doi: 10.12029/gc20210309

赵景辉,高玉巧,陈贞龙,郭涛,高小康. 2021. 鄂尔多斯盆地延川南区块深部地应力状态及其对煤层气开发效果的影响[J]. 中国地质, 48(3): 785−793.

Zhao Jinghui,Gao Yuqiao,Chen Zhenlong,Guo Tao,Gao Xiaokang. 2021. Stress state of deep seam and its influence on development performance of CBM wells in South Yanchuan Block, Odors Basin [J]. Geology in China, 48(3): 785−793(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地延川南区块深部地应力状态及其对煤层气开发效果的影响

赵景辉,高玉巧,陈贞龙,郭涛,高小康

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏 南京 210011)

提要:延川南区块煤储层埋深在700~1500 m,多数深于900 m。基于该区块压裂施工压降数据,计算最大、最小水平主应力和垂向应力,划分储层地应力类型,分析了地应力及其类型对渗透率和压裂效果的影响。结果表明,研究区整体处于拉张状态,最大、最小水平主应力和垂向应力与埋深呈正相关线性关系。地应力类型以Ia类为主,III类其次,II类最少。Ia类地应力储层以垂直裂缝为主,裂缝指数最低,但应力敏感性弱,应力敏感性系数仅为0.479,且压裂缝半长最短,产气量最低,产水量最高。II类地应力储层主次裂缝宽分别为16 μm和11μm,宽度最大,但储层应力敏感性最强。压裂以水平裂缝为主,裂缝指数最高,且压裂缝最长,改造效果最好,产气量最高。III类地应力储层裂缝复杂,渗透性和应力敏感性居中,压裂缝长居中,但产量相对较低,不能实现效益开发。

关　键　词:深部煤层;煤层气;地应力;压裂效果;渗透率;油气地质调查工程;延川区块;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE112.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000−3657(2021)03−0785−09

Stress state of deep seam and its influence on development performance of CBM wells in South Yanchuan Block, Odors Basin

ZHAO Jinghui, GAO Yuqiao, CHEN Zhenlong, GUO Tao, GAO Xiaokang

(*Institute of Exploration & Development,Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing* 210011*, Jiangsu, China*)

Abstract: The buried depth of the coal seams of South Yanchuan block is between 700 m and 1500 m. And for the most area, the depth is deeper than 900 m. In order to clarify the in−situ stress state of deep coal−bed methane reservoir and its influence on the development of CBM wells, the maximum and minimum horizontal principal stress and the vertical stress are calculated based on the pressure drop data of hydraulic fracturing. The results show that the whole area is in the state of tension. The maximum horizontal principal stress, the minimum horizontal principal stress and the vertical stress are positively correlated with the buried depth. The type of the ground stress is mainly type Ia, followed by III type and II type. The reservoir with type Ia ground stress is dominated by vertical fractures with the lowest fracture index. However, the stress sensitivity is weak, and the stress sensitivity coefficient is only 0.479. The main and secondary fractures of type I stress reservoir are 16μm and 11μm respectively, with the

收稿日期:2019−00−00;**改回日期**:2019−12−29

基金项目:中国石化科技部项目(P19019−4)和国家科技重大专项(2011ZX05035006)联合资助。

作者简介:赵景辉,男,1982年生,硕士,工程师,主要从事煤层气地质与勘探部署研究;E−mail:34609352@qq.com。

largest width and the strongest reservoir stress sensitivity. Type I fractures are mainly horizontal fractures, with the highest fracture index, the longest compression fracture, the best reconstruction effect and the highest gas production. Reservoirs with type III in-situ stress develop complex fractures, with medium permeability, stress sensitivity and hydraulic fracture length. However, the production for type III is relatively low, and cannot achieve economic development.

Keywords: deep coal seam; coalbed methane; in- situ ground stress; fracturing performance; permeability; influence; oil- gas geological survey engineering; Yanchuan Block; Odors Bsain

About the first author: ZHAO Jinghui, male, born in 1982, engineer, mainly engaged in the study of the geology and exploration of coalbed methane; E-mail:school1108@sohu.com.

Fund support: Funded by Ministry of Science and Technology of Sinopec Program (No.P19019-4) and National Science and Technology Major Project(No.2011ZX05035006).

1 引 言

深部煤层气是中国煤层气产业规模发展的重要基础，深部不代表具体的深度而是表征应力状态、含气量等发生了明显转折的深度，不同区块具有不同的具体深度（秦勇等，2016）。聂志宏等(2018)对大宁—吉县深部煤层气进行了研究，认为具有长期低产、上产缓慢和排采期更长的生产特征，其中应力状态对渗透率和储层改造效果的影响是主要因素(吴双等，2015)。因此，对深部煤储层应力状态特征进行研究具有重要意义。许多学者对不同区域的地应力状态进行了研究，徐宏杰等(2014)研究了黔西地区埋深及地应力对储层渗透率的控制，李勇等(2017)对鄂尔多斯盆地东缘的地应力状态及其影响进行了研究，刘洪林等(2007)对沁水盆地南部埋深800m以浅的储层地应力进行了研究，杨延辉等(2015)对沁南—夏店区块，刘大锰等(2017)、李叶朋等(2017)就郑庄区块地应力对储层渗透率的影响进行了研究，但对不同地应力类型对天然裂缝形态影响研究较少。陈峥嵘等(2018)对沁水盆地地应力类型对压裂裂缝效果进行了研究，但埋深在700~800 m，埋深分布范围较小。延川南煤层气田位于鄂尔多斯盆地东南缘，位于晋西挠褶带和渭北隆起交界处(图1)，整体为一倾向北西的单斜构造(陈贞龙等，2019)。研究区中部发育西掌断裂带，东部和西部分别为谭坪、万宝山构造带(付玉通等，2017)，埋深由西向东增加，平均埋深在1250 m左右。2号煤层煤层垂直应力总体上大于最大水平主应力，整体处于拉张应力区(陈贞龙等，2018)。目前对不同地应力类型对天然裂缝形态影

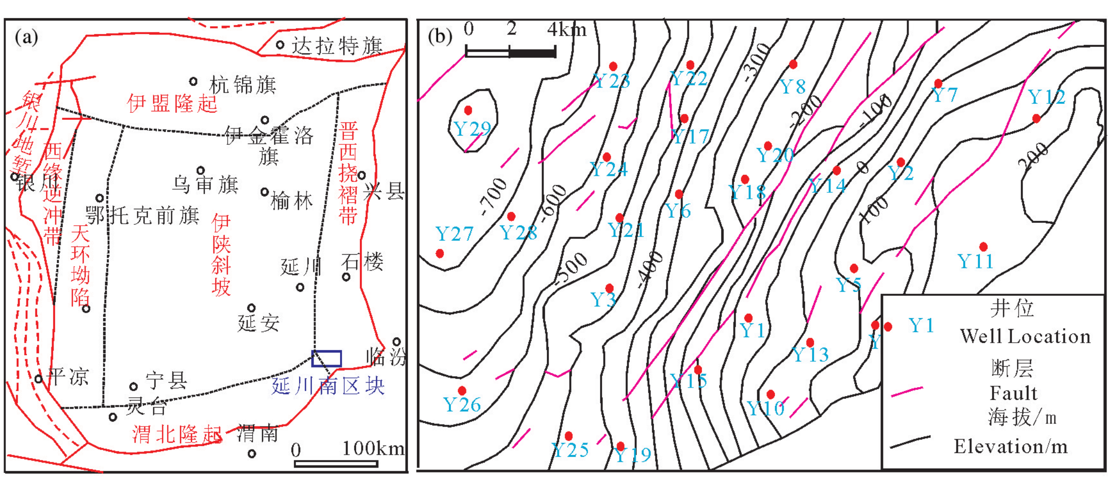


图1 延川南地理位置及地质构造图
a—延川南地理位置图；b—延川南地质构造图
Fig.1 Geological map showing structural location of South Yanchuan Block
a-Location of Yanchuan Nan Block;b-Structure of South Yanchuan Block

响以及延川南区块深部煤储层地应力状态的研究较少。本文围绕这两个问题，开展理论和实验分析，期望明确深部煤储层地应力状态及其对煤层气开发效果的影响。

2 地应力获得方法

2.1 最小水平主应力

在水力压裂过程中，裂缝沿垂直于最小水平主应力方向扩展，当压裂停止后，裂缝在最小水平主应力的作用下逐渐闭合，裂缝中流体压力最终趋于地层最小水平主应力。因此，水平最小主应力可利用下式计算（Schmitt et al.,1989）：

$$\sigma_h=p_c \tag{1}$$

式中，σ_h为最小水平主应力，MPa；p_c为闭合压力，MPa。

闭合压力p_c依据水力压裂施工压降数据获得。图2a为研究区Z1井压裂施工停泵后的压降曲线，井底流体压力与压降时间t满足负幂指数关系。将图2a中测试时间平方根与井底流压绘制曲线，该曲线两段近似线性段交汇点所对应的井底流压即为裂缝闭合压力p_c（图2b）。

2.2 最大水平主应力

根据摩尔破裂准则，当岩石破裂为拉伸破裂时，最大水平主应力计算公式为（孟召平等，2010）：

$$\sigma_H=3\sigma_h-p_f+T-p_0 \tag{2}$$

式中：σ_H为最大水平主应力，MPa；p_f为破裂压力，MPa，可以在压裂施工曲线上直接读取；T为抗拉强度，MPa；p_0为孔隙压力，MPa，相当于原始储层压力。煤层抗拉强度差异较小且数值较小，对最大水平主应力影响较小，本文取研究区平均值0.6MPa进行计算。同时，研究区煤层气井试井得到的原始储层压力与埋深满足线性关系（图3）。

垂直主应力根据上覆岩柱造成的静重力计算（孙良忠等，2017）：

$$\sigma_v=\rho gH \tag{3}$$

式中，σ_v为垂直主应力，MPa；ρ为上覆岩石平均密度，kg/m^3，研究区煤层以上地层测井解释平均岩石密度为2550 kg/m^3；g为重力加速度，m/s^2，按9.8 m/s^{2}计算。

3 地应力状态

3.1 地应力大小

研究区地应力场最小水平主应力为8.21~31.39 MPa，平均15.78 MPa；最大水平主应力为9.82~57.87 MPa，平均25.92 MPa；垂向应力为17.94~29.92 MPa，平均24.91 MPa。整体上看，研究区平均水平主应力远小于垂直主应力，整体处于拉张状态（孟召平等，2013）。如图4a所示，最小、最大水平主应力和垂向应力均随着埋深的增大而增大，但最小、最大水平主应力数据点较为分散。这与牛琳琳等（2018）对鄂尔多斯盆地南缘的研究结果一致。

从埋深730 m开始，以30 m为间隔，分别对埋深和最小、最大水平主应力取平均值，然后进行线性回归。如图4b所示，最小、最大水平主应力与埋

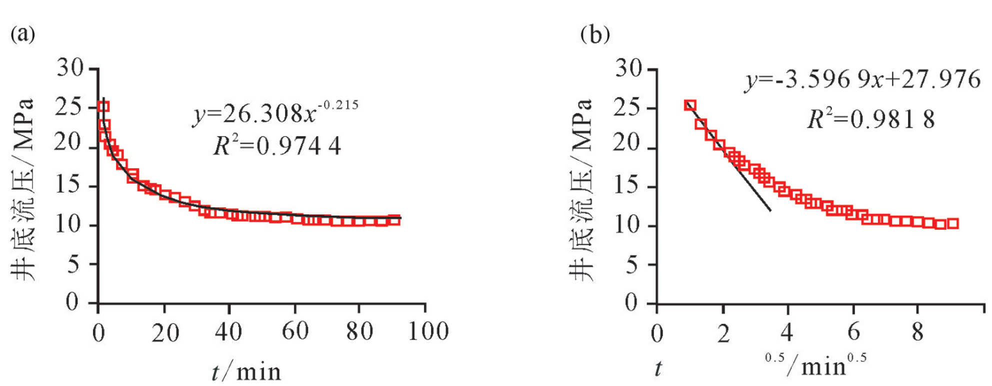


图2 井底压力与压降时间关系
a—压裂施工压降曲线;b—闭合压力点判识曲线
Fig.2 Relationship between bottom-hole-pressure and the time of pressure drop
a-Pressure drop curve of hydraulic fracturing ;b-Judging curve of closed pressure point

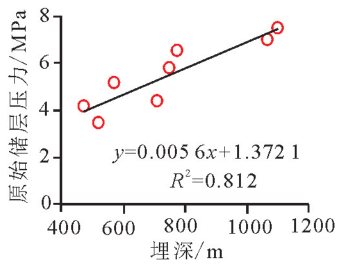


图3 埋深与原始储层压力关系
Fig.3 Relationship between buried depth and the original reservoir pressure

深呈正相关线性关系，则研究区最小、最大水平主应力近似预测公式：

$$\sigma_h = 0.023H - 6.848 \tag{4}$$

$$\sigma_H = 0.043H - 17.394 \tag{5}$$

侧压系数λ可以表征不同埋深条件下煤层地应力状态，用下式进行计算（王丹等，2015），

$$\lambda = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v} \tag{6}$$

根据式(6)得到研究区侧压系数，分布在0.42~1.58，平均为0.83；侧压系数随着埋深增加而增加，埋深小于1100 m时，垂向应力最大，煤层处于拉张应力区；埋深大于1100 m后，煤层逐步向挤压型应力状态转变（图5）。

3.2 地应力类型

根据最大、最小水平主应力和垂向应力可以将储层地应力类型划分为3种状态（孙良忠等，2017）。如图6所示，当$\sigma_v>\sigma_H>\sigma_h$时，为Ia型地应力，该类储层容易形成垂直裂缝（孙健等，2017；陈同刚等，2018；贾慧敏等，2019）；当$\sigma_H>\sigma_h>\sigma_v$时，为II型地应力，水平最大主应力为最大应力，垂向应力为最小应力，该类储层容易形成水平裂缝（陈同刚等，2018）；当$\sigma_H>\sigma_v>\sigma_h$时，为III型地应力，垂向应力为中间应力，该类储层形成走滑裂缝（陈朝伟等，2014；陈世达等，2018；文卓等，2019；李兵等，2019）。

根据该类型划分标准，研究区地应力类型分布如图7所示，图中灰色区域为Ia类地应力，该区域埋深进一步增大，平均大于990 m，导致其垂向应力最大；白色区域为II类地应力，该区域褶皱发育，表明水平应力较大，最大水平主应力达到33 MPa以上；黑色区域为III类地应力，主要分布在东北部区域。图7表明，该区域地应力类型以Ia类为主，III类其次，II类最少，因此天然裂缝以垂直裂缝为主，以走滑裂缝为辅，水平裂缝较少。

4 对渗透率的影响

4.1 对裂缝发育程度的影响

储层渗透率主要取决于裂缝宽度和密度。采用不同地应力类型条件下煤层气井煤样开展裂缝发育程度扫描电镜实验，定量观测煤样裂缝发育情况，结果如表1所示。表1表明，Ia类地应力类型储层主、次裂缝宽度均最小，分别为8 μm和7 μm；II类地应力类型储层主、次裂缝宽度均最大，分别为16 μm和11 μm；III类储层主、次裂缝宽度居中。从裂缝高度来看，Ia类储层主、次裂缝高度均最大，平均值分别为0.66 cm和0.45 cm；II类储层主、次裂缝高度最小，分别为0.39 cm和0.36 cm，这表明Ia类地

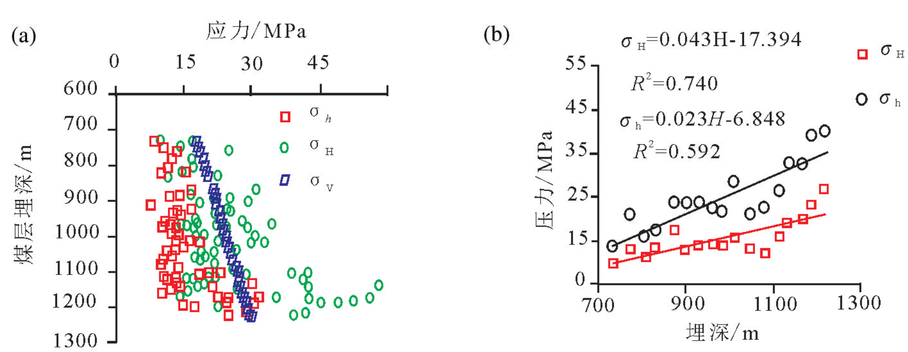


图4 各应力随埋深变化情况
a—全部值;b—平均值
Fig.4 Stress variation with the buried depth
a–All values;b–Mean values

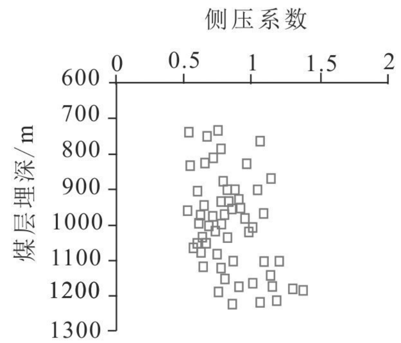


图5 侧压系数随埋深变化情况
Fig.5 Lateral pressure coefficient variation with the buried depth

应力类型更容易发育垂直裂缝。

裂缝渗透率可以用下式表示（贾慧敏等，2017）：

$$K_f = \frac{b^3 L}{12A} \tag{7}$$

式中，K_f为裂缝渗透率，b为裂缝宽度，L为渗流面积A上的裂缝长度。其中L/A可以用裂缝密度来代替，则裂缝渗透率可以近似地用裂缝指数来代替：

$$I_f = b^3 D \tag{8}$$

式中，I_f为裂缝指数，D为单位长度上的裂缝密度。利用式(8)对表1中的数据进行计算，得到不同地应力类型储层裂缝指数如表1所示。结果表明，Ia类地应力储层裂缝指数最低，平均为3891.1；II类地应力储层裂缝指数最高，为30739.8，比Ia类地应力储层裂缝指数增大一个数量级；III类地应力储层居中，为7311.2。表明Ia类地应力类型储层渗透性最差，II类地应力类型储层渗透率最好。

4.2 对裂缝应力敏感性影响

在同一块煤样加工成3块规则的正方形煤块，采用三轴加压设备模拟不同地应力类型，然后采用气体测定不同地应力类型条件下有效应力与渗透率关系，如图8所示。部分学者研究表明，煤样有效应力与渗透率关系可以用幂指数关系表示（薛培等，2016；贾慧敏等，2017）：

$$k = k_0 \sigma^{-a} \tag{9}$$

式中，k为有效渗透率；k_0为初始渗透率；σ为有效应力；a为应力敏感性因子，表征应力敏感性强弱，数值越大应力敏感性越强。利用式(9)对图8中测试数据进行回归，结果如图8所示。结果表明，三块煤样初始渗透率相差不大，但Ia类地应力储层应力敏感性系数最小，为0.479，表明该应力状态下，应力敏感性最弱；II类地应力储层应力敏感性系数最大，为0.698，表明应力敏感性最强；III类地应力储层应力敏感性居中。这主要是由于Ia类储层以垂直缝为主，上覆有效应力增加导致的裂缝闭合程度最小，而以水平裂缝为主的II类地应力储层裂缝闭合程度最强。

5　对储层压裂效果的影响

不同地应力类型对储层水力压裂裂缝形态及产量影响，其中裂缝形态和半长通过四维向量微地震监测得到，结果如表2所示。对于Ia类地应力储层，形成垂直缝，导致压裂缝长相对较短，仅为80~100 m；对于II类地应力储层，形成水平缝，裂缝延伸较长，达到130~150 m；对于第III类储层形成复杂缝，裂缝长度居中，主要分布在100~130 m。因此，

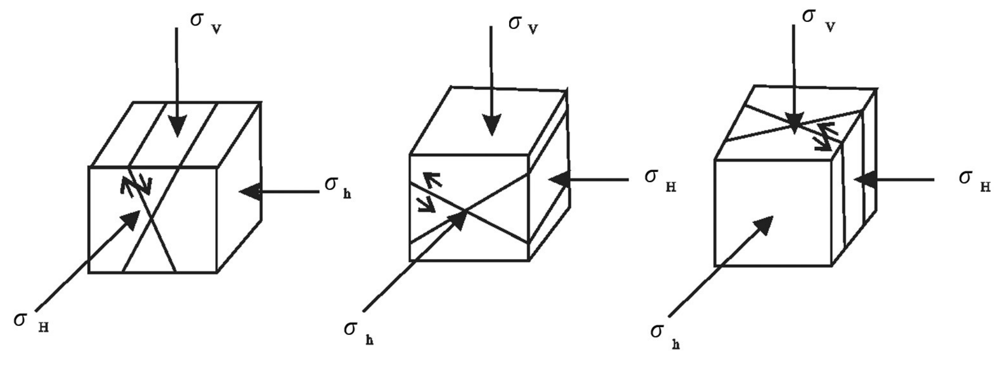


图6 研究区地应力类型示意图（据自孙良忠等，2017修改）
Fig.6 Sketch showing in-situ stress field types (modified from Sun Liangzhong et al., 2017)

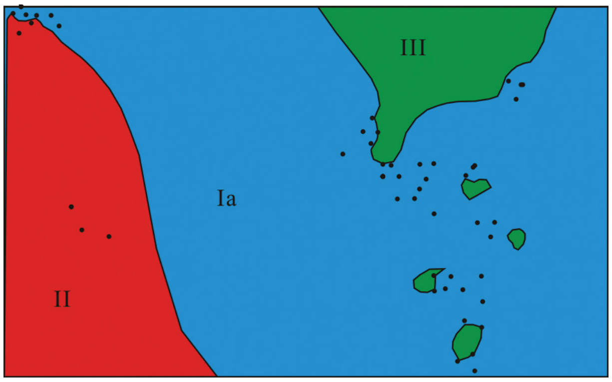


图7 研究区地应力类型分布
Fig.7 Distribution of the in-situ stress field types of South Yanchuan Block

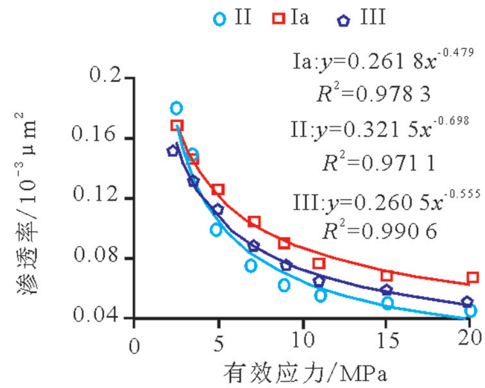


图8 不同地应力类型对煤样应力敏感性影响
Fig.8 Effect of in-situ stress field types on the sensitivity of different coal samples

从裂缝形态来看，II类地应力储层压裂效果较好。对研究区域内处于不同地应力类型的压裂煤层气井的累产气量和累产水量进行分析结果表明，处于Ia类地应力状态的井累产水量达到6800 m^3，远高于II类地应力状态的井累产水量1100 m^3，这充分说明Ia类地应力储层形成了垂直裂缝，沟通了上下含水层，导致累产水量增多，II类地应力储层由于为水平缝所以未沟通含水层，故产水量较少；另外处于II类

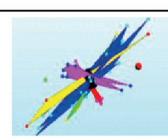
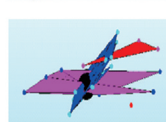
表1 不同地应力类型对裂缝发育程度的影响

Table 1 Effect of in-situ stress field types on the development degree of fractures

地应力类型	主裂缝			次裂缝			裂缝指数
	高度/cm	宽度/μm	密度/(条•cm^{-1})	高度/cm	宽度/μm	密度/(条•cm^{-1})	
Ia	0.78	8	7.4	0.47	7	1.8	4406.2
Ia	0.62	9	4.7	0.57	6	2.4	3944.7
Ia	0.72	8	8.3	0.45	8	1.3	4915.2
Ia	0.52	7	3.4	0.3	7	3.3	2298.1
II	0.39	16	6.4	0.36	11	3.4	30739.8
III	0.54	10	6.3	0.38	6	1.9	6710.4
III	0.49	11	4.5	0.18	6	8.9	7911.9

表2 不同地应力类型对压裂缝的影响

Table2 Effect of in-situ stress field types on the hydraulic fractures

地应力类型	压裂缝形态	裂缝形态监测结果	压裂缝长/m	累产水量/m^3	累产气量/10^{4}m^3
Ia	垂直缝		80~100	6800	16.8
II	水平缝		130~150	1100	91.1
III	复杂裂缝		100~130	4900	18.7

地应力状态的井累产气量达到91.1 × 10^4 m^3，远高于Ia类地应力状态的井累产气量16.8 × 10^4 m^3，这充分说明II类地应力储层形成了较长的压裂裂缝，储层改造效果较好。因此II类地应力储层形成水平缝、压裂缝最长，改造效果最好，产量最高；Ia类地应力储层压形成垂直缝、压裂缝最短，改造效果最差，产量最低，产水量最高；III类地应力储层形成复杂裂缝，缝长居中，但产量相对较低，不能实现效益开发。

6 结　论

（1）研究区各应力值较大，整体处于挤压状态，最小水平主应力为8.21~31.39 MPa，平均为15.78 MPa；最大水平主应力为9.82~57.87 MPa，平均为25.92 MPa；垂向应力为17.94~29.92 MPa，平均为24.91 MPa。最小、最大水平主应力和垂向应力与埋深呈正相关线性关系，最小水平主应力公式为 $\sigma_h = 0.023H - 6.848$ ，最大水平主应力公式为 $\sigma_H = 0.043H - 17.394$ 。

（2）研究区地应力类型以Ia类为主，III类其次，II类最少。Ia类地应力储层天然裂缝高度最高，以垂直裂缝为主，裂缝指数最低，渗透性最差，但应力敏感性最弱，应力敏感性系数最低为0.479；II类地应力储层主、次裂缝宽度均最大，分别为16 μm和11 μm，以水平裂缝为主，裂缝指数最高，达到30739.8，渗透性最高，同时应力敏感性最强；III类地应力储层裂缝复杂，渗透性和应力敏感性居中。

（3）II类地应力储层压裂形成水平缝、压裂缝最长，改造效果最好，产量最高；Ia类地应力储层压裂形成垂直缝、压裂缝最短，改造效果最差，产量最低，产水量最高；III类地应力储层压裂形成复杂裂缝，缝长居中，但产量相对较低，不能实现效益开发。

致谢：本研究借鉴了中国矿业大学(北京)孟召平教授相关研究方法，在此表示感谢。匿名审稿专家和郝梓国主编对本文提出了很多中肯的修改意见，让本文得到了很大的提升，在此一并致以诚挚的感谢。

References

Chen Zhaowei,Yang Xiangtong, Wang Gang, Yuan Xuefang, Liu Junyan, Zhou Pengyao, Ba Dan. 2014.Analytical technique of horizontal maximum principal stress for petroleum engineering[J]. Journal of Geomachanics, 20(1):94−102(in Chinese with English abstract).

Chen Shida, Tang Dazhen, Tao Shu, Xu Hao, Li Song, Zhao Junlong.2018.Statistic analysis on macro distribution law of geostress field in coalbed methane reservoir[J].Coal Science and Technology, 46(6):57−63(in Chinese with English abstract).

Chen Tonggang, Wang Qinian, Zhu Jiangbo, Tang Dazhen, Xu Hao. 2018.Control of mechanical properties of coal seam and its roof and floor rocks over the crack extension during hydraulic fracturing[J].East China Geology, 39(3):212−217(in Chinese with English abstract).

Chen Zhenlong, Guo Tao, Li Xin, Xiao Cui, Jin Xiaobo.2019. Enrichment law and development technology of deep coalbed methane in South Yanchuan Coalbed Methane Field[J].Coal Science and Technology, 47 (9):112−118(in Chinese with English abstract).

Chen Zhenlong, Wang Feng, Chen Gang, Mei Junwei, Guo Tao.2018. Study on enrichment law and development features of deep coalbed methane in South Yanchuan Field[J].Coal Science and Technology, 46(6):80−84, 194(in Chinese with English abstract).

Chen Zhengrong, Liu Shujie, Cao Yanfeng, Peng Chengyong, Li Yingying.2018.Methods to predict in−situ stress and fracture geometry of coal beds in Qinshui basin[J].China Off−shore Oil and Gas, 30(4):163−169(in Chinese with English abstract).

Li Bing, Ding Lifeng, Wang Jianxin, Hou Yanhe, Xie Furen.2019.The state of the in−situ stress and fault stability evaluation of the Penglai coast[J].Journal of Geomechanics, 25(4):459−466(in Chinese with English abstract).

Li Yepeng, Shen Jian, Yang Chunli, Zhang Jinbo.2017.Characteristics and its geological implication of ground stress in Zhengzhuang Block of Qinshui Basin[J].Coal Science and Technology, 45(10): 176−181, 110(in Chinese with English abstract).

Li Yong, Tang Dazhen, Meng Shangzhi, Wu Peng. 2017.The in−situ stress of coal reservoirs in east margin of Ordos Basin and its influence on coalbed methane development[J].Journal of Mining Science and Technology, 2(5) : 416−424(in Chinese with English abstract).

Liu Dameng, Zhou Sandong, Cai Yidong, Yao Yanbin.2017.Study on effect of geo− stress on coal permeability and its controlling mechanism[J]. Coal Science and Technology, 45(6):1−8, 23(in Chinese with English abstract).

Liu Honglin, Wang Bo, Wang Feng, Li Guizhong, Qin Yong.2007. Ground stress characteristics and prediction of high productivity zoned in south of Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 18(6): 885−890(in Chinese with English abstract).

Fu Yutong, Ma Jianqiang, Li Yongchen, Xu Zuwei. 2017.Research on key factors of CBM well productivity in deep strata in block of south Yanchuan[J]. Coal Geology & Exploration, 45(5): 48−53(in Chinese with English abstract).

Jia Huimin, Hu Qiujia, Liu Zhong, Liu Chunchun, Qiao Maopo, Qin Yu. 2017. Influence of fractures stress sensitivity on water production law for the single−phase flow of CBM wells and drainage countermeasures[J]. China Coalbed Methane, 14(5):31−34 (in Chinese with English abstract).

Jia Huimin, Hu Qiujia, Qi Kongjun, Liu Chunchun, Fan Bin, He Jun. 2019. Reasons of low yield and stimulation measures for vertical CBM wells in high−rank coal[J].Coal Geology & Exploration, 47(5): 104–110(in Chinese with English abstract).

Jia Huimin, Sun Shixuan, Mao Chonghao, Wu Zezhou, Luo Tianping, Luo Dan. 2017. Study on single−phase flow water production law of coalbed methane well based on coal and rock stress sensitivity[J]. Coal Science and Technology, 45(12): 189−193(in Chinese with English abstract).

Meng Guixi. 2017. Study on ground stress field features and its impact on coal reservoir pressure and permeability[J]. Coal Geology of China, 29(3): 21−27, 36(in Chinese with English abstract).

Meng Zhaoping, Lan Qiang, Liu Cuili, Ji Yiming, Li Shinan, Zhang Xiaoming. 2013. In−situ stress and coal reservoir pressure in Southeast margin of Ordos basin and their coupling relations[J]. Journal of China coal society, 38(1): 122−128(in Chinese with English abstract).

Meng Zhaoping, Tian Yongdong, Li Guofu. 2010. Characteristics of in−situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 35(6): 975−981(in Chinese with English abstract).

Nie Zhihong, Chao Haiyan, Liu Ying, Huang Hongxing, Yu Lizhu. 2018. Development strategy and production characteristics of deep coalbed methane in the east Ordos Basin: Taking Daning−Jixian block for example[J]. Journal of China Coal Society, 43(6): 1738−1746(in Chinese with English abstract).

Niu Linlin, Feng Chengjun, Zhang Peng, Chen Qunche, Tan Chengxuan. 2018. In−situ Measurements in the southern margin of the Ordos Block[J]. Journal of Geomachanics, 24(1): 25−34(in Chinese with English abstract).

Qin Yong, Shen Jian. 2016. On the fundamental issues of deep Coalbed Methane geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 37(1): 125−136 (in Chinese with English abstract).

Schmitt D R, Zoback M D. 1989. Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests——A proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(6): 499−506.

Sun Jian, Liu Wei, Hui Xuning, Li Qi, Li Linze, Xu Hancheng, Yin Shuai. 2017. Characteristics of in−situ stress at coalbed methane reservoir and its effects on fracturing results[J]. Drilling & Production Technology, 40(6): 45−48, 55(in Chinese with English abstract).

Sun Liangzhong, Kang Yongshang, Wang Jin, Jiang Shanjue, Zhang Bing, Gu Jiaoyang, Ye Jianping, Zhang Shouren. 2017. Vertical transformation of in−situ stress types and its control on Coalbed Reservoir permeability[J]. Geological Journal of China Universities, 23(1): 148−156(in Chinese with English abstract).

Wang Dan, Zhao Fenghua, Geng Hao, Wang Haitao, Sun Junyi, Cheng Chen. 2015. Characteristics of in−situ stress field for upper main coal seam of Linfen Block[J].Fault−Block Oil & Gas Field, 22(3): 287−290(in Chinese with English abstract).

Wen Zhuo, Kang Yongshang, Deng Ze, Sun Liangzhong, Li Guizhong, Wang Hongyan. 2019. Characteristics and distribution of current in−situ stress at shallow−medium depth in coal−bearing basins in China [J]. Geological Review, 65(3): 729−742(in Chinese with English abstract).

Wu Shuang, Tang Dazhen, Xu Hao, Li Song, Meng Yanjun.2015. Analysis of the characteristics of deep coalbed methane wells drainage and control factors of productivity[J].Journal of Northeast Petroleum University, 39(2): 69−76, 101(in Chinese with English abstract).

Xu Hongjie, Sang Shuxun, Yi Tongshegn, Zhao Xia, Liu Huihu, Li Lin. 2014. Control mechanism of buried depth and in−situ sress for coal reservoir permeability in Western Guizhou[J]. Earth Science——Journal of China University of Geoscience, 39(11): 1607−1616(in Chinese with English abstract).

Xue Pei, Gao Chao. 2016. Study on influence of effective stress on coal reservoir permeability in the Baode block[J].Geology and Exploration, 52(2): 0334−0339(in Chinese with English abstract).

Yang Yanhui, Meng Zhaoping, Chen Yanjun, Yang Yanlei, Gan Dayong. 2015. Geo−stress condition of coal reservoirs in Qinnan−Xiadian block and its influences on permeability[J].Acta Petrolei Sinica, 36(S1): 91−96 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈朝伟, 杨向同, 王刚, 袁学芳, 刘军严, 周鹏遥, 巴旦.2014.石油工程水平最大地应力分析技术[J].地质力学学报, 20(1):94−102.

陈世达, 汤达祯, 陶树, 许浩, 李松, 赵俊龙.2018.煤层气储层地应力场宏观分布规律统计分析[J].煤炭科学技术, 46(6):57−63.

陈同刚, 汪启年, 朱将波, 汤达祯, 许浩. 2018.煤层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制[J].华东地质, 39(3):212−217.

陈贞龙, 郭涛, 李鑫, 肖翠, 金晓波.2019.延川南煤层气田深部煤层气成藏规律与开发技术[J].煤炭科学技术, 47(9):112−118.

陈贞龙, 王烽, 陈刚, 梅俊伟, 郭涛.2018.延川南深部煤层气富集规律及开发特征研究[J].煤炭科学技术, 46(6): 80−84, 194.

陈峥嵘, 刘书杰, 曹砚锋, 彭成勇, 李莹莹. 2018.沁水盆地煤层地应力模型及压裂裂缝形态预测方法[J].中国海上油气, 30(4):163−169.

李兵, 丁立丰, 王建新, 侯砚和, 谢富仁.2019.山东蓬莱近海岸的地应力状态及断层稳定性评价[J].地质力学学报, 25(4):459−466.

李叶朋, 申建, 杨春莉, 张金波.2017.沁水盆地郑庄区块地应力发育特征及其地质意义[J].煤炭科学技术, 45(10):176−181, 110.

李勇, 汤达祯, 孟尚志, 吴鹏.2017.鄂尔多斯盆地东缘煤储层地应力状态及其对煤层气勘探开发的影响[J].矿业科学学报, 2(5):416−424.

刘大锰, 周三栋, 蔡益栋, 姚艳斌.2017.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, 45(6):1−8, 23.

刘洪林, 王勃, 王烽, 李贵中, 秦勇.2007.沁水盆地南部地应力特征及高产区带预测[J].天然气地球科学, 18(6):885−890.

付玉通, 马建强, 李永臣, 许祖伟.2017.延川南区块深层煤层气井产能主控因素[J].煤田地质与勘探, 45(5):48−53.

贾慧敏, 胡秋嘉, 刘忠, 刘春春, 乔茂坡, 秦宇. 2017.裂缝应力敏感性对煤层气井单相流段产水影响及排采对策[J].中国煤层气, 14(5):31−34.

贾慧敏, 胡秋嘉, 祁空军, 刘春春, 樊彬, 何军.2019.高阶煤煤层气直井低产原因分析及增产措施[J].煤田地质与勘探, 47(5):104−110.

贾慧敏, 孙世轩, 毛崇昊, 吴泽舟, 罗天平, 罗丹.2017.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, 45(12):189−193.

孟贵希.2017.地应力场特征及其对煤储层压力和渗透率的影响研究[J].中国煤炭地质, 29(3):21−27, 36.

孟召平, 蓝强, 刘翠丽, 纪懿明, 李诗男, 张小明.2013.鄂尔多斯盆地东南缘地应力、储层压力及其耦合关系[J].煤炭学报, 38(1):122−128.

孟召平, 田永东, 李国富.2010.沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J].煤炭学报, 35(6):975−981.

聂志宏, 巢海燕, 刘莹, 黄红星, 余莉珠.2018.鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气生产特征及开发对策——以大宁—吉县区块为例[J].煤炭学报, 43(6):1738−1746.

牛琳琳, 丰成君, 张鹏, 陈群策, 谭成轩.2018.鄂尔多斯地块南缘地应力测量研究[J].地质力学学报, 24(1):25−34.

秦勇, 申建.2016.论深部煤层气基本地质问题[J].石油学报, 37(1):125−136.

孙健, 刘伟, 惠徐宁, 李琪, 李林泽, 徐汉成, 尹帅.2017.煤层气储层地应力特征及其对压裂效果的影响[J].钻采工艺, 40(6):45−48, 55.

孙良忠, 康永尚, 王金, 姜杉钰, 张兵, 顾娇杨, 叶建平, 张守仁.2017.地应力类型垂向转换及其对煤储层渗透率控制作用[J].高校地质学报, 23(1):148−156.

王丹, 赵峰华, 耿昊, 王海涛, 孙俊义, 程晨. 2015.临汾区块上主力煤层地应力场特征[J].断块油气田, 22(3):287−290.

文卓, 康永尚, 邓泽, 孙良忠, 李贵中, 王红岩.2019.中国含煤盆地浅—中深部现今地应力特点和分布规律[J].地质论评, 65(3):729−742.

吴双, 汤达祯, 许浩, 李松, 孟艳军.2015.深部煤层气井排采特征及产能控制因素分析[J].东北石油大学学报, 39(2):69−76, 101.

徐宏杰, 桑树勋, 易同生, 赵霞, 刘会虎, 李林.2014.黔西地区煤层埋深与地应力对其渗透性控制机制[J].地球科学——中国地质大学学报, 39(11):1607−1616.

薛培, 高潮. 2016.有效应力对保德区块煤储层渗透率影响研究[J].地质与勘探, 52(2):334−339.

杨延辉, 孟召平, 陈彦君, 杨艳磊, 干大勇.2015.沁南—夏店区块煤储层地应力条件及其对渗透性的影响[J].石油学报, 36(增刊):91−96.