煤储层水力压裂破裂压力影响因素数值模拟研究

黄赛鹏[1,2],姚艳斌[1,2],崔金榜[3,4],喻 鹏[3,4],汤继丹[3,4],孙泽良[3,4],李俊乾[1,2]
(1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 非常规天然气地质评价及开发工程 北京市重点实验室,北京 100083;
3. 中国石油 华北油田分公司,河北 任丘 062552; 4. 中国石油天然气集团公司 煤层气开采先导试验基地,河北 任丘 062552)

摘 要: 为提高煤层气井的压裂效率,通过利用 ANSYS 有限元软件,模拟了煤层气井压裂过程中的降低煤层破裂压力的各种途径和方法,研究建立了套管射孔完井的应力计算模型,并计算了模拟煤岩破裂压力,分析了射孔长度、孔径、煤岩的泊松比与杨氏模量、地层深度等对煤岩破裂压力的影响。模拟结果表明,当射孔长度和射孔孔径分别控制在 1 m 左右和 15 mm 左右的情况下,有利于降低煤岩的破裂压力; 较低的煤岩泊松比在一定程度上有利于减小破裂压力; 煤岩杨氏模量对破裂压力的影响不大; 而煤层的深度越大,其破裂压力受水平主应力差的影响越小。

关键词: ANSYS 数值模拟; 水力压裂; 破裂压力; 水平主应力
中图分类号: TD712; TE371 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253 - 2336(2015)04 - 0123 - 04

Numerical simulation study on influence factors of hydraulic fracturing pressure in coal reservoir

HUANG Sai - peng[1,2], YAO Yan - bin[1,2], CUI Jin - bang[3,4], YU Peng[3,4], TANG Ji - dan[3,4], SUN Ze - liang[3,4], LI Jun - qian[1,2]
(1. *School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *Beijing Key Lab of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China*; 3. *Huabei Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Renqiu 062552, China*; 4. *Coalbed Methane Pilot Test Base, China National Petroleum Corporation, Renqiu 062552, China*)

Abstract: In order to improve the fracturing efficiency of the coalbed methane well, an ANSYS finite element software was applied to simulate the different path and method to reduce the seam fracturing pressure during the coalbed methane well fracturing process. A stress calculation model of the perforation completion was researched and established. Thus a simulated coal/rock fracturing pressure was calculated and the perforation borehole length, diameter, coal/rock Poisson's Ratio and Young's Modulus, strata depth and others affected to the coal/rock fracturing pressure were analyzed. The simulation results showed that when the perforation borehole length and diameter were individually controlled about 1 m and 15 mm, the coal/rock fracturing pressure would be favorably reduced. A low coal/rock Poisson's ratio would be favorable to reduce the fracturing pressure in a certain degree. The coal/rock Young's Modulus would not have high influence to fracturing pressure. While more deep depth of seam, the fracturing pressure would have a less influence by horizontal main stress difference.

Key words: ANSYSnumerical simulation; hydraulic fracturing; fracturing pressure; horizontal main stress

0 引 言

水力压裂是目前煤层气开采的关键技术之一[1-3]。对于压裂井来说,施压前的岩石破裂压力预测对成功进行压裂作业具有重要的帮助[4]。确定煤储层破裂压力的大小及其影响因素,对于煤层气压裂工艺设计,以及提高单井产量都具有重要意义[5-6]。通常,研究煤层破裂压力的方法主要有现场试验、物理模拟和数值模拟 3 种。现场试验成本较高,而在实验室的物理模拟又无法还原地下储层的真实环境,致使模拟结果误差较大,模拟成本较高。但数值模拟可方便实现对不同储层条件的精细化定量模拟。目前,专业有限元分析软件 ANSYS 具有建模快捷、高效计算、结果输出准确等特点,是煤

收稿日期: 2014 - 12 - 18; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2015.04.029
基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05061,2011ZX05034 - 001); 国家自然科学基金青年基金资助项目(41102099)
作者简介: 黄赛鹏(1990—),男,湖北仙桃人,博士研究生。Tel: 15120080021, E - mail: huangsaipeng@yeah.net
引用格式: 黄赛鹏,姚艳斌,崔金榜,等. 煤储层水力压裂破裂压力影响因素数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(4):123 - 126,22.
HUANG Sai - peng, YAO Yan - bin, CUI Jin - bang, *et al*. Numerical simulation study on influence factors of hydraulic fracturing pressure in coal reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(4): 123 - 126, 22.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

储层水力压裂模拟的一种行之有效的方法。前人曾采用有限元数值模拟方法开展过对煤储层的模拟研究,其结果表明,地应力的变化和天然裂缝的存在均会对破裂压力造成显著的影响[7-8]。但是,前人的研究仅模拟了水平地应力和天然裂缝的存在等因素,而没有对影响压裂的其他因素,如射孔参数等进行综合模拟分析,其模拟结果也存在一定的多解性和不确定性。为此,笔者在综合考虑射孔长度、射孔孔径、煤岩泊松比和杨氏模量、地层深度等参数及相关地质因素的基础上,在山西沁水盆地南部郑庄区块开展了精细化的压裂数值模拟研究工作。

1　ANSYS 模型建立与条件假设

ANSYS 软件目前被广泛应用[9],并在能源领域逐渐被推广应用。ANSYS 的一般分析过程包括 3 个部分:①前处理,主要包括定义材料属性,模型建立,网格划分及施加载荷;②求解运算;③后处理,主要包括读取计算数据,图形化显示等。可以在计算后输出等效应力图,第一主应力分布图等。

1.1　理论依据

目前国内外提出的破裂压力预测方法较多,如 Eaton 法、Stephen 法、Anderson 法、黄氏模式法等[10]。目前水力压裂中应用较广泛的为最大拉应力准则,即第一强度理论。该理论认为引起材料脆性断裂破坏的因素是最大拉应力,无论什么应力状态,只要构件内一点处的最大拉应力 σ_1 达到单向应力状态下的极限应力 σ_b,材料就视为要发生脆性断裂。于是,危险点处于复杂应力状态的构件发生脆性断裂破坏的临界条件是:$\sigma_t = \sigma_b$。笔者采用试算法计算破裂压力,并保证误差小于 1/1 000。

1.2　模型建立

沁水盆地煤层气井压裂现场的平均井径为 223 mm,射孔孔径为 10 ~ 15 mm[11]。为了使结果不受建模的影响,按照井径与射孔孔径的比例建立模型,综合考虑了模型大小的选取对结果的影响。笔者选取了适当的尺寸,建立了 250 cm × 150 cm 的平面模型。根据建模的对称平面原理,井筒拟采用 1/2 模型;射孔端采用半圆弧形,以保证应力加载的均匀分布,防止出现奇异点。

为了减少井筒对加载结果的影响,设置井筒壁和射孔壁上的位移自由度为零,以防止在加载过程中,井壁和射孔壁失稳而造成应力局部集中而改变原来射孔端的应力分布,导致较大误差。由于模型网格化的质量直接影响计算结果的精度,然而过于细化网格会导致计算时间的大幅增长,并且还会在不必细算的区域浪费过多的时间成本。鉴于以上考虑,本次网格化主要采用二次网格划分,即选择合适比例完成模型的第一次网格划分后,在需要重点计算的射孔区域完成二次网格划分。这样既保证了计算精度,同时也节省了计算时间成本。

以沁水盆地南部某煤层气井的数据为基准值来进行模拟分析,模拟的目标煤层位于地下深度668 ~ 674 m,煤岩泊松比为 0.22 ~ 0.27,煤岩杨氏模量为 4.7 ~ 9.8 GPa。假设煤层各向同性且均质,排除煤层夹矸和顶底板接触段煤岩的影响,取泊松比和杨氏模量的平均值进行模拟分析。采用的模拟参数包括煤的密度,抗拉强度以及最大(小)水平主应力,其取值:杨氏模量为 6.4 GPa、泊松比为 0.22、密度为 1 400 kg/m^3、抗拉强度为 0.91 MPa、最大水平主应力 17.21 MPa、最小水平主应力为 10.55 MPa。建模过程中,先构建模型框架,然后建立模型平面,对其进行网格化,并在射孔附近进行二次网格化,如图 1 所示。对模型加载应力时,所加载荷均为线载荷,在垂直射孔段方向施加最小水平主应力 σ_h,平行射孔段加载最大水平主应力 σ_H。由于是 1/2 井筒模型,故模型左侧、井筒、射孔壁等均将自由度设置为零,在射孔端处施加载荷 F。

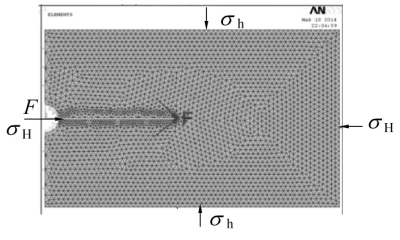


图 1　模型示意

模拟过程大致为:以建立的射孔模型为基础,分别改变模型的射孔长度和射孔孔径,网格化后,加载应力值;经过后处理计算,读取对应第一主应力并输出米塞斯等效应力云图,比较抗拉强度大小,计算破裂压力的大小;然后在优化了的射孔长度以及射孔孔径的情况下,分别分析不同的煤岩泊松比和杨氏模量以及地层深度对破裂压力的影响。

2　煤层破裂压力模拟结果分析

2.1　射孔长度对破裂压力的影响

在沁水盆地南部煤层气区块,煤层气井水力压

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

裂采用的射孔长度一般为 0.7 ~ 0.8 m,少数有超过 1.0 m 的情况。因此,模拟射孔长度取 0.4 ~ 2.2 m。保持其他条件不变,只改变射孔长度,应用最大拉应力准则,计算每个射孔长度对应的破裂压力。图 2 为 10 个不同射孔长度的破裂压力情况。

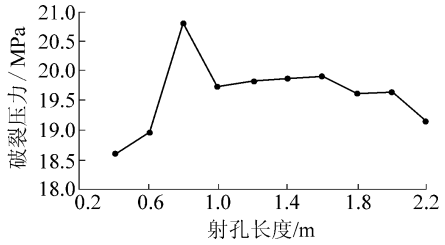


图 2　射孔长度与破裂压力关系

根据模拟结果,射孔长度为 0.4 m 时,破裂压力为 18.60 MPa。随着射孔长度的增加,破裂压力在射孔长度为 0.8 m 时达到最大值 20.81 MPa,随后持续呈现下降趋势,在射孔长度为 2.2 m 时,破裂压力达到 19.14 MPa。出现以上变化的原因可能是随着射孔长度的变化对射孔段煤层的原地应力产生了影响,从而导致破裂压力出现变化。虽然从模拟结果来看,射孔长度在低值时,有利于煤岩起裂,但会导致应力在井壁处的过于集中。同时,射孔过短可能在水力压裂过程中引起井壁附近的煤岩坍塌。从破裂压力的变化趋势来看,虽然在射孔长度大于 1.6 m,破裂压力呈现下降趋势,但基于目前煤层气井的水力压裂射孔长度均值远小于 1.6 m,故综合考虑认为射孔长度为 1.0 m 左右时,能有利于煤岩起裂。

2.2　射孔孔径的影响

射孔孔径一般与射孔弹型的选择有关系,取一个射孔长度为基准,保持其他条件不变,在一定范围内改变射孔孔径大小,以计算不同孔径对应的破裂压力。模拟结合第 2.1 节中对射孔长度优化结果,取射孔长度为 1 m,孔径模拟范围为 10 ~ 40 mm。根据模拟结果,射孔孔径为 10 ~ 20 mm 时对应的破裂压力曲线呈 Z 字形变化,可能因为孔径在这个范围内的变化,对射孔周围煤岩的应力产生了突变性影响。在射孔孔径 15 mm 左右破裂压力出现最小值 17.77 MPa,而当孔径大于 20 mm 时,破裂压力呈现逐渐降低的趋势,当孔径为 40 mm 时达到 18.43 MPa,如图 3 所示。改变射孔孔径大小对压裂液注入时造成的压力损失和射孔附近应力的改造均会影响。若只考虑降低破裂压力,因大幅增加射孔孔径对降低破裂压力作用不明显,故认为射孔孔径保持在射孔孔径 15 mm 有利于煤岩的水力压裂。

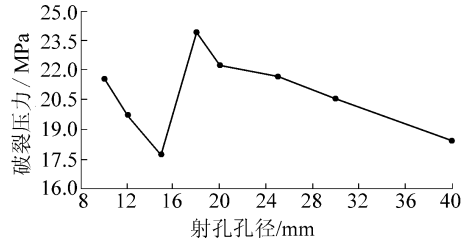


图 3　射孔孔径与破裂压力关系

2.3　泊松比的影响

泊松比是煤岩重要的力学参数,其不仅是计算其他岩石力学参数的基础,也是计算地层应力的重要参数之一,且直接影响到井壁力学的稳定性评价。常规压裂认为酸化处理地层,改变岩石力学参数,有利于降低破裂压力[12]。鉴于煤岩与常规地层的力学性质相差迥异,煤岩泊松比的变化范围往往也比较小。针对煤岩泊松比的变化情况,模拟不同的泊松比对煤岩破裂压力的影响。

根据模拟优化结果,设置射孔孔径为 15 mm,射孔长度为 1 m,以泊松比为 0.22 为基准,分别设置 6 组泊松比,保持其他条件不变,对不同泊松比对破裂压力的影响进行分析。从模拟结果来看,当泊松比为 0.20 时,破裂压力为 17.55 MPa; 随着泊松比的增加,煤岩破裂压力呈现小幅度增长,在泊松比为 0.40 时,破裂压力达到 20.06 MPa,如图 4 所示。

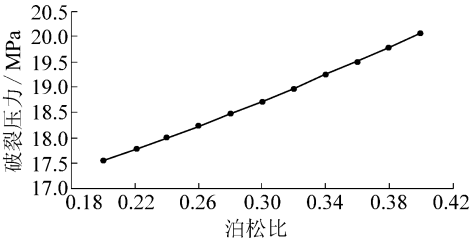


图 4　泊松比与破裂压力关系

产生以上变化规律的原因可能是因为随着泊松比的增大,煤岩垂直射孔方向的收缩应变增加,加大了煤岩压裂的难度,导致破裂压力的增加。

2.4　杨氏模量的影响

杨氏模量同样是煤岩重要的力学参数之一。煤层气井水力压裂过程中,通常会改变井筒周围的原地应力,而杨氏模量是计算地下应力条件的重要因素之一。目前,对于水力压裂过程中,煤岩杨氏模量对破裂压力的影响尚无定论。针对煤岩杨氏模量的变化情况,模拟不同的杨氏模量对煤岩破裂压力的

影响。根据模拟优化结果，设置射孔孔径为 15 mm，射孔长度为 1 m，泊松比为 0.22，以杨氏模量 6.4 GPa 为基准，设置了 6 组杨氏模量。保持其他条件不变，对不同杨氏模量对破裂压力的影响进行分析。从模拟结果来看，杨氏模量对破裂压力的影响并不明显，随着杨氏模量的逐渐增长，破裂压力的变化规律不明显，如图 5 所示。

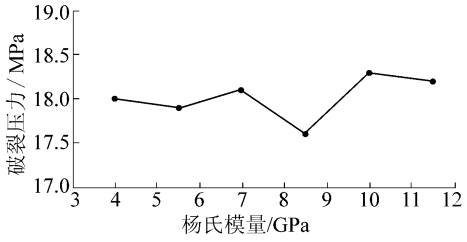


图 5　杨氏模量与破裂压力关系

2.5　地层埋藏深度的影响

储层深度对破裂压力的影响主要反映在垂向应力与水平主应力的大小上。岩石破裂压力大小由最小水平主应力的大小所决定[13]。通过设置 2 组地应力来计算破裂压力，选取一定的射孔长度和孔径，保持其他条件不变，分别改变 σ_H 与 σ_h 的大小，计算每组地应力的破裂压力。根据前文的优化结果，射孔长度取 1 m，孔径取 15 mm，分别设置 2 组地应力，第 1 组保持 σ_H 为 16 MPa 不变，σ_h 由 9 MPa 增至 13 MPa；第 2 组保持 σ_h 为 13 MPa 不变，σ_H 由 16 MPa 逐渐增至 20 MPa，结果见表 1。第 2 组的地应力数据总体上表现在深度上要大于第 1 组。

表 1　水平主应力条件改变破裂压力关系

组别	σ_H/MPa	σ_h/MPa	差值/MPa	破裂压力/MPa
第 1 组	16	9	7	14.69
	16	10	6	17.07
	16	11	5	19.45
	16	12	4	21.82
第 2 组	16	13	3	24.20
	17	13	4	23.71
	18	13	5	23.20
	19	13	6	22.71
	20	13	7	22.23

从模拟结果来看：随着水平主应力差的增大，2 组破裂压力均呈现下降趋势，当应力差为 3 MPa 时，对应的破裂压力为 24.2 MPa，随着应力差增加到 7 MPa，第 1 组的破裂压力减小到 14.69 MPa，而第 2 组的破裂压力则为 22.2 MPa，如图 6 所示。当水平主应力差逐渐增大时，煤岩破裂压力对应降低。由于第 1 组只改变 σ_h，而第 2 组只改变 σ_H，结果显示第 1 组的破裂压力减小趋势更明显，故认为 σ_h 对破裂压力有较大影响。相对地层深度来说，第 2 组的应力反映的地层深度要大于第 1 组，第 1 组破裂压力减小的趋势要大于第 2 组，故认为随着深度的增加，煤岩的破裂压力受应力差的影响反而越小。

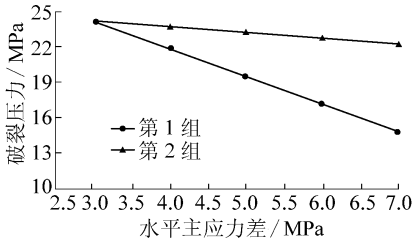


图 6　水平主应力差与破裂压力关系

3　结　　论

笔者分别从射孔长度，射孔孔径，煤岩泊松比和杨氏模量以及地层深度等方面来探讨对煤层水力压裂的破裂压力的影响。模拟结果显示，射孔长度与孔径对破裂压力影响较大，当射孔长度为 1 m 左右，射孔孔径为 15 mm 左右时有利于煤岩的起裂；破裂压力随着煤岩泊松比的增加而增大，泊松比的小幅度变小在一定程度上能降低破裂压力，而杨氏模量的变化对破裂压力大小的影响规律不明显；随着水平主应力差的增加，有利于降低破裂压力，并且最小水平主应力的大小对破裂压力的影响明显强于最大水平主应力；随着地层深度逐渐加大，破裂压力受水平主应力差的影响反而减小。

参考文献：

[1] 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[J]. 中国石油大学学报：自然科学版，2006，30(5)：42－45.

[2] 孙炳兴，王兆丰，伍厚荣. 水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭科学技术，2010，38(11)：78－80.

[3] 孙守山，宁　宇，葛　钧. 波兰煤矿坚硬顶板定向水力压裂技术[J]. 煤炭科学技术，1999，27(2)：51－53.

[4] 任　岚，赵金洲，胡永全，等. 水力压裂时岩石破裂压力数值计算[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(2)：3417－3422.

[5] 张广清，陈　勉，殷有泉，等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(1)：40－44.

[6] 彪仿俊，刘　合，张　劲，等. 螺旋射孔条件下地层破裂压力的数值模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报，2011，41(3)：219－226.

[7] 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[J]. 煤炭学报，2009，34(9)：1199－1202.

(下转第 22 页)

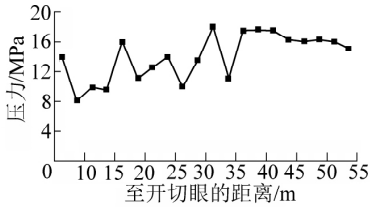
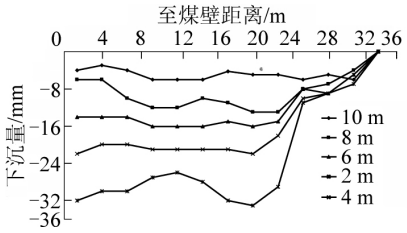


图 5　工作面沿推进方向的平均压力分布曲线

4.3　回采巷道顶板与围岩位移分析

回风巷观测点初始距工作面 36 m，据观测数据，上覆岩层下沉量与至煤壁距离关系如图 6 所示。



6　回风巷测点下沉量与距煤壁距离关系

由图 6 可知，矸石充填后回风巷测孔内各基点下沉不明显，最大值仅为 35 mm；10 m 处基点基本保持不动，2、4、6、8 m 处基点有下移倾向，且移近量逐渐减小，在距煤壁 24 m 内各基点下沉量稳定。

4.4　地表建筑物检测

工作面推进完成后，持续观察 6 个月，经勘察地表建筑物无明显开裂。经大采高综合机械化矸石充填开采质量检测系统监测并分析知：东坪煤矿村庄下 15601 工作面在采用煤矸石充填开采情况下，巷道顶板岩层移动比较微弱，各基点之间仅有小量离层现象，明显离层主要发生在下位岩层，地表最大下沉量仅有 46 mm，满足设计要求。

5　结　　论

1) 大采高综采矸石充填开采技术能实现采煤与充填同步进行，避免因采出厚煤层上覆岩层发生大幅下沉，既回采了村庄压滞煤炭资源又利用了矸石，满足绿色采矿发展要求。

2) 充填材料质量、充实率以及机械设备状况是影响充填质量的因素；通过确定质量参数及质量检测手段，建立起矸石充填开采质量检测技术体系。

3) 东坪煤矿现场实测数据表明，支架压力、回采巷道围岩移近量以及地表下沉量均与矸石充填质量有密切联系且在可控范围内变化。

4) 该矸石充填质量检测技术可以对矸石充填效果科学的进行评价，是矸石充填理论和技术的重要组成部分。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

参考文献：

[1] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤技术研究进展[J]. 煤炭学报，2012，37(8)：1247－1255.

[2] 钱鸣高，许家林，缪协兴. 煤矿绿色开采技术的研究与实践[J]. 能源技术与管理，2004(4)：1－4.

[3] 刘长友，杨培举，侯朝炯，等. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报，2004，33(2)：166－169.

[4] 冯光明，贾凯军，李风凯，等. 超高水材料开放式充填开采覆岩控制研究[J]. 中国矿业大学学报，2011，40(6)：841－845.

[5] 余伟健，冯　涛，王卫军，等. 充填开采的协作支撑系统及其力学特征[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(S0)：2803－2813.

[6] 杨　泽，侯克鹏，乔登攀. 我国充填技术的应用现状与发展趋势[J]. 矿业快报，2008，24(4)：1－5.

[7] 谢国强，杨军辉，谢生荣，等. 大采高综采面超高水材料充填开采技术[J]. 中国矿业，2013，22(31)：70－72，112.

[8] 王　磊，张鲜妮，郭广礼，等. 综合机械化固体充填质量控制的体系框架[J]. 煤炭学报，2013，38(9)：1568－1575.

[9] 李　强，茅献彪，卜万奎，等. 巷道矸石充填控制覆岩变形的力学机理研究[J]. 中国矿业大学学报，2008，37(6)：745－750.

[10] 缪协兴，黄艳利，巨　峰，等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究[J]. 中国矿业大学学报，2012，41(6)：863－867.

[11] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤矿压控制原理与支架受力分析[J]. 中国矿业大学学报，2010，39(6)：765－801.

[12] 王家臣，杨胜利，杨宝贵，等. 长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟试验[J]. 煤炭学报，2012，37(8)：1256－1262.

[13] 张吉雄，李　剑，安泰龙，等. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报，2010，35(3)：357－362.

[14] 李永明，刘长友，李西蒙，等. 水体下急倾斜煤层采空区矸石充填顶板控制[J]. 煤炭学报，2010，35(9)：1419－1424.

[15] 张吉雄，吴　强，黄艳利，等. 矸石充填综采工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报，2010，35(S0)：1－4.

[16] 孙希奎，李学华. 利用矸石充填置换开采条带煤柱的新技术[J]. 煤炭学报，2008，33(3)：259－263.

(上接 126 页)

[8] 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.

[9] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2009：27－50.

[10] 邓金根，张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理[M]. 北京：石油工业出版社，1998.

[11] 杨庆龙，吴财芳. 沁水盆地某煤层气井射孔完井技术适应性探讨[C]//煤层气学术研讨会论文集. 北京：中国煤炭学会，2011：271－277.

[12] 邓　燕，薛仁江，郭建春. 低渗透储层酸预处理降低破裂压力机理[J]. 西南石油大学学报：自然科学版，2011，33(3)：125－129.

[13] 苏建政，黄志文，龙秋莲，等. 基于 ANSYS 软件的降低破裂压力机理模拟[J]. 石油与天然气地质，2012，33(4)：640－645.