

非常规天然气

# “三软”煤层注水压裂增透机理及瓦斯抽采施工参数确定

王志荣<sup>1</sup>, 韩中阳<sup>1</sup>, 李树凯<sup>1</sup>, 胡向志<sup>2</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南煤层气钻井工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对豫西“三软”煤矿区瓦斯低渗难抽问题的特殊性,探讨了主采二<sub>1</sub>煤层生、储气层的变形特征。以 ABAQUS 软件为平台,依托告成煤矿建立了滑动构造带三维非线性流—固耦合水力压裂模型。应用多参数耦合模拟方法,探讨了定向注水压裂过程中目标层的流变—损伤—渗流耦合行为;同时利用 T—P 损伤演化准则的 Cohesive 单元,模拟了目标层裂隙的起裂和扩展过程。此外,探讨了煤岩体对动力荷载的响应机制和动态条件下的压裂效果。研究表明,定向注水新工艺条件下,当注水压力为 4.5MPa,注水时间在 2h 左右时,水力压裂在顺层软煤中的影响半径基本可以达到 80~100m 这一理想数据,从而大幅度地改善了“三软”煤层低渗性能。实践证明,采用正确的施工方法和技术参数优化组合,可以有效提高煤层的透气性和瓦斯抽采效果,对复杂矿区瓦斯综合利用具有重要借鉴意义。

**关键词:**“三软”煤层;水力压裂;流—固耦合;瓦斯抽采

**中图分类号:** TE357.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2014)05-0739-08

**引用格式:** Wang Zhirong, Han Zhongyang, Li Shukai, *et al.* Mechanism of water-fracturing-induced permeability increment of “Three-Soft” coal seam and construction parameters determination[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 739-746. [王志荣, 韩中阳, 李树凯, 等. “三软”煤层注水压裂增透机理及瓦斯抽采施工参数确定[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 739-746.]

## 0 引言

煤层瓦斯具有资源和灾害双重性:一方面瓦斯作为非常规天然气,是一种潜力巨大的洁净能源;另一方面,我国煤层瓦斯无论是在突出次数,还是突出强度上都是非常严重的,因而被公认为当前我国煤矿五大地质灾害之首<sup>[1-2]</sup>。

注水压裂技术广泛应用于国内外工程领域特别是油气开采部门,是目前最主要的油气藏增产措施之一。长期以来,国内外从理论、实验和现场测试等方面开展了大量的研究,取得了丰硕的学术成果<sup>[3-5]</sup>。随着岩石力学试验和计算机技术的迅猛发展,近年来众多学者<sup>[6]</sup>对软煤的渗透机理与规律进行了深入探讨,数值模拟也逐渐成为分析水力压裂机理和进行水力压裂设计的有效途径。国外以 Sommerton 等<sup>[7]</sup>为代表,研究了应力对煤体渗透性

的影响;国内唐巨鹏等<sup>[8-9]</sup>通过瓦斯在压力作用下的解析渗流试验研究,得到有效应力与瓦斯解吸渗流特性间的关系,并拟合了其关系表达式,从而揭示出煤体破坏前,固一流一些新的相互作用规律;谢维扬等<sup>[10]</sup>建立了水力压裂缝导流的页岩气开采渗流模型,指出压裂缝越多,间距越小,水平井产能就越大;王早祥等<sup>[11]</sup>建立了含煤粉流体流—固耦合的数学模型,为瓦斯气体开发数值模拟提供了理论基础;尹光志等<sup>[12]</sup>、胡国忠等<sup>[13]</sup>对于低渗透条件下的渗流作用进行了进一步模拟研究。前人学术成就为建立“三软煤层压裂增透”相关数理模型奠定了雄厚的理论基础。

河南省煤田系我国构造复杂矿区,尤其是豫西滑动构造形成了国内最富特色的“三软”(软顶、软底、软煤)煤层,其埋深 2 000m 以上的瓦斯蕴藏量约为  $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,平均资源丰度达  $1.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。生产实

收稿日期:2013-08-30;修回日期:2013-11-04.

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:41272339)资助.

作者简介:王志荣(1963-),男,浙江嘉善人,教授,博士,主要从事地质工程与地质灾害防治研究. E-mail: wangzhirong513@sina.com.

践表明,经过强烈构造作用的软煤透气性差,瓦斯压力大,但解析速度快,衰减期很短,实属低渗难抽采煤层。因此,研究“注水压裂条件下软煤的应力应变”、“压裂后煤体的开裂等动力学过程”以及“软煤瓦斯抽放技术中的施工参数应用问题”,对于综合利用瓦斯资源具有重大的理论与实践意义。基于此,本文以ABAQUS软件为分析平台,以芦店滑动构造区告成煤矿某试验井为实例,建立了滑动构造带水平断层三维非线性流固耦合水力压裂模型。通过模拟整个注水压裂过程,得到了断层带裂隙的孔隙压力分布和变形过程,并针对定向注水新工艺,讨论了裂隙的延伸、流体的扩展以及实际施工技术参数应用等问题。

## 1 瓦斯赋存地质背景

### 1.1 构造赋存环境

豫西芦店滑动构造位于嵩山—五指岭和其山—风后岭之间的登封、密县境内,主滑面基本沿 $\text{二}_1$ 煤软弱层位发育,剖面形状为舟状,中部水平,两端翘起,并交于边界正断层之上,钻孔揭露为平均厚40m的碎裂岩带。芦店滑动构造最显著的特征就是运动的多期性,即构造体本身为一早期由北向南滑动和晚期由南向北滑动的2期复合变形产物。这种构造反转特征致使滑动构造带在垂向上出现相应的分带现象,大致呈上部断层裂隙带、中部断层破碎带和底部断层带(滑动构造带主体)的共生组合。断层带本身又可划分为上部构造角砾岩覆盖下部断层泥的复杂二元结构(图1),从而构成了豫西“三软”矿区独特的煤层顶板储气层。

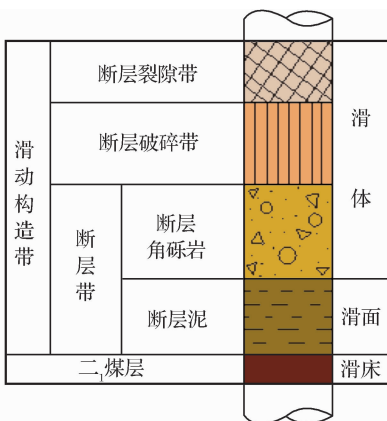


图1 滑动构造带垂向结构示意图

Fig. 1 Vertical structure of gliding structural zone

### 1.2 气源岩变形特征

#### 1.2.1 宏观变形

“三软”矿区火成岩体极不发育,主采 $\text{二}_1$ 煤层

基本没有受到热异常的影响,但因受后期滑动构造和断块掀斜的强烈改造,全区基本构造煤化,动力变质程度较高。经多期重力滑覆作用后的软煤,以“片状—鳞片—碎粒—碎粉”结构为主,煤级一般从高级烟煤到无烟煤。煤层透气性系数 $\lambda=0.005\text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ,衰减系数 $\alpha=0.55\text{ d}^{-1}$ ,瓦斯放散初速度 $\Delta P=17.42\text{ L/min}$ 。煤体质松性脆,揉搓现象严重,且小挠曲和劈理构造异常发育,碎裂后断面光滑,伴生有大量摩擦镜面、擦痕及擦槽,厚度一般为7~8m,是我国典型的“三软”煤层(图2)。



图2 告成煤矿构造煤变形素描

Fig. 2 Deformation sketch map of deformed coal in Gaocheng coal mine

#### 1.2.2 微观变形

煤储层的空隙发育特征是评价瓦斯运移条件的基本内容。空隙的性质、大小以及空间分布状况直接影响到煤的渗透率。煤中发育有孔隙(Matrix-pore)和裂隙(Fractal pore)2种类型影响瓦斯运动特征的空隙。前者是煤中的微空隙,主要影响瓦斯的赋存、解吸和扩散;后者主要影响瓦斯的渗透和运移。通过光学显微镜观测,研究区共出现剪、拉2类完全不同性质的煤岩裂隙。

图3(a)为典型的II类格里菲斯裂隙,椭圆形定向分布,大多已挠曲变形,灰色为黏土充填部分;图3(b)采自河南登封告成山西组 $\text{二}_1$ 煤,为典型的“x”剪切裂隙;图3(c)采自河南登封告成山西组 $\text{二}_1$ 煤,多组剪切裂隙形成的构造透镜体,AB面已无方向指示性;图3(d)采自河南登封告成山西组 $\text{二}_1$ 煤,构造杆状体,典型脆性拉张变形产物,空隙较为发育。上述软煤所发育的微观裂隙构成了瓦斯在压力作用下的主要运移通道。

尽管气源岩 $\text{二}_1$ 煤层的宏观构造变形极其复杂,总体显示低渗性能,但在定向注水压裂条件下,沿煤层中的次滑面可产生若干水平主裂缝,加上主裂缝两侧众多的微观裂缝,共同构成网络渗透体系,从而大大提高瓦斯抽放产能<sup>[10]</sup>。

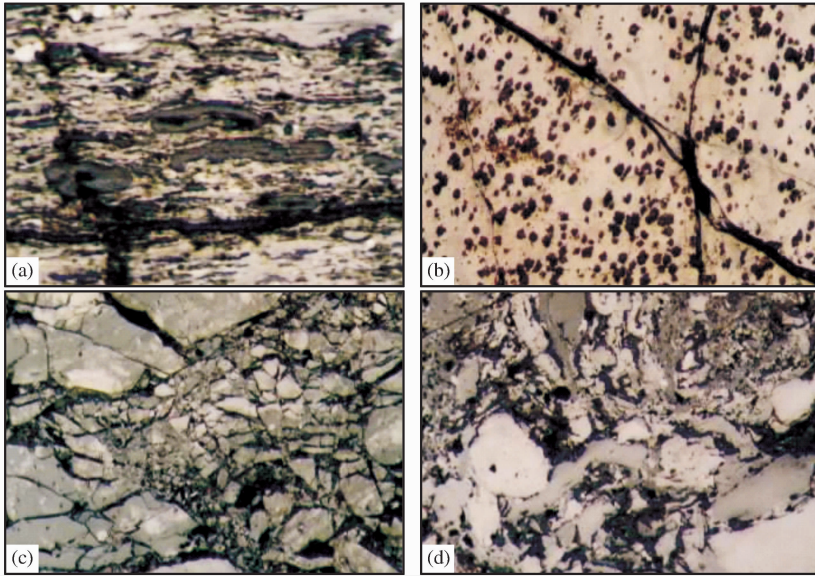


图3 软煤微观结构光学显微镜图

Fig. 3 Microscope picture of soft coal microstructure

## 2 流—固多参数耦合数值模拟方法

注水压裂与瓦斯抽采涉及到裂隙介质损伤、破坏、渗透性和气体运移等多种计算,特别是流—固耦合过程中,涉及到的力学过程十分复杂<sup>[14-18]</sup>,而现众多学者提出的理论都是各自在特定的环境下做出的,缺乏完善的理论公式。在漫长的地质历史时期中,岩石受到各种地质作用,从而产生了各种不同成因的结构面。当受到附加应力时,这些岩石力学性质在一定程度上受这些结构面所控制,或者说,岩石强度性质随时间的延长而弱化的现象,本质上是岩石内部结构损伤的结果。

注水压裂条件下,受内水压力影响,裂隙带物质往往处于流变状态,因此裂隙的损伤与延伸都是随时间变化的发展过程。当内水压力与初始地应力合成到一定临界值时,岩石旧裂隙会扩展,或诱发新的岩石裂隙,从而影响到岩石的渗透性能。上述过程本文称之为流变—损伤—渗流多参数耦合,这是对流—固双场耦合理论的补充和深入研究。要使这种耦合在 ABAQUS 软件中得以实现,首先需要确定一个方便和适合于该软件的多参数耦合模型。本文以 ABAQUS 软件自带的岩体流变模型为基础,用广义 Kelvin 模型来描述岩石材料蠕变方程,设  $t = 0$  时,初始常应力为  $\sigma$ ,则有:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right] \quad (1)$$

式中: $E_1$  为岩体的弹性模量; $E_2$  和  $\eta_2$  为岩体的黏性

参数。

设岩石处于弹性阶段时不发生损伤,当软岩单元的等效塑性应变超过极限塑性应变  $\bar{\epsilon}_{pmax}$  时,该岩石材料因塑性变形而发生畸变破坏。而损伤变量  $D$  与等效塑性应变  $\bar{\epsilon}_{pmax}$  之间满足一阶指数衰减函数,将等效塑性应变归一化,则有:

$$D = \frac{1}{e^{-1/a} - 1} e^{-\bar{\epsilon}_{pm}/a} + \frac{-1}{e^{-1/a} - 1} \quad (2)$$

式中: $\bar{\epsilon}_{pm}$  为归一化后的等效塑性应变; $a$  为材料参数,可以通过实验取得。

渗透性与损伤之间的关系:

$$k = \frac{n}{K_z S_v^2} = \frac{n_0 - D(n_0 - n_s)}{K_z S_v^2} \quad (3)$$

式中: $K_z$  为无量纲常数,其值一般可以取 4.5 ~ 5.5 之间; $S_v$  为单位孔隙体积的表面积, $S_v = A_s/V_v$ ;  $A_s$  为空隙的总表面积; $n$  为孔隙度; $n_0$  为岩体初始孔隙度。

通过 ABAQUS 提供的 USDFIELD 用户子程序,可运用 Fortran 语言编程,建立渗透性与损伤变量、及时间的多参数耦合关系,充分实现式(1)、式(2)、式(3)3个公式与模拟软件的嵌入与对接。

## 3 瓦斯抽采工程实例

### 3.1 计算模型与参数确定

以豫西芦店滑动构造区告成井田某试验井为例,采用有限元软件 ABAQUS 模拟其分段压裂过程。该井的完井深度为 823m,完钻垂深为 769m。地质模型中包括构造破碎带、断层带、二<sub>1</sub>煤层与砂质



泥岩底板,破碎带之上则为巨厚的上覆系统裂隙带(图4)。模型高度( $z$ 向)、宽度( $y$ 向)和长度( $x$ 向)分别为20m、50m和150m。为保证煤层走向上的最佳压裂效果,采用定向注射新工艺, $x$ 、 $y$ 构成的平面代表原始层面, $x$ 代表射眼注水方向,射眼位置正好位于原始层理。破碎带厚度为5m;断层带厚度为2m;煤层厚度为8m;底板厚度为5m。有限元计算模型如图4所示。

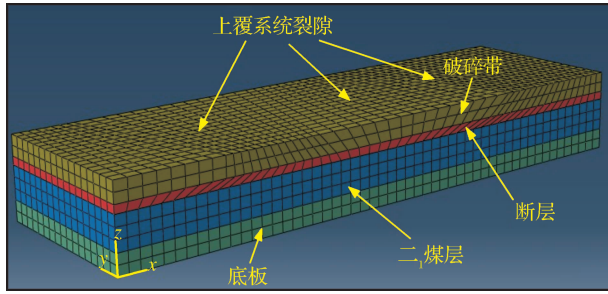


图4 软煤顺层注水压裂有限元计算模型

Fig. 4 Bedding injection fracturing FEM model of soft coal

考虑水平面内 $x$ 方向和 $y$ 方向的地应力分别为上覆地应力( $z$ 方向,数值见表1)的0.92和0.85(即侧向应力系数分别为0.92和0.85)。裂缝的扩展方向与最小水平地应力垂直,因此由注水孔位置

起始沿 $x$ 方向设置 Cohesive 单元模拟目标层中裂缝的起裂和扩展,形成横向裂缝; $y$ 向上各层之间设置 Cohesive 单元模拟可能出现竖向裂缝的破裂和扩展,射孔孔眼与微环隙和横向裂缝都相连接。由于本模型的埋深较大,均位于地下水位以下,故各岩层设置饱和度为1.0,初始孔隙率为0.3%,初始孔隙压力为2.3MPa。所有外表面约束法向位移。共生成8748个节点,7208个单元。地层的地质参数以及水平层 Cohesive 单元的材料参数参考告成煤矿试验井(表1,表2)。

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 压裂目标层的确定

滑动构造区“三软”煤层结构极其复杂,且分布有许多不同类型的渗透边界。在漫长的地质时期,煤层中瓦斯向多空隙的构造岩顶(底)板运移,并富集于各类裂隙中,最终形成多个瓦斯储层空间叠置的地质现象。据此,笔者对破碎带、断层带、二<sub>1</sub>煤层和底板分别进行注水压裂模拟,以寻找最佳压裂目标层。模拟过程中,设定压力水的黏度系数为 $1 \times 10^{-6}$  kPa·s,起始注入量控制在 $0.23\text{m}^3/\text{min}$ ,平均注入量为 $3.12\text{m}^3/\text{min}$ ;注水管长度取定2m,位置设置在底板与夹矸中间,采用2ZBYS系列矿用液压

表1 滑动带地层地质参数

Table 1 Geological parameters of strata in gliding structural zone

地层	弹性模量/GPa	泊松比	黏滞系数/(MPa·h)	渗透系数/(m/s)	Z向地应力/MPa	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa
破碎带	2.3	0.25	$0.757 \times 10^6$	$1 \times 10^{-6}$	16	2.75	3.3
断层带	1.1	0.33	$0.896 \times 10^6$	$1 \times 10^{-3}$	17	2.65	1.8
二 <sub>1</sub> 煤层	2.1	0.25	$1.093 \times 10^6$	$1 \times 10^{-7}$	17	2.75	2.9
底板(砂质泥岩)	2.4	0.25	$0.778 \times 10^6$	$1 \times 10^{-5}$	19	2.72	3.9

表2 各地层中 Cohesive 单元的材料参数

Table 2 Cohesive element material parameters of each stratum

地层	$t_n^0/\text{MPa}$	$t_s^0/\text{MPa}$	$t_t^0/\text{MPa}$	$t_{\text{eff}}^0/\text{MPa}$
破碎带	3.9	2.2	2.2	3.9
断层带	3.9	2.2	2.2	3.9
二 <sub>1</sub> 煤层	3.9	2.2	2.2	3.9
底板(砂质泥岩)	3.9	2.2	2.2	3.9

注浆泵提供压力水源,最大注浆压力为10.5MPa,计算时取平均注水压力4.5MPa,注水持续120min,所得到的4种不同结果分述如下。

(1)破碎带设为目标层[图5(a)]。该层经注水压裂,最大孔隙压力仅为2.20MPa,远远低于 Cohesive 单元初始牵引拉力为4.5MPa,因此压裂效果

最差。分析其原因,该带上部有较厚的构造裂隙带,分布有大量的垂直连通裂隙,致使压裂流体在裂隙中流失而不能形成有效压力。破碎带下部紧邻断层带,断层带岩性主要为角砾岩,渗透系数同样很大,压力流体也无法形成较大的牵引拉力,使得 Cohesive 单元损伤。但在相对低渗的底板,却形成了较高的孔隙压力,究其原因,随着流体增加,破碎带处的孔隙压力引起整个模型中的总应力增加,但仍然远小于 Cohesive 单元法向初始牵引拉力。

(2)断层带设为目标层[图5(b)]。从图中可以看出,断层带中孔隙压力比较集中,裂隙延伸较好,其长度大约达到80~90m,基本可以满足实际需求。而孔隙压力在破碎带与底板中衰减较快,其下降梯度比较平稳,各层中的梯度均稳定在 $40^\circ \sim 55^\circ$ 之间

难以形成有效裂隙。

(3)煤层设为目标层[图 5(c)]。由于相邻渗流场的压力下降梯度基本保持在  $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$  之间,致使煤层中孔隙压力最为集中,裂隙延伸也最好,长度均达到 100m 左右,有利于瓦斯快速析出。

(4)底板设为目标层[图 5(d)]。破碎带与断层

带之间的孔隙压力梯度基本没有变化,虽然煤层与底板中的孔隙压力比较适宜,但对于整体压裂抽采效果并不理想。

由此可见,在目前注水技术条件下,压裂主采二<sub>1</sub>煤层或者压裂顶板断层带,或者联合压裂煤层与顶板断层带,均能取得最好的瓦斯抽采效果。

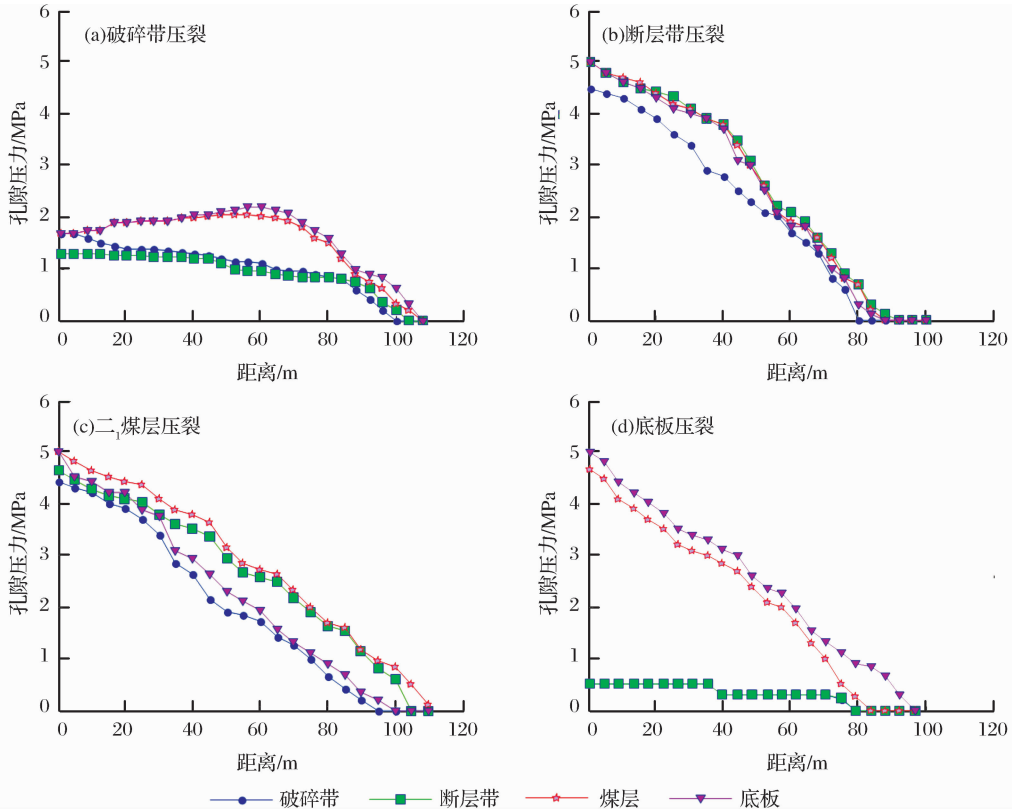


图 5 滑动构造带孔隙压力与压裂距离关系曲线

Fig. 5 Relation curves of pore pressure and fracturing distance in gliding structural zone

3.2.2 软煤损伤的应力条件

不同性质的荷载作用,裂隙尖端 Cohesive 单元损伤系数随压力值的变化状况有所不同(图 6)。静水压力值为 4MPa 时,二<sub>1</sub>煤 Cohesive 层左侧最大主应力损伤系数已经达到 0.948,即  $D=0.948$ ,接近于完全破坏值( $D=1$ )。当压力值增大到 4.5MPa 时,损伤系数已达到临界值( $D=1$ )。这一数值略大于  $T_{eff}^0$ ,与本文所用 Cohesive 单元中的起始牵引拉力比较接近,分析注水过程中,有一部分压力流体会滤失,导致 Cohesive 单元起裂时的初始牵引力会略大于理论值。而此时顶板碎裂岩相应的损伤系数仅为 0.7,尚未达到屈服破裂状态。由此可见,静力条件下主采二<sub>1</sub>煤层相对容易压裂,模拟值为 4.5MPa 被用作软煤的起始压力是切实可行的。

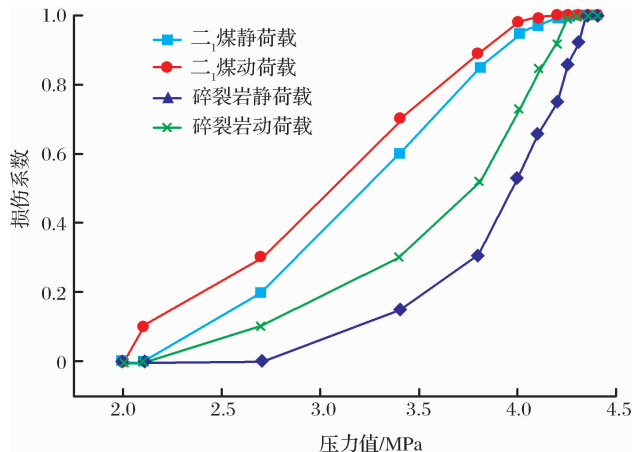


图 6 裂隙尖端 Cohesive 单元损伤系数随压力值的变化曲线

Fig. 6 Damage coefficients of cohesive elements at crack tip under different pressures

另外,通过施加经过修改的 Taft 地震数据的动

力幅值,二<sub>1</sub>煤与碎裂岩对动荷载皆有不同程度的响应,表现为裂隙尖端 Cohesive 层损伤系数  $D=1$  所对应的动力值均略低于相应的静态值,表明反复荷载作用下, Cohesive 单元韧性下降,更容易出现疲劳,更快达到损伤并拉裂。但从另一角度看,同等材料与边界条件下,二<sub>1</sub>煤静、动二者损伤系数数值相差很小,最大值仅为 0.1,反映了软煤具有较好的抗震与隔震作用,而顶板碎裂岩普遍达到 0.2 左右,暗示对地震作用有较强的敏感性。

### 3.2.3 软煤损伤的时间效应

岩体在内水压力作用下,裂隙尖端变形大致可分为开启、张裂与延伸 3 个阶段。当从注射孔孔眼向目标层注入高压流体浆液时,由于煤体具有一定的渗透性,部分液体会滤失到天然空隙中,致使煤体孔隙压力  $u_w$  骤然上升(压应力为正)。在总应力一定的条件下,有效应力  $\sigma'$ (拉应力为正)一定会随之下降,从而导致煤体强度降低。当煤层中孔隙压力增大到裂隙的抗拉强度时(即煤层中嵌入的 Cohesive 单元抗拉强度, T-P 损伤模型中的三角形最高点), Cohesive 单

元开始出现损伤,此时裂隙开启;随着拉应力作用与损伤的继续增加,损伤系数  $D$  逐渐达到 1 时, Cohesive 单元失效,裂隙尖端开始张裂并向前延伸。裂隙延伸后液体继续扩展,但孔隙压力下降,当小于裂隙抗拉强度时,裂隙的延伸也就随之停止。

图 7 体现了水力作用下软煤裂隙损伤的整个过程。计算中选择与 3.2.1 节相同的参数值,并设定压裂缝为永久变形,故考虑了向压裂缝灌入砂、砾石等填充料,以防止撤压后压裂缝重新闭合。压裂的最初时期,原始层理在一定的头水作用下开始出现裂缝,并在裂缝末端产生应力集中区。经过 30min 后, Cohesive 单元失效距离即裂缝扩展长度达 34m[图 7(a)];随着注水时间的持续与水头自然损失的加剧,压裂半径逐渐增大, Cohesive 单元损伤继续增长,在 60min 时达到 58m[图 7(b)];注水 90min 后由于水力梯度降低,浆液损失增多,煤层裂隙末端的损伤增速减慢,压裂效果不如前期理想,长度尚能延伸至 80m 左右[图 7(c)];120min 后高应力区基本消失,裂缝扩展趋于停滞,压裂半径最终维持在 106.5m[图 7(d)]。

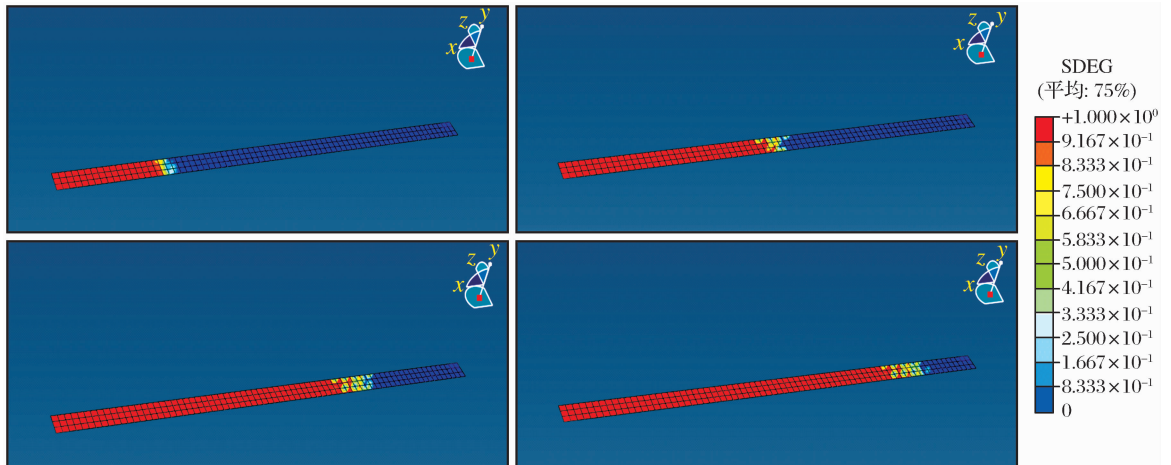


图 7 不同时刻 Cohesive 单元损伤

Fig. 7 Damage variable distribution cohesive elements at different times

软煤裂隙在注水压裂条件下,受应力场与渗流场的双重作用,必将产生开启损伤与两侧压实作用。流变—损伤—渗流多场耦合模型<sup>[19-23]</sup>,以 Biot 固结理论为基础,将破碎岩体应力—应变及渗流场的数值耦合模拟,应用于软煤的注水压裂工程中,精辟地阐明了岩体中流体的运移、压力传递以及裂隙的延伸,无论在时间还是在空间上都是一个逐渐发展的过程,并且逐渐衰减于某一极限值。图 5、图 6 与图 7 完全佐证了上述岩体本构模型同样适用于含瓦斯软煤。研究结果表明,在定向注水工艺条件下,4.5MPa 静荷载作用于软煤裂隙 1~2h 左右,损伤范围基本可以达到 80~

100m 这一最大数值,从而在基本不破坏两侧煤体结构的前提下,大幅度地改善了“三软”煤层的低渗性能。

## 4 模拟结果验证

运用国产长沙白云 MSD-1 瞬变电磁仪对二<sub>1</sub>煤某工作面的压裂试验进行了实际监测。压裂前高抽巷 40~80m 之间巷底以下 25m 范围内的煤层处密实状态,视电阻率( $\rho_s$ )表现为 20~40 $\Omega$  的高阻区[图 8(a)]。压裂后水体沿层间关键裂隙层流动,1 号与 2 号钻孔之间的煤层已变为视电阻率( $\rho_s$ )的低阻区,仅为 15 $\Omega$ [图 8(b)]。通过对传统注水压裂技



术进行的改进(5MPa左右的定向压力),相同情况下,2h后沿层间裂隙带的压裂长度可达100m左右。压裂后,7d内单孔瓦斯抽放量达3765m<sup>3</sup>,为

压裂前的120倍,平均抽采瓦斯浓度达到14%,能够满足瓦斯规模化利用的要求。上述压裂施工参数与理论计算结果完全一致。

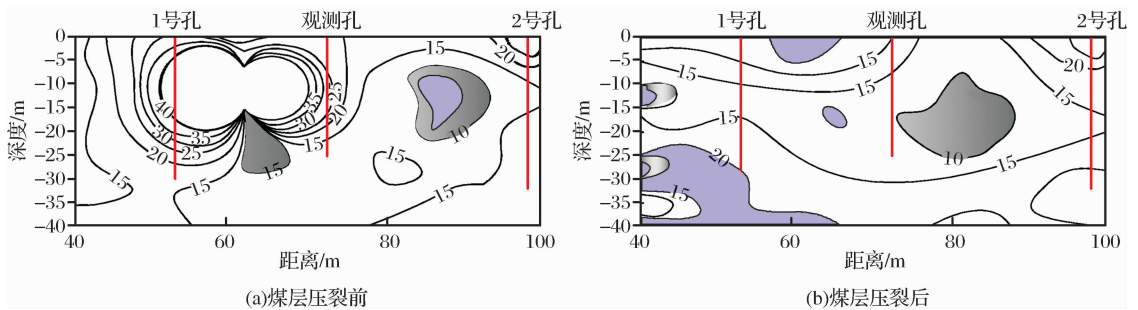


图8 二<sub>1</sub>煤层压裂电法探测对比

Fig. 8 Electrical detection of fracturing effect of II<sub>1</sub> coal seam

## 5 结论

以“施工技术参数优化组合”为核心内容的定向注水压裂技术,能够明显改善“三软”煤层的渗透性能,从而显著提高瓦斯抽采率。模拟结果与现场试验表明:

(1)针对滑动构造区二<sub>1</sub>煤生、储气条件好,但压裂、运移条件差的特征,基于多个储气层空间叠置现象,应以主采二<sub>1</sub>煤层或断层带顶板瓦斯为主要压裂目标层,或联合压裂煤层与上覆断层带。

(2)就豫西“三软”煤层而言,二<sub>1</sub>煤对动荷载的响应不是很敏感,相同地质条件下,动态注水压裂效果略优于静态。而顶板碎裂岩对地震作用有较强的敏感性,采用动力压裂方法预计可获得较好的抽放效果。

(3)为避免对裂隙两侧煤体结构的剧烈扰动,静态条件下,施加4.5MPa的注水压力,2h左右的注水时间,水力压裂在“三软”煤层中的影响半径基本可以达到80~100m这一理想数据。

(4)实践证明,采用正确的施工方法和施工技术参数,注水压裂前后的瓦斯抽采效率大约可以提高100倍,衰减周期由7d左右延长到1000~1500d,基本可以满足月产量达到1000~2000m<sup>3</sup>的预期目标。上述结论可以为类似工程提供一些有价值的参考依据,对于我国复杂地质条件下瓦斯开发利用具有重要的战略意义。

### 参考文献(References):

[1] Wang Zhirong, Chen Lingxia, Cheng Congren, *et al.* Forecast of gas geological hazards for “three-soft” coal seams in gliding

structural areas[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 17(4): 484-488.

[2] Wang Zhirong, Lang Dongsheng, Liu Shijun, *et al.* Tectonic control on gas geological hazard in Ludian gliding structure in West Henan[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 553-557. [王志荣, 郎东升, 刘士军, 等. 豫西芦店滑动构造区瓦斯地质灾害的构造控制作用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 553-557.]

[3] Ren Qingwen, Dong Yuwen, Yu Tiantang. Numerical modeling of concrete hydraulic fracturing with extended finite element method[J]. China Science: Technical Sciences, 2009, 52(3): 559-565.

[4] Wang Junjie, Zhang Huiping, Zhao Mingjie, *et al.* Mechanisms of hydraulic fracturing in cohesive soil[J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(4): 95-102.

[5] Meyer B R, Bazan L W. A Discrete Fracture Network Model for Hydraulically Induced Fractures Theory[C]. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 2011: 216-225.

[6] Adachi J, Siebrits E, Peirce A. Computer simulation of hydraulic fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44: 739-757.

[7] Sommerton W J, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(6): 129-145.

[8] Tang Jupeng, Pan Yishan, Li Chengquan, *et al.* Experimental study of desorption and seepage of coalbed methane under solid-fluid coupling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 274-278. [唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 固流耦合作用下煤层气解吸-渗流实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 274-278.]

[9] Tang Jupeng, Pan Yishan, Li Chengquan, *et al.* Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1563-1568. [唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力

- 学与工程学报, 2006, 25(8): 1563-1568. ]
- [10] Xie Weiyang, Li Xiaoping. Steady productivity of horizontal well in hydraulic fracture induced shale gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 387-392. [谢维扬, 李晓平. 水力压裂缝导流的页岩气藏水平井稳产能力研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 387-392. ]
- [11] Wang Hanxiang, Lan Wenjian, Liu Yanxin, *et al.* Mathematical model of fluid-solid coupling percolation with coal powder in coal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 667-670. [王旱祥, 兰文剑, 刘延鑫, 等. 煤储层含煤粉流固耦合渗流数学模型[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 667-670. ]
- [12] Yin Guangzhi, Li Xiaoquan, Zhao Hongbao, *et al.* Experimental research on effect of geostress on outburst coal's seepage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2557-2561. [尹光志, 李晓泉, 赵洪宝, 等. 地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2557-2561. ]
- [13] Hu Guozhong, Wang Hongtu, Fan Xiaogang, *et al.* Investigation on law of methane gas flow in coal with coal-gas outburst hazard and low permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2527-2534. [胡国忠, 王宏图, 范晓刚, 等. 低渗透突出煤的瓦斯渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2527-2534. ]
- [14] Wang Zhirong, Li Shukai, Wang Yuanxiao. Characteristics of compression fracture of "three soft" coal bed by perfusion and gas sucking technique[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2011, 17(1): 43-46.
- [15] Lomize G M. Flow in Fractured Rock(in Russian)[M]. Moscow: Gosemergoizdat, 1951: 127-129.
- [16] Romm E S. Flow in Fractured Rock(in Russian)[M]. Moscow: Nedra Publishing House, 1966: 67-65.
- [17] Louis C. A Study of Ground Water Flow in Jointed Rock and Its Influence on the Stability of Rock Masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [18] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [19] Duan Xiaoning, Li Jianchu, Liu Jishan. Numerical simulation of flow in fractured rocky masses with interaction of seepage and stress-strain[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1992, 32(6): 712-717. [段小宁, 李鉴初, 刘继山. 应力场与渗流场相互作用下裂隙岩体水流运动的数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 1992, 32(6): 712-717. ]
- [20] Yang Tianhong. Research on Seepage Property and Stress Coupling in Rock Failure Process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2001: 20-40. [杨天鸿. 岩石破裂过程渗透性质及其应力耦合作用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2001: 20-40. ]
- [21] Leo C J, Booker J R. A time-stepping FEM for analysis of contaminant transport in fractured porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 20(12): 847-864.
- [22] Tang Chun'an, Wang Shuhong, Fu Yufang. Numerical Experiments of Rock Failure Process[M]. Beijing: Science Press, 2003: 35-50. [唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 35-50. ]
- [23] Wu Yanqing. Principles of rock mass hydraulics(3)-concentrated parameter model and continuum model of rock mass coupling fields of flow and stress[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(2): 54-57. [仵彦卿. 岩体水力学基础(三)——岩体渗流场与应力场耦合的集中参数模型及连续介质模型[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(2): 54-57. ]

## Mechanism of Water-fracturing-induced Permeability Increment of "Three-Soft" Coal Seam and Construction Parameters Determination

WANG Zhi-rong<sup>1</sup>, HAN Zhong-yang<sup>1</sup>, LI Shu-kai<sup>1</sup>, HU Xiang-zhi<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Gas Well Engineering Research Center of Henan, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the low permeability and difficult extraction of gas in "three soft" coal seam in western Henan, China, this paper studied the deformation characteristics of gas generation and storage layers in III coal seam. Based on ABAQUS platform and Gaocheng coal mine, a three-dimensional nonlinear fluid-solid coupling hydraulic fracturing model was established. Then, the rheology-damage-seepage coupling behavior of target layer was described by multi-parameter coupling simulation method, and the initiation and propagation of crack was simulated by cohesive element of T-P damage evolution criterion. In addition, the response mechanism of rock mass against dynamic load and the fracturing effect under dynamic condition were discussed. The results show that when the injection pressure is 4.5 MPa, and injection time in about 2 hours, the influence radius of hydraulic fracturing in bedding coal seam can basically reach an ideal data of 80-100m and it greatly improves the low permeability of "three soft" coal seam. Practice also proves that correct construction method and optimal combination of technical parameters can effectively improve the permeability and gas extraction of coal seam, which has important significance to comprehensive utilization of gas in complex mining area.

**Key words:** "Three soft" coal seam; Hydraulic fracturing; Fluid-solid coupling; Gas extraction