



移动扫码阅读

赵岩龙,辛晓霖,汪志明.滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率应力敏感性试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):213-218.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.030

ZHAO Yanlong, XIN Xiaolin, WANG Zhiming. Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 213-218. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.08.030

滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率应力敏感性试验研究

赵岩龙¹, 辛晓霖², 汪志明³

(1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 石油学院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司 钻井一公司, 辽宁 盘锦 124000; 3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘 要:滇东黔西地区煤岩渗透率普遍较低但地应力较高,煤层有效应力的变化会显著地影响储层渗透率,为了研究滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率的应力敏感机制,针对该地区煤样开展了渗透率应力敏感性试验,并结合扫描电镜(SEM)技术分析了煤样裂缝结构特征。试验结果表明:煤岩裂缝渗透率与有效应力呈现负指数关系。当有效应力小于 10 MPa 时,随着有效应力增大,煤层裂缝渗透率急剧下降,渗透率损害主要发生在此阶段;当有效应力大于 10 MPa 时,裂缝越来越难被压缩,裂缝渗透率下降趋势减缓。煤岩天然和人工裂缝均具有很强的应力敏感性。扫描图片显示,天然裂缝表面粗糙度较小,缝内存在填充物可用来支撑裂缝闭合,人工裂缝的应力敏感程度强于天然裂缝。在煤层气开发过程中需要合理控制生产压差,以减轻应力对渗透率的伤害,确保煤层气井的高效生产。

关键词:煤层气;裂缝;有效应力;应力敏感

中图分类号:TE122. 23

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)08-0213-06

Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou

ZHAO Yanlong¹, XIN Xiaolin², WANG Zhiming³

(1. China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China; 2. No.1 Drilling Company, Greatwall Drilling Company, Panjin 124000; 3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The permeability of coal and rock is generally low in eastern Yunnan and western Guizhou, but the in-situ stress is high. The change of effective stress of coal seam will significantly affect permeability of reservoir. In order to study the stress sensitivity mechanism of coal fracture permeability, the stress sensitivity experiment was carried out for coal samples collected from the region of eastern Yunnan and western Guizhou, and the structure characteristics of coal samples were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The test results show that the fracture permeability of coal and rock and the effective stress show a negative exponential relationship. When the effective stress is less than 10 MPa, the fracture permeability of the coal seam decreases sharply with the increase of the effective stress, and the permeability damage mainly occurs at this stage; when the effective stress is greater than 10 MPa, the fracture becomes more and more difficult to be compressed, the downward trend of fracture permeability slows down. Both natural and artificial fractures of coal rock have strong stress sensitivity. Microscopic images show that the surface roughness of natural fractures is smaller, and the filler can be used to support the fracture closure. The stress sensitivity of artificial fracture is stronger than that of natural fractures. In the process of CBM development, it is necessary to control the production pressure difference reasonably to reduce the damage of stress to permeability, and ensure the efficient production of CBM wells.

Key words: coalbed methane; fracture; effective stress; stress sensitivity

收稿日期:2019-02-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044005-001);新疆维吾尔自治区高校科研计划资助项目(XJEDU2018Y061);中国石油大学(北京)克拉玛依校区科研启动基金资助项目(YJ2018B01001)

作者简介:赵岩龙(1988—),男,新疆奎屯人,讲师,博士。E-mail:814823792@qq.com

0 引言

在煤层气开发过程中,储层有效应力的变化会显著影响煤岩渗透率。滇东黔西地区煤层气开发地质条件特殊,地应力高,煤体结构变化大,这使得该地区煤岩渗透率应力敏感机制更加复杂。煤岩是典型的孔隙-裂隙双重介质,裂隙渗透率远大于基质渗透率,因此煤岩裂隙渗透率应力敏感性对储层渗流特征有较大影响。目前,包括对数、幂律和多项式函数在内的许多经验关系被用于描述裂隙性储层的渗透率随应力的变化关系^[1-3]。文献[4-5]利用数值模拟手段系统地研究了应力作用下裂隙渗透率及裂隙中的复杂流动规律。但目前有关裂隙的应力敏感性研究大多集中在致密砂岩储层与页岩储层^[6-8]。李相臣等^[9]以室内试验为手段,系统研究了变有效应力条件下煤岩裂隙宽度和渗透率的变化规律;赵伦^[10]等对人造裂隙的非填充、半填充、全填充裂隙进行应力敏感性试验,分析了样品渗透率应力敏感机理及损害程度;杨延辉等^[11]对沁水盆地南部高煤阶煤岩样进行了系统的压敏效应评价,研究发现该地区煤岩渗透率损害程度较大,主要表现为强压敏;刘大锰等^[12]总结了国内外地应力对煤储层渗透性影响规律及机制研究的最新进展;贾慧敏等^[13]通过室内试验评价了裂隙对煤岩应力敏感性的影响,建立了定量表征煤岩应力敏感性对渗透率影响的数学模型;陈浩^[14]等采用脉冲衰减方法开展了低渗透率煤岩样品渗透率应力敏感试验,并指出煤岩应力敏感机理主要受孔隙结构的影响。然而,笔者针对滇东黔西地区煤岩天然和人造裂隙开展应力敏感性试验,并结合微观结构分析对裂隙渗透率应力敏感进行研究。

1 应力敏感性试验

1.1 煤岩参数

试验煤样取自滇东黔西地区,煤块直接从矿井工作面采集,采用线切割的方法沿不同方向钻取标准圆柱煤心,煤岩显微组分以半暗煤和半亮煤为主,镜质组反射率在1.5%以上,为中高阶煤。将煤样分为2类,一类煤样具有明显贯穿的天然裂隙发育(初始渗透率在 $11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上),另一类则规则且无明显裂隙,以备制作人造裂隙的样品(初始渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。利用巴西劈裂试验将表面无明显裂纹、均质完整煤样劈裂为2半进行人工造缝,如图1所示。试验时将裂缝面完整的2个半圆柱煤样合并,测定升降压过程中裂缝煤样在不同有

效应力下的气测渗透率。由于完整煤样的初始渗透率较小,故认为煤样渗透率完全由裂缝贡献,测定值可视为煤岩人工裂缝的渗透率。

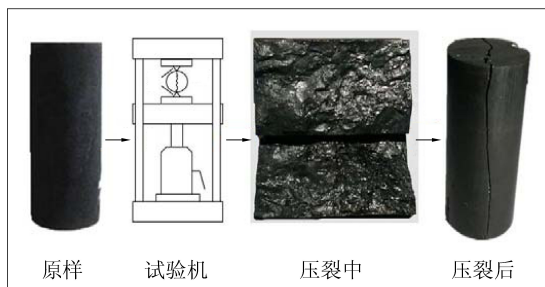


图1 原始煤样人工造缝过程示意

Fig.1 Schematic diagram of artificial fracture process of raw coal sample

1.2 试验方法

利用法国 VINCI 公司的 COREVAL-700 非稳态覆压孔渗仪进行渗透率的测定。气体渗透率的测量采用压力衰减法,气体从样品上端的储气罐注入样品,待稳定后,打开出口阀联通大气,连接在岩心夹持器上端管汇中的高精度压力传感器开始记录岩样内的压力随时间的变化。该设备的有效渗透率范围为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 20 \mu\text{m}^2$ 。具体试验流程如下:① 测量并记录待测煤样的长度、质量和直径,并将样品放入岩芯夹持器中;② 对样品施加一定围压和轴压并对样品充气,使煤心饱和氮气至孔隙压力均化(1.7 MPa)且达到平衡状态;③ 打开出口阀与大气连通,软件连续监测记录样品孔隙压力随时间衰减数据。在饱和气体和压力衰减的过程中,围压在程序的控制下随之调节,以保证有效应力恒定,软件将自动测量渗透率的值;④ 有效应力从 2 MPa 逐步提高到目标值再降低至 2 MPa,重复试验。

1.3 试验结果及讨论

试验结果表明,采用指数函数式能较好地拟合滇东黔西煤岩渗透率与有效应力的变化关系为

$$k = k_0 \exp(-b \sigma_e) \quad (1)$$

式中: k 为煤岩渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_0 为初始有效应力条件下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; b 为指数型应力敏感关系中的参数, MPa^{-1} , 其反映了渗透率对有效应力的变化的敏感程度,此值越大,渗透率下降越明显,应力敏感越强; σ_e 为有效应力, MPa。

天然裂隙和人工裂隙煤样的渗透率(k_1 、 k_2)试验数据的拟合结果如图2和图3所示。

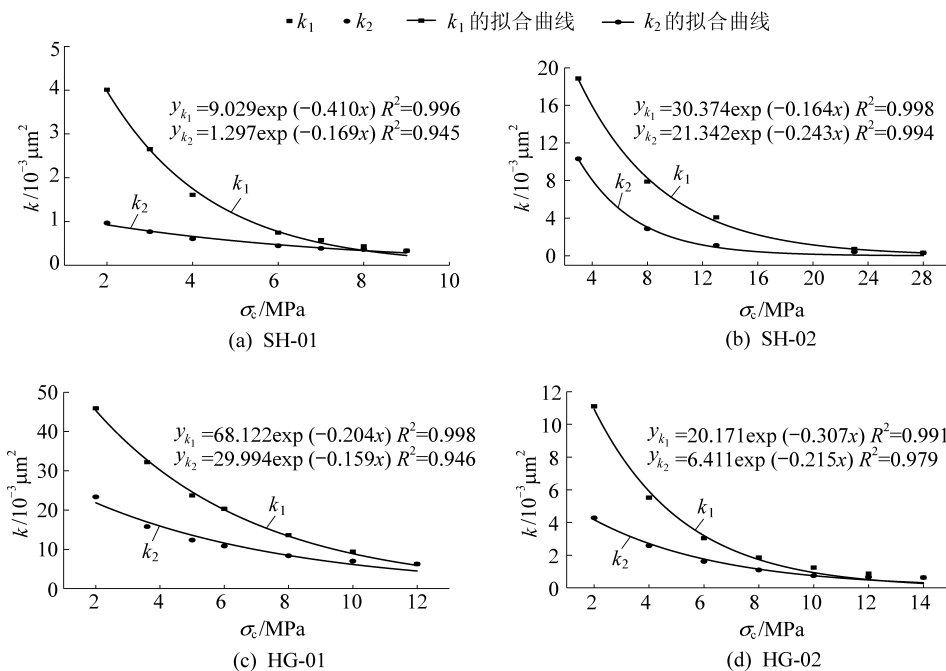


图2 天然裂缝煤岩渗透率随有效应力变化的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of coal permeability of natural fracture with change of effective stress

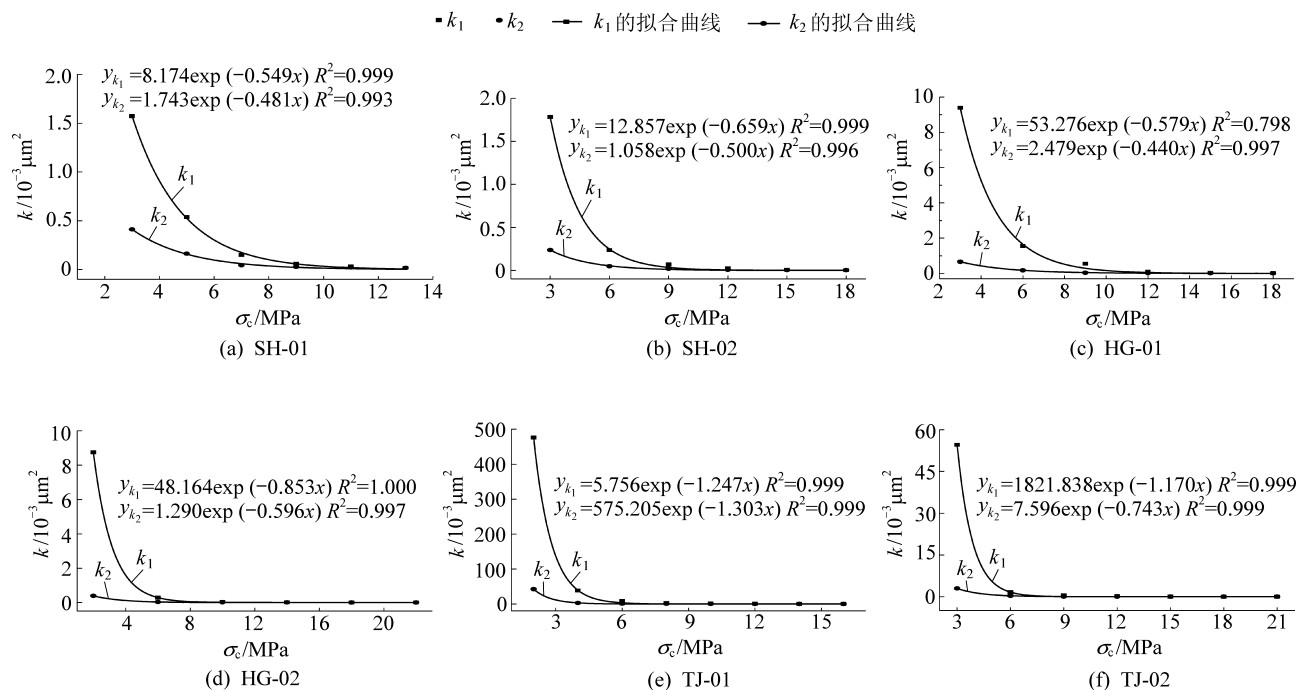


图3 人工裂缝煤岩渗透率随有效应力变化的拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of coal permeability of artificial fracture change with effective stress

由图2—图3可知,对于天然裂缝,当有效应力小于10 MPa时,随着有效应力增大,煤层裂缝渗透率急剧下降,渗透率损害主要发生在此阶段;当有效应力大于10 MPa时,裂缝越来越难被压缩,裂缝渗

透率下降趋势减缓。人工裂缝的临界应力约为7 MPa,此值普遍低于天然裂缝。利用经典的指数关系对滇东黔西地区天然及人造裂缝煤岩渗透率数据进行拟合,其参数拟合结果见表1。

表 1 试验渗透率参数拟合结果
Table 1 Parameter fitting results of experimental permeability

裂缝类型	编号	矿区	煤层 编号	$k_0/$ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	升压过程			降压过程		
					a	b	R^2	a	b	R^2
人工裂缝	SH-01	松河	15	1.571 6	8.174	0.549	0.999 3	1.743	0.481	0.993 0
	SH-02			1.783 3	12.857	0.659	0.999 1	1.058	0.500	0.996 5
	HG-01	红果	3	9.391 2	53.276	0.579	0.998 5	2.479	0.440	0.996 8
	HG-02			8.752 2	48.164	0.853	1.000 0	1.290	0.596	0.997 3
	TJ-01	天井	3	476.03	5 756.9	1.247	0.999 8	575.21	1.303	0.999 3
	TJ-02			54.584	1 821.8	1.170	0.999 9	27.596	0.743	0.999 6
天然裂缝	SH-01	松河	12	4.010 1	9.029	0.410	0.995 2	1.297	0.169	0.970 5
	SH-02	松河	15	18.857 3	30.674	0.164	0.998 0	21.342	0.243	0.994 8
	HG-01	红果	3	45.881 4	68.122	0.204	0.998 1	29.994	0.159	0.946 6
	HG-02			11.105 7	20.171	0.307	0.991 7	6.411	0.215	0.979 6

由表 1 可知,指数拟合的相关系数 R^2 均在 0.94 以上。不同类型裂缝的渗透率随有效应力的变化趋势基本一致,但系数 a 和 b 差别较大。煤岩人造裂缝可以显著提高煤岩的渗透性,但人工裂缝的应力敏感性强于天然裂缝。

2 滇东黔西煤岩应力敏感性评价

依据储层敏感性试验评价方法 (SY/T 5358—2010) 及相关学者的研究,不同的应力敏感评价标

准来评价滇东黔西地区煤岩的应力敏感程度。①应力敏感引起的渗透率损害率 D_{k1} ,其反映了有效应力加载引起的储层渗透率的损害程度;②应力敏感引起的不可逆渗透率损害率 D_{k2} ,它反映当有效应力降低后,煤储层渗透率不能恢复的程度;③ Jones F O 和 Owens W W 提出的应力敏感性系数 S_s 。行业标准和相关学者给定的具体标准见表 2 和表 3,其中渗透率损害率 D_k 取 D_{k1} 和 D_{k2} 中的最大值。

表 2 应力敏感性评价标准
Table 2 Evaluation criterion of stress sensitivity

D_k 取值范围	$D_k \leq 5$	$5 < D_k \leq 30$	$30 < D_k \leq 50$	$50 < D_k \leq 70$	$70 < D_k \leq 90$	$D_k > 90$
应力敏感程度	无	弱	中等偏弱	中等偏强	强	极强

表 3 应力敏感性系数评价标准
Table 3 Evaluation criteria of stress sensitivity coefficient

S_s 取值范围	$S_s < 0.05$	$0.05 \leq S_s < 0.3$	$0.3 \leq S_s < 0.5$	$0.5 \leq S_s < 0.7$	$0.7 \leq S_s < 1.0$	$S_s \geq 1.0$
应力敏感程度	无	弱	中等偏弱	中等偏强	强	极强

据表 4 可知,造缝后煤样的初始渗透率得到了极大的提高,但裂缝对应力的敏感程度远高于完整煤样。升压后裂缝渗透率均会明显下降且降压后恢复不到初始值。天然裂缝的渗透率损害率均在 85% 以上,不可逆损害率均在 49% 以上;人工裂缝的渗透率损害率均高于 90%,不可逆损害率均高于 73%。人工裂缝的应力敏感性强于天然裂缝,应力引起的人工裂缝的渗透率损害和不可逆损害更加显著。

3 微观结构分析

对该地区煤样进行扫描电镜测试,选取具有代

表性的裂隙扫描图片进行分析,煤样裂隙的电镜扫描图像 (图 4)。

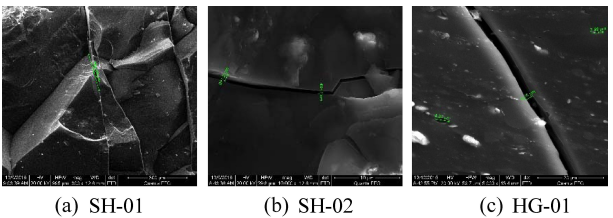


图 4 天然煤岩样品的扫描电镜
Fig.4 Scanning electron microscopy images
of natural coal samples

表 4 裂缝煤岩的渗透率损害评价及应力敏感程度

Table 4 Permeability damage evaluation and stress sensitivity of fractured coal

类型	煤样 编号	$k_0/$	$k_{\min}/$	$k_r/$	$D_{k1}/$	$D_{k2}/$	S_s	应力敏感程度	
		($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	%	%		D_k	S_s
人工裂缝	SH-01	1.5716	0.0178	0.4116	98.86	73.81	1.2178	极强	极强
	SH-02	1.7833	0.0029	0.2367	99.84	86.73	1.1344	极强	极强
	HG-01	9.3912	0.0179	0.6633	99.81	92.94	1.1260	极强	极强
	HG-02	8.7522	0.0024	0.3918	99.97	95.52	0.8977	极强	强
	TJ-01	476.03	0.0729	45.52	99.98	91.07	1.0481	极强	极强
	TJ-02	54.584	0.0136	2.976	90.84	94.55	1.1089	极强	极强
天然裂缝	SH-01	4.0101	0.3332	0.7679	91.70	71.04	0.8628	极强	强
	SH-02	18.8573	0.3157	10.317	85.92	57.01	0.7672	强	强
	HG-01	45.8814	6.252	23.35	86.37	49.10	0.6238	强	中等偏强
	HG-02	11.1057	0.6321	3.4667	94.31	68.78	0.7281	极强	强

注: k_0 、 k_{min} 、 k_r 分别表示样品初始渗透率,最大有效应力条件下的渗透率和降压过程中有效应力恢复到初始条件下的渗透率。

观察发现样品裂隙宽度在纳米-微米级别。由图 4b、图 4c 可以发现天然裂缝表面粗糙度较小,缝内存在填充物。由于天然裂缝内有填充物、形态更加复杂,且长期受压结构稳定,从而导致天然裂缝抵抗应力变形的能力相对较强。而人造裂缝形态结构单一,稳定性差,承受相同应力时裂缝更容易闭合,渗透率下降更为剧烈,导致人造裂缝应力敏感性更强。因此,煤层气开发过程中需要合理控制生产压差,避免严重的渗透率损害,确保煤层气井的产量和经济效益最大化。

4 结 论

1)煤岩裂缝渗透率与有效应力之间呈指数关系。随着有效应力增大,煤层裂缝渗透率先急剧下降而后趋势减缓,最终趋于稳定。

2)天然裂缝的渗透率损害率均在 85% 以上,不可逆损害率均在 49% 以上;人工裂缝的渗透率损害率均高于 90%,不可逆损害率均高于 73%。人工裂缝的应力敏感性强于天然裂缝,应力引起的人工裂缝的渗透率损害和不可逆损害更加显著。

3)煤岩裂缝存在着很强的应力敏感性,煤层气开发过程中需要合理控制生产压差,将有效应力控制在 7 MPa 以内,避免严重的渗透率损害,确保煤层气井的产量和经济效益最大化。

参考文献(References):

[1] CHEN Dong, PAN Zhejun, YE Zhihui, *et al.* A unified permeability and effective stress relationship for porous and fractured reservoir rocks [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 401-412.

[2] REYES L, OSISANYA S O. Empirical correlation of effective stress dependent shale rock properties [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 27(12): 47-53.

[3] PERROSA O A. Pressure transient response in stress-sensitive formation [C]// The 56th California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, SPE 15115, 1986: 203-214.

[4] MIN K B, RUTQVIST J, TSANG C F, *et al.* Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004; 41(7): 1191-1210.

[5] 曲冠政, 曲占庆, HAZLETT Randy Dolye 等. 页岩拉张型微裂缝几何特征描述及渗透率计算 [J]. 石油勘探与开发, 2016; 43(1): 115-120.

QU Guanzheng, QU Zhanqing, HAZLETT R D, *et al.* Geometrical description and permeability calculation about shale tensile micro-fractures [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 115-120.

[6] 王尤富, 石 勇, 付利琴. 低渗透裂缝油藏岩石应力敏感性试验研究 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 117-119.

WANG Youfu, SHI Yong, FU Liqin. Experimental study on rock stress sensitivity of low permeability fractured reservoir [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 117-119.

[7] 付兰清. 裂缝对致密砂岩储层应力敏感性及渗流特征影响研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2016, 13(7): 14-18.

FU Lanqing. Influence of fracture on stress sensitivity and seepage characteristics of tight sandstone reservoir [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2016, 13(7): 14-18.

[8] 张 浩, 康毅力, 陈景山, 等. 储层裂缝宽度应力敏感性可视化研究 [J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 41-43.

ZHANG Hao, KANG Yili, CHEN Jingshan, *et al.* Study on visualization of stress sensitivity of reservoir crack width [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 41-43.

[9] 李相臣, 康毅力, 罗平亚. 应力对煤岩裂缝宽度及渗透率的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 29-32.

LI Xiangchen, KANG Yili, LUO Pingya. Effects of stress on crack

- width and permeability of coal[J]. Coal Geology and Exploration, 2009, 37(1): 29-32.
- [10] 赵 伦,陈烨菲,宁正福等.异常高压碳酸盐岩油藏应力敏感试验评价:以滨里海盆地肯基亚克裂缝-孔隙型低渗透碳酸盐岩油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 194-200. ZHAO Lun, CHEN Yefei, NING Zhengfu, *et al.* Stress sensitive experiments for abnormal overpressure carbonate reservoirs: a case from the Kenkiyak low - permeability fractured - porous oilfield in the littoral Caspian Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 194-200.
- [11] 杨延辉,陈彦君,郭希波,等.沁水盆地南部高煤阶煤岩渗透率压敏效应分析[J].煤炭科学技术, 2015, 43(12): 152-156. YANG Yanhui, CHEN Yanjun, GUO Xibo, *et al.* Analysis on effect of stress sensitivity on permeability of high - rank coal in southern Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 152-156.
- [12] 刘大锰,周三栋,蔡益栋,等.地应力对煤储层渗透性影响及其控制机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 1-8, 23. LIU Dameng, ZHOU Sandong, CAI Yidong, *et al.* Study on effect of geo-stress on coal permeability and its controlling mechanism [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 1-8, 23.
- [13] 贾慧敏,孙世轩,毛崇昊,等.基于煤岩应力敏感性的煤层气井单相流产水规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 189-193. JIA Huimin, SUN Shixuan, MAO Chonghao, *et al.* Study on single-phase flow water production law of coalbed methane well based on coal and rock stress sensitivity[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 189-193.
- [14] 陈 浩,秦 勇,李贵中,等.基于脉冲衰减法的煤岩渗透率应力敏感性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 167-172. CHEN Hao, QIN Yong, LI Guizhong. *et al.* Study on stress sensitivity of coal rock permeability based on pulse-decay method [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 167-172.