过硫酸铵真三轴水力压裂煤体裂隙渗流特性变化规律*

郑春山[1,2,3],付世龙[2],薛生[1,3],江丙友[1,2],韩飞林[3],任波[4],赵洋[2]

(1.安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南市 232001;
2.安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南市 232001;
3.安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南市 232001;
4.平安煤矿瓦斯治理国家工程研究中心有限责任公司, 安徽 淮南市 232001)

摘要:煤体渗透率直接影响瓦斯抽采效率。采用煤岩多相多场真三轴动态渗流试验系统,结合声发射监测、超声波测试和高分辨率图像处理等手段,研究了低浓度过硫酸铵水力压裂原位煤体的裂隙结构和渗透率变化规律,并量化分析了5组不同注液速率和压注空间(压裂液与裸眼段煤壁的作用空间)的影响机制。结果表明:注液速率越大,煤体破裂所需时间越短,压注空间越大,煤体破裂压力越低,4孔压裂管(压注空间最大)煤样声发射定位点最多且分布最广;水力压裂后5组煤样超声波速均降低,与清水压裂相比,过硫酸铵压裂煤体声发射定位点更少(损伤更低),但过硫酸铵氧化溶蚀作用可进一步提升裂隙发育程度,在改善煤体渗透率方面效果更优。相同条件下压注空间越大,煤体裂缝贯通及过硫酸铵作用范围越广,渗透率提升越显著;压注空间相同时,注液速率越低,渗透率改善效果越好。过硫酸铵的氧化溶蚀与水力压裂致裂协同作用可促进煤体裂隙网络扩展,而压注空间影响裂隙扩展范围和密度。研究结果可为低渗煤层渗流特性改造提供理论指导。

关键词:真三轴水力压裂;裂隙结构;渗透率;过硫酸铵;声发射监测;超声波测试

中图分类号:TD712 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0173-12

Variation Law of Seepage Characteristics of Coal Fractures Under True Triaxial Hydraulic Fracturing with Ammonium Persulfate

Zheng Chunshan[1,2,3], *Fu Shilong*[2], *Xue Sheng*[1,3], *Jiang Bingyou*[1,2], *Han Feilin*[3], *Ren Bo*[4], *Zhao Yang*[2]

(1.State Key Laboratory of Deep Coal Mining & Environmental Protection,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2.School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and
Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
3.Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
4.Ping'an Coal Gas Control National Engineering Research Center Co., Ltd., Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract:Coal permeability directly affects the efficiency of gas extraction. Using the multiphase and multifield true triaxial dynamic seepage test system of coal and rock, combined with acoustic emission monitoring, ultrasonic testing and high-resolution image processing, the fracture structure and permeability evolution of in-situ coal subjected to hydraulic fracturing with low-concentration ammonium persulfate were investigated, and the influence mechanism of five groups of different liquid injection rates and pressure injection spaces (the action space between fracturing fluid and coal wall in the open hole section) was quantitatively analyzed. The results show that the larger the liquid injection rate is, the shorter the time required for coal to fracture is, the larger the pressure injection space is, the lower the coal fracture pressure is, and the 4-hole fracturing tube (the largest pressure injection space)has the most acoustic emission positioning points and the widest distribution. After hydraulic fracturing, the ultrasonic velocity of five groups of coal samples decreased. Compared with water fracturing, the coal fractured with ammonium persulfate has fewer acoustic emission positioning points (lower damage), but the oxidation and dissolution of ammonium persulfate can further improve the degree of fracture development, and the effect is better in improving coal permeability. Under the same conditions, the larger the pressure injection space is, the wider the range of coal fracture penetration and ammonium persulfate action is, and the more significant the permeability improvement is. When the pressure

* **收稿日期**:2025-10-31
基金项目:安徽省高校优青科研资助项目(2023AH030042);国家自然科学基金面上项目(52274171)
作者简介:郑春山(1989—),男,安徽淮南人,博士,教授,主要研究方向为矿井瓦斯抽采理论与技术。E-mail:chunshanzheng@aust.edu.cn

injection space is the same, the lower the liquid injection rate, the better the permeability improvement effect. The synergistic effect of oxidation dissolution of ammonium persulfate and hydraulic fracturing can promote the expansion of coal fracture network, and the pressure injection space affects the fracture expansion range and density. The research results can provide theoretical guidance for the modification of seepage characteristics of low permeability coal seams.

Key words: True triaxial hydraulic fracturing, Fracture structure, Permeability, Ammonium persulfate, Acoustic emission monitoring, Ultrasonic testing

0 引言

中国是世界上煤炭储量最丰富的国家之一,同时也是煤炭消费大国。相关研究表明,在未来较长时期内,煤炭仍将在我国能源结构中占据主导地位[1-2]。随着开采深度的不断增加,高地应力、高瓦斯和低透气性的瓦斯赋存条件大大降低了瓦斯治理效果,严重制约了煤矿安全生产[3-5],提高煤层渗透率已成为煤炭安全高效开采的关键[6-8]。

针对低渗煤层瓦斯抽采效果差的难题,相关学者采用多种技术手段开展了大量研究,如水力割缝[9]、水力压裂[10]、CO_2 致裂[11]和聚能爆破[12]等方法,其中水力压裂技术较为成熟且应用广泛。张帆等[13]采用大尺寸真三轴水力压裂试验系统,探究了煤岩受力状态、天然裂缝发育特征及泵注排量参数对水力裂缝扩展规律与空间形态的影响机制。Chen Yulong 等[14]采用真三轴水力压裂测试系统,研究了切口角度、切口长度和注入速率对水力压裂的影响。邬爱清等[15]利用煤岩体水力耦合真三轴试验系统,研究了不同应力状态、水力变化路径下煤岩体的变形规律和破坏机制。姜婷婷等[16]利用原煤试块开展真三轴水力压裂试验,通过剖切试块直接观测裂缝形态,并结合声发射定位技术进行综合分析,最终识别出煤岩储层裂缝起裂与延伸的四种典型模式。国内外水力压裂的相关研究主要以水作为压裂液改造煤层,并在现场试验中取得了一定的增渗效果,但仍存在裂隙发育不均、裂隙闭合快、水锁效应等问题[17-19]。近年来,相关学者针对煤层气开采难题提出创新思路:运用化学方法对煤体进行改造,通过化学试剂改变煤层理化性质,最终达到促进煤层气解吸和渗流的目的。倪小明等[20]对不同煤阶煤样进行酸化试验,从表面结构、矿物含量、渗透率等方面分析多组分酸对煤储层的增透效果。Jing Zhenhua 等[21]结合压汞法和扫描电子显微镜成像(SEM)技术开展研究,发现次氯酸钠(NaClO)的氧化作用可通过扩大孔隙尺寸,实现煤体孔隙度的提升。杨娟等[22]采用非均相钴基活化剂活化过硫酸铵,原位生成强氧化性硫酸根自由基,氧化溶蚀不同变质程度的煤样表面,产生新裂隙与孔洞以实现煤体“增孔”“扩孔”“疏孔”,同时降低煤样亲甲烷能力,改善孔隙连通性与瓦斯流动性。相较于上述单一技术路径,若将煤层注水工艺与氧化溶蚀改造孔隙的方法相结合,通过水力压裂改善煤体裂隙网络结构,并协同过硫酸铵氧化溶蚀煤中小分子相组分,可有效解除小分子对煤体孔道的占据与堵塞状态,两者协同改造能够显著提升煤体渗透性能。

已有研究多为用过硫酸铵浸泡煤粉或圆柱形煤样,难以反映真实的煤体三向应力赋存状态,对真三轴水力压裂原位煤体裂隙渗流特性尚不明确,故采用煤岩多相多场真三轴动态渗流试验系统,开展不同参数过硫酸铵压裂试验,量化分析裂隙结构与渗透率变化,相关结果可为厘清过硫酸铵水力压裂改造煤体渗流特性提供理论参考。

1 试验设计

1.1 试样制备与试验系统

试验煤样取自山西龙门塔煤矿,取样深度 700 m 左右,属于高瓦斯煤层,煤种为中等变质程度的焦煤,其基本参数见表 1。

表 1 煤样基本参数

Table 1 Basic parameters of coal samples %

水分	灰分	挥发分	固定碳	孔隙率
2.73	7.25	23.35	66.67	14.21

将采集的煤块切割成 200 mm×200 mm×200 mm 的试样,并将各表面打磨平整。在试样某一平整面中心,钻一个直径为 18 mm、深度为 105 mm 的压裂孔,向钻孔中置入一根尺寸(长×外径×内径)为 100 mm×17.6 mm×15 mm 的高强度耐腐蚀压裂管,并采用三角支撑架固定以防止压裂管偏移,再以高强度防水耐腐蚀的环氧树脂胶进行密封。压裂管下端有不同数量的分流孔,孔数越多,裸眼段长度越大,如图 1 所示。过硫酸铵水力压裂及渗流测试试验采用自主研发的煤岩多相多场真三轴动态渗流试验系统(见图 2)[23]。

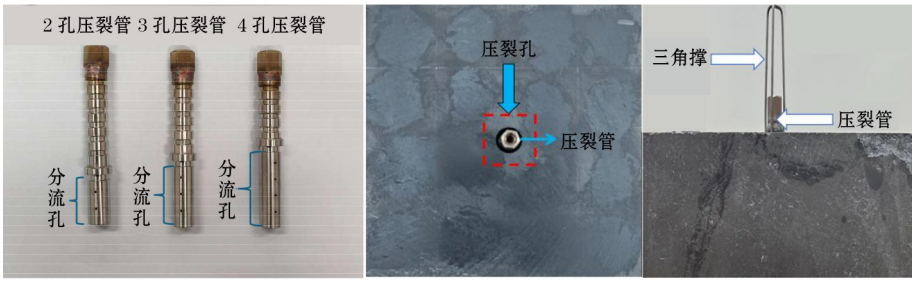


图 1　注液压裂管

Fig.1　Hydraulic injection pipe

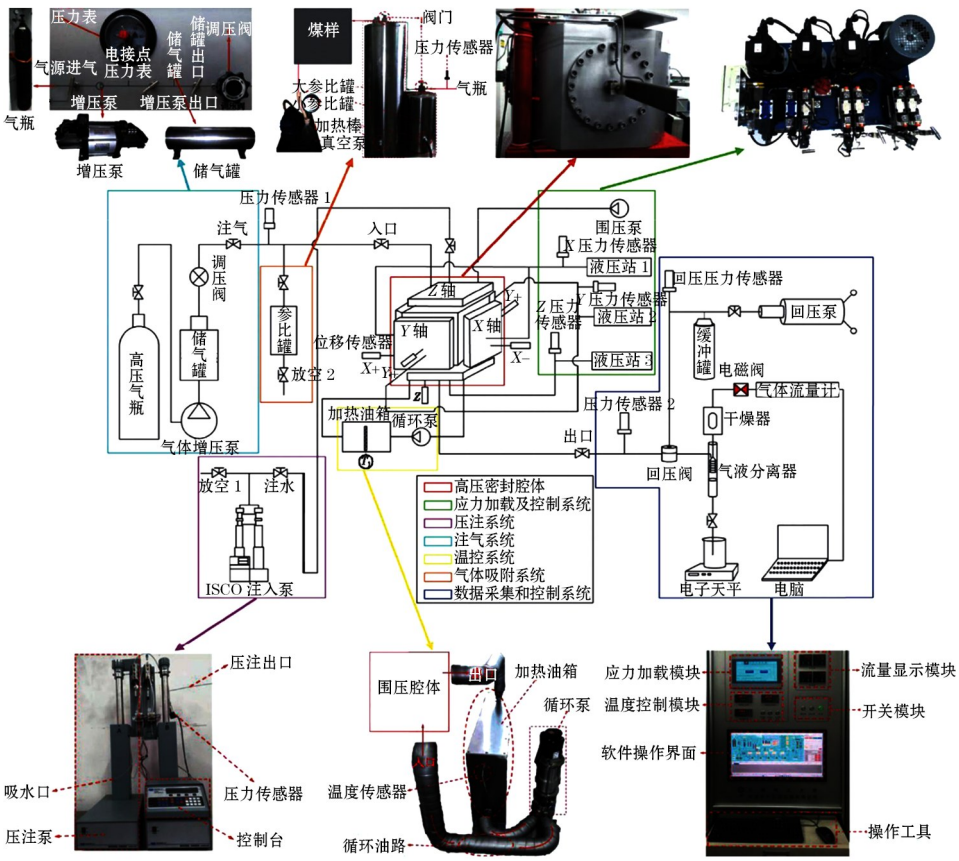


图 2　煤岩多相多场真三轴动态渗流试验系统

Fig.2　Multi-phase and multi-field true triaxial dynamic seepage experimental system for coal rock

1.2　试验步骤

5 组煤样三向加载应力均为定值，垂直应力 σ_v 为 12 MPa，最大水平应力 σ_H、最小水平应力 σ_h 分别为 10 MPa 和 8 MPa。压裂液均采用浓度为 5% 的过硫酸铵溶液。试验参数见表 2，其中，1# 和 2# 煤样使用分流孔数为 2 的压裂管，注液速率均为 6 mL/min，1# 煤样作为空白对照组，采用清水压裂，3#、4# 和 5# 煤样分别采用 2 孔、3 孔、4 孔的压裂管进行压裂，注液速率均为 4 mL/min。压裂管分流孔数量越多，其对应的压注空间越大。

表 2　试验参数设置

Table 2　Parameters setting of experiment

煤样编号	注液速率/(mL·min^{-1})	加载应力/MPa			压裂管类型	压裂液类型
		σ_H	σ_h	σ_v		
1#	6	10	8	12	2 孔	清水
2#	6	10	8	12	2 孔	5%过硫酸铵
3#	4	10	8	12	2 孔	5%过硫酸铵
4#	4	10	8	12	3 孔	5%过硫酸铵
5#	4	10	8	12	4 孔	5%过硫酸铵

(1) 通过高清相机拍摄煤样表面的原始裂隙，确立裂隙的三维坐标。然后将 z 轴端面分割为 16

个等大正方形网格,再用 HU-8 超声波设备测定各区域初始超声波数据。

(2) 将煤样置于真三轴试验系统的高压腔体中,以 0.01 MPa/s 的速度将三向应力加载至预定值,测试不同水平应力下的煤样初始渗透率。

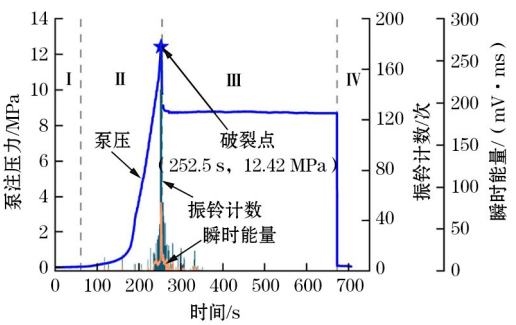
(3) 打开注水泵,以恒定流量将增渗溶液容器中的压裂液注入煤中,待煤体破裂后,保持初始条件继续注水 6 min 左右,关闭注液阀和出液阀,保证压裂液在煤中作用 24 h,然后取出煤样。

(4) 将压裂后的煤样装入高压腔体,测试不同水平应力下的煤样渗透率。渗透率测试结束后,测试分析压裂后煤样的表面裂隙形态和超声波参数。

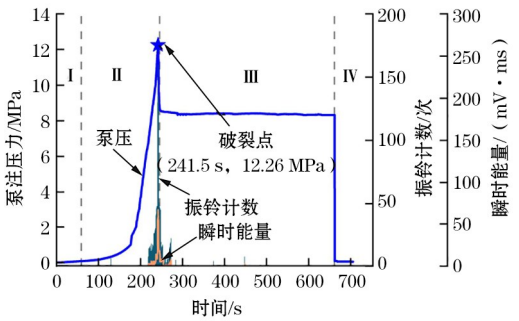
2 结果讨论与分析

2.1 泵注压力变化与声发射动态响应

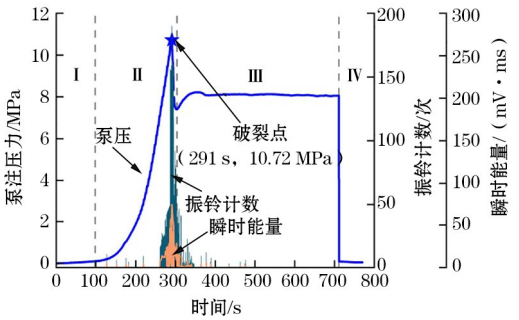
采用声发射振铃计数和瞬时能量反映水力压裂过程中煤样的声发射特征。所有煤样的泵注压力、声发射振铃计数与瞬时能量随时间的变化如图 3 所示。煤样的泵压曲线整体趋势一致,依据泵注压力变化特征可将压裂过程划分为 4 个阶段:压能积蓄阶段(Ⅰ)、增压破裂阶段(Ⅱ)、压力稳定阶段(Ⅲ)、压力卸除阶段(Ⅳ)。5 组煤样的破裂压力、破裂时间以及声发射振铃计数和瞬时能量各不相同,破裂压力分别为 12.42 MPa、12.26 MPa、10.72 MPa、10.13 MPa、9.47 MPa,对应的破裂时间分别为 252.5 s、241.5 s、291 s、298.4 s、318.5 s,其中 1# 和 2# 煤样的破裂压力较大,且升压破裂阶段持续时间更短,原因是这两组煤样的注液速率更高(6 mL/min),导致水压上升较快。3# 、4# 和 5# 煤样破裂压力依次递减,说明在相同条件下,裸眼段压注空间越大,煤样破裂压力越低,这是因为压裂液与裸眼段接触面积增加,压力作用范围更广,压裂液更容易向煤岩中渗滤,同时导致孔隙中流体压力增加[24],煤岩更易大范围破裂。



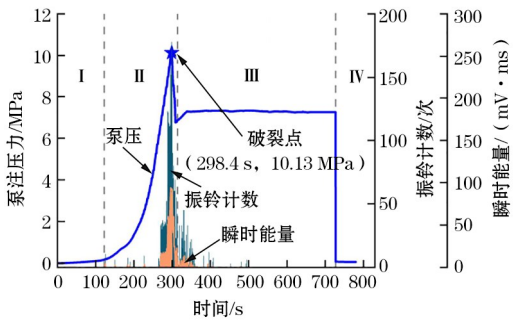
(a) 1# 煤样



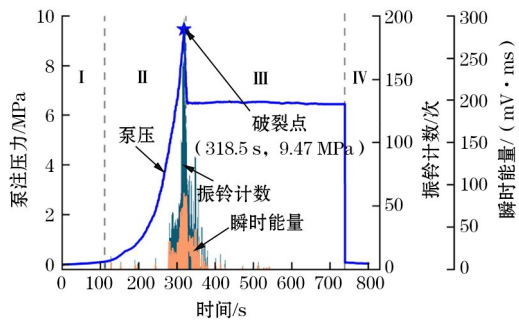
(b) 2# 煤样



(c) 3# 煤样



(d) 4# 煤样



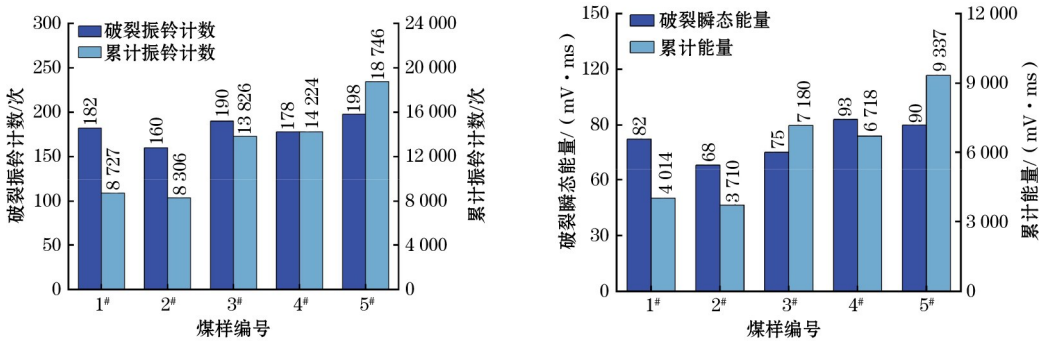
(e) 5# 煤样

图 3 泵注压力曲线与声发射响应特征

Fig.3 Pumping pressure curves and acoustic emission response characteristics

声发射振铃计数可在一定程度上表征压裂过程中裂缝萌生和扩展事件的频率和强度[25],声发射能量可反映煤样破裂程度与规模。定义煤样破裂时的最大振铃计数为破裂振铃计数,定义煤样破裂时产生的最大能量为破裂瞬态能量[26]。5 组煤样破裂

振铃计数、累计振铃计数、破裂瞬态能量以及累计能量如图 4 所示。1# 煤样和 2# 煤样声发射振铃计数少、能量较低，煤样内部裂隙发育差，说明与清水相比，过硫酸铵在压裂期间对裂隙发育的作用并不显著，这与压裂期间过硫酸铵氧化溶蚀速率低相关。5# 煤样声发射振铃计数多、能量值最高，累计振铃计数和最大振铃计数（破裂振铃计数）分别达到 18 746 次、198 次，累计能量达到 9 337 mV·ms，3# 和 4# 煤样次之，表明 5# 煤样裂缝萌生和扩展事件的频率最高，破裂程度与区域最大，裂隙发育最充分，对应于 4 个分流孔和注液速率 4 mL/min 的压裂情况。



（a）振铃计数　（b）破裂能量

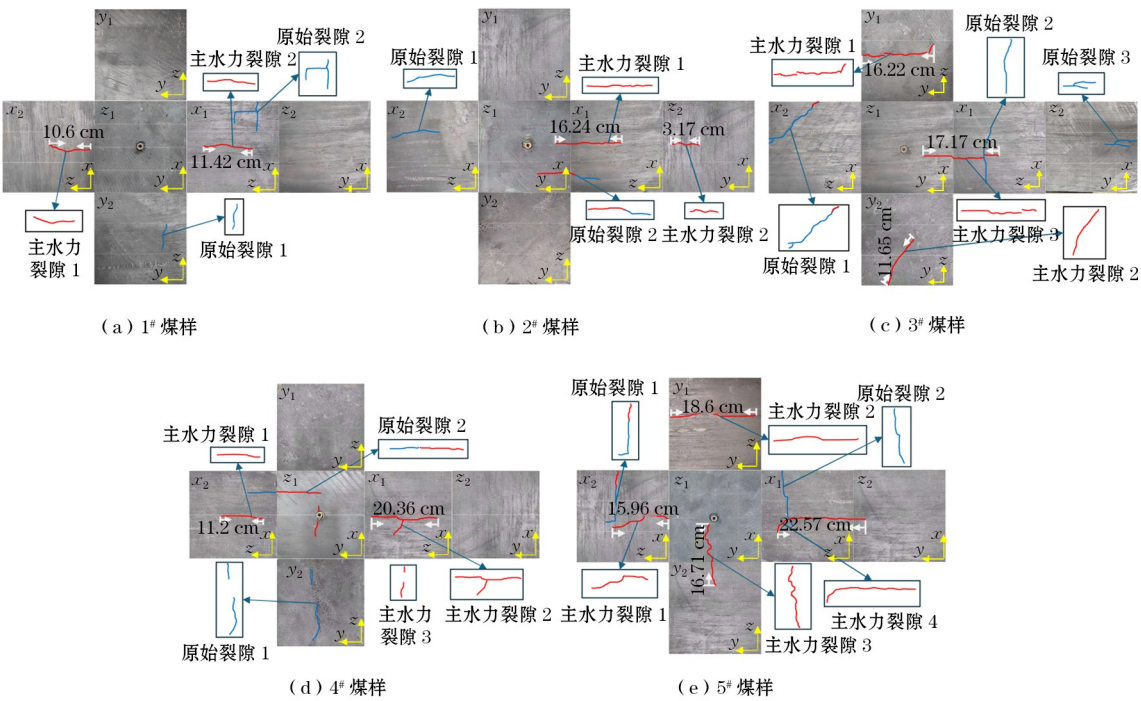
图 4　煤样破裂时振铃计数及能量

Fig.4　Ringing count and energy of acoustic emission when coal samples rupturing

2.2　裂隙结构变化

2.2.1　表面裂隙形态

通过对比水力压裂前后煤样表面裂隙形态，分析不同压裂参数对煤样表面裂隙扩展的影响。煤样对应 x、y、z 轴方向的 6 个端面的编号分别为 x_1、x_2、y_1、y_2、z_1、z_2，5 组煤样表面裂隙发育形态见图 5（煤体表面裂隙已做加粗处理，其中蓝色表示原始裂隙，红色代表水力裂隙及原始裂隙扩展段，颜色标识见电子版）。



（a）1# 煤样　（b）2# 煤样　（c）3# 煤样

（d）4# 煤样　（e）5# 煤样

图 5　水力压裂后煤样表面裂隙发育

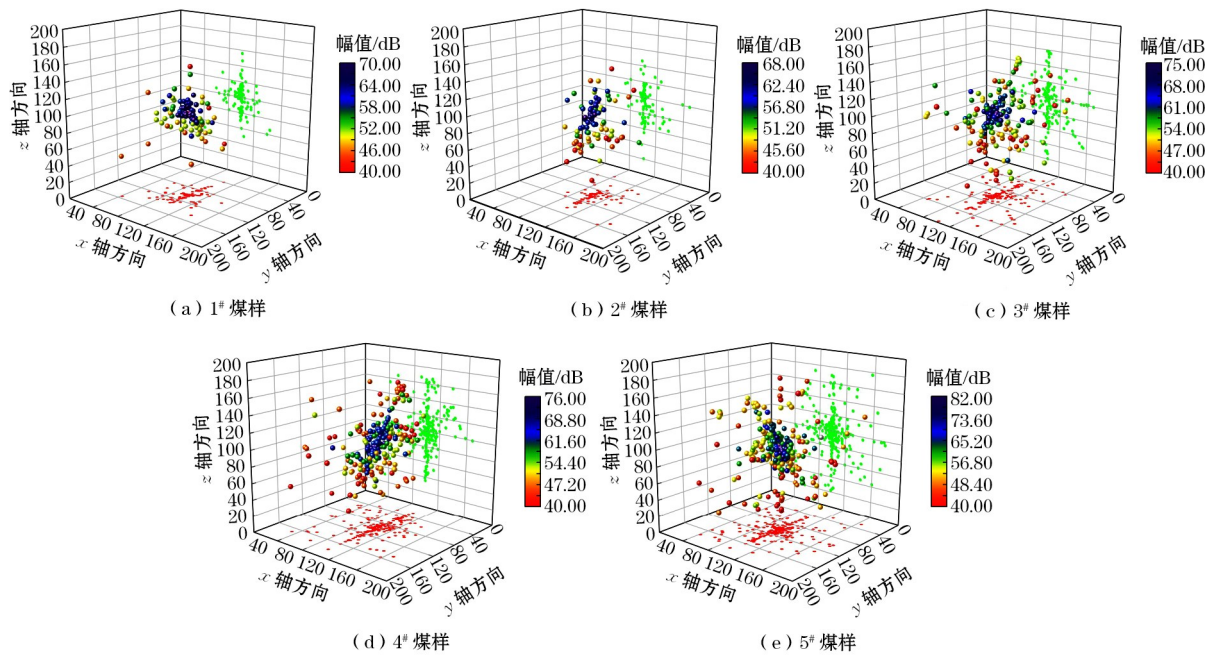
Fig.5　Surface crack development of coal samples after hydraulic fracturing

从图 5 可以看出，5 组煤样的主水力裂隙扩展特征呈现显著差异。其中 1#、2#、4#、5# 煤样初始均含 2 条原始裂隙，3# 煤样原始裂隙数量最多，这一初始条件差异是后续压裂裂隙发育分化的重要基

础。具体而言,1#煤样压裂后仅在 x_1、x_2 端面发育 2 条沿 z 轴扩展的主水力裂隙,无方向偏转和形态变化,原始裂隙与新生裂隙交互;2#煤样压裂后主水力裂隙 1 沿 z 轴贯穿 x_1 与 z_1 端面、主水力裂隙 2 转向 y 轴扩展("多方向扩展"),且 x_1 端面原始裂隙 2 沿 z 轴延伸至 z_1 端面,形成"原始 + 新生"交互模式,复杂度高于 1#煤样;3#煤样压裂后裂隙在 y_1、y_2、x_1 三个端面分散发育,形成 3 条主水力裂隙,主水力裂隙 2 向 y 轴偏转、主水力裂隙 3 穿过原始裂隙 2 时偏移,还首现"新生与原始裂隙交汇",网络连接性优于前两组;4#煤样压裂后形成 3 条主水力裂隙,主水力裂隙 2 呈"Y"形(非直线形态),主水力裂隙 3 沿 x 轴扩展(实现 x、y、z 三轴覆盖),原始裂隙 2 贯穿 x_2 与 z_1 端面,原始裂隙参与度高于 2#煤样;5#煤样压裂后形成 4 条主水力裂隙,扩展方向涵盖 x、y、z 轴(主水力裂隙 1 有向 x 轴偏转的趋势),主水力裂隙 4 呈"L"形、主水力裂隙 2 为 y_1 端面横切缝,还实现"原始-新生""新生-新生"多维度连接,是裂隙发育最充分的试样。综合来看,压裂后水力裂隙发育复杂度从 1#煤样"单一方向、无交互"升至 5#煤样"多方向、多形态、多交互";主水力裂隙数量从 1#煤样的 2 条增至 5#煤样的 4 条,发育端面从 x_1、x_2 扩展至 y_1、y_2、z_1、z_2;原始裂隙参与度从 1#煤样"无作用"到 2#煤样"单一激活",再到 5#煤样"与新生裂隙交汇",作用逐步增强。

2.2.2 声发射三维定位分析

声发射定位信号能够反映煤体压裂过程中破裂点位置以及内部裂隙扩展情况。对 5 组煤样压裂过程中采集的声发射信号进行滤波去噪后得到煤体内部声发射定位点分布及投影,如图 6 所示。



(a) 1#煤样 (b) 2#煤样 (c) 3#煤样

(d) 4#煤样 (e) 5#煤样

图 6 煤样声发射定位点分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of acoustic emission location points in coal samples

煤体内部声发射定位点分布区域与图 5 中煤体表面裂隙扩展形态基本一致,且 5 组煤样的声发射定位点均大致沿垂向分布,主要集中在压裂管裸眼段附近,这表明煤体压裂裂隙从裸眼段起裂并扩展至煤样表面。过硫酸铵压裂(注液速率 6 mL/min、压注空间 2 孔)的 2#煤样声发射定位点最少,最大幅值仅 68 dB,为所有煤样中损伤程度最低,而相同注液速率与压注空间下清水压裂的 1#煤样最大幅值达 70 dB,损伤程度略高,且两者水平方向主裂隙均仅沿 y 轴方向(最大水平应力方向)定向发展,压裂影响范围有限,高幅值点集中于 $z=80\sim120$ 区域,声发射定位点局部聚集。随着过硫酸铵压裂条件优化,煤样损伤程度逐步提升,具体表现为:注液速率降至 4 mL/min(压注空间保持 2 孔)时最大幅值升至 75 dB,压注空间扩大至 3 孔(注液速率保持 4 mL/min)时增至 76 dB,压注空间进一步扩大至 4 孔(注液速率保持 4 mL/min)时达 82 dB 且定位点数量最多,成为损伤程度最高的组别;同时裂隙发育方向发生关键转变,从单向发育过渡为沿 y 轴与 x 轴(最小水平应力方向)双向定向发育并持续保持,

压裂影响范围也逐步扩大；注液速率为 4 mL/min、压注空间 2 孔时，压裂核心区扩展至 z=80～130 区域，压注空间增至 3 孔时，压裂核心区上移至 z=90～140 区域，压注空间增至 4 孔时，主要压裂区沿 z 轴扩展至80～145 区域，定位点近乎全域分布，压裂液波及范围与裂隙网络发育充分性均显著优于其他组别，对应于 3# 、4# 和 5# 煤样声发射定位点分布特征。整体来看，在过硫酸铵压裂体系中，降低注液速率、扩大压注空间，可显著提升煤样损伤程度，裂隙发育更加丰富，并通过两者协同作用持续扩大压裂影响范围，最终实现较好的压裂效果。

2.2.3　超声波特性演化规律

为探究过硫酸铵压裂后煤体内部裂隙的发育情况，采用超声波测试仪进行无损检测[27]。超声波穿透煤体裂隙时，部分声波能量发生散射，导致能量发生衰减[28]，裂隙越多，能量损耗越大。由于不同压裂程度的煤体内部孔隙结构、裂隙分布等特征存在差异，超声波在其中传播时的能量衰减程度各不相同。煤样超声测试区域分布如图 7 所示。

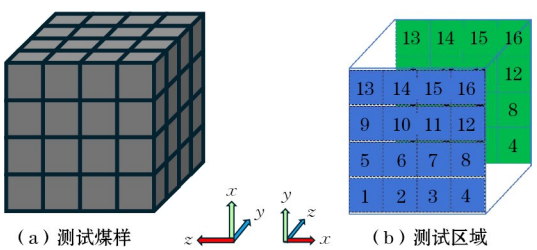


图 7　超声波检测设计

Fig.7　Ultrasonic testing design

5 组煤样超声波波速变化情况如图 8 所示(颜色标识见电子版)，左边柱状图为压裂前后不同区域的纵波波速变化，右边热力图为煤样压裂前后不同区域的波速差值。由图 8(a)可知，1# 原煤在第 14 块区域有较明显裂隙，真三轴清水压裂后，代表压裂后波速的蓝色柱状图在多个区域有不同程度的降低，说明这些位置裂隙有不同程度的发育。热力图直观反映了各个区域波速下降(ΔV)趋势，其中 4 号区域的波速衰减程度最大，其次是 5 号和 9 号区域，这些区域产生了新裂隙或原裂隙有不同程度发育。由图 8(b)可知，2# 煤压裂前，4 号区域裂隙较明显；真三轴过硫酸铵压裂后，各个区域波速均有不同程度降低，其中 11 号区域衰减幅度最大，裂隙发育最优，8 号、13 号区域次之。3# 煤压裂前，在 14 号、15 号区域有较明显的裂隙；压裂后，13 号区域波速衰减幅度最大，裂隙得到较好发育，4 号、15 号、16 号区域次之。4# 煤压裂前裂隙分布较多；压裂后，13 号区域波速衰减幅度最大，裂隙发育最好，4 号、8 号、9 号、15 号区域次之。而 5# 煤压裂处理后，3 号、7 号、11 号、15 号区域波速降低最显著，4 号、8 号、12 号区域次之，其他各区域的波速也有较明显的衰减，说明这些区域的裂隙网络发育较完善，裂隙得到大幅延伸和扩展。

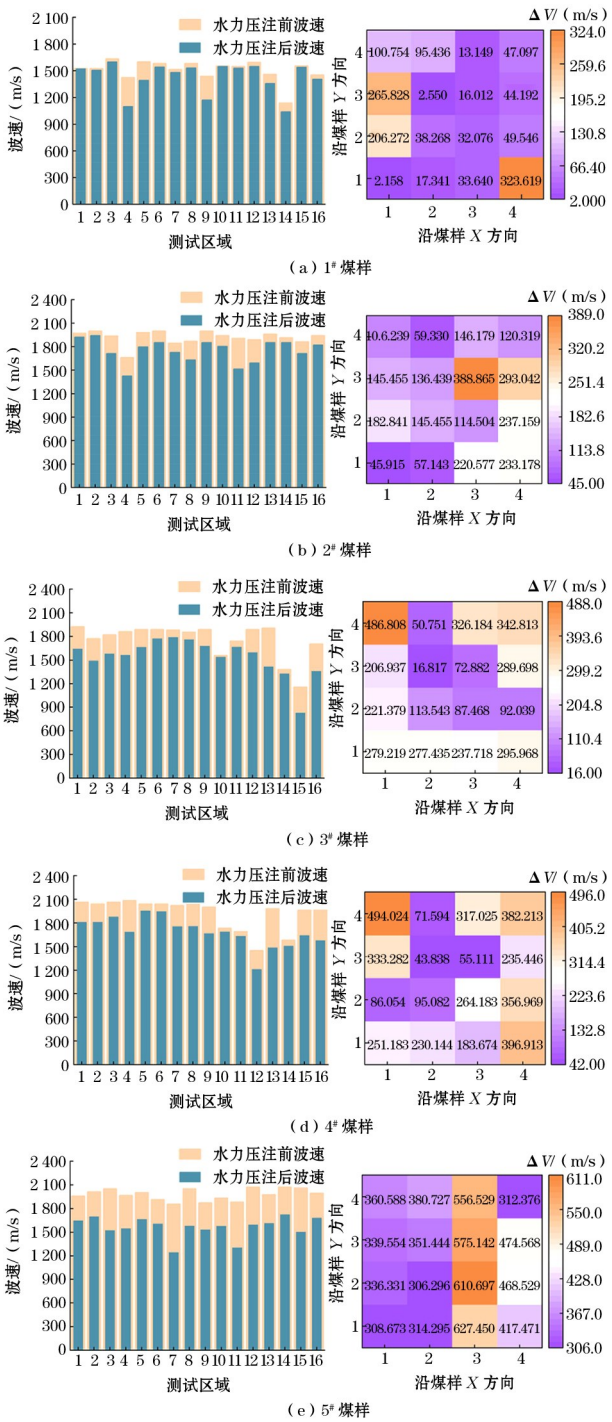


图 8　煤体超声波波速变化

Fig.8　Changes of ultrasonic wave velocity in coal samples

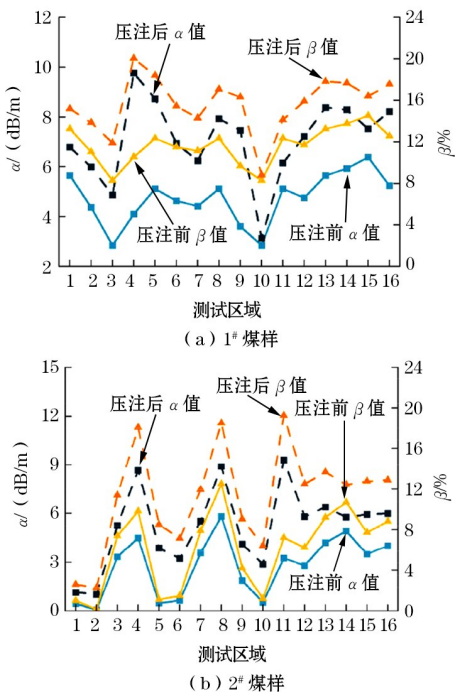
超声波振幅衰减系数(α 值)和衰减比值(β 值)是定量表征煤岩裂隙发育特征的关键参数[29]。为了深入分析水力压裂处理后煤层裂隙发育程度与数量的变化,根据公式(1)和公式(2)[30]计算 α 值和 β 值,且 α 值、β 值越大,表明煤中裂隙发育越佳。

$$\alpha=-\frac{20\times\log\frac{A_2}{A_1}}{L} \tag{1}$$

$$\beta=\left(1-\frac{A_2}{A_1}\right)\times100\% \tag{2}$$

式中:α 为超声衰减系数,dB/mm;β 为超声衰减比值;A_1 为超声发射振幅,mV;A_2 为超声接收振幅,mV;L 为煤样的长度,mm。

图 9 展示 5 组煤样 α 值与 β 值的变化,压裂处理后两值均有不同程度增大。其中,1# 煤的 4,5,9 号区域,2# 煤的 4,5,11 号区域,3# 煤的 4,13,15,16 号区域,4# 煤的 4,8,9,13,16 号区域和 5# 煤的 3,7,11,15 号区域的 α 值与 β 值增幅较大,说明这些区域裂隙发育较好,且与前述超声波波速降低最大的区域相对应。其中,2# 煤比 1# 煤 α 值增幅更大,即 2# 煤裂隙发育更好,而根据声发射定位点分布可知,2# 煤比 1# 煤损伤程度低,但是由于 2# 煤压裂后在过硫酸铵氧化溶蚀作用下煤体内部产生更多裂隙,裂隙改善效果较清水压裂更好。3# 煤比 2# 煤改造效果好,α 值增幅大的区域更多。5# 煤的 α 值增幅比 3# 和 4# 煤的更大,且增幅大的区域多,即 5# 煤压裂期间内部裂缝贯通范围更大,裂隙网络发育更完善,表明使用 4 孔压裂管压裂使得煤体内部裂隙扩展范围更大,立体连通性更强。



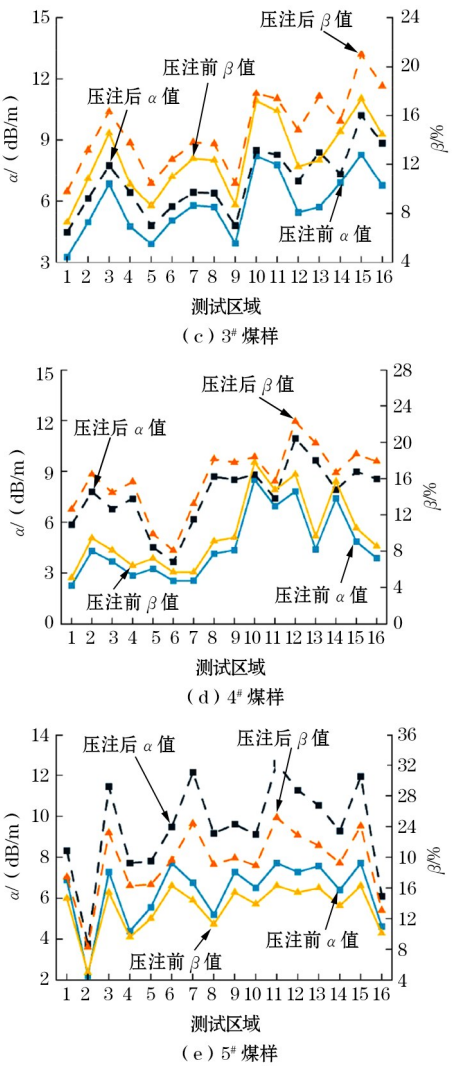


图 9 煤样 α、β 值处理前后的变化

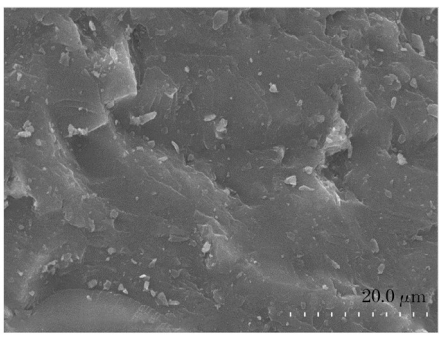
Fig.9 Changes in α and β values of coal samples before and after hydraulic fracturing

2.2.4 氧化溶蚀与水力致裂协同作用分析

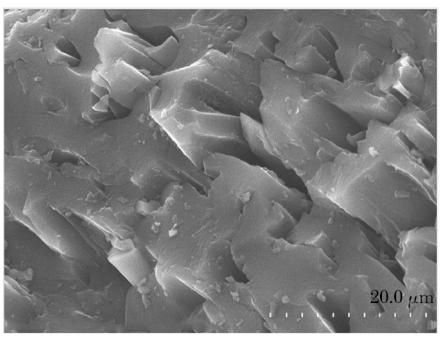
水力致裂形成的三维裂隙网络,在实现物理扩容的同时,为氧化剂的输运与反应提供了关键条件,新生裂隙面大幅增加了氧化剂与煤基质的有效接触比表面积,而贯通渗流通道则保障了氧化剂向裂隙尖端及深部煤体的高效输运。这构成了“物理造缝先行、化学溶蚀增效”协同作用的物理基础。扫描电镜(SEM)对比结果(见图 10)显示,氧化剂处理前的煤样表面呈现典型脆性断裂形貌,如台阶状断口与次生微裂纹。经氧化剂处理后,煤样表面出现显著的非均质溶蚀特征,煤基质中活性组分被选择性氧化形成蜂窝状孔洞,碳酸盐类矿物发生部分至完全溶解,导致整个煤样表面粗糙度显著增加、有效孔径扩大。这证实氧化反应沿水力裂隙通道发生,并从

微观尺度系统性扩宽裂隙并使初始裂隙网络复杂化。

该协同机制本质上是一个物理-化学耦合的动态正反馈过程。水力致裂建立的裂隙网络为氧化剂提供了优势传输通道和活性反应界面；氧化溶蚀则通过溶解矿物、扩大孔径和弱化煤体力学强度，反馈增强裂隙的扩展能力和结构稳定性，驱动裂隙网络结构与渗透性能提升。



（a）原始煤样



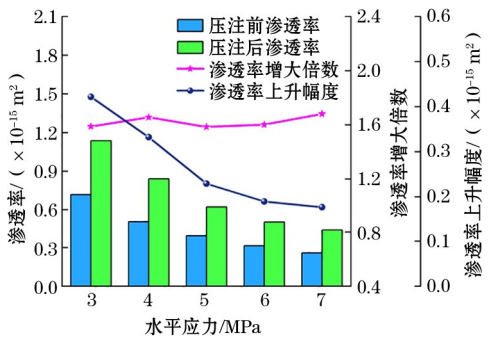
（b）氧化溶蚀后煤样

图 10　氧化溶蚀前后煤样表面形貌演化 SEM 图

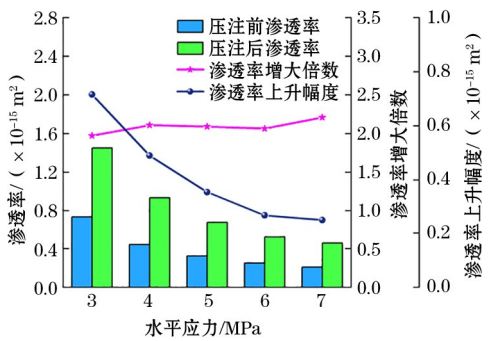
Fig.10　SEM images of the evolution of coal sample surface morphology before and after oxidative dissolution

2.3　渗透率变化规律

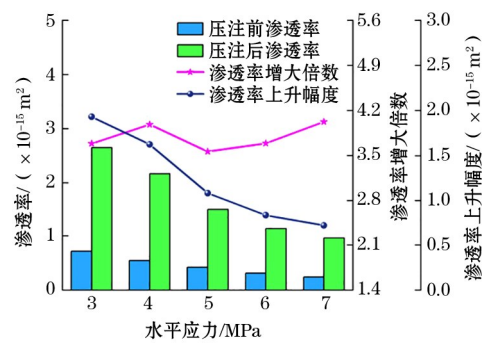
不同水平应力条件下，煤样压裂前后的渗透率变化如图 11 所示，在 3 MPa、4 MPa、5 MPa、6 MPa 和 7 MPa 五种水平应力下，5 组煤样水力压裂前后的渗透率变化趋势大致相同，煤样初始渗透率在 0.21×10^{-15}～0.73×10^{-15} m^2 之间，且均随水平应力升高而下降，表明地应力压缩了煤体内的渗流通道。压裂后，所有煤样渗透率均显著提升，压裂后的渗透率在 0.44×10^{-15}～4.04×10^{-15} m^2 之间，渗透率增大倍数为 1.58～6.49 倍，渗透率上升幅度为 0.18×10^{-15} m^2 至 3.36×10^{-15} m^2，表明水力压裂对改善煤体渗透率有较好的效果。所有煤样的渗透率上升幅度均随水平应力的增大而降低。其中，5# 煤压裂后的渗透率提升效果最优，其上升幅度最大，达 3.36×10^{-15} m^2。2# 煤、3# 煤和 4# 煤在压裂后渗透率的上升幅度次之，最大上升幅度分别为 0.72×10^{-15} m^2、1.93×10^{-15} m^2 和 2.12×10^{-15} m^2。1# 煤在压裂后渗透率的上升幅度最小，最大上升幅度仅有 0.42×10^{-15} m^2。其中，1# 煤与 2# 煤在不同水平应力下的渗透率增大倍数变化波动不大且增大倍数较小，最大值分别为 1.68，2.21 倍，说明 1# 煤与 2# 煤内部裂隙发育较单一，渗透率改善效果弱。与清水压裂处理相比，采用过硫酸铵溶液进行水力压裂，煤样经氧化溶蚀作用后，渗透率得到进一步提升。3# 煤、4# 煤与 5# 煤在不同水平应力下的渗透率增大倍数均较大，最大值分别为 4.03，4.60，6.49 倍，说明在过硫酸铵压裂过程中，降低注液速率、扩大压注空间能显著增强对介质渗透率的改善作用。



（a）1# 煤样



（b）2# 煤样



（c）3# 煤样

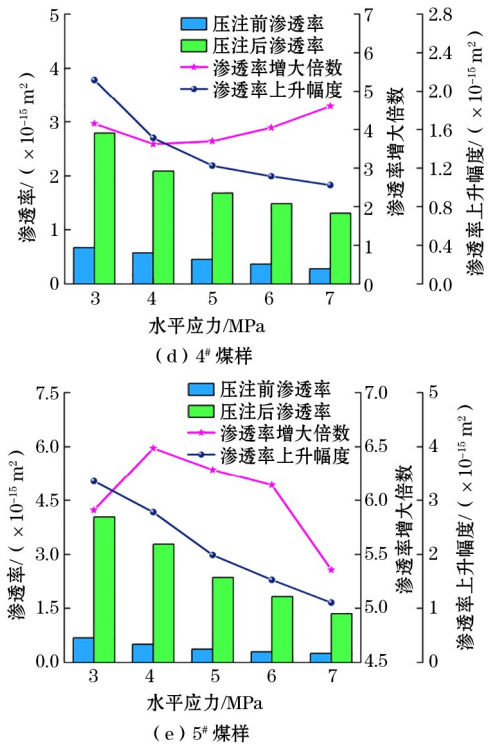


图 11 不同水平应力下煤样处理前后渗透率变化

Fig.11 Changes in permeability of coal samples before and after treating under different horizontal stresses

3 结论

(1) 基于泵注压力曲线,将过硫酸铵水力压裂过程分为压能积蓄、增压破裂、压力稳定、压力卸除4个阶段。5组煤样的破裂压力分别为12.42 MPa、12.26 MPa、10.72 MPa、10.13 MPa、9.47 MPa,破裂时间分别为252.5 s、241.5 s、291 s、298.4 s、318.5 s。同等情况下,注液速率越大,煤体破裂所需时间越短,压注空间越大,煤体破裂压力越低。1# 煤样和2# 煤样声发射振铃计数少、能量较低,裂隙发育差。5# 煤样声发射振铃计数最高、能量最密集,裂隙发育最充分,3# 和4# 煤样次之。

(2) 2# 煤样声发射定位点最少,5# 煤样定位点最多且分布最广。5组煤样最大声发射幅值依次为70 dB、68 dB、75 dB、76 dB、82 dB。水力压裂空间相同时,注液速率较小的3# 煤样的声发射定位点更密集,裂隙发育更充分。在注液速率一致时,水力压注空间越大,煤体内部裂缝贯通范围越广,立体连通性越强。水力压裂会导致煤体超声波速下降。相较于清水压裂,过硫酸铵溶液可通过氧化溶蚀作用进一步增强煤样裂隙网络。

(3) 水力压裂后,5组煤样在不同水平应力下的渗透率均有提升,最大增大倍数依次为1.68倍、2.21倍、4.03倍、4.60倍、6.49倍。其中1# 煤样渗透率增幅最小,对应裂隙发育较弱;5# 煤样渗透率增幅最大,裂隙发育最优。相较于清水压裂,过硫酸铵压裂对煤样渗透率的改善效果更显著。低浓度值的过硫酸铵压裂即可达到良好的渗透率改善效果,大大降低技术成本及消除对环境的影响,具有经济可行性与环境安全性,同时高效的瓦斯抽采亦有助于实现甲烷减排的环保目标,故该技术具有较好的应用前景。

参考文献(References):

[1] 胡健.全球煤炭资源利用现状、供需格局及发展趋势[J].中国煤炭,2024,50(11):153-162.
Hu Jian. The utilization status, supply and demand pattern, and development trend of global coal resources[J]. China Coal,2024,50(11):153-162.

[2] Jiang Bingyou, Sun Qian, Ni Guanhua. Study on the wettability of a composite solution based on surface structures of coal [J]. Acs Omega, 2020, 5 (43): 28341-28350.

[3] 贾男.低透气性煤层多组分酸化压裂增透技术研究[J].矿业安全与环保,2021,48(3):27-32.
Jia Nan. Study on antireflection technology of multi-component acid fracturing in low permeability coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 27-32.

[4] Yang Changxin, Yang Zhaozhong, Wang Hehua, et al. Mechanisms of non-uniform propagation of hydraulic fractures: a comprehensive numerical investigation [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2025, 178:106307.

[5] Yang Yuehui, Sun Dongsheng, Ma Xiaodong, et al. A total system stiffness approach for determining shut-in pressure in hydraulic fracturing stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 192:106160.

[6] 毕彩芹,迟焕鹏,单衍胜,等.水城矿区煤层气储层特征及压裂改造工艺研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):182-187.
Bi Caiqin, Chi Huanpeng, Shan Yansheng, et al. Analysis of coalbed methane reservoir characteristics and reconstruction process in Shuicheng Mining Area[J]. Coal Science and Technology,2017,45(9):182-187.

[7] 秦雷,王辉,李树刚,等.冻结煤未冻水与孔隙特征变化核磁共振研究[J].清华大学学报(自然科学版),2025,65(3):601-613.
Qin Lei, Wang Hui, Li Shugang, et al. Nuclear magnetic resonance study of changes in unfrozen water and pore characteristics in frozen coal [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2025,65(3):601-613.

[8] 王亮,廖晓雪,褚鹏,等.瓦斯抽采穿层钻孔钻扩造穴卸压增透机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):75-82.
Wang Liang, Liao Xiaoxue, Chu Peng, et al. Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole [J]. Coal Science and Technology,2021,49(5):75-82.

[9] 张永将,季飞,赵同彬,等.临空巷道坚硬顶板水力割缝-压裂联合控顶卸压技术[J].煤炭学报,2024,49(12):4739-4751.
Zhang Yongjiang, Ji Fei, Zhao Tongbin, et al. Theoretical and applied research on hydraulic slit-fracture joint roof control and pressure relief of hard roof in goaf roadway[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(12):4739-4751.

[10] 王刚,王恩茂,隆清明,等.考虑滤失效应的煤层水力压裂与裂隙扩展关系研究[J].岩土力学,2025,46(4):1071-1083.
Wang Gang, Wang Enmao, Long Qingming, et al. Relationship between hydraulic fracturing and fracture propagation in coal seams considering filtration effect[J]. Rock and Soil Mechanics,2025,46(4):1071-1083.

[11] Gao Shikang, Jiang Zebiao, Tian Shixiang, et al. Characterization of the multiscale evolution of coal pore structure under liquid CO_2 phase change fracturing[J]. ACS Omega,2025,10(8):8336-8348.

[12] 张健玉,刘泽功,傅师贵,等.深部松软高瓦斯煤层底板岩层深孔聚能控制爆破增透研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(6):1311-1322.
Zhang Jianyu, Liu Zegong, Fu Shigui, et al. Study on permeability enhancement by deep-hole shaped-charge controlled blasting of deep soft and high gas coal seam floor [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(6):1311-1322.

[13] 张帆,马耕,冯丹.大尺寸真三轴煤岩水力压裂模拟试验与裂缝扩展分析[J].岩土力学,2019,40(5):1890-1897.
Zhang Fan, Ma Geng, Feng Dan. Hydraulic fracturing simulation test and fracture propagation analysis of large-scale coal rock under true triaxial conditions[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(5):1890-1897.

[14] Chen Yulong, Meng Qingxiang, Zhang Jianwei. Effects of the notch angle, notch length and injection rate on hydraulic fracturing under true triaxial stress: an experimental study [J]. Water,2018,10(6):801.

[15] 邬爱清,范雷,钟作武,等.现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2020,39(11):2161-2171.
Wu Aiqing, Fan Lei, Zhong Zuowu, et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(11):2161-2171.

[16] 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 of fracture geometry during hydraulic fracturing in coal[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(10):3677-3684.

[17] 李贤忠,林柏泉,翟成,等.单一低透煤层脉动水力压裂脉动波破煤岩机理[J].煤炭学报,2013,38(6):918-923.
Li Xianzhong, Lin Baiquan, Zhai Cheng, et al. The mechanism of breaking coal and rock by pulsating pressure wave in single low permeability seam[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(6):918-923.

[18] 李雪彬,金力新,陈超峰,等.深层煤岩气水平井压裂关键技术:以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例[J].油气藏评价与开发,2024,14(4):629-637.
Li Xuebin, Jin Lixin, Chen Chaofeng, et al. Key technologies of horizontal well fracturing for deep coal-rock gas: a case study of Jurassic in Baijiahai area, Junggar Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024,14(4):629-637.

[19] Zhang Qihui, Li Haitao, Li Ying, et al. A dynamic permeability model in shale matrix after hydraulic fracturing: considering mineral and pore size distribution, dynamic gas entrapment and variation in poromechanics[J]. Processes,2024,12(1):117.

[20] 倪小明,李全中,王延斌,等.多组分酸对不同煤阶煤储层化学增透实验研究[J].煤炭学报,2014,39(增刊2):436-440.
Ni Xiaoming, Li Quanzhong, Wang Yanbin, et al. Experimental study on chemical permeability improvement of different rank coal reservoirs using multi-component acid [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Suppl. 2): 436-440.

[21] Jing Zhenhua, Gao Shuai, Rodrigues Sandra, et al. Influence of porosity on the reactivity of inertinite and vitrinite toward sodium hypochlorite: implications for enhancing coal seam gas development [J]. International Journal of Coal Geology,2021,237:103709.

[22] 杨娟,许思雨,戴俊,等.活化过硫酸铵溶液对煤样氧化增透的实验研究[J].煤炭学报,2020,45(4):1488-1498.
Yang Juan, Xu Siyu, Dai Jun, et al. Experimental study on oxidative improving-permeability of coal samples with activated ammonium persulfate solution[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(4):1488-1498.

[23] 郑春山,韩飞林,江丙友,等.煤体原位水力压注多尺度孔裂隙演化及渗透率跃变规律[J].中国矿业大学学报,2024,53(4):710-725.
Zheng Chunshan, Han Feilin, Jiang Bingyou, et al. Coal multi-scale pore fracture variations and permeability sharp increase characteristics induced by in-situ hydraulic injection [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024,53(4):710-725.

[24] 曾凡辉,唐波涛,王涛,等.考虑渗滤效应的压裂裸眼井破裂压力预测模型[J].天然气地球科学,2019,30(4):549-556.

Zeng Fanhui, Tang Botao, Wang Tao, et al. Prediction model of fracture initiation pressure of open hole well considering penetration effect[J]. Natural Gas Geoscience, 2019,30(4):549-556.

[25] 柴望阳,李文达,梁卫国,等.煤系储层 N_2 泡沫压裂裂缝垂向跨界面扩展与渗透性特征研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(6):1596-1611.
Chai Wangyang, Li Wenda, Liang Weiguo, et al. Study on vertical cross-interface expansion and permeability characteristics of N_2 foam fracturing cracks in coal measures reservoirs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2025,44(6):1596-1611.

[26] 李全贵,王明杰,余旭,等.流量控制式脉动水力压裂裂缝扩展特征试验研究[J].煤炭科学技术,2025,53(2):178-189.
Li Quangui, Wang Mingjie, Yu Xu, et al. Experimental study on characteristics of fracture propagation in pulsating hydraulic fracturing with flow control[J]. Coal Science and Technology,2025,53(2):178-189.

[27] Wang Zheng, Lin Baiquan, Li He, et al. Acetone erosion and its effect mechanism on pores and fractures in coal[J]. Fuel,2019,253:1282-1291.

[28] Lin Baiquan, Wang Zheng, Yang Wei, et al. Fracture development characteristics of coal under organic solvent erosion and its nondestructive testing method[J]. Energy & Fuels,2021,35(17):13788-13800.

[29] 张晓君,林芊君,宋秀丽,等.裂隙岩体损伤破裂演化超声波量化预测研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):378-383.
Zhang Xiaojun, Lin Qianjun, Song Xiuli, et al. Quantitative ultrasound prediction on damage and fracture evolution of fractured rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(2):378-383.

[30] Zheng Chunshan, Liao Feng, Xue Sheng, et al. Experimental investigation on pores and permeability variation characteristics of coal treated by chemical solvents [J]. Geoenergy Science and Engineering,2023,223:211514.