

文章编号: 1001-1986(2020)03-0045-06

大倾角煤层水力裂缝扩展物理模拟实验

姜 伟¹, 张 军², 仲 劼², 赵 琛², 唐助云², 卢海兵¹, 易新斌¹, 王 海³

(1. 中国石油勘探开发研究院压裂酸化技术服务中心, 河北 廊坊 065007; 2. 新疆维吾尔自治区煤田地质局一五六煤田地质勘探队, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司, 天津 300000)

摘要: 为研究大倾角煤层水力压裂裂缝扩展形态, 采用大尺寸真三轴压裂模拟系统, 分别开展最大水平主应力沿地层走向和沿地层倾向的 60°倾角煤层水力裂缝扩展物理模拟实验。结果表明: 最大主应力方向沿地层走向时, 裂缝起裂容易, 缝高受限, 裂缝连通性好, 裂缝的开启主要沿层理和天然裂缝, 形成垂直缝形态, 地层倾角对压裂施工影响相对较小, 建议进行大规模压裂以充分改造煤储层; 最大主应力方向沿地层倾向时, 裂缝起裂困难, 前期缝高受限, 后期缝高失控, 裂缝连通性差, 受节理影响, 不易形成主缝, 所以裂缝扩展困难, 转向及多级破裂较多, 此类煤层建议进行多级小规模压裂改造。实验结果对新疆等地区大倾角煤层的改造模式和改造规模具有指导作用。



关键词: 煤层气; 大倾角; 应力方向; 裂缝形态; 物理模拟; 施工规模; 新疆阜康
中图分类号: TE321 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.007

Physical simulation experiment investigation on hydraulic fracture propagation in high-dip coal seam

JIANG Wei¹, ZHANG Jun², ZHONG Jie², ZHAO Chen², TANG Zhuyun²,
LU Haibing¹, YI Xinbin¹, WANG Hai³

(1. *Fracturing and Acidizing Technology Service Center, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China*; 2. *No.156 Coalfield Geological Exploration Team, Xinjiang Bureau of Coalfield Geology, Ürümqi 830000, China*; 3. *CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd., Tianjin 300000, China*)

Abstract: In order to study the hydraulic fracture geometry in high-dip coal seam, a large-scale true triaxial fracturing simulation system was used to carry out physical simulation experiments, and the hydraulic fracture geometry of the maximum horizontal principal stress along the strike direction and along the dip direction-in 60° dip coal seam were investigated respectively. Experimental results of the maximum principal stress direction along the strike direction show that: hydraulic fracture initiation is easily; fracture height is limited in the whole time; fracture connectivity is good; fracture propagates mainly along bedding and natural fracture, vertical fracture is formed; the influence of high-dip on stimulation is relatively small; massive volume stimulation is needed. Experimental results of the maximum principal stress direction along the dip direction show that: hydraulic fracture initiation is hard; fracture height is limited in the early time and out of control in the later period; fracture connectivity is poor; fracture is not easy to form influenced by joint, and hydraulic fracture propagates difficultly; fracture diversion and multi-stage breakdown can be observed in the fracturing curve; small volume but multi-stage stimulation is needed. The experimental results have a good guiding effect on the stimulation model and scale determination of the high-dip coal seam in Xinjiang and other regions.

Keywords: coalbed methane; high-dip angle; stress direction; hydraulic fracture geometry; physical simulation; construction scale; Xinjiang Fukang

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技重大专项项目(2017B03019)

Foundation item: Science and Technology Major Project of Uygur Autonomous Region of Xinjiang(2017B03019)

第一作者简介: 姜伟, 1988 年生, 男, 湖北襄阳人, 硕士, 工程师, 从事非常规油气藏储层改造方面的研究工作. E-mail: jiangwei69@petrochina.com.cn

引用格式: 姜伟, 张军, 仲劼, 等. 大倾角煤层水力裂缝扩展物理模拟实验[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 45-50.

JIANG Wei, ZHANG Jun, ZHONG Jie, et al. Physical simulation experiment investigation on hydraulic fracture propagation in high-dip coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 45-50.

我国煤层气资源丰富,其中,新疆煤层气资源占全国煤层气预测资源量的26%^[1],与国内外其他煤层气藏相比,新疆阜康白杨河矿区煤层具有低煤阶、大倾角(地层倾角一般42°~68°,局部倒转)的地质特点^[2],煤层压裂裂缝扩展规律、裂缝形态等与其他地区水平煤层有较大差异,水平煤层压裂一般形成水平裂缝,裂缝高度扩展受限,大倾角煤层是否形成水平缝,高度上如何扩展等问题需进一步研究。

目前,对大倾角煤层压裂方面的研究工作较少,程亮等^[3]开展倾斜地层水力压裂数值模型推导和相关试验,得到施工压力随煤层倾角增大而增大;谢相军^[4]统计了大量现场压裂施工井及裂缝监测结果,采用压降分析方法对阜康白杨河矿区的大倾角煤层水力裂缝形态、方位等参数进行研究,并提出了相应的增产改造建议;罗晓^[5]建立大倾角煤层L井破裂点及破裂压力计算模型,对大倾角煤层破裂压力计算提供一定指导;高建成等^[6]采用数值模拟方法开展不同倾角煤层对水力压裂压力的影响,水力压裂压力随煤层倾角增大而减小,达到一定值后又随着煤层倾角的增大而增大;王志荣等^[7]分析了煤层倾角和埋深对压裂起裂压力和起裂位置影响,起裂压力在埋深相同时不随煤层倾角的改变而改变。前人研究主要是采用数值模拟方法,计算大倾角煤层倾角变化导致的施工压力变化,并未考虑最大主应力方向对施工压力和裂缝形态的影响。基于前人的研究认识,为了研究大倾角煤层条件下,水力压裂裂缝扩展过程、裂缝形态的演化规律,笔者采用大尺寸真三轴压裂模拟系统,分别开展最大水平主应力沿地层走向和沿地层倾向的60°倾角煤层水力裂缝形态物理模拟实验,探讨固定倾角下,应力方向对施工压力和裂缝形态的影响,并对不同应力方向下的水力压裂施工模式进行探讨。

1 实验设备及方法

1.1 实验装置与试样制备

大尺寸真三轴压裂模拟系统主要由真三轴岩样模型、真三轴压力加载系统、恒流速恒压泵、电器控制系统、数据采集系统、管阀件、辅助装置等部分组成,如图1所示。应力加载系统在水平方向和垂直方向最大应力分别可以达到30 MPa和15 MPa,恒速恒压泵采用双缸连续供液方式,最大注入压力65 MPa。

实验煤样采集自新疆阜康乌东矿井43号煤,采集煤样标高460~480 m,煤层埋深300 m左右,煤层裂隙长度0.01~2.70 cm,高度0.01~1.90 cm,宽度1~550 μm ,密度0.60~8.20条/cm,裂隙系统多呈网

状和平行状,煤层倾角42°~68°,煤体结构以碎裂—碎粒煤为主。

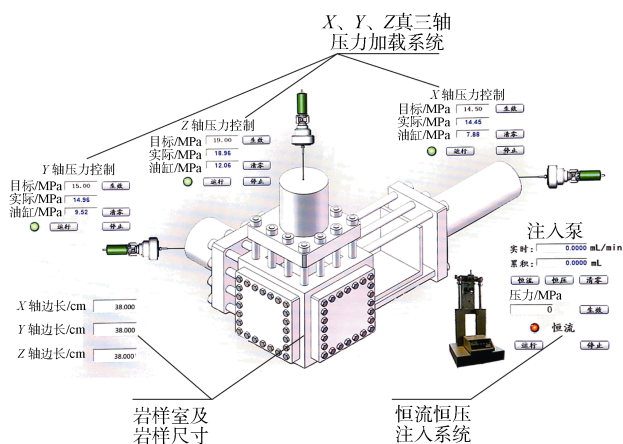


图1 大尺寸真三轴压裂模拟系统示意

Fig.1 Sketch map of large size true triaxial fracturing simulation system

采用环形全封闭数控砂线切割机床(型号DL7750)切割煤样,沿着煤层层理和与层理呈60°方向将煤块切割成倾斜煤样立方体,如图2a所示。在煤样周围采用水泥包裹制成38 cm×38 cm×38 cm试样(包裹试样水泥采用煤粉和水泥按照3:7比例制作,尽可能模拟煤层周围岩石性质),并在煤样中心钻孔,以模拟井眼至煤样中部、在距离井底2 cm处下套管固井,如图2b所示。

1.2 实验方法

通过计算,储层段最小水平主应力梯度为0.02 MPa/m,井深750 m,则实验加载最小水平主应力15 MPa、最大水平主应力19 MPa、垂向应力14.5 MPa。

采用速度相似准则,结合实验模型尺寸,确定实验室物理模拟实验排量。现场施工排量12 m³/min,套管内径124.26 mm,煤层平均厚度17 m,实验室注入管线内径3 mm,实验室设定水力裂缝贯穿煤样,高度取38 cm。确定物理模拟实验排量为150 mL/min。

1.3 实验步骤

开展2块试样的水力压裂模拟实验:模拟压裂液使用1% KCl活性水。模拟60°倾斜地层,分别按最大主应力沿地层倾向和沿地层走向开展模拟压裂实验。

实验流程按照制样→入仓→应力加载→压裂→出仓→外观观察→剖开观察的顺序进行。

2 大倾角煤层水力压裂裂缝形态

2.1 最大主应力沿地层走向的水力裂缝形态

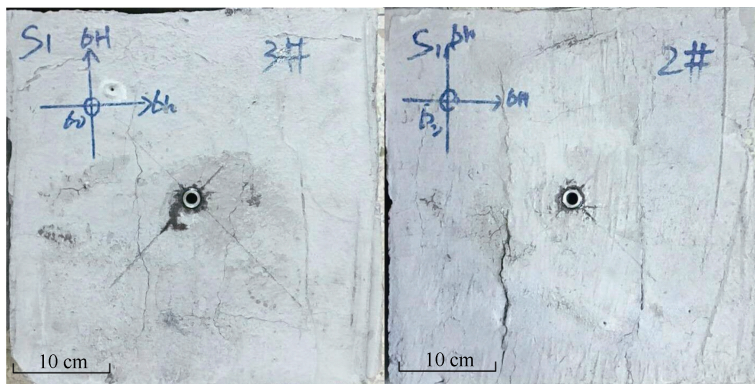
如图3a所示,恒定注入排量150 mL/min,压裂过程中压力沿一定斜率直线逐渐上升,从2 MPa逐

渐上升到 6 MPa。双对数曲线^[8-9]中(图 3b), 前期斜率为 1.375, 后期斜率为 0.303, 反映了裂缝向前延

伸过程中缝高受限。停泵后压力很快降到零, 说明裂缝连通性较好。



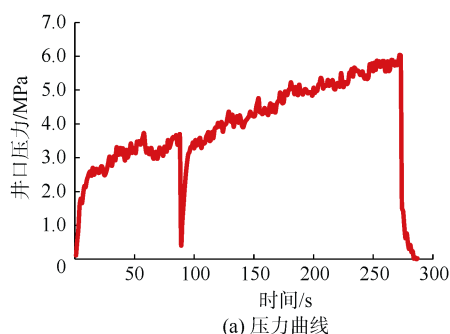
(a) 切割完成的大倾角煤样



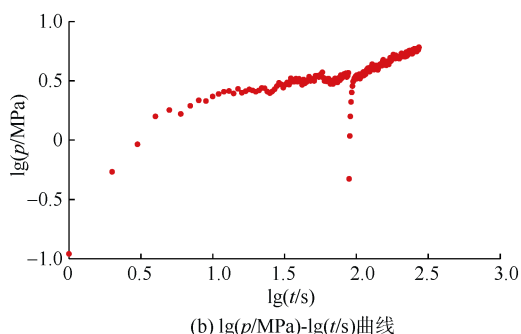
(b) 水泥包裹后煤样

图2 模拟实验煤样

Fig.2 Coal samples for simulation experiment



(a) 压力曲线



(b) $\lg(p/\text{MPa})-\lg(t/s)$ 曲线

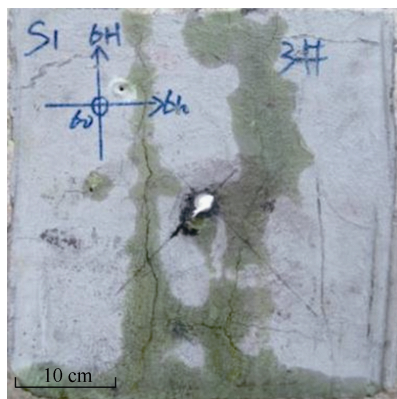
图3 最大主应力沿地层走向实验压裂曲线及双对数曲线

Fig.3 The fracturing curve and the logarithmic curve of maximum principal stress along the direction of the formation strike

试样从加压舱中取出后可以看到明显的水力裂缝(图 4a), 水力裂缝为沿最大主应力方向的垂直缝, 从试样外表来看, 人工裂缝基本贯穿整个试样, 且裂缝宽度较大, 所以压裂停泵后的压力很快降到零。煤样剖开后观察到明显的人工裂缝, 染料铺满整个裂缝面; 裂缝的开启主要沿层理和天然裂缝方向, 由于地层倾角较大, 形成垂直缝形态(图 4b)。

2.2 最大主应力沿地层倾向的水力裂缝形态

由图 5a 可以看出, 开始采用 150 mL/min 排量恒流注入时, 压力上升特别快, 决定改用 50 mL/min 恒流注入尝试压裂, 50 mL/min 注入后压力快速上升到 19 MPa, 后续采用 50 mL/min 完成压裂。注入过程中压力缓慢下降, 由 19 MPa 降至 9.5 MPa; 其中出现多次破裂, 双对数曲线中(图 5b)前期斜率为



(a) 表面裂缝形态



(b) 内部裂缝形态

图4 最大主应力沿地层走向模拟压裂后煤样的内外形态

Fig.4 Coal sample after simulated fracturing at maximum principal stress along the direction of the formation strike

1.209, 说明裂缝高度和长度扩展受限, 后期斜率小于零, 缝高失控。停泵后压力缓慢下降, 说明裂缝连通性较差。

试样从加压舱中取出后可以看到明显的水力裂

缝, 水力裂缝基本沿着煤与水泥的交界面, 有一条垂直交界面的水力裂缝(图 6a)。将煤样剖开, 煤中裂缝网络纵横交错, 所有层理和割理基本都有颜料, 任意选择一个面剖开均可以看到颜料呈星点状分布(图 6b)。

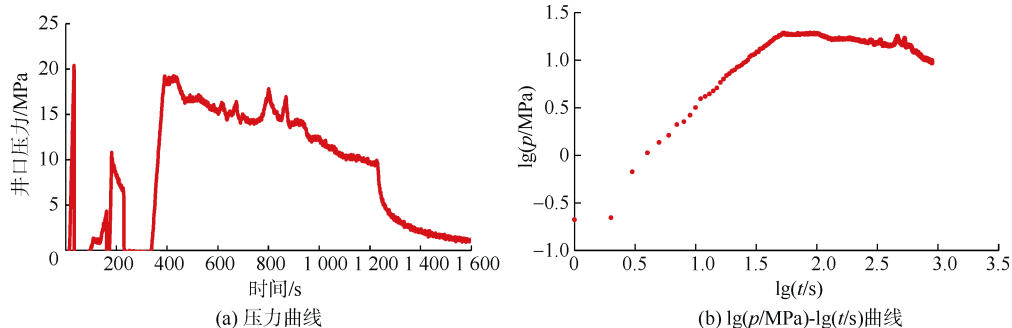


图 5 最大主应力沿地层倾向实验压裂曲线及双对数曲线

Fig.5 The fracturing curve and the logarithmic curve of maximum principal stress along the dip of the strata

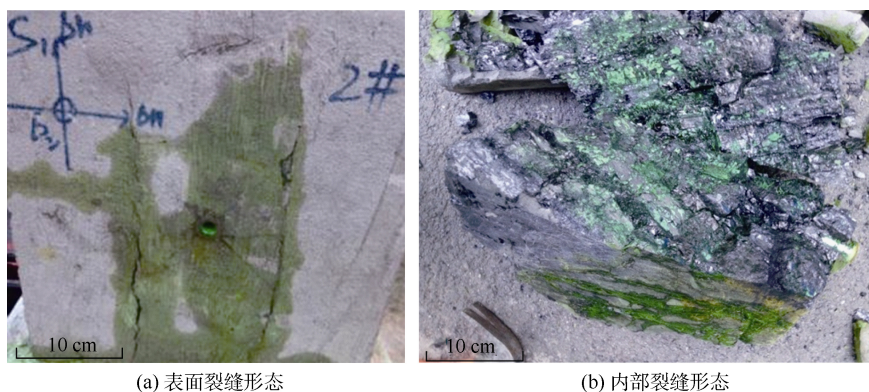


图 6 最大主应力沿地层倾向模拟压裂后煤样的内外形态

Fig.6 Coal sample after simulated fracturing at maximum principal stress along the dip of the strata

3 讨论

水力压裂过程中, 水力裂缝沿最大主应力方向扩展, 但同时受到层理的影响, 尤其对于层理特别发育的煤储层, 水力裂缝的起裂和扩展都与层理面密切相关^[10]。当最大主应力方向沿煤层走向, 即最大主应力方向沿层理方向, 水力裂缝沿最大主应力方向扩展与层理弱面方向一致, 使得裂缝起裂较为容易, 且由于储层倾角较大, 形成垂直缝形态, 在整个扩展过程中裂缝高度不断扩展, 裂缝延伸较远^[11-12], 故针对此类储层建议开展活性水大规模大排量压裂, 或者采用低黏瓜胶提高液体携砂性能, 提高较长裂缝的远端支撑^[13]。

对于最大主应力方向沿地层倾向, 即最大主应力方向沿节理方向, 裂缝沿节理方向扩展与层理弱面方向垂直, 导致裂缝开启困难, 且很快达到试样的最大高度。裂缝在沿最大主应力(节理)方向与沿层理弱面方向间来回转换, 导致裂缝转向和多级破裂较多。最终形成的裂缝为沿节理的近水平缝与沿层理的垂直缝相互交织的复杂缝。裂缝长度较小, 故针

对此类储层建议开展活性水小规模改造^[14-15], 采用连续油管拖动等分层工具, 提高储层纵向动用程度。

4 现场试验

选取煤储层为大倾角的 Z-5 煤层气井开展微地震裂缝监测, Z-5 井是一口沿地层倾向钻进的大斜度井, 地层走向 NE 向 65°, 倾角 65° 左右, 采用连续油管水力喷射环空加砂底部封隔器拖动压裂, 共进行 4 段压裂, 每段平均液量 800 m³, 砂量 45 m³, 施工排量 7~8 m³/min, 监测的裂缝走向 NE 向 65°~100°, 裂缝延伸方向主要沿地层走向, 监测裂缝倾角 90°, 全部为垂直缝(表 1), 现场监测与室内实验结果一致。

5 结论

a. 大倾角煤样压裂物理模拟实验表明, 最大主应力方向沿煤层走向时, 裂缝起裂容易, 缝高受限, 裂缝连通性好, 裂缝的开启主要沿层理和天然裂缝, 由于地层倾角较大, 形成垂直缝, 地层倾角对施工影响相对较小。

表 1 Z-5 井微地震监测结果
Table 1 Microseismic monitoring results of well Z-5

压裂层段	井深/m	垂深/m	走向/(°)	倾角/(°)	平面最大长度/m	垂向长度/m	裂缝面面积/万 m ²
1	665	646	NE65	90	100	100	1
2	654	637	NE65	90	260	450	8
3	532	527	NE100	90	430	340	10
4	508	504	NE90	90	480	500	13

b. 最大主应力方向沿地层倾向时, 裂缝起裂困难, 前期裂缝扩展受限, 后期缝高失控, 裂缝连通性差; 受节理影响, 不易形成主缝, 转向及多级破裂较多。

c. 现场微地震裂缝监测证实, 大倾角煤层沿地层倾向钻进时, 形成以垂直缝为主的裂缝形态。

d. 最大主应力方向沿地层走向时, 沿地层倾向钻进为优势钻进方向, 形成横切井筒的垂直缝, 建议大规模改造, 但大倾角煤层水力裂缝向上延伸距离较远, 建议适当控制施工排量; 最大主应力方向沿倾向时, 受应力和层理的双重控制, 水力压裂施工难度较大, 建议采用多级小规模改造。

请听作者语音介绍创新技术成果
等信息, 欢迎与作者进行交流



OSID 码

参考文献(References)

[1] 陶小晚, 王俊民, 胡国艺, 等. 新疆煤层气勘探开发现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 454–459.
TAO Xiaowan, WANG Junmin, HU Guoyi, et al. Current situation and prospect for exploration and development of coalbed methane in Xinjiang[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 454–459.

[2] 曹运兴, 石玢, 田林, 等. 大倾角厚煤层煤层气开发水平井方位优化和实践: 以新疆阜康矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 90–96.
CAO Yunxing, SHI Bin, TIAN Lin, et al. Optimization and practice of horizontal well azimuth in thick and high dip-angle coalbed in Fukang mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 90–96.

[3] 程亮, 卢义玉, 葛兆龙, 等. 倾斜煤层水力压裂起裂压力计算模型及判断准则[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 444–450.
CHENG Liang, LU Yiyu, GE Zhaolong, et al. Initiation pressure calculation model and judgment criterion for hydraulic fracturing of inclined coal seam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 444–450.

[4] 谢相军. 大倾角煤层压裂裂缝延展规律及技术对策研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
XIE Xiangjun. Study on fracture propagation rule and technical

methods of coal seam with high dip angle[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.

[5] 罗晓. 大倾角煤层 L 井压裂技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
LUO Xiao. Hydraulic fracturing study of L well with large dip angle in coal seam[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[6] 高建成, 田慧玲. 不同倾角煤层下水力压裂影响分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(1): 190–192.
GAO Jiancheng, TIAN Huiling. Analysis on impact of hydraulic fracturing under different dip angle of coal seam[J]. Coal Technology, 2017, 36(1): 190–192.

[7] 王志荣, 胡凯, 杨杰, 等. 软煤储层顶板水平井穿层工况下压裂裂缝扩展模型[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 20–25.
WANG Zhirong, HU Kai, YANG Jie, et al. Extension model of fracturing cracks of translayer horizontal well in roof of soft coal reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 20–25.

[8] NOLTE K G. Fracturing pressure analysis for non-ideal behavior[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(2): 210–218.

[9] AYOUB J A, BROWN J E, BARREE R D, et al. Diagnosis and evaluation of fracturing treatments[J]. SPE Production Engineering, 1992, 7(1): 39–46.

[10] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65–69.
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65–69.

[11] 周彤, 张士诚, 邹雨时, 等. 四川盆地东北缘强应力大倾角页岩储层水力压裂裂缝形态[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(3): 336–341.
ZHOU Tong, ZHANG Shicheng, ZOU Yushi, et al. Hydraulic fracture geometry of shale gas reservoirs with strong tectonic stress and large dip angle in northeastern margin of Sichuan basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(3): 336–341.

[12] 李宁. 渝东北大倾角页岩储层压裂改造研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
LI Ning. Investigation into the fracturing treatment for shale formation with large dip angle in northeast of Chongqing[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.

[13] 杨武剑. 高倾角煤层压裂裂缝延伸规律及压裂措施研究[D].

- 成都: 西南石油大学, 2015.
- YANG Wujian. Fracture propagation and fracturing treatments in high dip angle coal seam[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [14] 张壮. 煤层气井压后返排工艺[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 70–74.
- ZHANG Zhuang. Flowback technology after fracturing of CBM wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 70–74.
- [15] 黄炳香, 李浩泽, 程庆迎, 等. 煤层压裂裂缝内支撑剂的压嵌特性[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 48–54.
- HUANG Bingxiang, LI Haoze, CHENG Qingying, et al. Compaction and embedment characteristics of proppant in hydraulic fractures of coal seams[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 48–54.

(责任编辑 范章群)

(上接第 44 页)

- [25] 杜立志, 邱建慧, 张琪, 等. 高保真高分辨率遥测地震勘探采集系统研制及应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3964–3973.
- DU Lizhi, QIU Jianhui, ZHANG Qi, et al. Development and application of a high-fidelity and high-resolution telemetry seismic data acquisition system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3964–3973.
- [26] 赵云佩, 王伟, 侯献华. 基于克希霍夫偏移的槽波超前探测方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 186–192.
- ZHAO Yunpei, WANG Wei, HOU Xianhua. Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 186–192.
- [27] 刘善德. 地勘时期无烟煤与天然焦的煤岩学识别: 以柳江盆地 C–P 煤为例[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(8): 1–5.
- LIU Shande. Coal petrology recognition of anthracite and natural coke during geological exploration: A case study of Permo-Carboniferous coal measures in Liujiang basin[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(8): 1–5.
- [28] 马良. 柳江盆地内岩浆侵入活动对煤层煤质的影响[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 125–134.
- MA Liang. Effect of magmatic intrusion activity on coal bed and quality in Liujiang basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 125–134.
- [29] 王海军. 柳江盆地岩浆侵入对煤层顶板岩石力学特征的影响[J/OL]. 煤炭学报. <http://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.1237>.
- WANG Haijun. Influence of magma intrusion on rock mechanics characteristics of coal seam roof in Liujiang basin[J/OL]. Journal of China Coal Society. <http://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.1237>.

(责任编辑 范章群)