

# 煤岩体积压裂脆性评价研究

路艳军<sup>1</sup>, 杨兆中<sup>2</sup>, Shelepov V V<sup>1</sup>, 韩金轩<sup>1</sup>, 李小刚<sup>2</sup>, 韩 威<sup>3</sup>

(1. 莫斯科国立罗蒙诺索夫大学地质系, 俄罗斯 莫斯科 119991; 2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 3. 陕西海荔石油机械有限公司, 陕西 渭南 715106)

**摘要:**水力压裂是煤层气开发的主要手段,通过压裂可以在煤层中形成有效的甲烷渗流通道,而体积压裂不仅能够在煤层中形成渗流通道,还能通过复杂裂缝的切割增大甲烷的解吸扩散面积,提高单井产量。脆性指数是体积压裂实施评价的关键参数,因此,基于煤岩和页岩的应力应变曲线,借助应变能密度的概念,分析了煤岩和页岩的脆性指数。页岩的应变能密度与脆性指数计算结果表明,页岩脆性指数越高,应变能密度越低。在页岩脆性指数的计算方法上,结合应变能密度与最小能量原理,提出了煤岩脆性指数的计算方法,并通过修正得到了用于表征煤岩脆性破坏能力和评价煤层压后产生多裂缝能力的煤岩脆性指数。最后,结合现场6口压裂井的数据进行了实例分析,结果表明,煤岩脆性指数与单位改造体积具有强相关性,即脆性指数越高,单位压裂液的煤层改造体积越大。该方法可以用于煤岩体积压裂设计,指导煤层气的开发。

**关键词:** 体积压裂; 煤岩力学特征; 应变能密度; 脆性指数; 多裂缝

**中图分类号:** TE357      **文献标识码:** A

## Evaluation and research of brittleness on simulated reservoir volume in coal

Lu Yanjun<sup>1</sup>, Yang Zhaozhong<sup>2</sup>, Shelepov V V<sup>1</sup>, Han Jinxuan<sup>1</sup>, Li Xiaogang<sup>2</sup> and Han Wei<sup>3</sup>

(1. Department of Geology, Moscow Lomonosov State University, Moscow 119991, Russian Federation; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Shaanxi Haili Petroleum Machinery Co., Ltd., Weinan, Shaanxi 715106, China)

**Abstract:** The hydraulic fracturing is a major means of the coalbed methane (CBM) exploitation, and the effective channels of the methane seepage can be formed in the coal seams by this means. The stimulated reservoir volume (SRV) can not only help the coal seams form the seepage channels, but also increase the desorption-diffusion areas of the methane and improve the production of the single well by formed the complicated fractures. The brittleness index is one of the key parameters for evaluating the SRV implementation, therefore, based on the stress-strain curves of the coal and shale, it is analyzed with the help of the strain-energy density. The higher the brittleness index of the shale is, the lower the strain-energy density will be. Based on the calculation method of the brittleness index of the shale, the calculation method of the coal brittleness index that combines with the strain-energy density and minimum energy principle is put forward, and the modified brittleness index of the coal is obtained, which can be used for the characterization of the coal brittle failure and evaluation of the fracture formation after fracturing. Finally, the analysis of the calculation results and data of 6 fracturing wells, indicates that the strong correlation between the coal brittleness index and stimulated volume, which means that the higher the brittleness index is, the larger the stimulated volume of unit fracturing fluid in the coal seams will be. This method can be applied to design the SRV of the coal seams and guide the exploitation of CBM.

**Key words:** stimulated reservoir volume (SRV), mechanical property of coal, strain energy density, brittleness index, multifractures

我国煤层气资源丰富,埋深2 000 m以浅煤层气地质资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>。但我国煤层气藏具有  
低压、低饱和、低渗透、非均质性强、变质程度高以及  
储层构造复杂、临界解吸压力低<sup>[2-7]</sup>的特点。因此,要

收稿日期:2017-02-23。

第一作者简介:路艳军(1986—),男,在读博士研究生,从事油气藏增产改造理论与工艺研究。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“多层复杂煤体结构区煤储层直井压裂技术研究”(2016ZX05044004-002)。

实现我国煤层气工业开发,需采取一定有效的增产措施<sup>[8-9]</sup>。水力压裂是目前煤层气开发的关键手段<sup>[10-13]</sup>,相对常规储层,煤层水力压裂后形成的裂缝不仅充当着渗流通道的作用,还承担着传递压降、增大煤层甲烷解吸面积的角色。

体积压裂(Stimulated Reservoir Volume)是从页岩气开发发展起来的一种新型压裂技术。该技术在水力压裂时,借鉴微地震监测技术,通过大规模滑溜水压裂在地下形成人工裂缝与天然裂缝交织的复杂裂缝网络,进而提高“增产改造体积(SRV)”<sup>[14-17]</sup>。若在煤层开展体积压裂,将井筒附近煤层压裂压成一个由大小不同裂缝构成的裂缝网络,把煤层“分割”成若干大小不等的煤块,可在一定程度上提高煤层中甲烷气体的解吸、扩散、渗流速度,从而提高煤层气单井产量。但煤岩是一种特殊的沉积岩,其具有高泊松比、低杨氏模量,割理发育的特点<sup>[18]</sup>,完全不同于目前成功应用体积压裂的页岩。因此,在煤层能否通过一定的压裂工艺产生复杂的裂缝网络,首先需要煤岩脆性进行一定的评价。通过煤岩脆性指数计算结果分析压后形成复杂裂缝的地质区域,优选能在压裂改造后提高储层泄流能力的增产“甜点”。

脆性既是一种变形特性又是一种材料特性。岩土材料的脆性没有统一的概念。脆性指数是度量材料脆性的一种方法<sup>[19]</sup>。脆性指数的计算存在多种方法。冯涛等人提出利用岩石的单抗拉和抗压强度,峰值前、后应变值来计算岩石的脆性系数<sup>[20]</sup>。在页岩气开发中,研究人员根据脆性矿物在岩石总矿物中所占的比例计算岩石脆性指数<sup>[21-22]</sup>。Grieser和Bray在地层脆性和气井产量的对比中发现,脆性越强其产量越高,预示着压裂将在脆性地层产生缝网<sup>[23]</sup>。Rickman<sup>[24]</sup>以测井数据为基础,给出了杨氏模量和泊

松比的脆性指数计算公式,认为脆性指数越高形成缝网的能力越强。此外,Goktan<sup>[25]</sup>利用岩石的单轴抗压强度和单轴抗拉强度进行了脆性指数的计算,并对脆性等级进行了划分。

煤岩与页岩在岩石力学特征方面有着本质的不同,在脆性指数计算时,直接采用页岩脆性指数的方法显然不妥。因此,以页岩脆性指数计算方法为基础,从岩石脆性的基础条件和煤岩的本身特征出发研究煤岩脆性指数,研究适合煤岩的脆性指数计算方法<sup>[26]</sup>。

## 1 岩石力学特征

岩石力学特征是形成缝网的关键,直接影响着岩石在压裂过程后产生缝网的能力。基于杨氏模量和泊松比表征的岩石脆性指数是页岩、砂岩脆性研究的主要方法。在页岩脆性指数计算方法中,杨氏模量和泊松比是表征页岩脆性的主要岩石力学参数,其主要由室内岩石力学实验获取。室内实验结果显示,页岩的单轴实验杨氏模量为23~49 GPa,泊松比为0.13~0.31,三轴实验杨氏模量一般为35~56 GPa,泊松比为0.18~0.31<sup>[27-28]</sup>。

同样在室内开展煤岩力学实验,求取煤岩杨氏模量和泊松比。实验以沁水盆地3#煤岩为实验样品,通过力学实验获得煤岩单轴应力应变曲线图1。

由实验结果可知,相对于页岩应力应变曲线,煤岩发生破坏的应力峰值要小得多,发生破坏的应变差别较大。页岩发生破坏的应变一般小于0.6%,而煤岩发生破坏时的轴向应变则超过了1%;其次,页岩与煤岩在初始压缩时,应变曲线虽然都存在一个上凹的区域,但煤岩向上凹得更加明显,说明煤岩中割理密度更大。计算得出,煤岩的抗压强度为27.01

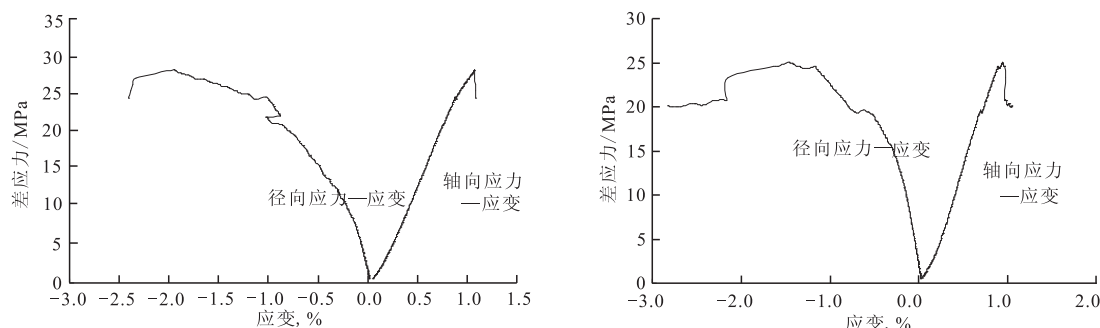


图1 煤岩单轴抗压强度(试样A左,试样B右)

Fig. 1 Uniaxial compressive strength of coal(left: sample A; right: sample B)

MPa,杨氏模量为2 903 MPa,泊松比为0.31。

随后对煤岩开展了三轴力学实验,其结果见图2。

在三轴实验下,不同围压对应的杨氏模量与泊松比也存在差异。随着围压的增加,煤岩发生破坏应力峰值并非线性增加,这体现了煤岩的非均质特

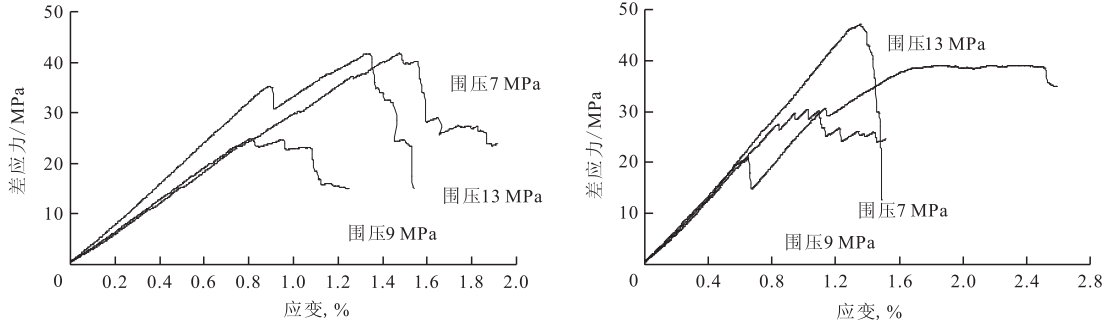


图2 不同围压下煤岩的应力应变曲线(左边煤岩试样C,右边煤岩试样D)

Fig. 2 Stress strain curve of coal under different confining pressure (left: coal sample C; right: coal sample D)

## 2 煤岩脆性指数计算

裂缝的形成,实际上是岩石的失稳破坏,而岩石失稳破坏的本质是岩石中能量突然释放的结果,这种释放是能量耗散在一定条件下的突变。在岩石力学试验加载过程中,试验机液压源提供能量对试件做功,使其在单向压缩情况下变形直至破坏。随着试件的变形,试验机机架、压盘等也将发生一定变形,从而储存一部分弹性能。试验系统刚性越好,则这部分弹性能越少。一般情况下,岩石力学实验中外部环境所作的功 $W$ 转化为3部分<sup>[28-29]</sup>。

$$W = FL = E_s + E_r + E_b \quad (1)$$

式中: $F$ 为载荷大小,kN; $L$ 为试验机作动器的行程,mm; $E_s$ 为试验机存储的弹性能,J; $E_r$ 为试验系统各种阻尼所耗散掉的能量,J; $E_b$ 则为传递给岩石试样的能量,J; $E$ 很小可忽略不计。

另外,若假设试验机为理想意义的刚性系统,即试验机的弹性储能足够小,可忽略不计。因此,根据式(1),对应每一载荷,外载所作的功全部转化为试样变形破坏吸收的能量。

试样变形破坏所吸收的能量也可近似由实测应力—应变曲线图下的面积确定,即:

$$E_b = V \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

式中: $V$ 为试样体积, $\text{mm}^3$ ; $\sigma$ 为作用在试样上的应力,MPa; $\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$ 称为应变能密度,即单位体积内储存的

征。不同煤岩试样在加载过程中,其微裂隙的形态及密度也存在一定的差异。

通过对比页岩与煤岩不同围压下的应力应变曲线可以发现,页岩在较低的应变下发生破坏,而煤岩达到破碎点时所发生的应变较页岩要高得多。

应变能, $\text{mJ}/\text{mm}^3$ 。当岩石发生破坏时所吸收的能量越高,即应变能密度越大,意味着该岩石不易发生破碎。因此,在一定条件下,可从能量的观点描述岩石变形破坏的难易程度。体积压裂,目的就是让岩石发生复杂的破坏,形成一定的裂缝网络。为此,可借鉴应变能密度来表征岩石力学可压性。将煤岩力学实验结果与页岩力学实验结果进行对比,对比结果见表1。

当岩石发生破碎时,煤岩与页岩所吸收的能量存在一定的差别,这一方面体现了不同岩样差异性,另一方面也体现了同种岩样的非均质性。总体上,煤岩在破坏时的应变能密度要比页岩应变能密度低,可见煤岩在同等外部能量下更容易发生破坏。

结合常用的页岩脆性指数计算公式,计算页岩的脆性指数<sup>[24]</sup>,脆性指数的计算结果在表1中给出。

$$\begin{aligned} YM_{sBRIT} &= \frac{YM_s - YM_{smin}}{YM_{smax} - YM_{smin}} \times 100 \\ PR_{sBRIT} &= \frac{PR_s - PR_{smax}}{PR_{smin} - PR_{smax}} \times 100 \\ BRIT_s &= \frac{YM_{sBRIT} + PR_{sBRIT}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $YM_s$ 为测定的页岩杨氏模量,10 GPa; $YM_{smax}$ 为页岩的最大杨氏模量,10 GPa; $YM_{smin}$ 为页岩的最小杨氏模量,10 GPa; $YM_{sBRIT}$ 为均一化后的页岩杨氏模量,无量纲; $PR_s$ 为测定的页岩泊松比; $PR_{smax}$ 为页岩的最大泊松比,取值为0.4; $PR_{smin}$ 为页岩的最小泊松比,取值为0.15; $PR_{sBRIT}$ 为页岩均一化后的泊松比,无量纲;

表1 页岩与煤岩力学实验数据对比

岩石类型	峰值压力/MPa	最大轴向应变	杨氏模量/MPa	泊松比	应变能密度/(mJ·mm <sup>-3</sup> )	脆性指数, %
页岩B	99	0.002 4	47 892	0.19	0.118 8	69.07
页岩D	179	0.006 4	35 260	0.31	0.572 8	36.04
页岩E	172	0.006 3	36 260	0.3	0.541 8	38.76
页岩H	138	0.003 7	44 195	0.27	0.255 3	50.43
煤岩A	32.5	0.009 3	2 668.7	0.246	0.152 1	48.21
煤岩B	18.5	0.008 3	2 713.3	0.473	0.076 6	16.10
煤岩E	36.2	0.011 1	3 672.5	0.261	0.200 9	53.23
煤岩F	25	0.009 4	2 471.3	0.324	0.117 8	35.65

注:单位体积吸收能量e的计算采用压缩破坏时的临界失稳点作为积分终点进行计算。

BRIT<sub>c</sub>为页岩的脆性指数,%。实例应用表明,页岩的脆性指数越高,储层形成复杂的裂缝网络的概率越大。将脆性指数的计算的结果与应变能密度建立关系见图3。

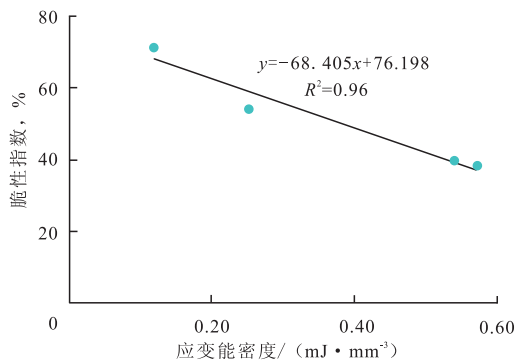


图3 页岩脆性指数与应变能密度关系

Fig. 3 Relation between shale brittleness index and strain energy density

计算结果发现,随着应变能密度的增加,其脆性指数呈现降低的趋势。结合前人对页岩压裂中脆性指数的研究表明,脆性指数越高,页岩压裂后越容易形成复杂裂缝。从而可以得出脆性指数越高,应变能密度越低,页岩压裂后越容易形成缝网。

根据这一结论,按照页岩脆性指数计算方法对煤岩的脆性指数和应变能密度进行计算。根据文献煤岩杨氏模量一般为2.38~5.6 GPa,少数地区煤岩超过10 GPa,泊松比为一般0.16~0.43,平均为0.26<sup>[30-31]</sup>。因而,可根据页岩脆性指数计算方法得出煤岩脆性指数计算公式如下:

$$YM_{cBRIT} = \frac{YM_c - YM_{cmin}}{YM_{cmax} - YM_{cmin}} \times 100$$

$$PR_{cBRIT} = \frac{PR_c - PR_{cmax}}{PR_{cmin} - PR_{cmax}} \times 100 \quad (4)$$

$$BRIT_c = \frac{YM_{cBRIT} + PR_{cBRIT}}{2}$$

式中:YM<sub>c</sub>为综合测定的煤岩杨氏模量,GPa;PR<sub>c</sub>为综合测定的煤岩泊松比;YM<sub>cBRIT</sub>为均一化后的杨氏模量,无量纲;PR<sub>cBRIT</sub>为均一化后的泊松比,无量纲;BRIT<sub>c</sub>为煤岩脆性系数,%;YM<sub>cmin</sub>为煤岩最小杨氏模量,GPa(此处取1 GPa);YM<sub>cmax</sub>为沁水盆地南煤岩最大杨氏模量,GPa(此处取值为11 GPa);PR<sub>cmax</sub>为煤岩最大泊松比,此处取值为0.5;PR<sub>cmin</sub>为最小泊松比,此处取值为0.15。计算结果在表1中给出。

根据计算结果得出煤岩脆性指数与应变能密度的关系见图4。

计算结果表明,随着应变能密度的增加,煤岩脆

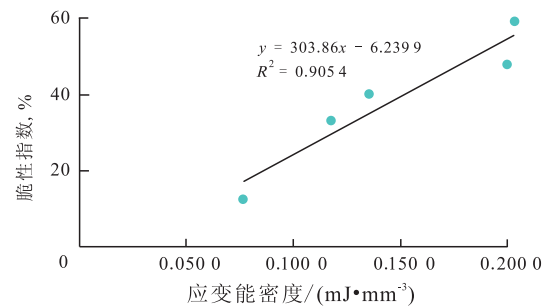


图4 煤岩的脆性指数与应变能密度关系

Fig. 4 Relation between coal brittleness index and strain energy density

性指数呈增加的趋势,这与页岩计算结果恰好相反。这表明式(4)计算的煤岩脆性指数不同于页岩,其值越高,煤岩越不容易破坏。但基于最小能量原理,即在低应变能密度下(吸收较低的能量)煤岩容易发生破坏的,则有利于复杂缝的形成。为此,根据以上计算结果,考虑常规用脆性指数表征岩石的破碎能力,对原煤岩脆性指数公式(4)进行了修正,修正结果如下所示:

$$\begin{aligned}
 YM_{\text{NcBRIT}} &= \left( 1 - \frac{YM_c - YM_{c \min}}{YM_{c \max} - YM_{c \min}} \right) \times 100 \\
 PR_{\text{NcBRIT}} &= \left( 1 - \frac{PR_c - PR_{c \max}}{PR_{c \min} - PR_{c \max}} \right) \times 100 \quad (5) \\
 BRIT_{\text{Nc}} &= \frac{YM_{\text{NcBRIT}} + PR_{\text{NcBRIT}}}{2}
 \end{aligned}$$

式中: $YM_{\text{NcBRIT}}$ 为改进均一化后的杨氏模量,无量纲; $PR_{\text{NcBRIT}}$ 为改进均一化后的泊松比,无量纲; $BRIT_{\text{Nc}}$ 为改进后的煤岩脆性指数,%。

改进后的煤岩脆性指数与应变能密度的关系见图5。

通过修正,应变能密度与煤岩修正脆性指数呈指数递减关系,该规律与页岩的相匹配。也就是应变能密度越低,破坏脆性指数越高,越容易形成缝网。

### 3 实例分析

目前,活性水压裂依然是我国煤层气开发的主体压裂技术。沁水盆地是我国商业开发效果较好的区块。该区煤岩以中高阶煤岩类型为主,低孔、低

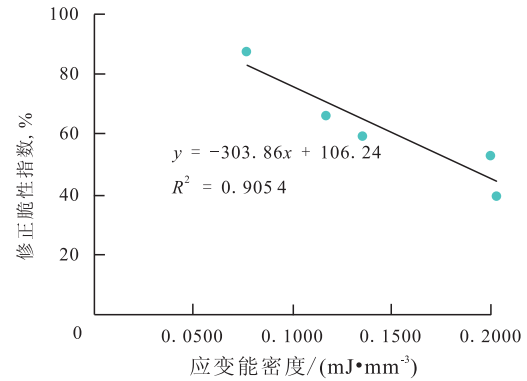


图5 修正后煤岩脆性指数与应变能密度关系  
Fig. 5 Relation between coal brittleness index and strain energy density after correction

渗。通过压裂改造后形成一定煤层气解吸区域,从而达到增产的目的。煤岩脆性计算可作为煤层压裂开发的指导参数。改造体积是体积压裂的重要参数,在一定经济条件下,液量规模越大改造体积越大。煤层压裂后,裂缝形态见图6。因此,假设煤层通过水力压裂后,压裂液在储层形成近似椭球形态,即形成椭球状压裂改造体积(SRV)。

为此可根据椭球体积计算公式,根据压裂后裂缝监测结果近似计算体积压裂的SRV,如公式:

$$SRV = \frac{4}{3} \pi abc \quad (6)$$

式中: $a$ 为裂缝监测半缝长,m; $b$ 为裂缝水平波及一侧宽度,m; $c$ 为半缝高,m。

从现场选择六口带有裂缝监测及测井数据的压裂井。六口井储层深度分布为634 ~ 1 216 m,压裂液规模为250 ~ 1 000 m<sup>3</sup>。根据裂缝监测结果计算出储层改造体积,并换算成单位压裂液下的改造体

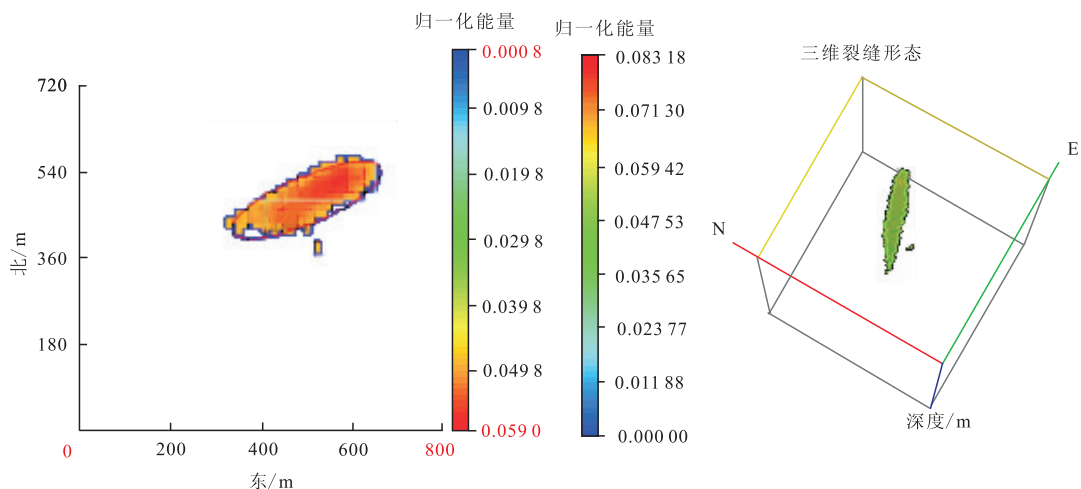


图6 压裂裂缝裂缝形态  
Fig. 6 Fracture morphology

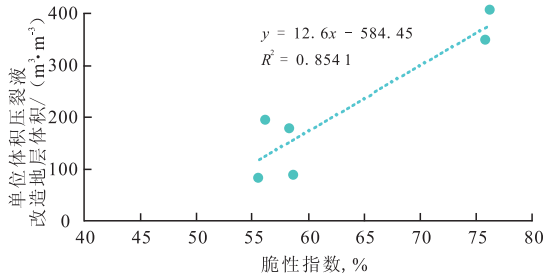


图7 煤岩脆性指数与单位体积压裂液改造体积的关系

Fig. 7 Relation between coal rock brittleness index and stimulated reservoir volume by unit fracturing fluid

积。最后建立6口井单位压裂液改造体积与煤岩脆性指数的关系(图7)。

计算结果表明,修正后的煤岩脆性指数与单位液量改造体积呈近似线性关系,即脆性指数越高,单位液量下改造体积越大。同时在计算中发现,压裂液规模越大压裂裂缝的水平波及宽度越大。因此,可利用所计算的煤岩脆性指数优选压裂煤层,对煤层气的有效开发有着很好的指导意义。当然,基于现场实例计算的样本数量有限,该方法有待于进一步验证。此外,在体积改造过程中,影响裂缝改造体积的客观地质因素不仅仅与煤岩的力学特征有关,还与煤岩裂缝发育情况、煤岩变质程度及煤储层的地应力有关。

## 4 结语

1) 体积压裂可在煤层中形成一定规模的裂缝网络,有效提高煤层气的解吸速度,改善煤层气的渗透性,达到增产的效果。脆性指数是评价体积压裂是否可行的关键参数,因煤岩具有低杨氏模量和高泊松比的力学特征,所以其脆性指数的计算方法有别于页岩和砂岩。

2) 页岩脆性指数越高,压后产生缝网的概率越高,而与其对应的应变能密度越低,即同等条件下,脆性指数高的页岩可在低能量下发生破坏。基于页岩应变能密度与脆性指数的理论,经修正得到煤岩脆性指数的计算方法,结果表明:煤岩应变能密度越低,其脆性指数越高。

3) 煤岩体积压裂后的储层改造体积近似椭球状。实例计算显示,煤岩脆性指数越高,单位压裂液下煤层的改造体积越大,二者具有很好的相关性。同等压裂规模下,脆性指数越高,越有利于复杂缝网

的形成。而在相近脆性指数下,压裂液规模越大,单位体积压裂液的储层改造体积越大。

### 参考文献

- [1] 刘成林,朱杰,车长波,等.新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J].天然气工业,2009,29(11):130-132.
- [2] 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.
- [3] 张培河.影响我国煤层气可采性主要储层参数特征[J].天然气地球科学,2007,18(6):880-884.
- [4] 邓泽,康永尚,刘洪林,等.开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J].煤炭学报,2009,34(7):947-951.
- [5] 冯三利,叶建平.中国煤层气勘探开发技术研究进展[J].中国煤炭地质,2003,15(6):19-23.
- [6] 王红岩,刘洪林,赵庆波,等.煤层气富集成藏规律[M].北京:石油工业出版社,2005.
- [7] 刘贻军,娄建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J].天然气工业,2004,24(1):68-71.
- [8] 李景明,巢海燕,李小军,等.中国煤层气资源特点及开发对策[J].天然气工业,2009,29(4):9-13.
- [9] 张亚蒲,杨正明,鲜保安.煤层气增产技术[J].特种油气藏,2006,13(1):95-98.
- [10] 饶孟余,杨陆武,冯三利,等.中国煤层气产业化开发的技术选择[J].特种油气藏,2005,12(4):1-4.
- [11] Jeffrey R G, Vlahovic W, Doyle R P, et al. Propped fracture geometry of three hydraulic fractures in Sydney Basin coal seams [C]// paper SPE-50061-MS presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 12-14 October 1998, Perth, Australia.
- [12] 李道品.低渗透油田开发[M].北京:石油工业出版社,1999:2-16.
- [13] 傅雪梅,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007:158-159.
- [14] 吴奇,胥云,刘玉章,等.美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示[J].石油钻采工艺,2011,33(2):1-7.
- [15] 吴奇,胥云,王晓泉,等.非常规油气藏体积改造技术—内涵,优化设计与实现[J].石油勘探与开发,2012,39(3):352-358.
- [16] 陈作,薛承瑾,蒋廷学,等.页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议[J].天然气工业,2010,30(10):30-32.
- [17] Mayerhofer M J, Lonon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated reservoir volume?[J]. Society of Petroleum Engineers, 2010, 25(1): 89-98.
- [18] 李增学,魏久传,刘莹.煤地质学[M].北京:地质出版社,2005:15-25.
- [19] 刘恩龙,沈珠江.岩土材料的脆性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3449-3453.
- [20] 冯涛,谢学斌,王文星,等.岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性

- 系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18-19.
- [21] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [22] Xiaochun Jin, Subhash N. Shah, Jean-Claude Roegiers, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs: An integrated petrophysics and geomechanics approach[C]// paper SPE-168589-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February 2014, The Woodlands, Texas, USA.
- [23] William Vincent Grieser, James M. Bray. Identification of production potential in unconventional reservoirs[C]// paper SPE-106623-MS presented at the Production and Operations Symposium, 31 March-3 April 2007, Oklahoma City, Oklahoma, USA.
- [24] Rickman R, Mullen M, Petre E et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]// paper SPE-115258-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008, Denver, Colorado, USA.
- [25] Goktan R M, Yilmaz N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency[J]. Journal-South african institute of mining and metallurgy, 2005, 105(10): 727-732.
- [26] 路艳军. 煤岩体积压裂机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [27] 时贤, 程远方, 蒋恕, 等. 页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3 439-3 445.
- [28] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 603-2 608.
- [29] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨, 等. 试验机弹性储能对岩石力学性能测试的影响[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 51-55.
- [30] 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[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 100-103.
- [31] 李俊乾, 刘大猛, 卢双舫, 等. 中高煤阶煤岩弹性模量及其影响因素试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 102-108.

(编辑 尹淑容)

(上接第57页)

主次关系, 消除了盲目性与主观性, 引入模糊层次分析法确定各因素的权重, 使决策结果更加客观实际。

2) 实例井计算验证了本文建立的相关系数+模糊层次分析法的有效性, 决策结果与实际增注效果相符, 该方法可有效指导注水并解调联作选井选层, 大幅提高解调联作的成功有效率。

3) 本文建立的方法可用于其它区块解调联作井层的选择, 并在其它领域有广泛的用途, 如酸化压裂井层选择, 具有一定的推广应用价值。

#### 参考文献

- [1] 黄波, 刘福海, 刘义刚, 等. 调剖技术在渤海油田的应用[C]// 中国石油学会全国油田注水技术研讨会. 2005.
- [2] Song Q, Sun Y, Zhou J. Quantifying the reservoir heterogeneity: A case study of clastic reservoirs, Bohai Bay Basin, China[C]// paper SEG-2009-1760 presented at the 2009 SEG Annual Meeting, 25-30 October 2009, Houston, Texas, USA.
- [3] 刘晓光. 渤海油田酸化工艺技术[J]. 中国海上油气: 工程, 1995, 7(4): 50-56.
- [4] 彭雪飞, 冯浦涌, 黄雷, 等. 海上高温低渗油田酸化技术应用研究[J]. 海洋石油, 2008, 28(2): 73-76.
- [5] 刘平礼, 张璐, 潘亿勇, 等. 海上油田注水井单步法在线酸化技术[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014(5): 148-154.
- [6] 吴建发, 郭建春, 赵金洲. 模糊分析方法优选压裂井层[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 84-86.
- [7] 位云生, 胡永全, 赵金洲, 等. 神经网络方法在水力压裂选井评层中的应用[J]. 断块油气田, 2005, 12(4): 42-44.
- [8] 谢润成, 周文, 高雅琴, 等. 应用偏相关+灰关联方法进行致密砂岩气藏压裂地质选层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 797-800.
- [9] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
- [10] 黄晶, 李年银, 刘平礼, 等. 基于模糊物元的注水井酸化井层选择[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(8): 133-138.
- [11] 刘文超. 调剖(驱)施工设计和决策系统研究[D]. 黑龙江大庆: 东北石油大学, 2012.

(编辑 尹淑容)