



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

高煤阶煤样水力压裂前后应力渗透率试验研究

孟召平 卢易新

引用本文:

孟召平, 卢易新. 高煤阶煤样水力压裂前后应力渗透率试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 353–360.

MENG Zhaoping, LU Yixin. Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 353–360.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1789>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮气闷压对高阶煤渗透率影响的试验研究

Experimental study on the influence of nitrogen soaking on the permeability of high rank coal

煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bcf8e2d2-7a59-4871-82b8-a88c56198ea3>

天然裂缝对水力压裂煤的起裂及扩展试验研究

Study on influence of natural fractures on initiation and propagation of hydraulic fracturing coal

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 92–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0813>

水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究

Experimental study on dispersion characteristics of complex resistivity of hydraulic fracturing coal

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 198–202 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c86f8baa-c422-4484-9f10-270fea2ef474>

沁水盆地中高煤阶煤储层覆压孔渗试验研究

Experimental study on overburden pore permeability of medium and high rank coal reservoirs in Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2cbdf4d5-2235-461b-a967-4734fff078b8>

水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究

Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 62–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1469>

滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率应力敏感性试验研究

Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou

煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d96e59e3-544e-4d03-8247-7d8c8272e30a>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

孟召平, 卢易新. 高煤阶煤样水力压裂前后应力-渗透率试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 353-360.

MENG Zhaoping, LU Yixin. Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 353-360.

高煤阶煤样水力压裂前后应力-渗透率试验研究

孟召平^{1,2}, 卢易新¹

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048000)

摘要:煤储层水力压裂是提高煤层气产量的关键技术, 水力压裂前后煤储层渗透率的变化反映了煤储层压裂改造效果。采用山西晋城矿区寺河煤矿二叠系山西组3号煤层高煤阶试样, 通过柱型煤样水力压裂前后渗透率试验对比分析, 测试了4个高煤阶煤样水力压裂前后渗透率分布特征, 揭示了水力压裂前后煤样渗透率随应力的变化规律和控制机理。结果表明, 在围压和轴压恒定条件下, 煤样孔隙压力随注入压力增大逐渐增高; 当注入压力大于破裂压力时, 煤样发生破裂, 煤样的破裂压力随围压的增加呈线性增大的规律。在注入压力相同的情况下, 随着围压和轴压的增大, 有效应力增高, 水力压裂前后煤样渗透率随有效应力的增大呈指数函数关系减小, 且压裂后的渗透率要明显大于压裂前的渗透率。采用煤储层渗透率改善率来评价围压下煤样水力压裂增渗效果, 4个试验煤样渗透率改善率随有效应力的增高呈指数函数关系增大, 但随围压的增大, 渗透率改善率提升幅度逐渐降低。煤储层的渗透性主要取决于煤中裂隙发育程度和裂隙开度的大小, 裂缝储层的渗透率的大小与裂缝张开度的3次方成正比关系。水力压裂后裂缝平均长度、裂缝孔隙度和裂缝开度增幅分别为70.81%~253.25%、171.88%~383.02%和20.31%~32.43%, 且水力压裂前后煤样裂缝开度均随有效应力的增高而呈负指数函数规律降低。试验结果与实测水力压裂前后煤储层渗透率对比, 两者具有较好的一致性, 为煤储层水力压裂改造效果评价探索了有效途径。

关键词:高阶煤; 煤储层; 水力压裂; 渗透率; 裂隙发育

中图分类号: TE377

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0353-08

Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing

MENG Zhaoping^{1,2}, LU Yixin¹

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048000, China)

Abstract: Hydraulic fracturing technology has become a key technical means to improve coalbed methane (CBM) yield. The evolution of CBM reservoir permeability before and after hydraulic fracturing reflects the induced fracturing level. By means of fracturing and stress-permeability experiments on four high rank coal samples of No.3 coal seam of the Permian Shanxi Formation in Sihe Coal Mine, Jincheng Mining Area, Shanxi Province, the permeability changes before and after fracturing are tested, and the evolution of pillar coal sample permeability with stress before and after fracturing is revealed. The results show that under the condition of constant confining pressure and axial pressure, the pore pressure of coal samples increases gradually with the increase of injection pressure. When the injection pressure is greater than the fracture pressure, the coal sample breaks, and the fracture pressure of the coal sample increases linearly with the increase of the confining pressure. Under the same injection pressure, the effective stress increases with the increase of confining pressure and axial pressure. The permeability of coal samples before and after hydraulic fracturing decreases exponentially with the increase of effective stress, and the permeability after fracturing is significantly greater than that before fracturing. The permeability improvement coefficient

收稿日期: 2022-10-20

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1789

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172190); 山西省科技重大专项资助项目(20201102001; 20191102001)

作者简介: 孟召平(1963—), 男, 湖南汨罗人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: mzp@cumt.edu.cn

(PIC) of CBM reservoir is used to evaluate the permeability improvement effect of coal samples. The PIC of four test coal samples increase exponentially with the increase of effective stress, but decrease with the increase of confining pressure. The permeability of CBM reservoir mainly depends on the degree of fracture development and the size of fracture width in coal. The permeability of fractured reservoir is in direct proportion to the 3rd power of fracture width. After hydraulic fracturing, the average fracture length, fracture porosity and fracture width increase by 70.81%–253.25%, 171.88%–383.02% and 20.31%–32.43%, respectively. The fracture width decreases with the increase of effective stress in a negative exponential function. The test results are compared with the measured coal reservoir permeability before and after hydraulic fracturing. The two have good consistency, which explores an effective way for the evaluation of the effect of hydraulic fracturing of coal reservoirs.

Key words: high rank coal; coal reservoir; hydraulic fracturing; permeability; fracture development

0 引言

我国煤层气开发自20世纪80年代发展至今已形成规模化生产^[1],随着我国煤层气开发深度的增加,煤层气勘探开发面临煤储层物性条件更加复杂的挑战^[2-3]。煤储层埋藏深度加大,地应力增高,严重影响煤储层渗透性,进而影响煤层气井的产能^[4]。由于煤储层的渗透率都很低,必须采取人工强化增产措施。利用以钻井水力压裂为关键技术的一整套工艺过程对煤储层进行改造,是当今世界开发煤层气所用的主要技术^[5-6],而其中煤储层应力是影响压裂裂缝形态和破裂压力大小的重要因素^[7-8]。研究煤储层水力压裂前后应力-渗透率特征,对于煤层气开发具有理论和实际意义。

国内外学者对压裂裂缝的主要研究方向为压裂裂缝扩展规律及其控制因素,通过理论分析、数值模拟以及物理试验等方式对裂缝扩展的形态、方向及其成因机理等方面开展研究^[9-11]。水力压裂裂缝的扩展主要受煤储层地应力、煤体自身力学性质、煤体结构、压裂施工参数等多种因素的影响。煤储层地应力控制着压裂裂缝的起裂压力、位置以及裂缝的延伸方位。如唐书恒等^[12]通过数值模拟方法研究了不同地应力条件下裂缝的破裂情况,认为随着水平主应力差系数的减小,裂缝形态会由单一裂缝向复杂缝网转变。笔者等^[13]通过对水力压裂裂缝微震监测数据和大地电位探测数据进行统计分析,确立了沁水盆地南部地应力的展布方向,并且建立了水压裂缝扩展与地应力之间关系。煤的力学性质是水力压裂裂缝起裂与扩展的重要因素,陈立超等^[14]通过试验分析,统计了煤岩石弹性力学参数与破裂压力数据之间的关系,提出较高的煤岩弹性模量与泊松比会导致煤岩的破裂压力升高。煤体结构对压裂裂缝的复杂程度和延伸长度起到一定的控制作用,SARMADIVALEH等^[15]进行了一系列的三轴压裂试验,通过改变不同样品中的填充材料和断裂面角

度,研究了不同结构的样品内部界面内聚力和内摩擦角对压裂裂缝扩展的影响。TAN等^[16]也在进行相似模拟试验,分析了裂缝几何形状受自然裂缝的影响机理,揭示了水力裂缝的传播遵循的最小阻力原则。这些认识为煤层气井水力压裂提供了理论依据;而在此基础上,许多学者对于裂缝控制渗透率的形成机制也进行了研究。GUO等^[17]分析了裂缝形态、有效压力、裂缝表面粗糙度和分布模式对渗透率的影响。EVELINE等^[18]提出了一种新的储层多相流模型,用于分析水力压裂对渗透率的影响。MEN等^[19]采用煤基质孔隙样品、天然裂缝样品和人工裂缝样品开展了渗流模拟试验研究,揭示了煤储层中的气体流动规律。这些研究为煤储层压裂改造提供了理论依据。但从目前的研究状况看,由于煤储层水力压裂裂缝及其渗透率现场监测资料缺乏,有关室内试验数据也相对有限,以往主要开展了压裂前煤样渗透率测试分析,压裂后煤样渗透率测试数据缺乏,对压裂裂缝渗透率控制机理的认识存在不足。

基于此,笔者采用柱状煤样中间钻孔模拟煤储层射孔和水力压裂过程。通过高煤阶煤样水力压裂试验,测试了水力压裂前后渗透率分布特征,揭示了水力压裂前后煤样渗透率随应力的变化规律和控制机理,为提高煤储层压裂改造效果提供了理论依据。

1 试验条件与方法

1.1 试验样品

为分析不同围压下高阶煤水力压裂前后应力-渗透率特征,采用山西晋城矿区寺河煤矿二叠系山西组3号煤层高煤阶样品。各煤样镜质组反射率和工业分析基本参数,见表1。

沿煤层层面方向加工为长100 mm,直径100 mm的圆柱体试件。将样品两端磨平并在其中一端中心钻小孔(内径10 mm,长度40~50 mm)。向煤样中心的钻孔插入准备好的上堵头并通过高强度隔水胶固

表 1 试验煤样基本参数
Table 1 Basic parameters of experimental coal samples

样品编号	$R_{o,max}$	工业分析/%			
		M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
GJ-1	3.28	1.22	9.43	5.24	84.11
GJ-2	3.18	1.56	8.01	6.73	83.70
GJ-3	3.11	1.29	11.62	5.54	81.56
GJ-4	3.30	0.70	12.79	11.78	74.73

定, 24 h 后将其整体与上堵头连接, 确保在围压和流体压力下压裂液不会沿堵头与煤样之间的接触面渗漏。

1.2 试验条件

根据沁水盆地南部 45 口煤层气井煤储层地应力测试资料统计^[20], 研究区 3 号煤储层埋藏深度在 334.9~1 122.3 m 内, 煤储层闭合压力 3.30~26.40 MPa; 煤储层压力 1.34~10.60 MPa。根据沁水盆地南部煤储层闭合压力(最小水平主应力)和煤储层压力以及煤层埋藏深度的实际资料确定实验方案, 煤样试验条件见表 2。试验中压裂液选用清水压裂液, 其中添加 80 目(0.180 mm)的自悬浮支撑剂, 支撑剂主要成分为石英砂。通过压裂液配方对比试验得出结果, 当水砂比为 8% 左右, 添加 2% 的破胶剂时, 适宜作为试验用压裂液。

表 2 样品试验条件
Table 2 Experimental conditions of samples

样品编号	测试流体	围压/ MPa	轴压/ MPa	煤储层压力/ MPa	有效应力/ MPa
GJ-1	CH ₄	3~8	5~10	2.7	0.97~5.97
GJ-2		3~12	5~14		0.97~9.97
GJ-3		3~16	5~18		0.97~13.97
GJ-4		3~20	5~22		0.97~17.97

1.3 试验方法及步骤

煤样水力压裂试验如图 1 所示。该系统具有独立的轴向压力、围压和孔隙压力控制系统, 可在三轴应力条件下进行不同孔隙流体压力下的水力压裂试验。在水力压裂时压裂液由上堵头中心管孔注入, 由下堵头管孔排出; 在压裂试验前、后进行煤中 CH₄ 渗透率测试时, 将 CH₄ 从下堵头管孔注入, 由上堵头侧管孔排出。在试验中实时记录试验过程中的围压、轴压、孔隙压力和煤样应力-应变和进出口流量等数据。

试验步骤如下: ①压裂前(初始)CH₄ 渗透率测量:

将新鲜煤样在大气压下饱水 24 h 后安装至夹持器内, 向煤样同步缓慢施加围压至 3 MPa 以及轴压至 5 MPa, 稳定 12 h, 待煤样应变稳定, 向煤样下堵头管孔注入 CH₄, 注入压力为 2.7 MPa, 待上堵头侧管孔流量稳定后测量渗透率, 增大围压与轴压各 1 MPa, 继续测量渗透率, 重复此过程直至达到试验压力。②水力压裂试验: 保持试验轴压围压不变, 停止向下堵头管孔内注 CH₄, 将上堵头侧管孔堵住, 打开上堵头中心管孔, 等待 12 h, 使煤样应变状态恢复。按比例配置压裂液倒入中间容器中, 将中间容器通过 10 mm 直径管线连接夹持器堵头中心管孔。将水压泵与中间容器连接, 开始注水压裂, 以 10 mL/min 速度匀速注水 20 min。期间当某一应变信号强烈波动, 围压轴压开始上升, 注水泵压下降时即显示样品破坏。③压裂后 CH₄ 渗透率测量: 水力压裂试验后保持围压和轴压静置 12 h, 待煤样应力状态恢复。将围压轴压缓慢卸至 2.7 MPa 后保持 24 h 等待煤样变形恢复。之后重复缓慢施加围压至 3 MPa、轴压至 5 MPa, 进行测 CH₄ 渗透率曲线过程, 即步骤①。完成后缓慢卸压, 取出煤样, 通过显微成像观察样品, 得到煤样形成裂缝形态, 支撑剂进入裂缝情况等信息。

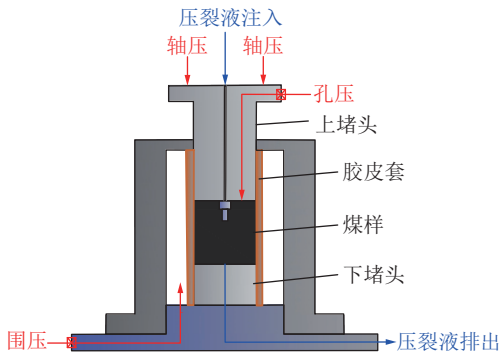


图 1 煤样水力压裂试验系统示意
Fig.1 Schematic of hydraulic fracturing test system for coal sample

根据达西定律计算气测渗透率公式为

$$k_g = \frac{2P_0 Q_g L \mu_g}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

其中: k_g 为气测渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; P_0 标准大气压, MPa; Q_g 为气体流量, mL/s; L 为煤样长度, cm; A 为煤样横截面积, cm^2 ; P_1 为气体进口压力, MPa; P_2 为气体出口压力, MPa; μ_g 为气体动力黏度系数, $\mu Pa \cdot s$ 。 μ_g 是与温度有关的变量, CH₄ 的黏度系数根据式 (2) 计算:

$$\mu_g = 1.36 \times 10^{-4} T^{0.77} \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度, K。

2 试验结果及分析

通过水力压裂前后煤样应力-渗透率试验, 获得了不同围压下煤样注入压力与时间和渗透率与有效应力关系曲线。

2.1 煤样破裂压力

在围压和轴压恒定条件下, 煤样孔隙压力随注入压力增大逐渐增大。当注入压力大于破裂压力时, 煤样发生破裂, 注入压力快速减小后开始波动并趋于稳定。虽然不同围压下4个试样破裂压力存在一定差异, 但各压裂曲线变化规律基本一致, 4个试验煤样水力压裂曲线如图2所示。

当试验煤样的围压分别为8、12、16、20 MPa时, 煤的破裂压力分别为10.68、15.01、18.27、23.40 MPa。统计表明, 煤样的破裂压力随围压的增加呈线性增高(图3), 其关系式为

$$P_f = 1.04\sigma_3 + 2.34 \quad (3)$$

式中: P_f 为破裂压力, MPa; σ_3 为围压, MPa, 决定系数 $R^2=0.99$ 。

2.2 水力压裂前后煤样应力-渗透率变化特征

高煤阶煤样水力压裂前后 CH_4 测渗透率试验结果表明(图4)。在注入压力(孔隙压力)相同的情况

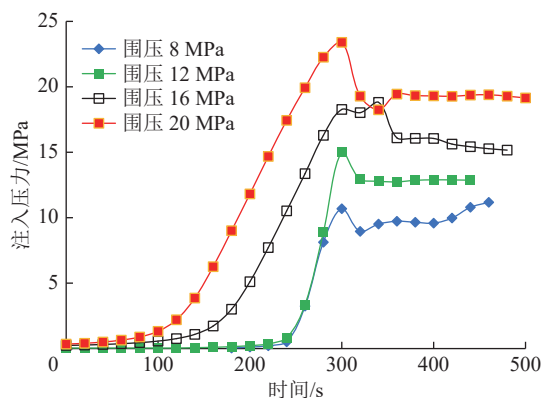


图2 水力压裂曲线

Fig.2 Hydraulic fracturing curve

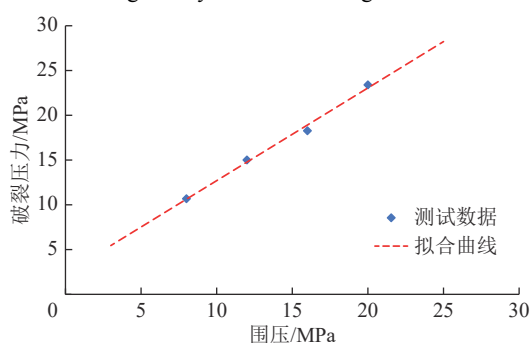
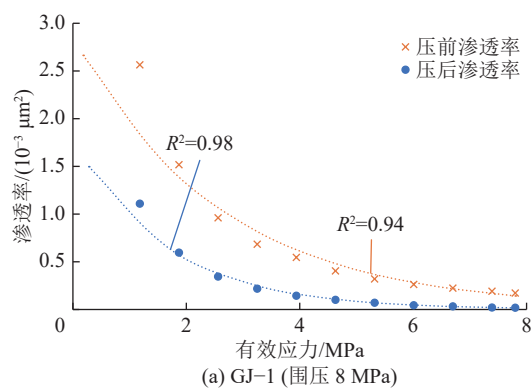
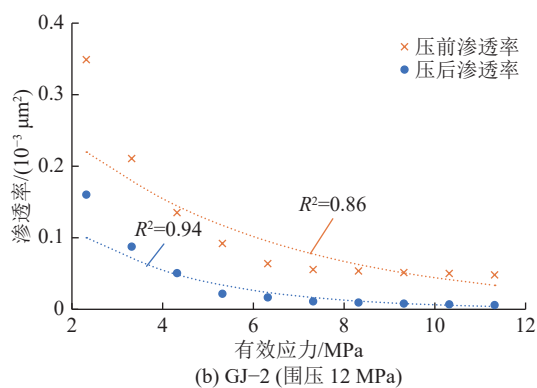


图3 破裂压力与围压之间关系

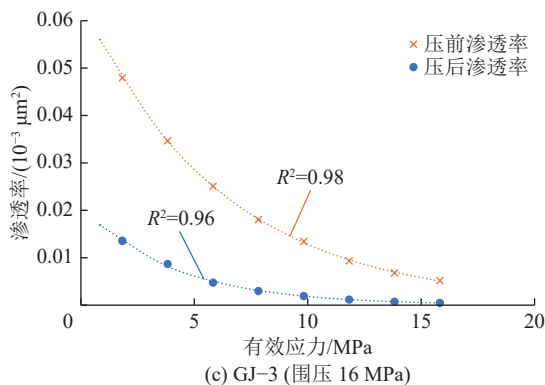
Fig.3 Relationship between fracture pressure and confining pressure



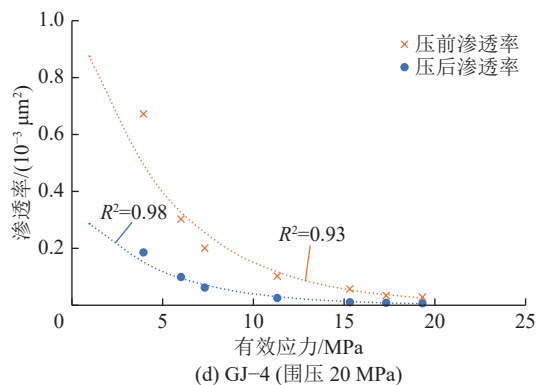
(a) GJ-1 (围压 8 MPa)



(b) GJ-2 (围压 12 MPa)



(c) GJ-3 (围压 16 MPa)



(d) GJ-4 (围压 20 MPa)

图4 水力压裂前后煤样应力-渗透率变化特征

Fig.4 Change characteristics of stress-permeability of coal samples before and after hydraulic fracturing

下,随着围压和轴压的增大,有效应力增高,水力压裂前后煤样渗透率随有效应力的增大呈指数函数关系减小,且压裂后的渗透率要明显大于压裂前的渗透率。

统计表明,水力压裂前后 4 个煤样渗透率随有效应力变化规律为(图 4):

$$k_g = ae^{-b\sigma_e} \quad (4)$$

式中: σ_e 为有效应力, MPa; a 和 b 为回归系数, 见表 3。可以看出, 回归系数 a 即为有效应力为 0 时煤样的渗透率, 其大小与煤样的原生裂隙和压裂裂缝的数量与开度相关; 回归系数 b 为回归应力敏感系数, 其决定了煤样渗透率随有效应力增大而下降幅度, 与煤岩自身物理性质有关。其中系数 a , 压裂后大于压裂前; 而系数 b , 压裂后小于压裂前。

表 3 煤样水力压裂前后应力-渗透率试验统计结果

Table 3 Statistical results of stress permeability test of coal samples before and after hydraulic fracturing

样品 编号	系数 a		系数 b		决定系数 R^2	
	水力压 裂前	水力压 裂后	水力压 裂前	水力压 裂后	水力压 裂前	水力压 裂后
GJ-1	1.772	2.854	0.604	0.385	0.978	0.938
GJ-2	0.230	0.357	0.360	0.209	0.944	0.865
GJ-3	0.021	0.064	0.242	0.161	0.958	0.984
GJ-4	0.351	1.050	0.217	0.194	0.975	0.927

3 讨 论

3.1 水力压裂后煤样增渗效果评价

为评价围压下煤样水力压裂增渗效果, 采用渗透率改善率, 即煤样水力压裂后渗透率与水力压裂前渗透率之差与水力压裂前渗透率比值的百分数来表示。渗透率改善率 k 的计算公式如下:

$$k = \left(\frac{K_a - K_b}{K_b} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: K_a 为围压下煤样水力压裂后渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_b 为围压下煤样水力压裂前渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

计算结果表明, 煤样渗透率改善率 k 随有效应力的增高呈指数函数关系增大; 但随围压的增大, 渗透率改善率提升幅度逐渐降低, 即水力压裂试验中围压越高, 水力压裂效果就越低, 如图 5 所示。试验也表明, 在其他条件相同的情况下, 相对于浅部, 在围压更高的深部煤储层水力压裂过程中, 煤储层渗透率改善率相对要差些。

中石油华北油田公司在煤层气开发中对沁水盆地南部 2 口煤层气井, 即沁 12-11-89 井和沁 13-10-

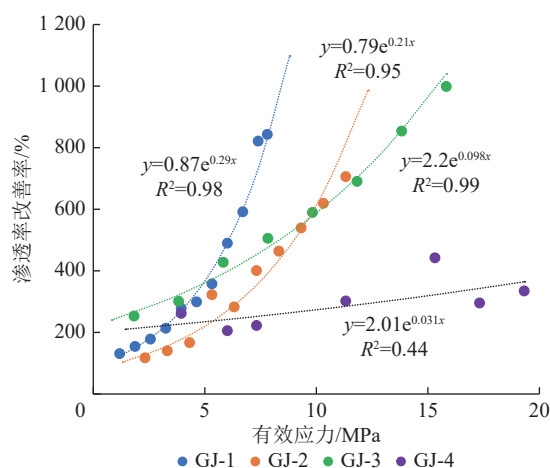


图 5 高阶煤压裂后渗透率改善率随有效应力变化

Fig.5 Change of permeability improvement rate with effective stress after fracturing of high rank coal

28 井进行了山西组 3 号煤储层水力压裂前后测试, 测试结果表明, 压裂前煤储层渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \sim 0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压裂后煤储层渗透率为 $3.18 \times 10^{-3} \sim 8.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压裂改造后煤储层渗透率增高近 30~300 倍, 其他煤储层参数也相应变化, 见表 4。

3.2 水力压裂前后煤样渗透率的受控机制

煤储层为孔隙-裂隙型储集层。煤储层的渗透率包括基质渗透率和裂隙(割理)渗透率。由于煤层的基质孔隙太小, 其表面的吸附作用很大, 基质渗透率可忽略不计。这样煤层气在煤体中的渗流, 其本质是煤层气在裂隙及其相互交错形成的网络中的渗流^[21]。因此, 可以应用“平行板”理论模型来模拟煤层中的裂隙(割理)渗透率。对于一组具有恒定开度的平行裂隙(割理), 煤储层渗透率 k_f 表达式^[22] 为

$$k_f = c\beta \frac{\gamma b^3}{12\mu s} \cos^2 \alpha \quad (6)$$

其中 k_f 为裂隙中的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; b 为裂隙的平均开度, μm ; γ 为流体的容重, kN/m^3 ; μ 为流体的动态黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; s 为裂隙的平均间距, cm ; α 为裂缝面与应力梯度轴的夹角, $(^\circ)$; c 为与裂隙表面粗糙度相关的一个常量; β 为描述裂隙连通性的一个常量。

由式(6)可以看出, 煤储层的渗透性主要取决于煤中裂隙发育程度和裂隙开度的大小, 其中裂隙的渗透率与裂隙的开度密切相关。裂缝储层的渗透率的大小与裂缝张开度的 3 次方成正比例关系。由于应力和流体孔隙压力变化导致裂隙张开度发生变化, 渗透率也随之变化。

在水力压裂试验前后通过相同平面进行显微扫描对比分析, 首先, 对压裂前、后煤样进行抛光, 抛光

表 4 水力压裂前、后煤储层参数测试对比

Table 4 Comparison of coal reservoir parameters before and after hydraulic fracturing

钻孔号及测试条件	沁12-11-89井		沁13-10-28井	
	压前	压后	压前	压后
埋深/m	779.00	779.00	1 103.20	1 103.20
煤层厚度/m	5.50	5.50	6.65	6.65
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	0.03	8.93	0.11	3.18
储层温度/ $^{\circ}\text{C}$	30.84	31.70	34.48	35.60
闭合压力/MPa	20.04	15.76	17.10	11.14
闭合压力梯度/(MPa·hm $^{-1}$)	2.63	2.07	1.57	1.02
破裂压力/MPa	20.51	16.06	20.96	11.17
破裂压力梯度/(MPa·hm $^{-1}$)	2.69	2.11	1.93	1.03

后在同一平面上进行显微扫描分析,并进行矢量化和裂缝参数提取,确定水力压裂前后煤中裂缝形态特征,见表 5。

通过对试验煤样进行显微裂隙对比分析表明,水力压裂后煤岩裂缝长度与孔隙度都出现了明显提高,水力压裂后裂缝平均长度增长率为 70.81%~253.25%;压裂后裂缝孔隙度增长率为 171.88%~383.02%,见表 6。

采用裂缝的总面积除以裂缝的总长度得到裂缝的平均开度,发现水力压裂前后裂缝开度发生了明显的变化,4 个试验煤样水力压裂后裂缝开度平均增幅为 20.31%~32.43%,且随着围岩的增高而降低,见表 7。煤样水力压裂前后煤样裂缝开度随有效应力

表 5 水力压裂前后煤样显微镜下裂缝形态对比

Table 5 Comparison of fracture morphology of coal samples before and after hydraulic fracturing under microscope

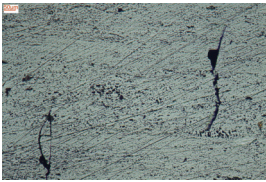
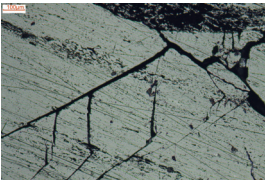
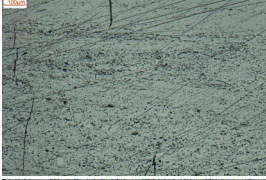
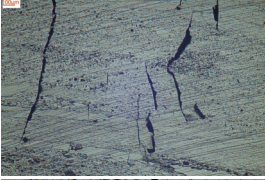
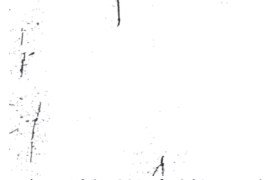
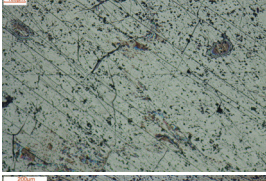
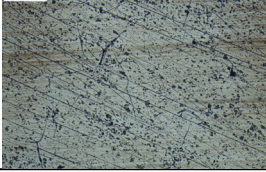
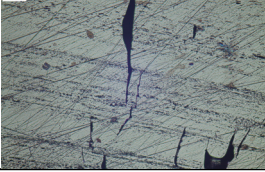
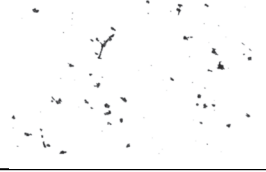
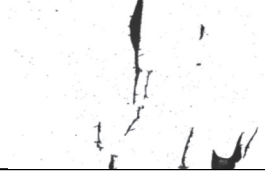
样品编号	显微扫描图像		矢量化和裂缝提取	
	水力压裂前	水力压裂后	水力压裂前	水力压裂后
GJ-1				
GJ-2				
GJ-3				
GJ-4				

表 6 水力压裂前后平均裂缝长度与孔隙度统计

Table 6 Statistics of average fracture length and porosity before and after hydraulic fracturing

样品编号	原始裂缝	压裂后裂缝	压裂后裂缝	原始裂缝	压裂后裂缝	压裂后裂缝
	平均长度/mm	平均长度/mm	长度增长率/%	孔隙度/%	孔隙度/%	孔隙度增长率/%
GJ-1	5.89	12.15	106.28	2.48	8.40	238.71
GJ-2	4.62	16.32	253.25	2.05	8.75	326.83
GJ-3	8.12	13.87	70.81	1.06	5.12	383.02
GJ-4	4.41	8.28	87.76	2.56	6.96	171.88

的增高而呈负指数函数规律降低,如图6所示,这些也反映了煤储层应力敏感性控制机理,表现为:无论

是水力压裂前,还是压裂后,煤储层渗透率均随有效应力的增高而呈负指数函数规律降低(图4)。

表7 水力压裂前后裂缝平均开度统计
Table 7 Average fracture aperture before and after hydraulic fracturing

样品编号	原始裂缝开度/ μm	压裂后裂缝开度/ μm	压裂后裂缝开度平均增幅/%
GJ-1	(239.02~278.21)/252.14	(251.28~370.48)/333.90	32.43
GJ-2	(104.77~170.42)/144.84	(105.86~163.17)/188.77	30.33
GJ-3	(42.91~72.32)/66.02	(49.21~127.11)/83.79	26.92
GJ-4	(240.43~255.14)/246.16	(146.31~342.01)/296.16	20.31

注:数据格式为(最小值~最大值)/平均值。

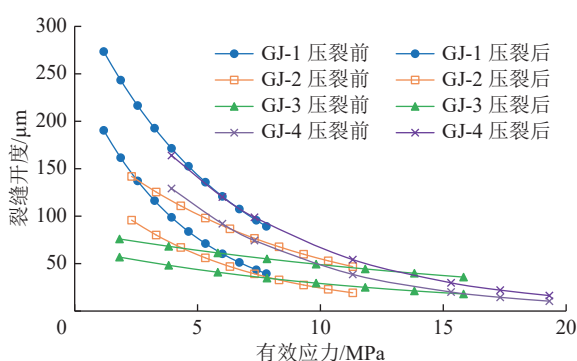


图6 不同有效应力下压裂前后裂缝开度变化

Fig.6 Change of fracture aperture before and after fracturing under different effective stresses

煤储层的应力敏感性对煤层气井的产能有很大的影响,随着生产压差的增加,气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,放大生产压差并不能获得最大产量。在煤层气生产过程中,特别是煤层气排采初期,应力较高,由于煤储层强应力敏感性,切忌一味地快速降低井底压力,因此制定合理的排采工艺是保障煤层气井高产稳产的重要途径。

4 结 论

1)煤样的破裂压力随围压的增加呈线性增高的规律;在注入压力相同的情况下,随着围压和轴压的增大有效应力增高,水力压裂前后煤样渗透率随有效应力的增大呈指数函数关系减小,且压裂后的渗透率要明显大于压裂前的渗透率。

2)采用煤样水力压裂后渗透率与水力压裂前渗透率之差与水力压裂前渗透率比值的百分数来表示煤样渗透率改善率;4个试验煤样渗透率改善率均随有效应力的增高呈指数函数关系增大;但随围压的增大,渗透率改善率提升幅度逐渐降低。

3)在水力压裂前后煤样裂缝开度均随有效应力的增高而按负指数函数规律降低,水力压裂后裂缝平

均长度、裂缝孔隙度和裂缝开度增幅分别为 70.81%~253.25%、171.88%~383.02% 和 20.31%~32.43%,揭示了水力压裂后煤样裂缝长度与孔隙度增高的规律。

参考文献(References):

- [1] 孟召平,刘世民,著.煤矿区煤层气开发地质与工程[M].北京:科学出版社,2018.
- [2] MOORE T A. Coalbed methane: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 101(1): 36–81.
- [3] 孙钦平,赵群,姜馨淳,等.新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J].煤炭学报,2021,46(1): 65–76.
SUN Qinqing, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65–76.
- [4] LIU T, LIN B, WEI Y. Impact of matrix-fracture interactions on coal permeability: Model development and analysis[J]. Fuel, 2017, 207: 522–532.
- [5] 朱庆忠,左银卿,杨延辉.如何破解我国煤层气开发的技术难题:以沁水盆地南部煤层气藏为例[J].天然气工业,2015,35(2): 106–109.
ZHU Qingzhong, ZUO Yinqing, YANG Yanhui. How to solve the technical problems of CBM development in china: A case study of CBM reservoir in southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 106–109.
- [6] FU H, TANG D, XU T, et al. Preliminary research on CBM enrichment models of low-rank coal and its geological controls: A case study in the middle of the southern Junggar Basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 83: 97–110.
- [7] 刘翔鹏,张景和,余建华,等.水力压裂裂缝形态和破裂压力的研究[J].石油勘探与开发,1983(4): 40–48.
LIU Xianglu, ZHANG Jinghe, YU Jianhua, et al. Study on fracture morphology and fracture pressure of hydraulic fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983(4): 40–48.
- [8] MOU P, PAN J, WANG K, et al. Influences of hydraulic fracturing on microfractures of high-rank coal under different in-situ stress conditions[J]. Fuel, 2020, 287: 119566.
- [9] 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(8): 1691–1699.
- ZHANG Jincai, YIN Shangxian. Some technologies of mechanics applications and hydraulic fracturing in shale oil, shale gas and coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2014(8) : 1691–1699.
- [10] LI Q, XING H. Numerical analysis of the material parameter effects on the initiation of hydraulic fracture in a near wellbore region[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(1): 1597–1608.
- [11] 姜婷婷, 张建华, 黄 刚. 煤岩水力压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3677–3684.
- JIANG Tingting, ZHANG Jianhua, HUANG Gang. Experimental study on fracture propagation morphology of hydraulic fracturing in coal rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10) : 3677–3684.
- [12] 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.
- TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of ground stress on hydraulic fracturing fracture development of coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1) : 65–69.
- [13] 孟召平, 王宇恒, 张 昆, 等. 沁水盆地南部煤层水力压裂裂缝及地应力方向分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 216–222.
- MENG Zhaoping, WANG Yuheng, ZHANG Kun, *et al.* Analysis of hydraulic fracturing cracks for coal reservoirs and in-situ stress direction southern Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 216–222.
- [14] 陈立超, 王生维. 煤岩弹性力学性质与煤层破裂压力关系[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(4): 503–511.
- CHEN Lichao, WANG Shengwei. Relationship between elastic mechanical properties of coal rock and fracture pressure of coal seam[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(4): 503–511.
- [15] SARMADIVALEH M, RASOULI V. Test design and sample preparation procedure for experimental investigation of hydraulic fracturing interaction modes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 93–105.
- [16] TAN P, JIN Y, HAN K, *et al.* Vertical propagation behavior of hydraulic fractures in coal measure strata based on true triaxial experiment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 158: 398–407.
- [17] GUO T, ZHANG S, Gao J, *et al.* Experimental study of fracture permeability for stimulated reservoir volume (SRV) in shale formation[J]. Transport in Porous Media, 2013, 98(3): 525–542.
- [18] EVELINE V F, AKKUTLU I Y, MORIDIS G J. Numerical simulation of hydraulic fracturing water effects on shale gas permeability alteration[J]. Transport in Porous Media, 2017, 116(2) : 721–752.
- [19] MEN X, TAO S, LIU Z, *et al.* Experimental study on gas mass transfer process in a heterogeneous coal reservoir[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 216: 106779.
- [20] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 975–981.
- MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6) : 975–981.
- [21] 冯增朝, 赵阳升, 文再明. 煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 236–240.
- FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, WEN Zaiming. Percolation mechanism of fractured coal rocks as dual continua[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2) : 236–240.
- [22] LOUIS C. A Study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock mass[J]. Imperial College Rock Mechanics Report, 1969, 10. Imperial College, London.