



采空区下伏煤层水力压裂试验研究与应用

陆泳鑫 胡胜勇 李国富 武玺 路佳旗 杨育涛 张村 苏燕

引用本文:

陆泳鑫, 胡胜勇, 李国富, 等. 采空区下伏煤层水力压裂试验研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 231-242.

LU Yongxin, HU Shengyong, LI Guofu. Experimental study and application of hydraulic fracturing in underlying coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 231-242.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0286>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

煤岩二次暂堵压裂裂缝扩展规律试验研究

Experimental study of hydraulic fracture propagation behavior during temporary plugging re-fracturing in coal formation

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 254-259 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/86adaba6-33f2-46e8-8228-b29989637248>

煤层顶板间接压裂裂缝扩展机制及影响因素

Extension mechanism and influencing factors of indirect fracturing fractures on coal seam roof

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 171-182 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0910>

煤层气直井压裂效果及其对产能影响

Hydraulic fracturing effect of CBM vertical well and its impact on productivity: a case study of Yaojie Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 130-136 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0539>

屯兰区块煤层气井压裂特征多尺度分析

Multi-scale analysis of fracturing characteristics of coalbed methane wells in Tunlan Block

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 148-158 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0433>

高煤阶煤样水力压裂前后应力渗透率试验研究

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

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 353-360 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1789>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陆泳鑫, 胡胜勇, 李国富, 等. 采空区下伏煤层水力压裂试验研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 231-242.

LU Yongxin, HU Shengyong, LI Guofu, *et al.* Experimental study and application of hydraulic fracturing in underlying coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 231-242.

采空区下伏煤层水力压裂试验研究与应用

陆泳鑫¹, 胡胜勇^{1,2,3}, 李国富^{2,3}, 武玺⁴, 路佳旗¹, 杨育涛¹, 张村⁵, 苏燕⁶

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. 晋能控股装备制造集团有限公司, 山西 晋城 048006; 3. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048012; 4. 山西蓝焰煤层气集团有限责任公司, 山西 晋城 048200; 5. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 6. 山东电子职业技术学院, 山东 济南 250100)

摘要: 采空区下伏煤层气资源储量丰富, 长期未能有效开发。水力压裂技术是一种提高煤层气采收率的有效手段, 上覆煤层的开采与重新压实会直接影响采空区下伏煤层水力裂缝的扩展行为。通过大尺寸(300 mm×300 mm×300 mm)真三轴水力压裂试验, 分析了不同加卸载应力扰动程度下煤体的力学与声发射响应特征, 提出了表征煤体损伤程度的损伤变量 T , 明晰了损伤与水力裂缝起裂与扩展规律之间的关系。结果表明: 采空区下伏煤体垂向应力加载阶段引起的损伤显著大于卸载阶段, 垂向加载应力不超过 11 MPa 时, 煤体处于弹性阶段, 损伤极少; 加载至 11~15 MPa, 处于屈服阶段, 损伤大幅增加; 加载至 15~18 MPa, 处于强化阶段, 煤体孔裂隙逐渐被压实。损伤变量 T 可以有效表征煤体内部损伤程度, T_c 为煤体未经过加卸载应力扰动时的损伤变量。 $T = T_c$ 时, 煤体内部的损伤程度与未经过加卸载应力扰动的煤体损伤程度相当; $T > T_c$ 时, 煤体呈应力损伤态, T 越大, 损伤程度越高; $T < T_c$ 时, 煤体呈应力压实态, T 越小, 压实程度越高。煤体应力损伤程度与破裂压力呈负相关, 高损伤程度使得煤体更容易破裂, 并筒近端容易形成主水力裂缝, 有利于开展水力压裂。煤体的压实程度与破裂压力呈正相关, 高压实程度使得水平应力差对水力裂缝扩展的影响减弱, 并筒近端水力裂缝发育, 不易形成主水力裂缝, 阻碍水力压裂开展。基于研究成果制定了采空区下伏煤层水力压裂施工方案优化原则并在现场应用, 优化后的方案水力压裂造缝能力显著提高。

关键词: 采空区; 下伏煤层; 煤层气; 水力压裂; 损伤变量; 裂缝扩展

中图分类号: TE37 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)04-0231-12

Experimental study and application of hydraulic fracturing in underlying coal seam

LU Yongxin¹, HU Shengyong^{1,2,3}, LI Guofu^{2,3}, WU Xi⁴, LU Jiaqi¹, YANG Yutao¹, ZHANG Cun⁵, SU Yan⁶

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Jinneng Holding Equipment Manufacturing Group Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 3. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China; 4. Shanxi Lanyan Coalbed Methane Company Limited, Jincheng 048200, China; 5. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 6. Shandong College of Electronic Technology, Jinan 250100, China)

Abstract: The coalbed methane resource under goaf is rich, but has not been effectively developed for a long time. Hydraulic fracturing technology stands as an effective means to augment coalbed methane recovery. The extraction and re-compaction of overlying coal seam will directly affect the expansion behavior of hydraulic fractures in the underlying coal seam. Though the large-scale (300 mm×300 mm×300 mm) true triaxial hydraulic fracturing experiments, the mechanical and acoustic emission response characteristics of coal were analyzed under different levels of loading and unloading stress perturbations. The damage variable T was proposed to characterize the degree of coal damage, and the relationship between damage and the initiation and expansion patterns of hydraulic fractures was elucidated. The results revealed that, the damage induced by vertical stress loading in the underlying coal significantly exceeded that in the unloading

收稿日期: 2024-03-07 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2024-0286

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目(2020T130389); 煤与煤层气共采国家重点实验室开放基金资助项目(2022KF15)

作者简介: 陆泳鑫(1998—), 男, 宁夏盐池人, 硕士研究生。E-mail: 17695069180@163.com

通讯作者: 胡胜勇(1984—), 男, 湖北随州人, 教授, 博士生导师。E-mail: hsyztz@163.com

stage. When the vertical loading stress was below 11 MPa, the coal remained in an elastic stage with minimal damage. Loading between 11~15 MPa corresponded to the yielding stage, witnessing a substantial increase in damage. Loading between 15~18 MPa led to the strengthening stage, the pores and fractures of coal were gradually compacted. Damage variables T can effectively characterize the degree of internal damage of coal. When $T=T_c$, the internal damage of coal was comparable to that of a coal that has not disturbed by loading and unloading stress. T_c is the damage variable of coal without loading and unloading stress disturbance. When $T>T_c$, the coal exhibited a stress-damaged state, with higher values of T corresponding to increasing damage levels. Conversely, when $T<T_c$, the coal demonstrated a stress-compacted state, with smaller values of T indicating higher compaction degrees. The degree of stress damage in coal was negatively correlated with the fracture pressure, a high degree of damage made coal more prone to fracture, and it was favor to form the primary hydraulic fractures near the wellbore, which was conducive to hydraulic fracturing. The degree of compaction of coal was positively correlated with fracture pressure. The high degree of compaction weakened the effect of horizontal stress difference on hydraulic fracture expansion, and the hydraulic fracture near the wellbore was more developed, which hindered the formation of primary hydraulic fractures. Based on the research results, the principle of hydraulic fracturing construction scheme optimization for underlying coal seam in goaf was formulated and applied in the field. The hydraulic fracturing ability of the optimized scheme was significantly improved.

Key words: goafs; underlying coal seam; coalbed methane; hydraulic fracturing; damage variable; fracture expansion

0 引 言

煤层气是一种具有巨大潜力的非常规清洁能源,它的开发和利用,可以有效减少瓦斯排放量,降低环境污染及改善能源结构^[1-2]。我国早期矿井大部分采用“先厚后薄、自上而下”的单水平开采方式^[3],经过数十年的上部煤层开采后废弃,形成了大面积的采空区。截至2022年,仅山西省就有4700余处废弃矿井,面积约2052 km²,废弃矿井采空区下伏煤层气储量高^[4],游离气资源量占比超过50%,为采空区下伏煤层气抽采提供了极为有利的资源条件^[5]。水力压裂技术作为一种提高煤层气采出率的有效手段,在开发煤层气中扮演着至关重要的角色^[6],了解水力裂缝在不同条件下的扩展规律是水力压裂成功的前提^[7]。研究针对采空区下伏煤层水力裂缝扩展规律,对提高采空区下伏煤层气井产量,保障我国能源安全具有重要意义。

煤层水力压裂增透技术的原理是利用水压力的作用,改变孔边煤体的应力状态,引起钻孔周围起裂和裂缝扩展,进而利用裂隙水压力,控制水力裂缝的扩展来改变煤体的渗透性能^[8]。国内外学者主要通过物理试验、数值模拟及理论研究等方式开展不同工况下水力裂缝的扩展规律研究。已有研究表明应力环境对煤体水力裂缝的扩展规律具有直接的影响, HUBBERT和WILLIS^[9]率先提出“孔壁应力集中诱发拉伸破裂准则”,认为水力压裂产生的水力裂缝垂直于最小主应力方向,并向垂直最小主应力的方向扩展。YU等^[10]研究了真三轴应力环境下水平应力差对破裂压力与裂缝演化特征的影响。孟召平等^[11]揭示了煤样不同的轴压与围压对水力压裂前后渗透率的控制机理。由于煤体具有极强的非均质性,煤

体内部的天然弱面同样会对水力裂缝的延伸路径产生直接影响^[12]。吕帅峰等^[13]将煤体内部天然裂隙系统进行了分类,并对现场压裂裂缝形态进行了描述。DEHGHAN^[14]研究了煤体内部天然裂缝对水力裂缝扩展行为的影响,揭示了水力裂缝在天然裂缝影响下的扩展机制。FAN等^[15]研究了割理对煤层水力压裂裂缝起裂和扩展的影响。为了避免煤体非均质性对水力裂缝扩展规律结果的影响,不少学者采用了相似模拟材料或数值模拟的方法开展水力压裂试验。翟成等^[16]测试了煤粉、水泥、沙子等相似材料的力学特性响应规律,认为选择合适配比的相似模拟材料可以精确模拟煤岩体。王永亮^[17]等采用有限元-离散元模型建立了水平井分段压裂三维数值模型,研究了不同射孔簇间距以及不同压裂方案对压裂裂缝网络的扩展扰动行为。张帆等^[18]利用水泥砂浆型煤探究了不同真三轴应力条件下水力压裂的起裂与扩展规律。李全贵等^[19]采用离散元数值模拟软件建立流固耦合模型,研究了水力压裂过程中排量、泊松比及应力对水力裂缝演化的影响。LI等^[20]采用位移不连续法模拟了层状裂缝和天然裂缝储层中水力裂缝的扩展,以及水力裂缝、天然裂缝和层理面之间的复杂相互作用。XIE等^[21]利用三维水力裂缝传播耦合模型研究了层面剪切位移不连续性对裂缝高度增长的影响。ZHOU等^[22]采用离散元建立目标储层三维裂缝扩展模型,分析了多种工况下水力裂缝的分布模式。

上述研究主要利用原煤、相似模拟材料或数值模拟等方法,考虑了原岩应力状态、天然裂隙、层理面等因素对水力裂缝起裂与扩展规律的影响,取得了一定成果。然而,未有针对采空区下伏煤层水力裂缝起裂与扩展规律的研究,此外,鲜有人从应力损

伤的角度开展水力裂缝扩展规律的相关研究。基于此,笔者采用大尺寸相似模拟材料(300 mm×300 mm×300 mm),分析煤体在不同程度加卸载应力扰动影响下的力学及声发射响应特征,提出表征煤体损伤程度的损伤变量,进一步开展不同损伤变量下煤体水力裂缝起裂与裂缝扩展规律分析,制定水力压裂施工参数优化原则,并在现场进行应用效果分析。

1 试验

1.1 试验系统

试验采用真三轴煤岩体扰动动态力学试验系统,开展煤岩体水力压裂物理模拟试验。加载部分安装6个高压活塞泵,可实现同步和异步加载,最高加载应力可达60 MPa;用于注水压裂的恒速恒压泵(双泵

型)可以连续不断的提供恒定流速无脉冲的液体,同时自动检测筒体内的压力、流量信号,流体最大注入压力可达70 MPa,图1为试验系统连接示意图;声发射监测系统为DS5声发射分析仪,预置8通道信号采集探头,试验过程中系统自动采集记录声发射能量、振铃计数、振幅等参数。

1.2 试块制备

由于大尺寸煤岩体原位保真取样技术不成熟,采用原煤进行试验容易导致结果失真,为保证试验的准确性,本文采用水泥砂浆作为相似模拟材料。HUANG等^[23]对水泥砂浆相似模拟材料进行了力学特性研究,认为砂、水泥、水的质量比为3.5:1:0.3的水泥砂浆相似模拟材料与煤体的力学特性接近,表1为水泥砂浆相似模拟材料的力学参数。

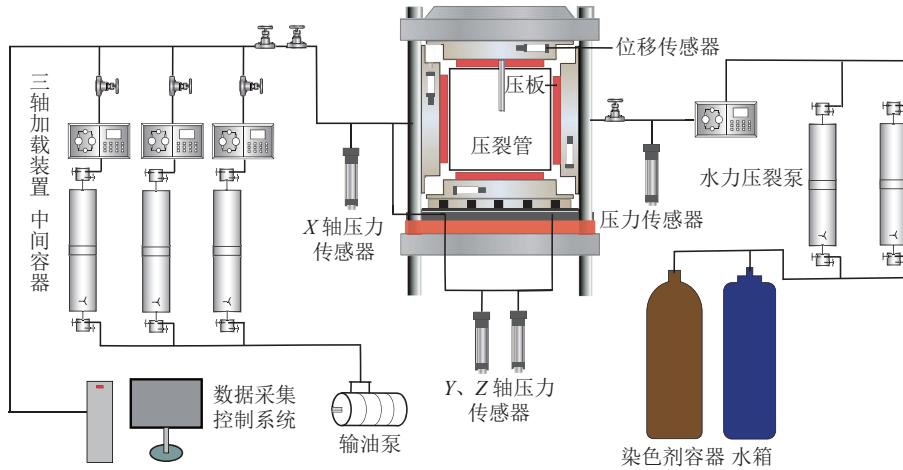


图1 真三轴应力扰动试验系统

Fig.1 Connection diagram of true triaxial stress disturbance test system

表1 相似模拟材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of cement mortar

孔隙率 $\phi/\%$	渗透率 $K/10^{-3}\mu\text{m}^2$	单轴抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_t/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
12.79	1.13	6.27	0.72	1.65	2.54	31.29

本试验采用300 mm×300 mm×300 mm大尺寸立方体试块。将质量比为3.5:1:0.3的水泥、过滤细砂及淡水混合充分搅拌,倒入立方体模具,初凝2 d后脱模,埋设长度为150 mm,内径为12 mm,外径为18 mm的压裂管模拟井筒,并用环氧树脂浇筑,防止压裂液沿井壁流出,压裂孔上方安装阻隔环模拟裸眼完井,同时防止环氧树脂进入压裂孔产生应力集中现象,室内恒温恒湿养护28 d。应力加载方式及声发射探头位置如图2所示。

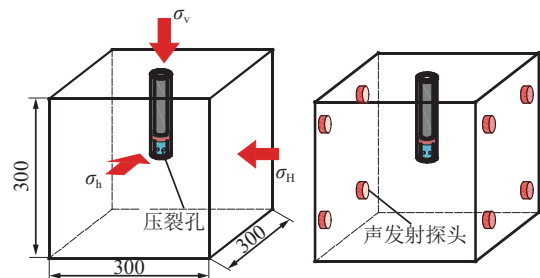


图2 声发射探头布置示意

Fig.2 Schematic diagram of position of acoustic emission probe

1.3 试验方案

以山西省晋城某矿区采空区下伏煤层应力特征为基础设计试验方案,下伏煤层距离采空区底板80 m,位于应力释放带^[24],应力体制为逆断层($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)^[25]。上覆煤层开采过程中,工作面前方煤柱会产生应力集中现象,工作面下方卸压,并向采空区底板深部传递,随着底板深度的增加,采空区下伏煤层受采动影响造成的应力集中与卸压效应逐渐减弱。上覆煤层开采结束,采空区上部岩层垮落,下伏煤层应力恢复重新压实。应力集中区煤体经历了垂向应力先增加后减少的过程,为了探究在不同加卸载应力扰动程度影响下采空区下伏煤层应力恢复重新压实区水力裂缝起裂与扩展规律,根据研究区地应力测试数据^[25],还原采空区下伏煤层真实地层应力环境,共设置5组试验(表2),其中1号试块为对照组。

表2 水力压裂试验方案
Table 2 Hydraulic fracturing test parameters

试块	垂向应力 σ_v /MPa	最大水平应力 σ_H /MPa	最小水平应力 σ_h /MPa	水力压裂
1	8	16	10	是
2	10→12→8	16	10	是
3	10→14→8	16	10	是
4	10→16→8	16	10	是
5	10→18→8	16	10	是

1.4 试验过程

对于1号试块,首先同时控制三轴应力加载至8 MPa,控制 σ_v 保持不变,加载 σ_h 与 σ_H 至10 MPa,随后控制 σ_h 保持不变,将 σ_H 加载至16 MPa,保载10 min后开始进行水力压裂试验。

对于2~5号试块,首先同时控制三轴应力加载至10 MPa,随后固定 σ_v 与 σ_h ,将 σ_H 加载至16 MPa后保载10 min。待试块内部应力达到平衡后,保持水平应力不变,开始加载垂向应力分别至12、14、16、18 MPa,随后保持三轴应力不变,再次保载10 min后开始卸载垂向应力至8 MPa,保载10 min后开始进行水力压裂试验。

2 煤体损伤规律

2.1 声发射定位点分析

声发射定位点可以直接反映煤体内部损伤情况,图3a为5号试块加载至12、15、18 MPa时的声发射定位点分布。在加载初期,试块首先发生弹性形

变,其内部的损伤较少,垂向应力继续加载至15 MPa时,声发射定位点大幅增加,试块内部产生大量损伤,加载至18 MPa后声发射定位点仅少量增加且约80%的损伤产生于15 MPa之前。这表明试块内部的损伤与垂向应力呈非线性,垂向应力加载至15 MPa后,试块内部结构发生改变,阻碍了损伤的产生。

图3b、3c、3d分别为5、4、3号试块卸载阶段的声发射定位点分布。可以看出试块内部的损伤大部分产生于加载阶段,卸载阶段产生的损伤极少。4、5号试块在卸载阶段声发射定位点表现为无规律的缓慢增加状态,试块内部新增的损伤较少。3号试块的初始卸载应力差仅为6 MPa,但在卸载至8 MPa时产生的损伤比4、5号试块多2倍以上。对比加载与卸载2个阶段的损伤特征,当垂向应力加载低于15 MPa,卸载阶段会造成较多的损伤,且损伤集中于10~8 MPa阶段。当垂向应力加载高于15 MPa,卸载阶段产生的损伤极少。说明试块垂向应力加载高于15 MPa时,试块逐渐接近峰值强度,由于围压较高,试块难以沿水平方向扩张,导致内部发生了压实效应,即孔裂隙开始被压密,短时间内损伤产生量较少。

2.2 应力应变曲线分析

随着垂向应力的增加,煤体会经历4个阶段:弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部变形阶段^[26]。声发射能量曲线可以在一定程度确定弹性阶段的范围。图4为试块加卸载阶段垂向位移及声发射能量曲线,图中Z轴位移表示垂向应力的位移,为便于分析,将卸载阶段起始位移清零并取绝对值。从图4d可以看出,垂向应力加载至11 MPa左右,声发射能量较低,随着垂向应力的增加,声发射能量开始强烈波动起伏,至15 MPa以后,声发射能量开始降低,加载阶段2、3、4号试块(图4a、4b、4c)与5号试块应力重合段位移变化趋势基本一致。可以确定试块在10~11 MPa为弹性阶段,11~15 MPa为屈服阶段,试块内部的损伤大部分来自于这一阶段,15~18 MPa为强化阶段,试块内部产生压实效应。4、5号试块卸载阶段的位移量远大于加载阶段,且声发射能量波动较小,证明了试块垂向应力加载大于15 MPa时,试块产生了压实效应,应力的卸载对试块的影响不大。观察2、3号试块卸载阶段的声发射能量,当垂向应力卸载至10 MPa以后,声发射能量开始出现强烈的波动起伏,且卸载阶段的位移量均大于加载阶段。

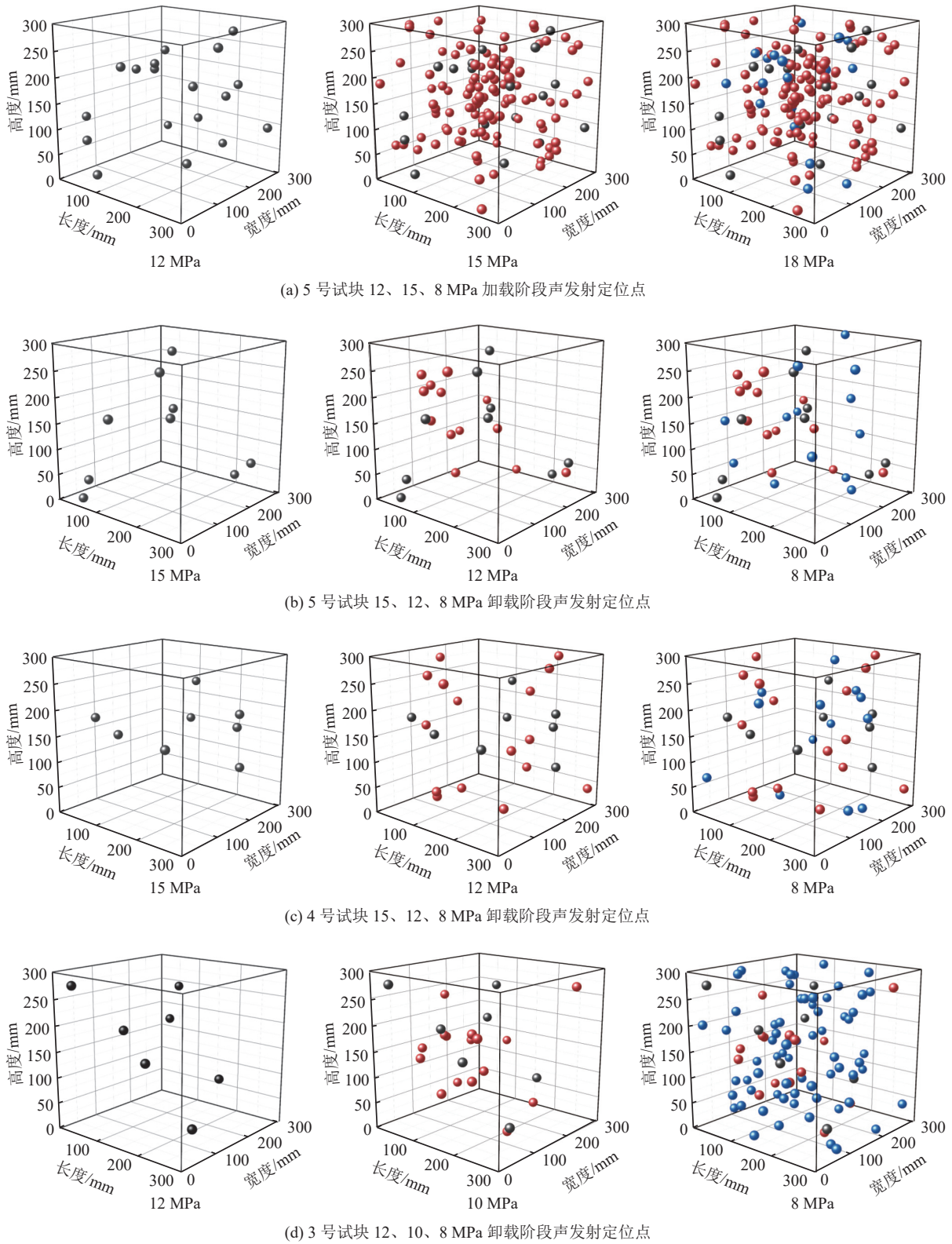


图3 八通道声发射信号定位图

Fig.3 Eight-channel acoustic emission signal localization diagram.

2.3 损伤变量

尹祥础等^[27]根据“物理量的变化”确定介质损伤程度,提出了定量表征介质损伤程度的参数,基于非线性系统失稳理论,以垂向应力、应变分别作为荷

载变量和响应变量,将加卸载响应比值 F 定义为

$$F = \frac{X_+}{X_-} \quad (1)$$

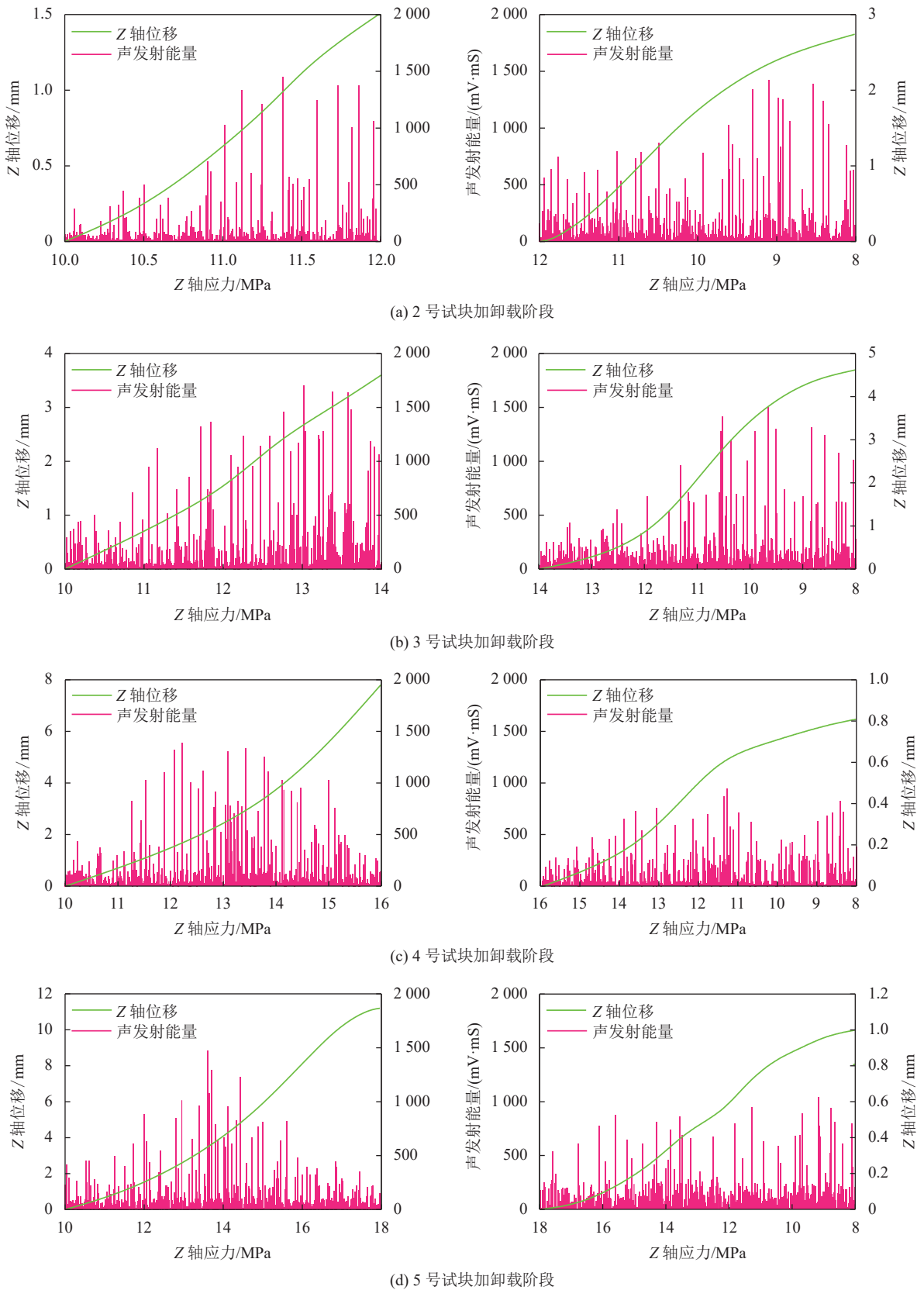


图4 加卸载阶段垂向位移及声发射能量曲线

Fig.4 Vertical displacement and acoustic emission energy curves during loading and unloading stages.

$$X = \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (2)$$

其中, X_+ , X_- 分别为加卸载 2 个阶段的响应量; ΔP ,

ΔR 为应力载荷变化量与应变响应变化量, 加卸载响应比 F 为

$$F = \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) \left/ \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) \right. \quad (3)$$

将系统的失稳度 Y 定义为

$$Y = 1 - \frac{1}{F} \quad (4)$$

在系统完全稳定时 $Y = 0$ ；完全破坏时 $Y = 1$ 。

失稳度无法表示加卸载 2 个阶段试块内部的损伤情况，根据失稳度的定义，在高应力应变状态下失稳度 Y 较大，由前文结论可知，当煤体进入强化阶段，煤体内部会发生压实效应。为了更进一步表示压实效应对煤体损伤的影响，引入损伤变量 T ：

$$T = Y \frac{\Delta R_-}{\Delta R_+} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)和式(4)得

$$T = \left[1 - \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) \left/ \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) \right. \right] \frac{\Delta R_-}{\Delta R_+} \quad (6)$$

对于加卸载应力扰动试验， ΔR_+ 为加载过程应变量的增量， ΔR_- 为卸载过程应变量的增量， $\Delta R/\Delta P$ 为应变随应力变化的速度快慢， $\Delta R_-/\Delta R_+$ 为卸载阶段与加载阶段应变量的比值。

当煤体处于弹性阶段时， $\Delta R/\Delta P$ 代表煤体的刚度，与煤体本身的物理特性有关，为固定值，因此当煤体处于弹性阶段时， T 始终为 0。进入屈服阶段，煤体内部开始产生损伤， T 从 0 开始增加，随着煤体内部损伤大幅增加， T 逐渐增大。存在一个损伤变量峰值 T_p ，当煤体进入强化阶段后 $T = T_p$ ，之后煤体内部损伤开始被压实， T 逐渐开始减小， T 越小，煤体被压实的程度越高。需要注意，由于煤体进入局部变形阶段，应力应变波动较强烈，因此本文的损伤变量仅适用于强化峰值前的阶段。

将试验的应力应变数据代入可得 2、3、4、5 号试块的损伤变量分别为 0.156、0.179、0.096、0.083。由前文结论可知，随着垂向应力的增加，试块内部会发生压实效应，即 T 逐渐减小。当 T 减小至一定程度时，试块内部的损伤程度与未经过加卸载应力扰动的试块损伤变量 T_c 相当，此时 $T = T_c$ 。

为了确定本试验 T_c 的具体值，补充一组垂向应力路径为 10 → 15 → 8 MPa 的三轴加卸载试验，得到 $\Delta R_+ = 5.5$ ， $\Delta R_- = 6.92$ ，确定 $T_c = 0.127$ 。

根据上述结论，认为 $T > T_c$ 的煤体处于应力损伤态， $T < T_c$ 的煤体处于应力压实态或应力微损伤态，本文暂不考虑应力微损伤态， $T < T_c$ 仅代表应力压实态，即 2、3 号试块为应力损伤态，4、5 号试块为应力压实态。

3 煤体水力裂缝扩展规律研究

3.1 水力压裂泵压曲线分析

准确分析水力压裂泵压的变化对于了解试块的压裂行为至关重要。图 5 显示了压裂液连续注入井筒时，煤体在不同损伤程度下注入压力的变化及声发射能量响应。随着压裂液的不间断注入，井筒裸眼段水压逐渐增大至煤体破裂压力时，裂缝开始扩展，煤体内的储液空间突然变大，水压随之快速降低，裂缝暂时停止扩展，当新的储水空间再次充满，水压开始快速升高至破裂压力，裂缝继续延伸直至裂缝扩展至煤体表面。因此，可以从泵压曲线中注意到水压具有明显的周期性波动特征。

整个水力压裂过程可分为 3 个阶段：①注水升压阶段；②水力裂缝的形成和扩展阶段；③水力裂缝扩展至表面停止注水阶段。在注水升压阶段声发射信号较弱，水力裂缝的形成与扩展阶段出现了多个水压波峰，声发射监测设备与之对应时在波峰出现时监测到明显的声发射能量，二者具有良好的对应关系。

对比图 5a—图 5e 的初次破裂压力，未经过加卸载应力扰动的 1 号试块初次破裂压力为 19 MPa。处于应力损伤态的 2、3 号试块初次破裂压力均小于试块 1，处于应力压实态的 4、5 号试块破裂压力与水力裂缝形成与扩展时间均大于试块 1，损伤变量与水力裂缝初次破裂压力关系如图 6 所示。上述结果表明，试块的损伤变量越大，初次破裂压力越大。当试块的损伤变量 $T < T_c$ 时，试块内部的孔裂隙被压实，阻碍了水力裂缝的扩展，使水力压裂的初次破裂压力明显增大，裂缝扩展至试块表面的速度变慢。

3.2 水力裂缝扩展形态分析

压裂液从试块表面流出(图 7)后停止水力压裂，将试块沿表面裂缝剖切开观察试块内部裂缝扩展情况(图 8)。主水力裂缝从井壁开始扩展，在水平应力差的影响下，沿垂直于最小主应力方向扩展，当水力裂缝扩展至井筒远端，由于沿程摩阻的作用，传导压力降低，导致井筒远端的水力裂缝难以向前延伸，水力裂缝开始变窄。井筒近端始终具有较高的水压，水力裂缝沿裸眼段开始向四周扩展，最终形成椭圆形水力裂缝网。

对比图 8a—图 8e，处于不同损伤状态的煤体最终形成的水力裂缝网不同。表 3 列出了 5 个试块水力压裂后水力裂缝的缝宽及缝长，缝长/缝宽代表了水力裂缝向井筒远端扩展的能力，即容易形成主水力裂缝的程度，值越大越易形成主水力裂缝。应力压实态的煤体水力裂缝网面积更大，缝长与缝宽的

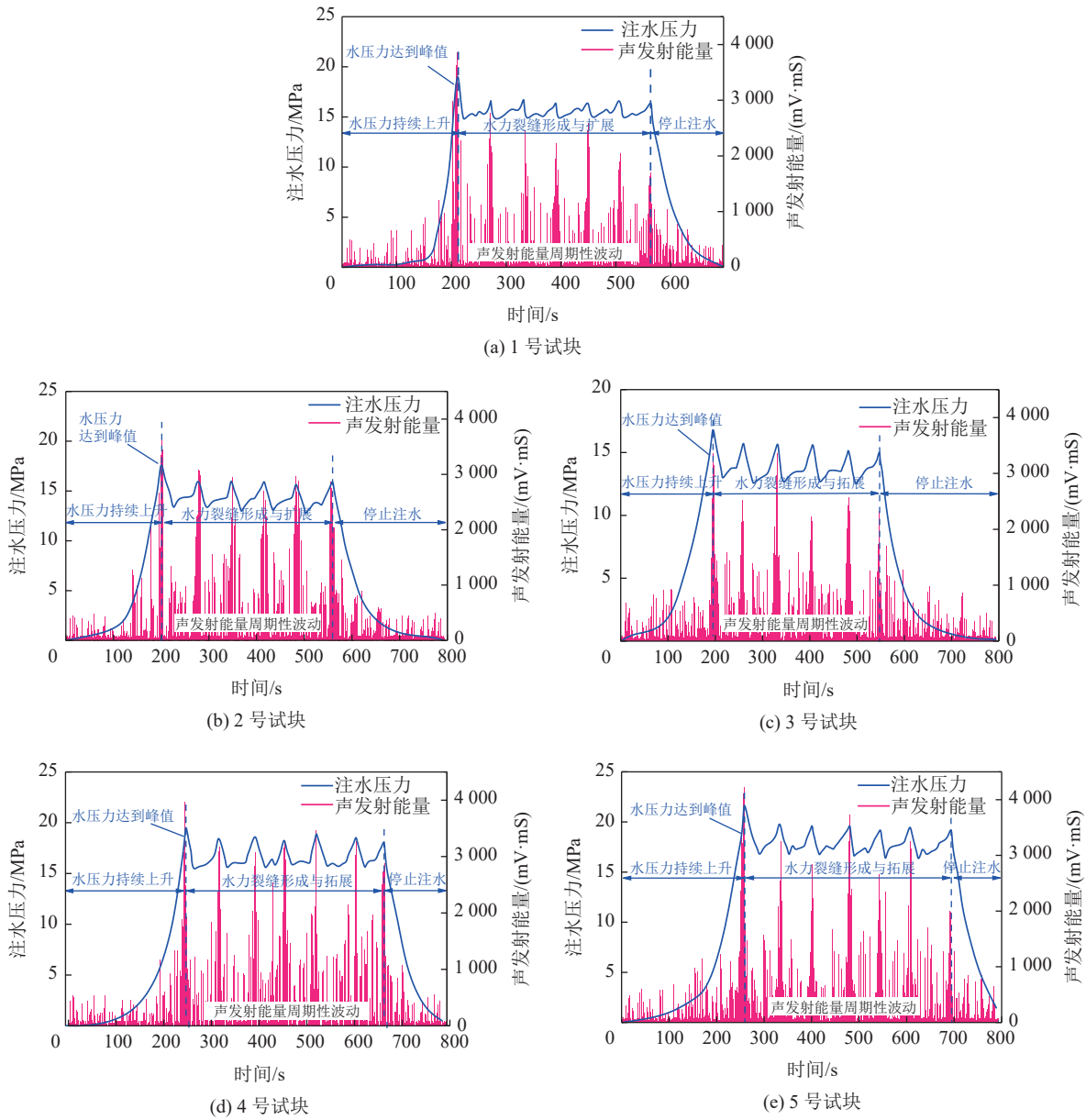


图5 水力压裂过程中的水压及声发射特性

Fig.5 Water pressure and acoustic emission characteristics during hydraulic fracturing process

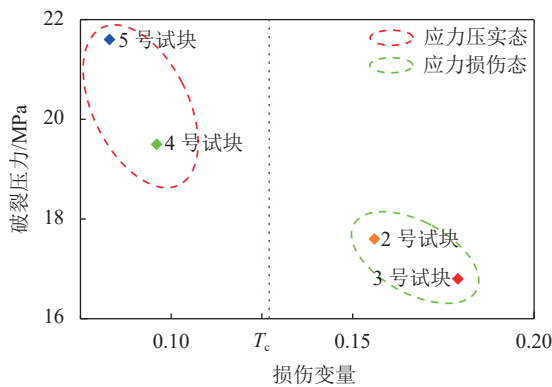


图6 损伤变量与初次破裂压力关系

Fig.6 Relationship between damage variable and initial fracturing pressure

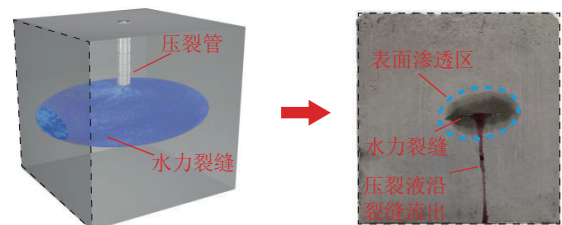
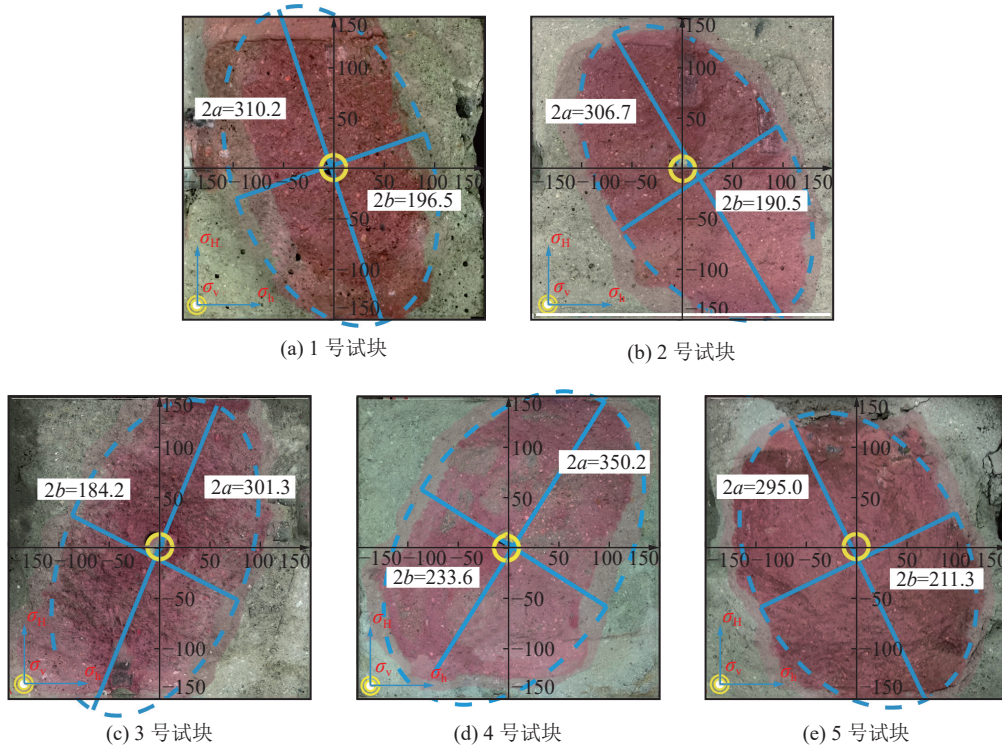


图7 压裂液从试块表面流出

Fig.7 Fracturing fluid flowing out from surface of specimen

比值更小, 裂缝难以向井筒远端扩展, 表现为均匀的沿裸眼段开始向四周扩展, 井筒近端裂缝网络发育, 不易形成主水力裂缝, 随着应力压实程度的增加, 上述情况更加明显。其原因在于, 当损伤变量 $T < T_c$ 时, 煤体内部新产生的损伤与内部原有孔裂隙在高应力



注：坐标轴为以压裂管中心为原点，表示试块的长度。 a 、 b 分别为水力裂缝的缝长与缝宽，mm。

图8 水力裂缝扩展形态

Fig.8 Morphology of hydraulic fracture propagation.

的作用下被压实，水力裂缝尖端难以找到优势扩展通道，只能在高水压的作用下向四周扩展，最终在井筒近端形成了缝长与缝宽比值较小的椭球形裂缝，不利于开展水力压裂。

表3 水力裂缝参数

Table 3 Hydraulic fracture parameters

试块	缝长 a /mm	缝宽 b /mm	a/b	裂缝形态
1	310.2	196.5	1.58	水平
2	306.7	190.5	1.61	水平
3	301.3	184.2	1.64	水平
4	350.2	233.6	1.50	水平
5	295.0	211.3	1.39	水平

处于应力损伤态的煤体所形成水力裂缝的缝长与缝宽比值更大，相比于应力压实态煤体的裂缝更加狭长，即井筒近端更易形成主水力裂缝，其原因在于经过垂向应力加卸载扰动的影响，煤体内部新增的微裂隙为水力裂缝的扩展提供了优势扩展通道，在井筒近端高水压的作用下，裂缝快速向远端扩展，形成了主水力裂缝。煤体的优势扩展通道越多，越容易形成长的主水力裂缝，同时煤体所需破裂压力更低，水力裂缝扩展至井筒远端需要的水压更小，有

利于开展水力压裂。

结合上文结论可以进一步明确受采动应力影响，煤体的水力裂缝扩展规律。垂向应力的加卸载使煤体内部产生大量损伤，煤体内部的损伤使水力压裂的破裂压力显著降低。在损伤与水平应力差的交互作用下，水力裂缝更有利于沿最大水平主应力延伸，在井筒近端更容易形成长的主水力裂缝。但煤体内部的损伤并不会随着加卸载应力扰动程度的增加而增加，当损伤变量 $T < T_c$ 时，煤体内部产生压实效应，阻碍水力裂缝的扩展，水力压裂所需破裂压力明显增加，水力裂缝扩展至井筒远端需要更高的水压，导致井筒近端水力裂缝发育。

4 应用实例与效果分析

4.1 水力压裂施工方案优化

根据前文试验结论可知，采空区下伏煤体所处损伤状态不同则水力裂缝扩展规律具有明显的差异，因此现场设计水力压裂施工方案时应充分考虑下伏煤层损伤状态。

结合室内试验及理论研究成果，现场水力压裂施工方案设计应遵循以下原则：

- 1)位于应力损伤区的煤层尽管更易形成主水力

裂缝,但压裂初期应注意控制前置液排量在相对较低水平使井筒近端形成主水力裂缝,防止过大的压力使井筒近端裂缝发育,远端裂缝憋压不够。当裂缝向远端扩展后应逐渐加大前置液排量,使井筒远端裂缝充分发育,形成“树形”缝网,同时累计排量不宜过高,防止压穿;

2)位于应力压实区的煤层应控制施工限压在相对较高水平使水力裂缝尽可能向井筒远端扩展,若条件允许,可选择黏度较高的压裂液,使水力裂缝发育程度大幅提高。

4.2 现场应用效果分析

收集晋城矿区典型的6口水平井压裂数据,并选择位于下伏煤层应力损伤区的压裂井进行分析与优化。由于压实区煤层目前仅能通过提高施工限压来优化施工方案,难以具体对比分析前后差异,因此暂不考虑压实区煤层。

采空区与下伏煤层的间距越大,采空区下伏煤层的应力集中效应越低,该矿区上覆3号煤层采空

区与下伏15号煤层平均间距为83.92 m,初步将采空区与煤层间距大于85 m正下方附近定为下伏煤层应力损伤区。其中1号水平井的第3段压裂点位于采空区下伏15号煤层应力损伤区,该段现场施工压裂曲线如图9所示。

从图9可以看出,前置液排量在15 min的时间内上升至 $6 \text{ m}^3/\text{min}$,泵压在排量为 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ 时出现一次尖峰值,后续将排量升高至 $6 \text{ m}^3/\text{min}$,又出现一次尖峰值,整体水力裂缝造缝效果并不理想,其原因可能在于前期排量过大,导致井筒近端裂缝发育,煤层内储液空间增大,压力下降,另外由于该压裂段处于应力损伤区,同样的储液空间内压裂液漏失率更高,造成了泵压的快速下降。

基于上述问题,结合前文结论与水力压裂施工方案优化原则,认为其在压裂前期排量过快,前置液排量应分级注入,在维持一段时间的低排量($4 \text{ m}^3/\text{min}$)注入后逐级增加排量至 $6 \text{ m}^3/\text{min}$ 。由于现场施工成本限制,仅能选择一个压裂段作为对比验证。图10

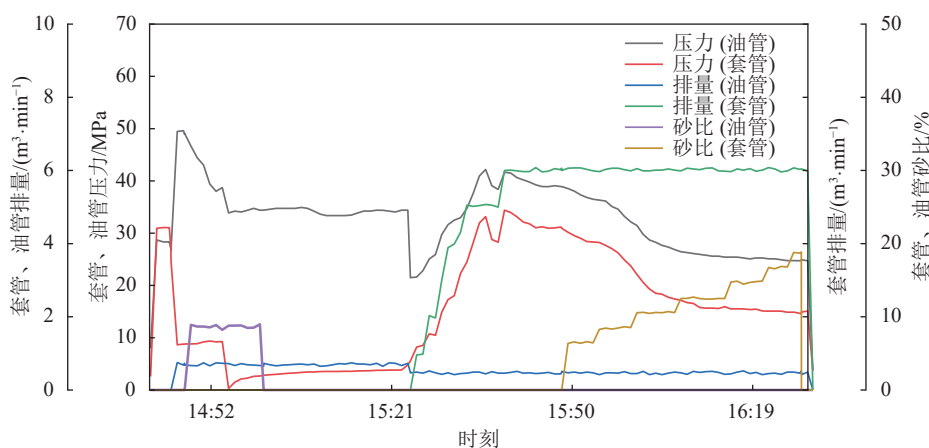


图9 1号水平井第三段压裂施工曲线

Fig.9 Third section fracturing operation curve of No. 1 horizontal well

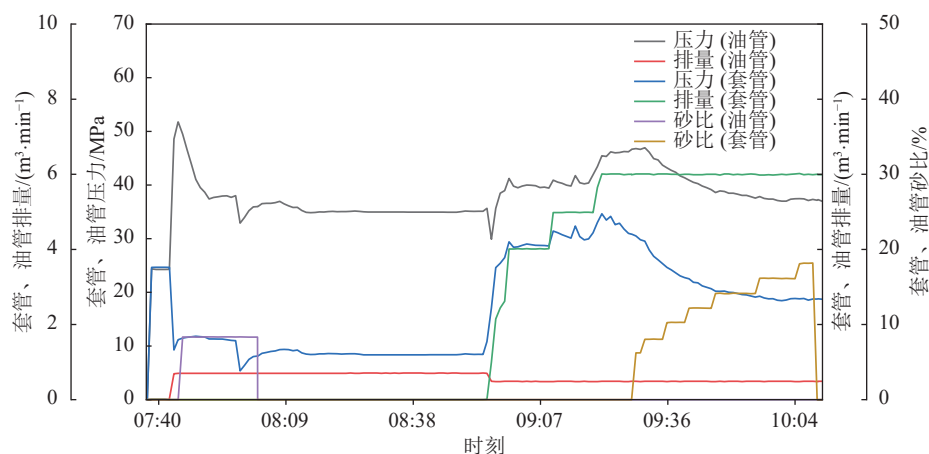


图10 2号水平井第六段压裂施工曲线

Fig.10 Third section fracturing operation curve of No. 2 horizontal well

为采空区下伏 15 号煤层应力损伤区 2 号水平井第 6 段压裂施工曲线,采用逐级增加排量的压裂方式使得泵压维持在较高水平的的时间大幅增加,且在前置液注入过程中出现多个尖峰值,说明下伏煤层内出现多次憋压的情况,煤层多次被压开,水力压裂造缝效果良好。

对比优化前后 2 口井的压裂施工效果,通过控制排量能够在一定程度上改善水力压裂造缝效果不佳、裂缝难以向井筒远端扩展的问题,证明了前文水力压裂施工优化原则的可行性。

5 结 论

1) 废弃矿井采空区下伏煤体受加卸载应力扰动的影响,内部会产生一定程度的损伤,且加载阶段造成的损伤明显大于卸载阶段。垂向加载应力不超过 11 MPa,煤体处于弹性阶段,内部损伤极少;11~15 MPa,煤体处于屈服阶段,内部开始产生大量损伤;大于 15 MPa,煤体处于强化阶段,内部损伤逐渐被压实,被压实的煤体卸载阶段产生的损伤较少。

2) 提出了表征加卸载应力扰动条件下煤体损伤程度的损伤变量 T ,煤体内部损伤有如下 3 种情况:① $T = T_c$,煤体内部的损伤程度与未经过加卸载应力扰动的煤体损伤程度相当;② $T > T_c$,煤体处于应力损伤态;③ $T < T_c$,煤体处于应力压实态。

3) 处于应力损伤态的煤体损伤变量 T 越大,破裂压力越低,水力裂缝更有利于沿最大水平主应力延伸,在井筒近端容易形成长的主水力裂缝;处于应力压实态的煤体损伤变量 T 越小,破裂压力越高,水平应力差对水力裂缝的扩展方向影响越弱,井筒近端水力裂缝发育。

4) 应用结果表明,采空区下伏煤层水力压裂施工方案经优化后造缝能力显著提升,水力裂缝扩展时间明显增加。

参考文献(References):

- [1] 刘 峰,郭林峰,赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [2] 王双明,申艳军,宋世杰,等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [3] 董灿灿,吕义清,刘志辉,等. 复杂地貌下行式开采地表移动变形规律[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 237-242.
DONG Cancan, LYU Yiqing, LIU Zhihui, et al. Surface movement and deformation law in downward mining of complex geomorphology[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 237-242.
- [4] 孟召平,李国富,田永东,等. 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 204-211.
MENG Zhaoping, LI Guofu, TIAN Yongdong, et al. Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobs of Jincheng mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 204-211.
- [5] 张江华,秦 勇,李国富,等. 煤炭采空区下伏煤层气资源潜力及抽采效果:以山西省晋城西部矿区为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 146-153.
ZHANG Jianghua, QIN Yong, LI Guofu, et al. Potential and extraction effect of CBM resources underlying coal goafs: a case study on the western Jincheng mining area in Shanxi Province[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 146-153.
- [6] 申鹏磊,吕帅锋,李贵山,等. 深部煤层气水平井水力压裂技术:以沁水盆地长治北地区为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2488-2500.
SHEN Penglei, LYU Shuaifeng, LI Guishan, et al. Hydraulic fracturing technology for deep coalbed methane horizontal wells: a case study in North Changzhi area of Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2488-2500.
- [7] 李全贵,邓羿泽,胡千庭,等. 煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 62-72.
LI Quanguai, DENG Yize, HU Qianting, et al. Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 62-72.
- [8] CAO Wenzhuo, YILDIRIM B, DURUCAN S, et al. Fracture behaviour and seismic response of naturally fractured coal subjected to true triaxial stresses and hydraulic fracturing[J]. Fuel, 2021, 288: 119618.
- [9] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Transactions of the AIME, 1957, 210(1): 153-168.
- [10] YU Beichen, LIU Chao, CHEN Weixing, et al. Experimental study on deformation and fracture characteristics of coal under different true triaxial hydraulic fracture schemes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110839.
- [11] 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.
- [12] 李彦伟,朱超凡,曾壹坚,等. 层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 44-54.
LI Yanwei, ZHU Chaofan, ZENG Yijian, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracture propagation law in oil shale[J]. Coal Geology & Exploration,

- 2023, 51(11): 44–54.
- [13] 吕帅锋, 王生维, 刘洪太, 等. 煤储层天然裂隙系统对水力压裂裂缝扩展形态的影响分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2590–2601.
LYU Shuaifeng, WANG Shengwei, LIU Hongtai, *et al.* Analysis of the influence of natural fracture system on hydraulic fracture propagation morphology in coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2590–2601.
- [14] DEHGHAN A N. An experimental investigation into the influence of pre-existing natural fracture on the behavior and length of propagating hydraulic fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 240: 107330.
- [15] FAN Tiegang, ZHANG Guangqing, CUI Jinbang. The impact of cleats on hydraulic fracture initiation and propagation in coal seams[J]. *Petroleum Science*, 2014, 11: 532–539.
- [16] 翟成, 郑仰峰, 余旭, 等. 水力压裂模拟用煤岩体相似材料基础力学特性实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 16–28.
ZHAI Cheng, ZHENG Yangfeng, YU Xu, *et al.* Experimental study on the mechanical properties of coal-like materials for hydraulic fracturing simulation[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 16–28.
- [17] 王永亮, 刘娜娜, 王昊. 水力压裂分段射孔簇多裂缝空间偏转模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 160–169.
WANG Yongliang, LIU Nana, WANG Hao. Simulation investigation on spatial deflection of multiples fractures of multistage perforation clusters in hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 160–169.
- [18] 张帆, 马耕, 刘晓, 等. 煤岩水力压裂起裂压力和裂缝扩展机制实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 84–89.
ZHANG Fan, MA Geng, LIU Xiao, *et al.* Experimental study on initiation pressure and mechanism of fracture propagation of hydraulic fracturing in coal and rock mass[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 84–89.
- [19] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤层水力压裂应力与裂隙演化的细观规律[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 32–40.
LI Quanguai, DENG Yize, HU Qianting, *et al.* Mesoscopic law of stress and fracture evolution of coal seams hydraulic fracturing[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 32–40.
- [20] LI Yanyan, HU Wei, ZHANG Zhizhong, ZHANG Zhaobin, *et al.* Numerical simulation of hydraulic fracturing process in a naturally fractured reservoir based on a discrete fracture network model[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 147: 104331.
- [21] XIE Jun, TANG Jizhou, YONG Rui, *et al.* A 3-D hydraulic fracture propagation model applied for shale gas reservoirs with multiple bedding planes[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 228: 106872.
- [22] ZHOU Tong, WANG Haibo, LI Fengxia, *et al.* Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in laminated shale reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1117–1130.
- [23] HUANG Bingxiang, LIU Jiangwei. Experimental investigation of the effect of bedding planes on hydraulic fracturing under true triaxial stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 2627–2643.
- [24] 李军军, 李国富, 郝海金, 等. 过采空区抽采下组煤层气技术及工程应用初探: 以晋城寺河井田为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 96–104.
LI Junjun, LI Guofu, HAO Haijin, *et al.* Technology of across-goaf drainage of coalbed methane from a lower coal seam group and its primary application: taking Sihe mine field as an example[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 96–104.
- [25] 刘亮亮, 李国庆, 李国富, 等. 寺河井田采空区下伏煤层应力特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1608–1619.
LIU Liangliang, LI Guoqing, LI Guofu, *et al.* Stress characteristics of coal seam underlying the goaf in the Sihe coalfield and its effect on the development of coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1608–1619.
- [26] 沈荣喜, 顾周杰, 王恩元, 等. 真三轴条件下煤样冲击动力学及破坏特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2168–2178.
SHEN Rongxi, GU Zhoujie, WANG Enyuan, *et al.* Experimental study on impact dynamics and failure characteristics of coal specimen under true triaxial conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2168–2178.
- [27] 尹祥砦, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报: 响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地学), 1991(5): 512–518.
YIN Xiangchu, YIN Can. Precursors and earthquake prediction of instability in nonlinear systems: response ratio theory and its applications[J]. Science in China: Series B, 1991(5): 512–518.