

# 表面活性剂对煤层损害的实验研究

宋 瑞<sup>1,2</sup>, 宋峙潮<sup>1,2\*</sup>, 李小刚<sup>2</sup>, 和鹏飞<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>, 卓振州<sup>1</sup>

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300457;

2. 西南石油大学油气藏地质与开发国家重点实验室, 四川 成都 610500)

**摘要:**针对煤层气独特的开采方式,研究了表面活性剂与煤岩的相互作用关系,分析了表面活性剂对煤层排水降压和甲烷渗流过程的影响,采用煤体吸湿实验和气相渗透率综合评价表面活性剂对煤层的潜在损害。实验结果表明,阳离子型、两性型、氟碳型表面活性剂会严重阻碍煤层排水降压过程的进行,影响甲烷解吸,降低煤层气井产量;非离子表面活性剂处理后的煤样会产生很多次生微裂缝,导致煤样气相渗透率有显著提升;阴离子表面活性剂的非极性基团碳链越长,越容易在煤基质表面形成大量吸附,导致煤粉微粒大量脱落,堵塞孔喉,降低煤层气相渗透率。研究成果为煤层气井开发过程中表面活性剂的选择和应用提供了理论依据。

**关键词:**表面活性剂;煤层;损害;水相流动能力;气相渗透率

中图分类号:TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)S-0150-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.030

## Experimental study on damage of surfactant to coal seam

SONG Rui<sup>1,2</sup>, SONG Zhi-chao<sup>1,2\*</sup>, LI Xiao-gang<sup>2</sup>, HE Peng-fei<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, ZHUO Zhen-zhou<sup>1</sup>

(1. Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Technology & Services Ltd., Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** In view of the unique mining mode for coalbed methane, the interaction between surfactant and coal rock is studied, and the influence of surfactant on drainage pressure reduction and methane seepage process is analyzed. Potential damage of surfactant to coal seam is comprehensively evaluated by using scanning electron microscope, coal moisture absorption test and gas permeability measurement experiment. Experimental results show that cationic, amphoteric and fluorocarbon-type surfactants will seriously hinder the process of coal seam drainage and depressurization, affect methane desorption and reduce the production of coalbed methane wells. Coal samples treated by non-ionic surfactants will generate many secondary microcracks, leading to a significant increase in gas permeability of coal samples. The longer the non-polar group of anionic surfactants, the easier it is to form a large amount of adsorption on the surface of coal matrix, resulting in a large number of coal particles falling off, blocking the pore throat and reducing the gas permeability of coal sample.

**Key words:** surfactant; coal seam; damage; aqueous phase flow ability; gas phase permeability

目前国内煤层气储层改造常用或使用过的水基压裂液主要有活性水压裂液、冻胶/线性胶压裂液、清洁压裂液和泡沫压裂液。清洁压裂液和泡沫压裂液的主要成分是表面活性剂的水溶液,具有地层损害小、返排迅速、滤失低、黏度高、摩阻低以及携砂能力强的优点<sup>[1]</sup>,所以逐步应用于煤层改造,并取得了较好的效果。但也存在着少数失败的案例,例如滇东黔西的EH-C6井,采用低伤害泡沫压裂液体系进行压裂施工后,最高日产气量仅为84.662 m<sup>3</sup>,没有起到压裂增产改造应有的效果。针对问题井,需要分析其可能存在的损害类型。冯青<sup>[2]</sup>从地质、工程及排采3个方面分析了煤层气井潜在损害因素,总结后发现在工程因素中,压裂液种类及浸泡时间、

压裂施工异常对储层产气量影响较大。本文不考虑施工过程存在的问题,仅考察压裂液的侵入对煤层造成的影响。

## 1 表面活性剂对煤层的损害机理

为了研究表面活性剂对煤层的损害机理,需要分析表面活性剂与煤层的相互作用关系。本文调查发现,表面活性剂吸附在煤基质表面后,会对煤体结构和煤层润湿性产生影响,但目前对这些影响的研究并不充分,甚至还存在矛盾。

针对表面活性剂与煤层相互作用关系不明确这个问题,本文结合煤层气独特的开采方式,提出了一种新的实验思路,即通过分析表面活性剂对煤层排

收稿日期:2021-01-05;修回日期:2021-04-06

基金项目:国家科技重大专项“多层复杂煤体结构区煤储层直井压裂技术研究”(2016ZX05002-005-011)

作者简介:宋瑞(1989-),男,硕士,工程师,主要从事油气增产改造理论、技术和非常规天然气开发,455913065@qq.com;宋峙潮(1995-),男,硕士,助理工程师,主要从事钻完井研究,通讯联系人,ex-songzhch@cnooc.com.cn。

水降压和甲烷渗流过程的影响,考虑结合煤体吸湿实验和气相渗透率,综合评价表面活性剂对煤层的潜在损害。其中,煤体吸湿实验可以对比不同类型表面活性剂处理前后,水在煤样毛细管中流动的难易程度,准确分析表面活性剂对煤层造成的水锁损害程度,进而判断表面活性剂对排水降压过程的影响。气相渗透率则可以从宏观上评价表面活性剂对甲烷渗流能力的影响。综合实验结果,可优选出对煤层损害更低的表面活性剂种类。

### 1.1 表面活性剂对排水降压过程的影响

由于表面活性剂结构的特殊性,吸附在储层中会造成水锁,进而影响煤层气井产量<sup>[3-4]</sup>。发生水锁是由于钻完井或临时关井过程中,水相在毛细管力的作用下自吸进入储层。当进入产气环节时,气相需要驱替水相流动,这是一个非润湿相驱替润湿相的过程,毛细管力会阻碍气相流动。如果生产压差小于毛细管力,则会导致水相滞留在孔喉中阻碍气相流动。邱正松等<sup>[5]</sup>和胡友林等<sup>[6]</sup>认为,在压裂液中加入使储层疏水的表面活性剂,增大压裂液与储层的接触角,可使压裂液不易进入储层的基质孔隙,且不易附着在储层孔隙表面形成水锁。但本文研究发现,表面活性剂在煤层中的应用与其他低渗致密储层不同。煤层气的开发中同样存在气水两相渗流的现象,如果使用泡沫压裂液进行增产改造,这种现象将会更加显著。但与常规储层生产过程不同,煤层气的生产首先要经历排水降压过程,应考虑使用表面活性剂,使储层亲水,进而增加水相渗流能力。但目前表面活性剂在煤基质表面的吸附情况有两种截然不同的理论,如图1所示,一种认为煤基质表面带电,在静电力的作用下易于吸附表面活性剂的极性端;另一种认为煤基质为有机质,易于吸附表面活性剂的非极性端。再考虑到表面活性剂种类的多样性,可能会对吸附方式产生更复杂的影响,所以表面活性剂对煤层排水降压的影响研究还不充分,需要通过实验进一步评估。

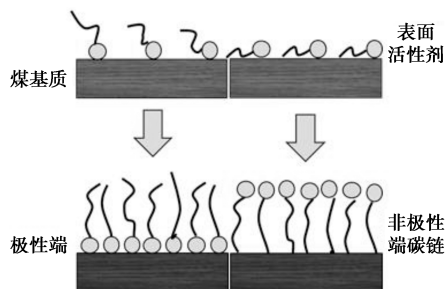
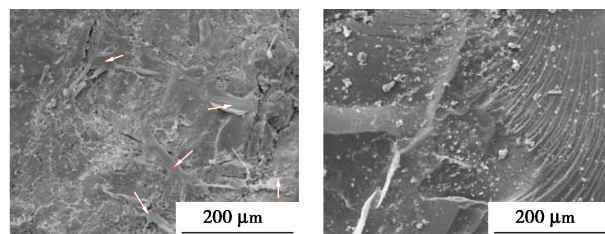


图1 表面活性剂在煤基质表面的吸附

### 1.2 表面活性剂对甲烷渗流过程的影响

通常认为表面活性剂为小分子物质,吸附在煤基质表面不会对气相绝对渗透率造成损害。但随着研究的深入,学者们发现表面活性剂的吸附可能会对煤体结构造成一定程度的影响,进而影响气相绝对渗透率。郑军等<sup>[7]</sup>考察了阴离子、阳离子、非离子表面活性剂(共6种药剂)对煤样的气相损害率 $a_g$ ,实验发现6种表面活性剂都会降低煤样的气相渗透率。根据实验结果做出以下两点假设:煤分子表面带电荷;微粒之所以能吸附在孔壁上,是因为煤微粒与孔壁之间的范德华引力大于静电斥力。因此,表面活性剂吸附在煤基质表面,煤粉颗粒可能会在静电斥力的作用下脱落,进而堵塞孔喉,降低煤样的气相渗透率。但不同区块煤样的煤质条件有所不同,在评价表面活性剂对渗流过程的影响时,可能会得出截然不同的结论。Lu等<sup>[8-9]</sup>使用XRD及SEM等手段综合分析发现,表面活性剂能够降低煤中黏土矿物的含量,提高煤样渗透率,改善甲烷在割理裂缝中的流动。本文通过SEM对表面活性剂吸附后煤岩的表面进行观察,如图2所示。煤岩上发生了表面活性剂吸附的区域[图2(a)中箭头所示]产生了较多次生微裂缝;而没有吸附现象发生的区域未产生次生微裂缝[图2(b)]。



(a) 有吸附的区域

(b) 无吸附的区域

图2 浸泡后煤岩 SEM图( $\times 500$ )

综上所述,表面活性剂吸附在煤岩表面后,对甲烷渗流能力的影响是多元的,其中哪种因素占主导地位,还需要通过实验进一步探究。

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料及设备

表面活性剂在煤基质上的吸附属于物理吸附,物理吸附也称范德华吸附,是由分子间作用力引起的,分子间作用力有3种:色散力、诱导力和静电力,其中静电力的影响最大。根据前人的研究,滇东黔西区块不同井层中取出的煤粉在地层水中的Zeta电位虽然不同,但都为负值,说明煤基质表面带负电。本文选取了溶于水后,带负电、带正电、带正负

电及不带电的表面活性剂,评价这些表面活性剂处理后煤样的水相流动能力,分析表面活性剂在煤岩表面的吸附情况。

从水溶性、经济性能及抗温抗盐性能角度考虑,选取硫酸酯盐类阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、季铵盐类阳离子表面活性剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)、甜菜碱型两性表面活性剂芥酸酰胺丙基甜菜碱(EAPB)、聚氧乙烯型非离子表面活性剂月桂醇聚氧乙烯醚(AEO)。而由于氟碳表面活性剂具有优异的“三高”性质(高表面活性、高耐热稳定性及高化学稳定性)及独特的“两憎”性质(憎水、憎油),也作为一种待评价的表面活性剂种类。

实验样品:滇东黔西小直径煤样。

实验样品使用结构致密的原生煤而不是人造柱状小直径岩心,主要原因有两个:其一,原生煤喉道较细,能够使水锁造成的水相流动能力损害幅度放大;其二,原生煤结构完整,不易产生煤粉影响实验结果。

实验设备:抽空加压岩心饱和装置;非常规储层岩心损害装置;烘箱。

## 2.2 实验步骤

首先通过煤体吸湿实验评价各类表面活性剂吸附在煤基质上后对煤层排水降压过程的影响,步骤如下:取 12 块煤样,每两块为一组,6 组分别取名为 SDS、DTAB、EAPB、AEO、氟碳、原样;每组中的两块煤样编号 1、2,测量 12 块煤样的直径与长度;将 12 块滇东黔西小直径煤心低温(60℃)烘干 24 h,称量原样组中两块煤样初始质量  $M$  原样 1、 $M$  原样 2;使

用抽空加压饱和装置,对 5 组煤样分别用上述 5 种表面活性剂饱和,饱和时间为 48 h,饱和压力为 20 MPa;表面活性剂饱和后的 10 块岩样低温(60℃)烘干 24 h;从烘箱中取出后快速称取 10 块岩样的初始质量  $M$ ;将 12 块岩心用热缩管包紧,一起放入抽空加压饱和装置中,不抽真空,直接用地层水饱和岩心,在 8 MPa 的压力下饱和 48 h;取出后擦拭表面水分,称量 12 块岩心的质量  $M'$ ;计算单位体积吸水量,对比可得水相通过毛细管的难易程度。

通过煤体吸湿实验得到对储层排水降压损害低的表面活性剂大类,再进行细分,评价不同种类、相同种类不同取代基、相同种类相同取代基不同碳链长度的表面活性剂对气相渗透率的损害情况。损害率计算公式如下:

$$D_k = [(K - K')/K] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_k$  为渗透损害率,%; $K$  为岩心饱和表面活性剂溶液前的气测渗透率,mD; $K'$  为岩心饱和表面活性剂溶液后的气测渗透率,mD。

## 3 结果与讨论

本实验的目的是为了研究不同类型表面活性剂与煤岩的相互作用关系,不关注表面活性剂浓度对煤岩的影响。在前人研究的泡沫压裂液体系中,表面活性剂质量浓度的使用范围通常在 0.1% ~ 1.0%,所以考虑取浓度中值,统一选取 0.5% 的表面活性剂浓度进行实验。

### 3.1 煤体吸湿实验结果分析

煤体吸湿实验结果如表 1 所示。

表 1 煤体吸湿实验结果

表面活性剂	序号	长度/ mm	直径/ mm	体积/ mm <sup>3</sup>	初始质量/ g	处理后质量/ g	吸水量/ g	单位岩石体积吸水量/ ( $\times 10^{-5}$ g·mm <sup>-3</sup> )
0.5% SDS	1	50.07	25.04	24644.267	40.2005	41.4660	1.2655	6.20
	2	49.68	24.64	23677.326	38.0183	39.2113	1.193	5.90
0.5% DTAB	1	50.03	24.92	23779.398	39.5339	40.5986	1.0647	5.14
	2	50.29	24.71	24104.425	39.3879	40.8814	1.4935	5.04
0.5% EAPB	1	50.27	24.52	23725.724	38.7246	40.1237	1.3991	4.48
	2	50.07	24.90	23760.226	39.9907	40.9530	0.9623	4.05
0.5% 氟碳	1	49.87	25.18	24821.069	39.8622	41.1592	1.2970	5.23
	2	49.96	24.83	24179.400	40.8033	41.9821	1.1788	4.88
0.5% AEO	1	50.31	24.60	23899.796	38.7464	40.0802	1.3338	5.58
	2	50.17	25.08	24772.442	40.7414	41.9353	1.1939	4.82
原样	1	50.20	24.69	24022.354	38.6086	39.9303	1.3217	5.50
	2	50.11	24.71	24018.150	38.7669	40.0040	1.2371	5.15

对比5种表面活性剂处理后的煤样及原生结构煤单位体积吸水量可知,当生产压差为8 MPa时,水相在煤样中的流动能力强弱为:SDS>原生结构煤>AEO>DTAB>氟碳表面活性剂>EAPB。

实验结果可解释为,阴离子表面活性剂带负电,煤基质表面也带负电,在静电斥力的作用下,带负电的极性基团远离煤基质;在色散力的作用下,非极性端与煤层有机质之间相互吸引,所以阴离子表面活性剂在煤基质表面的吸附形态是非极性基团靠近煤基质,极性基团向外。表面活性剂的这种吸附方式可以使煤层亲水,对煤层排水降压过程有促进作用。其他种类的表面活性剂吸附都会阻碍排水降压过程,其中阻碍程度最弱的为非离子表面活性剂,相比

其他溶于水带正电的表面活性剂,非离子表面活性剂溶于水呈电中性,极性基团不会定向吸附在煤基质表面,所以对煤层排水降压过程阻碍最小。

### 3.2 气相绝对渗透率结果分析

气相绝对渗透率代表着煤层气开发中的扩散渗流过程。表面活性剂吸附在煤基质表面,可能会影响甲烷在割理裂缝中的渗流。根据煤体吸湿实验结果,选取十二烷基硫酸酯钠、正十六烷基硫酸酯钠、月桂醇聚氧乙烯醚、十二烷基苯磺酸钠、 $\alpha$ -烯炔磺酸钠5种表面活性剂进行气相渗透率测定实验。这5种表面活性剂分别代表了不同种类、相同种类不同取代基、相同种类相同取代基不同碳链长度的表面活性剂对甲烷渗流能力的影响,结果如表2所示。

表2 表面活性剂损害前后渗透率变化表

岩心编号	表面活性剂	实验过程	实验温度/ ℃	气体黏度/ (mPa·s)	大气压/ kPa	气体流量/ sccm	入口压力/ MPa	出口压力/ MPa	环压/ MPa	渗透率/ mD	损害率/ %
1	月桂醇聚氧乙烯醚	初始	20	0.01785	102	2.02	1.32	0	6.69	0.0064	-12.50
		伤害后	20	0.01785	102	0.96	0.86	0.03	6.45	0.0072	
2	十二烷基苯磺酸钠	初始	20	0.01785	102	1.98	1.04	0.01	6.57	0.0143	-2.10
		伤害后	20	0.01785	102	1.96	0.81	0.01	6.25	0.0146	
3	十二烷基硫酸钠	初始	20	0.01785	102	14	0.8	0	6.28	0.2346	-0.47
		伤害后	20	0.01785	102	33	0.8	0	6.86	0.2357	
4	$\alpha$ -烯炔磺酸钠	初始	20	0.01785	102	97	0.84	0.03	6.29	0.9870	-2.56
		伤害后	20	0.01785	102	124	0.78	0.03	6.55	1.0123	
5	正十六烷基硫酸钠	初始	20	0.01785	102	43	0.87	0	6.62	0.4922	5.51
		伤害后	20	0.01785	102	54	0.79	0.01	6.28	0.4651	

由表2可知,1号煤样使用月桂醇聚氧乙烯醚,损害率为-12.50%;2号煤样使用十二烷基苯磺酸钠,损害率为-2.10%;3号煤样使用十二烷基硫酸钠,损害率为-0.47%;4号煤样使用 $\alpha$ -烯炔磺酸钠,损害率为-2.56%;5号煤样使用正十六烷基硫酸钠,损害率为5.51%。非离子表面活性剂对煤岩的气相损害率比阴离子表面活性剂低。分析原因可能是,非离子表面活性剂极性端不带电,不容易导致煤粉颗粒脱落、运移堵塞孔喉;另一方面,非离子表面活性剂在煤基质表面吸附可能会破坏煤体结构,形成一些次生裂缝,增大气相渗流能力。对于阴离子表面活性剂,磺酸盐型、苯磺酸盐型对煤岩的气相损害率比硫酸盐型低;非极性基团碳链短的对煤岩的气相损害率比非极性基团碳链长的低。分析原因可能是,正十六烷基硫酸钠的色散力较强,较易在煤基质表面形成大量吸附,导致煤粉大量脱落堵塞孔喉。

## 4 结论

本文结合煤层气独特的开采方式,研究了表面活性剂与煤岩的相互作用关系,分析了表面活性剂对煤层排水降压和甲烷渗流过程的影响,采用煤体吸湿实验和气相渗透率综合评价表面活性剂对煤层的潜在损害。实验结果表明:

(1)通过煤体吸湿实验可知,阴离子表面活性剂能提高水相在煤样中的流动能力,加快排水降压过程的进行,有利于促进甲烷解吸,提高煤层气井产量;非离子表面活性剂对水相在煤样中的流动能力阻碍最弱,造成的损害最小。

(2)因为表面活性剂吸附会使煤样产生微裂缝,且非离子表面活性剂不带电,不会导致煤粉微粒的脱落、运移进而堵塞孔喉,所以非离子表面活性剂处理后的煤样气相渗透率有显著提升。

(下转第158页)

受本身局限的影响使其去除效果不佳,但是碘值较大的碘值 1 000 椰壳活性炭去除效果明显优于同类活性炭,甚至与柱状碘值 1 000 活性炭去除效果相近,说明碘值对于活性炭去除效果也有一定的正向影响。

上述所有因素实验表明,柱状碘值 800 活性炭对色氨酸去除效果较好。色氨酸浓度较低时(1~2 mg/L)柱状碘值 1 000 活性炭表现较好,浓度稍高时(2~5 mg/L)柱状碘值 800 活性炭去除效果较好。

### 3 结论

(1)不同种类活性炭在不同 pH 条件下,经对色氨酸去除效果对比,柱状碘值 800 的活性炭去除效果最好。大部分活性炭在 pH=4 左右去除色氨酸的效果较好。

(2)活性炭寿命或运行周期对其处理效果有一定的影响,随着吸附时间的延长,色氨酸去除效率逐渐增加。吸附时间达到一定值后,再增加吸附时间,去除效果不会有较大的改变。

(3)较高温度对活性炭去除效果有正面的影响,30℃条件下色氨酸去除效果最好。高温也有一定限制,超过 35℃去除效果反而下降。

(4)总体上,柱状碘值 800 的活性炭对水中色氨酸的去除效果最好,是较为理想的消毒前驱物(色氨酸)处理材料。

### 参考文献

[1] Abbas S, Hashmi I, Rehman M S U, *et al.* Monitoring of chlorination

(上接第 153 页)

(3)通过宏观气相渗透率测定实验可知,阴离子表面活性剂处理后的煤样气相渗透率变化不明显,是因为阴离子极性基团带负电,煤粉微粒会在静电斥力的作用下脱落,降低气相渗流能力;其中阴离子表面活性剂的非极性基团碳链越长,越容易在煤基质表面形成大量吸附,负电基团积累越多,导致更多的煤粉微粒脱落,煤样渗流能力随之降低。

### 参考文献

[1] 谭明文,何兴贵,张绍彬,等.泡沫压裂液研究进展[J].钻采工艺,2008,31(5):129-132.  
[2] 冯青.煤层气井低产伤害诊断及应用[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):86-91.  
[3] Su X, Wang Q, Song J, *et al.* Experimental study of water blocking damage on coal[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,

disinfection by-products and their associated health risks in drinking water of Pakistan[J]. Journal of Water and Health, 2015, 13(1):270-284.

- [2] Oktar B. THM formation and removal with disinfection in drinking water [J]. The Turkish Journal of Occupational/Environmental Medicine and Safety, 2017, 1(3):47-53.  
[3] 丁春生,李乃军,张涛,等.天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究[J].环境科学,2016,37(5):1831-1836.  
[4] 鲁金凤,张勇,刘艳芳,等.含氮消毒副产物 HNMs 的形成与控制研究进展[J].水处理技术,2010,36(10):5-9,22.  
[5] 王超,胡洪营,王丽莎,等.典型含氮有机物的氯消毒副产物生成潜能研究[J].中国给水排水,2006,22(156):9-12.  
[6] 翟培露.色氨酸氯化及氯化胺消毒副产物的研究[D].郑州:郑州大学,2020.  
[7] 李栗莹.活性炭吸附技术在水处理中的应用[J].化工管理,2020,(23):116-117.  
[8] 王伟.活性炭对水中有机物去除的研究[J].能源技术与管理,2017,42(5):151-152.  
[9] Liu J L, Li X Y, Xie Y F, *et al.* Removal of soluble microbial products as the precursors of disinfection by-products in drinking water supplies[J]. Environmental Technology, 2015, 36(5-8):722-731.  
[10] 王世忠.活性炭与膜技术对水中天然有机物去除中试研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
[11] 王爱平,刘中华.活性炭水处理技术及在中国的应用前景[J].昆明理工大学学报(理工版),2002,27(6):48-51.  
[12] 徐丽军.活性炭对水中有机物去除的研究进展[J].广州化工,2015,43(4):42-44.  
[13] 宋建刚,岳东北,聂永丰.硝酸改性活性炭对渗滤液中小分子有机物的吸附性能[J].环境化学,2009,28(6):788-792.  
[14] 段蕾,吕炳南,李伟光.温度对生物活性炭处理效果影响的试验研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2008,24(2):151-155. ■

2017, 156:654-661.

- [4] Liu Q, Guo Y, An F, *et al.* Water blocking effect caused by the use of hydraulic methods for permeability enhancement in coal seams and methods for its removal[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(4):615-621.  
[5] 邱正松,逢培成,黄维安,等.页岩储层防水锁微乳液的制备与性能[J].石油学报,2013,34(2):334-339.  
[6] 胡友林,乌效鸣.煤层气储层水锁机理及防水锁剂的研究[J].煤炭学报,2014,39(6):1107-1111.  
[7] 郑军,贺承祖,冯文光,等.表面活性剂对煤层气储层损害作用研究[J].油田化学,2005,(3):258-261.  
[8] Lu Y, Yang F, Ge Z, *et al.* Influence of viscoelastic surfactant fracturing fluid on permeability of coal seams[J]. Fuel, 2017, 194:1-6.  
[9] Lu Y, Yang F, Ge Z, *et al.* Influence of viscoelastic surfactant fracturing fluid on coal pore structure under different geothermal gradients [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 97:207-215. ■