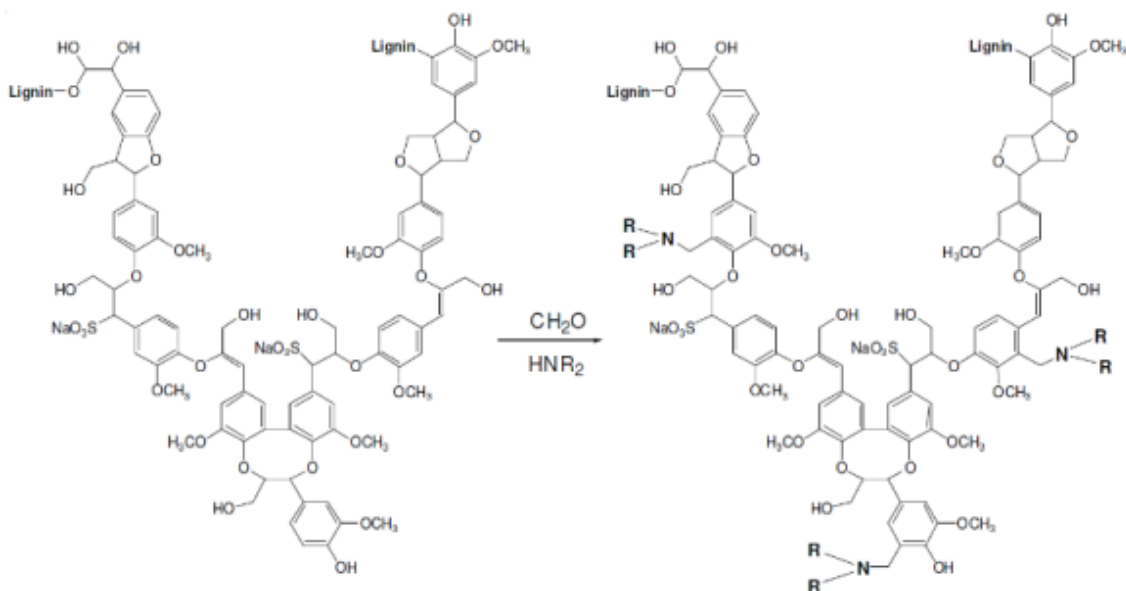


图 2 木质素改性

(2)作为环保钻井液的替代品, 由于传统的钻井液中常常含有一些对环境有害的化学物质, 例如苯、甲苯等有机溶剂, 以及重金属离子等物质, 这些物质可能对环境 and 人体健康造成不良影响。而木质素纤维素是一种天然的可再生材料, 其在钻井液中的应用可以减少有害化学物质的排放和对环境的污染, 因此被认为是一种环保的替代品。

目前, 木质素纤维素在钻井液领域的应用研究正在不断深入, 已经有很多研究表明其在钻井液中的应用具有很大的潜力。例如, 有研究报道采用木质素纤维素作为钻井液中的填充剂可以显著提高钻井液的粘度和流变性能; 另外还有研究利用木质素纤维素与其他材料复合制备了具有良好流变性能和抗温性能的新型环保钻井液。

4 结论

目前符合低粘度高切力的抗高温环保钻井液处理剂的种类主要为纳米颗粒、聚合物类、木质素纤维素类、盐等类型。其中纳米颗粒和木质素纤维素类最符合环保抗高温的要求, 并可以满足低粘度、高切力的钻井液性能要求, 且纳米颗粒可以在 180 ℃ 以上使用, 具有极强的稳定性, 同时木质素纤维素由于其低廉成本也建议应用于钻井液体系中。

致谢

本文为中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆

钻井总公司“高性能润滑剂和提切剂的研制与试验”的阶段成果之一。

参考文献

- [1] 王中华. 国内钻井液技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2023, 1-16.
- [2] 田文欣, 俞浩杰. 页岩储层高性能环保型水基钻井液体系及其环境影响评价 [J]. 断块油气田, 2023, 30 (1): 38-43.
- [3] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42 (12): 82-94.
- [4] 张雁, 屈沅治, 张志磊, 等. 超高温水基钻井液技术研究现状及发展方向 [J]. 油田化学, 2022, 39 (3): 540-547.
- [5] 陈智晖, 夏海英, 李洪波, 等. 水基钻井液环境友好性评价标准研究及应用 [J]. 广东化工, 2022, 49 (15): 56-58.
- [6] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望 [J]. 天然气工业, 2021, 41 (8): 163-177.
- [7] 吴彬, 向兴金, 张岩, 等. 深水低温条件下水基钻井液的流变性研究 [J]. 钻井液与完井液, 2006 (3): 12-13+19+82.
- [8] O'Brien D E, Martin E C. Stabilizing Sensitive Shales With Inhibited Potassium-Based Drilling Fluids [J]. J Pet Technol, 1973, 1089-1100.
- [9] Apos B. Stabilizing Sensitive Shales With Inhibited, Potassium-Based Drilling Fluids [J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25 (09), 1089-1100.
- [10] Du W C, Wang X Y, Shan W J, et al. Synthesis performance and inhibition mechanism of modified peanut shell nanocellulose as shale hydration inhibitor [J]. Polymer Bulletin, 2023, 80 (1), 263-277.
- [11] Lundberg. Ionomer Applications Including Ionic Elastomers and Polymer/Fluid Additives [J]. Structure and Properties of Ionomers, 1987, 429-438.
- [12] Thomas. Thermal Stability of Starch- and Carboxymethyl Cellulose-Based Polymers Used in Drilling Fluids [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982, 22 (02), 171-180.
- [13] 陈刚, 蔡丹, 张洁, 等. 羧酸多胺盐型黏土膨胀抑制剂制备与性能研究 [J]. 天然气与石油, 2014, 32 (2): 68-72+1.
- [14] Zhong H S, Wang H Z, Li G S. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (06), 743-747.
- [15] 杨志明. 钻井液在非开挖中的常规使用 [J]. 新疆有色金属, 2010, 33 (5): 31-32.
- [16] 周大宇. 聚合物钻井液的发展情况研究 [J]. 西部探矿工程, 2022, 34 (4): 91-92.
- [17] 胡伟民. 淀粉/木质素类钻井液高温处理剂的研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- [18] 刘振东, 贺伦俊, 李卉, 等. 钻井液纳米颗粒封堵性评价方法研究 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36 (02): 214-217.
- [19] 徐志勇. 高性能水基钻井液技术研究进展 [J]. 西部探矿工程, 2022, 34 (5): 76-77+79.
- [20] Burba J L, Holman W E, Crabb C R. Laboratory and field evaluations of novel inorganic drilling fluid additive, SPE 17198, the international association of drilling contractors the society of petroleum engineers (IADC SPE) drilling conference held in dallas, Texas, Feb. March 28, 1988.
- [21] 孙德军. Al-Mg MMH 溶胶和钠土悬浮体的相互作用机理 [J]. 高等学校化学学报, 1996, 17 (9): 1428~1432.
- [22] 卫伟. 无机钻井液材料温度响应与机理研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [23] 侯万国, 孙德军, 宋淑娥, 等. 氢氧化铝镁正电溶胶化学组成分析 [J]. 钻井液与完井液, 1995, 14 (6): 10-13.
- [24] 侯万国, 张春光, 孙德军, 等. 氢氧化铝镁正电溶胶制备及性能研究 [J]. 高等学校化学学报, 1995, 15 (8): 1292-1294.
- [25] 李发炎, 胡章文, 刘俊. 共沉淀法制备镁铝双金属氢氧化物及表征 [J]. 轻金属, 2013, 18 (6): 15-17.
- [26] 韩书华, 张春光, 侯万国, 等. 镁铝氢氧化物正电溶胶结构研究 [J]. 高等学校化学学报, 1996, 17 (11): 1785-1787.
- [27] 陈刚, 张洁, 张黎, 等. 聚糖-木质素钻井液处理剂作用效能评价 [J]. 油田化学, 2011, 28 (1): 4-8.
- [28] 张洁, 杨乃旺, 陈刚, 等. 钻井液处理剂氧化氨解木质素制备及性能评价 [J]. 石油钻采工艺, 2011, 33 (02): 46-50.
- [29] 张洁, 李忠正. SFP 木质素在钻井液中的作用效能 [J]. 纤维素科学与技术, 1997 (1): 48-53.
- [30] 张洁. 木质素钻井液添加剂 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 1990 (03): 60-64.