

文章编号:1007-9432(2019)04-0485-07

水与超临界 CO₂ 致裂煤体的压裂特征 与增渗效果对比

李 畅^{a,b}, 梁卫国^{a,b}, 侯东升^{a,b}, 姚宏波^{a,b}, 宋晓夏^a

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

摘 要:基于无水压裂思想,开展了两种压裂介质(水和超临界 CO₂)致裂煤体试验,并在原位条件下测量了压裂前后的渗透率,比较了水与超临界 CO₂ 致裂煤体的压裂特征与增渗效果。结果表明:与水力压裂相比,在同一应力条件下,超临界 CO₂ 压裂煤体的起裂压力更低、压裂曲线波动更小、所形成的裂纹数量更多、裂纹形态更为复杂;与水力压裂相似,超临界 CO₂ 压裂过程中裂纹的起裂和扩展方向受到三维应力状态与弱面(层理面、原生裂隙)的影响。与压裂前相比,在轴压 16 MPa、围压 10 MPa 下煤体经超临界 CO₂ 和水压裂后渗透率分别提高了 472 倍、34 倍,而在轴压 12 MPa、围压 10 MPa 下煤体经超临界 CO₂ 和水压裂后渗透率分别提高了 47 倍、19 倍;这说明在相同应力条件下超临界 CO₂ 压裂的增渗效果比水力压裂的增渗效果更好。

关键词:煤;压裂;超临界 CO₂;水力压裂;无水压裂;裂纹形态;渗透率

中图分类号:TD712;TE371 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2019.04.012 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Comparison of Fracturing Features and Permeability Enhancement of Coal Fractured by Water and Supercritical CO₂

LI Chang^{a,b}, LIANG Weigu^{a,b}, HOU Dongsheng^{a,b}, YAO Hongbo^{a,b}, SONG Xiaoxia^a

(a. College of Mining Engineering, b. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract:Based on the academic thought of non-aqueous fracturing, the coal cylindrical samples with different crack morphology were obtained by water and Sc-CO₂ fracturing. The permeability of coal after fracturing was measured under in-situ conditions, thus the fracturing characteristics and anti-seepage effect of water and Sc-CO₂ cracked coal is analyzed. The results show that, compared with hydraulic fracturing, under the same stress condition, Sc-CO₂ fracturing has a lower initiation pressure, the curve of pump pressure-time fluctuating less, and more complicated fracture-network; The initiation and propagation direction of fracture in Sc-CO₂ fracturing is affected by three-dimensional stress, weak planes such as bedding planes, and primary cracks. After Sc-CO₂ and water fracturing, under the axial pressure×confining pressure of 12 MPa×10 MPa, the permeability is increased by 472 times and 34 times compared with the intact coal, respectively. While the permeability is increased by 47 times and 19 times after Sc-CO₂ and water fracturing when the axial pressure×confining pressure is 16 MPa×10 MPa, respectively. Under

* 收稿日期:2019-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874206);山西省科技重大专项(MQ2016-01)

通讯作者:梁卫国(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与采矿工程方面的研究,(E-mail)liangweigu@tyut.edu.cn

引文格式:李畅,梁卫国,侯东升,等.水与超临界 CO₂ 致裂煤体的压裂特征与增渗效果对比[J].太原理工大学学报,2019,50(4):485-491.

the same stress condition, the permeability enhancement of Sc-CO₂ fracturing is better than hydraulic fracturing.

Keywords: coal; fracturing; supercritical CO₂; hydraulic fracturing; non-aqueous fracturing; crack morphology; permeability

我国埋深小于 2 000 m 的煤层中蕴藏着约 $2.982 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 的煤层气资源^[1]。煤层气资源的开发与利用对调整我国能源结构、保障煤矿安全生产、降低温室效应等具有重要意义。与其他国家相比,我国煤层渗透率普遍较低^[2],煤层气的抽采较为困难。水力压裂作为一种增渗手段,近年来被广泛应用于煤层气的开发中;但是从工业应用来看,水力压裂技术具有一定的局限性^[3-5]。为实现煤层气的高效开采,学者们提出了许多增渗方法^[6]。

二氧化碳(CO₂)压裂是近年来提出的一种非常规能源增产手段,具有储层伤害小、返排彻底、用水量较少等优点^[7]。此外,CO₂压裂在促进 CH₄解吸的同时,实现了 CO₂的封存^[8],因此具有良好的应用前景。国内外学者对 CO₂压裂、特别是超临界 CO₂(supercritical CO₂, Sc-CO₂)压裂进行了一些初步研究,前期的研究主要集中于花岗岩、页岩、砂岩等脆性岩石。ISHIDA et al^[9-10]采用 3 种压裂介质(Sc-CO₂、液态 CO₂、水)对花岗岩进行压裂,对比了 3 种压裂介质下起裂压力、裂纹形貌和声发射特征,结果表明 CO₂压裂更易于驱动裂纹起裂、扩展。卢义玉等^[11]对页岩与砂岩进行了真三轴条件下水力压裂与 Sc-CO₂压裂试验,并采用 CT 扫描对裂纹形态进行了表征,认为 Sc-CO₂压裂能形成类似体积压裂的网状裂纹。DENG et al^[12]通过压裂试验从力学机理上说明了在液态 CO₂压裂过程中,岩石本身的缺陷会发生张开和剪切滑移。此外,也有学者对 CO₂致裂煤岩体进行了试验。文虎等^[13]在煤层中进行了液态 CO₂压裂的现场试验,结果表明该技术在煤体中具有良好的应用效果;王磊等^[14]对 100 mm×100 mm×100 mm 的方形煤样进行了水力压裂与 Sc-CO₂压裂,对比了两种压裂介质下所形成的裂纹形态,发现 Sc-CO₂压裂产生的表面裂纹开度更小、裂纹形态更为复杂。

压裂能够实现对储层的改造,提升储层的渗透率。JIA et al^[15]对水力压裂与 Sc-CO₂压裂后的页岩进行了渗透率测量,结合对裂纹的粗糙度与曲折度的定量化表征,对比分析了水和 Sc-CO₂压裂页岩的增渗效果。ZHOU et al^[16]研究了页岩经 Sc-CO₂压裂后对不同吸附性气体的渗透率,认为有效

应力、基质膨胀、吸附气体导致的力学性能变化是影响渗透率的主要因素。刘国军等^[17]研究了页岩经 Sc-CO₂压裂后在不同温度、体积应力条件下的渗透率变化规律,指出压裂后页岩的渗透率受地温、地应力及其自身孔隙结构的共同影响。王兆丰等^[18]在现场利用液体 CO₂相变致裂煤体来提高瓦斯的抽采效果,结果表明:平均抽采流量有一定幅度的提高;压裂所形成的裂纹形态对渗透率具有重要影响。WANG et al^[19]采用脉冲瞬态法研究了在干燥与饱和水条件下具有 3 种裂纹形态(原生割理、纵向裂纹、横向裂纹)的无烟煤试件的渗透率,结果表明裂纹形态与水锁效应对渗透率具有重要影响。

上述研究表明,目前国内外学者对 Sc-CO₂压裂煤体的研究仍处于探索阶段,对于 Sc-CO₂作用下煤体的压裂特征与增渗效果的研究鲜有报道。基于此,笔者采用自主研发的试验装置在两种应力条件下对已测得渗透率的煤样进行水和 Sc-CO₂压裂试验,获取了具有不同裂纹形态的试件,在原位条件下测量了压裂后裂隙煤体的渗透率。在此基础上比较了不同压裂条件下的压裂曲线与裂纹形貌,探讨了压裂介质与应力条件对增渗效果的影响。试验结果可以为研究煤层气藏无水压裂提供参考。

1 试验方案

1.1 试件制备

试验所用煤样取自山西晋城寺河煤矿 3 号煤层,煤阶为无烟煤。为保证试件的均质性,试件均由同一块煤体垂直层理钻取,从中选取表面无明显裂隙的进行试验。

1.2 试验仪器

试验仪器为太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室自主研发的煤层气储层压裂-渗流装置,如图 1 所示。有关该仪器的详细介绍见文献^[14,20]。

1.3 试验参数设置

与其他压裂试验不同,本试验所选用的试件尺寸为 $d50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,试件的尺寸偏小如图 2 所示,这是因为煤体强度较低,且存在较多弱面,裂纹更易导通层理面扩展;对于尺寸过大的试件,压裂时难以形成纵向裂纹。在制备试件时,压裂孔内放有

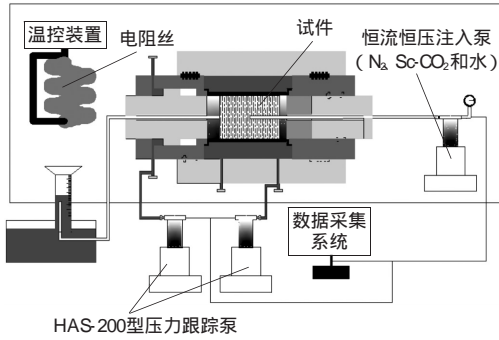


图 1 自主研发煤层气储层压裂-渗流装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-developed coalbed methane reservoir fracturing-seepage device

直径为 3 mm 的钢管,钢管与煤壁间采用高强度胶固定,以保证压裂试验的成功。需要注意的是,该钢管不仅在压裂过程中作为高压水、气的注入通道,也在渗流试验中为气体提供导流通道。

在压裂试验中,应力状态(特别是垂直应力与最大水平应力的差值)对压裂效果具有重要影响,故在相同围压(10 MPa)、不同轴压(12 MPa 和 16 MPa)下,对煤体进行水和 Sc-CO₂ 压裂试验,如表 1 所示。为保证数据可靠性,每种试验条件下进行 2 次压裂试验。

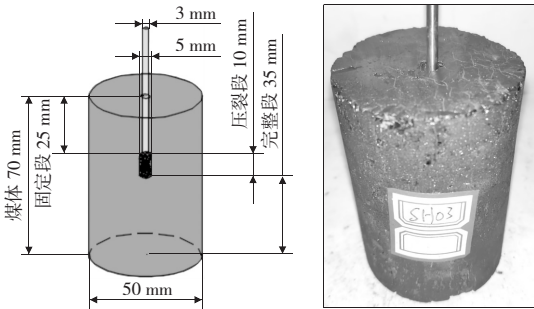


图 2 试件示意图及照片

Fig.2 Schematical and physical model of coal sample

表 1 压裂试验条件参数

Table 1 Parameters for fracturing experiment

试件编号	试件长度/mm	压裂介质	轴压/MPa
1 号	70.02	Sc-CO ₂	16
2 号	69.99	Sc-CO ₂	16
3 号	69.99	水	16
4 号	70.01	水	16
5 号	70.01	Sc-CO ₂	12
6 号	70.02	Sc-CO ₂	12
7 号	70.01	水	12
8 号	70.00	水	12

注:围压均为 10 MPa,温度为 40 °C,以下同

1.4 试验方法与步骤

1) 考虑到水分对煤样渗透率的影响,对煤体进行干燥处理。在真空干燥箱中加热试件至 60 °C,并于真空状态保温 24 h,直至试件质量不再变化。

2) 将试件放入夹持器中,采取先加轴压、再加围压的顺序,交替加载至轴压、围压均为 10 MPa,再增大轴压至设定值(12 MPa 或 16 MPa)。

3) 在轴压×围压为 12 MPa×10 MPa 下试件变形达到稳态后,采用氮气在孔隙压力为 1 MPa 时测量试件压裂前的渗透率。

4) 在轴压×围压分别为 12 MPa×10 MPa、16 MPa×10 MPa 这两种应力条件下进行水和 Sc-CO₂ 的压裂,压裂介质注入流量均为 30 mL/s. 在泵内压力稳定一段时间后,停泵并记录压降曲线。需要注意的是:在进行 Sc-CO₂ 压裂时,为保证 CO₂ 达到超临界态(临界温度 31.26 °C、临界压力 7.38 MPa),压裂前将夹持器与 CO₂ 气源加热至 40 °C,同时在夹持器前端设有 10 MPa 的背压阀。此外,在水力压裂前,先进行预加热使环境温度达到 40 °C,以便保证两种介质压裂时的温度条件相同。

5) 压裂结束后,为避免测量煤体渗透率时存在非稳态渗流,采用抽真空和注气的方式使气体流速达到稳定。

6) 调整轴压至 12 MPa,重复步骤 3),测量压裂后试件的渗透率。

1.5 渗透率的测量与计算

测量渗透率的常用方法有稳态法和脉冲衰减法^[21]。结合前人研究^[15-17],本试验采用稳态法对煤体压裂前后的渗透率进行测量。渗透率计算公式如下:

$$k_g = \frac{2Q_0 p_0 \mu L \times 10^{-2}}{S(p_1 - p_2)} \quad (1)$$

式中: k_g 为气体渗透率, cm²; Q_0 为气体流量, cm³/s; p_0 为大气压强, MPa; μ 为气体粘度, MPa·s; L 为渗流长度(试件完整段长度), mm; S 为试件横截面积, mm²; p_1 、 p_2 分别为试件的入口和出口压力, MPa。

在试验中,夹持器出口端为大气压强,试件孔底到下端面长度为 35 mm,故 $p_0 = p_2 = 0.1$ MPa, $L = 35$ mm。

2 试验结果与分析

2.1 水与 Sc-CO₂ 致裂煤体的压裂特征对比

2.1.1 压裂曲线

图 3 为水与 Sc-CO₂ 致裂煤体的典型压裂曲线。总体而言,Sc-CO₂ 压裂过程中的压力波动比水力压裂的要小。两种压裂介质下的压裂曲线均可以起裂点和停泵点分为三个阶段:压力升高段、起裂扩展

段、压力降低段。

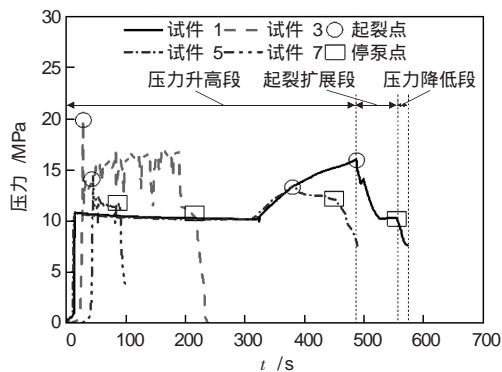


图 3 不同压裂条件下泵压曲线

Fig. 3 Curves of pump pressure-time under different fracturing conditions

在轴压、围压分别为 16 MPa 和 10 MPa 下,以 Sc-CO₂ 压裂的泵压曲线(试件 1)为例,对水和 Sc-CO₂ 致裂煤体的过程进行分析,具体如下:

1) 在压力升高段($t=0\sim 487$ s),压裂介质在压裂孔内发生聚集,压力升起。由于 Sc-CO₂ 具有较强的可压缩性、渗透性与吸附性,在其注入过程中,压力升高至峰值的耗时更长(长达 300 s 以上),而水力压裂过程中压力的升高时间仅为几十 s。需要说明的是,Sc-CO₂ 压裂曲线在该阶段存在一段近似水平段(压力保持在 10 MPa 左右);这是由于压裂孔前端存在一个设置为 10 MPa 的背压阀,当 Sc-CO₂ 压力超过 10 MPa 时才能通过背压阀,在压裂孔内憋起压力。

2) 在起裂扩展段($t=487\sim 556$ s),当压裂孔内的压力升至某一个方向上的极限强度时,煤体上发生裂纹的起裂和扩展。在起裂扩展阶段,Sc-CO₂ 压裂与水力压裂的不同之处为:达到起裂压力后,Sc-CO₂ 压裂过程中压力缓慢下降,而水力压裂中则伴有明显的压力波动。由于 Sc-CO₂ 具有独特性质(较小的粘度和零表面张力)以及较强的参数敏感性,Sc-CO₂ 压裂在裂纹起裂、裂纹扩展、稳定渗流通道的形成等方面表现出与水力压裂不同的特点:首先,高压的 Sc-CO₂ 能诱发煤体内部缺陷发生起裂^[22],同时由于气体的压缩性较大,随裂纹起裂扩展的压降较小,起裂后裂纹在高压气体作用下可持续扩展;其次,Sc-CO₂ 随着裂纹的扩展而出现压力的降低,从而发生复杂的相态变化,由此带来的应力、温度扰动将有助于裂纹的延伸、贯通^[23-24],Sc-CO₂ 压裂下裂纹网络更易一次形成;最后,在 Sc-CO₂ 压裂形成裂纹网络后,裂隙煤体便能很快对气体形成较为稳定的渗流通道,裂纹反复张开、闭合的

情况较为少见。上述三个原因导致 Sc-CO₂ 压裂中伴有较少的压力波动。而在水力压裂过程中,裂纹的起裂、扩展难以一次性完成;当水压随着裂纹的扩展而快速释放(水的压缩性较小)时,裂纹尖端将发生闭合甚至止裂;只有继续升高水压,才能使得裂纹再次打开或起裂。在此期间,水力压裂中裂纹的多次开合或起裂、止裂,将导致压力出现较多波动。

3) 在压力降低段($t>556$ s),停泵后,由于失去了压裂介质的补给,压裂介质的流出使得压裂孔内的压力逐渐降低。由于 Sc-CO₂ 气体具有较大的压缩性,大量气体聚集在压裂孔及其前端管线内,压力释放较为缓慢。

表 2 为不同应力和压裂介质条件下煤体的起裂压力。由表 2 可以看出,同一应力条件下,Sc-CO₂ 压裂煤体的起裂压力比水力压裂煤体的更低,这与有关文献的压裂结果相近^[11,14,25]。Sc-CO₂ 因其低粘度、零表面张力和高扩散系数等特性更容易进入煤体的孔裂隙,从而将注入的流体压力传递至煤体深部。通过降低有效应力、诱导煤体中预先存在的缺陷剪切滑移,Sc-CO₂ 压裂更易于促进裂纹的起裂和扩展。

表 2 水、Sc-CO₂ 致裂煤体的起裂压力

Table 2 Initiation pressure of water/Sc-CO₂ fracturing

轴压/MPa	压裂介质	起裂压力/MPa		
		第 1 次	第 2 次	平均值
16	Sc-CO ₂	14.71	15.21	14.96
16	水	19.92	19.51	19.72
12	Sc-CO ₂	13.59	13.84	13.72
12	水	14.45	14.68	14.57

2.1.2 裂纹表面形貌

压裂前后试件的表面裂纹特征如图 4 所示。在轴压为 16 MPa 的条件下采用 Sc-CO₂ 压裂后,试件 1 的中部存在一些间断的、不明显的纵向裂隙,中下部存在一条细小的主裂纹;该裂纹垂直于层理面向下端面曲折扩展,在靠近下端面处发生了分叉,产生一条横向裂纹,裂纹整体形态为“T”字型。在相同应力条件下,试件 3 经水力压裂后形成了一条开度较大的纵向主裂纹,表现为劈裂破坏。在轴压为 12 MPa 的应力条件下压裂试件 5,产生了 2 条较为细小的横向主裂纹,且主裂纹扩展中存在较多细小分叉,表明在此条件下 Sc-CO₂ 驱动了多条裂纹沿层理面、弱面起裂扩展;水力压裂后的试件 7 则产生了一条沿层理面扩展、开度较大的主裂纹。

综上所述,与水力压裂类似^[26-28],对煤体进行 Sc-CO₂ 压裂时,裂纹的起裂、扩展方向受到三维应力状态及层理面、原生裂隙等弱面的影响。当煤体

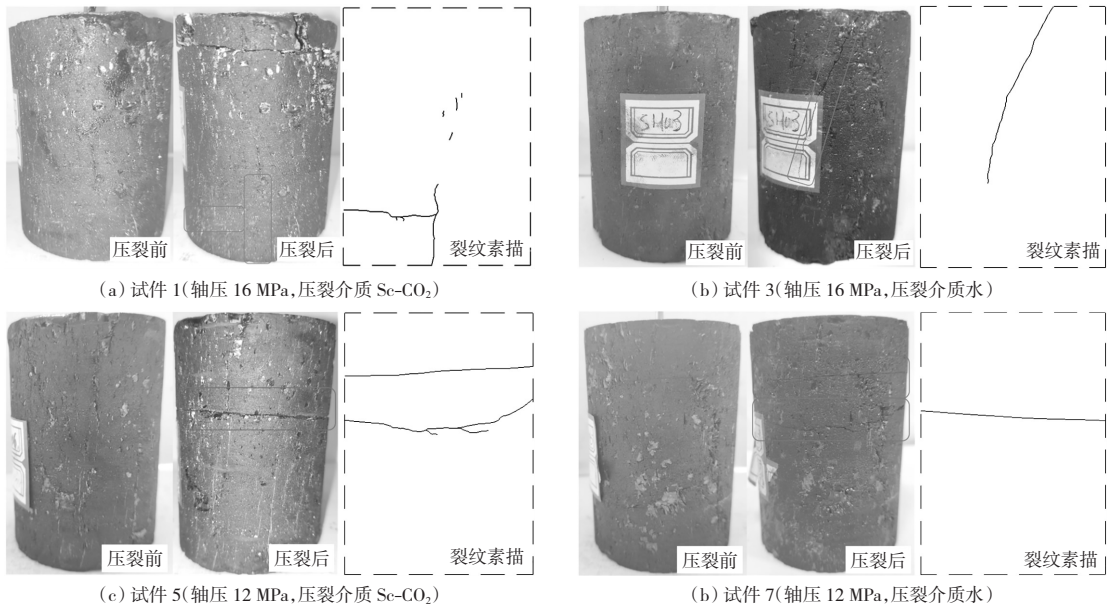


图 4 压裂前后试件表面裂纹对比

Fig. 4 Comparison of apparent cracks before and after fracturing

受到的垂直应力与最小水平主应力相差不大(本试验中小于 6 MPa)时,主裂纹更加倾向于沿层面扩展;而在应力差值(垂直应力减去最小水平主应力)较大的情况下,主裂纹往往沿垂直方向扩展。

比较图 4 中(a)和(b)、(c)和(d)可以发现,两种介质下试件的裂纹形态有一定差异:水力压裂的裂纹开度较大、数目较少、曲折度较低,裂纹形态较为单一;而 Sc-CO₂ 压裂所产生的裂纹开度较小、数目较多、曲折度较高,形态也较为复杂。Sc-CO₂ 因其

低粘度、零表面张力、高扩散系数等特性更容易进入煤岩体的微孔隙、微裂隙中,诱发次生裂纹,进而导致主裂纹在扩展过程中发生多次偏转、分叉,所形成的裂纹数目更多,裂纹网络也更为复杂、曲折。同时,由 Sc-CO₂ 诱发的裂纹大多由原生缺陷剪切滑移产生,其开度较水力压裂产生的张拉裂纹要小。

2.2 水与 Sc-CO₂ 致裂煤体的增渗效果对比

表 3 为不同压裂条件下试件的增渗效果。

由表 3 可以看出,与压裂前(原煤对氮气的渗透

表 3 压裂条件对增渗效果的影响

Table 3 Permeability enhancement under various fracturing condition

试件编号	压裂条件		渗透率/ μm^2		渗透率提高倍数	同一压裂条件下渗透率平均提高倍数
	轴压/MPa	压裂介质	压裂前	压裂后		
1 号	16	Sc-CO ₂	$1.784\ 55 \times 10^{-6}$	$8.628\ 42 \times 10^{-4}$	483	472
2 号	16	Sc-CO ₂	$2.071\ 45 \times 10^{-6}$	$9.571\ 94 \times 10^{-4}$	461	
3 号	16	水	$2.356\ 31 \times 10^{-6}$	$7.693\ 99 \times 10^{-5}$	32	34
4 号	16	水	$1.942\ 75 \times 10^{-6}$	$7.185\ 51 \times 10^{-5}$	36	
5 号	12	Sc-CO ₂	$2.983\ 22 \times 10^{-6}$	$1.168\ 44 \times 10^{-4}$	38	47
6 号	12	Sc-CO ₂	$2.481\ 59 \times 10^{-6}$	$1.379\ 40 \times 10^{-4}$	55	
7 号	12	水	$1.381\ 40 \times 10^{-6}$	$2.601\ 42 \times 10^{-5}$	18	19
8 号	12	水	$1.882\ 71 \times 10^{-6}$	$3.984\ 81 \times 10^{-5}$	20	

注:渗透率测量的条件为轴压 12 MPa、围压 10 MPa、孔隙压力 1 MPa

率为 $10^{-6} \sim 10^{-7} \mu\text{m}^2$)相比,在轴压为 16 MPa 下采用 Sc-CO₂ 和水压裂后,渗透率分别平均提高了 472 倍、34 倍;在轴压为 12 MPa 下采用 Sc-CO₂ 和水压裂后,渗透率分别平均提高了 47 倍、19 倍。从上述增渗效果可以看出,同一应力条件下,Sc-CO₂ 压裂煤体的增渗效果要好于水力压裂。一方面,水力压裂煤体后,有一部分水将残留在煤层的孔裂隙中,由此造成的水锁效应使得压裂后煤体的渗透率有较大

降低。另一方面,结合压裂曲线和裂纹形态分析,Sc-CO₂ 压裂能够沟通煤体深部的微缺陷,从而产生更多的裂纹和更大范围的裂纹网络,对煤体的改造更为彻底,有助于提高整个煤体的渗透率。

由表 3 还可看出,应力条件对 Sc-CO₂ 压裂和水力压裂的增渗效果均具有重要影响。结合表面裂纹形态分析,对于 Sc-CO₂ 压裂而言,在轴压为 16 MPa 下压裂(形成了纵向主裂纹),煤体渗透率是轴压为

12 MPa 下压裂(形成横向主裂纹)的煤体渗透率 10.2 倍。而对于水力压裂而言,在轴压为 16 MPa 下压裂煤体的渗透率为轴压为 12 MPa 下压裂的 1.8 倍。这表明,压裂形成了沿渗流方向的通道,更加有利于渗透率的提升。

2.3 水锁效应对增渗效果的影响

本试验对比了两种压裂介质(水、Sc-CO₂)的增渗效果,结果表明,相同应力条件下 Sc-CO₂ 压裂的增渗效果要好于水力压裂。这一方面是因为 Sc-CO₂ 压裂比水力压裂形成的裂纹数量更多、压裂的影响范围更大;另一方面,Sc-CO₂ 压裂煤体后残留物质较少,而水力压裂后残留的水分将带来水锁效应,导致煤体渗透率降低。由于本试验条件下无法将残留在煤体中的水分完全去除,这里采用卢义玉的研究成果^[29]对水锁效应进行定性分析。

高压水的注入将导致煤体产生裂隙,进而提高煤体渗透率。但是由于煤基质中存在亲水表面,注入的一部分水紧紧吸附于压裂产生的裂隙通道上,造成渗流通道变窄,如图 5 所示。

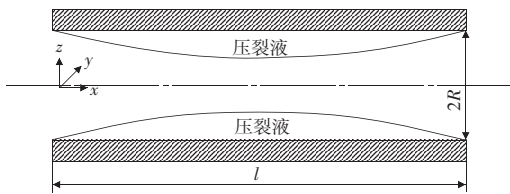


图 5 渗流通道剖面示意图^[29]

Fig. 5 Schematic diagram of flow channel section

运用流体力学与多孔介质等理论可以建立气体

流量 θ 与压裂液占据渗流通道的高度之间的关系^[29]:

$$Q = \pi v \left[R - \frac{l}{2} \tan \left(\frac{1}{2} \arctan \frac{\rho}{\gamma_{lg}} \right) \right]. \quad (2)$$

式中: v 为气体流速, R 为渗流通道的半径, L 为渗流通道的长度, ρ 为气体压力, γ_{lg} 为气液的表面张力。

由式 2 可知,对于给定的渗流通道,压裂液的残留将会导致气体流量的降低,从而使得渗透率下降。水力压裂的残留液不易通过注气、抽真空完全排除,所以压裂后的煤体渗透率存在一定程度的降低。本试验条件下,水锁效应同样影响着水力压裂的增渗效果。

3 结论

1) 与水力压裂相比,同一应力条件下,Sc-CO₂ 压裂煤体的起裂压力更低、压裂曲线波动更小、所形成的裂纹数量更多、裂纹形态更为复杂。此外,与水力压裂一致的是,Sc-CO₂ 压裂中裂纹起裂、扩展方向受到三维应力状态和层理面、原生裂隙等弱面的影响。

2) 与压裂前相比,在轴压×围压为 16 MPa×10 MPa 下采用 Sc-CO₂ 和水压裂后的煤体渗透率分别提高了 472 倍、34 倍,而轴压×围压为 12 MPa×10 MPa 下采用 Sc-CO₂ 和水压裂后的煤体渗透率分别提高了 47 倍、19 倍。这说明相同应力条件下,Sc-CO₂ 压裂增渗效果比水力压裂更好。

3) 裂纹形态和水锁效应共同决定了压裂产生的增渗效果。

参考文献:

- [1] 庚勳,陈浩,陈艳鹏,等.第 4 轮全国煤层气资源评价方法及结果[J].煤炭科学技术,2018,46(6):64-68.
GENG M, CHEN H, CHEN Y P, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 64-68.
- [2] LAU H C, LI H, HUANG S. Challenges and opportunities of coalbed methane development in China[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(5): 4588-4602.
- [3] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.
ZHAO Y S, YANG D, HU Y Q, et al. Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 455-458.
- [4] 黄炳香,陈树亮,程庆迎.煤层压裂开采与治理区域瓦斯的基本问题[J].煤炭学报,2016,41(1):128-137.
HUANG B X, CHEN S L, CHEN Q Y. Basic problems of hydraulic fracturing for mining and control zone gas in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 128-137.
- [5] 朱庆忠,杨延辉,左银卿,等.中国煤层气开发存在的问题及破解思路[J].天然气工业,2018,38(4):96-100.
ZHU Q Z, YANG Y H, ZUO Y Q, et al. CBM development in China: challenges and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 96-100.
- [6] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955.
WANG Y F, HE X Q, WANG E Y, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [7] 张强德,王培义,杨东兰.储层无伤害压裂技术——液态 CO₂ 压裂[J].石油钻采工艺,2002,24(4):47-50.
ZHANG Q D, WANG P Y, YANG D L. Fracturing technology with no damage to formation: fluid CO₂ fracture[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(4): 47-50.
- [8] 梁卫国,张倍宁,黎力,等.注能(以 CO₂ 为例)改性驱替开采 CH₄ 理论与实验研究[J].煤炭学报,2018,43(10):2839-2847.

- LIANG W G,ZHANG B N,LI L,et al. Theory and experimental study of CBM recovery driven by energy boosting[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(10):2839-2847.
- [9] ISHIDA T,AOYAGI K,NIWA T,et al. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO₂[J]. Geophysical Research Letters,2012,39(16):16309.
- [10] ISHIDA T,CHEN Y,BENNOUR Z,et al. Features of CO₂ fracturing deduced from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2016,121(11):8080-8098.
- [11] 卢义玉,廖引,汤积仁,等. 页岩超临界 CO₂ 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(1):175-180.
- LU Y Y,LIAO Y,TANG J R,et al. Experimental study on fracture initiation pressure and morphology in shale using supercritical CO₂ fracturing[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):175-180.
- [12] DENG B,YIN G,LI M,et al. Feature of fractures induced by hydrofracturing treatment using water and L-CO₂, as fracturing fluids in laboratory experiments[J]. Fuel,2018,226:35-46.
- [13] 文虎,李珍宝,王振平,等. 煤层注液态 CO₂ 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 H,LI Z B,WANG Z P,et al. Experiment on the liquid CO₂ 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.
- [14] 王磊,梁卫国. 超临界 CO₂/清水压裂煤体起裂及裂隙扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2680-2689.
- WANG L,LIANG W G. Experimental study on fracture initiation and growth in coal using hydraulic fracturing with supercritical CO₂ and normal water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(S1):2680-2689.
- [15] JIA Y,LU Y,ELSWORTH D,et al. Surface characteristics and permeability enhancement of shale fractures due to water and supercritical carbon dioxide fracturing[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering,2018,165:284-297.
- [16] ZHOU J,NAN H,JIANG Y,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 & Engineering,2016,36:369-377.
- [17] 刘国军,鲜学福,周军平,等. 超临界 CO₂ 致裂页岩岩渗透率变化规律及影响因素[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2670-2678.
- LIU G J,XIAN X F,ZHOU J P,et al. Dynamic permeability change of supercritical CO₂ fractured shale and its influencing factors[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(10):2670-2678.
- [18] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等. 液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(1):1-5.
- WANG Z F,SUN X M,LU T K,et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of He'nan Polytechnic University(Natural Science),2015,34(1):1-5.
- [19] WANG S,ELSWORTH D,LIU J. Permeability evolution in fractured coal: The roles of fracture geometry and water-content [J]. International Journal of Coal Geology,2011,87(1):13-25.
- [20] 梁卫国,张倍宁,韩俊杰,等. 超临界 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 装置及试验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1511-1520.
- LIANG W G,ZHANG B N,HAN J J,et al. Experimental study on coal bed methane displacement and recovery by supercritical carbon dioxide injection[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1511-1520.
- [21] 孙军昌,杨正明,郭和坤,等. 致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究[J]. 岩土力学,2013,34(4):1009-1016.
- SUN J C,YANG Z M,GUO H K,et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(4):1009-1016.
- [22] 王海柱,李根生,贺振国,等. 超临界 CO₂ 岩石致裂机制分析[J]. 岩土力学,2018,39(10):3589-3596.
- WANG H Z,LI G S,HE Z G,et al. Analysis of mechanisms of supercritical CO₂ fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(10):3589-3596.
- [23] CHEN Y,NAGAYA Y,ISHIDA T. Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(4):1455-1461.
- [24] 黄飞,卢义玉,汤积仁,等. 超临界二氧化碳射流冲刷页岩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(4):787-794.
- HUANG F,LU Y Y,TANG J R,et al. Research on erosion of shale impacted by supercritical carbon dioxide jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(4):787-794.
- [25] 刘国军,鲜学福,周军平,等. 超临界 CO₂ 致裂页岩实验研究[J]. 煤炭学报,2017,42(3):694-701.
- LIU G J,XIAN X F,ZHOU J P,et al. Experimental study on the supercritical CO₂ fracturing of shale[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(3):694-701.
- [26] 程远方,徐太双,吴百烈,等. 煤岩水力压裂裂缝形态实验研究[J]. 天然气地球科学,2013,24(1):134-137.
- CHEN Y F,XU T S,WU B L,et al. Experimental study on the hydraulic fractures' morphology of coal bed[J]. Natural Gas Geoscience,2013,24(1):134-137.
- [27] MAO R ,FENG Z ,LIU Z ,et al. Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering,2017,44:278-286.
- [28] 武鹏飞,梁卫国,廉浩杰,等. 大尺寸煤岩组合体水力裂缝越界形成缝网机理及试验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1381-1389.
- WU P F,LIANG W G,LIAN H J,et al. Mechanism and experimental investigation of the formation of hydro-fracture system by fracturing through the interface of large-size coal-rock[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(5):1381-1389.
- [29] 卢义玉,杨枫,葛兆龙,等. 清洁压裂液与水对煤层渗透率影响对比试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(1):93-97.
- LU Y Y,YANG F,GE Z L,et al. Comparative experiment on influence of clear fracturing fluid and water on coal seam permeability[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(1):93-97.