



移动扫码阅读

王 磊,梁卫国.超临界  $\text{CO}_2$  压裂下煤岩体裂缝扩展规律试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):65-70.  
doi:10.13199/j.cnki.est.2019.02.011

WANG Lei, LIANG Weiguo. Experimental study on crack propagation of coal-rock mass under supercritical  $\text{CO}_2$  fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 65-70. doi:10.13199/j.cnki.est.2019.02.011

# 超临界 $\text{CO}_2$ 压裂下煤岩体裂缝扩展规律试验研究

王 磊<sup>1,2</sup>, 梁卫国<sup>1,2</sup>

(1.太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2.太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室,山西 太原 030024)

**摘要:**为了掌握超临界  $\text{CO}_2$ (简称 SC- $\text{CO}_2$ )压裂煤岩体的起裂及裂缝扩展规律,采用 TCHSFM-I 型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置进行试验,同时采集压裂孔内压力和表面裂缝数据并结合理论分析。结果表明:超临界  $\text{CO}_2$  压裂煤岩的压力时间曲线可分为 4 个阶段:空腔充填阶段、孔隙增压阶段、相变增压阶段和破坏失稳阶段;其中煤和砂质泥岩起裂压力分别为 12.32、19.63 MPa;煤 Biot 系数 0.91、脆性系数 16.95%、弹性模量 3.48 GPa,产生平行层理的水平裂缝;砂质泥岩 Biot 系数 0.69、脆性系数 47.53%、弹性模量 10.52 GPa,产生垂直层理的贯通性复杂裂缝。可见 SC- $\text{CO}_2$  压裂下煤岩裂缝起裂扩展集中于破坏失稳阶段,起裂压力较小且为水力压裂的 65%~70%,煤相比于砂质泥岩,由于其层理等弱面发育、Biot 系数大、弹性模量低、脆性系数小,未产生贯通性的复杂裂缝。

**关键词:**超临界  $\text{CO}_2$ ;压裂;起裂压力;裂缝扩展

中图分类号:TE357.12 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)02-0065-06

## Experimental study on crack propagation of coal-rock mass under supercritical $\text{CO}_2$ fracturing

WANG Lei<sup>1,2</sup>, LIANG Weiguo<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to grasp the law of the initiation and the crack propagation in fracturing coal-rock mass with supercritical  $\text{CO}_2$  (SC- $\text{CO}_2$ ), the experimental study was carried out by using TCHSFM-I large-scale true-triaxial simulation device for fracturing and seepage and by collecting pressure and surface cracks data, combined with theoretical analysis. The results showed that the pressure-time curves of fracturing coal-rock with supercritical  $\text{CO}_2$  could be divided into four stages: cavity-filling stage, pore pressurization stage, phase-transiting pressurization stage and destabilization failure stage. The initiation pressure values of coal and sandy mudstone initiation were 12.32 MPa and 19.63 MPa respectively. The coal, with its Biot coefficient of 0.91, brittleness coefficient of 16.95% and elastic modulus of 3.48 GPa, produced horizontal cracks parallel to the bedding; while the sandy mudstone, with its Biot coefficient of 0.69, brittleness coefficient was 47.53% and elastic modulus of 10.52 GPa, produced connective and complex cracks perpendicular to the bedding. It could be seen that the initiation of fracturing with SC- $\text{CO}_2$  fracturing was mainly concentrated in the destabilization failure stage. The initiation pressure of was 65%~70% of that of hydraulic fracturing. Compared with sandy mudstone, coal did not produce complex-through cracks for its development of stratification and joint weakness, large Biot coefficient, low elastic modulus and small brittleness coefficient.

**Key words:** supercritical  $\text{CO}_2$ ; hydraulic fracturing; initiation pressure; crack propagation

收稿日期:2018-07-28;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(51225404)

作者简介:王 磊(1991—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生。

通讯作者:梁卫国(1972—),男,山西孟县人,教授,博士生导师。E-mail:liangweiguo@tyut.edu.cn

## 0 引言

近年来美国、加拿大、澳大利亚等发达国家对煤层气、页岩气资源的成功开采,使得该类非常规油气资源的开采技术广泛引起人们的关注<sup>[1-3]</sup>。众所周知,压裂技术是储层增透改造的关键技术<sup>[4]</sup>,然而,煤层气等非常规油气藏储层地质条件复杂,储层保护困难,勘探开发难度较大,传统的水压致裂技术难以达到高效、绿色开发储层的需求<sup>[5-7]</sup>。因此,迫切需要一种新型压裂介质,既能高效压裂储层,又能最大限度降低储层物性伤害,最终提高油气采收率。研究表明:超临界  $\text{CO}_2$ (简称  $\text{SC}-\text{CO}_2$ )具有近似于流体的密度、接近气体的黏度、扩散系数较大、表面张力接近于零等独特的优点,使其成为一种非常有应用前景的非常规油气藏开发的压裂介质<sup>[8-10]</sup>。近几年,国内外学者在  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂试验研究方面展开了一系列工作:王海柱等<sup>[11]</sup>提出了利用  $\text{SC}-\text{CO}_2$  对页岩储层进行压裂改造,能使储层产生更多微小裂纹,有助于储气抽采;ISHIDA 等<sup>[12]</sup>进行了  $\text{SC}-\text{CO}_2$  和液态  $\text{CO}_2$  压裂花岗岩的试验研究,结果表明:在相同的应力状态及相同的流速条件下,  $\text{SC}-\text{CO}_2$  和液态  $\text{CO}_2$  的起裂压力都比水力压裂所需的压力要小;CHEN 等<sup>[13]</sup>对比研究了 3 种不同黏度的流体(水、 $\text{SC}-\text{CO}_2$ 、稠油)对花岗岩压裂效果的影响,结果表明  $\text{SC}-\text{CO}_2$  由于黏度最低,形成的裂隙网络更复杂;鲜学福等<sup>[14]</sup>根据  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂页岩能增加储层渗透性的研究思路,自主研制了  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂增渗的试验装置;陈立强等<sup>[15]</sup>对  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂起裂压力建立了研究,得出  $\text{SC}-\text{CO}_2$  流体的起裂压力比常规水力压裂起裂压力低 75.5%;文虎等<sup>[16]</sup>等利用液态  $\text{CO}_2$  进行煤层压裂增透现场试验,结果表明压裂半径可达 10~20 m,且与水力压裂相比在压裂安全性、时间和效果方面存在技术优势;赵志恒等<sup>[17]</sup>阐述了  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂增产原理,同时结合清水压裂对室内实验进行了总结和分析并指出:由于试验条件简易,要借鉴其试验方法改变试样尺寸和应力条件,对裂纹形态进行大量试验研究;刘真光等<sup>[18]</sup>研究了非线性滤失条件下,  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂液的滤失主要受注入压力、压差、裂缝开启度及压裂液黏度等因素的影响;ZHOU Junping 等<sup>[19]</sup>结合 CT 扫描技术分析了  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂页岩的裂纹扩展规律,并探究了有效应力、孔隙压力、压力方向对裂缝渗透率的影响;刘国军等<sup>[20]</sup>结合声发射监测技术、CT 扫描技术,分析了压裂页岩过程中的裂纹扩展规律以及压裂前后的渗透率,研究指出  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂能够形成复杂裂隙网络,压裂后页岩渗透率可显著提高;ZHANG Xinwei 等<sup>[21]</sup>结合声发射监测技术、CT 扫描技术分析了压裂页岩、砂岩过程中的起裂压力和裂纹扩展规律,结果表明相对于水压裂,  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂的起裂压力减小 50% 以上,形成表面粗糙的复杂裂缝;孙可明等<sup>[22-23]</sup>进行了  $\text{SC}-\text{CO}_2$  气爆致裂实验发现裂纹起裂压力低且高压持续时间长,并且宏观裂隙的数目和累计长度与爆破压力满足 Logistic 函数关系。

目前,研究成果主要集中于页岩的  $\text{SC}-\text{CO}_2$  气爆致裂试验以及现场液态  $\text{CO}_2$  压裂煤层增透试验,针对煤系地层煤岩体的  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂实验研究相对较少。笔者在前人的研究基础上,通过 TCHSFM-I 型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置,研究相同应力条件下  $\text{SC}-\text{CO}_2$  压裂不同煤岩体试件的压裂结果,对比压裂后的裂缝扩展规律,寻找有利于提高压裂效果的压裂层位。

## 1 压裂理论依据

相同应力约束条件下,压裂结果的优劣取决于煤岩体的特性和压裂介质。3 种试验试样中,水泥作为参照组,可近似认为正交各向同性的试样,砂质泥岩视为平行层理与垂直层理性质不同的试样,而煤视为平行层理与垂直层理性质不同并且层理、节理、割理等弱面极度发育的试样。试验中岩石的弹性模量与泊松比可用来计算岩石的脆性指数。脆性指数在一定程度上可以表征储层的可压裂性,反映岩石发生破裂前的瞬间变化快慢(难易)程度。脆性指数越高,越容易形成网状裂缝;越低则容易形成单缝<sup>[24]</sup>。对于高弹性模量、高脆性指数的岩层突变破裂时,外力做功和压裂液势能转化为岩体突变释放的能量,产生大量微裂缝,微裂缝扩展延伸形成贯通的裂缝网络结构<sup>[25]</sup>。计算公式为

$$B = 80 + \frac{0.6895E - 28\nu - 1}{14} \times 10^2 \quad (1)$$

式中:  $B$  为脆性系数,%;  $E$  为杨氏模量,  $10^4 \text{ MPa}$ ;  $\nu$  为泊松比。

将表 1 数据代入式(1),得试件垂直层理方向的脆性系数:煤为 27.25%,砂质泥岩为 47.53%,水泥为 23.18%;层理方向的脆性系数:煤为 16.95%、砂质泥岩为 35.47%、水泥为 23.18%。可见,砂质泥岩压裂相同条件下,能够产生更复杂裂缝结构。

$\text{SC}-\text{CO}_2$  作为压裂介质,在压裂时与传统的水力压裂不同,其在试件中的渗透性,不得不考虑在内。即使在致密的低孔隙度的岩层中,  $\text{SC}-\text{CO}_2$  仍能表现

出较高的渗透性,沟通孔隙、裂隙等自然通道。

表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters of specimens

试样	加载方向	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	断裂韧性/ (MPa · m <sup>1/2</sup> )
煤	垂直层理	12.29	1.46	3.48	0.23	0.23
	平行层理	6.10	1.69	0.66	0.28	0.16
砂质泥岩	垂直层理	49.62	3.21	10.52	0.13	1.84
	平行层理	47.67	12.63	6.58	0.19	1.12
浇筑水泥	—	27.13	2.13	2.63	0.25	0.19

一般传统的水力压裂起裂压力值计算如下(文献[26]中规定拉应力为正)为

$$P_w = -3\sigma_h + \sigma_H + \sigma_T \quad (2)$$

而对于可渗透压裂介质,有

$$S_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} - P_0 \quad (3)$$

$$S_{\theta\theta} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_0 + P_w - \alpha P_w \frac{1 - 2v}{1 - v} \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 3\sigma_h - \sigma_H + P_w \left( 2 - \frac{1 - 2v}{1 - v} \alpha \right) \quad (5)$$

当  $\sigma_T = \sigma_{\theta\theta}$  时,产生初始裂缝,起裂压力为

$$P_w = \frac{-3\sigma_h + \sigma_H + \sigma_T}{2 - \frac{1 - 2v}{1 - v} \alpha} \quad (6)$$

式中: $P_w$  为压力; $\sigma_h$  为最小水平主应力; $\sigma_H$  为最大水平主应力; $\sigma_T$  为抗拉强度; $S_{\theta\theta}$  为压裂孔壁周向应力; $\sigma_{\theta\theta}$  为压裂孔壁周向有效应力; $P_0$  为原始孔隙压; $\alpha$  为 Biot 系数; $v$  为泊松比。

基于此,理论上 SC-CO<sub>2</sub> 压裂起裂压力低于传统水力压裂。此外,由于煤层在层理方向和垂直层理方向表现出的渗透性具有较大的差异,含有面割理渗透率约为垂直层理方向的 11 倍<sup>[27]</sup>,使得压裂过程中极有可能出现垂直层理的有效应力提前达到该方向上的抗拉强度,产生垂直于压裂孔、平行于层理方向的水平裂缝。

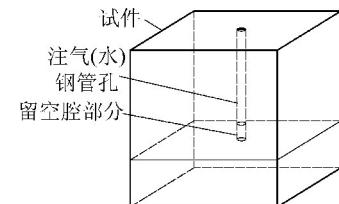
## 2 试件及试验方案

试验选用煤、砂质泥岩、浇筑水泥作为层理、节理等弱面发育程度不同的试件,取自沁水煤田 15 号煤层煤块和其顶板岩块,尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm,部分煤岩试件表面残损,用水泥稍作修补,满足标准试件尺寸要求。在试件上表面预制  $\phi 6$  mm × 70 mm 的裸孔作为压裂孔(轴线方向垂直于层理面),将  $\phi 3$  mm 的高强度压裂管放入,利用高强度耐

高温密封胶封孔,孔底留 10 mm 的自由段,用来产生初始裂隙,如图 1 所示。



(a) 实体试件



(b) 内部结构示意

图 1 试件及其内部结构示意

Fig.1 Specimens and illustration for the internal structure of the specimens

试验采用 TCHSFM-I 型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置进行,该装置包括计算机采集系统、气体制冷系统、气体恒流增压系统、预热系统、保温系统及真三轴伺服加载系统等,如图 2 所示。

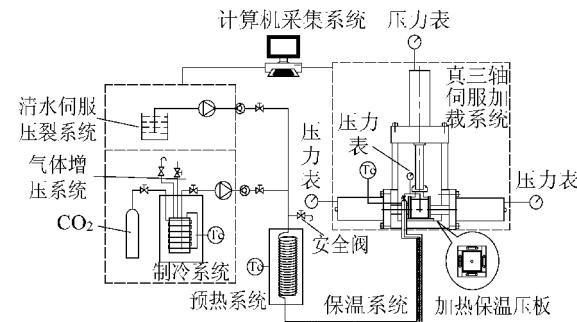


图 2 TCHSFM-I 型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置及其示意

Fig.2 Illustration for TCHSFM-I large-scale true-triaxial device for fracturing and seepage

为了对比 SC-CO<sub>2</sub>(临界压力 7.38 MPa, 温度 31.4 °C)压裂不同试样的结果,将试样置于相同的三轴压力条件下,试验温度统一设置为 50 °C,SC-CO<sub>2</sub>注入速率恒定设为 20 ml/min,试验方案条件为:压裂液 SC-CO<sub>2</sub>;三向压力( $\sigma_H$ 、 $\sigma_V$ 、 $\sigma_h$ )分别为 14、12、10 MPa。具体试验步骤如下:

1) 将试件与传压板放入压力室,进行真三轴伺服加载。综合考虑试件强度、SC-CO<sub>2</sub> 临界压力,最大水平压力  $\sigma_h$ 、垂直压力  $\sigma_V$ 、最小水平压力  $\sigma_h$  分别设为 10、12、14 MPa。加载过程中,先三轴同步加载,保证试件不被压坏;当达到最小水平压力值时,逐步交替施加垂直压力、最大水平压力到设定值。

2) 启动传压板内的加热管并设定温度为50℃,对试件进行加热1 h。启动气体预热系统、气体管路保温系统,温度设定为50℃。确保试件和CO<sub>2</sub>气体在试验过程中温度处于临界温度内。

3) 开启CO<sub>2</sub>气体增压系统,将CO<sub>2</sub>气体沿加热管路通入试件,同时采集起裂压力、裂纹扩展等参数,待压力值稳定不变,结束试验。

### 3 试验结果及分析

图3为SC-CO<sub>2</sub>压裂过程中压力P随时间t变化曲线。3条曲线变化趋势基本一致,可以明显地划分为4个阶段:空腔充填阶段、孔隙增压阶段、相变增压阶段和破坏失稳阶段。

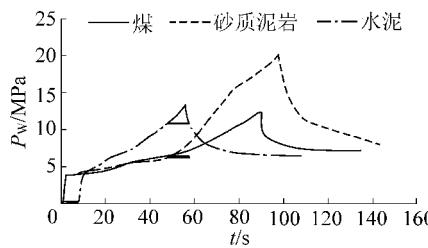


图3 压力时间曲线

Fig.3 Curves of pressure versus time

1) 空腔充填阶段。CO<sub>2</sub>气体充填预制压裂孔空腔体积以及孔壁表面较大缝隙,压力响应快增压迅速,在4 MPa左右均开始进入孔隙空间体积。

2) 孔隙增压阶段。CO<sub>2</sub>气体进入试件孔隙空间,因渗透特性而呈现平缓增压现象,其中水泥试件压力增长较快,煤和砂质泥岩压力增长较慢,因为水泥为人工浇筑试件,其渗透性不同于存在天然层理的煤和砂质泥岩试件。

3) 相变增压阶段。CO<sub>2</sub>气体发生相变,由气态变为超临界态,在压力值约7.38 MPa左右位置处压裂孔周围小范围内起裂扩展情况,因而在试件达到强度极限时,起裂和扩展几乎同时发生,在压力时间曲线中集中表现如图3所示的破坏失稳阶段。这不同于文虎<sup>[16]</sup>等现场压裂试验现象:因裂纹的扩展需经历一定的时间,可根据压力和流量随时间波动情况,将裂纹扩展划分不同阶段。

4) 破坏失稳阶段。CO<sub>2</sub>压力值达到试件的峰值破坏强度,试件破坏失稳,压力曲线骤降。

由于试验所选试件尺寸较小,主要用于观测压裂孔周围小范围内起裂扩展情况,因而在试件达到强度极限时,起裂和扩展几乎同时发生,在压力时间曲线中集中表现如图3所示的破坏失稳阶段。这不同于文虎<sup>[16]</sup>等现场压裂试验现象:因裂纹的扩展需经历一定的时间,可根据压力和流量随时间波动情况,将裂纹扩展划分不同阶段。

由图3可知,煤、砂质泥岩、水泥的起裂压力分别为12.32、19.63、12.59 MPa,结合表1试件参数代入式(6)可粗略估计3种试件Biot系数 $\alpha=0.91$ 、0.69、0.87,其反映了相同应力条件下,煤的孔隙度及其连通程度更大,层理、节理等弱面更发育。将 $\alpha$ 代入式子 $1/(2 - \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}\alpha)$ 可得,对于煤、砂质泥岩、水泥试件,SC-CO<sub>2</sub>压裂起裂值分别为传统水力压裂起裂值的69.44%、68.03%、70.42%。

试件表面裂纹扩展情况如图4—图6所示。图4中试件表面均产生了较为复杂的裂纹结构,包括沿最大水平主应力方向的主裂纹和沿主裂纹分叉且偏离主裂纹方向的次生裂纹。其中煤试件表面主裂纹在扩展过程中,产生的次生裂纹沿层理方向扩展,形成平行层理的水平裂纹(图4a、图4c),削弱了主裂纹扩展能力,致使主裂纹未能扩展到煤试件上下表面(图4b);与文虎<sup>[16]</sup>等现场试验的裂纹扩展结果相似:CO<sub>2</sub>在煤层中压裂裂纹沿压裂孔径向和轴向扩展。

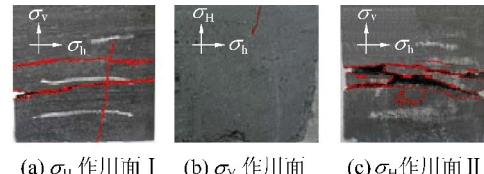


图4 煤试件表面裂纹

Fig.4 Cracks on surface of coal specimen

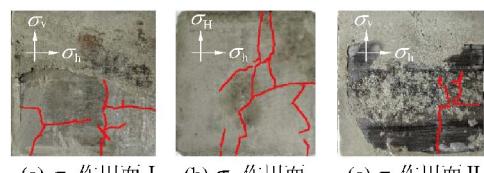


图5 砂质泥岩试件表面裂纹

Fig.5 Cracks on surface of sandy mudstone specimen

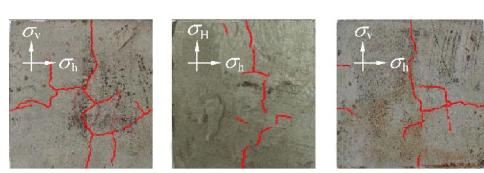


图6 水泥试件表面裂纹

Fig.6 Cracks on surface of cement specimen

砂质泥岩试件表面同样出现了沿层理方向的裂纹,但在扩展过程中方向发生偏转,仍沿最大主应力方向,形成新的主裂纹(图5a、图5c),保证了主裂纹的扩展能力,致使主裂纹扩展到试件下表面,并形成多条次生裂纹,而且裂纹连通性高,间断少(图5b);水泥试件由于其表现出一定的正交各向同性且内部

存在微孔隙,在主裂缝两次产生了多条次生裂缝(图6a、图6c),并扩展到试件上下表面,但这些表面裂缝连通性低,出现多处间断(图6b)。根据ZHANG Xinwei<sup>[21]</sup>等试验结果,SC-CO<sub>2</sub>压裂页岩和砂岩时,由于页岩存在层理,表面产生明显的平行层理裂缝且裂缝数量、类型多,与本文煤、砂质泥岩结果相同;砂岩视为各向同性岩体,表面产生的裂缝较为单一,无平行层理裂缝,与本文水泥结果略有不同,主要因为砂岩为天然致密的岩体,内部微孔隙较少。

对比上述结果,分析认为SC-CO<sub>2</sub>压裂,压力达到试件峰值强度时,试件压裂孔内壁产生初始裂缝,流体压力下降且发生相变,体积急剧膨胀,能量瞬间释放,裂缝迅速扩展。起裂压力均小于传统水力压裂,为60%~70%,根据最大拉应力准则起裂模型<sup>[15]</sup>,理想条件下起裂压力较传统水力压裂减少75.5%,二者较为接近,其原因在于CO<sub>2</sub>的特性受温度影响较大且试件不可能绝对均质并满足线弹性理论。在三向应力 $\sigma_H$ 、 $\sigma_V$ 、 $\sigma_h$ 作用下,理论上裂缝沿最大主应力 $\sigma_H$ 方向扩展,而且裂缝释放能量越大,则扩展越远,连通性越高,间断越少;当遇到孔隙、裂隙、层理等缺陷,可能改变裂缝扩展方向甚至诱发多条、多种裂缝。试验中 $\sigma_H$ 、 $\sigma_V$ 、 $\sigma_h$ 相差较小,试件中存在层理、节理等强度较小的弱面和较大的孔隙空间,压裂过程中提前达到该处的峰值强度值,裂缝发生转向,削弱原有裂缝扩展能力。因此,煤相比于砂质泥岩、水泥,层理、节理等弱面和大孔隙更加发育,裂缝在层理位置处发生转向并沿层理扩展,产生多条水平裂缝,裂缝在垂直层理方向扩展时释放能量少,未形成贯穿性的裂缝。砂质泥岩相比于煤、水泥,虽存在天然节理,但沿垂直层理方向裂缝扩展释放能量高,保证了裂缝的扩展方向,裂缝连通性大,间断少。而水泥作为无层理充满内部孔隙的试件,出现更多的分叉裂缝。可见,SC-CO<sub>2</sub>压裂煤岩体时,弹性模量和脆性系数越大,裂缝连通性越好;层理、节理等弱面越发育,裂缝越易发生转向;微孔隙有助于产生分叉裂缝,形成复杂的裂缝网络结构。那么,采用SC-CO<sub>2</sub>压裂技术开采煤层气时,当煤层层理、节理等弱面极其发育,应力状态为 $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ 且相差较小时,压裂位置可选择设在顶底板岩层中间接压裂煤层来增加煤层渗透性。

## 4 结 论

1)相比于煤、水泥,砂质泥岩由于其高弹性模量、高脆性系数,使用SC-CO<sub>2</sub>压裂能够产生复杂的贯通性网络结构裂缝。

2)SC-CO<sub>2</sub>压裂不同煤岩体试件过程相似,可根据压力时间曲线划分为四个阶段:空腔充填阶段、孔隙增压阶段、相变增压阶段和破坏失稳阶段。起裂和扩展主要发生在破坏失稳阶段且起裂值都比传统水力压裂起裂值小。

3)SC-CO<sub>2</sub>压裂不同煤岩体过程中,裂缝扩展与层理、节理等弱面的发育程度有着密切关系,层理、节理等弱面可以影响裂缝扩展方向,产生平行于层理的水平裂缝,微孔隙可以诱发分叉裂缝。

## 参考文献(References):

- [1] ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 182-196.
- [2] IAN Palmer. Coalbed methane completions: a world view [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3/4): 184-195.
- [3] PAN Zhejun, WOOD David A. Coalbed methane (CBM) exploration, reservoir characterization, production, and modeling: a collection of published research(2009—2015) [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 26: 1472-1484.
- [4] 张春华,张勇志,李江涛,等.深部煤层单段/多段水力压裂增透效果对比[J].煤炭科学技术,2017,45(6):50-54,175.  
ZHANG Chunhua, ZHANG Yongzhi, LI Jiangtao, et al. Comparison analysis on permeability improved effect of single and multi section hydraulic fracturing in deep depth seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 50-54, 175.
- [5] 张金才,尹尚先.页岩油气与煤层气开发的岩石力学与压裂关键技术[J].煤炭学报,2014,39(8):1691-1699.  
ZHANG Jincai, YIN Shangxian. Some technologies of rock mechanics applications and hydraulic fracturing in shale oil, shale gas and coalbed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1691-1699.
- [6] 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.
- [7] 王永辉,卢拥军,李永平,等.非常规储层压裂改造技术进展及应用[J].石油学报,2012,33(S1):149-158.  
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 149-158.
- [8] ITO Takatoshi. Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media: Rock [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7): 1753-1762.
- [9] SCHIMMEL D R, ZOBACK M D. Infiltration effects in the tensile rupture of thin walled cylinders of glass and granite: implications for the hydraulic fracturing breakdown equation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(3): 289-303.
- [10] MIDDLETON Richard, CAREY Bill, CURRIER Robert P, et al. Shalegas and non-aqueous fracturing fluids: opportunities and chal-

- lenges for supercritical CO<sub>2</sub> [J]. *Applied Energy*, 2015, 147: 500–509.
- [11] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界CO<sub>2</sub>开发页岩气技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 30–35.
- WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, LI Gensheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO<sub>2</sub> [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 30–35.
- [12] ISHIDA Tsuyoshi, AOYAGI Kazuhei, NIWA Tomoya, et al. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO<sub>2</sub> [J]. *Geophysics Research Letters*, 2012, 39(3): 1–6.
- [13] CHEN Youqing, NAGAYA Yuya, ISHIDA Tsuyoshi. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1455–1461.
- [14] 鲜学福, 殷宏, 周军平, 等. 页岩气藏超临界CO<sub>2</sub>致裂增渗实验装置研制[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 1–8.
- XIAN Xuefu, YIN Hong, ZHOU Junping, et al. A new experimental apparatus for fracturing shale gas reservoir to enhance permeability with supercritical carbon dioxide [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2015, 37(3): 1–8.
- [15] 陈立强, 田守嶒, 李根生, 等. 超临界CO<sub>2</sub>压裂起裂压力模型与参数敏感性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 125–131.
- CHEN Liqiang, TIAN Shouceng, LI Gensheng, et al. Initiation pressure models for supercritical CO<sub>2</sub> fracturing and sensitivity analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 125–131.
- [16] 文虎, 李珍宝, 王振平, 等. 煤层注液态CO<sub>2</sub>压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2793–2799.
- WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO<sub>2</sub> fracturing process for increasing permeability and the characteristics of crack propagation in coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2793–2799.
- [17] 赵志恒, 李晓, 张搏, 等. 超临界二氧化碳无水压裂新技术实验研究展望[J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(2): 58–64.
- ZHAO Zhiheng, LI Xiao, ZHANG Bo, et al. Experimental study on supercritical CO<sub>2</sub> fracturing [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2016, 39(2): 58–64.
- [18] 刘真光, 邱正松, 钟汉毅, 等. 页岩储层超临界CO<sub>2</sub>压裂液滤失规律实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 113–117.
- LIU Zhenguang, QIU Zhengsong, ZHONG Hanyi, et al. Study on filtration property of hypercritical fracturing fluid for shale reservoir [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(1): 113–117.
- [19] ZHOU Junping, HU Nan, JIANG Yongdong, et al. Supercritical carbon dioxide fracturing in shale and the coupled effects on the permeability of fractured shale: an experimental study [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36(1): 369–377.
- [20] 刘国军, 鲜学福, 周军平, 等. 超临界CO<sub>2</sub>致裂页岩实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 694–701.
- LIU Guojun, XIAN Xuefu, ZHOU Junping, et al. Experimental study on the supercritical CO<sub>2</sub> fracturing of shale [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 694–701.
- [21] ZHANG Xinwei, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Experimental study on fracture initiation and propagation in shale using super critical carbon dioxide fracturing [J]. *Fuel*, 2017, 190: 370–378.
- [22] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界CO<sub>2</sub>气爆致裂规律研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473–483.
- SUN Keming, XIN Liwei, WU Di, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion under the impact of initial stress [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(5): 473–483.
- [23] 孙可明, 辛利伟, 张树翠, 等. 超临界CO<sub>2</sub>气爆致裂规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 27–31.
- SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 38(5): 473–483.
- [24] 肖孙芸, 张冲, 张杰, 等. 基于阵列声波资料评价致裂砂岩可压裂性[J]. 中州煤炭, 2016(4): 125–128.
- XIAO Sunyun, ZHANG Chong, ZHANG Jie, et al. Fractability evaluation of tight sandstone reservoirs based on array acoustic data [J]. *Zhongzhou Coal*, 2016(4): 125–128.
- [25] 赵丹, 王婷婷, 赵万春, 等. 煤岩体压裂损伤突变演化模型的研究[J]. 中州煤炭, 2016(4): 118–121.
- ZHAO Dan, WANG Tingting, ZHAO Wanchun, et al. Study on damage mutation evolution model of coal and rock mass fracturing damage [J]. *Zhongzhou Coal*, 2016(4): 118–121.
- [26] HAIMSON B, FAIRHURST C. Initiation and extension of hydraulic fracturing in rocks [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1967, 7(6): 310–318.
- [27] 赵宇, 张玉贵, 岳高伟, 等. 煤层渗透性各向异性规律的实验研究[J]. 中国煤层气, 2017, 14(1): 32–36.
- ZHAO Yu, ZHANG Yugui, YUE Gaowei, et al. Experimental study on anisotropic permeability of coal seam [J]. *China Coalbed Methane*, 2017, 14(1): 32–36.