

文章编号:0253-9993(2013)09-1640-06

纳米材料稳定的微泡沫钻井液降低煤层气储层伤害的实验研究

蔡记华,袁 野,王济君,李鑫杰,曹伟建

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:针对我国煤层气储层低孔低压的特点,笔者提出采用纳米材料暂堵技术与可循环微泡沫钻井液相结合的技术思路。通过泡沫钻井液稳定性评价、钻井液性能参数测试与微观形态观测、煤岩膨胀性测试、煤岩滚动回收率评价、原状煤岩气体渗透率测试等方法,对纳米材料稳定的微泡沫钻井液降低煤层气储层伤害的能力进行了评价。结果表明:纳米材料可以提高泡沫钻井液的稳定性;纳米材料稳定的微泡沫钻井液密度($0.7 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$)与黏度指标可控,并且能有效抑制煤岩基质吸水膨胀,可满足低孔低压煤层的钻进要求;纳米材料稳定的微泡沫钻井液可有效封堵低孔低渗煤层,而通过表层切片处理后,煤岩气体渗透率恢复率达72%~96%。综合来看,纳米材料稳定的微泡沫钻井液不仅可以保证煤层稳定,还能降低对煤储层的伤害,适合低孔低压煤层气储层钻进。

关键词:纳米材料;微泡沫钻井液;煤层气;储层伤害;低孔低压煤层

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A

Experimental research on decreasing coalbed methane formation damage using micro-foam mud stabilized by nanoparticles

CAI Ji-hua, YUAN Ye, WANG Ji-jun, LI Xin-jie, CAO Wei-jian

(School of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: For the low porosity and pressure coalbed methane (CBM) reservoirs in China, the paper adopted the technology thought of combining the temporally plugging technology of the nanomaterials with circulative micro foam drilling fluid. Through the methods of evaluation on the stability of foam drilling fluid, performance tests of drilling fluid and microstructure observation, the expansibility, rolling recovery rate and gas permeability test of original coal rock, the ability of micro-foam mud stabilized by nanoparticles on reducing the damage of CBM reservoir was evaluated. We found that firstly, nanoparticles can improve the stability of foam drilling fluids. Furthermore, the micro-foam mud stabilized by nanoparticles have the advantage of high-controllable density ($0.7 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$) and viscosity, which can adapt to the drilling requirements of the low porosity and pressure coal seam, and which can effectively restrain the adsorption and swelling of coal rock matrix. Finally, the micro-foam mud stabilized by nanoparticles can effectively plug the low porosity and permeability coal seam, while the gas permeability recovery rate of coal is as high as 72%~96% after slice processing for the surface of pollution section of coal rock. With the integrative consideration, the micro-foam mud stabilized by nanoparticles can not only protect coal seam stability, but reduce the reservoir damage of coalbed methane, and is suitable for the low porosity and low pressure coalbed methane reservoirs drilling.

Key words: nanoparticles; micro-foam drilling fluids; coalbed methane; reservoir damage; low porosity and low pressure coal seam

我国煤层大多具有低孔低渗的特点,在总体上则以微孔为主、过渡孔次之,中孔和大孔的比例相对较

收稿日期:2013-06-07 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072111);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG120112, CUG130612)

作者简介:蔡记华(1978—),男,湖北浠水人,副教授,博士。Tel:027-67883538, E-mail:catchercai@126.com

小。以沁水盆地煤层气储层为例,该区域储层孔喉半径多分布在 $0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ^[1-3]。笔者利用全自动比表面积及孔隙度分析仪对晋城3号煤层的代表性煤样进行分析,发现其孔隙直径分布在 $0.002 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。

同时,煤层气钻井面临众多问题:煤的机械强度低,易于垮塌、破碎;钻开后的煤层,浸泡时间越长,煤层吸水膨胀或垮塌越厉害;煤岩微裂缝、孔隙发育,节理也相当发育,且地层孔隙压力低,容易发生漏失^[4]。因此,在低孔低压煤层气钻井过程中钻井液不仅要保持孔壁稳定,更要尽可能降低对煤储层的伤害^[5-10]。就钻井液来看,清水携带岩屑的能力差,且容易引起地层坍塌、掉块等问题。传统钻井液技术虽然能较好地解决了孔壁失稳问题,但其对煤层气储层损害严重;空气钻进难以直接应用于不稳定煤层,主要适用于目的层浅、储层压力低、地层较硬及裂缝发育的煤层^[11-12]。

可循环微泡沫钻井液具有低密度特性,可适应低压煤层钻进需求。它不需要专门的泡沫发生器,只要具备搅拌或流动条件即可^[13],且循环一周后只需补充少量处理剂,再经搅拌便可循环使用,节约了处理剂用量,大大降低了钻井成本。

在此,针对低孔低压煤层气储层特点,笔者提出采用纳米材料暂堵技术与可循环微泡沫钻井液相结合的技术思路。笔者通过泡沫钻井液稳定性评价、钻井液性能参数测试与微观形态观测、煤岩膨胀性测试、煤岩滚动回收率评价与煤岩气体渗透率测试等方法,对纳米材料稳定的微泡沫钻井液降低煤层气储层伤害的能力进行了评价。

1 实验材料和实验仪器

1.1 实验材料

① 纳米二氧化硅(质量浓度30%,杭州万景新材料有限公司生产);② 发泡剂:十二烷基苯磺酸钠(ABS)、十二烷基硫酸钠(K_{12});③ 稳泡剂:XC, CMC, PAC;④ 钠膨润土(山东华潍产);⑤ 煤样取自晋城煤矿3号煤层,它主要以非晶质组分(59%)、方解石(20%)和白云石(15%)为主,并含少量的高岭石(5%)和石英(1%)。原状煤样如图1(a)所示,使用取芯钻机钻取直径25 mm的煤岩芯若干,如图1(b)所示;将原煤磨成10~20目粉末,如图1(c)所示;将4.6 g 140~160目的煤样粉末与0.4 g黏土粉均匀混合,加适量水玻璃与氯化钙溶液(1:1),在岩芯压制机上15 MPa压力作用下压制20 min,取出即可得到实验所需煤样(直径为25 mm、长度9.2 mm),如图1(d)所示。

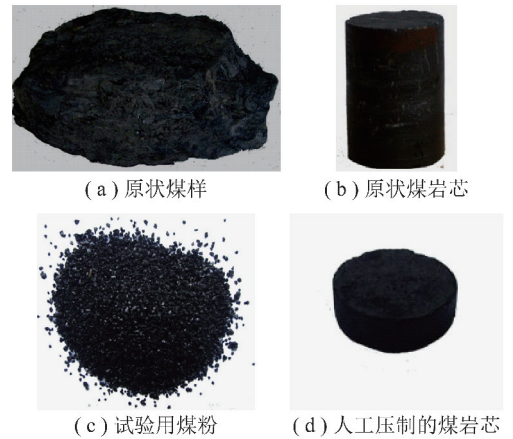


图1 实验用煤样

Fig. 1 Tested coal samples

1.2 实验仪器

FA1004 电子天平、GJD-B12K 单轴变频高速搅拌机、ZNN-D6 六速旋转黏度计、ZNS-5A 型中压滤失仪、OFITE 滚子加热炉、中兴101型电热鼓风干燥箱、JHP 岩芯压制机、ZNP-1 型膨胀量测定仪、SC-50B 型立式取芯机、QM-1 型岩芯端面切磨二用机、JHGP 智能气体渗透率测定仪、JHCF 岩芯流动试验仪和金相电子显微镜等。

2 实验方法

2.1 纳米材料对泡沫钻井液的稳定性影响

4种泡沫钻井液的配方:① 水+0.3% ABS+0.3% CMC;② 水+0.3% ABS+0.3% XC;③ 水+0.3% K_{12} +0.3% CMC;④ 水+0.3% K_{12} +0.3% XC。纳米二氧化硅加量在 $0 \sim 0.125\%$ 。

取清水100 mL,分别称取两份发泡剂、稳泡剂和纳米二氧化硅,在10 000 r/min转速下搅拌60 s,测试发泡体积和半衰期,分析结果如图2所示。

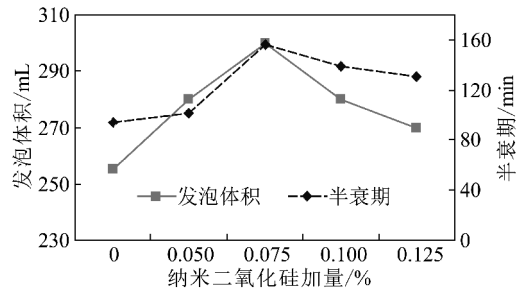


图2 纳米二氧化硅对泡沫钻井液稳定性的影响(配方②)

Fig. 2 Influence of silica nanoparticles on the stability of foam mud (formula ②)

2.2 纳米材料对微泡沫钻井液的稳定性影响

相对于普通泡沫钻井液而言,微泡沫钻井液更加稳定、半衰期较长,采用传统半衰期测试方法易出现

误差。这里通过观测低黏无固相微泡沫钻井液(简称 SFFM(低黏))的密度变化来评价其稳定性,即密度增加越快,稳定性越差。这里密度变化率=100%× $[(\rho_i-\rho_0)/\rho_0]$,其中, ρ_i 为某时间密度, ρ_0 为初始密度,结果如图 3 所示。SFFM(低黏)的配方:水+0.1% CMC+0.2% DFD+0.005% K_{12} +0.2% XC+0.1% PAC。

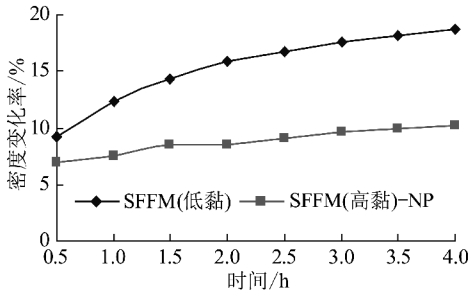


图 3 微泡沫钻井液密度变化率的对比
Fig. 3 Comparison of the density changing percent of micro-foam drilling

2.3 微泡沫钻井液的性能与微观形态评价

通过室内实验优选出纳米材料稳定的无固相泡沫钻井液(SFFM(低黏)-NP 和 SFFM(高黏)-NP)、低固相泡沫钻井液(LSFM-NP)优选配方:

SFFM(低黏)-NP, 水+0.1% CMC+0.2% DFD+0.005% K_{12} +0.2% XC+0.1% PAC+2% SiO_2 ;

SFFM(高黏)-NP, 水+0.2% CMC+0.5% DFD+0.01% K_{12} +0.3% XC+0.2% PAC+2% SiO_2 ;

LSFM-NP, 水+3% 钠土+0.005% K_{12} +0.2% XC+0.1% PAC+2% SiO_2 。

3 种配方的钻井液基本性能和微观形态分别如表 1 和图 4 所示。

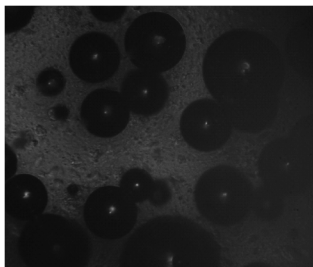
2.4 膨胀性测试

晋城矿区部分煤层气井显微煤岩组分测试结果表明,黏土矿物在 3 号煤层和 15 号煤层的平均含量分别是 8.3% 和 8.7%。因此,笔者在人工煤样的制作过程中添加了质量含量为 8% 的钠膨润土。将清水、3% 钠土钻井液、3% KCl 溶液、SFFM(高黏)-NP

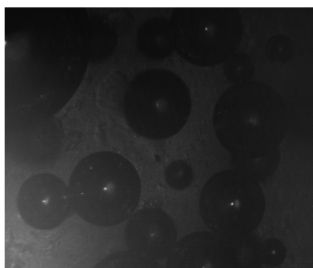
表 1 含纳米材料的微泡沫钻井液基本性能

Table 1 Basic properties of micro-foam mud containing NPs

钻井液类型	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	表观黏度/($mPa \cdot s$)	塑性黏度/($mPa \cdot s$)	动切力/Pa	初切力/Pa,终切力/Pa	滤失量/mL
SFFM(低黏)-NP	0.885	19.5	15.0	4.5	0.4,0.50	—
SFFM(高黏)-NP	0.872	37.5	20.5	17.0	2.5,2.75	—
LSFM-NP	0.788	27.5	18.5	9.0	4.0,5.50	17.5



(a) SFFM(高黏)-NP



(b) LSFM-NP

图 4 微泡沫钻井液放大 50 倍以后的微观形态
Fig. 4 The microstructure of micro-foam drilling fluids magnified for 50 times

与 LSFM-NP 作为介质与人工煤样(直径为 25 mm、长度 9.2 mm)接触。每隔 0.5 h 读取膨胀量数

据(mm),结果如图 5 所示。

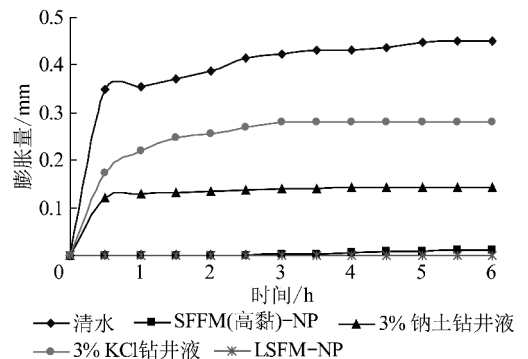


图 5 不同钻井液对煤岩膨胀性的影响曲线

Fig. 5 Impact curves of varied drilling fluids on the expansibility of coal samples

2.5 滚动回收率测试

称取 50 g 10~20 目煤样分别与清水、3% 钠土钻井液、3% KCl 溶液、SFFM(高黏)-NP 与 LSFM-NP 倒入老化罐中,在 30 ℃、16 h 热滚老化,40 目回收。100 ℃下烘干 4 h,再冷却 2 h 后称量煤样质量(g),计算回收率(%),结果见表 2。

表2 不同钻井液对煤岩滚动回收率的影响

Table 2 Impact of varied drilling fluids on the roller recovery rate of coal samples

钻井液类型	滚动回收率/%
清水	95.00
3% 钠土钻井液	95.26
3% KCl 钻井液	93.68
SFFM(高黏)-NP	95.06
LSFM-NP	95.74

2.6 原状煤岩气测渗透率

① 取煤样 1~3 号,在室温用 JHGP 智能气体渗透率测定仪正向测试煤岩芯的初始气测(氮气,下同)渗透率,记为 K_0 ;② 用 JHCF 岩芯流动实验仪在围压 2 MPa、轴压 1 MPa 的条件下,用 SFFM(高黏)-NP 工作液对煤岩芯进行反向驱替(污染)2 h,将污染后的煤岩芯正向测试气体渗透率,记为 K_1 ;③ 将污染后的煤岩芯的被污染端切片 5~8 mm,正向测试气测渗透率,记为 K_2 ;④ 对 4~7 号煤岩芯的实验方法同 1 号,将 SFFM(高黏)-NP 工作液分别换成 LSFM-NP 工作液(4,5 号)和 3% KCl 溶液(6,7 号),其他处理步骤同 1~3 号煤样,注意记录步骤②过程中的漏失量。本实验中,与煤岩接触的 1~3 号是 SFFM(高黏)-NP,4~5 号是 LSFM-NP,6~7 号是 KCl 溶液。

3 结果与讨论

3.1 纳米二氧化硅对泡沫钻井液稳定性的影响

实验发现,相对于普通的泡沫钻井液,含有纳米二氧化硅的泡沫钻井液发泡体积更大,半衰期更长,即稳定性更好,配方②的实验结果如图 2 所示。4 种泡沫配方发泡体积的增幅在 10%~15%,半衰期的增幅在 14.20%~26.18%;而且纳米二氧化硅的添加量在 0.05%~0.10% 时,纳米二氧化硅稳定泡沫的效果明显,且添加量为 0.075% 时性能最优。

从理论上来看,对于纳米材料而言,它到达或离开泡沫表面所需能量要大于常规表面活性剂,因此由纳米材料稳定的泡沫钻井液稳定性更好^[14]。

3.2 纳米二氧化硅对微泡沫钻井液稳定性的影响

实验发现,同一配方的微泡沫钻井液体系的发泡量随制备方法不同而不同,发泡时间越长和搅拌速度较快可以增加发泡量,使体系密度更低。在后续实验中统一采用 3 000 r/min、搅拌时间为 20 min。而 SFFM(低黏)-NP 相对 SFFM(低黏)的密度增加幅度要小(图 3),这也说明纳米二氧化硅可以提高微泡沫钻井液的稳定性。

3.3 微泡沫钻井液的基本性能与微观形态

由表 1 可以看出,无固相微泡沫钻井液的流变参数优良且可控,可以满足低压煤层钻进需求。但其 API 失水量偏大,不宜测量。而实际钻遇低压煤层时,可以通过控制微泡沫钻井液的密度实现欠平衡钻进或近平衡钻进,因此不会产生正压差(即钻井液液柱压力小于等于煤层孔隙水压力),从而防止滤失(漏失)的发生。

另外,经过 2~3 d 的观察,发现低固相微泡沫钻井液的稳定性较好(胶体率大于 98%)。而纳米二氧化硅颗粒与钠土配合使用可以显著地封堵滤纸的孔隙,降低失水量^[15]。

分别对 SFFM(高黏)-NP 和 LSFM-NP 两种微泡沫钻井液进行显微观察,结果如图 4 所示。表明:① 在常温常压下,微泡沫钻井液中泡沫是以非聚集、非连续态的形式存在的稳定分散体系,气泡外形为大小不等的圆球体,其粒径主要集中在 30~200 μm ;② 气泡群体可能以单个悬浮和部分相互连接的方式存在于体系中,其稳定性主要是依靠膜的强度和连续相的特定性能共同实现^[16];③ 微气泡之间为点接触,基本不存在 Plateau 边界,泡沫稳定性较好。

3.4 煤岩膨胀性测试

由图 5 可知,煤样与清水接触时膨胀量较大,表明清水也会对高黏土含量的煤储层造成伤害,而煤样与 SFFM(高黏)-NP 及 LSFM-NP 接触时的膨胀量相对最小,6 h 后的膨胀量仅为 0.01 mm。含纳米材料的微泡沫钻井液主要通过纳米颗粒填充部分煤样孔隙,同时 CMC, XC 和 PAC 等大分子在煤样表面形成隔膜,且低密度的泡沫液不易侵入煤样,使得钻井液中的水分不易与煤样进一步接触,从而抑制了煤岩的膨胀。

3.5 煤粒滚动回收率测试

由表 2 可知,10~20 目煤粒在清水中的滚动后,用 40 目筛回收的回收率较高,普通钻井液的回收率也较高,而纳米材料稳定的低固相微泡沫钻井液(LSFM-NP)的回收率略高于前 3 者(清水、钠土泥浆、KCl 溶液)。表明 LSFM-NP 有一定抑制煤粒的水化分散的能力。纳米材料稳定的微泡沫钻井液主要通过纳米颗粒封堵煤粒孔隙、高分子及微小泡沫吸附在煤粒表面,减少其与钻井液中的水分接触,从而抑制煤粒的水化分散。

3.6 原状煤岩气测渗透率测试

结合表 3 与图 6 可以发现:

(1) 1~3 号煤岩芯的初始平均气测渗透率分别为 8.26×10^{-15} , 5.43×10^{-15} , $2.28 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 在

表 3 原状煤岩芯气测渗透率测试结果

Table 3 Gas permeability testing results of original coal core samples

编号	长度/mm	上流压力/MPa	$K_0/(10^{-15} \text{ m}^2)$	$K_1/(10^{-15} \text{ m}^2)$	$\Delta K_1/\%$	$K_2/(10^{-15} \text{ m}^2)$	$\Delta K_2/\%$
1 号	19.28	0.35	8.19	2.29	72.00	6.61	80.78
		0.38	8.22	2.23	72.92	7.38	89.76
		0.40	8.37	2.23	73.39	7.22	86.34
	平均值		8.26	2.25	72.77	7.07	85.63
2 号	29.68	0.35	5.45	2.77	49.13	4.43	81.18
		0.38	5.41	2.69	50.24	4.19	77.55
		0.40	5.44	2.67	50.87	3.88	71.29
	平均值		5.43	2.71	50.08	4.16	76.68
3 号	29.10	0.35	2.32	1.39	40.00	2.03	87.81
		0.38	2.28	1.34	40.91	1.92	84.56
		0.40	2.25	1.32	41.24	1.92	85.53
	平均值		2.28	1.35	40.72	1.96	85.97
4 号	28.88	0.35	4.17	2.54	38.97	3.11	74.59
		0.38	4.11	2.52	38.75	2.99	72.79
		0.40	4.10	2.53	38.38	2.94	71.56
	平均值		4.13	2.53	38.70	3.01	72.98
5 号	38.12	0.45	1.82	1.30	28.57	1.79	98.52
		0.48	1.90	1.34	29.35	1.83	96.20
		0.50	1.95	1.40	28.16	1.84	94.11
	平均值		1.89	1.35	28.69	1.82	96.27
6 号	25.25	0.35	10.59	5.63	*	*	53.16
		0.38	10.32	5.61	*	*	54.35
		0.40	10.45	5.73	*	*	54.81
	平均值		10.46	5.66	*	*	54.11
7 号	21.53	0.35	2.86	1.42	*	*	49.60
		0.38	2.74	1.38	*	*	50.35
		0.40	2.78	1.30	*	*	46.91
	平均值		2.79	1.37	*	*	48.95

注:① 围压为 0.9 MPa,下流压力(出口压力)为 0.1 MPa(即 1 个大气压);② $\Delta K_1 = [(K_0 - K_1)/K_0] \times 100\%$,表示渗透率降低率;③ $\Delta K_2 = K_2/K_0 \times 100\%$,表示渗透率恢复率;④ * 表示由于煤岩芯被全面污染,未做切片处理,此时 $\Delta K_2 = K_1/K_0 \times 100\%$ 。

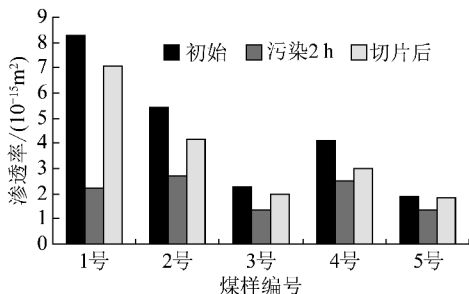


图 6 不同测试阶段煤岩芯的气测渗透率变化

Fig. 6 Comparison of average gas permeability of coal core during various testing stage

SFFM(高黏)-NP 工作液污染 2 h(围压 2 MPa,上流压力 1 MPa)后均无渗漏,平均气测渗透率均有不同程度的降低,分别为 2.25×10^{-15} , 2.71×10^{-15} , $1.35 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,降低率分别为 72.77%, 50.08%, 40.72%。而经过切片处理(切除 5~8 mm)以后,气测渗透率分别为 7.07×10^{-15} , 4.16×10^{-15} , $1.96 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均恢复率为 85.63%, 76.68%, 85.97%。表明纳米材料稳定的微泡沫钻井液具有较强的封堵能力,在切除污染端表层以后,纳米材料稳定的微泡沫钻井液对煤储层的伤害深度较浅,渗透率恢复值较高。

(2) 4~5 号煤岩芯的初始平均气测渗透率分别

为 4.13×10^{-15} , 1.89×10^{-15} m^2 , 在 LSFM-NP 工作液污染 2 h (围压 2 MPa, 上流压力 1 MPa) 后均无渗漏, 平均气测渗透率分别为 2.53×10^{-15} , 1.35×10^{-15} m^2 , 渗透率降低率分别为 38.70%, 28.69%。而经过切片处理(切除 5~8 mm)以后, 气测渗透率分别为 3.01×10^{-15} , 1.82×10^{-15} m^2 , 平均恢复率为 72.98%, 96.27%, 渗透率变化规律同上。

(3) 6~7 号煤岩芯的初始平均气测渗透率分别为 10.46×10^{-15} , 2.79×10^{-15} m^2 , 在 3% KCl 清水工作液污染 2 h (围压 2 MPa, 上流压力 1 MPa) 后有不同程度的漏失, 6 号漏失 7.68 mL, 7 号漏失 0.2 mL, 表明 KCl 溶液已经污染整个煤岩芯, 所以未做切片处理。污染后平均渗透率为 5.66×10^{-15} , 1.37×10^{-15} m^2 , 平均气测渗透率恢复低于 60%, 由此表明 KCl 溶液对煤储层的侵入较深, 清除工作液对储层伤害的难度加大。

(4) SFFM(高黏)-NP(LSFM-NP)工作液相对于煤层气钻进常用的 KCl 清水工作液具有更好的封堵能力, 其主要通过纳米二氧化硅颗粒封堵煤岩纳米级孔喉, 且通过 XC, CMC, PAC 等高分子聚合物形成隔膜降低煤岩的渗透率, 同时微泡沫液的密度较低, 工作液与地层之间压差小, 由此进一步减弱对煤岩的侵蚀, 从而对储层伤害的程度较低。钻完井后可通过射孔及水力压裂技术来消除钻井液对储层的伤害。

4 结 论

(1) 纳米二氧化硅材料可以提高泡沫体系的稳定性。

(2) 纳米材料稳定的微泡沫钻井液密度 ($0.7 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$) 与黏度可控, 具有微泡沫液的低密度性与较强稳定性, 从而能抑制高黏土含量的煤岩基质吸水膨胀, 可实现以近平衡或欠平衡的方式钻进低孔低压煤层。

(3) 纳米材料稳定的微泡沫钻井液通过纳米颗粒封堵煤岩的纳米级孔喉、高分子聚合物形成隔膜及微泡沫钻井液的低密度降低压差, 从而降低对煤储层的伤害(渗透率恢复率达 72%~96%), 相对于 KCl 溶液等传统的煤层钻井液而言(渗透率恢复率低于 60%), 其储层保护效果更好。

参考文献:

[1] 叶建平, 秦 勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
 [2] 许 浩, 张尚虎, 冷 雪, 等. 沁水盆地煤储层孔隙系统模型与物性分析[J]. 科学通报, 2005, 50(S): 45-50.
 Xu Hao, Zhang Shanghu, Leng Xue, et al. Coal reservoir pore sys-

tem model and physical property analysis in Qinshui basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S): 45-50.
 [3] 王明寿, 汤达祯, 魏永佩, 等. 沁水盆地北端煤层气储层特征及富集机制[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 440-444.
 Wang Mingshou, Tang Dazhen, Wei Yongpei, et al. Reservoir characteristics and enrichment mechanism of the coalbed gas in the north Qinshui basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(5): 440-444.
 [4] 崔凯华, 郑洪涛. 煤层气开采[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
 [5] Len V Baltoiu, Brent K Warren, Thanos A Natras. State-of-the-art in coalbed methane drilling fluids[J]. SPE Drilling & Completion, 2008, 23(3): 250-257.
 [6] Barr K. A guideline to optimize drilling fluids for coalbed methane reservoirs[J]. SPE 123175-MS, 2009.
 [7] Cai Jihua, Wu Xiaoming, Gu Sui. Research on environmentally safe temporarily plugging drilling fluid in Water Well Drilling[J]. SPE 122437-MS, 2009.
 [8] 蔡记华, 刘 浩, 陈 宇, 等. 煤层气水平井可降解钻井液体系研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1683-1688.
 Cai Jihua, Liu Hao, Chen Yu, et al. Study on degradable drilling fluid system for coalbed methane horizontal drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1683-1688.
 [9] 蔡记华, 乌效鸣, 刘 浩, 等. 一种松软煤层钻进用的可降解钻井液[P]. 中国专利: 102516957A, 2012-06-27.
 [10] 蔡记华, 王济君, 袁 野, 等. 盐溶液对煤岩抑制性效果评价[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 951-956.
 Cai Jihua, Wang Jijun, Yuan Ye, et al. Inhibitive ability appraisal of salt solution on coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 951-956.
 [11] 叶建平, 石慧宁. 煤层气多分支水平井技术在沁水盆地南部的试验和应用[A]. 煤层气开发利用技术国际研讨会[C]. 2010.
 [12] 秦 勇, 袁 亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 1-6.
 Qin Yong, Yuan Liang, Hu Qianting, et al. Status and development orientation coal bed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 1-6.
 [13] 李晓明, 蒲晓林. 可循环微泡沫钻井液研究[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(6): 53-56.
 Li Xiaoming, Pu Xiaolin. Research of circulative micro-foam drilling fluid[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(6): 53-56.
 [14] David Ryan Espinosa. Nanoparticle-stabilized supercritical CO₂ foams for potential mobility control applications[D]. Texas: University of Texas at Austin, 2011.
 [15] 袁 野, 蔡记华, 王济君. 纳米二氧化硅改善钻井液降滤失性能的研究[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(3): 30-33.
 Yuan Ye, Cai Jihua, Wang Jijun. Experimental study on improving filtration properties of drilling muds using silica nanoparticles[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 30-33.
 [16] 张振华. 可循环微泡沫钻井液研究及应用[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 92-95.
 Zhang Zhenhua. Preparation and application of circulative micro-foam drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 92-95.