



推荐阅读:

[论煤炭绿色开采的地质保障](#)

[我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展](#)

[西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法](#)

[软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用](#)

[基于排采初期生产特征的煤层气合采地质条件分析](#)

[碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式](#)

[再论煤矿区生态环境“边采边复”](#)

[西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估](#)

[采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律](#)

[基于 LBA-BP 的矿井瞬变电磁法岩层富水性的定量预测](#)

[保水采煤面临的科学问题](#)

[西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征](#)

[神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究](#)

[生态脆弱区保水采煤矿井\(区\)等级类型](#)

[覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法](#)

[干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义](#)

[结构充填“保水-储水”采煤顶板稳定性分析](#)

[基于保水采煤理念的地质环境承载力研究](#)

[西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征](#)

[结构充填开采基础理论与地下空间利用构想](#)

[矿井多波多分量地震方法与试验](#)

[煤中稀土元素分布特征及其开发利用前景](#)

[解决矿山环境问题的“九节鞭”](#)

[软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用](#)

[保水采煤面临的科学问题](#)



中国煤炭行业知识服务平台 (中国煤炭期刊网)  
CHINA COAL INDUSTRY KNOWLEDGE SERVICE PLATFORM



推荐阅读：

[西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征](#)

[神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究](#)

[生态脆弱区保水采煤矿井\(区\)等级类型](#)

[覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法](#)



移动阅读

张迁,王凯峰,周淑林,等.沁水盆地柿庄南区块地质因素对煤层气井压裂效果的影响[J].煤炭学报,2020,45(7):2636-2645. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1527

ZHNAG Qian, WANG Kaifeng, ZHOU Shulin, et al. Influence of geological factors on hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Shizhuangnan Block, Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (7): 2636-2645. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1527

## 沁水盆地柿庄南区块地质因素对煤层气井压裂效果的影响

张 迁<sup>1,2,3</sup>,王凯峰<sup>1,4,5</sup>,周淑林<sup>6</sup>,唐书恒<sup>1,2,3</sup>,张松航<sup>1,2,3</sup>,闫欣璐<sup>1,2,3</sup>,伊永祥<sup>1,2,3</sup>,党 枫<sup>1,2,3</sup>,朱卫平<sup>7</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083; 3. 非常规天然气地质评价与开发工程北京市重点实验室,北京 100083; 4. 内蒙古自治区煤田地质局,内蒙古 呼和浩特 010010; 5. 内蒙古自治区非常规天然气工程技术研究中心,内蒙古 呼和浩特 010010; 6. 浙江师范大学,浙江 金华 321004; 7. 吐哈油田勘探开发研究院,新疆 哈密 839000)

**摘 要:**在煤层气开发过程中,地质条件不仅是煤层气开采的先决条件和地质保障,也直接影响了水力压裂施工,从而影响煤层气井的产能。以沁水盆地柿庄南区块施工参数相近的34口煤层气井为例,从地应力条件、煤体结构和煤层顶底板岩性组合3个方面具体分析了地质因素对煤层气井水力压裂效果的影响,进而对研究区压裂效果进行评价。结果表明:三向地应力的大小关系控制裂缝的延伸方向和缝长,煤体结构类型决定能否形成有效裂缝,煤层顶底板砂岩、泥岩厚度及比例影响裂缝能否穿透隔水层。应力比越小、水平主应力差系数越大、煤层中原生结构煤比例越高、煤层顶底板的泥岩隔水层厚度及比例越大,水力压裂效果越好,煤层气井的平均日产气量也越高。综合上述3方面地质因素,研究区中部地区具有易发育垂直裂缝的地应力特征,且煤层的原生结构煤比例和顶底板泥岩比例高,最有利于水力压裂裂缝的形成与延伸,该区域为水力压裂的优选区域。其次为南部及西南部地区,地应力和顶底板条件较好,但煤体结构破坏程度相对较大。研究区北部、东北部及东南部区域由于煤体结构破坏程度大、顶底板封闭性差等因素,在进行水力压裂时应尽量规避。建议在对煤层气井进行水力压裂时应根据煤层气井的地质条件进行压裂方案设计。

**关键词:**水力压裂;煤层气井;地质因素;柿庄南区块;沁水盆地

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)07-2636-10

## Influence of geological factors on hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Shizhuangnan Block, Qinshui Basin

ZHNAG Qian<sup>1,2,3</sup>, WANG Kaifeng<sup>1,4,5</sup>, ZHOU Shulin<sup>6</sup>, TANG Shuheng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Songhang<sup>1,2,3</sup>,  
YAN Xinlu<sup>1,2,3</sup>, YI Yongxiang<sup>1,2,3</sup>, DANG Feng<sup>1,2,3</sup>, ZHU Weiping<sup>7</sup>

(1. School of Energy and Resources, China University of Geoscience(Beijing), Beijing 100083, China; 2. MOE Key Lab of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geological Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China; 4. Coal Geological of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China; 5. Unconventional Natural Gas Engineering Technology Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China; 6. Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 7. Exploration & Development Research Institute, Tuha Oilfield Company, Hami 839000, China)

**Abstract:** Geological conditions are predominant factors for developing the coalbed methane (CBM), and directly af-

收稿日期:2019-11-05 修回日期:2020-02-21 责任编辑:钱小静

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1910205,41772159,41872178)

作者简介:张 迁(1995—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail:1165368578@qq.com

通讯作者:唐书恒(1965—),男,河北正定人,教授,博士生导师。E-mail:tangsh@cugb.edu.cn

fect the hydraulic fracturing process, which results in the varying performance of coalbed methane wells. In this study, a total of 34 CBM wells with similar construction parameters were selected to analyze the effect of geological factors on the hydraulic-fracturing performance. Geological factors including crustal stress, coal texture and the lithological signature of roof and floor bed were analyzed and the fracturing effect were then evaluated. Results show that the magnitude of three-direction crustal stress controls the direction and the length of extended fractures. The type of coal texture determines whether effective fractures can be formed. The roof and floor of coal seam are mostly sandstones and mudstones, and their relative thicknesses affect whether the fractures can penetrate the aquifer. Better fracturing performance was found in the areas with smaller stress ratio, larger horizontal principal stress difference coefficient, higher proportion of the primary coal and larger thickness and proportion of the aquifer roof and floor. The production of CBM wells were recognized to be higher at such areas. The central part of the study area was characterized to develop vertical fractures, and to have a high proportion of the primary coal and high mudstone proportion in the top and floor, which makes it to be the primary area for hydraulic fracturing. The secondary targets for hydraulic fracturing are located in the south and southwest of the study area, where good crustal stress and roof-floor conditions could be found. In the north, northeast and southeast of the study area, however, the hydraulic fracturing should be avoided due to the large destruction of coal structure and poor sealing condition of roof and floor. It is suggested that the hydraulic fracturing scheme should be designed based on the geological conditions of coalbed methane wells.

**Key words:** hydraulic fracturing; CBM; geological factor; Shizhuangnan Block; Qinshui Basin

沁水盆地 2 000 m 以浅煤层气地质资源量达  $3.95 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>, 目前是我国最大的煤层气工业开发区。但由于其开采地质条件复杂, 煤层具有低孔低渗、低饱和、低压、强非均质性的特点<sup>[2-3]</sup>, 仍然存在很多技术难题制约其合理有效开采, 导致煤层气井产气效果不理想。

水力压裂技术是国内常用的煤层气井有效增产措施<sup>[4]</sup>, 水力压裂的影响因素主要分为地质因素和施工因素。对高煤阶煤层气生产来说, 地质资源和地质条件是开发基础; 储层改造措施和改造效果是开发关键; 排采制度是高产保障。因此, 在煤层气开发中, 对资源条件差的块段需要规避; 对开发条件差的块段应视其可改造性进行取舍; 工程技术手段应根据其地质适用性来考量, 排采制度应综合地质条件和储层改造效果来制定, 所以地质因素是煤层气开采的先决条件<sup>[5-6]</sup>。沁水盆地柿庄南区块煤层气井压裂施工参数相近, 绝大部分煤层气井采用的是活性水压裂液, 只有很少的煤层气井采用清洁压裂液和氮气泡沫压裂液, 压裂采用的支撑剂均为兰州石英砂。压裂液总量平均用量为  $510 \text{ m}^3$ , 主要分布在  $480 \sim 530 \text{ m}^3$ ; 携砂液量平均为  $350 \text{ m}^3$ , 主要分布在  $325 \sim 375 \text{ m}^3$ ; 加砂量和砂比变化也不大, 平均为  $52 \text{ m}^3$  和 13.5%。因此, 笔者主要从地质角度分析压裂裂缝的延伸规律和压裂效果的评价。地质因素属于内在因素, 包括地应力条件、煤层顶底板岩性组合以及煤体结构等, 对于水力压裂的效果评价主要以裂缝缝长、裂缝延伸方向、日均产气量和日均产水量作为主要评价参数。

在本次研究中通过对沁水盆地柿庄南区块地应力、煤体结构和煤层顶底板岩性组合等地质因素对水力压裂效果影响的评价, 力图划分出研究区煤层气井水力压裂有利区, 为该区煤层气高效开发奠定理论基础。

## 1 地质背景

柿庄南区块位于沁水盆地东南部, 行政区划属于沁水县与高平市管辖。研究区总体构造形态为一西北倾的单斜构造, 东南部发育一系列轴向近东西向的褶皱, 呈弧形排列(图1)。区内地层沉积自下而上发育古生界奥陶系、石炭系上统本溪组、石炭—二叠系太原组、二叠系下统山西组、二叠系中统石盒子组、二叠系上统石千峰组及新生界第四系。研究区太原组 15 号煤层和山西组 3 号煤层稳定分布, 其中 3 号煤层为主采煤层。3 号煤层厚度稳定且连续分布, 厚度介于  $3.34 \sim 7.00 \text{ m}$ , 平均厚度为  $6.34 \text{ m}$ ; 埋深分布在  $71.4 \sim 1\ 074.7 \text{ m}$ , 平均埋深为  $626.6 \text{ m}$ , 具有东浅西深的点; 煤层渗透率主要在  $0.01 \times 10^{-15} \sim 0.3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ , 平均在  $0.09 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  以上; 含气量介于  $3.11 \sim 21.51 \text{ m}^3/\text{t}$ , 平均为  $12.02 \text{ m}^3/\text{t}$ , 储层非均质性强。

## 2 水力压裂影响因素分析

### 2.1 地应力条件

地应力条件是影响煤层气井压裂效果的主要地质因素之一, 三向地应力的大小和方向控制着水力压

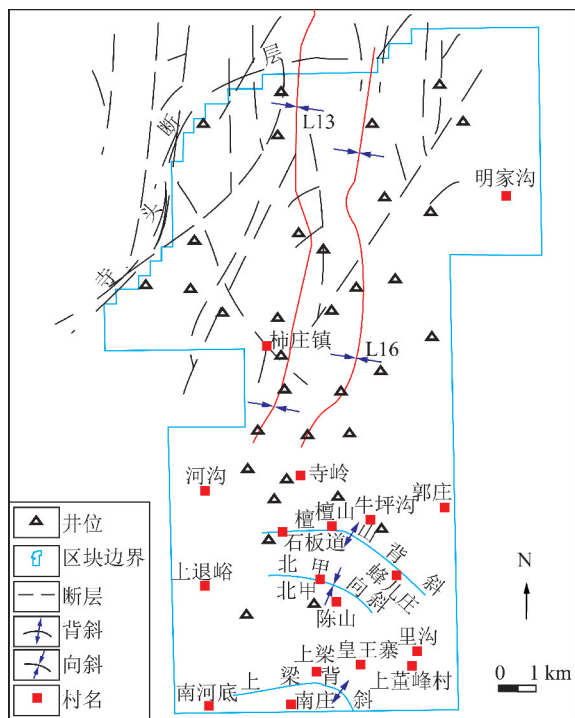


图1 柿庄南区块构造纲要及井位分布

Fig. 1 Regional geology and well location of Shizhuangnan Block  
 裂裂缝形态和延伸方向,进而影响水力压裂效果和产气特征<sup>[7-8]</sup>。根据压裂施工过程和地球物理测井资料获取各向地应力参数值,煤层气储层受到的地应力可以用3个相互正交的主应力表示,一般认为垂向地应力等于上覆岩层压力,可以利用密度测井数据积分得到,水平方向的2个主应力采用黄氏模型计算<sup>[9]</sup>,计算公式为

$$\sigma_v = \rho_0 g h_1 + \int_{h_1}^{h_2} \rho(h) g dh \quad (1)$$

表1 柿庄南区块34口煤层气井缝长计算结果

Table 1 Calculated fracture length of 34 coalbed methane wells in the Shizhuang South Block

井名	$h/m$	$Q_2/m^3$	$Q_1/m^3$	$E/MPa$	$\sigma_1/MPa$	$\sigma_2/MPa$	$\mu$	缝长/m
TS-6	5.90	506.60	85.35	3 500	15.00	14.50	0.33	103.04
TS-7	6.30	1 149.80	94.67	3 500	20.00	22.50	0.33	118.17
TS-8	5.00	518.00	105.33	3 500	14.00	13.00	0.33	119.79
TS-9	6.60	517.72	100.15	3 500	25.50	30.00	0.33	70.65
TS-10	6.53	513.79	117.72	3 500	12.50	13.00	0.33	106.43
TS-11	6.40	432.30	74.30	3 500	19.70	23.00	0.33	74.35
TS-12	6.55	509.01	100.56	3 500	15.00	14.50	0.33	98.65
TS-13	5.90	498.39	135.72	3 500	13.00	13.50	0.33	108.74
TS-14	6.20	485.52	65.54	3 500	8.00	7.50	0.33	135.04
TS-15	5.90	550.30	104.30	3 500	17.00	17.50	0.33	99.01
TS-16	6.51	501.78	118.92	3 500	21.00	23.50	0.33	79.28
TS-17	5.50	479.00	70.36	3 500	22.00	25.00	0.33	80.04
TS-18	6.40	562.10	86.37	3 500	20.00	21.00	0.33	87.08
TS-19	6.20	502.70	90.47	3 500	15.00	15.50	0.33	97.92
TS-20	6.20	588.90	102.33	3 500	18.50	21.00	0.33	91.99

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) + \beta_1(\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) + \beta_2(\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (3)$$

式中, $\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h$ 分别为垂向主应力和水平方向的2个主应力,MPa; $h_1, h_2$ 分别为起始深度和终止深度,m; $\rho_0$ 为起始深度的上覆地层密度, $g/cm^3$ ; $\rho(h)$ 为随深度变化的密度测井值, $g/cm^3$ ; $p_p$ 为地层孔隙压力,MPa; $\mu$ 为地层泊松比,无量纲; $\alpha$ 为有效应力系数,无量纲; $\beta_1, \beta_2$ 为构造应力系数。

裂缝在水平最大主应力方向的延伸长度<sup>[10]</sup>为

$$L_{max} = 2 \left\{ \left[ \frac{EQ_1}{[8h\sigma_1\pi(1-\mu^2)]} \right]^{1/2} + \left[ \frac{E(Q_2 - Q_1)}{[4h\sigma_2\pi(1-\mu^2)]} \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

式中, $L_{max}$ 为裂缝在水平最大主应力方向的延伸长度,m; $E$ 为煤岩弹性模量,MPa; $h$ 为储层厚度,m; $\sigma_1$ 为初始压裂缝内平均液体压力,MPa; $\sigma_2$ 为仅在水平最大主应力方向延伸时缝内平均液体压力,MPa; $Q_1$ 为裂缝在4个方向延伸时的泵注液量, $m^3$ ; $Q_2$ 为水力压裂总泵注液量, $m^3$ 。

由于裂缝在水平最大主应力方向的延伸长度表明了裂缝延伸的最大范围,对地层渗透率影响较大,具有代表性,因此在评价压裂效果时,主要取该值进行研究。裂缝长度计算结果及式(4)中各变量取值见表1。

通过计算34口煤层气井的地应力(表2),发现

续 表

井名	$h/m$	$Q_2/m^3$	$Q_1/m^3$	$E/MPa$	$\sigma_1/MPa$	$\sigma_2/MPa$	$\mu$	缝长/m
TS-21	5.79	581.10	70.65	3 500	14.50	16.50	0.33	104.69
TS-22	6.20	568.48	112.51	3 500	26.00	25.00	0.33	78.63
TS-23	6.20	562.20	110.70	3 500	15.00	17.50	0.33	99.43
TS-24	5.90	521.80	61.53	3 500	18.00	17.00	0.33	93.89
TS-25	6.00	558.62	72.81	3 500	20.00	18.00	0.33	94.49
TS-26	6.00	508.30	141.03	3 500	9.00	7.00	0.33	145.00
TS-27	6.40	455.91	91.65	3 500	15.00	19.00	0.33	85.65
TS-28	6.00	512.23	76.70	3 500	20.00	20.50	0.33	86.55
TS-29	5.00	514.65	108.03	3 500	24.00	28.00	0.33	84.00
TS-30	5.95	430.19	65.33	3 500	8.00	8.50	0.33	124.29
TS-31	6.65	510.99	112.69	3 500	12.00	11.00	0.33	112.25
TS-32	6.32	473.80	76.40	3 500	21.00	24.00	0.33	76.22
TS-33	5.00	500.29	92.69	3 500	15.00	14.00	0.33	113.15
TS-34	6.00	502.58	106.52	3 500	15.00	16.00	0.33	99.04
TS-35	5.50	583.50	92.20	3 500	19.00	23.00	0.33	93.19
TS-36	6.50	573.74	87.25	3 500	20.50	22.00	0.33	85.47
TS-37	6.60	499.26	109.23	3 500	9.00	9.00	0.33	124.54
TS-38	6.45	523.40	125.64	3 500	10.00	9.50	0.33	125.01
TS-39	6.80	505.70	111.42	3 500	12.00	13.00	0.33	103.92

表 2 柿庄南区块地应力数据统计与裂缝长度

Table 2 Crustal stress statistics and length of fracture in the Shizhuang South Block

井名	$\sigma_h/MPa$	$\sigma_v/MPa$	$\sigma_H/MPa$	应力比 $K_v$	水平主应力差系数 $K_n$	缝长/m	井名	$\sigma_h/MPa$	$\sigma_v/MPa$	$\sigma_H/MPa$	应力比 $K_v$	水平主应力差系数 $K_n$	缝长/m
TS-6	16.46	20.72	20.90	0.79	0.27	103.04	TS-23	15.15	17.69	17.10	0.86	0.13	99.43
TS-7	13.51	19.05	18.40	0.71	0.36	118.17	TS-24	18.40	18.85	20.90	0.98	0.14	93.89
TS-8	12.82	19.12	16.10	0.67	0.26	119.79	TS-25	15.89	18.49	18.90	0.86	0.19	94.49
TS-9	27.53	18.13	28.40	1.52	0.03	70.65	TS-26	9.49	19.14	13.80	0.50	0.45	145.00
TS-10	14.89	17.74	17.20	0.84	0.16	106.43	TS-27	18.97	16.92	20.30	1.12	0.07	85.65
TS-11	26.52	18.54	27.90	1.43	0.05	74.35	TS-28	19.63	14.70	21.70	1.34	0.11	86.55
TS-12	17.08	18.48	20.00	0.92	0.17	98.65	TS-29	17.40	14.31	19.20	1.22	0.10	84.00
TS-13	16.70	18.57	18.70	0.90	0.12	108.74	TS-30	12.74	15.22	17.80	0.84	0.40	124.29
TS-14	10.64	18.84	12.73	0.56	0.20	135.04	TS-31	10.93	15.17	15.40	0.72	0.41	112.25
TS-15	17.96	18.37	21.60	0.98	0.20	99.01	TS-32	16.28	16.01	19.00	1.02	0.17	76.22
TS-16	15.02	17.45	17.50	0.86	0.17	79.28	TS-33	11.97	17.69	16.80	0.68	0.40	113.15
TS-17	22.01	17.31	24.80	1.27	0.13	80.04	TS-34	16.44	13.81	20.34	1.19	0.24	99.04
TS-18	16.93	18.97	19.50	0.89	0.15	87.08	TS-35	16.41	17.51	19.70	0.94	0.20	93.19
TS-19	18.67	18.87	22.24	0.99	0.19	97.92	TS-36	22.64	19.03	25.83	1.19	0.14	85.47
TS-20	16.46	20.72	20.70	0.79	0.26	91.99	TS-37	9.80	14.33	11.38	0.68	0.16	124.54
TS-21	15.00	17.65	19.40	0.85	0.29	104.69	TS-38	8.41	13.89	11.55	0.61	0.37	125.01
TS-22	17.03	17.08	18.60	1.00	0.09	78.63	TS-39	10.21	14.25	14.91	0.72	0.46	103.92

三向地应力与缝长和日均产气量存在一定的相关性。水平最小主应力与缝长、日均产气量呈明显的负相关关系(图2(a),(b)),即水平最小主应力越大,压裂裂缝缝长和煤层气井日均产气量越小,压裂效果越不理想。这是因为在对煤储层进行压裂

时,裂缝往往沿着垂直于最小主应力方向开裂并延伸<sup>[11]</sup>,所以裂缝起裂需要克服水平最小主应力带来的阻力,高的最小水平主应力使得岩层不容易起裂,导致裂缝的延伸长度减小。水平最大主应力与缝长、日均产气量也呈现负相关关系,但相关性较

弱(图 2(c),(d))。从图 2(c),(d)可以看出,当水平最大主应力 $<20$  MPa 时,缝长往往 $>100$  m,日均产气量与水平最大主应力相关性较弱,变化范围较大,但整体呈现出负相关关系。分析可能的原因为压裂裂缝平行于最大主应力方向开裂和延伸,最大主应力越大,越不利于裂缝的起裂和延伸。而水平最大主应力和垂向地应力都可能为最大主应力,

故水平最大主应力与缝长虽有一定的负相关关系,但相关性较弱。而缝长越大,控制的煤储层排采泄压范围就越大,越有利于煤层气的解吸、扩散、产出,故水平最大主应力与日均产气量也呈现负相关关系。3 号煤层的垂向地应力大概分布于 13 ~ 23 MPa,且垂向地应力与缝长、日均产气量无明显的相关性(图 2(e),(f))。

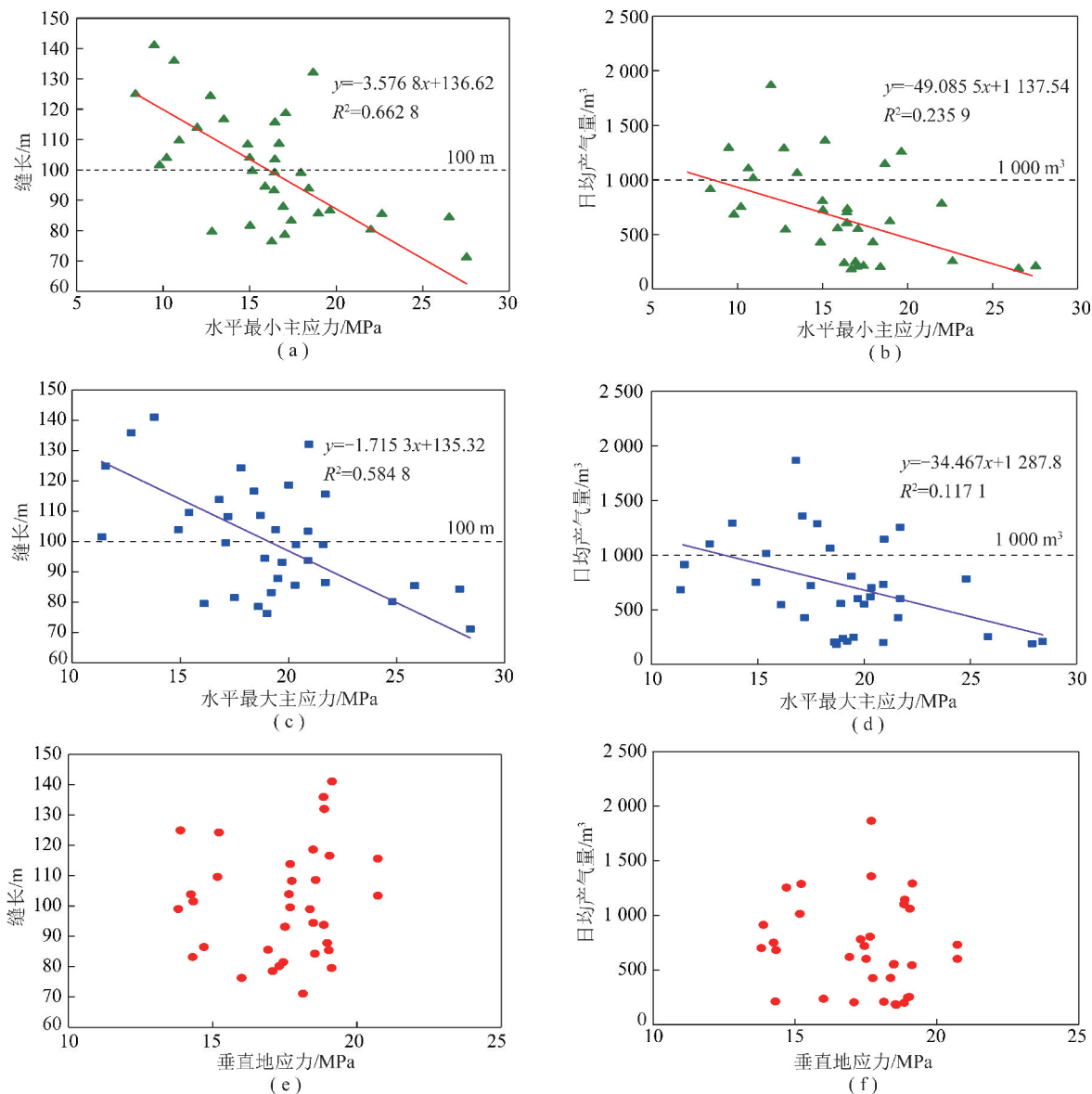


图 2 三向地应力与缝长、日均产气量相关关系

Fig. 2 Relationship between three-dimensional crustal stress, fracture length and daily average gas production

为了进一步研究柿庄南区块地应力特征对压裂效果的影响,引入应力比  $K_v$  和水平主应力差系数  $K_h$ <sup>[12]</sup>。应力比为水平最小主应力与垂向地应力之比,水平主应力差系数为水平最大主应力与水平最小主应力之差与水平最小主应力的比值,计算公式为

$$K_v = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (5)$$

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (6)$$

研究发现,应力比与缝长和日均产气量均呈负相关关系(图 3(a),(b))。应力比越大,缝长和日均产气量越小,表明压裂效果越差。由于裂缝往往沿着垂直于最小主应力的平面延伸,所以由应力比定义,可以通过比较  $K_v$  与 1.0 的大小关系来判断裂缝方向。

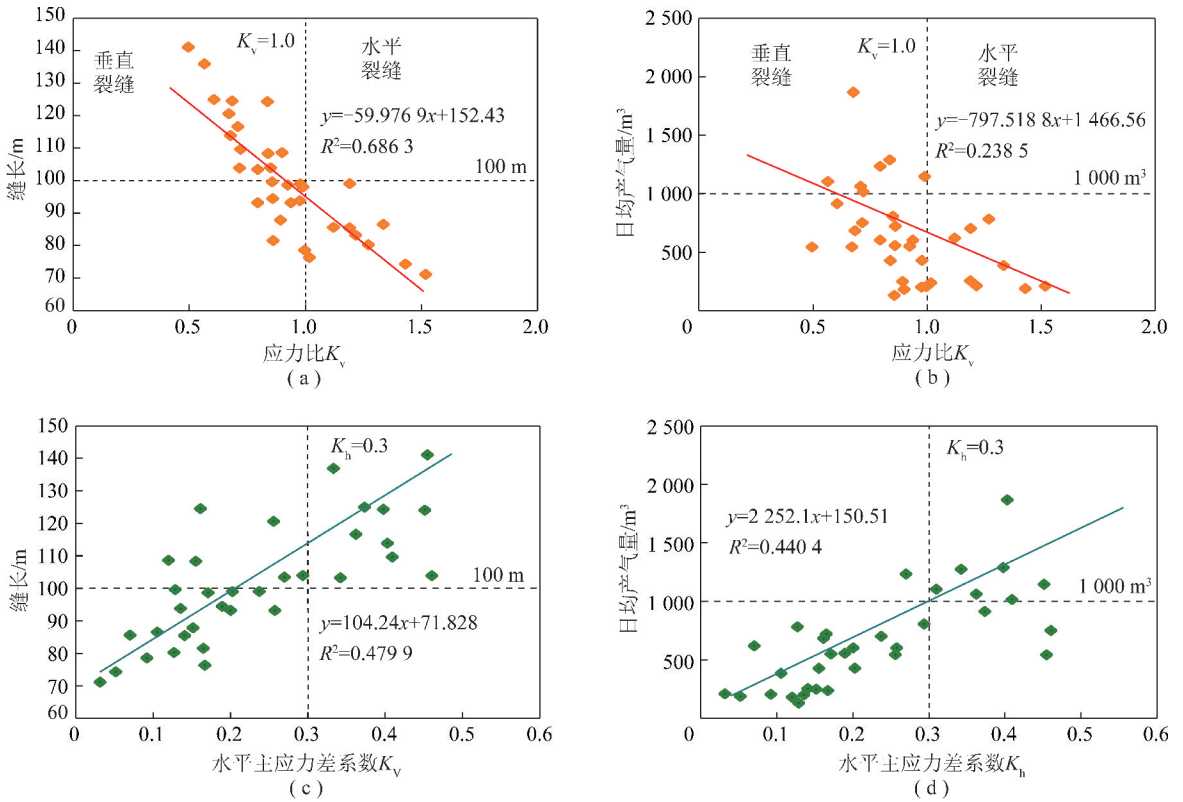


图3 应力比、水平主应力差系数与压裂效果相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between  $K_v$ ,  $K_h$  and fracturing effect

当  $K_v < 1.0$  时,水平最小主应力小于垂向地应力,即三向地应力中水平方向的主应力最小,由于裂缝往往沿着垂直于最小主应力的方向延伸,故易发育垂直裂缝; $K_v > 1.0$  时,即三向地应力中垂向地应力最小,同理,易发育水平裂缝。由于水平裂缝受上覆地层压力容易闭合,故发育垂直裂缝的煤层气井的压裂效果整体上好于水平裂缝井。缝长大于 100 m、产气量在 1 000  $m^3/d$  以上的煤层气井多为垂直裂缝井。

水平主应力差系数与裂缝长度和日均产气量都有明显的正相关关系(图 3(c),(d))。从散点图可以看出,水平主应力差系数  $K_h > 0.3$  时,缝长往往 > 100 m,日均产气量多在 1 000  $m^3/d$  以上。这是因为水平主应力差较大时,裂缝易于沿着垂直最小水平主应力的方向起裂并延伸,形成较长的水力裂缝;水平主应力差较小时,裂缝容易受到天然裂缝的控制沿着天然裂缝延伸,形成网格状裂缝。故水平主应力差系数越大,裂缝长度较大,煤层气井易达到高产,压裂效果较好。

## 2.2 煤体结构

柿庄南区块煤层煤体结构类型主要为原生结构煤、碎裂煤和碎粒煤,糜棱煤发育较少。与砂岩相比,煤岩脆性较大,泊松比相对较高,容易破碎,且受构造运动作用后,不同煤体结构煤的破坏程度、力学性质

以及形态特征存在很大差异<sup>[13]</sup>。因此,煤层气井在进行压裂改造时,不同煤体结构的煤岩在成缝及裂缝展布方面也会有所差异。

利用测井曲线对煤体结构进行划分是目前常见的方法<sup>[14-15]</sup>,通过识别测井曲线进行煤体结构划分,不同煤体结构的煤岩因密度及强度等的不同表现出不同的测井响应特征。通常随煤体遭受构造破坏程度的增加,其(视)电阻率、声波时差增大,孔隙、裂隙发育,密度降低,自然伽马曲线明显降低<sup>[16-17]</sup>(表 3)。

表3 煤层气井煤体结构测井响应值

Table 3 Logging response values of coal structure gas in CBM well

煤体结构	GR/API	RD/( $\Omega \cdot m$ )	DEN/( $g \cdot cm^{-3}$ )
原生结构煤	49 ~ 101	90 ~ 1 627	1.36 ~ 1.89
碎裂煤	28 ~ 65	437 ~ 2 355	1.25 ~ 1.41
碎粒煤	15 ~ 43	830 ~ 11 987	1.19 ~ 1.36

综合考虑了自然伽马、深侧向电阻率、密度 3 种测井曲线的变化情况对 34 口煤层气井进行煤体结构划分,根据不同破坏程度的煤体在测井曲线中表现出不同的特征,可以划分出煤层总厚度和原生结构煤厚度,以煤层中原生结构煤的厚度与煤层总厚度的比值



为原生结构煤比例。研究发现原生结构煤比例越大,在压裂时所形成的裂缝越长,且对应的煤层气井平均日产气量也越高。从图4可以看出,压裂裂缝缝长和日均产气量与原生结构煤比例呈正相关关系。这是因为原生结构煤未遭受构造破坏,保留原生沉积结构、构造特征,原生层理清晰、完整,仅发育少量内生裂隙和外生裂隙,在进行压裂施工时有利于裂缝的形成,成缝后加入支撑剂有利于形成长的、高导流能力的人工裂缝。构造煤均受到不同程度的应力破坏,割理裂隙发育但不连通,硬度、强度较低<sup>[18]</sup>,故裂缝展布时容易受到天然裂缝的控制而发生延伸方向转变而形成网格状,易形成多裂缝而难形成主裂缝,支撑剂不能有效发挥作用,容易形成砂堵<sup>[19]</sup>。所以,原生结构煤比例大的煤层压裂所形成的裂缝较长,煤层气井平均日产气量也越高,这样的煤层才是进行有效压裂的目的煤层。

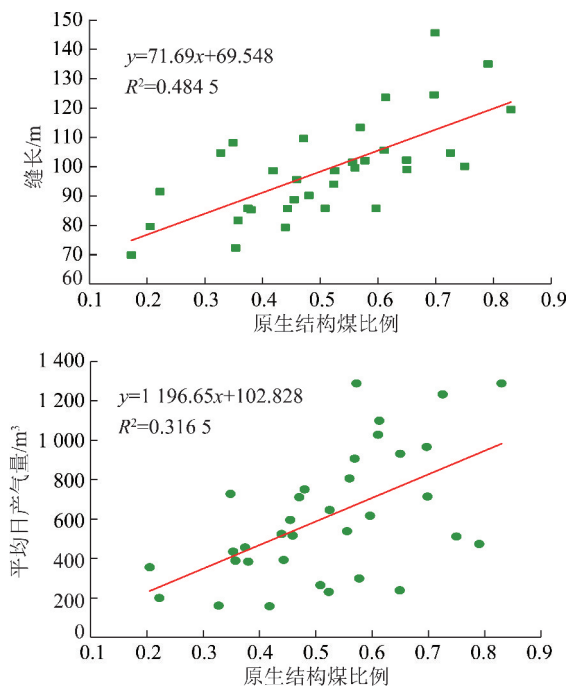


图4 原生结构煤比例与压裂效果相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between the proportion of the primary coal and fracturing effect

### 2.3 煤层顶底板岩性组合

煤层气井压裂后,裂缝有可能在煤层中延伸扩展,形成有效的运移通道;也可能穿过煤层段,在顶底板中延伸扩展,形成复杂的T型缝或工型缝;还可能穿透隔水层,造成外来水进入煤层导致煤层气井产水量高<sup>[20]</sup>。而高产水不仅抑制产气,而且对煤储层和裂缝也有不同程度的伤害,如此就降低了进行压裂改造的效果。因此评价煤层顶底板岩性组合对煤层气井水力压裂的影响至关重要。

柿庄南区块3号煤层顶板主要由泥岩和砂岩叠置组成,底板泥岩比例大,砂岩分布相对较少<sup>[21]</sup>。根据测井资料,对研究区中部及南部高产井分布区10口煤层气压裂井进行统计分析,研究发现煤层顶、底板泥岩比例越小,煤层气井的日均产水量越高(图5)。顶板泥岩比例对煤层气井日均产水量的影响大于底板,底板泥岩比例在0.6以上,最高接近1.0,顶板泥岩比例范围较大,分布在0.1~0.9。对于顶板泥岩比例在0.5以下的煤层气井,日均产水量在2.5 m<sup>3</sup>以上,可以判断在压裂时裂缝穿透了隔水层致使含水层与煤层间产生水力沟通,导致持续的高产水。因此,对于煤层顶板泥岩比例<0.5的煤层气井,压裂裂缝有很大穿透隔水层的风险,故要根据每口井的实际情况进行压裂方案设计,保证压裂裂缝在煤层和隔水层内,在此基础上对煤层气井进行提产方案优化。

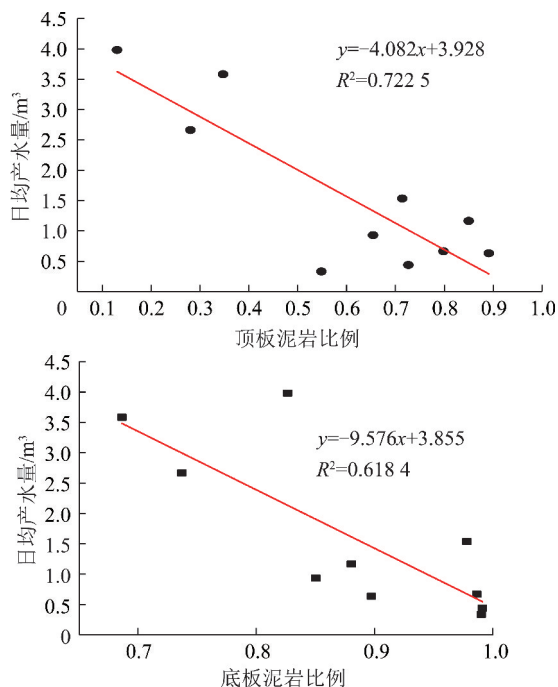


图5 煤储层盖层泥岩比例与日均产水量关系

Fig. 5 Relationship between mudstone ratio of cap rock of coal reservoir and daily average water production

### 3 研究区水力压裂效果评价

应力比和水平主应力差系数的等值线图反映出研究区整体的地应力分布特征(图6(a),(b))。研究区大部分地区  $K_1 < 1$ , 主要集中在中部、东北部、南部及东南部区域,这些地区煤层气井在进行水力压裂时有利于形成垂直裂缝。水平主应力差系数  $K_1$  分布特征总体呈现出从东向西增大的趋势,中部、中东部、西部以及西南部地区  $K_1$  较大,这些区域的地应力条

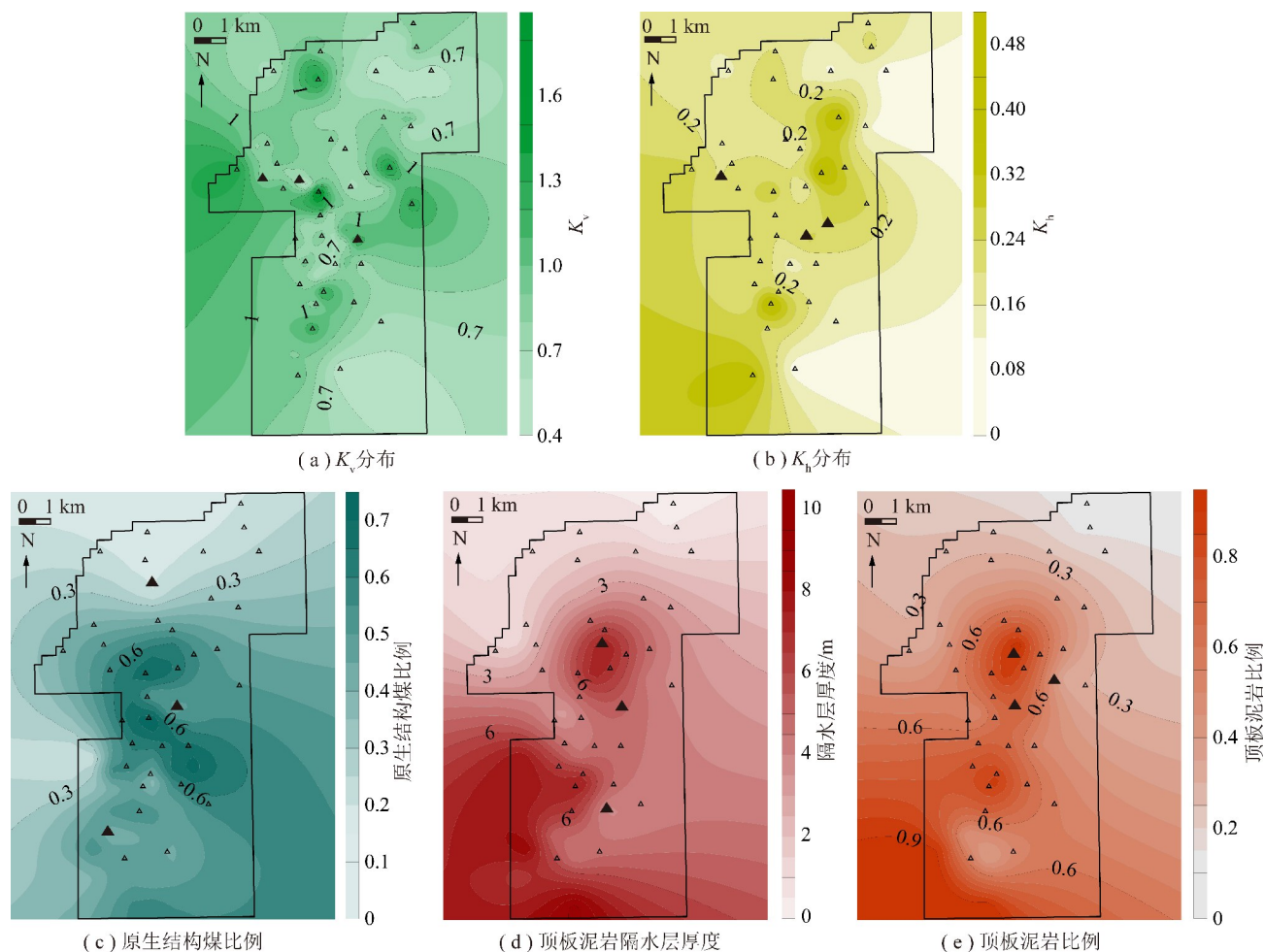


图6 柿庄南区块地应力,原生结构煤和顶板封闭层分布特征

Fig. 6 Distribution map of crustal stress, primary coal and roof sealing layer in Shizhuangnan Block

件有利于压裂裂缝的形成与扩展。研究区中部、西南部的地应力条件有利于水力压裂,具有易发育垂直裂缝的地应力特征,裂缝延伸特征整体较好。

从全区原生结构煤比例等值线图可以看出(图6(c)),柿庄南区块大部分区域原生结构煤较发育,占比较高。研究区中部、中西部及东南部地区原生结构煤比例在0.5以上,煤体结构较为完整,最有利于进行水力压裂;西南部、北部区域占比较低,北部甚至在0.25以下,煤体破坏程度大,不利于进行压裂改造。

前人研究表明当隔水层厚度 $<6$  m,直立的压裂裂缝可能会穿透隔水层与含水层取得水力联系<sup>[22]</sup>。从顶板泥岩隔水层厚度分布和泥岩比例分布图中可以看出(图6(e),(f)),研究区中部、南部及西南部泥岩厚度在6 m以上,泥岩比例 $>0.6$ ,压裂时裂缝穿透隔水层风险相对较小,属于压裂有利区;北部、东北部地区隔水层厚度在3 m以下,泥岩比例 $<0.3$ ,在进行压裂时裂缝极易穿透隔水层而使煤层与上部含水层之间取得水力联系,导致压裂效果变差;中南部及东

部大部分地区隔水层厚度在3~6 m,有沟通含水层的风险,在压裂时要根据煤层气井的具体情况进行压裂方案设计,确保裂缝在煤层和隔水层内延伸。

通过对以上3方面的分析(图6),结合研究区平均日产气量分布特征(图7),发现研究区中部地质条

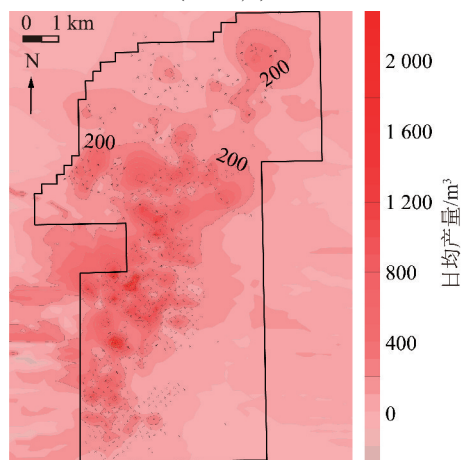


图7 柿庄南区块日均产气量分布

Fig. 7 Distribution characteristics of daily gas production in Shizhuangnan Block

件最有利于进行水力压裂,对应平均日产气量也最高,其次为南部及西南部,东北部地区地质条件较差。

## 4 结 论

(1)水平最小主应力与压裂裂缝缝长、煤层气井日均产气量呈负相关关系;应力比  $K_v > 1.0$  易发育水平裂缝,  $K_v < 1.0$  易发育垂直裂缝,垂直裂缝缝长及产气效果优于水平裂缝;水平主应力差系数越大,压裂裂缝缝长越大,产气效果越好。

(2)煤层原生结构煤比例越大,越易于形成单一的、高导流能力的长裂缝,煤层原生结构煤比例越小,煤层破碎程度越高,越不利于水力压裂裂缝的形成。煤层顶板砂岩比例对压裂的影响大于底板,当煤层顶板砂岩含水层比例  $> 0.5$  时裂缝易穿透隔水层使煤层与含水层沟通。

(3)综合地应力条件、煤体结构及煤层顶底板岩性组合 3 方面地质因素,柿庄南区块中部的地质条件最有利于水力压裂,其次为南部及西南部地区,北部、东北部及东南部区域水力压裂的地质条件较差。在压裂时应根据煤层气井的具体情况设计。

## 参考文献 (References):

[1] 路艳军,杨兆中,SHELEPOV V V,等.煤层气储层压裂现状及展望[J].煤炭科学技术,2017,45(6):73-84.  
LU Yanjun, YANG Zhaozhong, SHELEPOV V V, et al. Status and prospects of coalbed methane reservoir fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 73-84.

[2] LI Hangyu, HON Chung Lau, HUANG Shan, China's coalbed methane development: A review of the challenges and opportunities in subsurface and surface engineering[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166, 621-635.

[3] 叶建平,史保生,张春才.中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J].煤炭学报,1999,24(2):118-122.  
YE Jianping, SHI Baosheng, ZHANG Chuncai, Coal reservoir permeability and its main influencing factors in China[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 118-122.

[4] 韩保山,构造煤煤层气压裂方式及机制探讨[J].煤矿安全,2019,50(7):211-214.  
HAN Baoshan, Discussion on fracturing mode and mechanism of coalbed methane in tectonic Coal[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 211-214.

[5] 闫欣璐,唐书恒,张松航,等.沁水盆地柿庄南区块煤层气低效井二次改造研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):119-125.  
YAN Xinlu, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Study on reconstruction of inefficient well of coalbed methane in southern Shizhuang block of Qingshui basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 119-125.

[6] 王凯峰,唐书恒,张松航,等.柿庄南区块煤层气高产潜力井低

产因素分析[J].煤炭科学技术,2018,46(6):85-91.  
WANG Kaifeng, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Analysis on low production factors of coalbed methane high production potential well in Southern Shizhuang Block[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 85-91.

[7] 刘之的,赵靖舟,时保宏,等.煤层气储层“三品质”测井定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例[J].天然气地球科学,2015,26(5):966-978.  
LIU Zhidi, ZHAO Jingzhou, SHI Baohong, et al. Study on the method of quantitative evaluation for “three qualities” of CBM reservoir using logging data: A case study from the Hancheng mine at the eastern edge of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 966-978.

[8] 孟召平,雷钧焕,王宇恒.基于Griffith强度理论的煤储层水力压裂有利区评价[J].煤炭学报,2020,45(1):268-275.  
MENG Zhaoping, LEI Junhuan, WANG Yuheng. Evaluation of favorable areas for hydraulic fracturing of coal reservoir based on Griffith strength theory[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 268-275.

[9] 万金彬,何羽飞,杨林,等.基于地质因素的煤层气储层压裂产能分类评价[J].测井技术,2019,43(2):155-160.  
WAN Jinbin, HE Yufei, YANG Lin, et al. Classification and evaluation of post-fracturing productivity of coalbed methane reservoirs based on geological factor[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(2): 155-160.

[10] 倪小明,苏现波,张小东.煤层气开发地质学[M].北京:化学工业出版社,2010.

[11] WU Caifang, ZHANG Xiaoyang, WANG Meng, et al. Physical simulation study on the hydraulic fracture propagation of coalbed methane well[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 150, 244-253.

[12] 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 Baojun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.

[13] 李增学,煤地质学[M].北京:地质出版社,2009.

[14] 傅雪海,陆国桢,秦杰,等.用测井响应值进行煤层气含量拟合和煤体结构划分[J].测井技术,1999,23(2):112-115.  
FU Xuehai, LU Guozhen, QIN Jie, et al. Determination of coalbed gas content and classification of coalbody structure with log response[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(2): 112-115.

[15] 倪小明,陈鹏,李广生,等.恩村井田煤体结构与煤层气垂直井产能关系[J].天然气地球科学,2010,21(3):508-512.  
NI Xiaoming, CHEN Peng, LI Guangsheng, et al. Relations between productivity of CBM vertical wells and coal structure in En Cun Mine Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 508-512.

[16] TENG Juan, YAO Yanbin, LIU Dameng, et al. Evaluation of coal texture distributions in the southern Qinshui basin, North China: Investigation by a multiple geophysical logging method[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 140: 9-22.

[17] 许耀波,郭富强.软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用[J].煤炭学报,2019,44(4):1169-1177.

- XU Yaobo, GUO Shengqiang. Technology and application of staged fracturing in coalbed methane horizontal well of soft and hard coal composite coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1169-1177.
- [18] 王青川, 金国辉, 王琪. 浅析煤体结构对压裂的影响[J]. 中国煤层气, 2017, 14(5): 8-10.
- WANG Qingchuan, JIN Guohui, WANG Qi. Elementary analysis of the effect of coal structure on fracturing results[J]. China Coalbed Methane, 2017, 14(5): 8-10.
- [19] YANG Guoqiao, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Impacts of vertical variation of different coal texture types on coalbed methane production in Zaoyuan area of the Shizhuangnan Block, Southern Qinshui Basin, North China[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2017, 39(15): 1617-1624.
- [20] 单学军, 张士诚, 李安启, 等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130-132.
- SHAN Xuejun, ZHANG Shicheng, LI Anqi, et al. Analyzing the fracture extended law of hydraulic fracturing in coalbed gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130-132.
- [21] PENG Cheng, ZOU Changchun, ZHOU Tianning, et al. Factors affecting coalbed methane (CBM) well productivity in the Shizhuangnan block of southern Qinshui basin, North China: Investigation by geophysical log, experiment and production data[J]. Fuel, 2017, 191: 427-441.
- [22] 姜杉钰, 康永尚, 张守仁, 等. 沁水盆地柿庄区块煤层气井排采动态影响因素分析及开发对策研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 1134-1142.
- JIANG Shanyu, KANG Yongshang, ZHANG Shouren, et al. Analysis on influencing factors of drainage dynamic of wells and CBM development strategy in ShiZhuang block[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(6): 1134-1142.