文章编号:1000-4092(2021)03-381-07

表面具有不同官能团的可分散二氧化硅纳米微粒对钻井液滤失性能的影响*

田 晓,周长华,杨广彬,宋宁宁,张治军,张晟卯

(河南大学纳米材料工程研究中心,河南 开封 475004)

摘要:目前不同类型的硅烷偶联剂改性纳米二氧化硅在水基钻井液中的降滤失性研究尚不十分充分,其与商用降滤失剂的配伍性也有待进一步研究。因此,本文通过API滤失实验分别研究了带有氨基、双键和环氧基团的纳米二氧化硅(分别记作SiO_2-A、SiO_2-D和SiO_2-E)与商用降滤失剂(酚醛树脂、磺化沥青、低黏度CMC和腐殖酸钾)复配后对水基钻井液滤失量的影响及它们的配伍性。借助红外光谱仪、透射电子显微镜和接触角测量仪分别研究了3种表面修饰剂的分子结构、二氧化硅纳米微粒的形貌及纳米微粒的亲/疏水性能。研究结果表明,SiO_2-D与低黏度CMC和腐殖酸钾分别按质量比2∶1和1∶1复配后钻井液滤失量较单独使用商用降滤失剂分别减少41%和29%。180 ℃老化后,SiO_2-D与腐殖酸钾之间仍具有较好的配伍性,其滤失量与单独使用腐殖酸钾相比减少28%。SiO_2-D与腐殖酸钾之间较好配伍性的原因在于腐殖酸钾含有的极性基团(如—OH、—OCH_3、=CO等)能与SiO_2-D表面的羟基进行氢键吸附,能够较好地稳定钻井液黏度,合理保持钻井液中固相粒子的粒径分布,在滤失过程中形成薄而致密的泥饼,从而有效地控制钻井液的API滤失量。图24表2参30

关键词:纳米二氧化硅;商用降滤失剂;配伍性;水基钻井液;滤失量

中图分类号:TE254 **文献标识码**:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.03.001

0 前言

近年来,全球油气资源的消耗呈上升态势[1],浅部地层油气资源日益枯竭而使油气勘探逐步向深部地层和海上发展[2]。随着钻井难度的不断增加,人们对钻井液处理剂提出了更高的要求以符合油气资源的开采。目前,钻井液主要以水基钻井液和油基钻井液为主[3]。油基钻井液因具有优异的流变性和热稳定性被广泛应用[4]。然而,随着人们对环境问题越来越重视,油基钻井液的毒性且在高温高压条件下乳液稳定性较差的问题使其应用受到限制[5-6]。水基钻井液因低成本、低活性、无腐蚀性和耐盐耐高温的优点被广泛应用于水平井和长水平井段油气资源的勘探[7-8]。钻井过程中滤失量过大的危害有:(1)容易引起页岩的膨胀和坍塌,造成井壁失稳;(2)钻井液和滤液侵入地层,引起黏土膨胀,堵塞地层油气流通道,损害地层;(3)滤饼增厚,造成钻具扭矩大、起钻抽汲、下钻遇阻、固井质量差等问题[9-10]。降滤失剂作为水基钻井液最为重要的处理剂之一,在钻井液中用量较多且有至关重要的作用[11-12],其作用主要包括护胶、提高滤液黏度、增加钻井液中黏土颗粒的水化程度等[13]。目前,水基

* **收稿日期**:2019-12-26;**修回日期**:2020-06-15。

基金项目:河南省高等学校重点科研项目"温敏型纳米SiO_2的制备及其在油基钻井液中的流变性能研究"(项目编号 20A150003),河南省高校科技创新团队支持计划"纳米润滑材料规模化生产及应用技术"(项目编号 19IRTSTHN024)。

作者简介:田晓(1993—),女,河南大学物理化学专业硕士(2017),主要从事提高水基钻井液降滤失性与润滑性研究工作,E-mail:980113613@qq.com。张晟卯(1975—),男,教授,博士生导师,中科院兰州化学物理研究所物理化学专业博士(2005),主要从事纳米材料的规模化制备及其在钻井液和摩擦学中应用研究,通讯地址:475004 河南省开封市龙亭区河南大学纳米材料工程研究中心,电话:0371-25152077,E-mail:zsm@henu.edu.com。

钻井液中常用的降滤失剂包括纤维素类、腐殖酸类、淀粉类、树脂类、聚合物类、纳米材料等[7, 14-16]。纳米材料因具有表面活性高和颗粒尺寸小等特性被用于提高钻井液性能，如改善稳定性、调节流变性、降低滤失量等[17]。

纳米二氧化硅具有无毒、无污染、与膨润土成分相匹配、热稳定性高等特点，可用于提高钻井液的黏度，从而有效降低钻井液的滤失量。纳米二氧化硅也可以用作页岩抑制剂，是目前应用最广泛的无机纳米材料之一[18-19]。Ghanbari 等采用溶胶凝胶法制备了粒径为 10 nm 的二氧化硅，将其加入水基钻井液中后滤失量相比基浆减少 47%[20]。Yusof 等研究发现向水基钻井液中加入质量分数为 20%、粒径为 10～20 nm 的二氧化硅，232 ℃下的 API 滤失量可降低 30%[21]。然而，未改性的纳米二氧化硅粒子由于比表面积大，易出现分散性不佳和团聚等现象，在钻井液中难以均匀分散，从而会影响材料的性能[22-24]。因此，研究者致力于对纳米二氧化硅进行表面改性以改善其在钻井液中的分散性。目前，对于纳米二氧化硅的改性方法主要有偶联剂改性法、有机聚合物法等。毛惠等将丙烯酰胺、马来酸酐和 *N*,*N*-二甲基丙烯酰胺与纳米二氧化硅进行聚合制备了一种具有核壳结构的有机-无机复合材料[25]。当加量为 0.5%时，180 ℃钻井液的滤失量较基浆的减少了 79%。徐建根等采用 *γ*-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷（KH-570）对纳米二氧化硅进行改性以改善其分散稳定性，进而与丙烯酰胺、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸、马来酸酐和苯乙烯发生聚合反应制备了一种疏水性的聚合物基二氧化硅纳米复合材料，加量为 2.0%时，120 ℃时钻井液的滤失量较未添加时减少了 21%[26]。徐琳等采用 KH-550 对二氧化硅纳米微粒进行预处理，再与丙烯酸甲酯和乙二胺单体进行聚合制备了超支化聚合物修饰的纳米二氧化硅，加量为 5%时，在 120 ℃时钻井液的滤失量比基浆的减少了 64%[27]。目前对不同类型的硅烷偶联剂改性纳米二氧化硅在水基钻井液中的降滤失性研究尚不十分充分，其与商用降滤失剂的配伍性也有待进一步研究。因此，本文将分别用硅烷偶联剂 KH-550、KH-570 和 KH-560 改性的分别带有氨基、双键和环氧基团的纳米二氧化硅（分别记为 SiO_2-A、SiO_2-D 和 SiO_2-E）与商用降滤失剂（如腐殖酸钾、低黏度 CMC、磺化沥青、酚醛树脂等）进行复配，研究了它们在室温及高温老化后对水基钻井液滤失量的影响；并通过研究纳米二氧化硅与商用降滤失剂复配后滤饼的微观形貌，进一步揭示了两者在降滤失方面的协同作用。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

钠基-膨润土，过粒径小于 200 目的筛子，浙江临安膨润土化工材料有限公司；羧甲基纤维素钠、无水碳酸钠，天津市科密欧化学试剂有限公司；酚醛树脂 SMP-2、低黏度 CMC（Lv-CMC）、磺化沥青，河南濮阳中原油田钻井三公司；腐殖酸钾，山东圣煌化工产品有限责任公司；蒸馏水，实验室自制。改性纳米二氧化硅 SiO_2-A、SiO_2-D 和 SiO_2-E，河南河大纳米材料工程研究中心有限公司，产品参数如表 1 所示。

Nicolet Avatar360 型傅里叶红外光谱仪，美国 Nicolet 设备有限公司；JEM-2100 型透射电子显微镜，日本电子株式会社；DSA100S 型全自动折叠光路接触角测量仪，德国 Krüss 公司；Carl Zeiss 型场发射扫描电镜，德国蔡司公司；GJSS-B12K2 型高速变频无级调速搅拌机，山东同春石油仪器有限公司；XGRL-7 型高温滚子加热炉，青岛森欣机电设备有限公司；SD3/B 型中温中压滤失仪，青岛创梦仪器有限公司。

表 1 3 种纳米二氧化硅的基本参数

改性纳米二氧化硅	表面修饰剂	表观密度/（g·mL^{-1}）	水分含量/%	灼烧含量（950 ℃）/%	羟基数目/（10^{17}个·m^{-2}）	吸油值/（mL·g^{-1}）	比表面积/（m^2·g^{-1}）
SiO_2-A	KH-550	0.26	1.75	12.78	2.93	2.26	302
SiO_2-D	KH-570	0.28	1.70	15.42	5.87	2.19	123
SiO_2-E	KH-560	0.12	0	11.92	2.95	2.57	271

1.2　实验方法

采用傅里叶红外光谱仪对 SiO_2-A、SiO_2-D、SiO_2-E进行红外光谱表征。

采用透射电子显微镜(TEM)对纳米二氧化硅进行形貌和粒径表征。

采用全自动折叠光路接触角测量仪测试不同类型纳米二氧化硅微粒的亲/疏水性能。具体步骤如下:将1 g的纳米二氧化硅分散于19 g的无水乙醇中超声30 min,将干净的载玻片放入分散液10 s后匀速拿出,使乙醇蒸发掉,重复操作5次,将涂覆有不同样品的载玻片进行水相接触角测试。

采用场发射扫描电镜(SEM)对滤饼进行微观形貌分析,在测试之前滤饼需在空气中干燥24 h以挥发水分并进行喷金处理。

1.3　钻井液的制备及性能测试

1.3.1　钻井液的配制

将400.0 g蒸馏水、16.0 g钠基膨润土、2.0 g碳酸钠和0.4 g羧甲基纤维素钠均匀混合制得基浆[28],然后将不同质量分数的降滤失剂加入基浆中,用高速变频无级调速搅拌机搅拌30 min,再在室温下养护24 h,制得钻井液。

1.3.2　钻井液体系的滤失量测试

参照美国石油学会钻井液室内试验标准测定钻井液的滤失量。将上述样品放入高温滚子加热炉中,分别在室温、180 ℃、200 ℃和230 ℃老化16 h;然后在室温、0.69 MPa压力下采用中温中压滤失仪测试其老化后的滤失量,测试时间为30 min,测试重复3次取平均值。

2　结果与讨论

2.1　改性纳米二氧化硅的结构分析

2.1.1　红外光谱分析

SiO_2-A、SiO_2-D、SiO_2-E的红外光谱图如图1所示。对于未修饰的二氧化硅与本文采用的3种改性纳米二氧化硅,在3390 cm^{-1}左右为水的—OH伸缩振动吸收峰;1634 cm^{-1}左右为表面吸附水的H—O—H弯曲振动吸收峰;1100、800和470 cm^{-1}左右分别对应Si—O—Si的反对称伸缩振动吸收峰、对称伸缩振动吸收峰和弯曲振动吸收峰[29]。对于SiO_2-A,798 cm^{-1}处出现了N—H键的弯曲振动吸收峰。对于SiO_2-D,在1722 cm^{-1}出现了羰基的伸缩振动吸收峰,在1635 cm^{-1}处的峰属于表面吸附水H—O—H的弯曲振动峰,双键的振动吸收与此重叠。对于SiO_2-E,在911 cm^{-1}处出现了环氧基的振动峰,在1261 cm^{-1}处出现了C—O—C键的吸收峰。

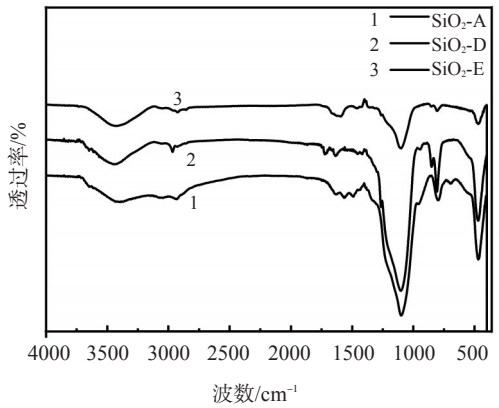


图1　不同官能团的纳米二氧化硅的红外光谱图

2.1.2　粒径分析

图2为改性纳米二氧化硅分散于乙醇中的TEM图。由图2可知,SiO_2-A的平均粒径为28 nm;SiO_2-D和SiO_2-E的粒径相对较小,平均粒径分别为7 nm和6 nm。

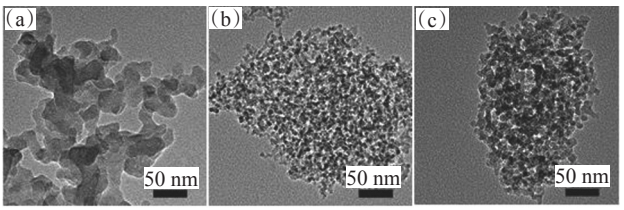


图2　SiO_2-A(a)、SiO_2-D(b)和SiO_2-E(c)的TEM图

2.1.3　亲/疏水性分析

经测试,水在SiO_2-A、SiO_2-D、SiO_2-E表面的接触角分别为6.03°、132.8°和161.9°,这说明SiO_2-A的亲水性最强,SiO_2-D次之,SiO_2-E最差。适当的疏水性可使材料对水的亲和力减弱,有利于减少对水的吸附,从而减少钻井液在钻井过程中的滤失量。

2.2　不同改性纳米二氧化硅的降滤失性能

分别将不同质量分数的改性纳米二氧化硅加入基浆中,并测试其API滤失量,结果见图3。从图3可以看出,SiO_2-A的最佳加量为0.05%,在该加量下滤失量较基浆的减少12%;但当SiO_2-A加量为5.0%时,钻井液的滤失量骤增至122.33 mL。图3显示SiO_2-D加量为5%时滤失量最小,相对基浆可减

少14%。当加量为5.0%时，SiO_2-E在水基钻井液中的滤失量最小，相对基浆可减少12%。基于以上结果可知，SiO_2-D在基浆中降滤失作用相比其它两种纳米二氧化硅更加明显。可能的原因在于SiO_2-A中氨基为亲水性基团，对水的亲和力强，使得SiO_2-A在钻井液中无法达到降滤失的效果，不利于钻井工作的进行。SiO_2-E中环氧基团为疏水性基团，使其难于分散于水基钻井液中，使得钻井液性能降低。SiO_2-D降滤失性相对较好的原因主要包括两点：(1) SiO_2-D的疏水性介于SiO_2-A和SiO_2-E之间，使其在水基钻井液中不仅分散性良好且能起到堵漏的效果；(2)相比其它两种二氧化硅，SiO_2-D表面含有最多的羟基数目，其通过生成更多的氢键与黏土相互作用，在钻井过程中阻止了更多的自由水向地层渗透。

2.3 改性纳米二氧化硅与商用降滤失剂复配后对钻井液滤失量的影响

目前，钻井过程中常用的商用降滤失剂主要有磺化沥青、Lv-CMC、SMP-2和腐殖酸钾等。首先将不同质量分数的4种商用降滤失剂加入基浆中，评价降滤失剂加量对钻井液滤失量的影响，结果见图4。从图4可以看出，磺化沥青、Lv-CMC、SMP-2和腐殖酸钾的最佳加量分别为1%、5%、3%和5%，对应的钻井液的API滤失量降低率依次为40%、68%、52%、63%。

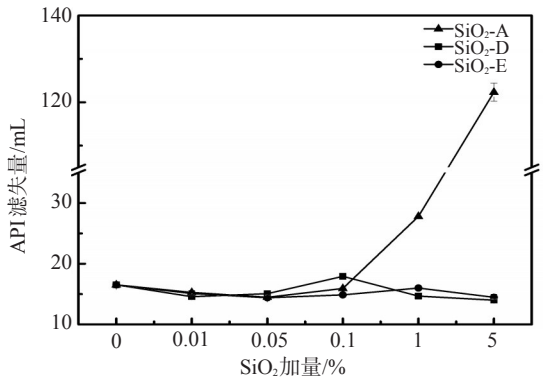


图3 不同官能团的纳米二氧化硅在钻井液中的API滤失量

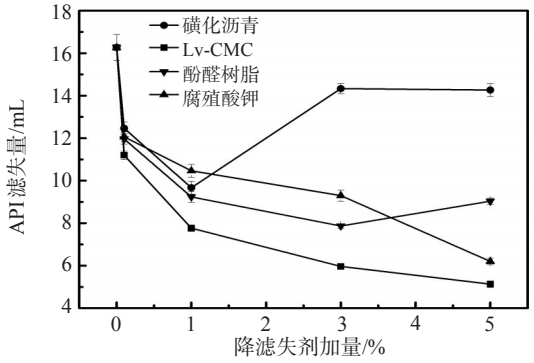


图4 降滤失剂加量对钻井液API滤失量的影响

不同类型的二氧化硅与商用降滤失剂复配后钻井液滤失量的变化如图5所示。3种类型的二氧化硅与磺化沥青复配后，钻井液的滤失量均比单独使用磺化沥青时的有所增加。SiO_2-A、SiO_2-E与

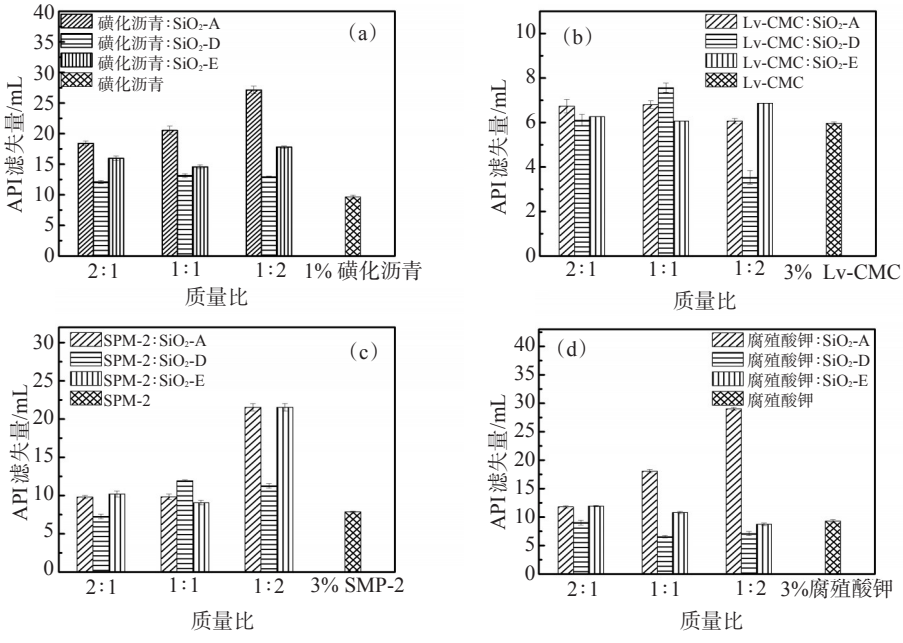


图5 3种不同官能团的纳米二氧化硅与不同商用降滤失剂复配后钻井液的API滤失量

Lv-CMC 复配后,钻井液的滤失量较单独使用 Lv-CMC 有所增加,而 SiO_2-D 与 Lv-CMC 有较好的配伍性,钻井液的滤失量较单独使用 Lv-CMC 时减少 41%。其原因有三方面:(1)SiO_2-D 的溶液呈碱性,促使羟基络离子进一步通过水解和羟桥作用产生多核羟桥络离子;(2)SiO_2-D 与 Lv-CMC 含有的甙键和羟基形成氢键吸附;(3)SiO_2-D 的比表面积比其他两种纳米二氧化硅的大。SMP-2 与 SiO_2-D 复配比为 2∶1 时,钻井液的滤失量比单独使用 SMP-2 时降低 9%,其余两种纳米二氧化硅与 SMP-2 复配使用时钻井液的滤失量均有所增加;腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配比为 1∶1 时,钻井液的滤失量比单独使用腐殖酸钾时减少 29%,腐殖酸钾与 SiO_2-E 复配为 1∶2 时,钻井液的滤失量较单独使用腐殖酸钾时减少 6%,但加入 SiO_2-A 后钻井液的滤失量有所增加。SiO_2-D 与腐殖酸钾有较好的配伍性,原因在于腐殖酸钾含有的极性基团如—OH、—OCH_3、=CO 等能与 SiO_2-D 表面的羟基形成氢键,吸附于黏土表面进一步减少钻井液的滤失量。

2.4　高温老化对复配钻井液滤失性的影响

通过以上研究,我们发现 SiO_2-D 与腐殖酸钾、Lv-CMC 的最佳质量比分别为 1∶1 和 2∶1。因此,进一步评价了它们在高温老化后的 API 滤失量。首先,测试了 180 ℃老化后 SiO_2-D 对两种商用降滤失剂滤失量的影响,结果如表 2 所示。腐殖酸钾与 SiO_2-D 质量比为 1∶1 时,滤失量比单独使用腐殖酸钾减少 28%;Lv-CMC 与 SiO_2-D 质量比为 1∶2 时,滤失量较单独使用 Lv-CMC 滤失量有所增加。由于 SiO_2-D 与腐殖酸钾复配体系在 180 ℃老化后降滤失效果仍然较为明显,进而将老化温度提高至 200 ℃并评价其滤失量。200 ℃老化后复配钻井液的滤失量与 180 ℃老化后相差不大。因此,进一步测试了钻井液在 230 ℃老化后的滤失量变化。在此温度下,复配钻井液滤失量比 180 ℃老化后增加了约 3.5 倍,推测其原因在于高温下 SiO_2-D 与腐殖酸钾之间的氢键发生断裂而使滤失量明显增加。

表 2　含 SiO_2-D 与商用降滤失剂的钻井液在不同温度老化后的 API 滤失量

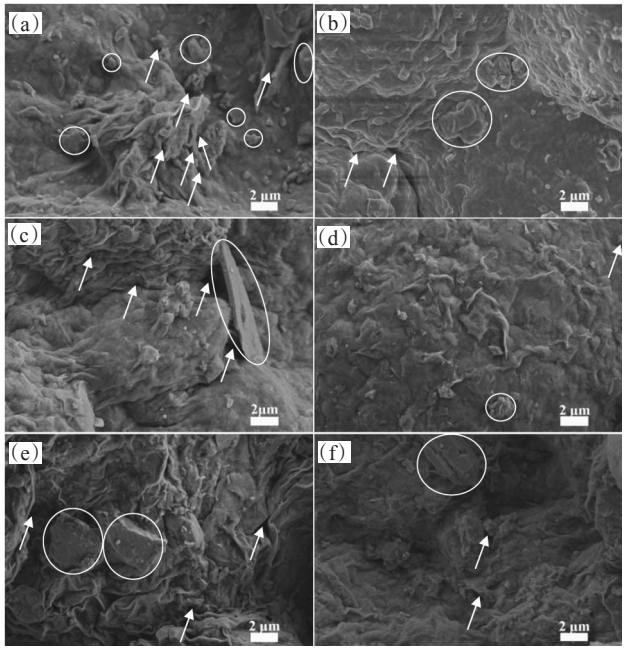
降滤失剂	不同温度下的滤失量/mL		
	180	200	230
空白	42.0	44.9	47.4
腐殖酸钾	16.2	14.9	21.4
Lv-CMC	31.5	/	/
腐殖酸钾∶SiO_2-D=1∶1	11.7	15.7	40.8
Lv-CMC∶SiO_2-D=1∶2	82.7	/	/

2.5　滤饼微观形貌分析

钻井过程中影响钻井液降滤失性能的主要因素包括滤失量和滤失过程中形成滤饼的质量。滤饼质量是钻井液体系滤失量的决定因素,质量好的滤饼一般具有薄且致密、紧实等特性,其通过阻滞滤液向地层渗透来控制体系的滤失量。因此,研究滤失过程中形成的滤饼形貌是分析降滤失剂作用机理的主要途径之一。

2.5.1　降滤失剂对钻井液基浆滤饼微观形貌的影响

加有不同降滤剂的钻井液所形成滤饼的微观形貌如图 6 所示,其中黏土颗粒的聚结在图中用圆圈圈出,孔隙及微裂缝用箭头指出。基浆的滤饼(图 6(a))的表面粗糙、有黏土颗粒的聚结,且含有较大孔隙,导致钻井过程中滤失量过大;从图 6(b)、6(c)可以看出,分别加入 SiO_2-D 和 Lv-CMC 时,滤饼表面的孔隙变少且聚结程度减小,但仍有少量孔隙存在;SiO_2-D 与 Lv-CMC 复配后所得的滤饼几乎没有孔隙且黏土的聚结程度较分别加入 SiO_2-D、



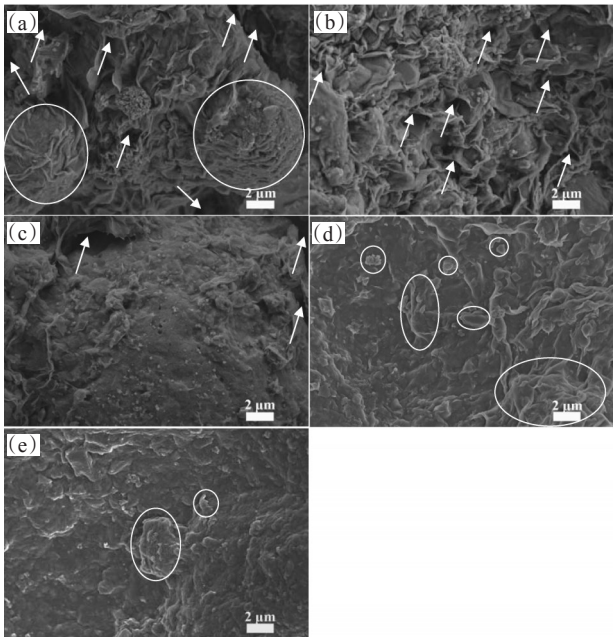
(a)基浆;(b) SiO_2-D;(c) Lv-CMC;(d)Lv-CMC 与 SiO_2-D 复配;(e)腐殖酸钾;(f)腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配。

图 6　含不同降滤失剂的钻井液及其基浆所形成滤饼的微观形貌图

Lv-CMC 时明显降低，此现象与 SiO_2-D 和 Lv-CMC 复配后滤失量降低结果一致，如图 6(d)所示。从图 6(b)、6(e)、6(f)可以看出，分别加入 SiO_2-D、腐殖酸钾时，其滤饼较基浆相比，仍有少量孔隙和微裂缝存在，将 SiO_2-D、腐殖酸钾复配后所得的滤饼结构更为致密且减少了黏土颗粒的聚集，从而达到降滤失的效果。

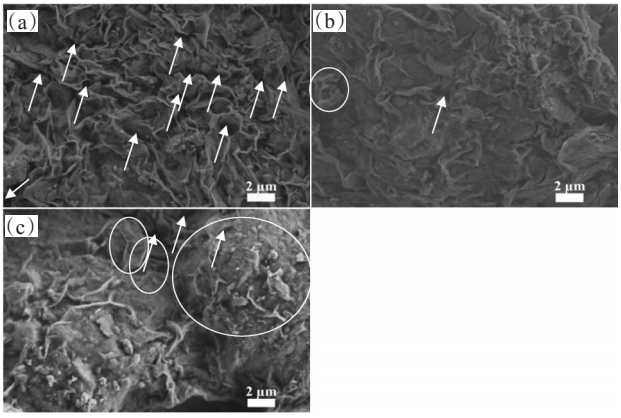
2.5.2 高温老化对钻井液滤饼微观形貌的影响

为探究高温老化对 SiO_2-D 与 Lv-CMC 和腐殖酸钾复配钻井液滤饼的影响，我们将老化后的滤饼进行了微观形貌观测。图 7 为 180 ℃老化 16 h 后所得到的滤饼微观形貌图。从图 7(a)可以看出，180 ℃老化后基浆的滤饼质量下降，表面有较多大块的黏土颗粒和大量的微空隙，使得滤饼渗透率增加。这可能是由于高温作用下黏土表面的水化膜减薄，颗粒间斥力减弱，导致黏土颗粒高温聚结。无论是添加 Lv-CMC 还是其与 SiO_2-D 复配，其滤饼虽比基浆的黏土颗粒聚集程度有所减少，但结构仍较为松散(图 7(b)和 7(c))。其原因在于 Lv-CMC 所含的葡萄糖单元之间的糖苷键、醚键断裂而使泥饼渗透率增加[30]。从图 7(d)、7(e)可以看出，180 ℃老化后腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配的滤饼相比单独使用腐殖酸钾时，滤饼中黏土颗粒之间堆积更加紧密，表面没有明显的孔隙和微裂缝，从而使滤饼渗透率进一步降低。图 8 为 200 ℃老化 16 h 后所得到的滤饼微观形貌图。可以看出 200 ℃老化后基浆的滤饼质量与 180 ℃时相似，均有大量黏土聚集且滤饼结构松散；从图 8(b)、8(c)可以看出，200 ℃老化后腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配的滤饼与单独使用腐殖酸钾的滤饼相比其表面出现黏土的大量聚结，表明降滤失效果降低。



(a)基浆；(b)Lv-CMC；(c)Lv-CMC 与 SiO_2-D 复配；(d)腐殖酸钾；(e)腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配。

图 7 含不同降滤失剂的钻井液及其基浆于 180 ℃老化的滤饼微观形貌图



(a)基浆；(b)腐殖酸钾；(c)腐殖酸钾与 SiO_2-D 复配。

图 8 含不同降滤失剂的钻井液及其基浆于 200 ℃老化的滤饼微观形貌图

3 结论

含双键功能团的纳米二氧化硅 SiO_2-D 与商用降滤失剂腐殖酸钾和 Lv-CMC 分别按 1∶1 和 2∶1 复配后在室温下均具有较好的配伍性，钻井液滤失量较单独使用商用降滤失剂分别减少 29%和 41%。在 180 ℃老化后 SiO_2-D 与腐殖酸钾仍具有较好的配伍性，滤失量较单独使用腐殖酸钾减少 28%；但 SiO_2-D 与 Lv-CMC 复配后滤失量有所增加。腐殖酸钾含有的极性基团(如—OH、—OCH_3、=CO 等)能与 SiO_2-D 表面的羟基进行氢键吸附，能够较好地稳定钻井液黏度，合理保持钻井液中固相粒子的粒径分布，在滤失过程中形成薄而致密的泥饼，从而有效地控制钻井液的 API 滤失量。在钻井过程中，将含双键功能团的纳米二氧化硅与商用降滤失剂腐殖酸钾复配使用，可减少钻井过程中自由水的产生，提高钻采效率。

参考文献:

[1] 陶怀志. 抗高温抗盐钙水基钻井液降滤失剂合成、表征与作用机理研究[D]. 成都:西南石油大学, 2012.

[2] 李财富, 李本高, 汪燮卿. 国内水基钻井液降滤失剂研究现状[J]. 中外能源, 2013, 18(2): 39-44.

[3] LIU T, JIANG G, ZHANG P, et al. A new low-cost drilling fluid for drilling in natural gas hydrate-bearing sediments[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2016, 33: 934-941.

[4] MENG X, ZHANG Y, ZHOU F, et al. Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids[J]. J Pet Sci Eng, 2012, 100: 1-8.

[5] ABDUO M I, DAHAB A S, ABUSEDA H, et al. Comparative study of using water-based mud containing multiwall carbon nanotubes versus oil-based mud in HPHT fields[J]. Egypt J Pet, 2016, 25(4): 459-464.

[6] CHERAGHIAN G, WU Q, MOSTOFI M, et al. Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties[J]. Colloids Surf, 2018, 555: 339-350.

[7] DEJTARADON P, HAMIDI H, CHUKS M H, et al. Impact of ZnO and CuO nanoparticles on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid[J]. Colloids Surf, 2019, 570: 354-367.

[8] PROFESSOR A, SCHOLAR R. Effect of fly ash on the rheological and filtration propretirs of water based drilling fluids[J]. Int J Res Eng Technol, 2013, 2(8): 150-156.

[9] MAHMOUD O, A H, VRYZAS Z, et al. Nanoparticle-based drilling fluids for minnimzing for mation damage in HP/HT application[C]//SPE Interenational Conference & Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 2016.

[10] LI M C, WU Q, SONG K, et al. Soy Protein isolate as fluid loss additive in bentonite-water-based drilling fluids[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(44): 24799-24809.

[11] 褚奇, 薛玉志, 李涛, 等. 新型聚合醇钻井液抑制性能研究[J]. 科学技术与工程 2015, 15: 208-211.

[12] 曲建峰, 邱正松, 郭保雨, 等. 氧化石墨烯新型抗高温降滤失剂的合成与评价[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(4): 9-14.

[13] KOSYNKIN D V, CERIOTTI G, WILSON K C, et al. Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2012, 4(1): 222-227.

[14] AFTAB A, ISMAIL A R, IBUPOTO Z H, et al. Nanoparticles based drilling muds a solution to drill elevated temperature wells: A review[J]. Renewable Sustainable Energy Rev, 2017, 76: 1301-1313.

[15] 王德龙, 汪建明, 宋自家, 等. 无机硅改性羧甲基淀粉钠降滤失剂的研制及其性能[J]. 石油化工, 2010, 39(4): 440-443.

[16] ZHANG Xianmin, JIANG Guancheng, XUAN Yang, et al. Associating copolymer acrylamide/diallyldimethylammonium chloride/butyl acrylate/2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid as a tackifier in clay-free and water-based drilling fluids[J]. Energy Fuels, 2017, 31(5): 4655-4662.

[17] LI Meichun, REN Suxia, ZHANG Xiuqiang, et al. Surface-chemistry-tuned cellulose nanocrystals in a bentonite suspension for water-based drilling fluids[J]. ACS Appl Nano Mater, 2018, 1(12): 7039-7051.

[18] VRYZAS Z, KELESSIDIS V C. Nano-based drilling fluids: A review[J]. Energies, 2017, 10(4): 1-34.

[19] AFOLABI R O, ORODU O D, SETEYEOBOT I. Predictive modelling of the impact of silica nanoparticles on fluid loss of water based drilling mud[J]. Appl Clay Sci, 2018, 151: 37-45.

[20] GHANBARI S, KAZEMZADEH E, SOLEYMANI M, et al. A facile method for synthesis and dispersion of silica nanoparticles in water-based drilling fluid[J]. Colloid Polym Sci, 2015, 294(2): 381-388.

[21] YUSOF M A M, HANAFI N H. Vital roles of nano silica in synthetic based mud for high temperature drilling operation[C]// AIP Conf Proc, USA, 2015.

[22] 褚奇, 刘四海, 李涛, 等. 钻井液用纳米二氧化硅封堵剂的制备与性能评价[J]. 精细石油化工, 2016, 33(04): 4-8.

[23] 宋晓岚, 吴雪兰, 曲鹏, 等. 纳米SiO_2分散稳定性能影响因素及作用机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2005, (01): 3-7.

[24] 范开鑫, 张太亮. PAAD/改性纳米二氧化硅共聚物钻井液降滤失剂的制备及性能研究[J]. 西南石油大学 2017, 13(7): 21-23.

[25] 毛惠, 邱正松, 付建国, 等. 聚合物基纳米SiO_2的制备及钻井液性能[J]. 中南大学学报, 46(7): 2564-2570.

[26] XU Jiangen, QIU Zhengsong, ZHAO Xin, et al. Hydrophobic modified polymer based silica nanocomposite for improving shale stability in water-based drilling fluids[J]. J Pet Sci Eng, 2017, 153: 325-330.

[27] PARIZAD A, SHAHBAZI K, TANHA A A. SiO_2 nanoparticle and KCl salt effects on filtration and thixotropical behavior of polymeric water based drilling fluid: With zeta potential and size analysis[J]. Results Phys, 2018, 9: 1656-1665.

[28] 陈朝然, 刘宝昌, 刘时琦. 纳米氧化物颗粒对水基钻井液润滑性能影响的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 27-32.

[29] XIA Xiujian, GUO Jintang, FENG Yakai, et al. Hydrophobic associated polymer "grafted onto" nanosilica as a multi-functional fluid loss agent for oil well cement under ultrahigh temperature [J]. RSC Adv, 2016, 6 (94): 91728-91740.

[30] 杨睿, 何晨晨, 罗春芝, 等. 国内外共聚物类水基钻井液降滤失剂研究与应用进展[J]. 广东化工, 2016, 43(16): 266-267.

(下转第405页。to be continued on p.405)

用[J]. 石油科技论坛，2012，31(2)：42–45.
[14] 吴若宁，熊汉桥，岳超先，等. 新型高密度清洁复合盐水完井液[J]. 钻井液与完井液，2018，35(2)：142–146.
[15] 高鸿锦，孙素琴，王鹤泉，等. 润滑剂分子结构及其润滑作用机理的红外发射光谱研究[C]//第五届全国摩擦学学术会议，湖北 武汉，1992：99–104.

Performance of Drag Reducer for Completion Fluid of Extended Reach Well

JIANG Hua[1], YANG Yang[2], YOU Fuchang[2], DU Jiaqi[2], DENG Cong[2]
(*1. Shenzhen Branch Company, CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518067, P R of China; 2. Jingzhou Jiahua Technology Company Ltd, Jingzhou, Hubei 434000, P R of China*)

Abstract: Due to long horizontal displacement, large deviation angle, high formation pressure coefficient and high friction torque during completion, the running of string is affected. In order to solve this problem, a kind of completion fluid lubricant CR301 was developed in laboratory, and the friction reducing and drag reducing performance, anti-friction ability, compatibility, reservoir protection effect and water locking effect of KCl brine completion fluid system with the lubricant were studied. The results showed that when the dosage of CR301 was 2%, the friction coefficient of KCl brine completion fluid decreased from 0.078 to 0.046, the friction coefficient decreased by more than 40%, and the anti-friction ability increased from 4 weights to 10 weights. At the same time, CR301 had good compatibility with KCl brine completion fluid, which could improve the permeability recovery value of core, reduce the surface tension of completion fluid system and reduce reservoir damage. CR301 could obviously improve the drag reduction performance of KCl brine completion fluid system, and had protective effect on reservoir, so it could be used in extended reach well completion fluid.

Keywords: *extended reach well*; *friction torque*; *completion fluid*; *coefficient of friction resistance*; *anti-friction ability*; *reservoir damage*

(上接第387页。continued from p.387)

Effect of Dispersible Silica Nanoparticles with Different Functional Groups on Filtration Properties of Drilling Fluid

TIAN Xiao, ZHOU Changhua, YANG Guangbin, SONG Ningning, ZHANG Zhijun, ZHANG Shengmao
(*Engineering Research Center for Applied Technology of Hybrid Nanomaterials, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, P R of China*)

Abstract: In this paper, API filtration experiments were carried out to study the influence of silica nanoparticles with amino (SiO_2-A), double bond (SiO_2-D) and epoxy groups (SiO_2-E) on the filtration of water-based drilling fluid and their compatibility with commercial filtrate reducer, including phenolic resin, sulfonated asphalt, low viscosity CMC and potassium humate. And the molecular structure of surface modifiers, morphology and hydrophilic/hydrophobic properties of nanoparticles were studied by means of infrared spectrometer, transmission electron microscope and contact angle measuring instrument, respectively. The results showed that the filtrate loss of drilling fluid was reduced by 41% and 29%, respectively, compared with adding commercial filtrate reducer alone, when SiO_2-D was combined with low viscosity CMC and potassium humate at mass ratio of 2∶1 and 1∶1, respectively. After aged at 180 ℃, SiO_2-D still had good compatibility with humic acid potassium, and the filtrate loss of the drilling fluid adding SiO_2-D and humic acid potassium was 28% lower than that adding humic acid alone. The reason for the good compatibility between SiO_2-D and potassium humate was that the polar groups in potassium humate, such as —OH, —OCH_3, =CO, could implement the hydrogen bond adsorption with hydroxyl groups on the surface of SiO_2-D, which could stabilize the viscosity of drilling fluid and maintain the particle size distribution of solid phase in drilling fluid. Ultimately, thin and dense mud cake in the filtration process was formed, so as to effectively control the API filtrate loss of drilling fluid.

Keywords: *nano-silica*; *commercial fluid loss agent*; *compatibility*; *water-based drilling fluid*; *fluid loss*