

表面活性剂对煤层气压裂伤害研究

夏永江^{1,2}, 管保山², 梁利², 刘萍²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

摘要 为评价压裂液中表面活性剂对煤层气压裂过程的影响, 利用煤岩样品针对阳离子、非离子、阴离子表面活性剂和表面活性剂复配体系, 开展膨胀性、润湿性、吸附性能、表面张力、煤岩伤害和煤层气吸附解吸附物理模拟实验。将不同表面活性剂和复配体系的煤岩膨胀高度、接触角、煤粉中吸附形态和吸附量、措施前后表面张力和煤岩渗透率、吸附和解吸附曲线进行对比分析, 进而优选表面活性剂体系。研究表明: 水和表面活性剂溶液对所选煤岩膨胀性影响不大; 阳离子可以增加憎水性, 非离子保持煤岩水润湿性, 阴离子会增加煤岩水润湿性; 非离子表面活性剂有利于扩大煤岩孔隙进而提高煤层气的解吸附作用; 双子表面活性剂(GM)为点状吸附, 烷基酚聚氧乙烯醚(OP)为平铺吸附, 十八烷基三甲基氯化铵(1831)为连体状吸附; 双子-烷基酚聚氧乙烯醚(GMOP-4)复配体系措施前后表面张力较低, 大幅度降低了GM的吸附量且对煤层气解吸附过程具有促进作用; GMOP-4复配体系实现了阳离子表面活性剂在煤层气压裂措施中低成本、高性能的应用。

关键词 煤层气; 水力压裂; 表面活性剂; 煤岩伤害实验

中图分类号 TE37

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.004

Fracturing Damage of Coal Bed Methane Caused by Surfactants

XIA Yongjiang^{1,2}, GUAN Baoshan², LIANG Li², LIU Ping²

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2. Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, China

Abstract The coal expansibility, wettability, adsorption, surface tension, damage, adsorption and desorption experiments of cationic surfactant, nonionic surfactant and anionic surfactant were performed to investigate the effect of surfactants on hydraulic fracturing in coal bed methane (CBM) reservoir. The expansion height, contact angle, adsorption forms and absorbance, the surface tension and permeability of coal samples before and after damage, adsorption and desorption of different surfactants and compounded systems were compared and analyzed to identify the optimal system. The investigation shows that the surfactants and water have little effect on coal expansibility. The cationic surfactant increases the coal sample's hydrophobicity, the nonionic surfactant maintains the coal wettability, and the anionic surfactant increases the coal hydrophilia. The nonionic surfactant enlarges coal porosity and accelerates coal gas desorption. The GM is dot adsorption, OP is tile adsorption, and 1831 is conjoined structure adsorption. The GMOP-4 compounded system with low surface tension significantly decreases the GM adsorption volume and accelerates coal gas desorption. The GMOP-4 compounded system realizes the low-cost and high-performance application of cationic surfactants in CBM hydraulic fracturing.

Keywords CBM; hydraulic fracturing; surfactant; coal sample damage experiment

中国煤层气资源丰富, 仅沁水盆地已探明煤层气储量就达到 $325 \times 10^8 \text{ m}^3$, 合理开发利用前景广阔^[1-4]。煤层气主要以3种形式赋存于煤层中, 即以吸附态吸附在煤孔隙表面上、游离态存储于煤孔隙及裂隙内、溶解态存储在煤层水中。煤化

作用生成的甲烷气体通常先满足吸附, 然后是溶解和游离析出, 故此煤层气的主要赋存状态是吸附态^[5,6]。通常吸附气占整个煤层气地质储量的90%以上, 游离气和溶解气不足10%^[7,8]。

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2014-01-15

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05037)

作者简介: 夏永江, 博士后, 研究方向为储层改造, 电子信箱: xiayongjiang3286@163.com

引用格式: 夏永江, 管保山, 梁利, 等. 表面活性剂对煤层气压裂伤害研究[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 32-38.

煤层气开发过程中,水在细微孔隙中封闭着煤层气的解吸流动通道。随孔隙直径减小,孔隙中水施加于气体的流动阻力显著增加^[9-13]。研究表明,注水后煤层中气体的释放速度可以降低90%,如需达到干煤样的气体释放速度,需要在大气中放置5~6个月^[14-18]。

煤层气压裂改造时,水基压裂液进入煤层后会对煤层造成一定伤害。压裂液对煤层的伤害程度与压裂液性质和煤层发育条件相关。注水封堵瓦斯研究显示,将煤表面的水润湿性改善的越好,煤层气解吸效率及速度越低^[1,19]。煤层气压裂增产措施的主要目的是为煤层气的脱附建立高速通道,通道对煤气的阻力大小直接影响煤气脱附效率。压裂液对煤岩吸附气体解吸阻力的影响也影响煤气脱附速度,研究煤层气脱附机理有助于更好地选择压裂液中的携砂液。通过室内实验研究水基压裂液中表面活性剂对煤层气解吸的影响,定量给出不同表面活性剂对煤层气解吸过程的作用,选择表面活性高、煤层气解吸效率高、煤层伤害小同时适合煤层气压裂的表面活性剂体系。

1 实验设计

评价压裂液中表面活性剂体系性能的方法主要包括膨胀性实验、润湿性实验、表面活性剂在煤粉中的吸附性能、表面张力分析、煤岩伤害实验^[20-26]等。采用煤层压裂液中常用的表面活性剂^[20-24]为基础,复配不同比例的新型表面活性剂,利用给定煤岩样品进行实验评价,优出最优的表面活性剂体系作为煤层压裂液的添加剂。

1.1 实验材料

烷基酚聚氧乙烯醚-15(OP-15,天津市北仁化工厂),十八烷基三甲基氯化铵(1831,天津市奔澎表面化学助剂厂),双子表面活性剂(GM,天津科技大学),脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠(AES,天津天智精细化工有限公司),煤粉(韩城,黏土质量分数14.4%)。

1.2 实验设备

PGX 动静接触角测定仪(瑞典 Fibro system AB 公司),BZY-B 型自动表面张力仪(上海方瑞仪器有限公司),756PC 型紫外可见分光光度计(上海光谱仪器有限公司),JSPM-5200 原子力显微镜(AFM,日本电子公司),Easysizer20 激光粒度仪(珠海欧美克仪器有限公司),液体对煤岩解吸影响(排液)实验装置及数据采集系统(中国石油勘探开发研究院廊坊分院),煤岩伤害实验装置(中国石油勘探开发研究院廊坊分院)。

1.3 实验方法

1.3.1 原子力显微镜测定

室温条件下首先将新鲜剥离的天然云母片(约1 cm×1 cm)置于20 mL待测溶液中浸泡72 h,然后将天然云母片取出浸入20 mL清水中超声清洗15 min,最后取出云母片自然晾干,采用轻敲模式进行AFM观测,除平整修饰外无其他处理。实验使用的探针型号Tap 300Al,共振频率(300±100) kHz,力

常数40 N·m⁻¹。

1.3.2 煤粉洗出率测定

称取40.00 g石英砂和200目煤粉1.00 g充分混合,转移至玻璃管中。通过调整流量控制阀控制流速在20 mL/min左右,过滤煤粉悬浮剂洗出液。将滤纸和滤饼置于恒温干燥箱中105℃条件下干燥1 h,取出在室温条件下称重即为携带出煤粉的重量。通过携带出煤粉和总煤粉重量计算携带出煤粉的质量分数,即为煤粉洗出率。

1.3.3 煤片制备

将煤样粉碎,过200目筛,得到煤粉。称取0.25 g煤粉,用粉末压片机在5.0 MPa压力下制成直径10 mm的煤粉片,存于干燥器中备用。

1.3.4 煤层气解吸模拟实验

测试液体对吸附甲烷煤样解吸特性的影响,具体实验过程如下:

1) 将处理好的干燥煤样装入吸附罐,高温抽真空至10 Pa以下。脱气结束后向吸附罐中充入氦气标定煤样的自由体积,依据高压容量法测试干燥煤样的解吸等温线;

2) 对实验煤样重新抽真空至10 Pa以下,设定水浴温度为(30±0.5)℃,多次充入一定体积的甲烷待吸附平衡后,记录平衡压力;

3) 系统平衡8 h后,记录平衡压力。通过注液泵以设定的注液压力和注液速度对煤样进行注液。注液过程中,记录吸附罐内气体压力变化。当注液量达到设定值后停泵,以称重方法计量注液量。

2 分析与讨论

2.1 煤岩膨胀性实验分析

由于煤的润湿性较差,难以利用线性膨胀仪准确测量煤样的线性膨胀量^[27,28]。本文通过离心法测定煤样的膨胀高度。将煤样品粉碎后过100目筛,在105℃条件下烘干4 h,测试结果见表1。由测试结果可知,煤岩样品在水中的膨胀高度与煤岩样品在煤油中的膨胀高度相同。尽管煤岩中含有一定量黏土,但在水中基本测不出膨胀性(参考样品在煤油中的膨胀高度),水和表面活性剂水溶液对该煤岩膨胀性影响不大。

表1 煤岩水膨胀测试结果

Table 1 Experimental result of coal expansibility

序号	实验液体	添加剂质量分数(0.5%)	膨胀高度/mm
1	水	—	1.0
2	水	GM	0.9
3	水	1831	0.9
4	水	OP-15	1.1
5	水	AES	1.0
6	煤油	—	1.0

2.2 煤粉润湿性实验分析

表面活性剂在固体表面作用分3个阶段^[1]:煤岩表面润湿,裂缝中渗流,微孔中扩散。在注液条件下,液态水在外力作用下先进入煤岩孔隙。水相克服界面张力后,煤岩孔隙内表面被润湿进而形成水膜。煤分子和第一层水分子间存在极强的偶极力,导致水相在煤岩孔隙内表面形成连续的水分子吸附层。连续水分子层能够将吸附在煤岩孔隙表面上的甲烷置换出来。第一层水分子形成后,氢键作用会形成多个水分子吸附层。水分子吸附层的存在阻碍了细微孔隙中煤层气的解吸附。

将煤粉片在 600 mg/L 待测溶液中浸泡 48 h, 自然晾干 24 h, 测定 0~10 s 内蒸馏水在煤粉片上的动态接触角。图 1 给出了不同溶液动态接触角随时间的变化曲线。由图 1 可知:水对煤岩润湿角随时间略有下降,表明水对煤岩具有一定的润湿性;阳离子表面活性剂与煤岩接触角随时间略有下降,其中 GM 具有更大的接触角并能够增加煤岩的憎水性;非离子表面活性剂(OP-15)与煤岩接触角基本保持恒定,表明该表面活性剂能够保持煤岩的水润湿性特征;阴离子表面活性剂与煤岩接触角随时间明显下降,表明该表面活性剂能够大幅度增加煤岩的水润性。根据不同溶液动态接触角变化规律,OP-15 和 GM 能够保持煤岩水润性或提高憎水性且有利于煤层气解吸附。

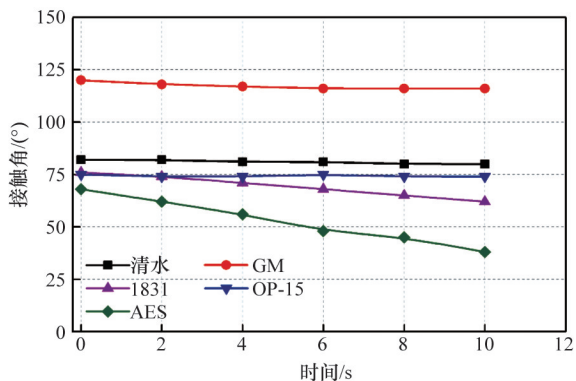


图1 不同液体对煤岩的润湿角变化曲线

Fig.1 Contact angle variation between different fluids and coal sample

2.3 表面活性剂在煤粉中的吸附性能

2.3.1 单组份液体在煤粉中吸附量

将煤粉在一定浓度待测溶液中浸泡 48 h, 过滤后测定滤液的剩余浓度, 计算表面活性剂在煤粉中的吸附量。图 2 给出了不同溶液中煤粉吸附量变化曲线。由图 2 可知, 阳离子表面活性剂在煤粉中吸附量较大。非离子表面活性剂出现负吸附, 这主要是由于非离子表面活性剂将煤粉中的某些组分洗脱下来, 这些组分刚好在紫外区与 OP-15 吸收波长一致。非离子表面活性剂有利于扩大煤岩孔隙进而提高煤层气的解吸附作用。阴离子表面活性剂吸附量较小, 然而考虑到煤岩水润性的影响不宜在煤层气开采中使用。

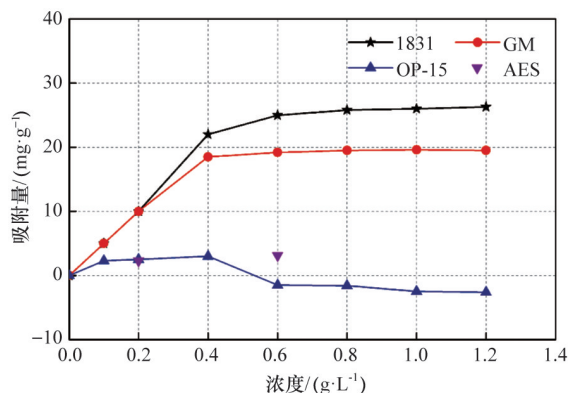


图2 不同浓度条件下液体在煤粉中的吸附量

Fig. 2 Fluid adsorption capacities under different fluid concentrations

2.3.2 复合液体在煤粉中吸附量

采用非离子和 GM 复配制备性能更佳的体系。固定 GM 浓度, 逐渐增大 OP-15 浓度, 测定不同浓度体系中煤粉对 GM 的吸附量, 结果见表 2。非离子与 GM 复配后, 非离子与阳离子表面活性剂存在竞争吸附, 水润接触角优于单独使用非离子的方案而 GM 的吸附量大大降低。考虑非离子表面活性剂用量及经济效益, 认为 GMOP-4 (GM 与 OP-15 质量分数比为 1:4) 为最优体系。

表2 复配体系中GM吸附及接触角

Table2 GM adsorptions and contact angles of different compounded systems

GM与OP-15 质量分数比	GM的吸附量/ (mg·g ⁻¹)	接触角(°)
仅GM	19.5	118
1:1	12.5	112
1:2	9.7	106
1:4	7.8	95
1:6	2.4	88

2.3.3 表面活性剂吸附机理

3种表面活性剂吸附量分析表明, 阳离子吸附量最大, 其次为非离子, 阴离子吸附量最小。将表面活性剂吸附在云母片上, 采用原子力显微镜观察吸附状态, 进一步揭示其吸附机理。图 3 给出了不同表面活性剂对应的原子力显微镜图。阳离子表面活性剂带正电荷, 煤岩表面的羧基、酚羟基等官能团发生电离, 使得煤表面带负电。当阳离子表面活性剂浓度较低时, 由于正负电荷之间易产生静电作用, 带正电荷的阳离子基团吸附于煤粉表面, 即亲水基朝向煤粉表面, 而疏水的长碳链烃基裸露在外, 形成单层吸附, 此时煤粉表面为憎水性质。当浓度较高时, 发生双层吸附及胶束吸附, 表面活性剂亲水基朝上, 煤粉表现出弱亲水性质。双链阳离子表面活性剂具有较高的电荷密度, 对应的单层吸附量明显低于

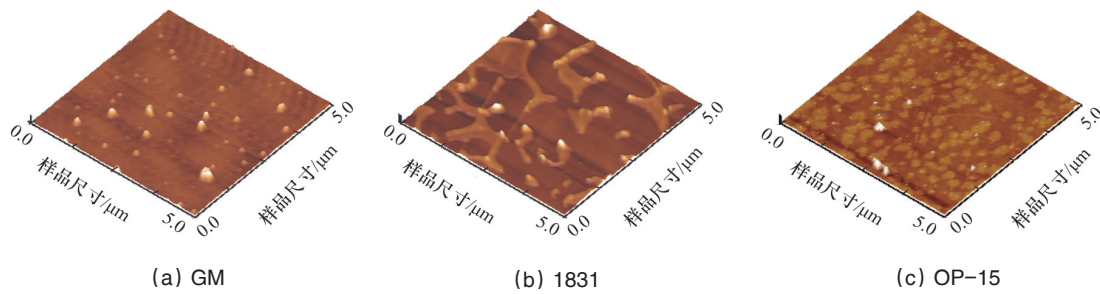


图3 原子力显微镜图

Fig. 3 AFM map

单链表面活性剂。由于电荷斥力大于脂肪链之间的范德华作用力,无法形成胶束吸附。同时由于双链阳离子表面活性剂在水中具有足够的伸展空间,同时双链长度较大,形成的双层吸附稳定性不好,不会出现润湿性的较大变化。

非离子表面活性剂不带电荷,不能通过静电力吸附于带有负电的煤粉表面。但煤粉表面含有大量的脂肪烃和芳香烃等憎水性非极性基团使煤尘表面具有较强的疏水性。在水中添加非离子表面活性剂时,煤粉表面与非离子表面活性剂之间的作用力主要是疏水作用和色散力,在煤粉表面被吸附的分子呈无规则状态平躺于界面上。

阳离子表面活性剂在煤岩表面较大的吸附量为有利因素,压裂液最初与压裂面、裂缝及大孔道表面接触吸附造成的厚度体积伤害可以忽略。表面活性剂吸附后煤岩表面憎水性增加,阻碍水进入较深的较小孔隙,降低压裂液对煤层气解吸附作用的损害。阳离子表面活性剂在煤岩表面为化学吸附,具有较好的持久性。然而阳离子表面活性剂较大的吸附量会提高压裂液成本,煤岩表面较大的水润接触角也可能导致其他新问题的出现。因此可通过复配减少阳离子吸附量和降低水润接触角,这也验证了采用GM与OP进行复配的合理性。

2.4 表面张力分析

压裂措施中压裂液表面张力越低,液体在孔隙中受到的毛细管力越小,压裂液返排率越高。低表面张力的压裂液体系具有较高实际应用价值。将煤岩样品在添加不同表面活性剂体系的溶液中浸泡,测试实验前后溶液的表面张力。表

3列出了不同体系的表面张力,表面活性剂浓度为1000 mg/L对应的体系均可将表面张力降到30 mN/m以下。

表3 不同溶液体系的表面张力

Table 3 Surface tension of different fluid systems

体系	表面张力/(mN·m ⁻¹)	
	处理前	处理后
清水	68	60
GMOP-4(a)	28	34
GMOP-4(b)	28	29
OP-15(a)	32	32
OP-15(b)	32	32
GM(a)	28	38
GM(b)	28	28

注:复配体系质量分数为(a)400 mg/L,(b)1000 mg/L。

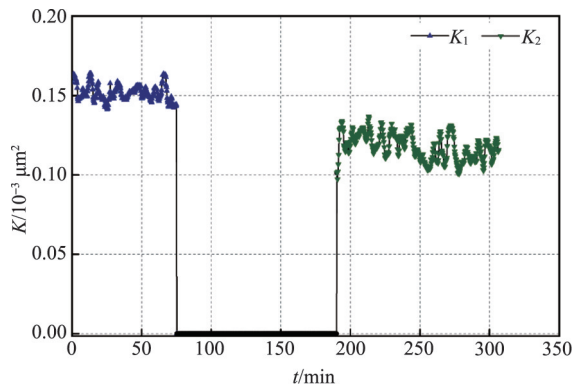
2.5 表面活性剂对煤岩的伤害

应用混合后浓度为5000 mg/L的各个溶液对煤岩进行伤害实验,表4列出了伤害实验前后煤岩样品的渗透率。GM单一体系和GMOP-4体系对煤岩的伤害最小,然而GM单一体系的使用成本较高。1831为主剂的清洁压裂液对煤岩的伤害程度大于清水体系,原因为分子链较长,使用浓度超过临界胶束浓度后发生胶团吸附作用。OP-15对煤岩的伤害程度与清水相当。综合比较,GMOP-4是理想的体系。图4给出了不同样品压裂液(添加剂为OP-15)伤害前后渗透率的对比曲线。由图4可知,压裂液伤害前后煤岩样品渗透率变化幅度较小。

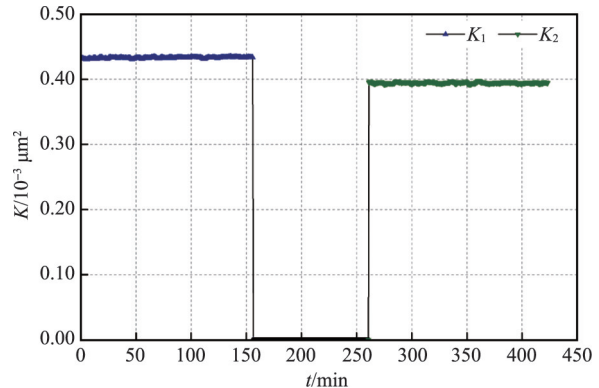
表4 液体对煤岩的伤害

Table 4 Fluid damage experiment on coal samples

编号	伤害液体质量分数(0.5%)	伤害前 $K_i/10^{-3}\mu\text{m}^2$	伤害后 $K_j/10^{-3}\mu\text{m}^2$	伤害率/%
1	GMOP-4	0.2172	0.1863	14.22
2	1831	0.1514	0.1182	21.93
3	OP-15	1.6744	1.3551	19.07
4	GM	0.4237	0.3863	8.83
5	清水	0.2354	0.1910	18.86



(a) 样品1压裂液伤害前后渗透率对比曲线



(b) 样品2压裂液伤害前后渗透率对比曲线

图4 液体对不同煤岩样品的伤害实验

Fig. 4 Fluid damage experiment on coal samples

2.6 煤层气吸附解吸附物理模拟

依据煤层气解吸附实验方法进行模拟。在向吸附罐内注液的过程中,吸附罐内气体压力逐渐升高,表明液体占据了煤岩孔隙中的自由体积,造成自由体积减少,使吸附罐内甲烷压力增加。随甲烷压力增加使一部分游离态甲烷转化为吸附态甲烷,提高了吸附态甲烷的含量。保持甲烷平衡压力为6.0 MPa,注液措施会增加吸附罐压力,压力升高的幅度可以间接作为评价液体置换甲烷的速度及质量的指标。使用0.17~0.25 mm的煤粒,标定自由体积。向吸附罐中以4 mL/min的注入速度注液10 min并连续记录压力变化情况。

图5给出注液过程中吸附罐压力变化曲线。清水注入过程中,总注水量为40.23 ml,吸附罐压力由6.50 MPa上升到7.25 MPa。GMOP-4(0.5%)溶液注入过程中,总注水量为40.45 ml,吸附罐压力由6.35 MPa上升到7.58 MPa。两种不同液体注入过程中吸附罐压力变化曲线表明,清水注入后吸附罐压力上升幅度较小仅为0.75 MPa,压力上升主要是清水占据自由体积造成的压力上升。GMOP-4(0.5%)溶液注入后吸附罐压力上升幅度较大为1.23 MPa,除溶液占据自由体积外表面活性剂吸附置换了更多的甲烷。

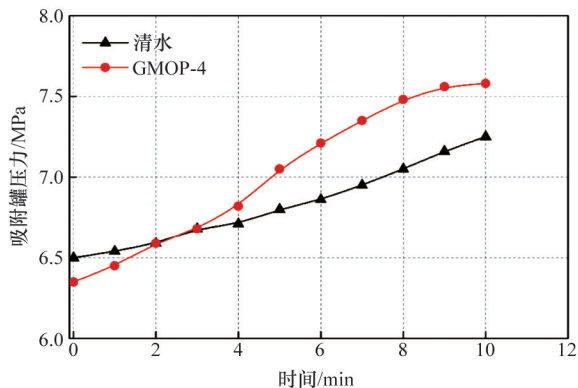


图5 注液过程体系压力变化

Fig. 5 Pressure variation during fluid injection

图6为清水和GMOP-4(0.5%)溶液注入后煤岩的吸附和解吸附曲线。清水注入后煤岩的解吸附过程明显滞后于吸附过程。GMOP-4(0.5%)注入后煤岩的解吸附过程明显超前于吸附过程,这也表明GMOP-4(0.5%)溶液能够提高煤岩中气体的解吸附速度。

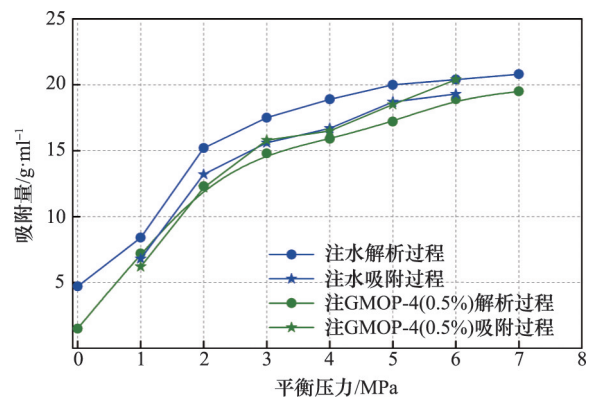


图6 吸附解吸附过程

Fig.6 Fluid adsorption and desorption

3 结论

煤层气开发过程中,煤岩对表面活性剂的吸附作用只发生在大孔道、裂缝表面,较低的表面张力有助于压裂液的返排并减少压裂液在煤层中的残留量,最终有效减小了压裂液对煤层的伤害。GMOP-4(GM与OP-15质量分数比为1:4)复配表面活性剂体系具有低表面张力、大水润接触角和小吸附量的特征,作为煤层气压裂增产措施中的压裂液能够降低对煤岩伤害提高微孔隙中煤层气的解吸附速度。

参考文献(References)

- [1] 秦勇,袁亮,程远平. 中国煤层气产业战略效益影响因素分析[J]. 科技导报, 2012, 30(34): 70-75.
Qin Yong, Yuan Liang, Cheng Yuanping. Factors affecting the strategic benefits of CBM Industry in China[J]. Science & Technology Review,

- 2012, 30(34): 70-75.
- [2] 李明宅. 沁水盆地枣园井网煤层气采出程度[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 91-95.
Li Mingzhai. Discussion on recovered percent of coal-bed methane in Zaoyuan well pattern of Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 91-95.
- [3] 刘升贵, 陈含, 彭智高, 等. 沁水盆地煤层气产能差异及采收率[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2013, 32(6): 721-724.
Liu Shenggui, Chen Han, Peng Zhigao, et al. Coalbed methane productivity differences and gas recovery in Qinshui Basin[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2013, 32(6): 721-724.
- [4] 范俊佳, 琚宜文, 柳少波, 等. 不同煤储层条件下煤岩微孔结构及其对煤层气开发的启示[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 441-447.
Fan Junjia, Ju Xuanwen, Liu Shaobo, et al. Micropore structure of coals under different reservoir conditions and its implication for coalbed methane development[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 441-447.
- [5] 朱维耀, 董焯, 宋洪庆, 等. 低渗透煤层气水两相非线性渗流数学模型及计算分析[J]. 科技导报, 2013, 31(22): 36-39.
Zhu Weiyao, Dong He, Song Hongqing, et al. A mathematical model for gas-water two-phase nonlinear flow in low permeability coal reservoirs and calculation analysis[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(22): 36-39.
- [6] 蔡强, 牛丛丛, 刘曰武, 等. 煤层中双重孔隙介质渗流理论的应用[J]. 科技导报, 2012, 30(24): 17-22.
Cai Qiang, Niu Congcong, Liu Yuewu, et al. Theory of dual-porosity media in coal bed methane and its application[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(24): 17-22.
- [7] 肖知国. 注水抑制瓦斯解吸效应实验研究与应用[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
Xiao Zhiguo. Experimental Study and Application of Inhibitory Effect on Gas Desorption of Coal Seam Injected with water[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [8] 张虎权, 王延东, 卫平, 等. 煤层气成因研究[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 29-32.
Zhang Huquan, Wang Yandong, Wei Ping, et al. Study on the origins of coal-bed gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 29-32.
- [9] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤吸附水的微观机理[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 379-383.
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 379-383.
- [10] 欧成华, 李士伦, 杜建芬, 等. 煤层气吸附机理研究的发展与展望[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(5): 34-38.
Ou Chenghua, Li Shilun, Du Jianfen, et al. Development and prospect on adsorption mechanism of coalbed methane in coal seams[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(5): 34-38.
- [11] 孔祥文, 赵庆波, 孙粉锦, 等. 煤层气高产富集规律及开采特征研究新进展[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 738-746.
Kong Xiangwen, Zhao Qingbo, Sun Fenjin, et al. New advances of productive & enriching patterns and production characteristics of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 738-746.
- [12] 赵庆波, 孔祥文, 赵奇. 煤层气成藏条件及开采特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 552-560.
Zhao Qingbo, Kong Xiangwen, Zhao Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 552-560.
- [13] 王怀勤, 朱炎铭, 李伍, 等. 煤层气赋存的两大地质控制因素[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1129-1131.
Wang Huaimeng, Zhu Yanming, Li Wu, et al. Two major geological control factors of occurrence characteristics of CBM[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1129-1131.
- [14] 张杰, 林珊珊, 曲永林, 等. 煤层气驱驱附及解吸规律实验研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 122-125.
Zhang Jie, Lin Shanshan, Qu Yonglin, et al. Experimental study on the regularity of absorption and desorption of coal seam gas[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(6): 122-125.
- [15] 刘曰武, 苏中良, 方虹斌, 等. 煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J]. 油气井测试, 2010, 19(6): 37-44.
Liu Yuewu, Su Zhongliang, Fang Hongbin, et al. Review on CBM desorption/adsorption mechanism[J]. Well Testing, 2010, 19(6): 37-44.
- [16] 秦文贵, 张延松. 煤孔隙分布与煤层注水增量的关系[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 514-517.
Qin Wengui, Zhang Yansong. Relation of pore distribution of coal with water infusion increment in seams[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 514-517.
- [17] 陈霞, 刘洪林, 王红岩, 等. 沁水盆地含水煤层气藏的气体渗流特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 500-503.
Chen Xia, Liu Honglin, Wang Hongyan, et al. Gas-seepage characteristics of coalbed reservoirs with different water saturation in the Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 500-503.
- [18] 孟巧荣, 赵阳升, 胡耀青, 等. 焦煤孔隙结构形态的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 487-490.
Meng Qiaorong, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing, et al. Experimental study on pore structure and pore shape of coking coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 487-490.
- [19] 王惠滨, 汪远东, 卢平. 煤层注水添加润湿剂研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(2): 551-160.
Wang Huibin, Wang Yuandong, Lu Ping. Research on wetting agent for water infusion of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 487-490.
- [20] 姜伟, 管保山, 杨致远, 等. 不同类型表面活性剂对煤岩润湿性能影响研究[C]//2013年煤层气学术研讨会, 2013年9月22-24日, 杭州, 中国.
Jiang Wei, Guan Baoshan, Yang Zhiyuan, et al. Study on the coal wettability performance affected by different surfactant[C]//2013 CBM Symposium, September 22-24, 2013, Hangzhou, China.
- [21] 问晓勇, 伊向艺, 卢渊, 等. 不同压裂液对煤岩渗透率伤害实验评价初探[J]. 石油化工应用, 2011, 30(3): 12-15.
Wen Xiaoyong, Yi Xiangyi, Lu Yuan, et al. Wvaluation and primary exploration of damage experiment of coal rock permeability caused by different fracture fluid[J]. Petrochemical Industry Application, 2011, 30(3): 12-15.
- [22] 丛连铸, 吴庆红, 赵波. 煤层气储层压裂液添加剂的优选[J]. 油田化学, 2004, 21(3): 220-223.
Cong Lianzhu, Wu Qinghong, Zhao Bo. Screening and optimizing

- additives of water base hydrofracturing gelling fluids for coalbed methane reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2004, 21(3): 220-223.
- [23] 刘萍, 管保山, 梁利, 等. 利用煤层气采出水配制表面活性剂压裂液的研究与应用[C]//2013年煤层气学术研讨会, 2013年9月22-24日, 杭州, 中国.
Liu Ping, Guan Baoshan, Liang Li, et al. Study and application of formation water from coalbed methane wells for preparing viscoelastic surfactant fracturing fluid[C]//2013 CBM Symposium, September 22-24, 2013, Hangzhou, China.
- [24] 崔思华, 管保山, 张遂安, 等. 煤岩储层伤害机理及评价方法[J]. 中国煤层气, 2012, 9(3): 38-41.
Cui Sihua, Guan Baoshan, Zhang Suian, et al. Mechanism of coal & rocks reservoirs and evaluation methods[J]. China Coalbed Mechane, 2012, 9(3): 38-41.
- [25] 宋佳, 卢渊, 李永寿, 等. 煤岩压裂液动滤失实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(1/2): 74-77.
Song Jia, Lu Yuan, Li Yongshou, et al. Experiment research on fracture fluid dynamic filtration of coal rocks[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2011, 1(1/2): 74-77.
- [26] 丛连铸, 汪永利, 梁利, 等. 水基压裂液对煤层储气层伤害的室内研究[J]. 油田化学, 2002, 19(4): 334-336.
Cong Lianzhu, Wang Yongli, Liang Li, et al. A laboratory study on damage to gas-bearing coalbed by aqueous fracturing fluids[J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(4): 334-336.
- [27] 胡广强. 大曲率段煤层坍塌机理及防塌钻井液技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
Hu Guangqiang. The caving mechanism and anti-sloughing drilling fluid in large curvature CBM reservoir[D]. Chengdu: The Southwest Petroleum University, 2011.
- [28] 管宝山, 郭丽梅, 梁利, 等. 煤层用黏弹性表面活性剂压裂液适应性评价[C]. 2010年全国煤层气学术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Guan Baoshan, Guo Li, Liang Li, et al. Adaptability evaluation of viscoelastic surfactant fracturing fluid in CBM reservoir[C]//2010 CBM Symposium. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.

(编辑 田恬)

·学术动态·



中国科学技术协会

“美丽人生·中国梦”活动在北京举行

2014年3月7日,在中国科协常委会女科技工作者专委会支持下,中国女科技工作者协会主办的“美丽人生·中国梦”系列活动在清华大学举办,来自清华大学的女大学生、青年女教师等300余人参加活动。

全国人大常委、中国科协常委、中国科学院党组副书记、中国女科技工作者协会常务副会长方新,西安电子科技大学校长、中国科学院院士、发展中国家科学院院士、中国女科技工作者协会副会长郑晓静,中国医学科学院肿瘤医院分子肿瘤国家重点实验室主任刘芝华研究员,中国科学院理化技术研究所超分子光化学实验室主任吴骊珠教授,用她们丰富的人生经历和感悟为同学们诠释科学精神,传递科学思想;启迪科技女性青年学子,勇于投身科技事业并在未来职业生涯中规划和平衡家庭、事业、婚恋关系,树立正确的人生观和价值观。

“女科学家进校园活动”主要面向科技女性,旨在展示女科学家们的巾帼风采,促进女性科技后备力量成长。自2008年起曾先后在北京大学、北京航空航天大学以及天津、福建、贵州等省市的8所高校举办,至今共有3700余名大学师生参加活动,30多位女科学家结合自身成长经历作精彩报告。该项系列活动已成为中国科协常委会女科技工作者专委会和中国女科技工作者协会贯彻落实人才强国战略、可持续发展战略、促进女性科技人才后备力量健康成长的重要品牌活动。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15457988.html>。