

清洁压裂液对煤岩储层伤害的实验评价

周珺¹, 伊向艺², 卢渊¹, 邱小龙³, 叶金亮⁴

1. 成都理工大学能源学院, 成都 610059
2. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610059
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 113 地质大队, 六盘水 553001
4. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 兰州 730050

摘要 压裂液进入煤层后会带来一定的伤害, 影响煤层气的产量。通过实验研究了清洁压裂液对煤层气解吸扩散和渗流的伤害机制。以沁水盆地煤岩为实验样品, 利用自主研究的煤岩解吸装置和全模拟流体模拟微观分布实验系统, 测试了清洁压裂对煤岩解吸量和地层水渗透率的伤害程度。研究表明, 清洁压裂液对煤岩渗透率的伤害为 30%, 对煤层气解吸量的伤害率为 24%, 并且推迟了煤层气开始解吸的时间, 降低了解吸的速率。通过电镜扫描、润湿性等测试, 明确了清洁压裂液对煤岩的伤害机制。

关键词 煤层气; 清洁压裂液; 渗透率; 解吸; 润湿性

中图分类号 P618.11

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.012

Experimental and mechanism research of damage of clean fracturing fluids to coalbed methane

ZHOU Jun¹, YI Xiangyi², LU Yuan¹, QIU Xiaolong³, YE Jinliang⁴

1. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. Brigade 113, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Liupanshui 553001, China
4. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China

Abstract Coalbed would be damaged by fracturing fluid, which affects coalbed methane production. Clean fracturing fluid is studied through experiments on the diffusion of coalbed methane desorption and seepage damage mechanism to provide a theoretical basis for the selection of coalbed methane well fracturing fluid. Coal 3 from Qinshui basin is selected as test samples to conduct the desorption test after injecting fracturing liquids into the samples by using independently developed CBM desorption experimental apparatus and permeability test by microscopic distribution of fluid simulation experiment system. Research shows that permeability of coal is damaged by 30% and the desorption amount of damage rate is 24%. Clean fracturing fluid may postpone the coalbed methane desorption time and reduce the absorption rate. And then through the electron microscope scanning and wettability analysis, the damage mechanism of coal by clean fracturing fluid is found out.

Keywords coalbed methane; clean fracturing fluid; permeability; desorption; wettability

煤岩储层具有低孔、低渗及较低地层压力等特征, 开发过程中自然产能低。因此, 煤层气井需要进行压裂改造才能

达到较好的开发效果^[1]。在油藏压裂中, 清洁压裂液作为一种新型的压裂液体系逐渐被人们所认可。清洁压裂液是由

收稿日期: 2014-08-06; 修回日期: 2014-11-02

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05037-003); 高等学校博士学科点专项科研项目(20125122110017)

作者简介: 周珺, 博士研究生, 研究方向为储层增产改造技术和非常规气藏开采, 电子信箱: zhoucdu2012@126.com; 伊向艺(通信作者), 教授, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: yxy610059@163.com

引用格式: 周珺, 伊向艺, 卢渊, 等. 清洁压裂液对煤岩储层伤害的实验评价[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 72-75.

表面活性分子构成的,它最大的优点是残渣较少,这样对储层的伤害就比其他类型的压裂液要小得多^[2]。但对于煤层储层来说,情况要复杂得多。与常规油气藏不同,煤层对清洁压裂液中有机成分的吸附是很明显的^[3]。

在煤层气生产过程中,吸附气从煤岩表面解吸,这是与常规气藏生产不同的地方,煤岩中的甲烷需通过解吸-扩散-渗流3个步骤才能达到井底^[4]。清洁压裂液进入煤岩后,首先进入割理系统中,会对煤岩的渗透率产生一定的影响^[5];同时,液体充满割理后会对煤层气的解吸扩散产生较大的影响^[6]。因此,研究清洁压裂液对煤岩储层的伤害需要同时考虑渗透率伤害和解吸扩散伤害。本文以沁水盆地晋城煤样为研究对象,研究清洁压裂液对完全浸泡时和浸泡排出后的煤层气解吸扩散能力的伤害以及清洁压裂液对煤岩渗透率的伤害,综合评价清洁压裂液对煤层气开采的影响。

1 清洁压裂液作用下的煤层气解吸-扩散实验

1.1 实验样品及方法

本次实验所用煤样来自于沁水盆地寺河区块,根据煤样的割理大小发育情况,粉碎部分煤样,挑选出粒径为5 mm的割理颗粒作为实验样品,每份实验样品的质量为30 g,放在恒温箱内烘干,确保实验样品不含水分。

实验所采用的液体为地层水和清洁压裂液,地层水按照井区地层水配方配制。清洁压裂液按施工现场所使用的比例配制,质量分数为1%,其中表面活性剂质量分数小于0.4%。

实验采用自主研发的入井液煤岩解吸分析实验装置,可以进行不同液体作用下的煤层气解吸扩散试验。向压力容器装入30 g平均粒径为5 mm的割理颗粒煤样,打开水浴加热,设置恒温25℃,然后注入甲烷,达到5 MPa后关闭进气阀,吸附时间为12 h。吸附完成后,打开放空阀,向压力容器注入液体。在排液实验时,还需将液体排出,使煤岩表面露出液面。然后逐渐降低解吸压力,记录不同解吸压力阶段下的解吸量,直到压力容器中的压力为0.1 MPa,且1 h内的解吸量在10 mL以内时认为解吸停止。

1.2 实验结果与分析

1.2.1 清洁压裂液对煤层气解吸-扩散的影响

中国煤层中大量含水,在实际生产中要考虑地层水对煤层气解吸的影响。因此,在本次实验中,先筛选出两份质量、粒径相同的干煤样,测其解吸量,在相同时间内两份样品解吸量的相差在6 mL左右,干煤样的吸附量基本相同。然后将已经吸附甲烷后的干煤样分别注入地层水和清洁压裂液,测试其解吸量的变化。对比煤层中原有的地层水,外来的压裂液这两种不同类型液体对煤层气解吸的伤害程度。

从表1可以看出,单位质量干煤样的解吸量为12.95 m³/t,地层水和清洁压裂液作用下的气体解吸量明显减少,清洁压裂液作为一种外来液体对煤层气解吸扩散伤害更大。

表1 清洁压裂液对煤岩解吸的影响

Table 1 Desorption change of coal under clean fracturing fluid

样品	解吸条件	解吸量/(m ³ ·t ⁻¹)	解吸伤害率/%
1	干煤样	12.95	14.9
	注入地层水	11.02	
2	干煤样	12.93	24.1
	注入清洁压裂液	9.81	

根据实验结果,统计了不同压力降落阶段气体解吸量的变化。从图1中可以看出,地层水和清洁压裂液使气体的解吸规律发生了变化。当压力从2.2 MPa(临界解吸压力)下降到1.8 MPa时,干煤样已经开始大量解吸,此阶段的解吸量为总量的34.0%,而地层水和清洁压裂液作用下的煤样在此阶段没有解吸。随着解吸压力的降低,条煤样的解吸量逐渐增加,但在低压段(0.6 MPa以下)时,干煤样的解吸量仅为总量的28.2%,地层水作用下解吸量占总解吸量的67.7%,清洁压裂液作用下的解吸量占总解吸量的65.2%。由于受到清洁压裂液的影响,煤层气需要更低的压力才能运移,但是在压力从1.4 MPa下降到0.6 MPa时,相比地层水,清洁压裂液能提高此阶段的解吸量。

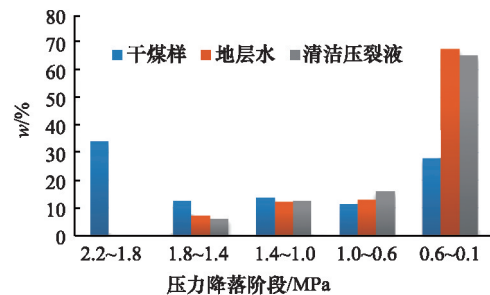


图1 清洁压裂液注入煤岩后不同解吸压力下解吸
Fig. 1 Percentage of desorption quantity under different pressures

从图2可以看出,注入清洁压裂液后,煤岩解吸速率随解吸压力降低解吸速率增大,解吸速率比较均匀,增加幅度小于干煤样的变化。

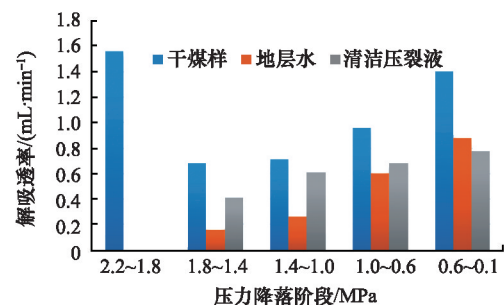


图2 清洁压裂液注入煤岩后不同解吸压力下解吸速率
Fig. 2 Desorption rate under different pressures

当压力从0.6 MPa降低到0.1 MPa时,解吸速率达到最大(0.79 mL/min),此阶段的解吸时间也较长。与地层水相比,在1.0~0.6,1.4~1.0,1.8~1.4 MPa这三个阶段内,清洁压裂液作用下煤层气的解吸速率要高于地层水下的解吸速率。

通过降压解吸实验(图3),可以看出由于液体的作用,煤样的解吸滞后特征明显,残余气量增加。根据公式拟合,可以得到不同类型液体作用下单位质量解吸气量与解吸压力的关系,其中干燥煤样的解吸规律计算式为

$$y=13.854e^{-0.614x} \quad (1)$$

地层水作用下煤样的解吸规律计算式为

$$y=-3.613\ln x+1.9356 \quad (2)$$

清洁压裂液作用下煤样的解吸规律计算式为

$$y=-3.34\ln x+1.7929 \quad (3)$$

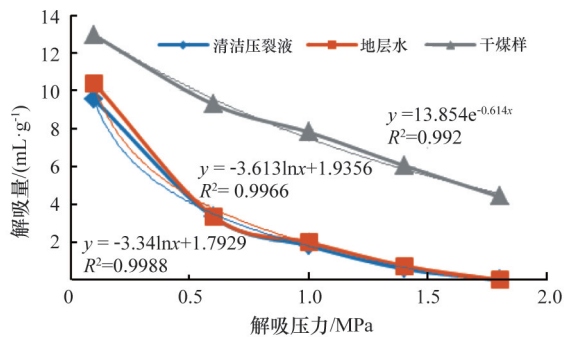


图3 不同液体作用下累计解吸量与解吸压力关系

Fig. 3 Relation of coal desorption and desorption pressure with different liquids

1.2.2 清洁压裂液排液后的解吸规律

为降低压裂液对储层的伤害,压裂液在注入地层压开裂缝后要迅速返排。为模拟该情况,进行了清洁压裂液排液后的解吸测试。将清洁压裂液注满容器浸泡一定时间再排出,测试煤样在排液后的解吸量。

通过对比清洁压裂液排液前与排液后的实验数据(表2),清洁压裂液排液后的解吸总量比未排液的解吸总量要多,解吸总量增加了11.5 mL,增加量主要在0.6 MPa以上。排液后解吸压力在1.8 MPa就有一定的解吸量,而未排液在1.8 MPa解吸压力下没有甲烷解吸出。当压力从2.2 MPa降低到0.6 MPa时,排液后在此阶段内的解吸百分比比排液前提高了7.5%,排液加快了煤层气在这个压力段的解吸。但与干燥煤样相比,在此阶段的解吸量仍然相差很大。

表2 排液前后各个解吸阶段煤层气解吸量对比

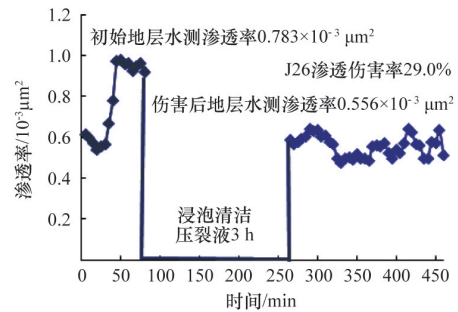
Table 2 Desorption amounts of each stage before and after drainage

解吸压力/MPa	排液前解吸量/mL	排液前占总量解吸量/%	排液后解吸量/mL	排液后占总量解吸量/%
2.2~1.0	54.2	18.9	65.7	22.0
1.0~0.6	45.5	15.8	60.2	20.2
0.6~0.1	186.9	65.3	172.2	57.8

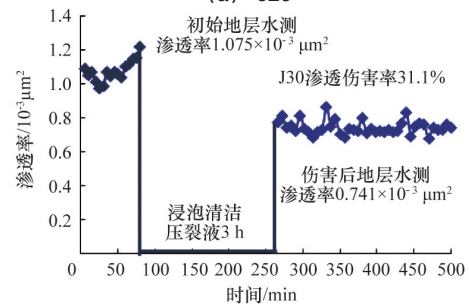
2 清洁压裂液对煤岩渗透率的伤害

煤层气的生产是一种长期排水,降低地层压力,促使煤层气大量解吸的过程。然而,压裂液进入煤层后,其所含的化学物质会进入在煤层割理、微裂缝或基质孔隙中,在压裂液返排后,这些残留物质堵塞了部分孔隙通道,阻碍地层水的排出,进而影响煤层气的产量。因此,通过实验测试注入压裂液前后地层水的渗透率,评价压裂液的侵入对地层水排出能力的影响程度。

由于压裂液在施工过程相对较短,在2~3 h后就开始返排,这个阶段内地层压力变化不大,可暂不考虑应力敏感对渗透率的影响。实验过程模拟实际生产情况,通过FW-101全模拟流体模拟微观分布实验系统先正向测定地层水对煤样的渗透率,然后反向将清洁压裂液以低于临界流速的流量通过煤样,使煤样与清洁压裂液接触为3 h后再次正向测定地层水的渗透率,计算渗透率的变化规律。从图4可看出,清洁压裂液对煤岩渗透率的伤害较高,为29%~31%。



(a) J26



(b) J30

图4 煤样接触清洁压裂液后渗透率伤害曲线

Fig. 4 Coal samples permeability damage curves by clean fracturing fluid

在不断提高气体返排压差的条件下,清洁压裂液的气测渗透率返排恢复率提高到72.09%,实验结果表明清洁压裂液对煤岩渗透率造成了不可恢复的伤害(表3)。

表3 清洁压裂液对煤样J30损害后气测返排实验结果

Table 3 Flowback permeability test of coal J30

煤样	进口压差/MPa	渗透率/10⁻³ μm²	返排恢复率/%
J30	0.05	0.244	10.80
	0.10	0.587	25.92
	0.30	0.992	40.76
	0.50	1.631	72.09

3 清洁压裂液对煤岩储层伤害机制

3.1 清洁压裂液对煤岩孔隙结构的影响

当压裂液液柱压力大于煤岩储层孔隙压力时,清洁压裂液就会进入煤岩储层的微裂缝、大孔隙和割理中,堵塞气体解吸和渗流的通道。清洁压裂液中表面活性成分对煤岩有很强的吸附性^[7],会黏附在煤岩孔隙和微裂缝的表面,从而缩小煤层气的解吸扩散和渗流的通道,甚至完全堵死煤层孔喉和微裂缝,通过扫描电镜照片可以对压裂液的固相侵入孔喉和微裂缝的情形进行直接的观察(图5)。

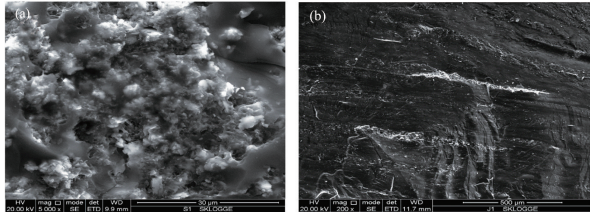


图5 侵入孔喉中(a)和裂缝中(b)的清洁压裂液显微结构
Fig. 5 Clean fracturing fluid in pore (a) and fracture (b)

3.2 清洁压裂液对煤岩表面的润湿性

压裂液接触到煤岩表面后,在毛细管力作用下自吸进入煤层,会逐步达到与毛管力相平衡状态,导致近井地带或裂缝面水饱和度增加,相应的煤层孔喉和裂缝通道变窄,降低气相渗透率和解吸能力^[8]。首先测试地层水和清洁压裂液对煤岩的接触角,分别为 78° 和 61° ,表明煤岩为弱亲水性,由于清洁压裂液中含有一定的表面活性剂,改善了煤岩的亲水效果,清洁压裂液的润湿接触角相对较小(图6(a)、(b))。将煤岩在清洁压裂液中浸泡2 h后,再用地层水测量煤岩的润湿角为 67° (图6(c)),说明清洁压裂液作用后,煤岩的亲水性增强,阻碍了压裂液和地层水的排出,降低气相渗透率。

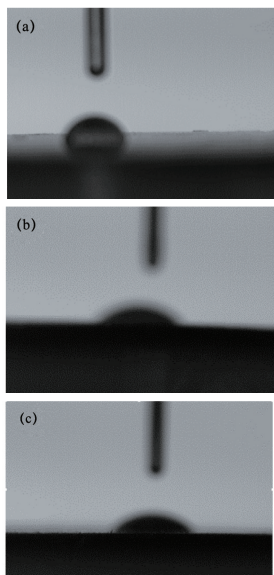


图6 地层水(a)、清洁压裂液(b)、伤害后地层水(c)对煤岩的接触角
Fig. 6 Contact angles of coal with formation water(a), clean fracturing fluid(b) and formation water in coal covered by clean fracturing fluid(c)

4 结论

与干燥煤样相比,清洁压裂液注入后使煤层气解吸量降低了24%,并且在压力从2.2 MPa降低到1.8 MPa时没有气体解吸出,而此阶段干燥煤样的解吸量占了总量的34%。由于清洁压裂液的影响,在压力降低到0.6 MPa以下,煤层气才能大量解吸出;清洁压裂液排液后的解吸总量比未排液的解吸总量要多,解吸总量增加了11.5 mL,通过分析各压力阶段的解吸量,排液有助于煤层气的解吸的提前;清洁压裂液对煤岩渗透率的伤害为30%,伤害程度较高。清洁压裂对煤样造成了永久性的伤害,在气测返排后,渗透率只能恢复到原来的72%;清洁压裂液将进入煤岩的微裂缝和割理中,堵塞气体解吸和渗流的通道。清洁压裂液中的表面活性剂还会吸附在煤岩表面,降低煤层气的解吸扩散渗流能力。同时,清洁压裂液中的表面活性剂会改变煤岩的润湿性,导致压裂液和地层水的返排困难。

参考文献(References)

- [1] 伊向艺,雷群,丁云宏,等.煤层气压裂技术及应用[M].北京:石油工业出版社,2012.
Yi Xiangyi, Lei Qun, Ding Yunhong, et al. Coalbed methane fracturing technology and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 王国强,冯三利,崔会杰.清洁压裂液在煤层气井压裂中的应用[J].天然气工业,2006(11):104-106.
Wang Guoqiang, Feng Sanli, Cui Huijie. Application of clean fracturing fluid in coalbed gas well fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2006(11): 104-106.
- [3] 陈尚斌,朱炎铭,刘通义,等.清洁压裂液对煤层气吸附性能的影响[J].煤炭学报,2009(1):89-94.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Liu Tongyi, et al. IMPact of the clear fracturing fluid on the adsorption properties of CBM [J]. Journal of China Coal Society, 2009(1): 89-94.
- [4] 李相臣,康毅力,陈德飞,等.钻井完井液对煤层气解吸-扩散-渗流过程的影响——以宁武盆地9号煤层为例[J].天然气工业,2014(1):86-91.
Li Xiangchen, Kang Yili, Chen Defei, et al. Effect of drill-in fluids on CBM desorption, diffusion and percolation: A case study of NO.9 Coal Seam of the Ningwu Basin [J]. Natural gas industry, 2014(1): 86-91.
- [5] 康毅力,周来诚,池晓明,等.致密煤岩气藏压裂液损害实验评价[J].断块油气田,2014(2):269-272.
Kang Yili, Zhou Laicheng, Chi Xiaoming, et al. Experimental evaluation on damage induced by fracturing fluids in tight coal rock gas reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014(2): 269-272.
- [6] 徐兵威,李雷,何青,等.致密砂岩储层压裂液损害机理探讨[J].断块油气田,2013(5):639-643.
Xu Bingwei, Li Lei, He Qing, et al. Discussion on damage mechanism of fracturing fluid in tight sandstone reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013(5): 639-643.
- [7] 夏永江,管保山,梁利,等.表面活性剂对煤层气压裂伤害机理研究[J].科技导报,2014,32(8):32-38.
Xiang Yongjiang, Guan Baoshan, Liang Li, et al. Fracturing damage of coal bed methane caused by surfactants [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(8): 32-38.
- [8] 张晓宇.表面活性剂润湿煤体的实验研究[D].北京:中国地质大学,2010.
Zhang Xiaoyu. Experimental study on wetting coal by surfactant [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.

(责任编辑 赵业玲)