

煤储层速敏伤害机理及防速敏试验研究

宋金星^{1,2},于世耀¹,苏现波^{1,2}

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454003;2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南 焦作 454003)

摘要:为了探索煤储层速敏伤害的控制方法,采用质量分数 1.5% KCl 溶液为基液,在其中加入不同浓度的阴离子型表面活性剂 AS 和非离子型表面活性剂 NS,配置出 35 种溶液,对河东煤田柳林地区沙曲矿的焦煤进行煤粉沉降试验、直剪试验,最终优选出用于防速敏的最佳表面活性剂体系为质量分数 0.05% AN 复配溶液(AS 和 NS 的比例为 9:1),由此构成了表面活性剂压裂液(1.5% KCl+0.05% AN)。研究结果表明:表面活性剂压裂液能润湿煤粉,增大煤粉颗粒间的黏聚力,导致水力压裂产生的煤粉经润湿后迅速沉降、固定,从而减少悬浮煤粉的数量,进而减少孔喉或裂缝狭窄处受到堵塞的机会,实现对煤储层速敏伤害的有效控制。

关键词:煤储层;速敏伤害;防速敏;表面活性剂;水基压裂液

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)06-0173-05

Study on velocity sensitivity damage mechanism and its proof test of coal reservoir

SONG Jinxing^{1,2}, YU Shiyao¹, SU Xianbo^{1,2}

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Provincial Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to discover a velocity sensitivity damage control method of the coal reservoir, 1.5% KCl solution was applied as a base fluid, different density anion type surfactant AS and nonionic type surfactant NS were added in the KCl solution and thus 35 types solution were prepared. Those 35 solutions were applied to the fine coal settling experiment and direct shear experiment of the coking coal in Shaqu Mine of Liulin Area of Hedong Coalfield. Finally, an optimum surfactant system for the velocity sensitivity proof was optimized as 0.05% AN complex solution (the ratio of AS and NS was 9:1) and therefore a surfactant fracturing fluid (1.5% KCl + 0.05% AN) was made. The study results showed that the surfactant fracturing fluid could moisture the fine coal, could improve the cohesion between the particles of the fine coal and could make the fine coal from the hydraulic fracturing rapidly setting and fixing after the watering. Thus the quantity of the suspended fine coal was reduced, the jamming opportunity occurred at the borehole throat and the narrow point of the cracks could be reduced and could realize the effective control of the velocity sensitivity damage to the coal reservoir.

Key words: coal reservoir; velocity sensitivity damage; velocity sensitivity proof; surfactant; water-based fracturing fluid

0 引 言

整个煤层气开发的系统工程中,排采是最后一道工序,这一阶段如果出现了问题,造成了储层伤害,工程将前功尽弃,经济损失严重^[1-4]。为此,学者们提出了“连续、缓慢、稳定”的排采控制原则,目

的是控制速敏的发生与应力敏感的延期到来^[5-8]。但缓慢程度及是否能定量表征,是目前关注的焦点。对于排采过程中的应力敏感是不可消除的,只能延缓其到来,使煤层气解吸后基质收缩造成的裂缝增宽与应力敏感造成的裂缝闭合衔接起来,最大限度地消除应力敏感造成的裂缝闭合,这一点也是决定

收稿日期:2018-03-18;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.06.029

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX05064-003-001);河南省高等学校重点科研资助项目(18B170004);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF170801)

作者简介:宋金星(1980—),男,河南安阳人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail:songjinxing@hpu.edu.cn

引用格式:宋金星,于世耀,苏现波.煤储层速敏伤害机理及防速敏试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):173-177.

SONG Jinxing, YU Shiyao, SU Xianbo. Study on velocity sensitivity damage mechanism and its proof test of coal reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 173-177.

排采的缓慢程度的因素之一^[9-12]。针对最为关键的速敏的控制,许多研究者进行了大量的研究工作,大体可概括为3个方面:①与流速有关,随着流体流速的增加,参加运移的微粒增多,孔喉或裂缝狭窄处受到堵塞的机会以及堵塞强度增加,储层速敏伤害程度也就增强,因此降低注水速度和抽水速度,使其不超过储层临界流速,避免储层微粒运移^[13-15];②与煤岩体胶结程度有关,岩石胶结越差,其发生储层速敏伤害的概率越高^[16];③储层发生速敏伤害与流体电解质浓度、pH值、盐度有关^[17]。笔者以探索煤储层速敏伤害的控制方法为目的,采集河东煤田柳林地区沙曲矿的焦煤作为研究对象,通过煤粉沉降试验和直剪试验,试图从减少水流中悬浮煤粉的数量入手,优选出用于防速敏的最佳表面活性剂体系,并揭示其防速敏的作用机理,为我国煤层气增产技术的研发与应用提供理论支撑。

1 煤储层速敏伤害机理

水力压裂施工中,由于压裂液与支撑剂的水力冲蚀和打磨作用,会产生大量的煤粉。悬浮或漂浮在水流中的细小煤粉随水流一起流动,当遇到狭窄的通道(通道直径小于3倍煤粉直径)时,煤粉将堵塞水流通道,造成气相渗透率下降,发生速敏^[18-20]。部分大颗粒煤粉沉降在水流通道底部,此时煤粉颗粒受到水流的拖拽力 F_D (力臂 L_D)、上举力 F_L (力臂 L_L)和煤粉自身的重力 W (力臂 L_W),由滚动平衡条件可知,当 $F_D L_D + F_L L_L = W L_W$ 时,煤粉颗粒开始滚动,当滚动的煤粉颗粒遇到凸起等障碍物后,跳跃升起,并被水流带走,产生滚动应满足的最小流速为:

$$U_c = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.605 \times 10^{-8} \frac{h + 10}{d^{0.72}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: h 为裂缝高度; d 为煤粉粒径; γ 和 γ_s 分别为液体的容重与煤粉容重。

因此,排采时应降低注水速度和抽水速度,使其不超过储层临界流速 U_c ,避免储层中已经沉降的大颗粒煤粉再次被水流冲起带走堵塞储层的狭窄通道。

储层的孔喉特征和煤岩体胶结程度是不易改变的,控制储层速敏伤害最有效的途径是使压裂施工过程中产生的大量煤粉润湿后迅速就地沉降、固定,从而减少水流中悬浮煤粉的数量,进而减少孔喉或

裂缝狭窄处受到堵塞的机会,抑制排采过程中煤粉对储层造成的速敏伤害,实现煤层气增产。

2 防速敏压裂液的优选试验

2.1 煤粉沉降试验

2.1.1 试验样品

采集河东煤田柳林地区沙曲矿的焦煤作为研究对象,煤质特征如下:

层位	4号
时代	P _{1s}
$M_{ad}/\%$	0.47
$A_{ad}/\%$	11.12
$V_{ad}/\%$	26.59
$R_{o,max}/\%$	1.3

将煤样粉碎后,用筛子筛取0.25 mm(60目)以下煤粉,装袋密封,编号备用。

2.1.2 配制压裂液

以往大量的研究和工程实践表明,氯化钾是一种可以有效控制水敏发生的黏土稳定剂,其质量分数一般在1%~2%,笔者采用蒸馏水配制成质量分数1.5%的KCl溶液作为基液进行试验。通过对多种表面活性剂进行初步的煤粉沉降试验,优选出2种性价比最好的表面活性剂:阴离子型表面活性剂AS和非离子型表面活性剂NS^[21-23]。以初步筛选得到的AN(AS和NS复配)的浓度、复配比例为研究因素,设置5个质量分数(0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.09%),每个质量分数均设置7个复配比例(NS和AS的比例为1:0、1:9、3:7、1:1、7:3、9:1、0:1);按照上述复配方案形成35种溶液。

2.1.3 试验方法

煤粉沉降试验以煤粉沉降率和沉降速度为考察标准。试验过程中,分别取出20 mL复合溶液倒入25 mL的玻璃试管中,加入煤粉0.5 g,用力振荡均匀,放置在试管架上,开始计时并观察煤粉沉降情况。

2.1.4 试验结果与分析

通过对配制的35种压裂液进行煤粉沉降试验,分析沉降率和沉降速度可知:加入单一AS的浆液,浆液静置沉降所需时间短、沉降速度快,但是浆液中存在部分絮状物,浆液的浊度高,沉降率低;加入单一NS的溶液,浆液静置沉降所需时间长,沉降速度慢,但浆液的浊度低,沉降率高;加入不同质量分数AN

的浆液,0.05%时的沉降率整体优于0.01%、0.03%、0.07%和0.09%,复配比例9:1的沉降速度整体优于1:9、3:7、1:1、7:3。通过煤粉沉降试验可以初步筛选出用于防速敏的最佳表面活性剂体系为0.05%的AN复配溶液(AS和NS的比例为9:1),由此构成了表面活性剂压裂液(1.5%KCl+0.05%AN)。

以蒸馏水、1.5%KCl溶液、0.05%AN溶液、1.5%KCl+0.05%AN溶液与沙曲煤粉形成4种浆液(编号①—④)为例,浆液静置沉降情况如图1所示。

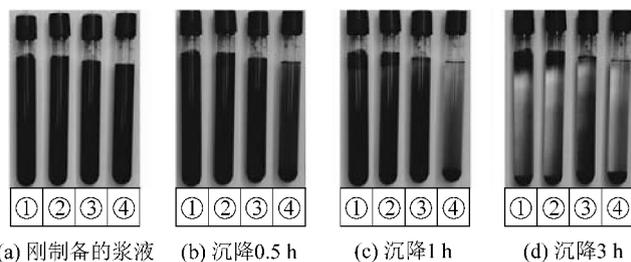


图1 煤粉沉降试验

Fig.1 Fine coal settling experiment

图1a为浆液刚制备好,此时煤粉在4种浆液内均匀分布,①—④号浆液颜色几乎没有差别,但随着时间的推移,煤粉开始沉降;浆液静置沉降0.5 h后(图1b),④号试管上部呈现半透明状态;浆液静置沉降1 h后(图1c),④号试管的上部和中部均已呈现半透明状态,但试管底部沉降的煤粉与液体的分界线还不明朗,③号试管上部也开始呈现半透明状态,①号和②号试管上部悬浮了少量煤粉;浆液静置沉降3 h后(图1d),③号和④号浆液内的煤粉均已沉淀于试管底部,①号和②号浆液内的煤粉大部分聚集漂浮于试管上部,只有少量煤粉沉降于试管底部,说明0.05%AN和1.5%KCl+0.05%AN溶液能够润湿煤粉,并且后者性能略优于前者。这是由于在蒸馏水、活性水等溶剂中加入少量的亲水性表面活性剂AN,可以改变溶剂的界面状态,从而对煤粉产生润湿作用。

2.2 直剪试验

2.2.1 煤样的制备

将沙曲矿煤样粉碎后,用筛子筛取0.25 mm(60目)以下的煤粉,烘干、缩分为21份。按不同含液率(3%、6%、9%、12%、15%、18%、21%)的配比向各组试样中分别加入蒸馏水、0.05%AN和1.5%KCl+0.05%AN溶液,搅拌均匀,装袋密封保存24 h。

2.2.2 试验结果

采用ZJ型应变控制式直剪仪进行直剪试验。

试样使用常规钢制环刀(直径为6.18 cm,高度为2 cm,环刀系数为1.86 kPa/0.01 mm)制备,体积约为60 cm³。试验时,在不同的竖向荷载作用下,对试样施加等速剪应变,通过测量系统测定出相应的剪应力和水平位移,得到不同的竖向荷载作用下破坏时的剪应力,然后根据库仑定律确定试样的黏聚力和内摩擦角(表1)。

表1 直剪试验结果

Table 1 Straight-shearing test results

含液率/ %	蒸馏水		0.05%AN		1.5%KCl+0.05%AN	
	黏聚力	内摩擦角	黏聚力	内摩擦角	黏聚力	内摩擦角
3	3.41	27.93	22.01	25.38	25.41	16.90
6	7.75	27.09	22.94	24.94	30.89	17.36
9	7.44	26.24	22.63	25.38	30.50	17.01
12	8.06	27.93	24.75	25.38	33.91	18.42
15	8.99	27.93	32.28	23.16	42.23	17.33
18	9.92	27.51	24.56	25.81	33.47	18.26
21	5.89	27.09	21.39	26.24	27.27	17.83

注:黏聚力单位 kPa,内摩擦角单位(°)。

3 煤储层表面活性剂压裂液的防速敏机理

3.1 润湿煤粉促使煤粉沉降

通过煤粉沉降试验发现,在蒸馏水、活性水等水基压裂液中加入0.05%的亲水性表面活性剂AN,可以改变溶剂的界面状态,从而对煤粉产生润湿作用,使煤粉迅速就地沉降聚集。因此,表面活性剂压裂液(1.5%KCl+0.05%AN)可以将煤粉颗粒从液面“拉入”水中,由于颗粒的密度大于压裂液的密度,煤粉颗粒在重力作用下就地自行沉降聚集。沉降聚集后的煤粉由于受到颗粒接触点上的黏聚力、摩擦力作用,使煤粉颗粒间不容易发生相对移动。

3.2 增大黏聚力抑制煤粉滚动

煤粉颗粒从静止状态到开始变形流动有一个过程,这是煤粉颗粒具有一定强度造成的。而煤粉颗粒的强度是由颗粒间接触点上存在黏聚力和摩擦力所形成的,即黏聚力和摩擦力与促使煤粉变形、流动的力相对抗。对于不同粒度和形态的煤粉,当颗粒较大时,其流动性取决于形貌,因体积力远大于颗粒间的黏聚力,由于煤粉颗粒表面粗糙且形态不均匀,因此颗粒较大的煤粉流动性较差;当煤粉颗粒很小时,其稳定性主要取决于颗粒间的黏聚力,此时体积力远小于颗粒间的黏聚力,因此,若要固定颗粒较小的煤粉,就要增大其黏聚力。由表1和图2可知,所

有溶液都呈现黏聚力随含水率增加先增加再降低的趋势,内摩擦角随含水率的变化不大。其中 1.5% KCl+0.05% AN 溶液作用的煤粉黏聚力最强,0.05% AN 溶液次之,蒸馏水最弱,干燥煤粉几乎没有黏聚力(接近于标准粉体,无法测得黏聚力)。

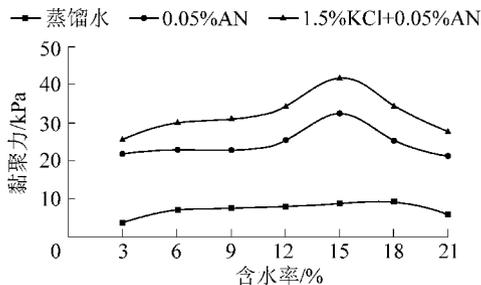


图2 3种液体作用后煤粉黏聚力的变化

Fig. 2 The effect of three kinds of solution treatment on cohesion of coal powder

表面活性剂分子 AN 由非极性的、亲油(疏水)的碳氢链部分和极性的、亲水(疏油)的基团共同构成的,且两部分分处两端,形成不对称结构^[24]。煤是由许多有机高分子组成的化合物,其结构单元的的主体部分由若干个芳环及个别脂环和杂环缩合而成,边缘部分主要是烷基侧链和各种官能团^[25],而表面活性剂的非极性基团(碳氢链)部分是亲煤的^[24],可以增大煤粉颗粒间的黏聚力以及沉降煤粉与孔喉或裂缝表面之间的吸引力,克服水流的拖拽力,以提高临界流速,从而起到固定煤粉的作用。在表面活性剂 AN 溶液中加入 KCl 后,由于 K⁺水化膜薄的弱水化作用,当表面活性剂压裂液(1.5% KCl + 0.05% AN)进入煤粉的层间,既减少了煤粉的水化,又增加了煤粉层间的吸引力^[18-19],从而进一步增加了煤粉的黏聚力,因此,3种液体中 1.5% KCl+0.05% AN 溶液作用后的煤样的黏聚力最强,固定煤粉效果更好。

综上所述,表面活性剂压裂液(1.5% KCl + 0.05% AN)同时具备增大煤粉颗粒表面的润湿性促使煤粉快速沉降的能力和增大煤粉颗粒间的黏聚力抑制已沉降的煤粉产生滚动的作用,致使压裂施工过程中产生的大量煤粉润湿后迅速就地沉降、固定,从而减少水流中悬浮煤粉的数量,进而减少孔喉或裂缝狭窄处受到堵塞的机会,抑制排采过程中煤粉对储层造成的速敏伤害,实现煤层气增产(图3)。

4 结 论

1) 在含 1.5% KCl 的活性水压裂液中加入 0.05%

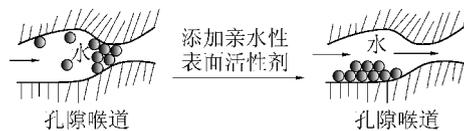


图3 表面活性剂压裂液抑制速敏示意

Fig.3 Schematic diagram of restraining velocity sensitivity with surfactant fracturing fluid

的亲水性表面活性剂 AN(AS 和 NS 的比例为 9 : 1),由此构成的表面活性剂压裂液(1.5% KCl + 0.05% AN),可以对煤粉产生润湿作用,使水力压裂产生的煤粉润湿后迅速沉降,从而减少悬浮煤粉的数量,进而减少孔喉或裂缝狭窄处受到堵塞的机会。

2) 表面活性剂压裂液可以增大煤粉颗粒间的黏聚力,从而抑制沉降的煤粉产生滚动,避免已经沉降的煤粉再次被水流冲起带走,堵塞储层的狭窄通道,起到固定煤粉的作用。

3) 表面活性剂压裂液能够使煤粉润湿后迅速沉降和固定,从而抑制排采过程中煤粉对储层造成的速敏伤害,实现煤层气增产。

参考文献 (References) :

- [1] 曹彦超,曲占庆,郭天魁,等.水基压裂液的储层伤害机理试验研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2016,31(2):87-92.
CAO Yanchao, QU Zhanqing, GUO Tiankui, et al. Experimental study on damage mechanism of water-based fracturing fluid to reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science, 2016, 31(2): 87-92.
- [2] 张永平,杨艳磊,唐新毅,等.沁南地区高煤阶煤储层流速敏感性及其影响因素[J].煤田地质与勘探,2015,43(4):36-40.
ZHANG Yongping, YANG Yanlei, TANG Xinyi, et al. Velocity sensitivity and its influencing factors of high-rank coal reservoirs in southern Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4): 36-40.
- [3] 孟召平,侯安琪,张鹏,等.沁水盆地典型煤矿区煤的流速敏感性试验及控制机理[J].煤炭学报,2017,42(10):2649-2656.
MENG Zhaoping, HOU Anqi, ZHANG Peng, et al. Experimental study on flow rate sensitivity of coal in typical coal mining area of Qinshui Basin and its control mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2649-2656.
- [4] 刘春花,刘新福,周超.煤层气井排采过程中煤粉运移规律研究[J].煤田地质与勘探,2015,43(5):23-26.
LIU Chunhua, LIU Xinfu, ZHOU Chao. Migration patterns of coal powder in coal reservoirs during the well drainage[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(5): 23-26.
- [5] 张遂安,曹立虎,杜彩霞.煤层气井产气机理及排采控压控粉研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1927-1931.

- ZHANG Sui'an, CAO Lihu, DU Caixia. Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1927-1931.
- [6] 陈振宏, 王一兵, 孙平. 煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 229-232.
- CHEN Zhenhong, WANG Yibing, SUN Ping. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 229-232.
- [7] 杨延辉, 汤达祯, 杨艳磊, 等. 煤储层速敏效应对煤粉产出规律及产能的影响[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 96-99, 103.
- YANG Yanhui, TANG Dazhen, YANG Yanlei, et al. Influence on velocity sensitivity effect of coal reservoir to production law of pulverized coal and gas productivity[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 96-99, 103.
- [8] 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.
- [9] 郑军, 贺承祖, 冯文光, 等. 煤气储层应力敏感、速敏和水敏性研究[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 77-78.
- ZHENG Jun, HE Chengzu, FENG Wenguang, et al. Sensitivity of stress, velocity and water of coal gas reservoir[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(4): 77-78.
- [10] 张双斌. 基于“三场”耦合的煤层气井排采控制理论与应用[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014: 10-12.
- [11] 张双斌, 苏现波, 郭红玉, 等. 煤层气井排采过程中压裂裂缝导流能力的伤害与控制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 124-128.
- ZHANG Shuangbin, SU Xianbo, GUO Hongyu, et al. Controlling the damage of conductivity of hydraulic fractures during the process of drainage in coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 124-128.
- [12] 敖坤, 刘月田, 秦冬雨. 微裂缝岩心不同应力下的速敏效应[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(6): 64-67, 71.
- AO Kun, LIU Yuetian, QIN Dongyu. Speed sensitive effect on micro fracture rocks under different stress[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2010, 34(6): 64-67, 71.
- [13] 张晓阳, 吴财芳, 刘强. 基于排采速率的煤层气井排采制度研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 131-135.
- ZHANG Xiaoyang, WU Caifang, LIU Qiang. Study on drainage system of coalbed methane well based on drainage rate[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 131-135.
- [14] HASANNEJADA Reza, POURAFSHARY Peyman, VATANI Ali, 等. 二氧化硅纳米流体在储集层微粒运移控制中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 802-810.
- HASANNEJADA Reza, POURAFSHARY Peyman, VATANI Ali, et al. Application of silica nanofluid to control initiation of fines migration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 802-810.
- [15] 林鑫, 张士诚, 张劲, 等. 柳林煤层气储层敏感性评价试验[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(6): 28-31, 35.
- LIN Xin, ZHANG Shicheng, ZHANG Jin, et al. Sensitivity evaluation experiment of Liulin CBM reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(6): 28-31, 35.
- [16] 徐加放, 李小迪, 孙泽宁, 等. 疏松砂岩储层敏感性评价方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 130-134.
- XU Jiafang, LI Xiaodi, SUN Zening, et al. Evaluation methodology of formation sensitivity for unconsolidated sandstones[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(5): 130-134.
- [17] 石京平, 宫文超, 曹维政, 等. 储层岩石速敏伤害机理研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(5): 501-504.
- SHI Jingping, GONG Wenchao, CAO Weizheng, et al. A research into the damage mechanism of velocity-sensitivity in sandstone of a reservoir[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(5): 501-504.
- [18] 宋金星. 煤储层表面改性增产机理及技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016: 108-113.
- [19] 苏现波, 马耕, 宋金星, 等. 煤系气储层缝网改造技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 182-183.
- [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论文集. 北京: 地质出版社, 2013: 365-369.
- [21] 杨宇, 曹煜, 田慧君, 等. 压裂中煤粉对煤储层损害机理分析与防控对策[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 84-87.
- YANG Yu, CAO Yu, TIAN Huijun, et al. Mechanism analysis of coal fines damaged to coal reservoirs and prevention countermeasures during fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 84-87.
- [22] 宋金星, 陈培红, 王乾. 煤储层水基压裂液用表面活性剂的筛选试验[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 79-83.
- SONG Jinxing, CHEN Peihong, WANG Qian. Laboratory study on screening and optimizing surfactant of water-based fracturing fluid for coalbed methane reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 79-83.
- [23] 张晓宇. 表面活性剂润湿煤体的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 10-11.
- [24] 朱锴. 表面活性剂降低瓦斯涌出的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 11-14.
- [25] 程五一, 裴晶晶, 朱锴. 表面活性剂降低颗粒煤瓦斯涌出量初步试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2007, 4(4): 1-5.
- CHENG Wuyi, PEI Jingjing, ZHU Kai. Study on reducing gas emissivity of mine granules by surfactant[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2007, 4(4): 1-5.