

颜志丰, 琚宜文, 唐书恒等. 沁水盆地南部煤层气储层压裂过程数值模拟研究. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1734-1744, doi: 10.6038/cjg20130531.

Yan Z F, Ju Y W, Tang S H, et al. Numerical simulation study of fracturing process in coalbed methane reservoirs in southern Qinshui basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(5): 1734-1744, doi: 10.6038/cjg20130531.

沁水盆地南部煤层气储层压裂过程数值模拟研究

颜志丰^{1,2,3}, 琚宜文^{1*}, 唐书恒⁴, 侯泉林¹, 朱宝存⁵, 王国昌¹

1 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049

2 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221116

3 河北工程大学资源学院, 河北邯郸 056038

4 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

5 中煤地质工程总公司大地特勘分公司, 北京 100073

摘 要 储层改造是煤层气井提高产能的重要措施, 水力压裂是煤层气储层改造的重要方法. 为研究煤层气储层压裂过程及其天然裂缝对煤储层压裂时破裂压力的影响, 本文以山西沁水盆地南部高煤级煤矿区为研究区, 运用有限元数值模拟方法, 计算不同地应力条件下、裂缝处于不同位置时煤储层的破裂压力. 结果表明: (1) 不同类型地应力场对破裂压力的影响不同. 对于均匀应力场, 破裂压力随着围压的增大而增大, 其增幅约为围压的两倍; 对于非均匀应力场, 当一个水平主应力不变时, 破裂压力会随着水平主应力差的增加而减少; (2) 如果地应力条件不变, 煤储层破裂压力随着天然裂缝与最大水平主应力方向夹角的增加而增加, 水平主应力差越大煤储层破裂压力增幅也越大; (3) 在有天然裂隙的地层中进行压裂, 当天然裂缝的方位不同时压裂裂缝既可能是沿着天然裂缝扩展的裂缝, 也可能是压裂过程中产生的新裂缝, 因此天然裂缝的方位对破裂压力具有一定的影响.

关键词 煤层气开发, 煤储层, 压裂过程, 天然裂缝, 数值模拟

doi: 10.6038/cjg20130531

中图分类号 P631

收稿日期 2012-05-14, 2013-04-10 收修定稿

Numerical simulation study of fracturing process in coalbed methane reservoirs in southern Qinshui basin

YAN Zhi-Feng^{1,2,3}, JU Yi-Wen^{1*}, TANG Shu-Heng⁴, HOU Quan-Lin¹,
ZHU Bao-Cun⁵, WANG Guo-Chang¹

1 *Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2 *Key Laboratory of Coalbed Methane Resources & Reservoir Formation History, Ministry of Education, Xuzhou Jiangsu 221116, China*

3 *School of Resource Science, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China*

4 *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

5 *Beijing Dadi Specific Exploration Branch, China Coal Geological Engineering Corporation, Beijing 100073, China*

Abstract Reservoir reconstruction is a significant approach to enhance productivity of coalbed

基金项目 国家自然科学基金项目(41030422, 40972131); 国家重点基础研究发展规划(973)(2009CB219601); 国家科技重大专项课题(2011ZX05060-005; 2011ZX05039-004; 2009ZX05039-004); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05030100); 河北工程大学博士基金项目; 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室(中国矿业大学)开放基金资助项目(2012-002)以及中国博士后科学基金项目(2012M520438)资助.

作者简介 颜志丰, 男, 1969 年生, 博士后, 长期从事煤层气地质、构造地质和矿产地质勘查研究. E-mail: yzfyzr2008@126.com

*** 通讯作者** 琚宜文, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事盆地分析、能源地质和构造地质研究. E-mail: juyw03@163.com

methane (CBM) wells, and hydraulic fracturing is an important method to reconstruct CBM reservoirs. The primary objective of this study is to analyze the effects of fracturing process and the natural fractures in CBM reservoir on the fracture pressure. This article takes the high rank coal mining area in the south of the Qinshui basin in Shanxi province as the study area, using the finite element numerical simulation method to calculate the coal fracture pressure under different in-situ stress and different natural fracture position. The results indicate: (1) the different types of in-situ stress field show distinct mechanism in affecting fracture pressure. As for uniform stress field, the fracture pressure increases with the confining pressure, and the rate of increase is about twice of the confining pressure; To non-uniform stress field, when a horizontal principal stress is constant, the fracture pressure decreases with the increase of horizontal main stress difference; (2) If the in-situ stress remains invariant, the more the angle formed between the natural fracture and the direction of the maximum principal stress is, the higher the fracture pressure of CBM reservoirs is, and the greater horizontal principal stress difference implies a bigger increase amplitude of fracture pressure; (3) When formation fracturing in the stratum contained different natural fractures, the new fractures either extended along the pre-existing natural fractures or are formed in another different orientation, which indicates the effect of natural fracture orientation on fracture pressure.

Keywords Coalbed methane development, Coal reservoir, Fracturing process, Natural cracks, Numerical simulation

1 引言

水力压裂在测定深部地层原地应力^[1-2]、现代石油和天然气工业以及地热资源的开发等众多领域^[3-4]都有重要应用,并能带来较好的经济效益^[5-10],因此国内外对水力压裂技术和应用进行了多方面的研究,取得了不少研究成果,主要包括:天然裂缝的存在对压裂裂缝的延伸具有影响^[11-13];裂缝的起裂和延伸与地应力的大小及分布、岩石的组成及力学性质等有关^[14];射孔孔眼作为沟通井筒和地层的通道,压裂施工中的射孔参数对施工效果有较大的影响^[15-16];三向主应力的相对大小决定着裂缝扩展的方向,而且最小水平地应力的大小与分布影响到裂缝的几何形态^[17-18]。煤层气储层通常为低渗储层,水力压裂是提高煤储层煤层气生产井产能的重要措施^[19-21]。与砂岩相比,煤岩的抗拉强度、抗压强度和弹性模量都较低,而泊松比则较高,因此煤层气储层的压裂与含油气的致密性砂岩储层的压裂特征不同。美国和澳大利亚是煤层气勘探开发程度较高的国家,其煤层气储层主要为中低变质阶段的烟煤,且变形较弱。我国沁水盆地南部煤储层变质程度高,为高煤阶煤,内生裂隙不发育^[22];含煤地层为经历过多次构造活动的晚古生代地层,煤体结构遭到不同程度的破坏,发育一定程度的构造裂隙,因

而煤储层渗透率有所增加。这些特点决定了沁水盆地南部煤层气储层水力压裂的特征与美国和澳大利亚煤储层的压裂特征不同,因此需要针对高煤阶煤进行专门的研究。

数值模拟研究是现在科学研究中一种重要研究方法:杨仁虎等^[23]模拟研究了非均匀各向同性介质中的黏弹性波特征;许鹤华等^[24]对南海东部海盆扩张过程进行了数值模拟研究;王延欣等^[25]利用大地构造动力学数值模拟的方法研究了准噶尔盆地古生代末大地构造动力学;强祖基和谢富仁^[26]对临汾裂谷现代构造应力场特征进行了三维模拟研究;李刚等^[27]对水平井开采南海神狐海域天然气水合物进行了数值模拟研究;何丽娟等^[28]对南海北部神狐海域天然气水合物形成聚集特征进行了模拟研究。在煤层气开发中数值模拟也有较广泛的应用:肖晓春等^[29]进行了多井开采条件下煤层气渗流数值模拟研究;吴晓东等^[30]研究了煤层气储层含水率对煤层气渗流的影响;唐书恒、朱宝存等^[31-32]也用数值模拟方法研究了地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响等。尽管如此,沁水盆地南部煤层气储层压裂过程的数值模拟研究还不够,这也是提高煤储层产能以及煤层气采收率需要解决的关键问题。

本文以沁水盆地南部煤矿区为研究区,在分析煤储层岩石力学性质及裂隙系统的基础上,模拟沁水盆地南部煤层气储层压裂过程,研究不同地应力

条件和天然裂隙发育方位对高煤级煤储层压裂裂缝发育的控制机理,进而为煤层气储层水力压裂效果提供理论方法和实践指导,为提高煤层气开采效率和产量提供技术支持。

2 研究区地质背景和样品试验

2.1 研究区地质背景

沁水盆地位于东部渤海湾盆地与西部鄂尔多斯盆地之间地带,构成沁水盆地主体构造为一轴向 NNE 的沁水复向斜,其两翼不对称,西翼地层倾角相对稍陡,一般为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,东翼相对平缓,一般 10° 左右^[33]。沁水盆地复向斜的形成是受燕山运动早期挤压作用的影响,喜山运动形成了沁水盆地盆缘变形强烈、而盆内较简单的基本格局^[34]。

沁水盆地南部煤系地层主要为石炭-二叠纪地层。石炭系太原组地层由一套灰色中细粒砂岩、灰黑色粉砂岩、泥岩、石灰岩和煤层组成,具有明显的完整或不完整沉积旋回。地层厚度为 50~135 m,全区厚度分布东厚西薄,发育煤层 8~10 层,底部 15 号煤的厚度最大且稳定,为全区主要可采煤层。二叠系山西组与下伏太原组连续沉积,主要由砂岩、砂质泥岩、泥岩和煤层组成,属滨海三角洲相沉积。地层厚度为 20~86 m,全区变化规律明显,北厚南薄、东厚西薄。山西组含煤 1~4 层,其中主要煤层为 3 号煤,是沁水盆地南部的的主要可采煤层。

沁水盆地石炭-二叠系主要煤层的有效孔隙度变化在 1.15%~7.69% 间^[33],一般多在 5% 以下。煤孔隙的大小多参差不齐,不同煤化程度的煤,孔隙体积分布有差别,各种煤微孔都很发育。

由于沁水盆地南部具有煤层埋藏浅、厚度大、煤储层中煤层气含量高,且具有相对较高的渗透率等特点,因此沁水盆地南部成为我国煤层气产业优先发展的区域,在该区域已建成我国第一个煤层气产业示范工程,目前主采的煤层气储层为 3 号煤储层。

2.2 样品岩石力学试验

模拟研究煤储层压裂特征,需要获得一些参数,为此进行了抗拉强度试验、单轴压缩试验、三轴压缩试验等煤储层岩石力学实验。所有煤储层试验样品均采自山西沁水盆地南部的晋城煤业集团公司寺河煤矿 3 号煤,参照岩石力学实验规范规定,将抗拉强度试验用煤样加工成直径 50 mm,高 25~50 mm,将单轴和三轴压缩用煤试块加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱型标准试件,圆柱轴向均平行层面。

试验在北京科技大学土木工程实验室进行的,试验工作参照中华人民共和国行业标准《水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001)》^[35]进行,试验前对试件进行了饱水处理,以测试煤岩在饱和含水条件下的抗拉强度、单轴和三轴压缩条件下的强度特征。

煤岩抗拉强度实验、单轴压缩实验在 WEP-600 微机控制屏显万能试验机上进行,记录设备选用 30 t 压力传感器和 7V14 程序控制记录仪;三轴压缩试验在 TYS-500 型岩石三轴试验机上进行,记录设备选用 100 t 压力传感器和 7V14 程序控制记录仪。利用系统配备的计算机数据采集系统,记录加载过程中的荷载、位移、应力、应变等参数,由此计算煤岩的力学性质。

根据试验结果计算的煤岩力学参数为:弹性模量 7.51 GPa,泊松比 0.48,抗拉强度 1.19 MPa。

3 煤储层压裂过程及数值模拟方法

3.1 煤储层压裂过程

煤储层的水力压裂是在石油井水力压裂工艺基础上,结合煤储层抗拉强度、抗压强度和弹性模量等比砂岩低,而泊松比较高、裂隙发育等煤层自身特点加以改进之后实施的。水力压裂改造技术是开采煤层气的一种有效的增产方法,其方法是在煤储层压裂过程中利用地面水动力在井底形成高压,当井底压力超过煤储层抗压强度后,煤层破裂或裂缝张开:在纵向上,受煤储层顶底板围岩遮挡制约,裂缝被限制在一定范围内;在横向上,受煤储层结构影响,裂缝沿煤层主裂缝和次裂缝方向同时延伸。受煤储层地应力和天然裂缝发育条件影响,主裂缝沿主应力方向延伸较长,次裂缝也在一定范围内延伸。压裂最终结果:在有限范围的煤层内,压裂裂缝将煤储层原生和次生裂缝有效连通,在煤储层中形成大量大型裂缝和微裂缝,通过支撑裂缝和裂缝效应改善煤储层的渗流特性,从而提高煤储层的导流能力。

3.2 数值计算模型

数值计算模型假设:①煤岩材料为各向同性或横观各向同性的线弹性材料,其加载和卸载过程的力学行为符合线弹性理论;②岩层产状水平,水平方向无限延伸;③不考虑煤岩材料介质中渗流场、温度场与应力场的耦合效应;④井眼形状规则,为正圆形;⑤煤层气井以裸眼方式完井,煤层的井壁为自由边界。

计算模型采用二维平面模型,考虑到井筒处地

应力特征和边界效应,取模型尺寸为井筒半径(设井筒半径为 0.1 m)的 20 倍以上.采用直角坐标系,井筒中心为坐标原点,单位 m.作用于模型外边界上的最大水平主应力平行于 X 轴,最小水平主应力平行于 Y 轴;液压作用于孔眼内壁和天然裂缝处.

3.3 破裂压力的影响因素及模拟地应力的确定

在天然状态下煤储层具有割理、裂隙等天然裂缝,当对煤储层进行压裂时,促使裂缝张开的流体压力需要克服垂直于裂缝面的地应力.因此,地应力及各种天然裂缝都会影响煤储层的破裂压力.目前国内提出的破裂压力预测方法较多,如 Eaton 法、Stephen 法、Anderson 法、黄荣樽法等^[36].本文以沁水盆地南部煤矿区为研究对象,以 ANSYS 有限元数值模拟软件为平台,运用有限元模拟方法研究压裂裂缝的形成和扩展受天然裂缝的影响.

许多研究者已作过沁水盆地南部的地应力研究,倪小明等^[37]利用水压致裂法计算得到 25 个晋城矿区西部地应力结果,其结果为:最小水平主应力为 2.07~11.60 MPa,平均 7.48 MPa,最大水平主应力为 4.50~17.93 MPa,平均 9.92 MPa.当埋深

较浅时,最大水平主应力和最小水平主应力往往相差较大,而当地层埋深大于 650 m 时,孟召平等^[38]研究认为各向地应力近似相等.张晓^[39]利用小口径水压致裂地应力测量技术测得了 18 个晋城矿区地应力资料.刘洪林等^[40]统计了沁水盆地南部地区的注入/压降试井测试地应力资料.张培河^[41]、康红普等^[42]也研究了沁水盆地南部的地应力.

参考以上资料,本文采用沁水盆地南部地应力数据(表 1).本文模拟研究所采用的地应力条件共 33 种,具体地应力条件见表 2.

表 1 沁水盆地南部地应力统计表

Table 1 Stress statistical table in Southern Qinshui basin

	σ_v /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa	σ_k
最小值	4.25	4.50	2.07	0.00	0.000
最大值	6.09	17.93	11.60	9.59	1.609
平均值	5.22	9.92	7.48	3.77	0.564
采用最小值	4	4	2	0	0
采用最大值	10	20	15	10	4

表 2 没有天然裂缝时的煤岩破裂压力

Table 2 The fracture pressure of coal in no natural cracks

地应力条件	σ_H /MPa	σ_h /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa	σ_k	P_f /MPa	地应力条件	σ_H /MPa	σ_h /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa	σ_k	P_f /MPa
1	2	2	0	0.00	5.14643	18	18	10	8	0.80	13.11613
2	5	2	3	1.50	2.14793	19	20	10	10	1.00	11.11703
3	5	4	1	0.25	8.13863	20	15	5	10	2.00	1.13524
4	5	5	0	0.00	11.13233	21	15	7	8	1.14	7.12893
5	6	5	1	0.20	10.13443	22	15	9	6	0.67	13.11913
6	8	5	3	0.60	8.13523	23	15	11	4	0.36	19.11013
7	10	5	5	1.00	6.13613	24	15	13	2	0.15	25.10113
8	12	5	7	1.40	4.13693	25	15	15	0	0.00	31.08566
9	14	5	9	1.80	2.13773	26	17	15	2	0.13	29.09213
10	10	2	8	4.00	-2.84997	27	19	15	4	0.27	27.09313
11	10	4	6	1.50	3.14073	28	20	15	5	0.33	26.09413
12	10	6	4	0.67	9.13143	29	20	12	8	0.67	17.10813
13	10	8	2	0.25	15.12213	30	20	14	6	0.43	23.09813
14	10	10	0	0.00	21.10866	31	20	16	4	0.25	29.08913
15	12	10	2	0.20	19.11413	32	20	18	2	0.11	35.08101
16	14	10	4	0.40	17.11413	33	20	20	0	0.00	41.06166
17	16	10	6	0.60	15.11513						

3.4 破裂压力的求解方法

Hossain 等^[43]证实,基于最大拉应力准则所预测的地层破裂压力比其它任何破裂准则都更精确.

因此,采用最大拉应力准则,即当岩石中存在的拉伸应力达到或大于其抗拉强度时,岩石材料将产生初始断裂,形成初始裂缝.有限元模拟表明,孔周水压

与产生的最大周向拉应力之间存在很好的线性关系^[32].通过有限元求解数据得出最大周向拉应力与孔压间的回归方程,使最大周向拉应力等于煤岩抗拉强度,得到的孔压即为一定地应力条件下的煤储层破裂压力.

4 模拟计算结果及分析

4.1 不含裂缝时的破裂压力特征

根据 33 个地应力条件(见表 2),采用试验得到的煤岩力学参数,在孔缘施加工作压力,对不含裂缝的情况进行了模拟计算,得到最大拉应力与孔压的关系,然后代入煤的抗拉强度,得到没有裂缝时的煤岩破裂压力 P_f 结果见表 2.为了便于研究,对地应力条件进行了分类:(a)假设地应力是均匀的,即最大主应力和最小主应力相等($\sigma_H = \sigma_h$);(b)在非均匀地应力场中最大主应力 σ_H 不变而最小主应力 σ_h 变化;(c)在非均匀地应力场中最小主应力 σ_h 不变而最大主应力 σ_H 变化.下面分别讨论这三种情况下的破裂压力.

4.1.1 均匀地应力场条件下的破裂压力

当地应力为均匀应力场,即 $\sigma_H = \sigma_h$ 时,在不同围压下的破裂压力呈线性关系(见图 1),其相关系数为 $r=1$.其方程为 $y=1.9953x+1.1558$.破裂压力随着围压的增大而增大,其增幅约为围压的两倍.

4.1.2 非均匀地应力场中最大主应力不变而最小主应力变化时的破裂压力

对于非均匀地应力场最大主应力 σ_H 不变而最小主应力 σ_h 变化、取最大地应力 σ_H 分别为 10 MPa、15 和 20 MPa 分三组进行研究.图 2 为三组最大水平主应力 σ_H 不变,而最小水平主应力 σ_h 变化的关系图,其应力关系为:

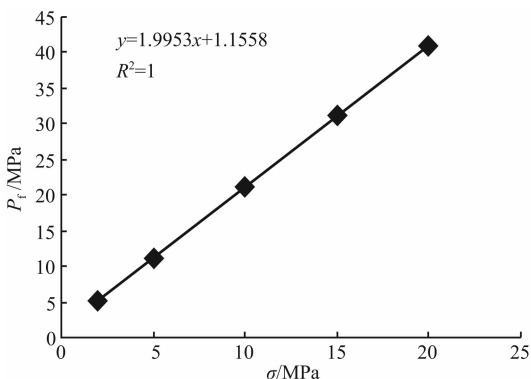


图 1 均匀地应力场中 $\sigma-P_f$ 的关系

Fig. 1 The relationship of $\sigma-P_f$ in the uniform stress field

第一组: $\sigma_H=10$ MPa; $\sigma_h=2,4,5,6,8,10$ MPa; 其方程为 $y=2.9949x-8.8389$;

第二组: $\sigma_H=15$ MPa; $\sigma_h=5,7,9,11,13$ MPa, 15 MPa;其方程为 $y=2.9951x-13.838$;

第三组: $\sigma_H=20$ MPa; $\sigma_h=10,12,14,15$ MPa, 16,18,20 MPa;其方程为 $y=2.9948x-18.829$.

由图 2 可知当最大主应力 σ_H 不变而最小主应力 σ_h 变化时,破裂压力随着最小主应力 σ_h 的增加而呈线性增加,其增幅约为最小主应力 σ_h 增幅的三倍.由于常数项为负值,当最小主应力 σ_h 变得较小而使应力系数大于 2.0~2.4 时计算出的破裂压力将出现由正值向负值转变的情况,即不需要施加液压在孔壁处也会产生裂缝.朱宝存等^[32]经计算得出当最小主应力 $\sigma_h < (\sigma_H + T)/3$ 时不需要施加液压,在孔壁处也会产生裂缝.

4.1.3 非均匀地应力场中最小主应力不变而最大主应力变化时的破裂压力

对于非均匀地应力场最小主应力 σ_h 不变而最大主应力 σ_H 变化、取最小地应力 σ_h 分别为 5、10 和 15 MPa 分三组进行研究.图 3 为三组最小水平主应力 σ_h 不变,而最大水平主应力 σ_H 变化的关系图,其

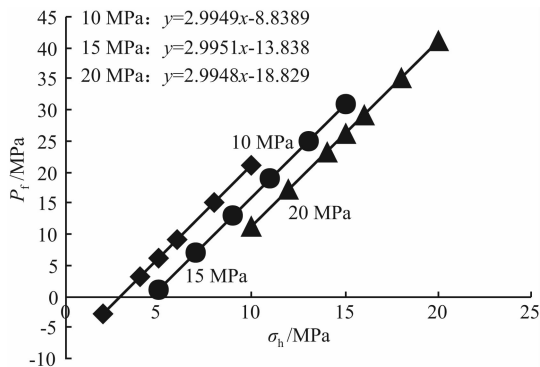


图 2 σ_H 不变时 σ_h-P_f 的关系

Fig. 2 The relationship of σ_h-P_f under the σ_H constant

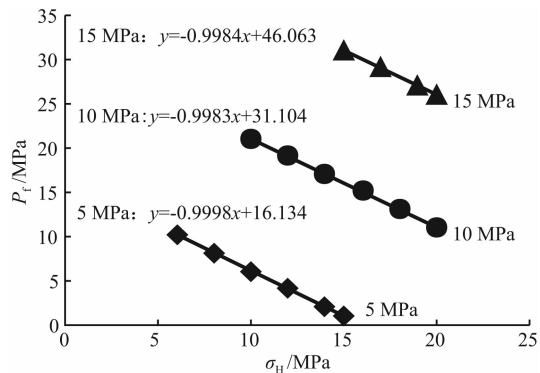


图 3 σ_h 不变时 σ_H-P_f 的关系

Fig. 3 The relationship of σ_H-P_f under the σ_h constant

应力关系为:

第一组: $\sigma_h = 5 \text{ MPa}$; $\sigma_H = 6, 8, 10, 12, 14 \text{ MPa}$,
15 MPa; 其方程为 $y = -0.9998x + 16.134$;

第二组: $\sigma_h = 10 \text{ MPa}$; $\sigma_H = 10, 12, 14, 16 \text{ MPa}$,
18, 20 MPa; 其方程为 $y = -0.9993x + 31.104$;

第三组: $\sigma_h = 15 \text{ MPa}$; $\sigma_H = 15, 17, 19, 20 \text{ MPa}$;
其方程为 $y = -0.9984x + 46.063$.

由图 3 可知当最小主应力 σ_h 不变而最大主应力 σ_H 变化时, 破裂压力随着最大主应力 σ_H 的增加而呈线性减少, 其相关系数均为 -1 , 其降幅约等于最大主应力 σ_H 的增幅. 由于系数为负值, 当最大主应力 σ_H 变得很大而使应力系数大于 $2.0 \sim 2.4$ 时计算出来的破裂压力将出现由正值向负值转变的情况.

4.2 天然裂缝对破裂压力的影响

为研究地应力场中天然裂缝与最大水平主应力 σ_H 方向的夹角对破裂压力的影响, 设计如下:

1. 实体模型: 设计 33 种地应力环境, 每种地应力环境建天然裂缝和水平最大主应力 σ_H 方向的夹角为 $5^\circ \sim 85^\circ$ 、间隔为 5° , 计 17 个模型, 33 种地应力环境下的总模型数为 561 个.

2. 采用试验得到的煤岩力学参数, 在孔缘施加工作压力, 计算求解, 得到最大拉应力与孔压的关系, 然后代入煤的抗拉强度, 从而求出煤层压裂时的破裂压力. 计算结果见表 3.

4.2.1 地应力条件不变时的破裂特征

当地应力条件不变, 天然裂缝与最大水平主应力 σ_H 方向的夹角 θ 由小变大时, 煤储层的破裂压力 P_x 总体上由小变大(见图 4, 5). 当应力系数 $\sigma_k < 1$ 时, θ - P_x 曲线随着应力的增大而增大; 当应力系数 $\sigma_k > 1$ 且角度小于 25° 时, 将会出现煤岩的破裂压力 P_x 随着角度的增大而呈略微减小的现象, 且破裂压力可能会小于最小水平主应力; 当 $\theta > 35^\circ$ 时, 随着角度的增加破裂压力 P_x 呈现近似均匀增加的情况, 其增加的幅度受控于应力差, 且增幅随着应力差的增加而增加. 其最大值和最小值的差值决定于主应力差, 主应力差越大其差值越大; 主应力差为零时, 其破裂压力在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 时值最大, 但最大值和最小值的差值极小, 小于 1% (在围压为 10, 15, 20 MPa 时差值分别为 0.011, 0.016 和 0.020 MPa), 其 θ - P_x 曲线呈现近直线状态(见图 4c 条件 25, $\sigma_H = \sigma_h = 15 \text{ MPa}$; 图 5a 条件 14, $\sigma_H = \sigma_h = 10 \text{ MPa}$, 图 5c 条件 33, $\sigma_H = \sigma_h = 20 \text{ MPa}$).

4.2.2 地应力条件变化而角度不变

如果地应力条件变化而角度不变, 当 $\theta < 25^\circ$ 时

P_x 主要受控于最小主应力, P_x 的大小主要由最小主应力决定, 同时也受应力系数的影响.

如果固定最小水平主应力, 让最大水平主应力逐步增加(图 4), 则夹角小于 25° 时 P_x 随着最大主应力的增加而降低, 但降幅很小. 在 $30^\circ \sim 35^\circ$ 之间破裂压力趋向相同, 接近最小主应力. 如果夹角大于 35° , 破裂压力 P_x 随着最大主应力 σ_H 的增加而增加, 增幅随着主应力差的增大而增大, 当达到 80° 时 P_x 主要由最大主应力 σ_H 控制, 破裂压力接近最大主应力, 受其它条件影响较小.

如果固定最大水平地应力, 让最小水平地应力逐步增加(图 5), 当 $\theta < 25^\circ$ 时破裂压力 P_x 变化和应力系数有关, 当应力系数大于 1 时 P_x 随着最小主应力的增加而降低, 但降低幅度很小, 其值接近于最小主应力. 当 $\theta > 30^\circ$ 时破裂压力 P_x 随着最小主应力的增加而增加, 不同最小主应力条件下破裂压力 P_x 差值受控于主应力差, 主应力差越大差值越大. 不同最小主应力条件下破裂压力 P_x 的差值随着 θ 的变大而变小, 当 θ 接近 80° 时, 不同最小主应力之间的破裂压力 P_x 趋向相同, 接近最大主应力. 当角度大于 80° 时破裂压力 P_x 值随着最小主应力的增加而变小, 但不同应力条件下 P_x 差值很小.

4.3 压裂裂缝的启裂方位

4.3.1 含裂缝时破裂压力与不含裂缝时破裂压力的比较

研究表达地应力特征的四个参数, 发现破裂压力与应力系数 σ_k 关系最为密切, 图 7 为不含裂缝时破裂压力 P_f 与含裂缝时同一地应力条件不同角度下的最大破裂压力 $\text{MAX } P_x$ 之差 ($P_f - \text{MAX } P_x$) 与应力系数 σ_k 的散点图, 由图 6 可知当应力系数 $\sigma_k > 0.5$ 时 $\text{MAX } P_x$ 要比 P_f 大, 而当应力系数 $\sigma_k < 0.5$ 时 $\text{MAX } P_x$ 要比 P_f 小.

图 7 为含裂缝时不同角度下的最小破裂压力 $\text{MIN } P_x$ 与不含裂缝时同一地应力条件下的破裂压力 P_f 之差 ($\text{MIN } P_x - P_f$) 与应力系数 σ_k 的关系图, 由图 7 可知当 $\sigma_k < 1.3$ 时其差值小于 0, 当 $\sigma_k > 1.3$ 时差值一般大于 0, 即 P_f 要小于 $\text{MIN } P_x - P_f$.

当应力系数 σ_k 位于 $0.5 \sim 1.3$ 之间时, 不含裂缝的破裂压力 P_f 位于含有裂缝时不同角度下破裂压力最大值 $\text{MAX } P_x$ 与最小值 $\text{MIN } P_x$ 之间.

4.3.2 压裂裂缝启裂方位

若存在天然裂缝, 压裂时在井壁处和天然裂缝尖端都可以产生拉应力. 井壁处的最大拉应力方向与最小水平主应力方向平行, 缝端的最大水平拉应

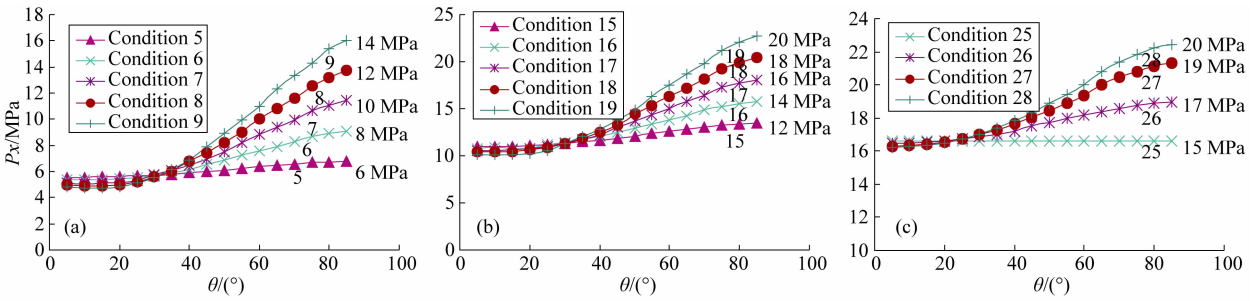


图 4 σ_h 不变时煤储层 θ - P_x 关系图

(a) $\sigma_h=5$ MPa; (b) $\sigma_h=10$ MPa; (c) $\sigma_h=15$ MPa.

Fig. 4 The coal reservoir θ - P_x diagram when σ_h is constant

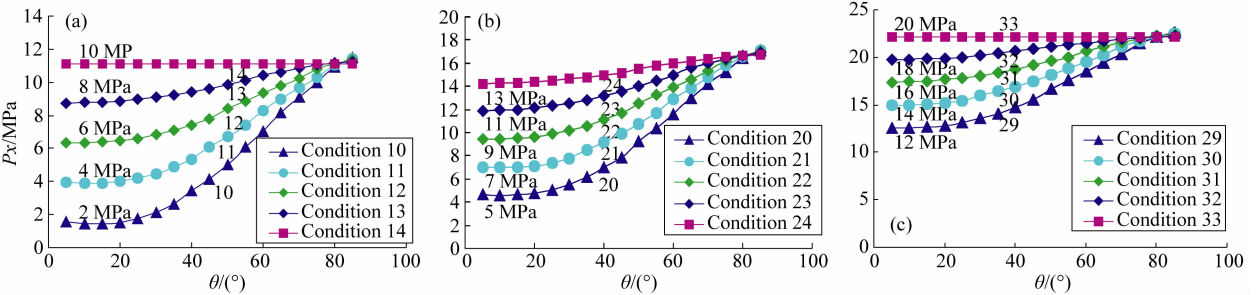


图 5 σ_H 不变时煤储层 θ - P_x 关系图

(a) $\sigma_H=10$ MPa; (b) $\sigma_H=15$ MPa; (c) $\sigma_H=20$ MPa.

Fig. 5 The relationship of θ - P_x on the coal reservoir under σ_H constant

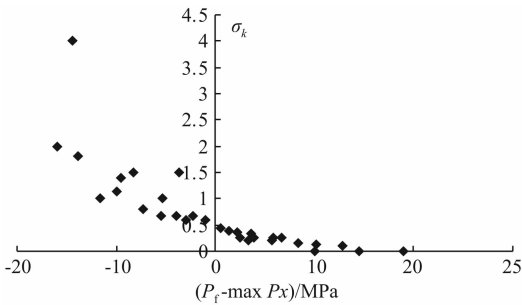


图 6 P_f -MAX P_x 和 σ_k 关系图

Fig. 6 The relationship of P_f -MAX P_x and σ_k

夹角,最大、最小水平主应力的大小、压裂时的最高工作压力等因素有关.

井壁处最大拉应力的大小主要受应力集中的控制,缝端的最大拉应力大小主要受垂直天然裂缝的正应力影响.可以通过比较相同地应力场条件下有天然裂缝和没有天然裂缝时的破裂压力的大小,来判断是否产生新缝.

如果有天然裂缝存在时,在压裂施工中是沿天然裂缝继续扩展,还是产生新缝,则讨论如下:

(1)当应力系数 $\sigma_k < 0.5$ 时,由于含有裂缝时的最大破裂压力 MAX P_x 要小于没有裂缝时的破裂压力 P_f ,因此在施工中首先沿天然裂缝继续扩展;

(2)当应力系数 $\sigma_k > 1.3$ 时,由于含有裂缝时最小破裂压力 MIN P_x 大于没有裂缝时的破裂压力 P_f ,因此在施工中首先产生新的裂缝;

(3)当应力系数 σ_k 介于 $0.5 \sim 1.3$ 时,由于没有裂缝时的破裂压力 P_f 介于含有裂缝时破裂压力最大值与最小值之间,若:① 若 $P_f < P_x$ 时,没有裂缝时的破裂压力小于含有裂缝时的破裂压力.当工作压力 $P_0 < P_f$ 时,井壁处不会产生新缝,也不会沿天然裂缝扩展;当 $P_f < P_0 < P_x$ 时,在井壁处产生新缝,但不会沿天然裂缝扩展;当 $P_0 > P_x$ 时,产生新

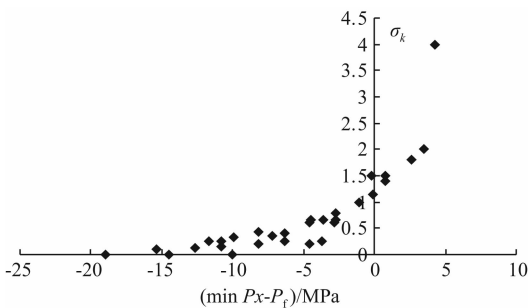


图 7 MIN P_x - P_f 和 σ_k 关系图

Fig. 7 The relationship of MIN P_x - P_f and σ_k

力基本与裂缝垂直.压裂裂缝是沿天然裂缝继续扩展,还是产生新缝,和天然裂缝与最大水平主应力的

缝的同时,压裂液也会沿天然裂缝推进;②若 $P_f > P_x$ 时,没有裂缝时的破裂压力大于含有裂缝时的破裂压力,当工作压力 $P_0 < P_x$ 时,井壁处不会产生新缝,也不会沿天然裂缝扩展;当 $P_x < P_0 < P_f$ 时,将沿天然裂缝扩展,但不会在井壁处产生新缝;当 $P_0 > P_f$ 时,压裂液沿天然裂缝推进的同时,也会产生新的裂缝。

4.4 计算结果及其分析

要使模拟计算研究具有应用意义,就必须对所建立模型的计算压裂效果和实际压裂效果与前人的研究结果进行对比,如果结论相符,既是对本文所得结果的有效验证,也为进一步的研究工作提供合理的依据。

4.4.1 地应力大小对破裂压力的影响

地应力对水力压裂影响的研究结果^[44-46]表明,压裂施工处最小主应力越大破裂压力也越大。关于最小主应力对破裂压力的影响研究的人较多,然而最大主应力对破裂压力的影响,却很少有人进行研究,本文研究弥补了这方面的不足。

4.4.2 裂缝方位对破裂压力的影响

与不含天然裂缝时的破裂压力相比,当天然裂缝方位与最大水平主应力方向之间的夹角小于 25° 时,应力系数越小,破裂压力差就越大,有天然裂缝时破裂压力就越小,因此对于没有天然裂缝的地层,如果增加人工裂缝就可以显著降低地层的破裂压力。对煤系地层压裂时进行水力射孔来降低破裂压力是压裂施工中经常采取的措施,许多研究者^[44-47]认为射孔可以控制裂缝的起裂,降低地层破裂压力,在沿着最大水平地应力方向射孔(θ 为 0°),地层的破裂压力最低。李根生等^[44]认为地层破裂压力随着射孔方位角(θ)的增加而增加,并认为要有效降低破裂压力,射孔方位角要小于 30° 。射孔破坏了地层的原始状态,使井壁表面结构遭到破坏,相当于在地层中增加了人工裂缝,因此射孔可以有效降低破裂压力,这与本文研究结果基本符合。

5 结论

本文以我国沁水盆地南部高煤级煤矿区为研究区,在建立煤储层压裂理论模型基础上,以煤储层力学性质测试结果为模拟参数,通过煤储层压裂过程 ANSYS 有限元模拟计算,获得如下结论:

(1)地应力对破裂压力的影响:①当地应力为均匀应力场时,在不同围压下的破裂压力与围压呈线

性关系,破裂压力的增幅约为围压增幅的两倍;②在非均匀地应力场中,当最大主应力不变而最小主应力变化时,破裂压力随着最小主应力的增加而呈线性增加,其增幅约为最小主应力增幅的三倍;当最小主应力不变而最大主应力变化时,破裂压力随着最大主应力的增加而呈线性减少,其降幅约等于最大主应力的增幅。

(2)天然裂缝对破裂压力的影响:①在均匀地应力场中破裂压力几乎不受裂缝方向与最大主应力方向夹角的影响,仅受地应力大小的影响;②在非均匀地应力场中当地应力不变时破裂压力随着裂缝方向与最大主应力方向夹角的变化而变化。

(3)在有天然裂隙的地层中进行压裂,如果最大主应力和最小主应力比值很小,压裂裂缝将沿着天然裂缝扩展,如果比值很大则产生新的裂缝。

致谢 在样品采集过程中得到了沁水蓝焰煤层气有限责任公司李国富高级工程师、中国煤炭地质总局第一勘探局高级工程师高利民的大力帮助,在样品加工过程中得到了中煤水文一队实验室主任徐印虎的帮助,在试验过程中得到了北京科技大学土木工程实验室的帮助,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] Wolff R G, Bredehoeft J D, Keys W S, et al. Stress determination by hydraulic fracturing subsurface waste injection. *Journal of American Water Works Association*, 1975, 67(9): 519-523.
- [2] Abou-Sayed A S, Brechtel C E, Clifton R J. In-situ stress determination by hydrofracturing: A fracture mechanics approach. *Journal of Geophysics Research*, 1978, 83(B6): 2851-2862.
- [3] Shyapobersky J, Chudnovsky A, Chudnovsky A, et al. Review of recent developments in fracture mechanics with petroleum engineering applications. American: SPE/ISRM, 28074, 1994.
- [4] Valko P, Economides M J. *Hydraulic Fracture Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [5] Gidley J L, Holditch S A, Nierode D E, et al. Recent advances in hydraulic fracturing. In: SPE Monograph. 1989, 12.
- [6] Economides M J, Nolte K G. *Reservoir Stimulation*. 3rd ed. Old Tappan, NJ: Prentice Hall Inc, 2002: 1-7.
- [7] Jarvie D. Evaluation of Hydrocarbon Generation and Storage in the Barnett Shale, Ft. Worth Basin, Texas. Texas: Humble Geochemical Services, 2004.
- [8] Gidley J L, Holditch S A, Nierode D E, et al. Recent Advances in Hydraulic Fracturing. SPE Monograph, 1989
- [9] 郎兆新, 张丽华, 程林松. 压裂水平井产能研究. 石油大学

- 学报(自然科学版), 1994, 18(2): 43-46.
- Lang Z X, Zhang L H, Cheng L S. Investigation on pkductivity of fractured horizontal well. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 1994, 18(2): 43-46.
- [10] 唐颖, 唐, 王广源等. 页岩气开发水力压裂技术综述. 地质通报, 2011, 30(2): 393-399.
- Tang Y, Tang X, Wang G Y, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2011, 30(2): 393-399.
- [11] Papadopoulos J M, Narendran V M, Cleary M P. Laboratory simulations of hydraulic fracturing. SPE/DOE 11618, 1983.
- [12] Daneshy A A. Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness. SPE 4852, 1974.
- [13] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 868-872.
- Chen M, Pang F, Jin Y. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2000, 19(S1): 868-872.
- [14] Daneshy A A. A study of inclined hydraulic fractures. *Soc. Pet. Eng. J.*, 1973, 13(2): 61-68.
- [15] Daneshy A A. Experimental investigation of hydraulic fracturing through perforations. SPE 4333, 1973.
- [16] 李海涛, 王永清, 李洪建等. 压裂施工井的射孔优化设计方法. 天然气工业, 1998, 18(2): 53-56, 67.
- Li H T, Wang Y Q, Li H J, et al. An optimum perforation design method for prefracturing wells. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 1998, 18(2): 53-56, 67.
- [17] 阳友奎, 肖长富, 吴刚等. 不同地应力状态下水力压裂的破裂模式. 重庆大学学报, 1993, (3): 35-40.
- Yang Y K, Xiao C F, Wu G, et al. Hydrofracturing breakdown modes under different In-situ stress states. *Journal of Chongqing University* (in Chinese), 1993, (3): 35-40.
- [18] Papanastasiou P, Zervos A. Three-dimensional stress analysis of a wellbore with perforation and a fracture. SPE 47378, 1998.
- [19] Zebrowitz M, Thomas B D. Coalbed stimulation are optimized in Alabama Basin. *Oil & Gas J.*, 1989, 87(4): 61-72.
- [20] 徐刚, 彭苏萍, 邓绪彪. 煤层气井水力压裂压力曲线分析模型及应用. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 173-178.
- Xu G, Peng S P, Deng X B. Hydraulic fracturing pressure curve analysis and its application to coalbed methane wells. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 2011, 40(2): 173-178.
- [21] 冯晴, 吴财芳, 雷波. 沁水盆地煤岩力学特征及其压裂裂缝的控制. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 100-103.
- Feng Q, Wu C F, Lei B. Coal /Rock mechanics features of Qinshui basin and fracturing crack control. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 2011, 39(3): 100-103.
- [22] 据宜文, 卫明明, 薛传东. 华北盆地演化对深部煤与煤层气赋存的制约. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 390-398.
- Ju Y W, Wei M M, Xue C D. Control of basin-mountain evolution on the occurrence of deep coal and coalbed methane in North China. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 2011, 40(3): 390-398.
- [23] 杨仁虎, 常旭, 刘伊克. 基于非均匀各向同性介质的黏弹性波正演数值模拟. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2321-2327.
- Yang R H, Chang X, Liu Y K. Viscoelastic wave modeling in heterogeneous and isotropic media. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2009, 52(9): 2321-2327.
- [24] 许鹤华, 马辉, 宋海斌等. 南海东部海盆扩张过程的数值模拟. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3070-3078.
- Xu H H, Ma H, Song H B, et al. Numerical simulation of Eastern South China Sea basin expansion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(12): 3070-3078.
- [25] 王延欣, 侯贵廷, 刘世良等. 准噶尔盆地古生代末大地构造动力学数值模拟. 地球物理学报, 2011, 54(2): 441-448.
- Wang Y X, Hou G T, Liu S L, et al. Numerical simulation of tectonic Dynamics of the Junggar basin at the end of Paleozoic. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 441-448.
- [26] 强祖基, 谢富仁. 临汾裂谷现代构造应力场特征及其数值模拟. 地球物理学报, 1988, 31(5): 556-565.
- Qiang Z J, Xie F R. On the recent Tectonic Stress-field and mathematical modelling of Linfen rift valley. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1988, 31(5): 556-565.
- [27] 李刚, 李小森, Zhang Keni 等. 水平井开采南海神狐海域天然气水合物数值模拟. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2325-2337.
- Li G, Li X S, Zhang K, et al. Numerical simulation of gas production from hydrate accumulations using a single horizontal well in Shenhu Area, South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(9): 2325-2337.
- [28] 何丽娟, 雷兴林, 张毅. 南海北部神狐海域天然气水合物形成聚集的数值模拟研究. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1285-1295.
- He L J, Lei X L, Zhang Y. Numerical modeling of gas hydrate accumulation in the marine sediments of Shenhu Area, Northern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(5): 1285-1295.
- [29] 肖晓春, 潘一山. 多井开采条件下煤层气渗流数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 977-981.
- Xiao X C, Pan Y S. Numerical simulation of coalbed methane seepage flow under multi-well exploitation conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2007, 26(5): 977-981.
- [30] 吴晓东, 张迎春, 李安启. 煤层气单井开采数值模拟的研究. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(2): 47-49.
- Wu X D, Zhang Y C, Li A Q. Numerical simulation for coalbed methane production. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 2000, 24(2): 47-49.

- [31] 唐书恒, 颜志丰, 朱宝存等. 饱含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征. 煤炭学报, 2010, 35(1): 37-41.
Tang S H, Yan Z F, Zhu B C, et al. Acoustic emission characteristics of water-saturated coals in uniaxial compression experiment. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2010, 35(1): 37-41.
- [32] 朱宝存, 唐书恒, 颜志丰等. 地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1199-1202.
Zhu B C, Tang S H, Yan Z F, et al. Effects of crustal stresses and natural fractures on fracture pressure of coal reservoirs. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2009, 34(9): 1199-1202.
- [33] 冀涛, 杨德义. 沁水盆地煤与煤层气地质条件. 中国煤田地质, 2007, 19(5): 28-30, 61.
Ji T, Yang D Y. Geological condition evaluation of CBM in Qinshui basin. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2007, 19(5): 28-30, 61.
- [34] 据宜文, 卫明明, 侯泉林等. 华北含煤盆地构造分异与深部煤炭资源就位模式. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1051-1055.
Ju Y W, Wei M M, Hou Q L, et al. The tectonic differentiation of the coal basins and the emplacement models of the deep coal in North China. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2010, 35(9): 1051-1055.
- [35] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001). 北京: 地质出版社, 2001.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering (SL264-2001). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese), 2001.
- [36] 邓金根, 张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Deng J G, Zhang H S. Mechanical Mechanism of Borehole Instability in Drilling Engineering. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese), 1998.
- [37] 倪小明, 王延斌, 接铭训等. 不同构造部位地应力对压裂裂缝形态的控制. 煤炭学报, 2008, 33(5): 505-508.
Ni X M, Wang Y B, Jie M X, et al. Stress's Influence in Different Tectonic Positions on Fracturing Interstitial Morphology. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2008, 33(5): 505-508.
- [38] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义. 煤炭学报, 2010, 35(6): 975-981.
Meng Z P, Tian Y D, Li G F. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2010, 35(6): 975-981.
- [39] 张晓. 小孔径水压致裂地应力测量技术研究及现场应用. 北京: 煤炭科学研究总院, 2004.
Zhang X. Study on Hydraulic Fracturing In-Situ Stress Measurement Techniques in Small Holes and Field Application (in Chinese). Beijing: Coal Science Research Institute, 2004.
- [40] 刘洪林, 王勃, 王烽等. 沁水盆地南部地应力特征及高产区带预测. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 885-890.
Liu H L, Wang B, Wang F, et al. Ground stress characteristics and prediction of high productivity zones in south of Qinshui basin. *Natural Gas Geosciences* (in Chinese), 2007, 18(6): 885-890.
- [41] 张培河. 沁水煤田煤储层压力分布特征及影响因素分析. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 31-32.
Zhang P H. Characters of distribution and influencing factors about the reservoir pressure in Qinshui Coalfield. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2002, 30(6): 31-32.
- [42] 康红普, 林健, 颜立新等. 山西煤矿矿区井下地应力场分布特征研究. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1782-1792.
Kang H P, Lin J, Yan L X, et al. Study on characteristics of underground in-situ stress distribution in Shanxi coal mining fields. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7): 1782-1792.
- [43] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. Hydraulic fracture initiation and propagation; roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, 27(3-4): 129-149.
- [44] 李根生, 刘丽, 黄中伟等. 水力射孔对地层破裂压力的影响研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 42-45.
Li G S, Liu L, Huang Z W, et al. Study of effect of hydraulic perforating on formation fracturing pressure. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 2006, 30(5): 42-45.
- [45] 张毅, 李根生, 熊伟等. 高压水射流深穿透射孔增产机理研究. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 38-41.
Zhang Y, Li G S, Xiong W, et al. Stimulation mechanism of oil well using high pressure water jet deep penetrating perforation technique. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 2004, 28(2): 38-41.
- [46] East L, Willet R, Surjaatmadja J, et al. Application of new fracturing technique improves stimulationsuccess for openhole horizontal completions. SPE86480, 2004.
- [47] 康园园, 邵先杰, 王彩凤. 高-中煤阶煤层气井生产特征及影响因素分析——以樊庄、韩城矿区为例. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 728-732.
Kang Y Y, Shao X J, Wang C F. Production characteristics and affecting factors of high-mid rank coalbed methane wells: Taking Fanzhuang and Hancheng mining areas as examples. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2012, 39(6): 728-732.