

# 通许深部煤层气测试压裂技术探索及应用

蒋艳芳

中国石化华北油气分公司石油工程技术研究院 河南郑州 450006

通讯作者: E-mail: jyfdyhb@126.com

引用: 蒋艳芳. 通许深部煤层气测试压裂技术探索及应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(2): 24-28.

Cite: JIANG Yanfang. Exploration and application of deep coalbed methane test fracturing technology in Tongxu[J]. Well Testing, 2023, 32(2): 24-28.

**摘要** 通许区块山西组发育深部煤层,与浅层煤层气相比含气量高、游离气丰富,割理裂隙发育,压裂施工过程中滤失大、易形成短缝、加砂困难。前期采用浅层煤层气常规压裂技术压裂施工压力高,加砂困难,压后效果不理想。针对深部煤层储层特征及改造难点,开展了深部煤层气压前注入压降和原地应力测试,获取煤层参数,为压裂设计参数优化提供依据;同时,通过室内实验、数值模拟研究,探索试验了饱填砂压裂技术。现场A井山1煤层采用“大排量、大规模、饱填砂”体积压裂设计思路完成压裂施工,施工排量最高 $20\text{ m}^3/\text{min}$ ,入地液量 $4\ 315\text{ m}^3$ ,加砂量 $347\text{ m}^3$ ,是常规压裂加砂强度的7倍,压后最高日产气量 $7\ 299\text{ m}^3$ ,累计产气量 $71\ 509\text{ m}^3$ ,效果显著。该技术的试验成功,为深部煤层气压裂提供了技术指导。

**关键词** 深部煤层;割理发育;注入压降测试;原地应力测试;饱填砂;缝网压裂;数值模拟;清洁压裂液

中图分类号: TE357

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.02.005

## Exploration and application of deep coalbed methane test fracturing technology in Tongxu

JIANG Yanfang

Research Institute of Petroleum Engineering and Technology, North China Oil and Gas Branch, Sinopec, Zhengzhou, Henan 450006, China

**Abstract:** Deep coal seams are developed in the Shanxi Formation of Tongxu Block, with high gas content, rich free gas, and developed cleat fractures compared to shallow coalbed methane. During fracturing construction, there is large filtration, short fractures are easy to form, and sand addition is difficult. In the early stage, conventional fracturing technology for shallow coalbed methane was used, resulting in high fracturing pressure, difficult sand addition, and unsatisfactory results after fracturing. Aiming at the characteristics of deep coal seam reservoirs and the difficulties in their transformation, pressure drop and in-situ stress tests were carried out before injecting gas pressure into deep coal seams to obtain coal seam parameters and provide a basis for optimizing fracturing design parameters; At the same time, through indoor experiments and numerical simulation research, the saturated sand fracturing technology was explored and tested. On site, the design concept of “large displacement, large-scale, and saturated sand” volume fracturing was adopted for Well Hill 1 Coal Seam A to complete the fracturing construction. The maximum construction displacement was  $20\text{ m}^3/\text{min}$ , the amount of liquid injected into the ground was  $4\ 315\text{ m}^3$ , and the amount of sand added was  $347\text{ m}^3$ , which was 7 times the strength of conventional fracturing sand addition. The maximum daily gas production after fracturing was  $7\ 299\text{ m}^3$ , and the cumulative gas production was  $71\ 509\text{ m}^3$ , with significant results. The successful test of this technology provides technical guidance for deep coal seam pneumatic fracturing.

**Keywords:** Deep coal seam; cleat development; injection pressure drop test; in-situ stress test; saturated sand; mesh fracturing; numerical simulation; clean fracturing fluid

2019年前,我国煤层气开发基本集中在煤层埋深小于 $1\ 200\text{ m}$ 区域, $1\ 500\text{ m}$ 以深区域只进行了少量现场试验<sup>[1-5]</sup>,未取得实质性突破。倪方杰<sup>[6]</sup>针对准葛尔盆地白家海凸起埋深大于 $1\ 500\text{ m}$ 煤层气,采用“低黏液、大排量、大液量、高砂比”压裂改

造措施,施工排量 $7\sim 11\text{ m}^3/\text{min}$ ,单层加砂量 $39\text{ m}^3$ ,但整体加砂量低,支撑缝长短。姚红生等<sup>[7-9]</sup>针对延川南深煤层常规压裂难以实现长距离有效支撑的问题,开展“远支撑”核心理念压裂工艺,造长缝、远支撑,但有效支撑缝长仅能达到 $190.6\text{ m}$ ,且煤层

埋深仅为1 600 m。李贵山<sup>[10]</sup>等针对和顺横岭区块深部煤层气,采用水力喷砂射流压裂、连续油管底封拖动压裂、“水力喷砂射孔+大排量复合压裂”和“段内多簇定向射孔+桥塞联作分段压裂”技术进行压裂,加砂量20~53 m<sup>3</sup>。王绪性等<sup>[11]</sup>针对鄂尔多斯盆地东部深部煤层气采用低浓度线性胶压裂液体体系进行压裂,加砂量51.8 m<sup>3</sup>。根据国内外深部煤层气压裂技术调研,增大改造体积,提高支撑缝长是深部煤层气提产的重要方向,但受限于深部煤层气加砂困难,前期改造体积仍有限。基于此,在通许深部煤层气藏创新提出了饱填砂压裂技术。同时,为保障加砂强度,首先开展深部煤层气压前注入压降和原地应力测试,获取煤层参数,为压裂设计参数优化提供依据;其次通过室内实验、数值模拟研究,优化饱填砂压裂技术参数,为后期深部煤层的压裂提供借鉴。

## 1 储层特征及改造难点

通许区块位于河南省开封市通许县,区块面积3 076.645 km<sup>2</sup>,构造上属于太康隆起构造单元,在石炭二叠系发现深部煤层,煤炭资源量127亿吨,煤层气资源量2 032亿方,具有巨大的资源潜力。

通许区块山西组为海陆过渡相三角洲前缘沉积,发育黑色碳质泥岩、暗色泥岩、煤层等,储层埋深1 500~2 000 m,煤层厚度3~7 m,煤岩类型为破裂-糜棱煤,煤阶为高阶构造煤,Ro值2.3%~3.3%,含气量30.05 m<sup>3</sup>/t,杨氏模量3.12 GPa,泊松比0.3。通许区块深部煤层气与浅层煤层气相比,含气量高,游离气丰富,割理裂隙发育、煤体结构完善,但基质渗透率低、孔隙连通性差。

该区块深部煤层割理、层理、节理等天然裂隙网络发育,压裂过程中割理张开易引起高滤失,导致造缝不充分,发生砂堵,同时通许深层煤层气杨氏模量低,泊松比高,易形成短宽缝,缝长延伸受阻。同时由于高泊松比和矿物成分影响,煤层压裂后,支撑剂嵌入更深。

## 2 注入压降及原地应力测试

煤层参数对于压裂设计优化至关重要,为了准确获取储层参数,开展了注入压降及原地应力测试。

### 2.1 注入压降试井

注入压降试井方法是一种单井压力瞬变测

试<sup>[12]</sup>,以较稳定的排量,低于煤层破裂压力的注入压力向井中注水一段时间,在井筒周围产生一个高于原始储层的压力分布区,然后关井,使得压力与原始储层压力逐渐趋于平衡。注入和关井阶段采用压力计记录井底压力随时间的变化。通过分析数据,获取煤层的有效渗透率、原始地层压力、表皮系数及探测半径等参数。通过软件,优化山西组煤储层设计参数,注入时间8~16 h,最大注入压力5.68 MPa,关井时间20~32 h,最大注入排量0.35 m<sup>3</sup>/d,测试曲线见图1。

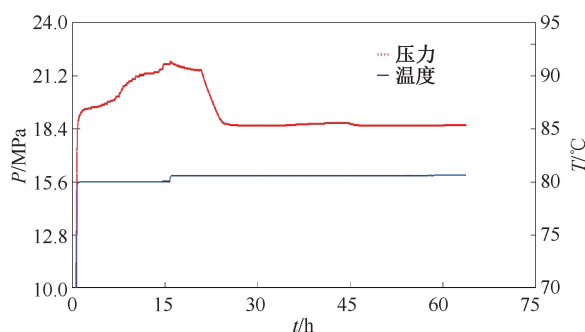


图1 山西组煤层注入压降测试施工曲线  
Fig. 1 Injection pressure drop test construction curve of Shanxi Formation coal seam

通过Pansystem试井解释软件,对测试曲线进行了解释,储层压力17.31 MPa,压力梯度0.0913 MPa/m,渗透率0.06 mD,表皮系数6.78,探测半径5.13 m,储层温度80.56℃。

### 2.2 原地应力测试

原地应力测试在注入压降试井以后进行,该测试一般进行2~4个循环,每个循环由注入段和关井压降段组成。通过分析注入段数据求取破裂压力,分析压降段求取闭合压力。通许区块山西组煤层原地应力测试曲线见图2。测试解释结果见表1。

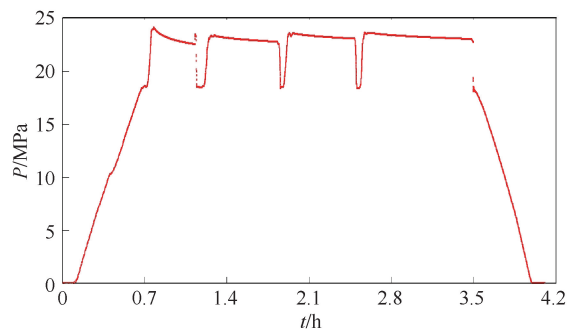


图2 山西组煤层原地应力实测曲线图  
Fig. 2 In-situ stress curve diagram of Shanxi Formation coal seam

表1 煤层原地应力测试分析结果

Table 1 In-situ stress measurement and analysis results of coal seam

参数	第一循环	第四循环	平均值
闭合压力 $P_c$ /MPa	23.93	23.54	23.74
闭合压力梯度/( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$1.26\times 10^{-2}$	$1.24\times 10^{-2}$	$1.25\times 10^{-2}$
破裂压力 $P_b$ /MPa	24.11	23.56	23.84
破裂压力梯度/( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$1.27\times 10^{-2}$	$1.24\times 10^{-2}$	$1.26\times 10^{-2}$
压力点深度/m	/	1 895.0	/

### 3 饱填砂压裂技术研究

为进一步提高改造体积,提高单井产量,在通许深部煤层气藏创新提出了饱填砂压裂技术,并进行设计参数优化。

#### 3.1 设计思路优化

深部煤层气应以追求有效支撑大体积缝网为目标,但由于深部煤层气滤失大,加砂困难,故开展“大规模、大排量”饱填砂压裂技术探索,形成超大、充分支撑的体积缝网。具体思路,一是大排量施工,利用割理特征,打碎储层;二是通过大砂量连续加砂,饱填砂解决嵌入与导流的问题;三是设计采用“中、小粒径组合支撑剂”降低滤失,形成长缝,其中小粒径支撑剂支撑远端裂缝及主缝,提高支撑缝长;中粒径支撑剂支撑近井裂缝,提高近井裂缝及导流能力;四是采用表面活性剂类清洁压裂液体系造缝、携砂,有效解决摩阻高、伤害高和携砂困难等问题,且可以有效解决支撑剂运移距离不足的问题。

#### 3.2 施工排量优化

以通许区块 A 井山西组煤层为例,进行设计参数优化。

A 井采用外径 139.7 mm,壁厚 7.72 mm,抗内压 73.4 MPa 套管固井完井,套管头抗内压为 70 MPa,根据 1.25 的管柱安全作业系数,套管承受内压最高为 58.7 MPa,井口限压 60 MPa,井口设备选择 70 MPa 井口。根据不同施工排量、不同延伸压力梯度下井口施工压力预测结果(见表 2),优化施工排量  $16 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

表2 不同施工排量下井口施工压力预测结果

Table 2 Prediction results of wellhead construction pressure under different construction displacement

	施工排量/( $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ )				延伸压力梯度/ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )
	15	16	17	18	
井口压力/ MPa	47.5	49.9	54.4	56.5	0.022
	49.3	51.7	56.2	58.3	0.023
	51.1	53.5	58.0	60.1	0.024

#### 3.3 施工规模优化

通过数模软件,在最大压裂改造体积条件下,评价最佳缝长、最佳砂量。地质模型参数:储层厚度 5 m、渗透率 0.26 mD,含气量  $30 \text{ m}^3/\text{t}$  不同裂缝长度下累计产气量与生产时间的关系见图 3。可以看出,随着裂缝长度增加,累产增加,当裂缝长度 500 m 后增加幅度降低,故优化最优裂缝长度 450 m。不同加砂量下缝长关系曲线见图 4。由图 4 可以看出,随着加砂量增加,缝长增加,当砂量  $350 \text{ m}^3$  时,缝长达到 450 m,且后期缝长随着加砂量增加幅度变小。

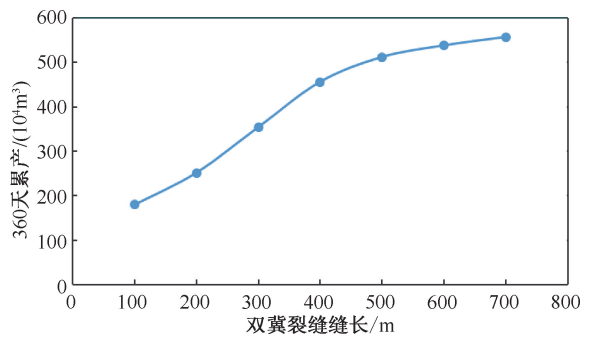


图3 缝长与累产关系曲线

Fig. 3 The curve of the relationship between length of seam and cumulative yield

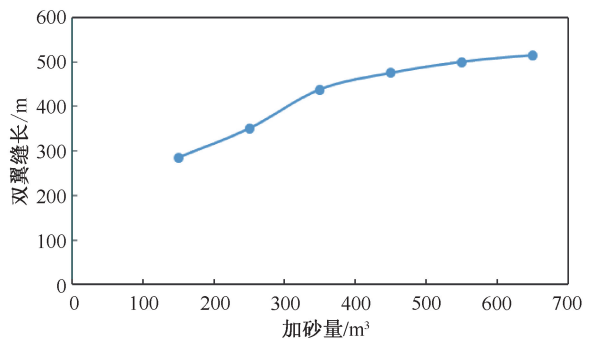


图4 加砂量与缝长关系曲线

Fig. 4 The relation curve between the amount of sand added and the length of seam

#### 3.4 支撑剂优化

经计算,在  $16 \text{ m}^3/\text{min}$  排量下本井裂缝缝宽可达到 5.7 mm 以上。

按照裂缝宽度要达到支撑剂直径的 3 倍以上,可以选择 100 目、40/70 目和 30/50 目支撑剂。由于煤层较软,容易发生支撑剂嵌入,综合考虑有效性和经济性,选用石英砂作为支撑剂。前期采用 100 目砂打磨裂缝壁面,并充填微裂缝,形成有效支撑,主加砂阶段采用 100 目和 40/70 目,施工后期使用 30/50 目保证压裂后主裂缝的导流能力。小粒径

支撑剂(40/70目或100目)能够输送更远并能适度的进入裂缝网络,有助于封堵现有裂缝,张开新裂缝,从而强化裂缝复杂性;结合储层埋深及应力特征,借鉴邻井施工经验,选择100目、40/70目砂的使用比例为1:1左右。

### 3.5 压裂液优化

随着压裂理念的改变,在如此大规模压裂条件下,低成本,易施工的压裂液体系选择成为该技术能否推广的核心<sup>[13-16]</sup>。煤层压裂后易形成煤粉,流动中引起堵塞伤害。煤岩吸附能力强,压裂液对煤岩的伤害随压裂液材料分子量增加,伤害率也相应增加。根据调研情况和大宁-吉县压裂液体系评价实验,低浓度胍胶压裂液煤芯伤害率40.6%,变粘乳液岩心伤害率24.84%,而表面活性剂清洁压裂液岩心伤害率只有7.96%,所以设计采用表面活性剂类清洁压裂液体系。

## 4 现场试验

A井煤层井段1804~1806.5m,视厚度2.5m,全烃22.428%,净增值1.143%;B井煤层井段1907.0~1910.0m,视厚度3m,全烃86.048%,净增值1.789%。A井与B井山1段煤层对比,煤层厚度基本相当,且上、下部遮挡效果好,易控制缝高,全烃显示较低,录井显示相对较差。A井岩心照片见图5。



图5 A井岩心照片

Fig. 5 Core photos of Weibei 1 well

从图5可见,A井岩心出筒较顺利,顶部煤层破碎严重。顶部煤层岩心出筒见气泡刺破泥皮。浸水实验:见多处串珠状气泡溢出,气泡径约2~3mm,持续时间15min,可见煤层的含气性较好,但取芯比较碎裂,对压裂影响较大,有可能出现与B井相同的情况。

A井山1煤层采用“大排量、大规模、饱填砂”

体积压裂设计思路于2022年5月20日完成压裂施工。该井设计施工排量4.0~16.0 m<sup>3</sup>/min,入井液量3667 m<sup>3</sup>,砂量305.7 m<sup>3</sup>;实际施工排量最高20 m<sup>3</sup>/min,入井液量4315 m<sup>3</sup>,加砂量347 m<sup>3</sup>,施工压力43.5~58.3 MPa,破裂压力31.3 MPa,停泵压力25.4 MPa。最高日产气量7299 m<sup>3</sup>,累计产气量71509 m<sup>3</sup>,A井达到了延川南3.0的加砂强度(70 m<sup>3</sup>/m),同时显示比B井差的情况下,获得了理想产气量,证实了该工艺的可行性和适用性。

## 5 结论

(1)深部煤层气由于割理、层理发育,压裂过程中滤失大、加砂困难,有效支撑体积有限。

(2)注入压降及原地应力测试能准确获取储层参数,为压裂设计优化提供依据。

(3)大排量饱填砂压裂技术能在深部煤层形成有效支撑,解决增产问题。

(4)通许深部煤层气饱填砂压裂技术的成功应用,为后期深部煤层气藏的压裂提供了技术支撑。

致谢:感谢中石化华北油气分公司石油工程技术研究院相关技术人员的大力支持。

### 参考文献

- [1] 张思捷. 深部煤层气压裂技术与应用[J]. 石化技术, 2022, 29(5): 156-158.  
ZHANG Sijie. Technology and application of deep coal seam gas fracturing [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(5): 156-158.
- [2] 张军涛, 郭庆, 汶锋刚. 深层煤层气压裂技术的研究与应用[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 78-80.  
ZHANG Juntao, GUO Qing, WEN Fenggang. Research and application of deep coal bed methane fracturing technology [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2015, 34(1): 78-80.
- [3] 孙晗森. 我国煤层气压裂技术发展现状与展望[J]. 中国海上油气, 2021, 33(4): 120-128.  
SUN Hansen. Development status and prospect of CBM fracturing technology in China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(4): 120-128.
- [4] 吕帅锋, 王生维, 刘洪太, 等. 煤储层天然裂隙系统对水力压裂裂缝扩展形态的影响分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2590-2601.  
LV Shuaifeng, WANG Shengwei, LIU Hongtai, et al. Analysis of the influence of natural fracture system on hydraulic fracture propagation morphology in coal reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2590

- 2601.
- [5] 叶建平, 杨兆中, 夏日桂, 等. 深煤层水力波及压裂技术及其在沁南地区的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(10): 35-45.  
YE Jianping, YANG Zhaozhong, XIA Rigui, et al. Synchronous hydraulic conformance fracturing technology used for deep coal beds and its field application in the Southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(10): 35-45.
- [6] 倪方杰. 白家海凸起深层煤层气压裂试气实践与认识[J]. 江汉石油职工大学, 2019, 32(5): 36-38.  
NI Fangjie. Practice and understanding of deep CBM fracturing gas testing in Baijiahai uplift [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2019, 32(5): 36-38.
- [7] 姚红生, 肖翠, 陈贞龙, 等. 延川南深部煤层气高效开发调整对策研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 545-555.  
YAO Hongsheng, XIAO Cui, CHEN Zhenlong, et al. Adjustment countermeasures for efficient development of deep coalbed methane in southern Yanchuan CBM Field. [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 545-555.
- [8] 姚红生, 陈贞龙, 何希鹏, 等. 深部煤层气“有效支撑”理念及创新实践——以鄂尔多斯盆地延川南煤层气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 97-106.  
YAO Hongsheng, CHEN Zhenlong, HE Xipeng, et al. “Effective support” concept and innovative practice of deep CBM in South Yanchuan Gas Field of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 97-106.
- [9] 姚红生, 陈贞龙, 郭涛, 等. 延川南深部煤层气地质工程一体化压裂增产实践[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 291-296.  
YAO Hongsheng, CHEN Zhenlong, GUO Tao, et al. Stimulation practice of geology-engineering integration fracturing for deep CBM in Yanchuannan Field [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 291-296.
- [10] 李贵山, 白建平, 黄帆, 等. 和顺横岭区块深部煤层气井压裂工艺研究及应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 166-171.  
LI Guishan, BAI Jianping, HUANG Fan, et al. Fracturing process and practice for deep CBM wells in Heshun Hengling Block [J]. Coal Engineering, 2021, 53(8): 166-171.
- [11] 王绪性, 王杏尊, 郭布民, 等. 鄂尔多斯盆地东部深部煤层气井压裂工艺及实践 [J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 92-95.  
WANG Xuxing, WANG Xingzun, GUO Bumin, et al. Technology and practice for deep CBM fracturing in eastern Ordos basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 92-95.
- [12] 刘立军, 王立中, 张增惠, 等. 煤层气井注入压降试井技术研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 79-81.  
LIU Lijun, WANG Lizhong, ZHANG Zhenhui, et al. Study on pressure-drop well test with injection of coal-bed gas well[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 79-81.
- [13] 田跃儒, 张双双, 郑晓斌. 柳林区块煤层气压裂液评价及伤害机理研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 69-71.  
TIAN Yueru, ZHANG Shuangshuang, ZHENG Xiaobin. Study on evaluation and damage mechanism of coal-bed methane of fracturing fluid in liulin block [J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 69-71.
- [14] 田跃儒, 张双双, 李昀昀. 沁水盆地煤层气压裂液体系优化与性能研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 65-70.  
TIAN Yueru, ZHANG Shuangshuang, LI Yunyun, et al. Study on optimization and performance of fracturing fluid system in coal seams of Qinshui basi [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2020, 48(05): 65-70.
- [15] 陈海汇, 范洪富, 郭建平, 等. 煤层气井水力压裂液分析与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 33-40.  
CHEN Haihui, FAN Hongfu, GUO Jianping, et al. Analysis and prospect on hydraulic fracturing fluid used in coalbed methane well [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 33-40.
- [16] 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, 34(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, 34(1): 89-94.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 蒋艳芳, 女, 1985年出生, 副研究员, 硕士, 2012年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业, 现从事油气藏增产及测试技术研究工作。电话: 0371-86002172; Email: jyfdyhb@126.com。通信地址: 河南省郑州市陇海西路199号中石化华北油气分公司石油工程技术研究院储层改造研究所, 邮政编码: 450006。