

纳米氧化物颗粒对水基钻井液 润滑性能影响的试验研究

陈朝然^{1,2}, 刘宝昌^{1,2,3}, 刘时琦^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学复杂条件钻采技术国土资源部重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 通过在水基钻井液中添加纳米氧化物颗粒, 来改善其润滑性能。选用了 Al_2O_3 、 TiO_2 及 SiO_2 三种纳米氧化物颗粒作为钻井液改性添加剂, 利用极压润滑仪及销盘摩擦磨损实验仪研究了添加不同种类和浓度纳米颗粒氧化物对水基钻井液的润滑性能及减摩效果的影响。结果表明, 所添加的3种球形纳米颗粒均有润滑减阻减摩的效果, 其中 SiO_2 颗粒的钻井液的润滑性能、滤失性能以及减摩效果都是最好的。当纳米 SiO_2 颗粒加量为 0.4% 时, 滤失量最小, 润滑系数降低率达到 15.6%, 摩擦系数降低率为 32.0%, 磨痕轨迹平滑, 减摩效果最为明显。当纳米颗粒浓度超过 0.5% 时, 减摩效果降低, 磨盘脱层磨损明显。

关键词: 纳米氧化物颗粒; 钻井液; 润滑性能; 销盘摩擦磨损实验

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2016)03-0027-06

Effect of Nano Oxide Particles Addition on Lubricating Properties of Water-based Drilling Fluid/CHEN Zhao-ran^{1,2}, LIU Bao-chang^{1,2,3}, LIU Shi-qi^{1,2} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Land and Resources, Changchun Jilin 130026, China; 3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China)

Abstract: This study has tried to improve lubricating properties of water-based drilling fluid with adding nano oxide particles to it. Alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2) and silica (SiO_2) nanoparticles were selected as modified drilling fluid additives, the study was made on the effects of adding different kinds and concentrations of oxide nanoparticles on lubricating properties and friction reducing of water-based drilling fluid by using the extreme pressure lubrication device and the pin-on-disk friction and wear tester. The results show that the three kinds of spherical nanoparticles all have the effect of lubrication and antifrication, but the drilling fluid containing SiO_2 particles has the best properties of lubrication, filtration and antifrication. When the adding amount of SiO_2 nanoparticles was 0.4%, the filtration was minimum, the reduction rates of lubricating and friction coefficients were 15.6% and 32.0% respectively with smooth wear scar, the friction reducing effects was the most evident. When the concentration of the nanoparticles was higher than 0.5%, the friction reducing effect decreased with obvious delamination and wear.

Key words: nano oxide particle; drilling fluid; lubricating property; pin-on-disk friction and wear test

0 引言

纳米材料是指晶粒或颗粒尺寸在 1~100 nm 范围内的超细材料, 分散性好的纳米氧化物颗粒能够在摩擦过程中, 利用纳米粒子的表面活性, 在对摩表面形成润滑膜, 从而实现减摩抗摩效果。由于其颗粒尺寸小、巨大的比表面积, 很少的添加量就能满足在摩擦副的表面形成润滑膜的要求, 不会影响钻井

液及摩擦副材料的基本性能^[1-3]。

在钻井和修井作业过程中, 钻杆柱在井中起钻及下钻时, 将不可避免地套管内壁接触造成摩擦磨损, 使用铝合金钻杆在深井、超深井、水平井钻进过程中时尤为重要, 因为铝合金材质较软, 当铝合金钻杆与钢套管接触时, 摩擦磨损更为严重。因此考虑利用润滑性能好的钻井液来减少铝合金钻杆与套

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-02-23

基金项目: 国家国际科技合作专项资助“深部油气钻探用高性能钻具系统关键技术合作研究”(编号: 2013DFR70490)、吉林省科技发展计划资助项目“深井油气钻探用铝合金钻杆关键制造技术”(编号: 20130206023GX)

作者简介: 陈朝然, 男, 汉族, 1990年生, 吉林大学在读硕士研究生, 主要研究纳米颗粒对水基钻井液润滑性能的影响, 564825155@qq.com。

通讯作者: 刘宝昌, 男, 汉族, 1975年生, 副院长, 副教授, 博士后, 主要从事岩土钻凿机具与材料的研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, liubc@jlu.edu.cn。

管及井壁的摩擦磨损^[4-6]。

纳米材料具有普通材料不可比拟的优势性能,将纳米材料与钻井液技术相结合,有助于解决现场各种施工难题、提升钻井工艺的整体水平^[7-8]。例如 Zhou 等^[9]研究表明,在液体润滑剂中添加修饰过的纳米铜,在钻井过程中,能起到明显的减摩、极压承载和抗摩作用。赵雄虎等^[10]利用实验室自制的纳米钻井液材料 GY-2,加入到钻井液中,使得钻井液的润滑系数和滤失量明显降低,分散好的 GY-2,会在钻具与套管表面形成稳定的薄膜,从而减少钻杆与套管及井壁之间的摩擦力。孙金声等^[11]在膨润土水溶液中加入的纳米膨润土,其降滤失性能比有机铵盐的降滤失性还好。

将纳米颗粒与水基钻井液技术相结合的研究才刚刚起步,本文利用极压润滑仪及销盘摩擦磨损实验仪,研究纳米氧化物颗粒对水基钻井液润滑性能、滤失性能以及减摩效果的影响,分析纳米材料在钻井液中的作用机制,对钻井液技术的发展有重要意义。

1 试验

1.1 纳米氧化物颗粒材料

本文选用纳米 SiO₂、纳米 TiO₂ 和纳米 Al₂O₃ 三种纳米颗粒作为润滑材料。通过透射电子显微镜观察,3种纳米颗粒均为白色无定形粉末。在3种纳米材料表面存在有羟基,相邻羟基彼此以氢键结合,表面羟基的存在使表面具有化学吸附活性,遇水分子时形成氢键吸附,它可以与系统产生一个良好的亲和力,从而改变悬浮液的稳定性和流变系统^[12-15]。

3种纳米氧化物颗粒的粒径及比表面积如下:

(1) 纳米 TiO₂ 是粒径为 35 nm 球形粉末颗粒,比表面积 200 ~ 220 m²/g;

(2) 纳米 SiO₂ 是粒径为 30 nm 的球形粉末颗粒,比表面积为 600 m²/g;

(3) 纳米 Al₂O₃ 是粒径为 20 ~ 30 nm 的球形粉末颗粒,比表面积为 50 m²/g。

纳米 SiO₂、纳米 TiO₂、纳米 Al₂O₃ 在实验室观察到的电镜图如图 1 ~ 图 3 所示,可以看到,3种纳米氧化物都处于团聚状态,但是经过分散处理后的纳米 SiO₂ 如图 4 所示是球形颗粒,满足对钻井液改性纳米材料的形状要求。

1.2 基浆

水基钻井液基浆配方为:4%的膨润土+0.5%

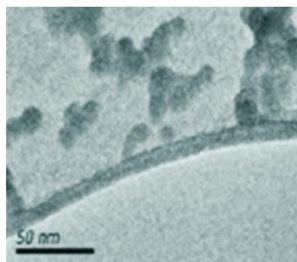


图 1 30 nm 纳米 SiO₂

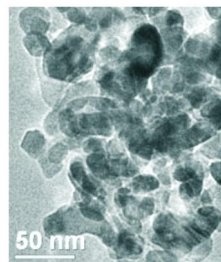


图 2 35 nm 纳米 TiO₂

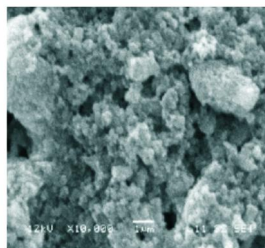


图 3 纳米 Al₂O₃

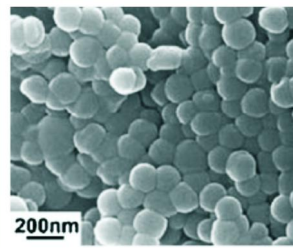


图 4 分散之后的纳米 SiO₂ 颗粒

Na₂CO₃ + 0.1% CMC (羧甲基纤维素钠,增粘降失水)。

2 试验仪器及方法

试验所用到的仪器设备包括:高速搅拌机、极压润滑仪、六速旋转粘度计、销盘式摩擦磨损试验机、多联中压滤失仪以及轮廓仪和扫描电镜等。

将纳米 TiO₂、SiO₂、Al₂O₃ 颗粒按照 0.1%、0.25%、0.4%、0.5% 以及 0.6% 的比例加入水基钻井液基浆中,在 GJS-B12K 型变频高速搅拌机上高速(10000 r/min)搅拌 10 min,使其充分混合。用 DNN-D6 型六速旋转粘度计测试添加纳米氧化物颗粒钻井液的各种流变参数。然后利用 EP 极压润滑仪得到测试添加纳米氧化物颗粒的钻井液润滑系数。利用 SD-6 型多联中压滤失仪测量其在 0.69 MPa 压力作用下,7.5 min 和 30 min 的失水量,然后按照 API 滤失量公式得到添加纳米氧化物颗粒的钻井液的滤失量^[16]。

利用销盘式摩擦磨损试验机(见图 5)测定磨盘材料与销棒钢珠材料之间的动摩擦系数。其中磨盘材料由 7075 铝合金钻杆材料制成,销棒下的钢珠由钢套管材料 AISI316 制成,摩擦磨损原理如图 6 所示。然后利用轮廓仪得到磨盘上留下的磨痕深度数据,通过 OriginPro 9.0 将得到的数据进行积分处理,得到磨损面积和磨损质量。最后利用扫描电镜分析磨盘上磨痕轨道以及磨损方式。

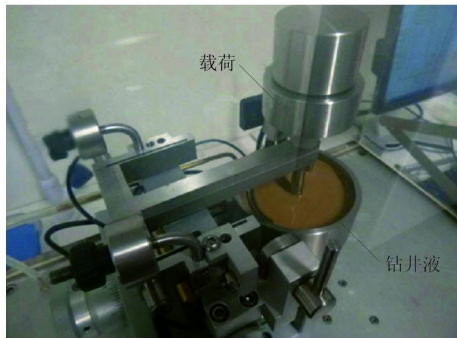


图 5 销盘式摩擦磨损试验机



图 6 摩擦磨损原理图以及磨盘和钢珠

根据在六速旋转粘度计得到的钻井液切力表以及流变曲线图可以看到,流动曲线是不过原点的一条直线,说明基浆钻井液属于塑性流体。满足我们对钻井液选型的要求。

3.2 钻井液的滤失性能测试

钻井液的滤失性能主要是由钻井液滤失量的大小和所形成泥皮的质量来体现。滤失量 V_f 与渗滤时间的平方根成正比。因此如果不考虑瞬时滤失,绘制出滤失量与滤失时间平方根的关系是通过原点的一条直线^[17]。因此 7.5 min 的滤失量将是 30 min 滤失量的一半,通常采用 7.5 min 滤失量的 2 倍作为 API 滤失量,钻井液滤失量与纳米 SiO₂ 浓度关系如表 2 所示。

表 2 钻井液滤失量与纳米 SiO₂ 浓度之间的关系

SiO ₂ 浓度/%	FL _{7.5 min} /mL	FL _{30 min} /mL	泥皮厚度/mm	pH 值
0	22.0	38.0	2.45	7
0.1	20.0	37.0	2.20	7
0.25	18.5	35.0	1.98	8
0.4	15.0	29.0	1.55	8
0.5	16.5	31.5	2.13	8
0.6	19.0	39.0	2.35	8

3 试验结果及分析

3.1 钻井液基浆的流变性

钻井液基浆流变性能测试使用的是 DNN - D6 型六速旋转粘度计。利用钻井液基浆在剪切速率分别为 6、100、200、300、600 r/min 时的仪表读数,根据式(1),分别计算对应转速下的剪切应力如表 1 所示,然后根据剪切应力表绘制流变曲线见图 7。

$$\tau_{实} = 0.511\varphi \quad (1)$$

表 1 钻井液基浆剪切应力

转速/ (r·min ⁻¹)	剪切应力/ mPa	转速/ (r·min ⁻¹)	剪切应力/ mPa
6	6.4	300	16.6
100	11.2	600	21.7
200	13.8		

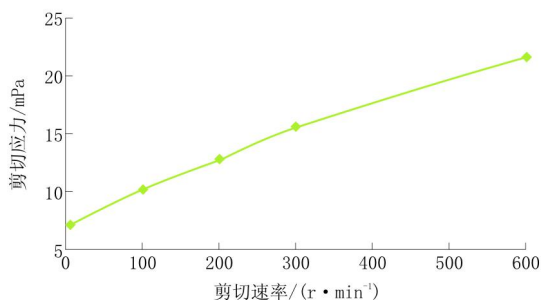


图 7 钻井液流变曲线图

试验采用的是 API 滤失量测定仪,从表 2 可以看出,泥皮的实际厚度及润滑系数则呈先减小再增大的变化规律。在加量为 0.4% 的时候,滤失量最小,并且从滤纸得到的滤饼明显比基浆钻井液滤失得到的滤饼薄而硬,加量为 0.1% 与 0.25%,30 min 的滤失量基本一样,得到的滤饼也是厚而软。

3.3 纳米氧化物颗粒对水基钻井液性能的影响

3.3.1 试验数据及处理

3.3.1.1 钻进液润滑系数

钻井液的润滑特性通过 EP 极压润滑仪来测试。根据极压润滑仪所提供的数据,然后按公式(2)进行计算,即可得到测试的润滑剂的润滑系数。

$$C = \frac{S}{A}, D = \frac{MC}{100}, L = \frac{B - N}{B} \quad (2)$$

式中:S——水的标准仪器读数,为 34;A——水的实际仪器读数;C——校正系数;D——钻井液润滑系数;M——仪表读数;L——润滑系数降低率;B——基浆钻井液润滑系数;N——纳米改性钻井液润滑系数。

通过对极压润滑仪得到的数据进行处理,可以得到添加纳米氧化物颗粒钻井液的润滑系数(D)以及润滑系数降低率(L)和纳米氧化物颗粒浓度的关

系如表3和图8所示。

表3 不同纳米颗粒浓度钻井液的润滑系数及润滑系数降低率

纳米颗粒 浓度/%	SiO ₂		TiO ₂		Al ₂ O ₃	
	D	L/%	D	L/%	D	L/%
0	0.51	0	0.51	0	0.51	0
0.1	0.499	2.0	0.498	2.0	0.487	2.5
0.25	0.439	13.9	0.464	9.0	0.485	4.9
0.4	0.431	15.6	0.457	10.4	0.451	11.6
0.5	0.425	16.6	0.462	9.4	0.489	4.1
0.6	0.546	7.0	0.534	4.7	0.524	2.7

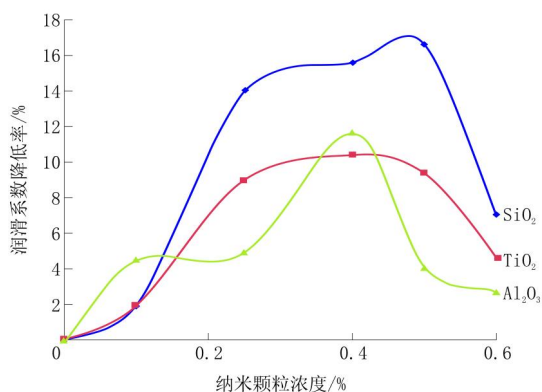


图8 钻井液润滑系数降低率与纳米颗粒浓度的关系

从表3和图8可以观察到,随着钻井液纳米颗粒浓度的增加,钻井液的润滑系数都是呈现先上升后下降的趋势,当加量合适时,能够明显降低钻井液的润滑系数。对比图8的润滑系数降低率可以看到,0.5%的纳米SiO₂润滑系数降低率最大,同时在不同浓度下的3种纳米材料对比,纳米SiO₂对钻井液的润滑系数降低率明显优于其他2种材料,纳米Al₂O₃和纳米TiO₂在添加浓度达到0.4%的情况下达到最优润滑系数降低率,纳米SiO₂是在0.5%的情况下达到最优润滑系数降低率,随着浓度再增加,润滑系数降低率反而减小。

3.3.1.2 纳米颗粒浓度和摩擦系数的关系

利用销盘式摩擦磨损试验机可得到磨盘材料及销棒钢珠材料之间的摩擦系数。其中磨盘材料选用的是7075铝合金钻杆材料,钢珠选用的是钢套管材料AISI316。通过添加不同种类、不同浓度的纳米颗粒氧化物到钻井液中,观察添加纳米颗粒的钻井液对磨盘和销棒之间摩擦系数的影响如表4和图9所示。

由表4和图9可以观察到,对比基浆溶液,不同加量的纳米颗粒改性钻井液都会使摩擦系数有一定程度的降低,添加0.4%纳米SiO₂的钻井液摩擦系数最小,摩擦系数降低率达到32%,其他2种纳米

表4 不同纳米颗粒浓度钻井液的摩擦系数

浓度	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	浓度	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
0	0.31525	0.31525	0.31525	0.5	0.24544	0.23304	0.25297
0.25	0.25013	0.24242	0.24293	0.6	0.25854	0.23258	0.26009
0.4	0.21304	0.24047	0.24397				

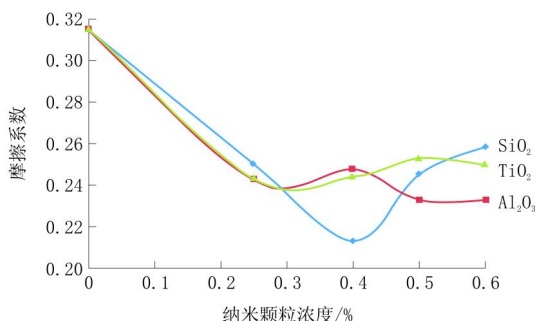


图9 钻井液摩擦系数与纳米颗粒浓度的关系

氧化物颗粒也随着钻井液纳米颗粒浓度的增加,摩擦系数都是呈现先下降后上升的趋势,当加量合适时,能够明显的减少磨盘与销棒的摩擦。

3.3.1.3 磨盘磨损形貌分析

在使用销盘式摩擦磨损试验机进行试验的过程中,销棒(钢珠)会在磨盘(铝合金)上留下磨痕以及磨损轨迹,通过对磨痕及轨迹进行扫描电镜观察,可以分析出纳米氧化物颗粒种类及加量对水基钻井液改善摩擦系数的影响。磨盘磨损形貌如图10~13所示。



图10 磨损轨迹内团聚的纳米SiO₂颗粒

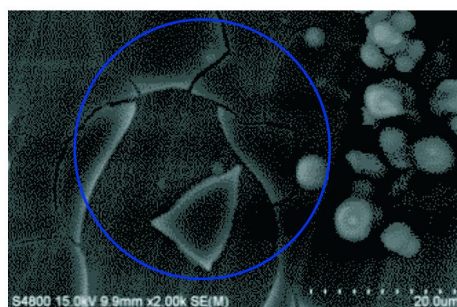


图11 脱层剥落

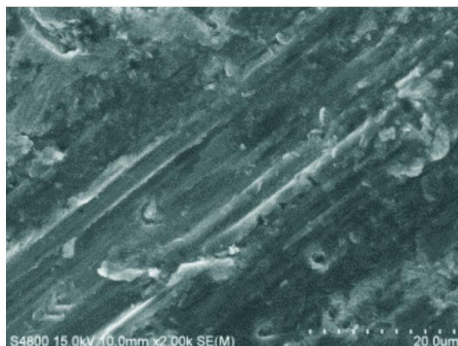
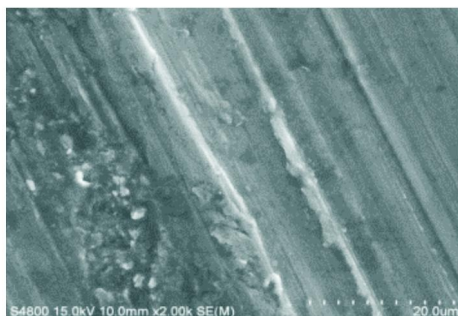


图 12 基浆钻井液条件下的犁槽

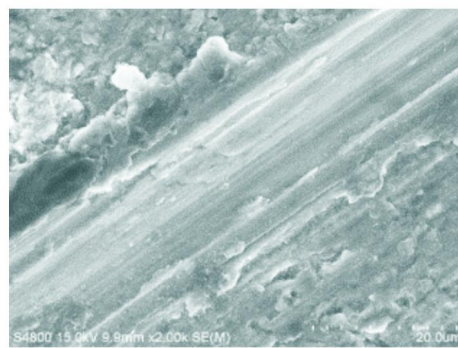
图 13 添加纳米 SiO₂ 颗粒钻井液条件下的犁槽

由图 10 可以看到在磨痕轨迹内存在团聚的纳米球形 SiO₂ 颗粒,同时观察到磨痕轨迹非常的平滑。由图 11 圆圈区域可以看到明显的脱层剥落,由硬表面(销钢球)划伤软表面(铝合金磨盘)造成,从磨层表面的浅坑和裂缝可以看出是脱层磨损。脱层磨损是由于在滑动过程中,磨盘的表面经历了一个大的塑性变形,这些裂缝的相交导致片状磨损颗粒的脱离,留下浅坑。从图 12 和图 13 对比,可以看到在相同的电镜放大倍数下,钻井液中添加纳米颗粒后,磨盘上形成磨损轨迹较平滑,磨痕宽度小,磨损程度较轻。

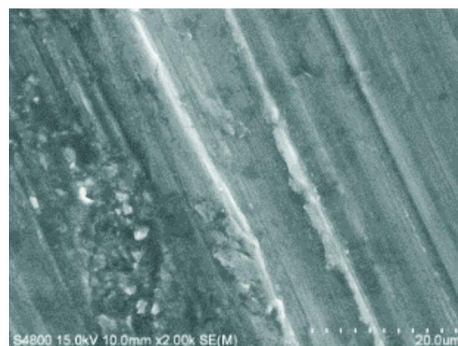
在钻井液中添加不同浓度纳米 SiO₂ 颗粒,分别进行销盘摩擦磨损试验,并通过扫描电镜观察来对比磨盘的磨损情况,如图 14 所示。

由图 14 可以看出,钻井液中添加纳米颗粒后,磨盘上形成磨损轨迹较平滑,磨损程度较轻。但是当加量超过 0.5% 后,在磨盘表面可观察到铝合金的层状脱落,甚至形成浅坑。即加量过多反而会影影响减摩效果。

分析原因,虽然钻井液中所添加的纳米颗粒都是球形颗粒,会将铝合金材料与钢材料之间的滑动摩擦变为滚动摩擦,从而明显的减少 2 种材料的



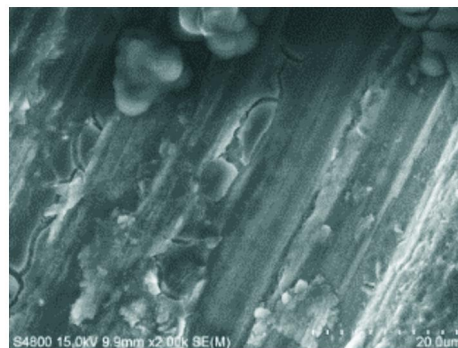
(a) 0.25%



(b) 0.4%



(c) 0.5%



(d) 0.6%

图 14 不同浓度纳米 SiO₂ 的磨盘磨损情况

摩擦,但是毕竟纳米 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃ 这 3 种材料都是硬质材料,在高压下进行滚动摩擦,会对软磨盘(铝合金)造成一定的压裂脱落磨损。

3.3.1.4 磨痕数据分析

利用轮廓仪对铝合金磨盘上的磨痕进行进一步分析,包括磨损深度、磨损面积、磨损体积、磨损质量等。利用 OriginPro 9.0 将得到的数据进行积分处理可得到积分曲线的面积。磨损面积与纳米颗粒浓度的关系如图 15 所示。

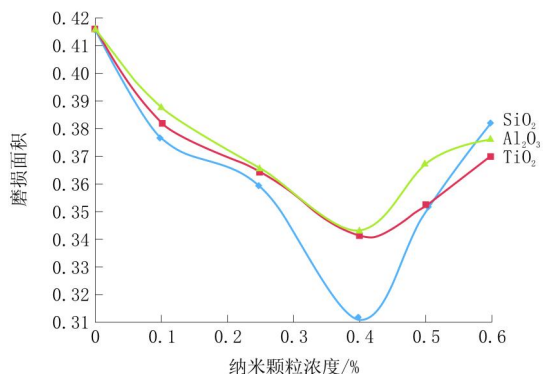


图 15 磨损面积与纳米颗粒浓度的关系

由磨损面积可得到磨损体积和磨损质量:

磨损体积 = 磨损面积 × 周长, 磨损质量 = 磨损体积 × 密度。

其中周长可由轨道的直径(为 5 mm)求得, 7075 铝合金密度为 2.8 g/cm^3 。

从图 15 可以看出,随着钻井液中纳米颗粒浓度的增加,磨痕的磨损面积都是呈先下降后上升的趋势,纳米颗粒加量合适时,能够明显地降低磨盘的磨损体积。其中添加 0.4% 的纳米 SiO₂ 减磨效果最为明显,会使磨损体积下降 25%。纳米颗粒浓度超过 0.4%,磨损体积会增加,与扫描电镜下的观察到的脱层磨损相吻合。

4 结论

根据试验观察及数据分析可以得到以下结论。

(1) 纳米颗粒作为水基钻井液添加剂能明显提高钻井液润滑性。

(2) 钻井液的润滑性能和纳米颗粒的浓度有关。0.4% 的纳米 SiO₂ 改善水基钻井液的润滑性能较好,润滑系数降低率达到 15.6%,滤失量最小,磨损量小且明显的降低摩擦系数。0.5% 的纳米 SiO₂ 钻井液润滑性能最好,但是它对铝合金 7075 材料的磨损量较大。

(3) 球形纳米氧化物能有效改善钻井液的减磨效果。纳米 SiO₂ 颗粒加量为 0.4% 时,摩擦系数降低率为 32.0%,磨痕轨迹平滑,减磨效果最为明显。

当加量超过 0.5% 后,在磨盘表面可观察到铝合金的层状脱落,甚至形成浅坑。即加量过多反而会影响减磨效果。

(4) 纳米 TiO₂、纳米 Al₂O₃ 颗粒对水基钻井液润滑性能以及减磨效果影响有限。

参考文献:

- [1] 翟庆洲,裴式轮,肖丰收,等. 纳米材料研究进展 I——纳米材料结构与化学性质[J]. 化学研究与应用,1998,(3):8-17.
- [2] 朱世东,周根树,蔡锐,等. 纳米材料国内外研究进展 I——纳米材料的结构、特异效应与性能[J]. 热处理技术与装备,2010,(3):1-5,26.
- [3] 车剑飞. 纳米氧化物表面改性与分散技术及其在高性能摩擦材料中的应用[D]. 江苏南京:南京理工大学,2005.
- [4] 沈忠厚. 现代钻井工艺技术的发展和特征[J]. 石油钻采工艺,1984,(1):1-9.
- [5] 郑锋辉,韩来聚,杨利,等. 国内外新兴钻井技术发展现状[J]. 石油钻探技术,2008,36(4):5-11.
- [6] 沈忠厚,王瑞和. 现代石油钻井技术 50 年年进展和发展趋势[J]. 石油钻采工艺,2003,(5):1-6,93.
- [7] 吴军,陈兹然,李阔. 纳米技术在钻井液中的应用探究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012,(9):55.
- [8] Sharma Mukul M, Zhang R, Chenevert M E. A new family of nanoparticle based drilling fluids[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: [S. n.],2012:1-13.
- [9] Zhou Jingfang, Zhang Z J, Wang X B, et al. Investigation of the tribological behavior of oil-soluble Cu nanoparticles as additive in liquid paraffin[J]. Tribology,2000,20(2):123-126.
- [10] 赵雄虎,高飞,鄢捷军,等. 纳米钻井液材料 GY-2 室内研究[J]. 油田化学,2010,(4):357-359,365.
- [11] 孙金声,屈沉治,刘芳,等. 纳米膨润土复合体的制备及性能[J]. 钻井液与完井液,2006,(2):8-10,83-84.
- [12] Li X., Cao Z., Zhang Z., et al. Surface-modification in situ of Nano-SiO₂ and its structure and tribological properties[J]. Applied Surface Science,2006,(22),7856-7861.
- [13] Zhang L., Chen L., Wan H., et al. Synthesis and tribological properties of stearic acid-modified anatase (TiO₂) nanoparticles[J]. Tribology Letters,2011,41(2),409-416.
- [14] B. J. Briscoe, P. M. Cann, A. Delfino, et al. Lubrication of water-based clay suspensions[J]. Tribology Series,2001,39:331-340.
- [15] Fernandes N. J., Akbarzadeh J., Peterlik H., et al. Synthesis and properties of highly dispersed ionic silica-poly(ethylene oxide) nanohybrids[J]. ACS Nano,2013,7(2),1265-1271.
- [16] Abdullah S. F. Study on nanoparticles as an additive in lubricant towards sustainability of energy in industrial engineering[J]. Journal Energy Environ,2009,1(1),34-37.
- [17] Meng Q E, Liu F, Fisher J, et al. Transient elastohydrodynamic lubrication analysis of a novel metal-on-metal hip prosthesis with a non-spherical femoral bearing surface[J]. Institution of Mechanical Engineers, Proceedings. Part H: Journal of Engineering in Medicine,2011,(1):25-37.