

深部煤-岩组合体力学特征及裂隙扩展规律

——以沁水盆地武乡区块为例

蔡益栋^{1,2},李倩³,肖帆^{1,2},刘大锰^{1,2},邱峰^{1,2}

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京100083;2. 非常规天然气地质评价与开发北京市重点实验室,北京100083;

3. 中国石化石油勘探开发研究院,北京102206]

摘要:煤层及其顶、底板的岩石力学性质是影响煤储层压裂、起裂和裂缝延伸的关键因素,制约深部煤层气的规模效益开发。为研究煤-岩组合体破裂过程中的力学特征及其裂隙扩展行为,根据声发射信号监测,开展了沁水盆地中、东部武乡区块煤-岩组合体的单轴压缩实验和有限元数值模拟计算,研究了煤-岩组合体中不同厚度比、不同岩性类别和不同界面倾角对组合体抗压强度、弹性模量、声发射信号特征和破裂特征的影响规律,探究不同组合配置下的裂缝扩展行为。研究结果表明:①煤-岩组合体的抗压强度和弹性模量随煤-岩厚度比和煤-岩界面接触倾角的增大而减小,不同岩性的组合体弹性模量介于1.75~5.44 GPa,抗压强度为11.20~20.60 MPa,其中煤岩-泥页岩组合体力学性质最弱,煤岩-砂岩组合体最强。②煤-岩厚度比增大会加剧组合体的破坏程度和裂隙数量,当煤-岩厚度比达到一定程度时,煤体发生破裂后能量会继续扩散到邻层,使整个组合体破碎。在不同岩性的组合体中,破坏难易程度为煤岩-砂岩组合>煤岩-灰岩组合>煤岩-泥页岩组合。随着煤-岩组合体界面接触倾角增大,整体更容易被破坏失稳、产生裂隙。③随着组合体中煤岩厚度增大,发育的裂缝由张性裂隙演变为X型剪切裂隙,且由只在煤岩内部扩展逐渐过渡到整个组合体。不同岩性组合体的力学强度愈大,其裂隙越倾向于从X型剪切裂隙演变为张性裂隙,展布范围由整个组合体变为局限于煤岩内部。煤-岩界面接触倾角的增大使组合体内部的X型剪切裂隙尺度相应增加,加剧破坏程度。

关键词:单轴压缩实验;声发射信号监测;力学行为;数值模拟;裂隙扩展;煤-岩组合体;武乡区块;沁水盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Mechanical characteristics and fracture propagation patterns of deep coal-rock assemblages: A case study of the Wuxiang block, Qinshui Basin

CAI Yidong^{1,2}, LI Qian³, XIAO Fan^{1,2}, LIU Dameng^{1,2}, QIU Feng^{1,2}

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geological Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China]

Abstract: The rock mechanical properties of coal seams and their roofs and floors are critical factors influencing the initial cracking and fracture propagation of coal reservoirs during fracturing. However, a limited understanding of these properties has constrained the large-scale commercial production of deep coalbed methane (CBM). This study aims to investigate the mechanical characteristics and fracture propagation patterns of coal-rock assemblages during fracturing. Based on the acoustic emission signals monitored, we perform uniaxial compressive stress tests and finite element analysis (FEA) on coal-rock assemblages from the Wuxiang block in the east-central Qinshui Basin, with the impacts of different coal/rock thickness ratios, lithologies, and coal-rock interfacial angles on the compressive strength, elastic modulus, features of acoustic emission signals, and breakup characteristics of the coal-rock assemblages delved into. Additionally, we explore the fracture propagation behavior under varying coal-rock configurations. The results indicate that the compressive strength and elastic modulus of the coal-rock assemblages decrease with an increase in the coal-rock

收稿日期:2024-07-08;修回日期:2024-10-16。

第一作者简介:蔡益栋(1985—),男,博士研究生导师、教授,煤层气地质与开发。E-mail: yidong.cai@cugb.edu.cn。

通信作者简介:李倩(1997—),女,硕士研究生,气藏地质与开发。E-mail: liqian2022.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42130806,42372195)。

ratio in thickness and the coal-rock interfacial angle. The coal-rock assemblages with varying lithologies exhibit elastic modulus and compressive strength ranging from 1.75 to 5.44 GPa and from 11.20 to 20.60 MPa, respectively, with the coal-argillaceous shale and coal-sandstone assemblages displaying the weakest and strongest mechanical properties, respectively. A higher coal-rock thickness ratio tends to exacerbate the breakup of the coal-rock assemblages and results in more fractures within. At a given coal-rock ratio in thickness, the energy released from coal fracturing would continue to diffuse to adjacent layers, culminating in the breakup of the whole coal-rock assemblage. The susceptibility to failure among the various coal-rock assemblages decreases in the order of coal-sandstone, coal-limestone, and coal-argillaceous shale assemblages. The coal-rock assemblages are increasingly prone to failure, instability, and fracturing as the interfacial angle increases. As the coal thickness increases, fractures in the coal-rock assemblages evolve from tensile fissures to X-shaped shear fissures while gradually propagating from within coals to the entire assemblages. In contrast, with an increase in the mechanical strength of the coal-rock assemblages of diverse lithologies, fractures in the assemblages tend to evolve from X-shaped shear fissures to tensile fissures, with the propagation range shrinking from the entire assemblages to within coals. Besides, an increase in the interfacial angle between coals and rocks in the coal-rock assemblages leads to larger X-shaped shear fissures within, exacerbating the assemblage failure.

Key words: uniaxial compressive stress test, acoustic emission signal monitoring, mechanical behavior, numerical simulation, fracture propagation, coal-rock assemblage, Wuxiang block, Qinshui Basin

引用格式:蔡益栋,李倩,肖帆,等. 深部煤-岩组合体力学特征及裂隙扩展规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1686–1704. DOI: 10.11743/ogg20240615.

CAI Yidong, LI Qian, XIAO Fan, et al. Mechanical characteristics and fracture propagation patterns of deep coal-rock assemblages: A case study of the Wuxiang block, Qinshui Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1686–1704. DOI: 10.11743/ogg20240615.

2021年以来,准噶尔盆地和鄂尔多斯盆地数口深部煤层气并取得日产气万立方米的突破^[1-3],深部煤层气将成为中国煤层气未来增储上产的重要接替领域逐渐成为业界共识^[4]。据统计,在中国埋深1 500~3 000 m的煤层气地质资源量约为 $30.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2],开发潜力巨大。并且,随着中国能源体系建设的发展,基于双碳目标的迫切要求,全面扩大资源勘探范围,煤层与煤系各类岩性储层并重开发,提升深部资源总量和采收率势在必行^[4-7]。

深部煤层地质条件复杂,具有高地应力、高地层温度和高储层压力3大特点^[6,8]。在孔隙压缩和裂缝闭合行为作用下,人工缝网延伸范围受限^[7],储层增产改造难度大^[8]。同时,深部煤层气岩层间力学性质差异显著,厚度变化范围大,在深部地层环境下的变形破裂特点会影响人工裂缝网络的扩展模式。因此,厘清深部煤-岩组合体力学性质及裂缝扩展规律对进一步优化深部储层缝网系统改造理论具有重要价值。

目前,诸多学者针对不同条件下煤岩强度和变形特征开展了大量的实验研究,获得了其力学参数特征和能量演化规律^[9-12]。王磊等^[9]对原位应力煤岩开展不同载荷速率的三轴加载-卸载实验,获取全过程的应力-应变曲线以分析煤岩力学性能与变形特征。段敏克等^[11]利用真三轴力学实验系统揭示了真

三轴循环过程中的主应力效应。高亚楠等^[12]设计了温度-围压-瓦斯压力作用下的力学试验,并建立了有限变形系统下的煤岩变形本构方程。但对于煤-岩组合体来说,其力学及变形特征受到煤岩单体力学特征及组合体结构方式的共同影响^[13]。左建平等^[14]针对人工构建的煤-岩组合体进行了单轴和三轴力学试验,研究其破坏强度特征及非线性破坏模型。秦忠诚等^[15]研究了不同组合方式的煤-岩组合体在单轴实验中的弹、塑性阶段特征。陈光波等^[16]针对不同浸水时间条件下的煤-岩组合体开展了轴向压缩实验,研究水-岩作用下的煤-岩组合体力学损伤特性和劣化机制。这些成果为深部岩体力学行为和破裂模式探究奠定了基础,但目前鲜有学者关注深部煤层气开采过程中不同顶、底板条件下不同岩性组合体力学行为特征和裂缝扩展规律。基于此,以沁水盆地武乡区块的主力煤层及其顶、底板岩石构成的煤-岩组合体为研究对象,开展不同组合体的单轴压缩-声发射实验,对比煤-岩组合体的不同力学参数特征,并结合声发射监测信息,探究岩石厚度、岩性组成及交界面接触倾角对组合体破裂行为的影响;同时,基于有限元模拟揭示不同类型组合体裂缝扩展行为规律,以期对深部煤层与煤系各类岩性储层的合采开发提供理论基础。

1 实验与方法

1.1 采样与试样制备

样品采集地武乡区块位于沁水盆地中、东部,主要的含煤地层为石炭系-二叠系太原组和山西组(图1)。太原组主要可采煤层为15#煤层,埋深介于1 728.5~1 762.5 m;山西组主要可采煤层为3#煤层,埋深介于1 400.0~1 600.0 m。考虑到采样的难易程度,以及本次工作的侧重点为深部煤层的力学性质研究,沁水盆地武乡区块W18井的15#煤层及其顶、底板样品是主

要研究对象。15#煤层上部岩性组成以灰色中-厚层灰岩和灰色砂岩为主,下部主要岩性为灰黑色泥页岩(图1)^[17-18]。对样品WX进行最大镜质体反射率($R_{o,max}$)、工业分析和显微组分测试,结果见表1。

取样区域煤层顶、底板岩层与煤层的厚度比约为5:3;顶、底板岩石类型以泥页岩、灰岩和砂岩为主;煤岩与顶、底板岩石交界面接触倾角范围为0°~35°^[20]。据此,设计了不同岩性煤-岩厚度比、不同岩性组成以及不同交界面接触倾角的煤-岩组合体模型,具体条件见表2。其中,利用云石胶粘接煤岩和砂岩、灰岩以及泥页岩,来有效避免煤岩和其他岩体直接接触而导致单轴压缩过程中发生滑移误差^[21],最终获得尺寸为

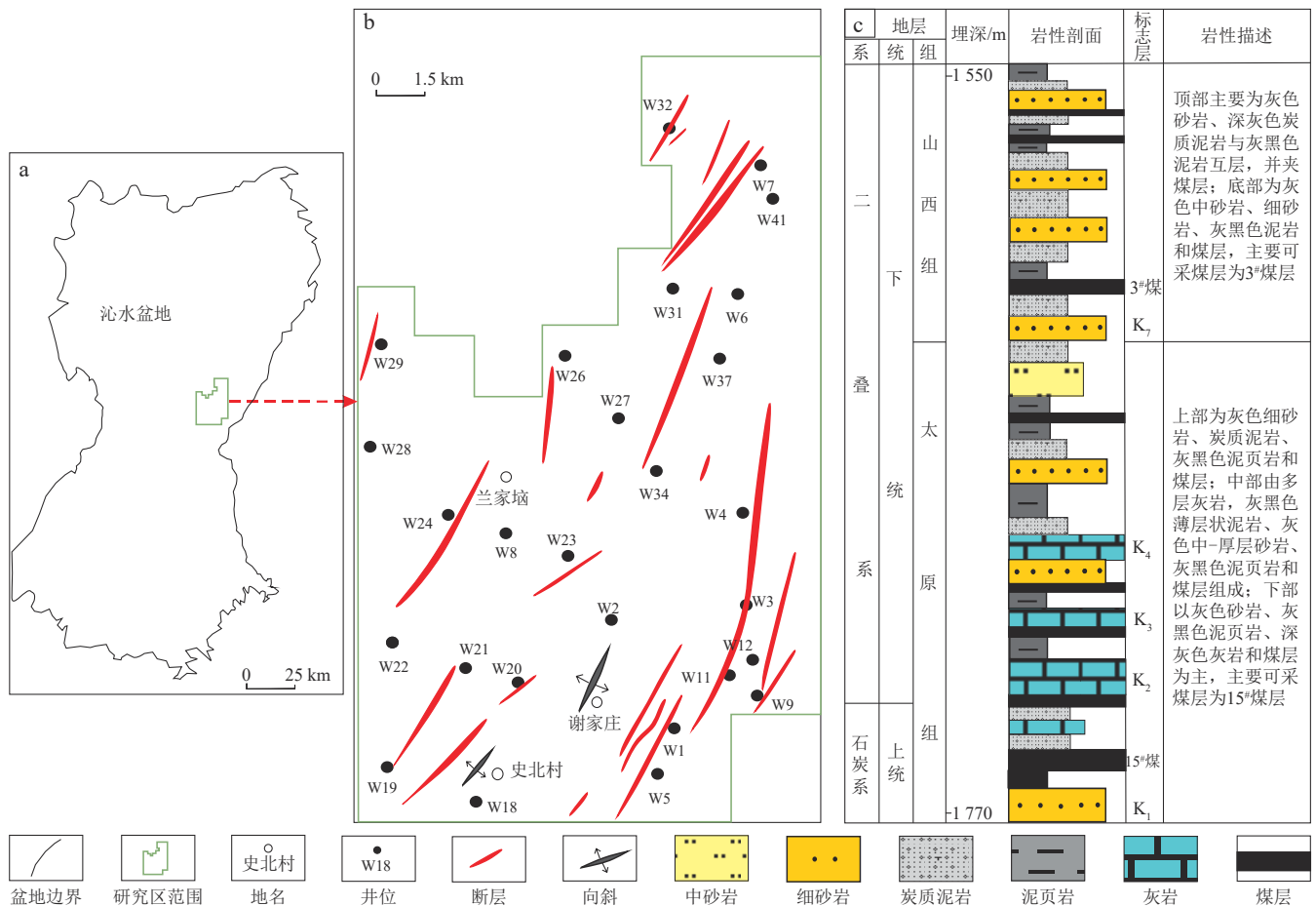


图1 沁水盆地武乡区块构造位置(a,b)及地层柱状图(c)(改自文献[19])

Fig. 1 Structural location (a,c) and stratigraphic column (c) of the Wuxiang block, Qinshui Basin (modified after reference [19])
(K_1 表示砂岩层; K_{2-4} 为主要灰岩层; K_7 为标志层砂岩。)

表1 沁水盆地武乡区块煤样WX基础数据测试结果

Table 1 Tested fundamental data on coal sample WX from the study area in Wuxiang block, Qinshui Basin

样品编号	$R_{o,max}/\%$	工业分析组分含量/%				显微组分含量/%		
		水分	灰分	挥发分	固定碳	镜质组	惰质组	壳质组
WX	1.76	1.32	11.51	14.79	72.38	95.7	4.3	—

注:“—”表示无结果。

表2 沁水盆地武乡区块不同类型煤-岩组合体模型及其参数
Table 2 Models of various coal-rock assemblages in the study area and the parameters related to tests in Wuxiang block, Qinshui Basin

组合体类型	煤-岩厚度比	煤-岩交界面接触倾角/(°)
煤岩+砂岩	1:2	0
	1:1	0, 15, 30
	2:1	0
煤岩+泥页岩	1:2	0
	1:1	0, 15, 30
	2:1	0
煤岩+灰岩	1:2	0
	1:1	0, 15, 30
	2:1	0

5 cm × 10 cm (直径×高度)的不同类型圆柱状煤-岩组合体。

1.2 单轴压缩-声发射实验方法

将单轴压缩实验和声发射监测联做(图2)。试验系统主要包括单轴加载系统和声发射系统,其中单轴加载系统为美国GCTS电液伺服加载系统,加载结果由伺服压力机数据采集系统清晰呈现,可以实现对单轴压缩变形过程的观察并测定岩石力学参数;声发射系统采用美国物理声学公司(PAC)PCI-II声发射系统,其采样频率高达40 MHz,可采集包括AE事件、能量、振铃和上升时间等在内的多个参数。此外,还可同步将电液伺服加载系统的应力值和应变值等引入AE采集系统。实验时在圆柱型煤-岩组合体外表面贴上2个NANO声发射探头,记录AE事件的参数与波形。

杨氏模量和泊松比也是煤岩岩石力学性质研究中

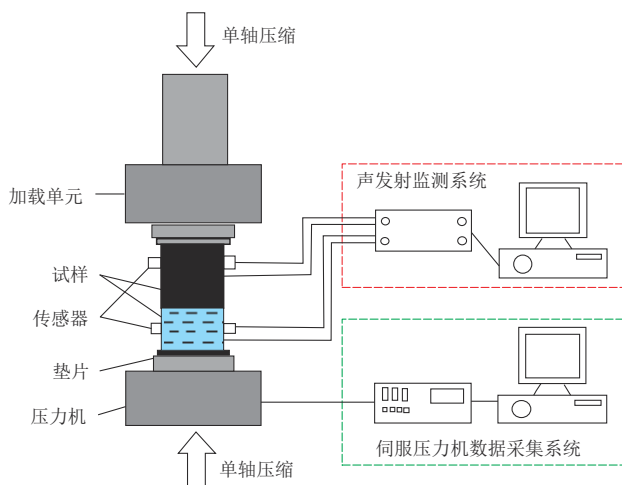


图2 单轴压缩-声发射实验简图

Fig. 2 Schematic diagram of the uniaxial compressive strength test with acoustic emission signals monitored in the process

的重要参数^[22, 23]。其中杨氏模量 E 是表征在弹性限度内物质材料纵向上的弹性模量^[24],而根据胡克定律,在物体的弹性变形阶段,应力与应变成正比,所以煤岩线弹性变形阶段应力与应变的比值即为杨氏模量,计算公式为:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_1} \quad (1)$$

式中: E 为杨氏模量, GPa; $\Delta\sigma$ 为线弹性变形阶段应力增量, MPa; $\Delta\varepsilon_1$ 为轴向应变增量, %。

泊松比(ν)定义为材料横向正应变 $\Delta\varepsilon_2$ 与轴向正应变 $\Delta\varepsilon_1$ 的比值,也称为横向变形系数^[25],计算公式为:

$$\nu = \left| \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} \right| \quad (2)$$

1.3 数值模拟方法

本文采用ABAQUS2020软件进行有限元数值模拟分析。ABAQUS可以进行结构静力和动力分析,根据外部载荷作用过程中岩石结构的应力-应变情况,还能进行塑性变形和膨胀变形等非线性问题的分析。一个完整的分析过程通常由以下3个步骤组成:前处理、模拟计算和后处理^[26]。前处理操作在ABAQUS/CAE模块完成,在交互式图形环境下创建并生成模型。模拟计算阶段,利用ABAQUS/Standard模块进行处理,一般情况下都是由软件后台自动计算处理,可以输出应力、应变以及破坏的结果。后处理阶段就是对模拟计算的结果进行分析评估,也是使用ABAQUS/CAE模块在图形环境下交互式进行,获得可视化评估结果。具体操作步骤如下:①确定好模型的几何形状,创建宽度为2.5 cm、长度为10.0 cm的矩形,长边旋转一周即可得到直径为5.0 cm、高度为10.0 cm的圆柱体模型;②在模型上选取节点建立截面,确定为不同岩性接触的交界面,然后给模型不同部分创建不同的材料并赋予岩石力学参数等属性;③创建实例并装配模块,设置分析步,最大增量步数设置为1 000.00,初始增量步数为0.02;④设定边界条件,避免模拟过程中模型失位;⑤选择创建好的部件,进行网格化处理;⑥提交作业进行分析(图3)。

2 不同煤-岩组合体力学性质特征

2.1 单一岩性样品力学性质特征

对不同岩性柱样进行单轴压缩加载实验,获得其各自的单轴压缩变形曲线,结果如图4所示,可以发现

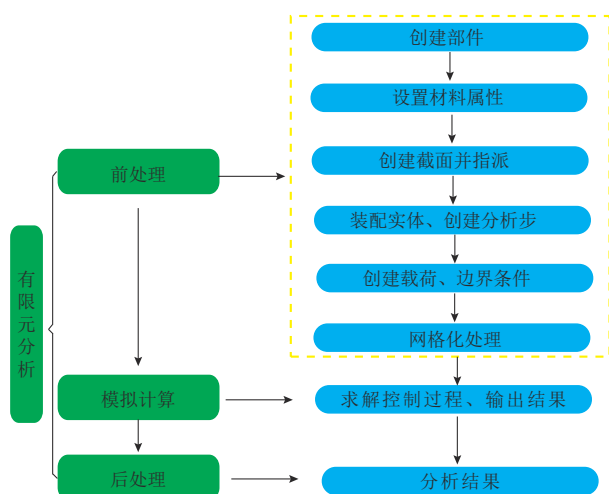


图3 ABAQUS有限元分析流程图

Fig. 3 Flow chart of finite element analysis using ABAQUS

3种岩性的径向应变均大于轴向应变。由图4a可知,泥页岩应力变化范围较大,其中弹性变形阶段呈现出明显的线性变化,当轴向应力达到泥页岩的最大抗压强度14.980 MPa时,泥页岩失稳破坏,之后应力先急剧下降,然后缓慢减小,轴向应变缓慢增加,轴向应变变化范围小于径向应变,最大为0.994%。相较于灰

岩(图4b),砂岩的应力变化范围较小,被破坏之后应力-应变曲线呈阶梯式不连续下降。由图4c可知,灰岩单轴压缩破坏过程中应力变化范围较大,破坏后应力快速下降,最终趋于残余强度。

结合公式(1)和公式(2)计算,得到不同岩性的力学参数(表3)。从泥页岩、灰岩到砂岩,随着单轴最大抗压强度的增加,其杨氏模量和泊松比均呈现出增大的趋势,轴向应变逐渐减小。这表明在相同的尺寸下,砂岩的抗压强度最大,灰岩次之,泥页岩最小。而煤岩性质较为特殊,相较其他岩性,其轴向应变最大,杨氏模量和抗压强度最小,泊松比则是介于灰岩与砂岩之间。此外,还进行了饱和水的煤岩力学测试,发现相比于干燥煤样,含饱和水煤岩各项力学参数均减小,说明水-岩作用使得煤岩力学性质发生变化,抗压强度降低,在应力作用下更容易发生破坏。

2.2 不同煤-岩厚度比组合体力学性质特征

以煤岩-砂岩组合体为例,图5a是在交界面接触倾角为0°的条件下,不同煤-岩厚度比组合体单轴压缩过程的应力-应变曲线。由图5a可知,煤岩-砂岩组合

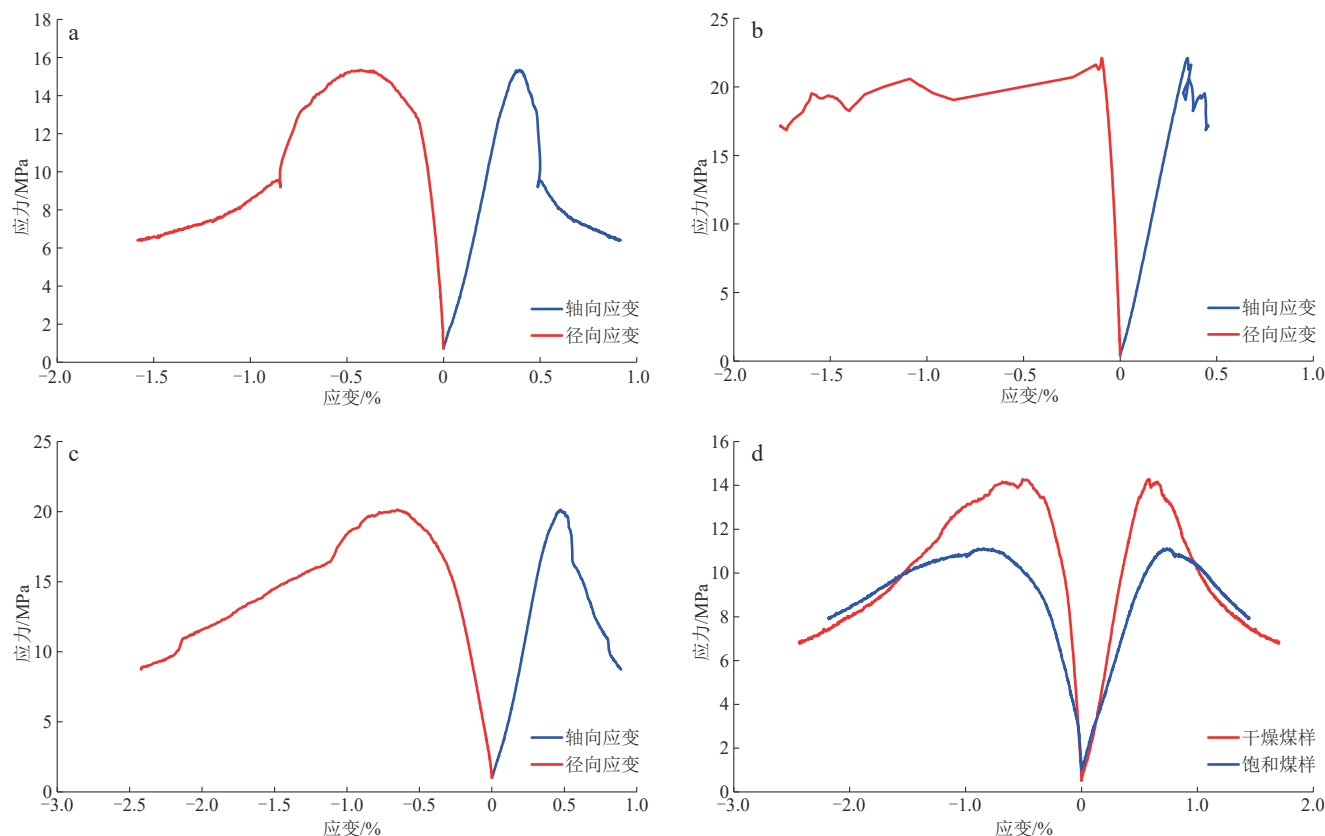


图4 沁水盆地武乡区块不同岩性单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of various lithologies derived from uniaxial compressive strength test in Wuxiang block, Qinshui Basin

a. 泥页岩; b. 砂岩; c. 灰岩; d. 煤岩

表3 沁水盆地武乡区块不同岩性单一岩石力学参数

Table 3 Individual rock mechanical parameters of various lithologies in Wuxiang block, Qinshui Basin

岩性	轴向应变/%	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
泥页岩	0.994	5.470	0.340	14.980
灰岩	0.840	5.740	0.410	19.700
砂岩	0.500	5.940	0.500	22.200
干燥煤岩	1.700	3.260	0.420	14.500
饱和煤岩	1.450	1.180	0.390	11.200

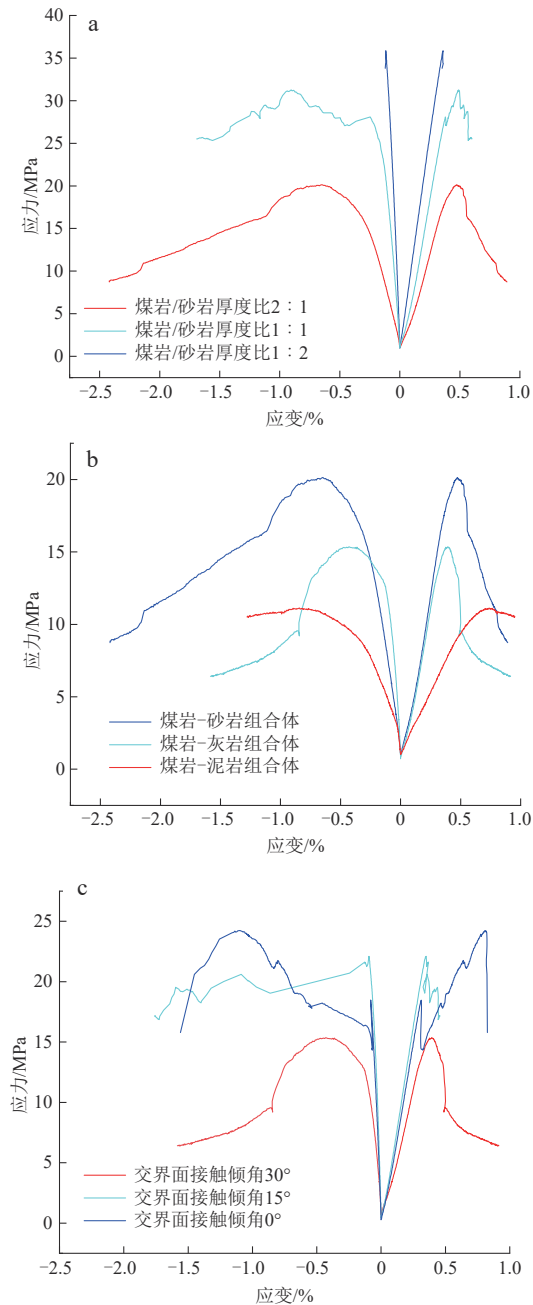


图5 沁水盆地武乡区块不同煤岩组合体单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of various coal-rock assemblages derived from uniaxial compressive strength test in Wuxiang block, Qinshui Basin

a. 不同厚度比; b. 不同岩性类别; c. 不同界面接触倾角

体的应力-应变曲线与单体煤岩或单体砂岩的应力-应变曲线相似,都经历了压密阶段、线弹性变形阶段、塑性变形阶段以及峰后破坏阶段。当煤岩/砂岩厚度比为1:2时,随着轴向应力的不断增大,应力-应变曲线接近线性形态,当应力达到抗压强度时,组合体破坏,随后失稳,轴向应变较小,且基本没有变化,应力则呈直线式急剧下降,但是变化幅度较小。当煤岩/砂岩厚度比为1:1,即组合体中煤岩厚度等于砂岩厚度时,应力-应变曲线的峰值应力减小,当组合体破裂后,应力呈阶梯状下降并趋于残余强度,轴向应变相比有所增加。当煤岩/砂岩厚度比为2:1时,应力-应变曲线的峰值应力继续减小,在煤岩失稳破裂后,应力缓慢下降,轴向应变缓慢增加,轴向应变大于其他组合体的轴向应变。

不同煤-岩厚度比组合体的力学参数如表4所示。可以发现,随着煤-岩厚度比的增大,即组合体中煤岩厚度的增加,组合体的轴向应变不断增大,而杨氏模量、抗压强度和泊松比都呈减小趋势。抗压强度越小,在受到轴向应力的时候越容易产生变形而导致破裂;泊松比越小,轴向应变与径向应变的比值越小,径向应变相对轴向应变越大,组合体越容易产生拉伸变形而破裂并向两侧挤出。

2.3 不同岩性组成组合体力学性质特征

图5b是不同岩性组成煤-岩组合体在交界面接触倾角相同且为0°、煤-岩厚度比为1:2条件下,单轴压缩过程的应力-应变曲线。在煤岩-泥页岩组合体中,破坏之前随着轴向应力的不断增大,轴向应变缓慢增加,当应力达到抗压强度时,组合体破坏,随后失稳,应力缓慢减小。在煤岩-灰岩组合体中,应力-应变曲线的峰值应力加大,当组合体破裂后,应力先急剧下降,随后缓慢减小,直至轴向应变达到最大。在煤岩-砂岩组合体中,应力-应变曲线的峰值应力继续增大,在组合体失稳破裂后,应力快速下降至残余强度。

实验结果表明,岩性强度由强到弱依次为砂岩、灰岩和泥页岩(表5)。可以发现,随着与煤岩形成组合

表4 沁水盆地武乡区块不同煤-岩厚度比组合体力学参数统计

Table 4 Statistics of the mechanical parameters of coal-rock assemblages with different coal-rock thickness ratios in Wuxiang block, Qinshui Basin

煤岩/砂岩厚度比	轴向应变/%	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
1:2	0.590	10.060	0.500	36.000
1:1	0.620	8.290	0.428	31.300
2:1	0.890	5.442	0.324	20.200

表5 沁水盆地武乡区块不同岩性组成煤-岩组合体力学参数统计

Table 5 Statistics of the mechanical parameters of coal-rock assemblages with different lithologies in Wuxiang block, Qinshui Basin

组合体	轴向应变/%	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
煤岩-泥页岩	0.970	1.754	0.277	11.200
煤岩-灰岩	0.940	4.732	0.438	15.400
煤岩-砂岩	0.890	5.442	0.500	20.600

体的岩石强度的增加,组合体的轴向应变不断减小,而其杨氏模量、抗压强度和泊松比都呈不断增大的趋势。

2.4 不同交界面接触倾角组合体力学性质特征

图5c是不同交界面接触倾角的煤岩-灰岩组合体单轴压缩应力-应变曲线。当交界面接触倾角为0°时,随着轴向应力增大,轴向应变不断增大,当应力达到18.2 MPa左右时,煤岩发生破坏,随后应力在短时间内下降至一定程度;之后随着应力进一步增大,当达到组合体的抗压强度时,组合体整体破坏,轴向应力达到最大值,随后轴向应力急剧减小,直至轴向应变达到最大,此时整个组合体完全破坏。当交界面接触倾角为15°、应力达到组合体抗压强度时,组合体发生破坏,随后应力呈阶梯状快速减小至残余强度,轴向应变小于交界面水平的煤-岩组合体,也远小于其本身的径向应变。当交界面接触倾角为30°时,应力-应变曲线峰值应力较小,组合体发生破坏后应力变化经历2个阶段:刚开始应力快速减小;随后应力缓慢减小至残余强度,轴向应变达到最大,大于接触倾角为0°时的值。

由表6所示的力学参数可以发现,随着煤-岩组合体交界面接触倾角变大,组合体的杨氏模量、抗压强度及泊松比都呈不断减小的趋势。

3 煤-岩组合体破裂行为影响因素

3.1 煤-岩厚度比

由图6a可以发现,当煤岩厚度占比低于砂岩厚度占比时,组合体破坏的平静发育阶段较长,约为300 s。在这一阶段中,组合体内经历了前期能量缓慢存储,之后声发射振铃次数和能量计数呈缓慢增长态势,且组合体的变形大部分是可逆的;随后,声发射能量激增,进入破坏活跃期,煤岩内部产生大量裂纹,裂纹之间相互连通产生主裂隙,从而导致煤岩产生破裂。由于煤岩厚度占比较小且煤岩抗压强度低于砂岩,所以煤岩破裂后,随轴向应力的增大,煤岩损伤导致砂岩破裂,声发射振铃计数和能量迅速增大,当轴向应力达到抗压强度时,声发射能量达到峰值,组合体完全破裂;轴向应力达到抗压强度之后继续增大,此时已破裂的组合体承载能力急剧下降,少量残余的能量被释放出来,声发射信号减弱,声发射振铃计数和声发射能量逐渐减小为0。

由图6b可知,当煤岩厚度和砂岩厚度相同时,组合体破裂过程的平静发育期较短,约为200 s。随着轴向应力进一步增大,声发射信号进入活跃期,声发射振铃计数和能量急剧增加,组合体所储存的能量被大量释放,内部裂纹逐步扩展并产生主裂隙;当达到组合体

表6 沁水盆地武乡区块不同交界面倾角煤-灰岩组合体力学参数统计

Table 6 Statistics of the mechanical parameters of coal-limestone assemblages with different interfacial angles between coal and rock in Wuxiang block, Qinshui Basin

交界面接触倾角/(°)	轴向应变/%	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
0	0.760	6.927	0.477	24.600
15	0.320	6.405	0.299	22.100
30	0.930	4.732	0.246	15.300

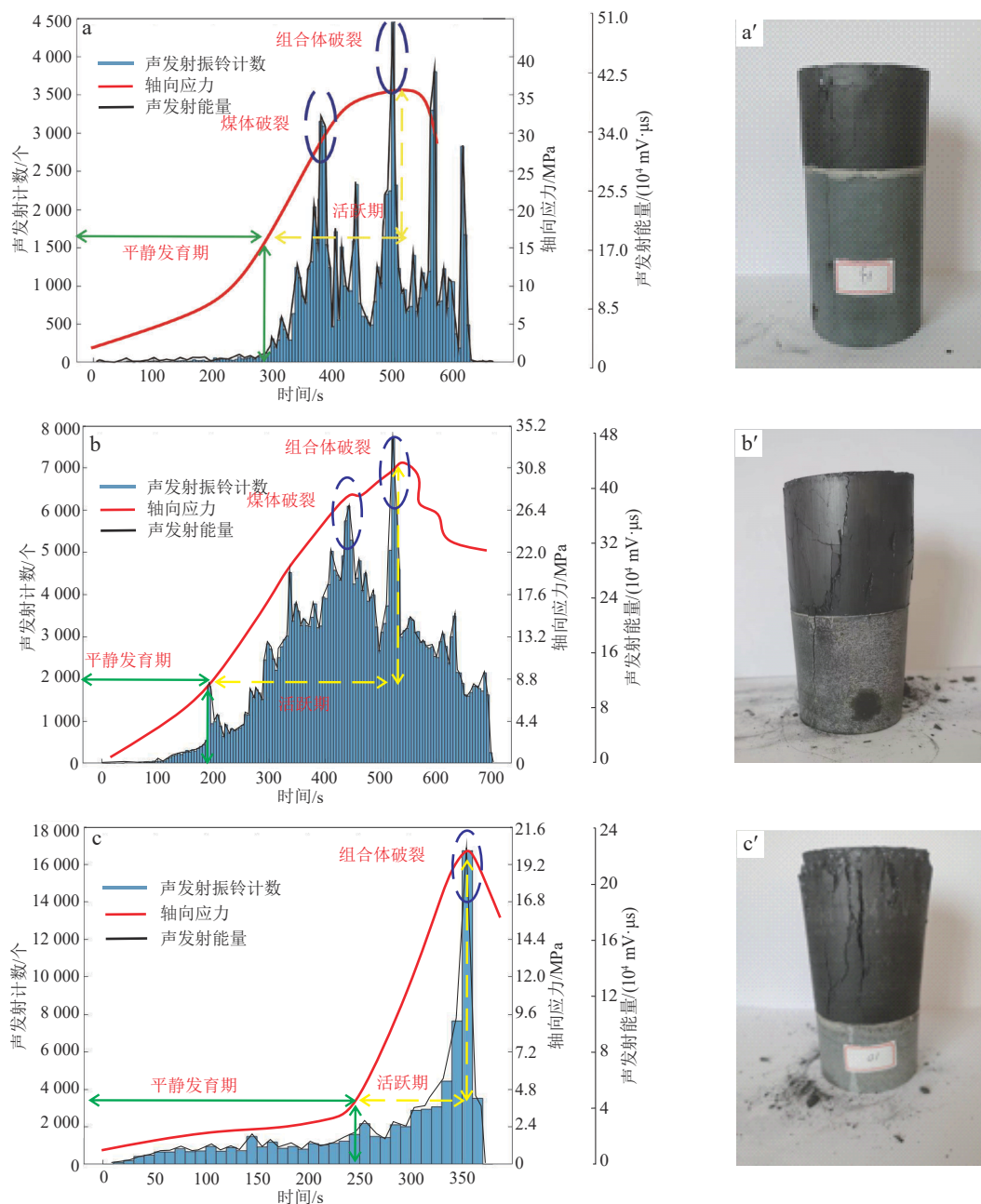


图6 沁水盆地武乡区块不同煤-岩厚度比组合体破裂过程应力-声发射参数-时间演化关系

Fig. 6 Curves showing the time-varying stress and acoustic emission parameters of coal-rock assemblages of different lithologies and varying coal-rock ratios in thickness during failure in Wuxiang block, Qinshui Basin

a, a'. 煤岩/砂岩厚度比 1:2; b, b'. 煤岩/砂岩厚度比 1:1; c, c'. 煤岩/砂岩厚度比 2:1

(a—c 为破裂过程应力-声发射参数-时间演化关系曲线; a'—c' 为对应破裂煤-岩组合体岩心照片。)

抗压强度时,声发射振铃计数和能量也达到峰值,组合体破裂。可以发现,当组合体中煤岩厚度所占比例增大时,由于煤岩的最大抗压强度比砂岩小,使得整个组合体更容易被破坏。当组合体中煤岩厚度占比继续增大为砂岩厚度的2倍时(图6c),整个组合体试件破裂过程所持续的时间约为250 s。组合体在经历短暂的平静发育期后进入活跃期,由于煤岩厚度所占比例较大,达到66.7%,使得整个组合体试件的抗压强度降

低,当轴向应力达到最大抗压强度时,煤体产生破裂而砂岩未破裂;之后,由于组合体中的煤岩完全破裂,组合体失去承载能力。

以煤岩-砂岩组合体为例(图6),随着煤岩/砂岩厚度比的增大,组合体破坏主裂纹的倾角随之增大。当煤岩/砂岩厚度为1:2时,组合体产生局部破坏,产生的变形类型为单斜面剪切破坏,贯穿于煤体部分并延伸至煤岩与砂岩交界面处,裂隙延伸方向与组合体轴向平行。

当煤岩/砂岩厚度为1:1时,产生的变形类型为H型拉伸破坏,轴向应力的作用使得垂直于轴向的方向上产生拉应力;产生的裂隙近乎平行于轴向并贯穿整个煤-岩组合体的煤岩中,表现为整体上的拉伸破坏。当煤岩/砂岩厚度比为2:1时,产生的变形类型为典型的X型共轭斜面剪切破坏,破坏分布于整个煤-岩组合体部分;当轴向应力达到组合体的抗压强度时,沿着煤岩的裂隙产生剪切错位,导致煤岩剪切破坏,煤岩整体遭到破坏并向两侧挤出。

3.2 岩性组成

对不同岩性组成的煤-岩组合体的声发射数据进行处理,得到其声发射参数随轴向应力和时间变化的关系曲线(图7)。可以发现,泥页岩、灰岩、砂岩和煤岩组成的煤-岩组合体的破坏过程差异较大。煤岩-泥页岩组

合体中,由于煤岩和泥页岩的抗压强度相对较小,所以组合体的平静发育期较长,组合体内部缓慢储存能量;之后,随着轴向应力逐渐加大,声发射振铃计数和能量开始增加,组合体内部产生裂纹;随着轴向应力继续增大,产生的裂纹相互连通形成主裂隙,当轴向应力达到抗压强度时组合体完全破裂,声发射能量达到峰值(图7a)。

而在煤岩-灰岩组合体中,由于灰岩的抗压强度显著高于煤岩,所以当进入活跃期时,煤岩率先产生破裂,并在内部产生大量裂隙,此时声发射振铃计数和能量达到一个较高值。随着轴向应力进一步增大,灰岩中也开始产生大量裂隙,达到抗压强度时组合体完全破裂,声发射能量达到峰值。组合体经历了前、后两次破裂(图7b)。

图7a', b'为不同岩性组成、煤-岩厚度比都为1:2的煤-岩组合体单轴压缩破坏示意图。煤岩-泥页岩组合体整体破裂,泥页岩岩体部分产生的变形类型为

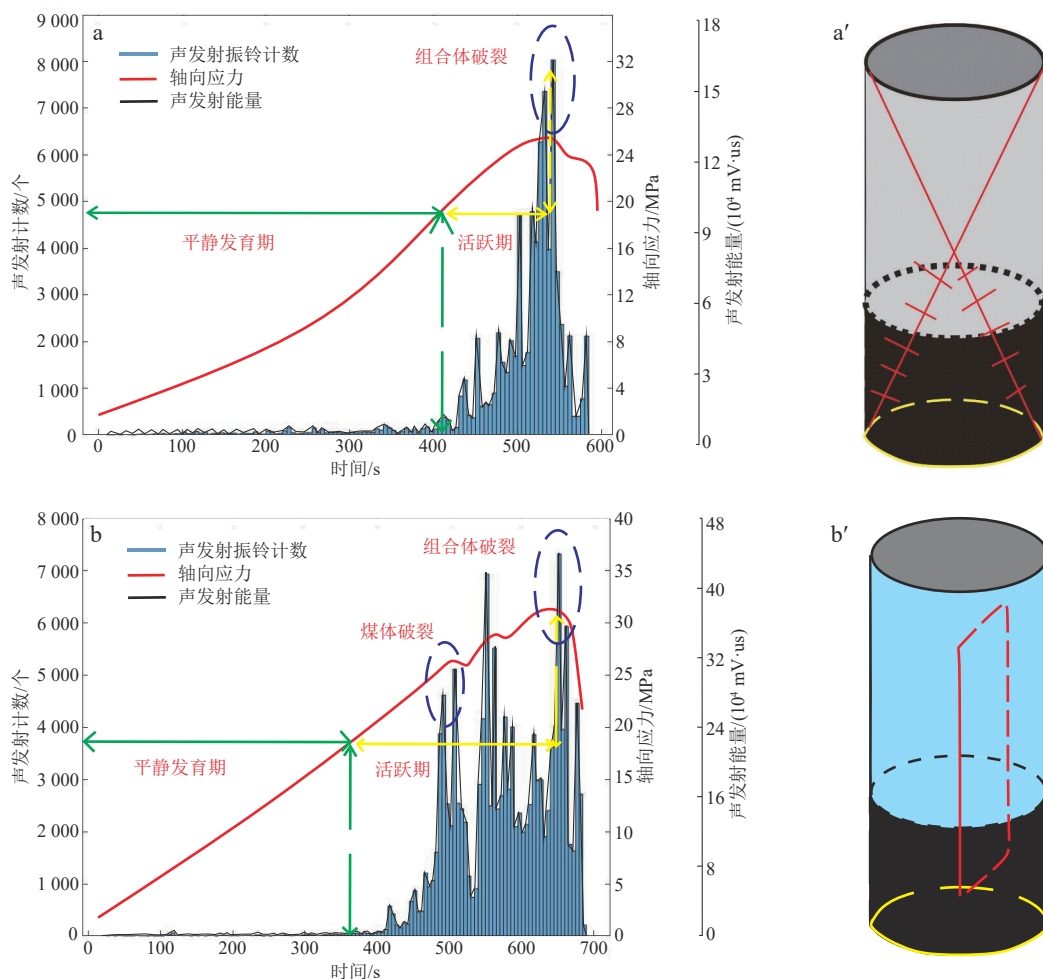


图7 沁水盆地武乡区块不同岩性组成组合体破裂过程应力-声发射参数-时间演化关系

Fig. 7 Curves showing the time-varying stress and acoustic emission parameters of coal-rock assemblages with different lithologies during failure in Wuxiang block, Qinshui Basin

a, a'. 煤岩-泥页岩组合体破裂过程及破裂示意图; b, b'. 煤岩-灰岩组合体破裂过程及破裂示意图

(a, b为破裂过程应力-声发射参数-时间演化关系曲线; a', b'为对应破裂煤-岩组合体示意图。)

X型共轭斜面剪切破坏,剪切破坏范围大,贯穿于整个组合体内部。煤岩由于受到破坏,整体上破碎成小块,需要实验用的热塑管才能维持柱体形状;泥页岩部分沿着X型裂隙产生大量小型裂隙,这些小型裂隙延伸至泥页岩内部。

在煤岩-灰岩组合体中,煤岩部分出现大量轴向劈理,长度大,贯穿于煤岩体内,产生的变形类型为拉伸破坏,轴向应力的作用使得垂直于轴向的方向上产生拉应力而形成张性裂隙;煤体内部产生的张性裂隙延伸至灰岩内部,组合体完全破坏。

在煤岩-砂岩组合体中,煤岩内部产生的变形类型为单斜面剪切破坏,煤岩内部产生大量裂隙并穿过煤岩-砂岩交界面延伸至砂岩内部。

3.3 煤-岩交界面接触倾角

以煤岩-砂岩组合体为例,不同交界面接触倾角组合体破坏过程中的轴向应力-声发射参数-时间演化特征如图8所示。初始阶段,随着轴向应力的不断增大,煤岩内部产生压缩,微裂隙开始闭合,相对应的振铃计数和声发射能量都处于低值阶段。之后,随着轴向应力不断增大,煤岩颗粒被压密,煤岩进入弹性变形阶段,局部开始产生新的微裂隙。此时,之前压密阶段煤岩内部所储存的能量逐步释放,振铃计数和声发射能量增加,整体进入活跃期。随着轴向应力的继续增大,煤岩-砂岩组合体内部所储存的能量大量释放,产生的微裂隙逐渐连通、裂纹扩展,振铃计数和声发射能量快速增加。当轴向应力达到煤岩-砂岩组合体的抗压强度时,产生主裂隙,振铃计数和声发射能量达到峰值,煤岩破裂,少量剩余能量逐步释放直至为零。

对比图8发现,随着煤岩与砂岩的交界面接触倾角不断增大,破坏过程所经历的平静发育期逐渐变长,峰值能量却显著下降。当交界面接触倾角为 0° ,即煤-岩交界面水平时,声发射过程的平静发育期较短,这个阶段声发射参数都较小。到了活跃期,随着加载的轴向应力不断增大,声发射振铃计数和能量计数急剧增加达到一个较高值,这时煤体产生破裂。之后,由于煤体破裂,声发射参数呈急剧减小趋势。当振铃计数和能量计数降低到一定值时,随着轴向应力增大,声发射参数突然急剧增大,整个组合体产生破裂。此时,煤岩内部产生大量张性裂隙。当交界面接触倾角为 15° 时,声发射阶段要经历一个较长的平静发育期,进入活跃期后,振铃计数和能量计数显著增加,组合体发生破裂,轴向应力达到峰值。此后,轴向上逐渐泄压,声发射参数也逐渐减小,当压缩阶段快要结束时,不再施加应力,组合体产

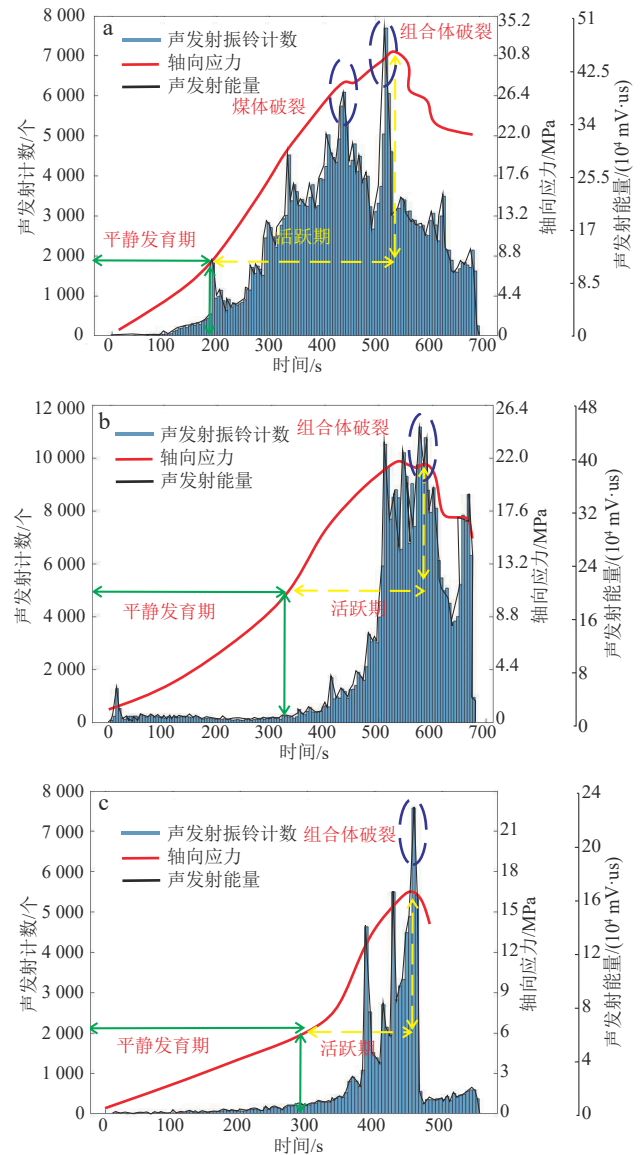


图8 沁水盆地武乡区块不同交界面接触倾角煤-岩组合体破裂过程应力-声发射参数-时间演化关系曲线

Fig. 8 Curves showing the time-varying stress and acoustic emission parameters of coal-rock assemblages with different interfacial angles during failure in Wuxiang block, Qinshui Basin
a. 倾角 0° ; b. 倾角 15° ; c. 倾角 30°

生破坏并向外挤出,导致应变增大,声发射参数也出现增大并随之骤降为零。此时,组合体表面产生X型裂隙,随之裂隙周围产生大量次级裂隙,延伸至煤岩和砂岩内部。当交界面接触倾角为 30° 时,组合体发生一次破裂,声发射能量达到峰值,之后声发射计数和能量逐渐减小为0。此时,组合体破坏程度加剧,内部产生X型共轭斜面剪切破坏,煤岩和砂岩整体失稳,组合体表面产生X型裂隙,内部岩体产生大量裂隙而破碎成块状。综上,随着组合体交界面接触倾角增大,整个岩体更易产生裂隙并破坏失稳。

4 基于有限元的煤-岩组合体裂缝扩展模拟

4.1 不同煤-岩厚度比组合体裂缝扩展模拟

选取煤-岩交界面水平的煤岩-砂岩组合体建立模型,运算后得到不同煤岩/砂岩厚度比组合体破坏前、后的应力-应变分布云图以及破坏后裂隙分布应

力-应变透视图。当煤岩/砂岩厚度比为1:2时(如图9),在组合体破坏前,应力高值集中于煤岩和砂岩交界面处。砂岩内部应力值整体较高,而煤岩内部应力高值集中于下底面附近。煤岩内部的应变值普遍高于砂岩,在煤岩下底面出现应变峰值,煤岩内部还出现一个高应变值面(图9a)。随组合体模型破坏发生变形(图9b),组合体煤岩部分表面出现劈理,且裂缝长度较长,贯穿煤岩整体,而砂岩部分并未产生裂缝。结合组合体破坏后的透视图(图9c)可以看出,组合体破坏

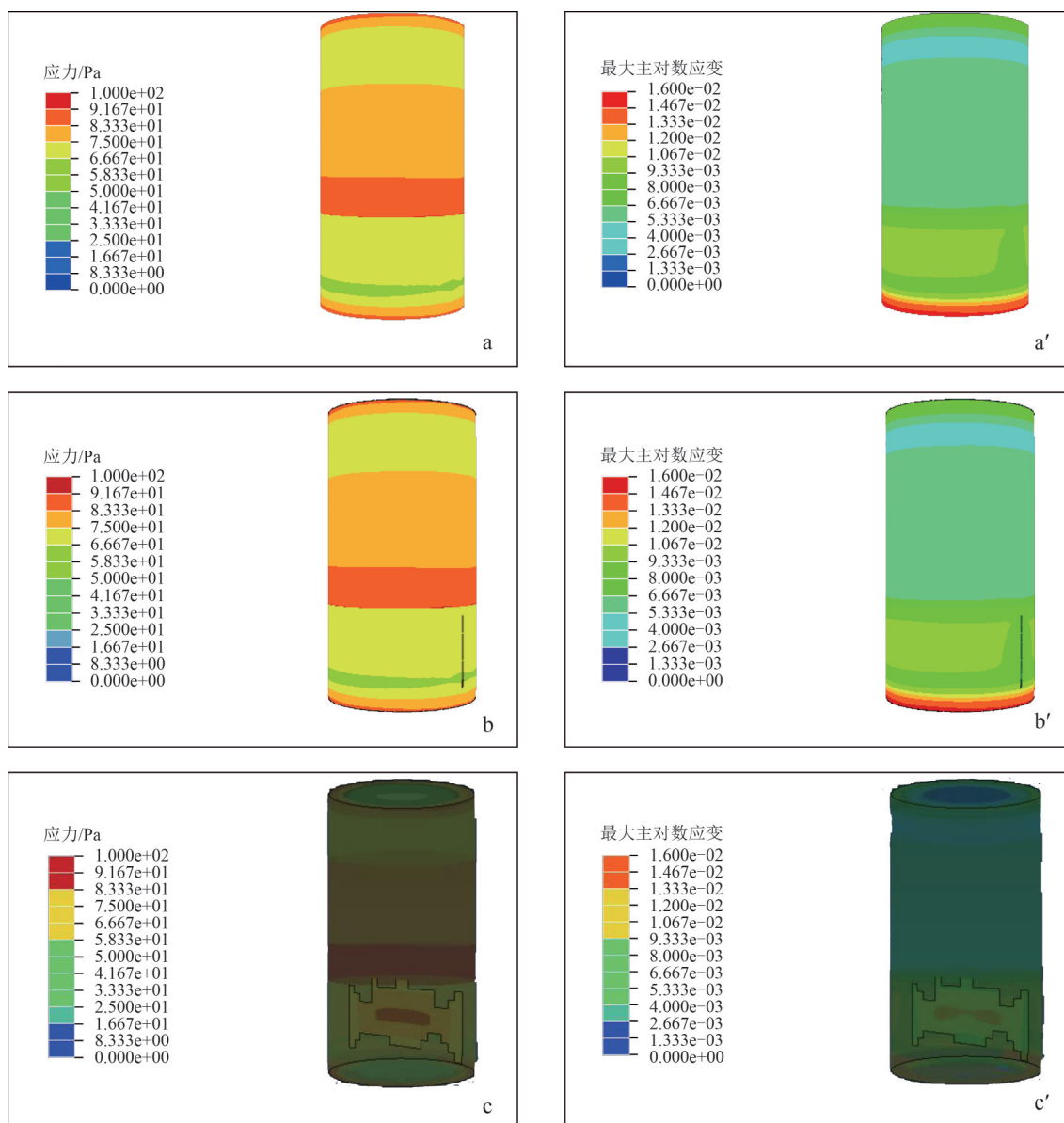


图9 沁水盆地武乡区块煤岩/砂岩厚度比为1:2时煤岩-砂岩组合体破坏前(a, a')、后的应力-应变分布云图(b, b')及破坏后的裂隙分布应力(c)-应变(c')透视图

Fig. 9 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-sandstone assemblage, and the perspective views of the stress (c) and strain (c') of fracture distribution in the post-failure assemblage with a coal-sandstone ratio of 1:2 in thickness in Wuxiang block, Qinshui Basin

a—c. 应力; a'—c'. 应变

之后,煤岩内部产生了一个竖直破坏面,垂直于煤岩和砂岩的交界面。结合数值模拟输出的结果可知,组合体破坏过程中径向应变大于轴向应变,组合体模型高度有所降低、直径增大,且直径增大的幅度大于高度降低的幅度,使得煤岩部分发生拉伸破坏,产生轴向上的裂缝。

当煤岩/砂岩厚度比为1:1时,组合体破坏前的煤岩内部应力高值集中于煤岩和砂岩交界处的煤岩顶部,且砂岩内部应力值整体较高。煤岩内部的应变值普遍高于砂岩,在煤岩下底面出现应变峰值,煤岩体内

部还出现一个较高应变值的区域(图10a),在这个区域上、下都出现应变最低值;砂岩内部应变值整体较低。如图10b所示,当组合体模型破坏发生变形后,组合体煤岩表面出现劈理,且裂缝长度较长,贯穿整个煤岩,而砂岩部分并未产生裂缝。结合图10c可以发现,组合体破坏之后,煤岩体内部产生了一个竖直破坏面,垂直于煤岩和砂岩的交界面。综上,组合体破坏过程中径向应变大于轴向应变,组合体模型变形后高度降低、直径增大,且直径增大的幅度大于高度降低的幅度,

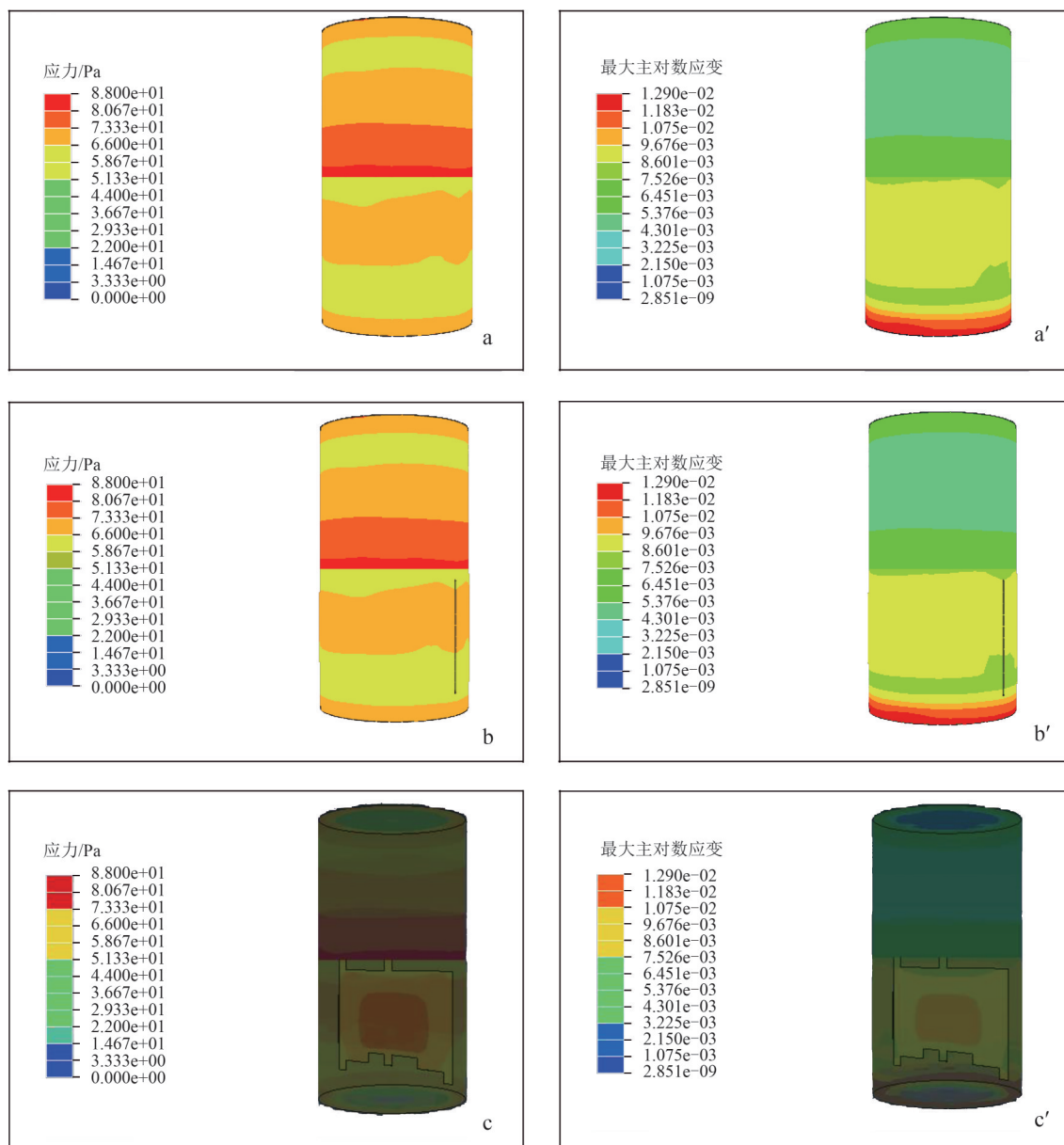


图10 沁水盆地武乡区块煤岩/砂岩厚度比为1:1时组合体破坏前(a, a')、后(b, b')的应力-应变分布云图及破坏后裂隙分布应力(c)-应变(c')透视图

Fig. 10 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-sandstone assemblage, and the perspective views of the stress (c) and strain (c') of fracture distribution in the post-failure assemblage with a coal-sandstone ratio of 1:1 in thickness in Wuxiang block, Qinshui Basin

使得煤岩部分发生拉伸破坏,产生轴向上的张性裂隙。

如图11所示,当煤岩/砂岩厚度比为2:1时,在组合体破坏前,组合体有发生X型共轭斜面剪切破坏的趋势,在剪切破坏面中间的煤岩和砂岩应力值较高,剪切破坏面两侧区域应力值相对较低;组合体模型破坏前,应变高值的分布区域与应力分布大致吻合。组合体破坏后,组合体模型发生X型共轭剪切破坏,在破坏面的基础上产生X型剪切裂隙,煤岩内部先出现裂隙,随着轴向应力不断增大,裂隙延伸到砂岩内部,随后贯通于整个组合体内,组合体模型沿着破坏面发生滑移,滑移面内侧区域在应力作用下发生压缩,使得破坏面两侧的组合体呈沿两侧挤出的趋势,表现为组合体模型整体的径向应变大于轴向应变(图11b)。

4.2 不同岩性组成煤-岩组合体裂缝扩展模拟

选取煤-岩厚度比为1:2、交界面水平的煤岩-泥页岩组合体、煤岩-灰岩组合体以及煤岩-砂岩组合体,通过单轴压缩声发射试验得到岩石力学参数,建立组合体模型进行数值模拟分析。

如图12a,在煤岩-泥页岩组合体模型中,模型破坏变形前,组合体内部有产生X型共轭斜面剪切破坏的趋势。组合体对角线出现一个X型共轭剪切面,在剪切面中心处应力和应变值较高且比较集中。在组合体下部的煤岩中,应力与应变值相对较高;在组合体上部的泥页岩中,X型共轭剪切面之间的泥页岩部分应力和应变值较高,X型共轭剪切面两侧的泥页岩应力和应变值很低。试样破坏后,模拟输出的破坏过程显示在轴向上试样高度有所降低,受到了压缩变形;组合体内部产生X型共轭剪切破坏面,在煤岩部分和泥页岩底部,沿着X型共轭剪切破坏面产生一系列小型裂隙,且裂隙长度较短,延伸至煤岩和泥页岩内部(图12b)。

模型破坏变形前的煤岩-灰岩组合体(图13a),在其交界面上方的灰岩内部形成一个倒漏斗状的应力高值区。这个部分的应力值在组合体内最高,再往上应力值逐渐降低,灰岩顶部出现小区域的应力高值区;在煤岩下底部,应力出现小区域高值区,其上方煤岩内部形成一个透镜状应力相对低值区。煤岩内部应变值整体高于灰岩内部,下底部应变值最高,往上应变值逐渐

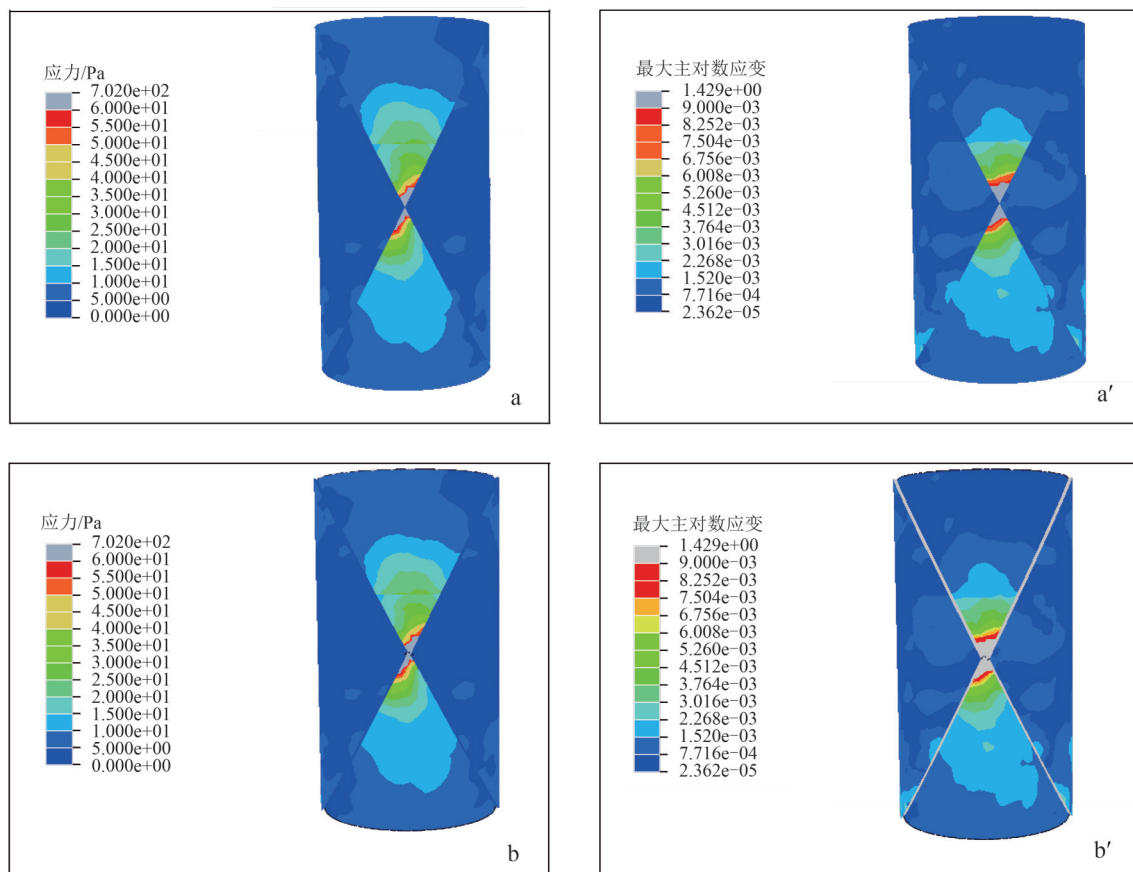


图11 沁水盆地武乡区块煤岩/砂岩厚度比为2:1时组合体破坏前(a, a')、后(b, b')应力-应变分布云图

Fig. 11 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-sandstone assemblage with a coal-sandstone ratio of 2:1 in thickness in Wuxiang block, Qinshui Basin

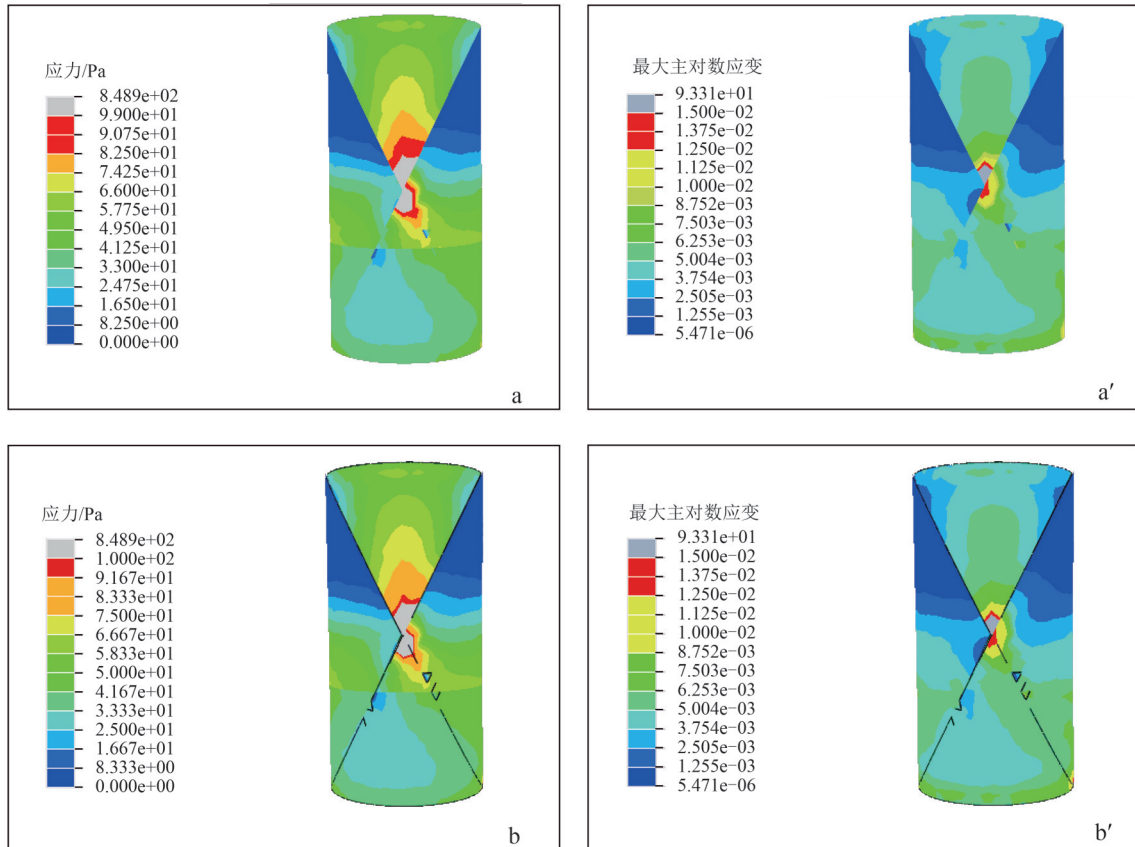


图12 沁水盆地武乡区块煤岩/泥页岩厚度比为1:2时组合体破坏前(a, a')、后(b, b')应力-应变分布云图

Fig. 12 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-argillaceous shale assemblage with a coal-argillaceous shale ratio of 1:2 in thickness in Wuxiang block, Qinshui Basin

降低,到煤岩与灰岩交界面处相对有所增加;灰岩内部整体应变值较低,在上顶部出现漏斗状应变最低值区。

在组合体模型破坏变形后(图13b),组合体外表面产生竖直裂隙,裂隙长度较长,贯穿组合体上、下的煤岩和灰岩。结合图13c的模型破坏后的透视图可以发现,破坏变形后组合体内部产生竖直的破坏面,贯穿于煤岩和灰岩岩体,在灰岩中延伸的长度大于在煤岩内部延伸的长度,在组合体外表面表现为竖直的长裂隙。组合体模型在轴向上高度降低,在径向上直径扩大,属于明显的拉伸破坏,在组合体外表面产生张性裂隙。煤岩部分和泥页岩部分由于受到组合体整体的X型共轭剪切破坏的作用而变形严重。煤岩-砂岩组合体的破坏形态以及裂隙展布在前文中已做描述。

综上,当煤-岩厚度比为1:2、交界面水平时,从泥页岩到灰岩再到砂岩,随着其与煤岩构成组合体的岩体力学强度的增大,组合体整体受到单轴压缩破坏模拟后呈现的破坏特征明显不同。煤岩-泥页岩组合体模型破坏后产生X型共轭斜面剪切破坏,组合体形成X型剪切裂隙和大量小裂隙;煤岩-灰岩组合体模型破

坏后产生拉伸破坏,组合体受到拉伸作用形成张性裂隙;煤岩-砂岩组合体受到破坏后只有煤岩部分产生破坏,砂岩部分并未产生破坏,煤岩部分受到拉伸作用产生张性裂隙,裂缝尺度相对较小,局限于煤岩部分,煤岩部分表面出现裂纹。可见,随着不同岩性组成的煤-岩组合体的岩体力学强度的增大,组合体由受到X型共轭斜面剪切破坏变成拉伸破坏,组合体产生的裂隙类型也从X型剪切裂隙变成张性裂隙,裂隙尺度由遍布组合体到局限于煤岩内部。

4.3 不同交界面接触倾角煤-岩组合体裂缝扩展模拟

单轴压缩实验表明,不同煤-岩交界面接触倾角组合体在单轴压缩破坏过程中的应力-应变曲线特征、破坏特征以及裂隙展布存在差异。选取不同煤-岩交界面接触倾角的煤岩-灰岩组合体模型进行单轴压缩破坏过程的有限元模拟分析:采取轴向加载方式,以模型下底面为边界进行约束,分别设定不同接触倾角的煤-岩组合体相对应的初应力,得到不同交界面接触倾角煤岩组合体破坏前、后的应力、应变分布以及

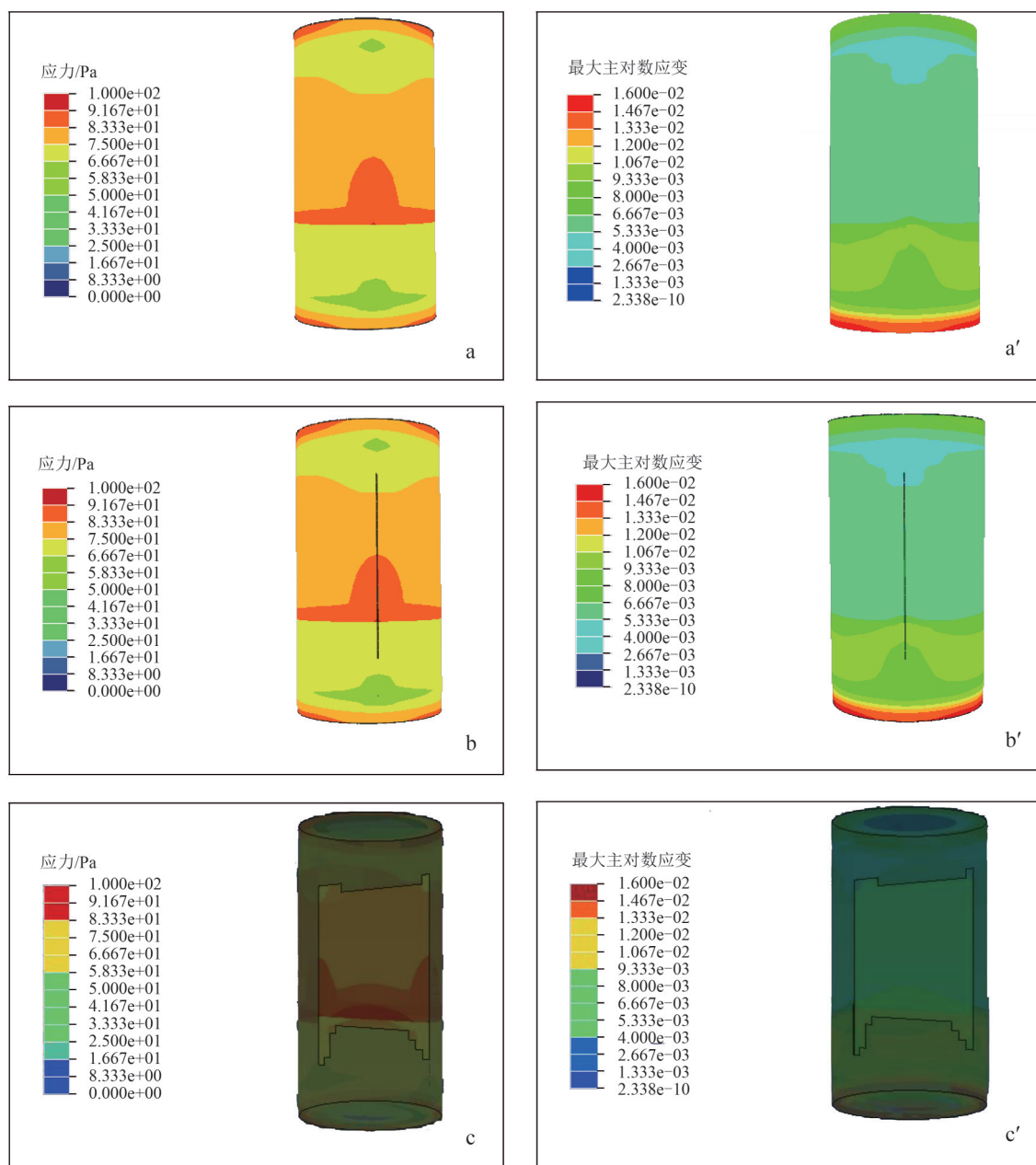


图13 沁水盆地武乡区块煤岩/灰岩厚度比为1:2时组合体破坏前(a, a')、后(b, b')应力-应变分布云图及破坏后裂隙分布应力(c)-应变(c')透视图

Fig. 13 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-limestone assemblage, and the perspective views of the stress (c) and strain (c') of fracture distribution in the post-failure assemblage with a coal-limestone ratio of 1:2 in thickness in Wuxiang block, Qinshui Basin

破坏后的形态特征和裂隙展布。

当煤岩与灰岩的交界面接触倾角为 0° 时,在模型破坏前,应力和应变云图如图14a。组合体的应力高值主要分布在煤岩与砂岩交界面处,煤体中部产生一个相对的应力高值区,这个区域上、下的煤岩部分应力值较低,而灰岩内部,交界面之上区域应力值较高,再往上应力值逐渐降低,灰岩顶部出现小区域的应力较高值。煤岩内部应变值整体高于灰岩,煤岩下底部应

变值达到最大,煤岩中部形成一个应变值较大的区域,区域以外煤岩部分的应变值相对低一些;灰岩应变值整体相对较低,中间部分区域应变值达到最低,这个区域以外的灰岩部分应变相对高一些。模型破坏变形后(图14b),煤岩部分外表面产生张性裂隙,贯穿于煤岩内部,但是并未延伸到灰岩部分;灰岩受到压缩变形,高度降低,但是并没有产生裂隙;煤岩部分受到拉伸破坏作用,内部产生一个拉伸破坏面,表面产生张性裂隙。

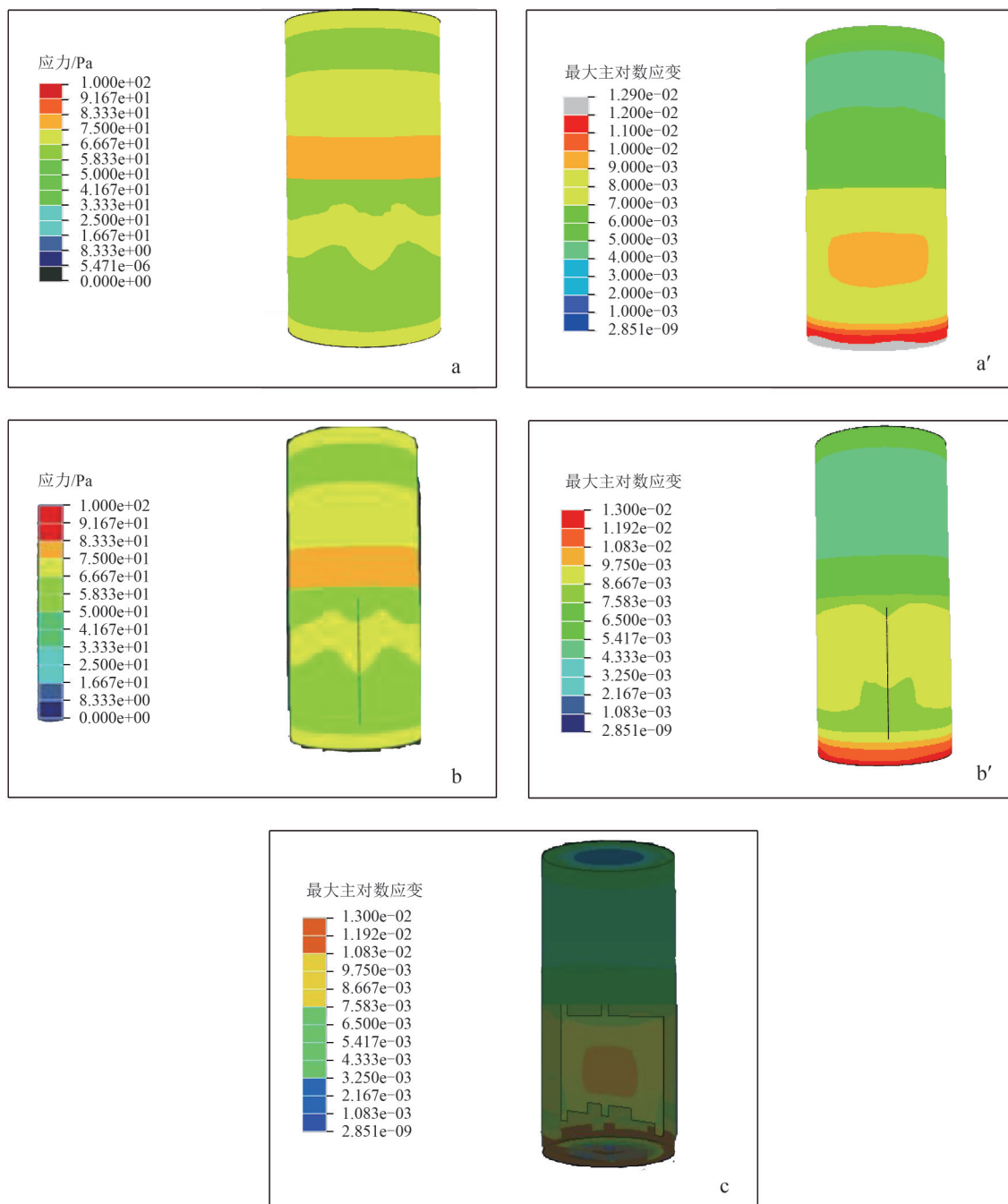


图 14 沁水盆地武乡区块交界面水平的煤岩-灰岩组合体破坏前(a, a')、后(b, b')的应力-应变分布云图及破坏后裂隙分布透视图(c)
Fig. 14 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of a coal-limestone assemblage, and the perspective views of fracture distribution in the post-failure assemblage (c) with an interfacial angle of 0° in Wuxiang block, Qinshui Basin

当交界面接触倾角为 15° 时,模型破坏前组合体内部出现一个沿对角线延伸的 X 型共轭剪切破坏面。如图 15a,灰岩内部应力高值集中于下部与煤岩交界面附近,而应变值整体较低,仅在与煤岩交界面处和 X 型共轭剪切面中心处出现小区域的应变高值。煤岩内部应力高值主要集中在沿 X 型共轭剪切破坏面附近,应变值整体高于灰岩内部,在 X 型共轭剪切破坏面左侧应力峰值处出现应变峰值。当模型加载被破坏后,组

合体沿着 X 型共轭剪切破坏面的其中一个面发生滑动,组合体模型破坏分成两个部分,且 X 型共轭剪切破坏面的另一个面上出现很多裂隙,沿着破坏面向煤岩和灰岩内部延伸,裂隙长度较短(图 15b)。煤体下部靠近滑动面处出现扭曲,应变量相对较大,煤岩体积相对破坏前有所减小。

当交界面接触倾角为 30° 时,在模型被破坏前,组合体内部出现一个 X 型共轭剪切破坏面,破坏面中心点与

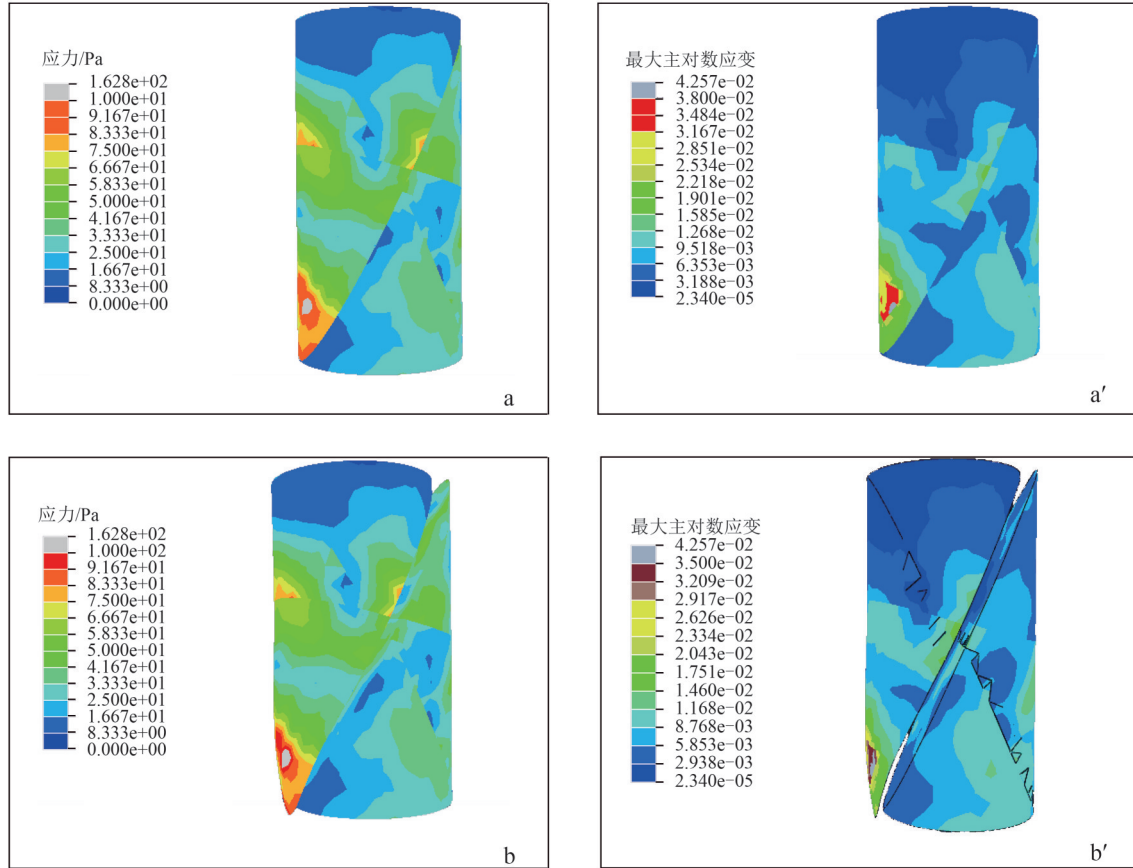


图15 沁水盆地武乡区块煤-岩交界面倾角为 15° 时煤岩-灰岩组合体破坏前(a, a')、后(b, b')应力-应变分布云图

Fig. 15 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of the coal-limestone assemblage with an interfacial angle of 15° in Wuxiang block, Qinshui Basin

灰岩和煤岩交界处应力值达到最高,其余部分应力值相对较低;应变高值在灰岩内部分布较多,主要分布于煤岩-灰岩交界面处和X型共轭剪切面附近,煤岩内部应变高值主要集中于X型共轭剪切面与煤-灰岩交界面的交汇处(图16a)。模型遭破坏后,组合体模型发生X型共轭剪切破坏,内部沿着组合体对角线产生X型共轭剪切裂隙,模型产生大尺度破坏,径向应变明显大于轴向应变;在轴向上,由于受压缩变形,组合体模型高度有所减小,径向上组合体部分沿着X型剪切裂隙向外剥离,在X型剪切破坏面中心处产生一系列小裂隙。

不同煤-岩交界面接触倾角的组合体模拟结果表明,随着煤岩与灰岩交界面接触倾角的不断增大,组合体的破坏程度逐渐加剧,组合体由受到拉伸破坏转变为X型共轭斜面剪切破坏。当交界面水平时,组合体外部产生张性裂隙;当交界面接触倾角增大时,组合体受到X型共轭剪切破坏而产生X型剪切裂隙,煤-岩交界面角度越大,裂隙尺度越大,并造成组合体沿着裂隙面的分离。

5 结论

1) 煤-岩组合体的抗压强度和弹性模量随煤-岩厚度比和交界面接触倾角的增大而减小。不同岩性的组合体弹性模量介于 $1.75 \sim 5.44$ GPa,抗压强度介于 $11.20 \sim 20.60$ MPa,其中煤岩-泥页岩组合体的力学性质最弱,煤岩-砂岩组合体的最强。

2) 结合单轴压缩和声发射信号综合表征煤-岩组合体受力过程的破坏情况:煤岩厚度占比增大会加剧组合体的破坏程度并增加裂隙数量。随着煤岩厚度占比逐渐增大,煤体发生破裂后能量会继续扩散到邻层,继而使整个组合体破坏失稳。在不同岩性的组合体中,破坏难易程度由大到小依次为煤岩-砂岩组合体、煤岩-灰岩组合体和煤岩-泥页岩组合体。随着煤-岩组合体交界面接触倾角的增大,整体更容易破坏失稳产生裂隙。

3) 采用有限元分析方法进行数值模拟,明确煤-岩组合体单轴压缩过程的破坏特征及裂隙扩展机理。随着组合体中煤岩厚度占比增加,发育的裂缝由张性

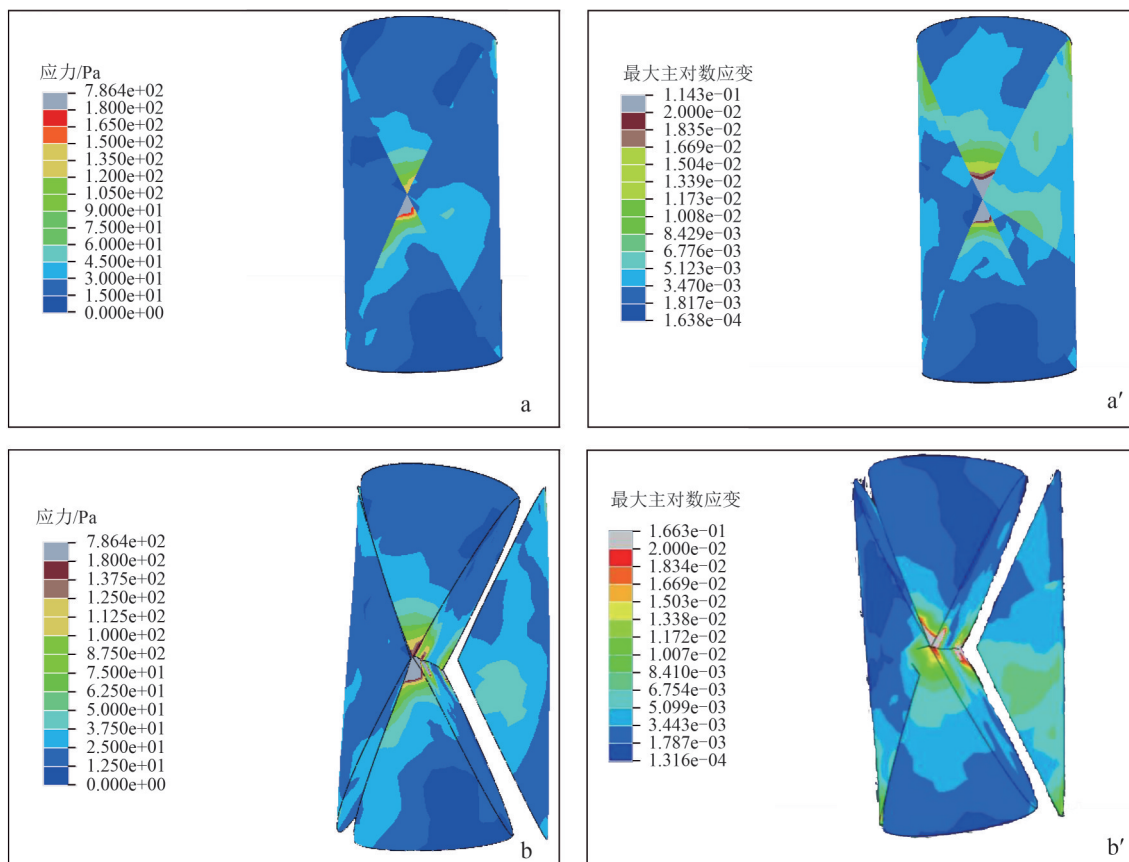


图16 沁水盆地武乡区块煤-岩交界面倾角为 30° 时煤-岩-灰岩组合体破坏前(a, a')、后(b, b')应力-应变分布云图

Fig. 16 Distribution nephograms of the stress and strain before (a, a') and after (b, b') the failure of the coal-limestone assemblage with an interfacial angle of 30°

裂隙演变为X型剪切裂隙,且由只局限于煤岩内部逐渐过渡到贯穿整个组合体。强度大的煤-岩组合体的裂隙倾向于从X型剪切裂隙演变为张性裂隙,展布范围由整个组合体转变到局限于煤岩内部。煤-岩交界面接触倾角的增大,使组合体内部的X型剪切裂隙尺度相应增加,破坏程度加剧。

参 考 文 献

- [1] 徐凤银, 聂志宏, 孙伟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气高效开发理论技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 528-544.
XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei, et al. Theoretical and technological system for Highly efficient development of deep coalbed methane in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 528-544.
- [2] 郭广山, 徐凤银, 刘丽芳, 等. 鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 81-91.
GUO Guangshan, XU Fengyin, LIU Lifang, et al. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu area, Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 81-91.
- [3] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1-14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress

and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1-14.

- [4] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [5] 蔡益栋, 高国森, 刘大猛, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴中区煤系气富集地质条件及成藏模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 25-36.
CAI Yidong, GAO Guosen, LIU Dameng, et al. Geological conditions for coal measure gas enrichment and accumulation models in Linxingzhong Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 25-36.
- [6] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [7] 李倩, 李童, 蔡益栋, 等. 煤层气储层水力裂缝扩展特征与控因研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4443-4460.
LI Qian, LI Tong, CAI Yidong, et al. Research progress on hydraulic fracture characteristics and controlling factors of coalbed methane reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4443-4460.

- [8] 江同文,熊先钺,金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918-1930.
JIANG Tongwen, XIONG Xianyue, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1918-1930.
- [9] 王磊,邹鹏,谢广祥,等. 深部原位应力煤岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2876-2887.
WANG Lei, ZOU Peng, XIE Guangxiang, et al. Experimental study on unloading mechanical properties of deep coal under in-situ stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2876-2887.
- [10] 桑树勋,韩思杰,周效志,等. 华东地区深部煤层气资源与勘探开发前景[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 403-415.
SANG Shuxun, HAN Sijie, ZHOU Xiaozhi, et al. Deep coalbed methane resource and its exploration and development prospect in East China[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 403-415.
- [11] 段敏克,蒋长宝,郭现伟,等. 真三轴循环载荷作用下煤岩力学及损伤特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1110-1118.
DUAN Minke, JIANG Changbao, GUO Xianwei, et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under cyclic true triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1110-1118.
- [12] 贾慧敏,胡秋嘉,张聪,等. 煤层气双层合采直井产能预测及排采试验——以沁水盆地郑庄西南部为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 657-665.
JIA Huimin, HU Qiujia, ZHANG Cong, et al. Prediction of productivity and co-drainage trial of bilayer vertical coalbed methane wells: Cases study of the southwest of Zhengzhuang Block, Qinshui Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 657-665.
- [13] 王凯,付强,徐超,等. 原生煤岩组合体界面力学效应数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊1): 623-633.
WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, et al. Numerical simulation of interface mechanical effects of primary coal-rock combination[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 623-633.
- [14] 左建平,陈岩,宋洪强. 深部煤岩组合体破坏行为与非线性模型研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2510-2521.
ZUO Jianping, CHEN Yan, SONG Hongqiang. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2510-2521.
- [15] 秦忠诚,陈光波,秦琼杰. 组合方式对煤岩组合体力学特性和冲击倾向性影响实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 655-661.
QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, QIN Qiongjie. Effects of combination mode on mechanical properties and rock burst tendency of the coal-rock combinations[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 655-661.
- [16] 陈光波,李谭,杨磊,等. 水岩作用下煤岩组合体力学特性与损伤特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 37-46.
CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and damage characteristics of coal-rock combined samples under water-rock interaction[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 37-46.
- [17] 苏育飞,宋儒. 沁水盆地榆社武乡区块深部煤层气地质特征研究及可改造性评价[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(5): 46-57.
SU Yufei, SONG Ru. Study on geological characteristics of deep CBM in Yushewu Block, Qinshui Basin and evaluation of transformability[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(5): 46-57.
- [18] 申有义,王凯峰,唐书恒,等. 沁水盆地榆社—武乡区块二叠系煤系页岩储层地质建模及“甜点”预测[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(4): 98-108.
SHEN Youyi, WANG Kaifeng, TANG Shuheng, et al. Geological modeling and “sweet spot” prediction of Permian coal measures shale reservoirs in Yushu-Wuxiang Block, Qinshui Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(4): 98-108.
- [19] 宋慧波,安红亮,刘顺喜,等. 沁水盆地武乡南煤层气赋存主控地质因素及富集区预测[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3974-3987.
SONG Huibo, AN Hongliang, LIU Shunxi, et al. Controlling geological factors and coalbed methane enrichment areas in Southern Wuxiang Block, Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3974-3987.
- [20] 屈晓荣. 榆社—武乡区块煤系气叠置成藏机理与成藏模式[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
QU Xiaorong. Study on the accumulation mechanism and accumulation mode of the coal measure gases in Yushu-Wuxiang block[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [21] 朱传杰,马聪,周靖轩,等. 动静载荷耦合作用下复合煤岩体的力学特性及破坏特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S02): 817-829.
ZHU Chuanjie, MA Cong, ZHOU Jingxuan, et al. Mechanical properties and failure characteristics of composite coal and rock mass under dynamic and static loading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S02): 817-829.
- [22] RIABOKON E, POPLYGIN V, TURBAKOV M, et al. Nonlinear Young's modulus of new red sandstone: Experimental studies[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021, 34(6): 989-999.
- [23] 李伟,申建,李超,等. 沁水盆地榆社—武乡区块深部煤层气赋存条件及开发甜点预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(4): 9-19.
LI Wei, SHEN Jian, LI Chao, et al. Occurrence conditions and development sweet spots prediction of deep coalbed methane in Yushu-Wuxiang block of Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 9-19.
- [24] 宗兆云,印兴耀,张峰,等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3786-3794.
ZONG Zhaoyun, YIN Xingyao, ZHANG Feng, et al. Reflection coefficient equation and pre-stack seismic inversion with Young's modulus and Poisson ratio[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3786-3794.
- [25] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729-1740.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729-1740.
- [26] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等. 基于ABAQUS平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1512-1520.
GONG Diguang, QU Zhanqing, LI Jianxiong, et al. Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1512-1520.