

纳米材料对低固相冲洗液性能影响的研究

刘徐三

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:低固相冲洗液是最适合绳索取心钻探工艺的冲洗液类型之一,但其防塌护壁能力和钻孔净化能力弱,阻碍了绳索取心钻探工艺在复杂地层的应用。本文通过实验研究,分析了纳米四氧化三铁、纳米氮化硼、纳米二氧化钛、多壁碳纳米管和纳米二氧化硅对低固相冲洗液的流变性能和滤失性能的影响规律。结果表明:纳米四氧化三铁、多壁碳纳米管和纳米氮化硼对低固相冲洗液的性能影响最明显,且具有增粘提切的作用。在此基础之上,通过正交实验分析了上述3种纳米材料复合后对低固相冲洗液性能的影响规律,得到性能优良的复合纳米低固相冲洗液体系优化配方:3% 钠基膨润土+0.5% CMC-HV+0.3% 纳米四氧化三铁+0.9% 纳米氮化硼+0.9% 多壁碳纳米管。最后,分析了纳米材料改善低固相冲洗液性能的作用机理。

关键词:纳米材料;低固相冲洗液;流变性能;滤失性能;绳索取心钻探

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)04-0061-07

Influence of nanomaterials on the properties of low-solid drilling fluids

LIU Xusan

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp.,
Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: The low-solid drilling fluid is one of the most suitable drilling fluids for wireline core drilling; however, its poor anti-collapse and borehole cleaning capabilities hinder the application of wireline coring drilling in complex formations. The effects of nano-iron tetroxide, nano-boron nitride, nano-titanium dioxide, multi-wall carbon nanotubes and nano-silica on the rheological properties and filtration properties of low-solid drilling fluids were analyzed through experimental research. The results showed that: nano-iron tetroxide, multi-walled carbon nanotubes and nano-boron nitride had obvious effects on the performance of low-solid drilling fluids; furthermore, they can increase the viscosity and improve shear force. Then, the influence of the combination of the above three nanomaterials on the performance of the low-solid drilling fluid was analyzed by orthogonal experiments to obtain the optimized formulation of the composite nano-low-solid drilling fluid system with excellent performance: 3% sodium bentonite + 0.5% CMC-HV + 0.3% nano ferric oxide + 0.9% nanoboron nitride + 0.9% multi-walled carbon nanotubes. Finally, the mechanism of nanomaterials to improve the performance of low-solid drilling fluids is analyzed.

Key words: nanomaterials; low-solid drilling fluid; rheological properties; filtration properties; wireline core drilling

随着我国经济社会的快速发展,对矿产资源的需求越来越旺盛。但随着浅部矿产资源勘探开发逐步枯竭,为确保我国矿产资源的战略安全,向地球深部勘探开发矿产资源成为必由之路^[1-2]。目前,取心钻探作为唯一可以直接获得地下深部岩矿心实物样品的技术,在深部找矿工作中发挥着不可替

代的作用。其中,绳索取心钻探技术具有钻进效率高、取心快速、工人劳动强度低、辅助时间占比率低等优势^[3],在深部取心钻探中这一优势将更加明显,是应用最广泛的、综合地质效果最好的钻探技术^[4-5]。但是,随着钻进深度的增加,地层也越复杂,事实上又成为了绳索取心钻探技术的高效应用的

收稿日期:2022-03-04; 修回日期:2022-05-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.04.009

基金项目:国家重点研发计划课题(编号:2018YF0808005)

作者简介:刘徐三,男,汉族,1983年生,助理研究员,硕士,从事钻探技术研究工作,陕西省西安市碑林区雁塔北路52号,liuxusan@cctegxian.com。

引用格式:刘徐三. 纳米材料对低固相冲洗液性能影响的研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 61-67.

LIU Xusan. Influence of nanomaterials on the properties of low-solid drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 61-67.

障碍。长期以来的研究和实践表明,无固相/低固相冲洗液是最适合绳索取心钻探的冲洗液类型^[6],其流变性能好,循环泵压低,钻杆内不容易结泥皮,对岩心捞取影响小等。但其存在防塌护壁能力和携带悬浮岩屑能力弱的缺点,钻进过程中容易发生孔壁失稳、沉砂等,从而导致卡钻、埋钻等孔内事故的发生^[7-8],使得深孔钻进难以达到地质设计的深度要求,从而延误深部矿产资源的勘探与开发。

纳米材料作为一种新兴的材料类型,因其具有独特的性能,近年来在冲洗液领域的研究与应用较广泛。但这些研究与应用均集中于油气钻探领域^[9-13],在地质岩心钻探领域还鲜有研究。鉴于此,本文选择5种油气钻探领域冲洗液研究常用的纳米材料,通过评价其单剂或者复合后对低固相冲洗液性能的改善与强化效果,构建复合纳米低固相冲洗液体系,并借助扫描电镜(SEM)分析泥饼的微观形貌,综合分析纳米材料的作用机理,以期为绳索取心钻探技术在深孔复杂地层中的高效应用提供新的冲洗液技术方案。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料及仪器

本文使用的5种纳米材料,分别为纳米四氧化三铁(Fe_3O_4)、纳米氮化硼(BN)、纳米二氧化钛(TiO_2)、多壁纳米碳管(MWNTs)和纳米二氧化硅(SiO_2),均为油气钻探领域冲洗液研究常用的纳米材料,具体参数如表1所示。

表1 实验用纳米材料的参数

材 料	粒径/nm	纯度/%	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	形貌
纳米 Fe_3O_4	50	99.99	90~100	球形
纳米 BN	300	99.99	60~70	片状
纳米 TiO_2	30	99.5	60	球形
MWNTs	3~5(内径) 8~15(外径)	95	233	管状
纳米 SiO_2	15±5	99.8	250±30	球形

使用的主要实验仪器包括 API 中压失水仪(ZNS-2A),六速旋转粘度计(ZNN-D6B)等。

1.2 实验方法

1.2.1 单一纳米材料对冲洗液性能的影响

1000 mL 水中加入 30 g 钠基膨润土和 5 g 高粘度羧甲基纤维素钠(CMC-HV),充分搅拌后静置 24 h,作为低固相冲洗液供后续实验使用。在低固相冲洗液中加入 0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5% 的纳米材料,充分搅拌后分别测量其流变性能参数、API 滤失量等实验数据,优选出对低固相冲洗液性能改善效果较好的纳米材料及其加量。

1.2.2 复合纳米材料对冲洗液性能的影响

将“1.2.1”节实验中对低固相冲洗液改善效果较好的纳米材料进行复合,设计正交实验,分别测量纳米冲洗液的流变性能参数、API 滤失量等实验数据,分析得到性能最好的优化配方,构建复合纳米低固相冲洗液体系。

2 实验结果与讨论

2.1 单一纳米材料对低固相冲洗液性能的影响

2.1.1 纳米材料对低固相冲洗液表观粘度的影响

5 种纳米材料对低固相冲洗液的表观粘度(AV)的影响规律如图1所示。

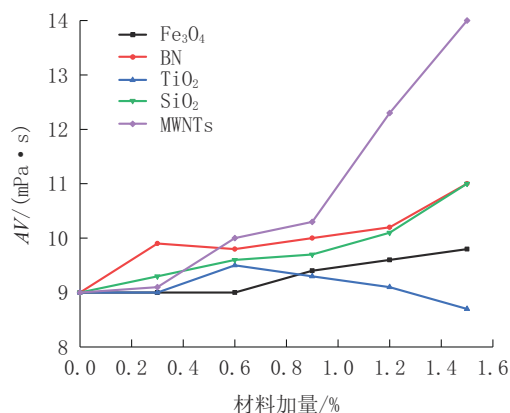


图1 纳米材料对低固相冲洗液表观粘度的影响

Fig.1 Influence of nanomaterials on apparent viscosity of the low-solid drilling fluid

由图1可知,5种纳米材料对低固相冲洗液表观粘度的影响存在明显的差异。其中,影响最显著的是MWNTs,在实验加量范围内,可以将低固相冲洗液的表观粘度从8.90 mPa·s提高到14.00 mPa·s左右,增幅达57.87%。纳米 Fe_3O_4 、纳米BN和纳米 SiO_2 也能提高低固相冲洗液的表观粘度,但随着纳

米材料加量的增大缓慢提高,增幅要比MWNTs小得多。随着纳米TiO₂的加入,低固相冲洗液的表现粘度先小幅提高,加量超过0.6%后,表现粘度又开始降低,最后降低至8.60 mPa·s。

2.1.2 纳米材料对低固相冲洗液塑性粘度的影响

5种纳米材料对低固相冲洗液塑性粘度(PV)的影响规律如图2所示。

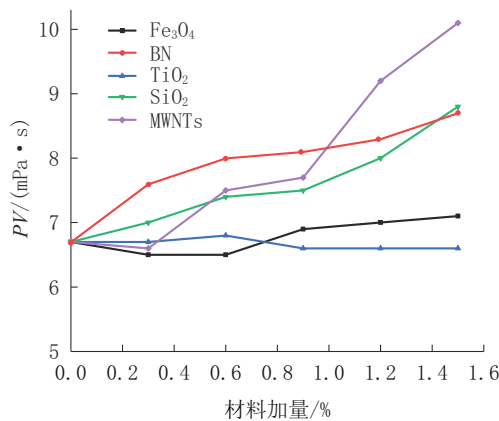


图2 纳米材料对低固相冲洗液的塑性粘度影响
Fig.2 Influence of nanomaterials on plastic viscosity of the low-solid drilling fluid

从图2可知,纳米BN、纳米SiO₂和MWNTs对低固相冲洗液的塑性粘度影响较明显。其中, MWNTs的影响最显著,在实验加量范围内,可以将低固相冲洗液的塑性粘度从6.70 mPa·s提高到10.20 mPa·s,增加幅度达到了52.2%。纳米BN和纳米SiO₂也将低固相冲洗液的塑性粘度分别提高了29.9%和31.34%。纳米Fe₃O₄加量为0.3%和0.6%时,塑性粘度略微降低;加量为0.9%、1.2%和1.5%时,塑性粘度稍有增加。纳米TiO₂对低固相冲洗液的塑性粘度影响并不明显,加入纳米TiO₂后,低固相冲洗液的塑性粘度变化幅度很小。

2.1.3 纳米材料对低固相冲洗液的动切力的影响

5种纳米材料对低固相冲洗液动切力(YP)的影响规律如图3所示。

从图3可知,除纳米SiO₂之外,其他纳米材料均对低固相冲洗液的动切力有明显的影 响。其中, MWNTs的影响最显著,在实验加量范围内,将低固相冲洗液的动切力由2.25 Pa提高到4.20 Pa左右,提高幅度达86%。纳米Fe₃O₄也能提升低固相冲洗液的动切力,但提升幅度仅22%,效果不如

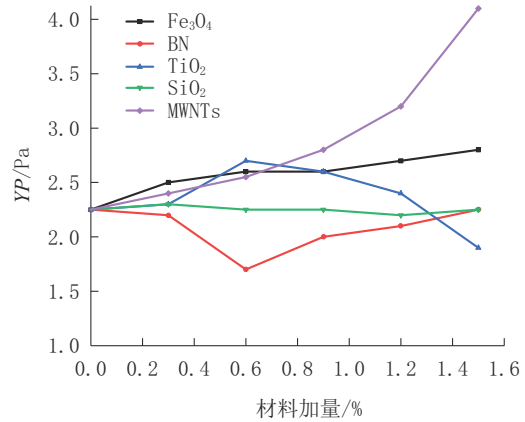


图3 纳米材料对低固相冲洗液的动切力的影响
Fig.3 Influence of nanomaterials on dynamic shear force of the low-solid drilling fluid

MWNTs。纳米BN的加入,导致冲洗液的动切力先下降后回升,在加量为0.6%时,动切力达到最小值,仅为1.79 Pa,然后随着加量的增加,动切力又逐步回到初始水平。纳米TiO₂的加入使低固相冲洗液的动切力先增大后减小,加量为0.6%时,动切力达到最大值,然后随着加量的增加,动切力逐步减小。纳米SiO₂对低固相冲洗液的动切力几乎没有影响,随着加量的增加,动切力略有变化。

2.1.4 纳米材料对低固相冲洗液的动塑比的影响

5种纳米材料对低固相冲洗液动塑比的影响规律如图4所示。

由图4可知,5种纳米材料对低固相冲洗液的动塑比的影响均比较明显。纳米Fe₃O₄在不同的加量时,均能保证低固相冲洗液的动塑比处于较高的

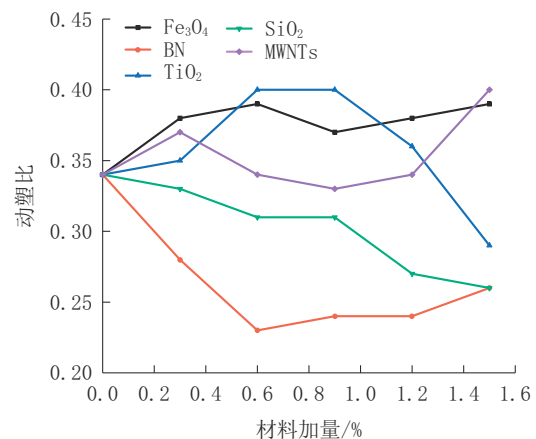


图4 纳米材料对低固相冲洗液动塑比的影响
Fig.4 Influence of nanomaterials on dynamic-plastic ratio of the low-solid drilling fluid

值。但随着纳米 Fe_3O_4 加量的变化,动塑比起伏变化,当加量为 0.6% 时,动塑比最大,加量为 0.9% 时,动塑比最小;纳米 TiO_2 的加入,低固相冲洗液的动塑比先增大后降低,加量为 0.6% 或 0.9% 时,冲洗液的动塑比达到最高值 0.40 左右,之后又随着加量的增大而降低;MWNTs 的加量为 0.9% 时,冲洗液动塑比达到最小值,在加量达到 1.5% 时,动塑比达到了最大值;随着纳米 BN、纳米 SiO_2 加量的增大,冲洗液动塑比不断减小。动塑比的大小,反映的是冲洗液体系剪切稀释性能的强弱,动塑比越大,表明冲洗液剪切稀释性能越强。一般认为,冲洗液体系的动塑比为 0.38 左右最好,对携带岩屑、净化钻孔最有利^[14-15]。

2.1.5 纳米材料对低固相冲洗液的滤失量的影响

5 种纳米材料对低固相冲洗液滤失性能 (FL) 的影响规律如图 5 所示。

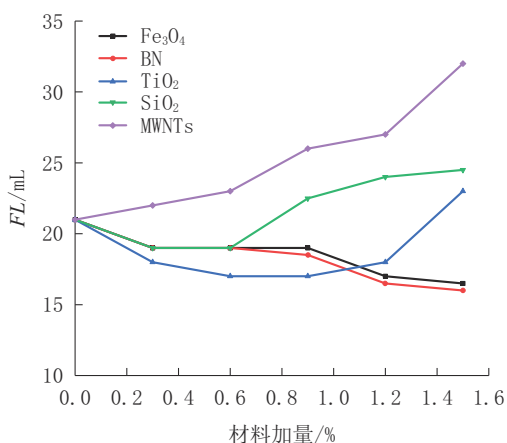


图5 纳米材料对低固相冲洗液的滤失性能的影响

Fig.5 Influence of nanomaterials on filtration properties of the low-solid drilling fluid

由图 5 可知,纳米 Fe_3O_4 对低固相冲洗液的滤失性能有较好地改善作用,随其加量的增加,低固相冲洗液的失水量逐渐减小,当加量达到 1.5% 时,冲洗液的滤失量最小,只有 17.3 mL,降低了 19%;纳米 BN 也有与纳米 Fe_3O_4 相同的效果,而且降低幅度更大,加量为 1.5% 时,冲洗液滤失量可以降低 24%。MWNTs 的加入,却进一步恶化了冲洗液的滤失性能,随着其加量的增加,滤失量越来越高。纳米 SiO_2 以及纳米 TiO_2 对冲洗液滤失性能改善不明显,加量超过 0.6% 后,滤失性能反而开始恶化。

综上所述,5 种纳米材料均会对低固相冲洗液

的流变性能和滤失性能产生一定的影响,但各自的影响规律并不相同。纳米 Fe_3O_4 、纳米 BN 和 MWNTs 对低固相冲洗液的粘度、动切力和动塑比都具有明显改善效果,这有利于冲洗液悬浮和携带岩屑、清洗净化钻孔。同时,纳米 Fe_3O_4 、纳米 BN 还能明显改善低固相冲洗液的滤失性能。综合考虑,选择纳米 Fe_3O_4 、纳米 BN 和 MWNTs 三种纳米材料进行复合,评价复合纳米材料对低固相冲洗液性能的改善效果,得到性能良好的复合纳米低固相冲洗液体系。

2.2 复合纳米材料对低固相冲洗液性能的影响

2.2.1 正交实验

设纳米 Fe_3O_4 为因素 A、纳米 BN 为因素 B、MWNTs 为因素 C,每个因素设 5 个水平,分别为 1 (0.3%)、2 (0.6%)、3 (0.9%)、4 (1.2%)、5 (1.5%)。以表观粘度、塑性粘度、动切力、动塑比、滤失量等为评价指标,评价复合纳米材料对低固相冲洗液性能的影响规律,优选出性能优良的复合纳米低固相冲洗液体系。正交实验结果见表 2。

2.2.2 实验结果分析

基于正交实验结果,计算各因素对动塑比、滤失量的估算边际平均值,由此分析各因素的最优加量。结果如图 6 和图 7 所示。

冲洗液能高效的悬浮、携带岩屑和净化钻孔,其动塑比不能太低,一般为 0.38 左右最好。由图 6 可知,三种纳米材料的加量均为 0.9% 时,得到的低固相冲洗液体系的动塑比最高。提高冲洗液稳定孔壁的能力,最基本的一点是冲洗液具有较低的滤失量。由图 7 可知,纳米 Fe_3O_4 的加量为 0.3%,纳米 BN 和 MWNTs 的加量均为 0.9% 时,低固相冲洗液具有最低的滤失量。再结合图 6,可知此时冲洗液的动塑比依然维持在较高的水平。由此可得到复合纳米低固相冲洗液体系的优化配方是:3% 钠基膨润土 + 0.5% CMC-HV + 0.3% 纳米 Fe_3O_4 + 0.9% 纳米 BN + 0.9% MWNTs。此配方对应的正交实验中第 3 号实验组合 $A_1B_3C_3$,其 API 滤失量为 14 mL,是所有实验组合中最低的一组;动塑比为 0.40,反映出该配方具有优良的剪切稀释特性;其他参数也能很好的满足绳索取心钻探对低固相冲洗液性能的要求。

表 2 正交实验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

实验编号	实验组合	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	动塑比	FL _{API} / mL
1	A ₁ B ₁ C ₁	9.15	7.1	2.10	0.30	18.2
2	A ₁ B ₂ C ₂	8.75	7.0	1.79	0.26	17.4
3	A ₁ B ₃ C ₃	8.25	6.5	2.97	0.40	14.0
4	A ₁ B ₄ C ₄	8.1	6.8	1.33	0.20	16.6
5	A ₁ B ₅ C ₅	7.8	6.4	1.43	0.22	18.0
6	A ₂ B ₁ C ₂	9.7	7.9	1.84	0.23	15.8
7	A ₂ B ₂ C ₃	9.75	7.5	2.30	0.31	15.4
8	A ₂ B ₃ C ₄	9.5	7.8	1.74	0.22	16.2
9	A ₂ B ₄ C ₅	10.25	8.3	2.00	0.24	18.6
10	A ₂ B ₅ C ₁	10.5	8.1	2.45	0.30	19.0
11	A ₃ B ₁ C ₃	10.6	7.3	3.37	0.46	17.2
12	A ₃ B ₂ C ₄	10.7	8.2	2.56	0.31	18.2
13	A ₃ B ₃ C ₅	11.0	8.5	2.556	0.30	16.2
14	A ₃ B ₄ C ₁	10.2	7.9	2.35	0.30	18.0
15	A ₃ B ₅ C ₂	10.25	8.2	2.10	0.26	15.8
16	A ₄ B ₁ C ₄	9.05	7.1	1.99	0.28	17.8
17	A ₄ B ₂ C ₅	8.85	6.9	1.99	0.29	16.4
18	A ₄ B ₃ C ₁	10.25	7.6	2.71	0.36	17.0
19	A ₄ B ₄ C ₂	9.9	7.9	2.04	0.26	18.2
20	A ₄ B ₅ C ₃	9.85	7.6	2.30	0.30	19.0
21	A ₅ B ₂ C ₁	10.25	8.1	2.20	0.27	17.0
22	A ₅ B ₃ C ₂	9.65	7.3	2.40	0.33	17.8
23	A ₅ B ₄ C ₃	9.75	7.5	2.30	0.31	18.6
24	A ₅ B ₅ C ₄	8.7	7.2	1.53	0.21	18.0
25	A ₅ B ₁ C ₅	8.2	6.6	1.64	0.25	19.2

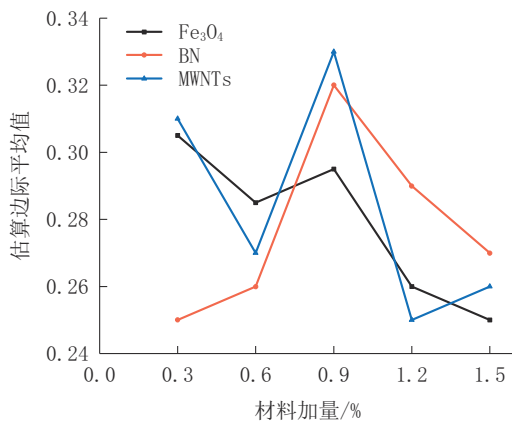


图 6 各因素对动塑比的估算边际平均值

Fig.6 Estimated marginal mean value of each factor for dynamic-plastic ratio

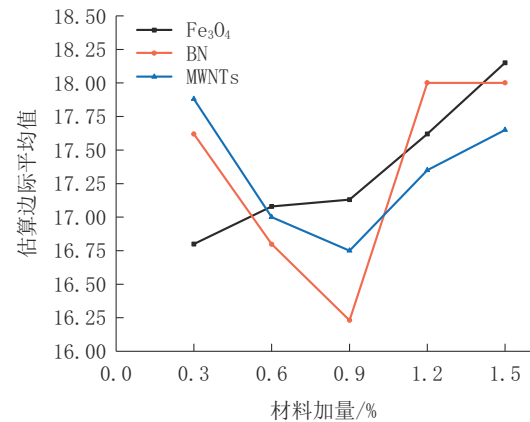


图 7 各因素对滤失量的估算边际平均值

Fig.7 Estimated marginal mean value of each factor for filtration

3 纳米材料的作用机理

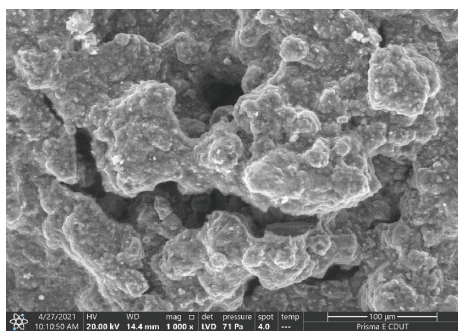
3.1 改善低固相冲洗液流变性能的作用机理

由表 1 可知, MWNTs 是一种管状纳米材料, BN 是一种片状纳米材料。相比于球形纳米材料, 它们通过氢键作用与膨润土颗粒、处理剂 CMC 以及水分子之间形成具有一定强度的空间网络结构, 从而能更加有效的提升低固相冲洗液体系的表观粘度、动切力和动塑比, 有利于携带岩屑。除此以外, 相比于其他纳米材料, MWNTs 具有更小的粒径和更大的比表面积, 在冲洗液层流流动过程中, 颗粒间的摩擦力更大, 因而对低固相冲洗液体系的塑性粘度提升更明显。虽然纳米 SiO₂ 也具有较大的比表面积, 但因为其是球形颗粒, 在冲洗液流动过程中存在滚动摩擦现象, 因而对塑性粘度的提高没有 MWNTs 明显。

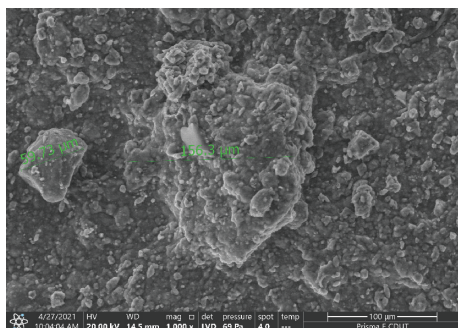
3.2 改善低固相冲洗液滤失性能的作用机理

将低固相冲洗液的滤饼和优化配方的复合纳米低固相冲洗液的滤饼在常温下阴干处理, 采用扫描电镜 (SEM) 对其微观形貌特征进行分析, 如图 8 所示。

图 8(a) 所示为未加入纳米材料的低固相冲洗液的滤饼, 其表面粗糙且松散, 膨润土颗粒之间存在较大的孔隙, 故滤失量高。图 8(b) 所示为优化配方的复合纳米低固相冲洗液的泥饼, 纳米颗粒发挥其致密封堵作用, 填充于膨润土颗粒之间的孔隙, 使得泥饼表面光滑且致密。纳米材料因其粒径小, 具有比表面积大、活性高、刚度大等优良特性^[16]。除此之外, 纳米 Fe₃O₄ 容易通过氢键作用吸附于膨润土



(a) 未加纳米材料的低固相冲洗液的滤饼



(b) 复合纳米低固相冲洗液的泥饼

图8 泥饼扫描照片(1000×)

Fig.8 Mud cake scan photos(1000×)

表面,从而增加膨润土颗粒的Zeta电位^[13,17],使低固相冲洗液中的膨润土颗粒保持细分散状态,有利于形成薄且致密的泥饼,降低低固相冲洗液的滤失量^[18]。

综上所述,纳米材料的加入,不但有利于低固相冲洗液体系滤失量的降低,提升其稳定孔壁的能力,还有利于改善低固相冲洗液流变性能,增强其携带和悬浮岩屑和清洁、净化钻孔的能力。

4 结论

(1)通过单剂纳米材料对低固相冲洗液性能影响的实验评价,5种纳米材料对低固相冲洗液的流变性能和滤失性能均有一定的影响,但影响程度和规律并不一致。纳米 Fe_3O_4 、纳米BN和MWNTs对低固相冲洗液的粘度、动切力和动塑比都具有明显的改善效果;纳米 Fe_3O_4 、纳米BN能明显降低低固相冲洗液的API滤失量。

(2)通过正交实验分析,获得了性能优良的复合纳米低固相冲洗液的配方:3%钠基膨润土+0.5%CMC-HV+0.3%纳米 Fe_3O_4 +0.9%纳米

BN+0.9%MWNTs,其表观粘度为8.25 mPa·s,塑性粘度为6.5 mPa·s,动切力为2.97 Pa,动塑比为0.40,API滤失量为14 mL。

(3)借助SEM观察了复合纳米低固相冲洗液的泥饼的微观形貌,并综合分析了复合纳米材料改善低固相冲洗液性能的作用机理。纳米材料通过致密封堵、氢键吸附等作用,形成具有一定强度的空间网络结构和薄而致密的泥饼,提升了低固相冲洗液的粘度和切力,降低了滤失量。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019,41(4):417-426.
- [2] 王柯淇,王治国,高静怀.金属矿产资源探测的地震方法:综述与展望[J].地球物理学进展,2021,36(4):1607-1629.
WANG Keqi, WANG Zhiguo, GAO Jinghui. Seismic methods for exploration of metal mineral resources: Review and prospect[J]. Progress in Geophysics, 2021,36(4):1607-1629.
- [3] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1806-1822.
RAN Hengqian, ZHANG Jinchang, XIE Wenwei, et al. Applications study of geo-drilling technology[J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1806-1822.
- [4] 张永勤.高效钻探技术是加速“危机矿山接替资源勘探规划”实施的最有效手段[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(1):6-8.
ZHANG Yongqin. High efficiency drilling tech is best way to speed up 'crisis mine replacement resources exploration plan' [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(1):6-8.
- [5] 任伟.综合地质勘探技术在矿山开采中的应用研究[J].世界有色金属,2021(21):43-44.
REN Wei. Application of comprehensive geological exploration technology in mining[J]. World Nonferrous Metals, 2021(21):43-44.
- [6] 周志雄.复杂地层地质钻探冲洗液技术现状[J].四川地质学报,2014,34(S1):104-107.
ZHOU Zhixiong. Current status of flushing fluid technology for geological drilling in complex formations[J]. Acta Geologica Sichuan, 2014,34(S1):104-107.
- [7] 王盛,潘振泉,黄忠高,等.防塌泥浆在朱溪矿区ZK1013孔煤系地层钻探施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):25-28.
WANG Sheng, PAN Zhenquan, HUANG Zhonggao, et al. Ap-

- plication of anti-cave mud in coal formation drilling of ZK1013 of Zhuxi mining area [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(9):25-28.
- [8] 孔祥旺,张绍和,王文彬,等.湘西北复杂构造区破碎地层绳索取心钻进技术难点及优化[J].*煤田地质与勘探*, 2021, 49(2):247-252.
- KONG Xiangwang, ZHANG Shaohu, WANG Wenbin, et al. Difficulties and optimization of wire-line core drilling technology for broken formation in complex structure area of northwest Hunan [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2):247-252.
- [9] 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(2):214-217.
- LIU Zhendong, HE Lunjun, LI Hui, et al. Study on the method of evaluating plugging capacity of nanoparticles used in drilling fluid [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(2):214-217.
- [10] 李强,李志勇,张浩东,等.响应面法优化纳米材料稳定的泡沫钻井液[J].*钻井液与完井液*, 2020, 37(1):23-30.
- LI Qiang, LI Zhiyong, ZHANG Haodong, et al. Study on foam drilling fluid stabilized with nanomaterials optimized with RSM [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(1):23-30.
- [11] 倪晓晓,蒋官澄,王建华,等.油基钻井液用憎液性纳米封堵剂[J].*钻井液与完井液*, 2021, 38(3):298-304.
- NI Xiaoxiao, JIANG Guancheng, WANG Jianhua, et al. Study on a lyophobic nanophase plugging agent for oil base muds [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(3):298-304.
- [12] 谢龙龙,叶成,袁翊,等.准噶尔盆地南缘高温高密度有机盐钻井液技术[J].*科学技术与工程*, 2021, 21(21):8851-8856.
- XIE Longlong, YE Cheng, YUAN Yi, et al. High-temperature and high-density organic salt drilling fluid technology in the southern margin of Junggar Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(21):8851-8856.
- [13] 罗源皓,林凌,郭拥军,等.纳米材料在抗高温钻井液中的应用进展[J/OL].*化工进展*, 2022-02-21:1-15.
- LUO Yuanhao, LIN Ling, GUO Yongjun, et al. Progress in the application of nanomaterials in high temperature resistant drilling fluids [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 1-15 [2022-02-21].
- [14] 胡继良.复杂地层地质钻探冲洗液研究与应用[D].北京:中国地质大学, 2012.
- HU Jiliang. Research and application of complex formation geological drilling fluid [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [15] 冀前辉.煤矿井下碎软煤层泡沫钻进关键技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院研究生院, 2020.
- Ji Qianhui. Research on key technology of foam drilling in underground broken soft coal [D]. Beijing: Graduate School of China Coal Research Institute, 2020.
- [16] 袁成,盛海亮,冯松,等.纳米金复合水凝胶的制备及其应用研究进展[J].*中国科学:化学*, 2021, 51(12):1563-1578.
- YUAN Cheng, SHENG Hailiang, FENG Song, et al. Progress on synthesis and applications of nanogold-based composite hydrogels [J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 2021, 51(12):1563-1578.
- [17] 周宝义,赵贤正,章超,等.钻井液用多功能阳离子聚合物乳液研制及其作用机制[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4):121-127.
- ZHOU Baoyi, ZHAO Xianzheng, ZHANG Chao, et al. Preparation and mechanism of cationic polymer latex as multi-functional additive in water based drilling fluid [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(4):121-127.
- [18] 袁进科,陈礼仪,王军伟,等.青藏高原复杂地层地质钻探低固相冲洗液试验研究[J].*钻探工程*, 2021, 48(4):79-84.
- YUAN Jinke, CHEN Liyi, WANG Junwei, et al. Experimental study on low solid flushing fluid for geological drilling in complex metamorphic of Qing-Tibetan plateau [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4):79-84.

(编辑 荐华)