

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.263

# 单轴荷载下含层理页岩损伤破坏过程及破坏模式研究

陈美玲<sup>1a</sup>, 郭红光<sup>2</sup>, 董治<sup>1b</sup>, 孟振江<sup>1c</sup>, 吴彦成<sup>1a</sup>

(1. 长安大学 a. 基建处; b. 运输工程学院; c. 科学研究院 西安 710018;

2. 中建八局西北建设有限公司, 西安 710075)

**摘要:**低渗透性是制约页岩气开采的主要因素之一,而岩体内裂隙的类型及复杂程度又是制约渗透率的关键因素,因此,加强页岩损伤破坏过程的研究对于提升页岩气开采效率意义重大。文中采用试验与数值模拟相结合的方法,深入研究单轴荷载下含层理页岩的损伤演化、裂纹发育、分形特征以及影响因素等内容。结果表明:试件加载过程中,微裂纹发育整体呈“平稳上升—基本稳定—快速上升”变化趋势;微裂纹发育阶段,0°和90°层理角度下,以拉伸裂纹发育为主,其占比依次为94.7%和96%;30°和60°层理角度下,以剪切裂纹发育为主,占比依次为65%和86.9%。试件宏观破坏裂纹具有明显的分形特征,0°、30°、60°和90°层理角度下,宏观裂纹的分形维数依次为4.25、3.44、2.06和3.60,说明当荷载与层理方向相互垂直时,更易形成复杂裂纹。损伤发育规律受层理的影响,0°和90°层理角度下,损伤集中于基质内发育;30°和60°层理角度下,损伤则集中于层理处发育。此外,损伤受岩石的非均质性和各向异性的影响,随着弹性模量方差的增加,试件的均质性减弱,同等荷载下的损伤范围增强,而随着层理刚度的增加,试件各向异性减弱,同等荷载下的损伤范围增强。

**关键词:**层状页岩;裂纹演化;破坏模式;分形特征;损伤过程

中图分类号: TE377

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)08-152-15

## Damage process and failure mode of stratified shale under uniaxial load

CHEN Meiling<sup>1a</sup>, GUO Hongguang<sup>2</sup>, DONG Zhi<sup>1b</sup>, MENG Zhenjiang<sup>1c</sup>, WU Yancheng<sup>1a</sup>

(1a. Capital Construction Division; 1b. College of Transportation Engineering; 1c. Institute of Science,

Chang'an University, Xi'an 710018, P. R. China; 2. Northwest Construction Limited Company of China

Construction Eighth Engineering Division, Xi'an 710075, P. R. China)

**Abstract:** Low permeability is one of the main factors restricting shale gas exploitation, and the type and complexity of fractures in rock mass are key factors affecting permeability. Therefore, strengthening the study of shale damage and failure process is of great significance for improving the efficiency of shale gas exploitation. In this study, based on a combination of experimental methods and numerical simulations, the damage evolution, crack development, fractal characteristics, and influencing factors of stratified shale under uniaxial load are deeply investigated. The results show that the development of micro-cracks follows a trend of “steady rise - basically stable - rapid rise” during the loading of specimens. In terms of the stages of micro-crack development, tensile cracks dominate at 0° and 90° bedding angles with proportions of 94.7% and 96%, respectively, while shear

收稿日期: 2024-02-26 网络出版日期: 2024-05-10

作者简介: 陈美玲(1991—),女,硕士研究生,主要从事土木工程方向的研究,(E-mail)cmling2023@163.com。

通信作者: 董治(1985—),女,博士,副教授,主要从事交通运输规划与管理方向的研究,(E-mail)dongzhi@163.com。

cracks dominate at 30° and 60° bedding angles with proportions of 65% and 86.9%, respectively. The macroscopic failure cracks exhibit obvious fractal characteristics, with fractal dimensions of 4.25, 3.44, 2.06 and 3.60 at bedding angles of 0°, 30°, 60° and 90°, indicating that complex cracks are more likely to form when the load is perpendicular to the bedding direction. The law of damage development is affected by bedding orientation. Damage is concentrated in the matrix at 0° and 90° bedding angles and in the bedding at 30° and 60° bedding angles. In addition, damage is affected by the heterogeneity and anisotropy of the rock. For example, with an increase in the variance of the elastic modulus, the homogeneity of the specimen decreases, and the damage range under the same load increases. Conversely, with an increase in bedding stiffness, the anisotropy of the specimen decreases, and the damage range under the same load increases.

**Keywords:** bedded shale; crack evolution; failure mode; fractal characteristics; damage process

伴随长水平井技术<sup>[1]</sup>、水力压裂技术<sup>[2]</sup>以及裂缝支撑技术<sup>[3]</sup>的发展,页岩气工业化开采逐渐成为了可能<sup>[4]</sup>。而页岩的渗透率作为影响页岩气开采效率的关键因素一直是学者们的重点关注对象,页岩的基质具有低渗透性<sup>[5]</sup>,其内部的裂隙才是渗流的主要通道<sup>[6]</sup>,并且在渗透率贡献方面,拉伸裂纹和剪切裂纹具有显著的差异<sup>[7]</sup>。此外,页岩内部层理的存在,使其力学特性表现出明显的各向异性<sup>[8]</sup>。因此,加强外在荷载下含层理页岩的损伤演化、裂纹演化以及破坏模式等方面的研究,对于深入理解页岩内部渗流通道演化规律以及提升页岩气开采效率均有重要的意义。

页岩作为一种沉积岩,内部层理广泛发育。针对页岩的层理效应,国内外学者基于试验<sup>[9-17]</sup>及数值模拟<sup>[18-20]</sup>对其在压缩<sup>[9-12]</sup>、拉伸<sup>[13-15]</sup>、剪切<sup>[9]</sup>、蠕变<sup>[16]</sup>以及疲劳<sup>[17]</sup>等荷载下的力学特性进行了大量的研究,结果表明,含层理页岩的变形及力学特性均表现出极强的各向异性。

外在荷载下岩石内部有大量微裂纹发育。作为一种无损监测工具,声发射技术已被广泛应用于岩石的损伤监测。蒋翔等<sup>[21]</sup>研究表明,岩石类材料内部断裂破坏与声发射信号之间存在一定的函数关系,利用声发射技术可逆向认识岩石材料的断裂破坏;Wang等<sup>[22]</sup>基于声发射参数获取了表征岩石破坏过程中微裂纹与宏观裂纹比值的表征参数 $b$ 值,而 $b$ 值的大小可在一定程度上评价岩石的损伤程度;龚鹁等<sup>[23]</sup>则基于声发射 $b$ 值成功预测了蠕变荷载下红砂岩破坏;此外,Ohno等<sup>[24]</sup>基于声发射参数提出了参数分析法和矩张量分析法,这2种方法可用于材料内部裂纹类型的甄别;在此基础上,Noorsuhada等<sup>[25]</sup>基于矩张量分析法对疲劳荷载下预应力钢筋内部的微裂纹发育模式进行了研究;而Wang等<sup>[26]</sup>则基于参数分析法对循环荷载下页岩内部的裂纹发育模型进行了分析,表明平行层理荷载下页岩内部以拉伸裂纹发育为主,垂直层理荷载下页岩内部以剪切裂纹发育为主。

此外,学者们还对荷载下页岩的破坏模式及破坏机理进行了探讨。腾俊洋等<sup>[27]</sup>、Chen等<sup>[28]</sup>研究了单轴荷载下层状页岩的损伤特征,表明层理对页岩损伤作用的本质是沿层理分布的原生微裂纹群的软化作用;申海萌等<sup>[29]</sup>研究表明岩石内部的微裂纹在损伤应力前无明显的方向性和区域性,而在损伤应力后则出现明显的集聚和贯通的现象;侯振坤等<sup>[30]</sup>基于水力压裂过程中裂隙网络的形成过程,指出水力裂缝在遇到弱层理面时会发生止裂、分叉、穿过和转向等现象,进而提出了弱结构面是复杂裂隙网络形成基础的结论;Rybacki等<sup>[31]</sup>研究表明页岩内部的矿物成分、孔隙率、有机质成熟度以及围压、温度、应变率等均是影响其力学性质的因素;Bourne等<sup>[32]</sup>对软硬互层型岩石内部的应力状态进行了分析,指出软硬岩层交界处具有应力集中的现象,并且受荷载类型以及层理角度的影响;Amaan等<sup>[33]</sup>则表示软硬互层岩体内,软弱岩层更易形成拉伸裂纹,而坚硬岩层则更易形成剪切裂纹。

综上所述,现有研究大多集中于对页岩各向异性、损伤演化以及破坏机理等方面,而对于层理影响下页岩破坏过程中的细观裂纹划分、宏观裂纹的定量表征以及损伤对影响因素的响应规律等方面尚缺乏深入、系统性的研究。基于此,对不同层理角度下的页岩,相继开展单轴压缩试验、声发射测试试验、CT扫描试验以及数值

模拟试验,以期揭示单轴荷载下含层理页岩的细观裂纹演化、宏观破坏模式以及损伤影响因素等。

## 1 试验方案

所用试件取自重庆市南川区,隶属龙马溪组页岩,其内部层理发育。将现场取回岩块带至试验室,依次按层理与试件轴向方向为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 的方向依次钻取岩芯(见图1),后经切割、打磨等工序将其加工为 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 标准圆柱形试件备用。加工后的标准试件如图2所示。

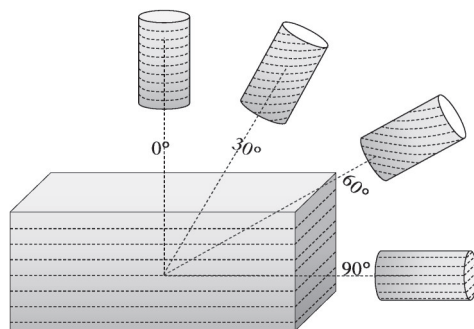


图1 岩芯钻取方向示意图

Fig. 1 The direction of drilling

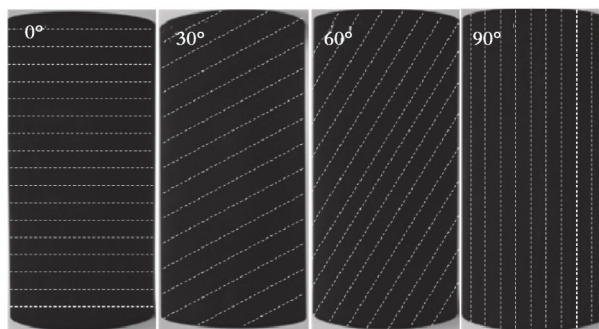


图2 加工后的页岩试件

Fig. 2 Processed shale specimen

试验由力学测试试验、声发射测试试验以及CT扫描试验共同构成。利用美产MTS815岩石力学测试系统对试件进行单轴压缩试验,采用位移控制的加载方式,加载速率为 $0.05\text{ mm/s}$ 。在此过程中,利用美产PCI-2声发射仪采集试件内部产生的声发射信号。为确保数据的可靠性,采用2个独立的通道进行单独监测,声发射阈值设为 $36\text{ dB}$ ,采样频率设为 $1\text{ MHz}$ ,如图3所示。此外,利用煤岩热-流-固耦合CT试验系统对破坏后的试件进行CT扫描,以获取试件内部的破坏模式,如图4所示。

MTS815岩石力学测试系统最大轴向荷载 $2\ 800\text{ kN}$ 、最大轴向变形 $10\text{ mm}$ 、精度 $\pm 0.5\%$ ;PCI-2声发射仪频率范围 $10\text{ kHz}\sim 2.1\text{ MHz}$ 、高速处理速度 $20\ 000\text{ hits/s}$ 、触发器处理能力 $150\text{ Mflops}$ 、最低噪音阈值 $18\text{ dB}$ 、峰值定义时间 $35\ \mu\text{s}$ 、撞击定义时间 $150\ \mu\text{s}$ 、撞击闭锁时间 $300\ \mu\text{s}$ ;CT测试系统扫描长度 $1\ 530\text{ mm}$ 、厚度 $0.6\sim 19.2\text{ mm}$ 、最大扫描时间 $100\text{ s}$ 。

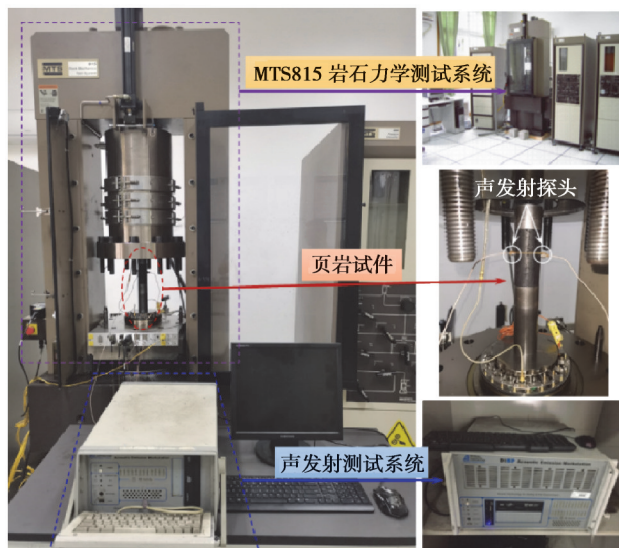


图3 力学及声发射采集试验

Fig. 3 Mechanical and acoustic emission test





图 4 CT扫描试验

Fig. 4 CT scanning test

## 2 试验结果分析

### 2.1 宏观力学参数分析

单轴荷载下含层理页岩试件的应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知,单轴压缩下试件主要表现为脆性跌落破坏,且峰值强度前的应力-应变曲线大致可被划分为压密阶段、弹性变形阶段以及微裂纹发育阶段。相较其他层理角度而言,0°层理下,试件有更强的可压缩性,主要原因在于微裂纹在 0°层理试件的内部主要沿荷载垂直方向展布,在相同应力条件下,沿荷载方向变形量更大。随层理角度的增加,试件峰值前的塑性变形量逐渐增加,主要原因在于随试件内部层理角度的增加,微裂纹轴线方向逐渐由平行荷载方向向垂直荷载方向转化,而垂直荷载方向下的微裂纹更易发生起裂和扩展,进而表现为更强的塑性变形。

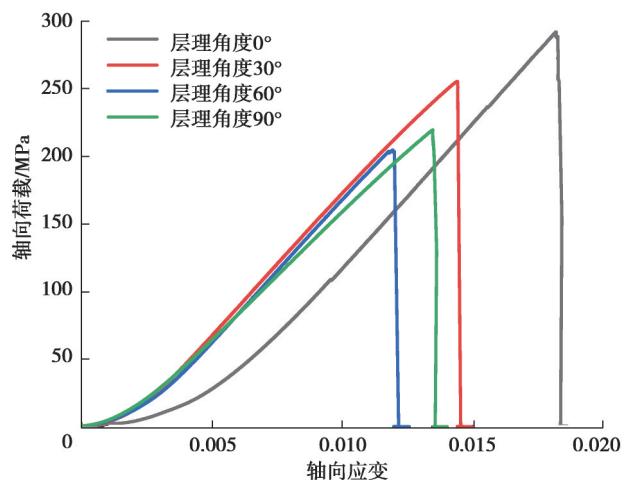


图 5 页岩应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of shale

单轴荷载作用下,页岩试件单轴抗压强度随层理角度的变化规律如图 6 所示。由图 6 可知,层理角度 0°、30°、60°、90°条件下的单轴抗压强度分别为 291.95、255.22、204.65、219.34 MPa;层理角度由 0°增至 30°时,单轴抗压强度下降了 36.73 MPa,降幅为 14.39%;层理角度由 30°增至 60°时,单轴抗压强度下降了 50.57 MPa,降幅为 24.71%;层理角度由 60°增至 90°时,单轴抗压强度增加了 14.69 MPa,增幅为 6.69%。综上可知,含层理页岩单轴抗压强度的层理效应明显,即随层理角度的增加,单轴抗压强度呈现“先减后增”的变化趋势;0°层理角度下,单轴抗压强度最大,60°层理角度下,单轴抗拉强度最小;当层理角度由 30°变为 60°时,单轴抗压强度的变化幅值最为显著。

单轴荷载作用下,页岩试件弹性模量随层理角度的变化规律如图 7 所示。由图 7 可知,层理角度 0°、30°、60°、90°下的弹性模量分别为 21.52、21.36、21.25、19.06 GPa;层理角度由 0°上升为 30°时,弹性模量下降了 0.16 GPa,降幅为 0.75%;层理角度由 30°上升为 60°时,弹性模量下降了 0.11 GPa,降幅为 5.18%;层理角度由 60°上升为 90°时,弹性模量下降了 2.19 GPa,降幅为 11.49%。综上可知,含层理页岩弹性模量的层理效应明显,即随着层理角度增加,弹性模量整体呈逐渐下降的趋势;0°层理条件下,弹性模量最大,90°层理条件下,弹性模量最小;当层理角度由 60°变为 90°时,弹性模量变化幅值最大。

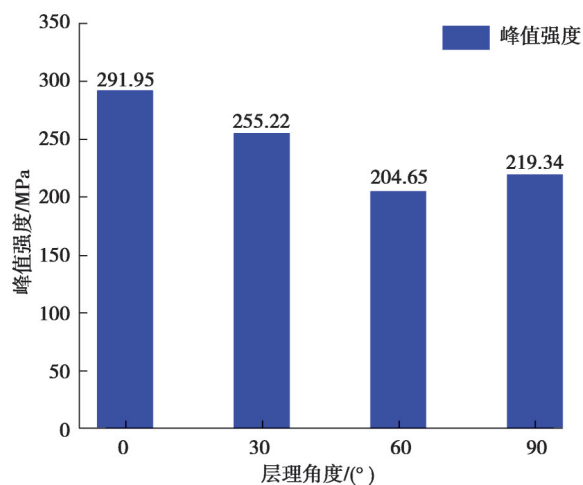


图6 单轴抗压强度-层理角度关系图

Fig. 6 Relationship between uniaxial compressive strength and bedding angle

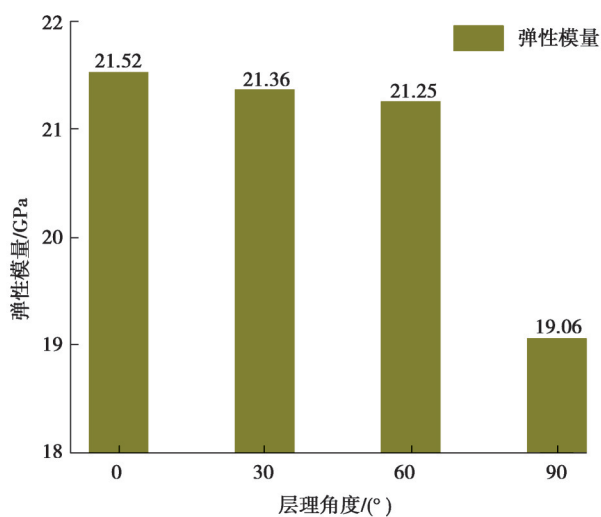


图7 弹性模量-层理角度关系图

Fig. 7 Relationship between elastic modulus and bedding angle

## 2.2 细观裂纹演化过程

单轴荷载下,不同层理角度页岩试件的振铃计数随轴向应变的演化规律如图8所示。由图8可知,单轴压缩过程中,试件内部的声发射集中于孔裂隙压密阶段以及微裂纹发育阶段发生,而弹性变形阶段则相对较少。孔裂隙压密阶段,声发射前期较为活跃;微裂隙发育阶段,声发射则后期较为活跃,而弹性变形阶段,声发射活动的分布则较为均匀;就弹性变形阶段而言,相较0°和90°层理页岩试件,30°和60°层理下试件内部的声发射活动则较为活跃;整体而言,随着轴向应变的增加,试件内部的声发射活动大致呈“平稳上升—基本稳定—快速上升”的变化趋势,其中,平稳上升对应于试件孔裂隙压密阶段,声发射活动主要来自于试件内部的微孔隙和微裂隙的压密作用,而后期的快速上升则对应于试件破坏前的微裂纹发育阶段,声发射活动主要来自于试件内部微裂纹的起裂、扩展与贯通作用。层理角度0°、30°、60°、90°条件下的累积振铃计数分别为26 522、22 594、22 054、25 443,即单轴压缩过程中,含层理页岩内部的声发射活动剧烈程度由强到弱依次为0°>90°>30°>60°。

声发射波形及特征参数如图9所示。综合声发射相关理论<sup>[34]</sup>及图9可知,材料内部的一次局部变形称之为一个声发射事件,前置放大器设置的高于背景噪音门阈值的电压称之为阈,一个声发射事件中超过阈值的震荡次数为振铃计数,声发射信号第一次穿过阈至最终降至阈以下所经历的时间为持续时间,信号波形的最大幅度为最大振幅,信号第一次越过阈至最大振幅所经历的时间间隔为上升时间。

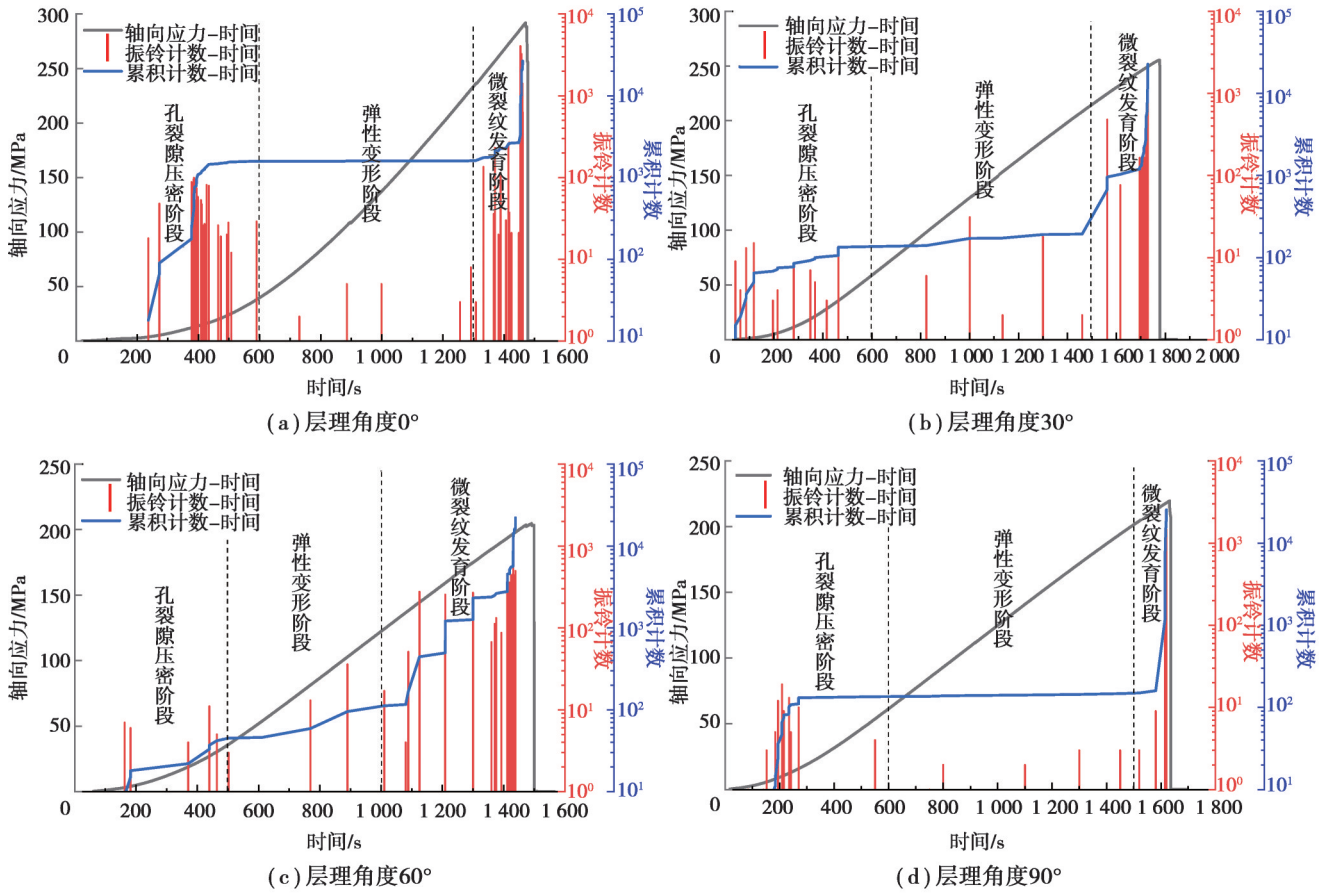


图 8 试件应力-应变-振铃计数关系图

Fig. 8 Stress-strain-acoustic emission counting relation

相关研究表明<sup>[24-26]</sup>,岩石内部微裂纹产生过程中,拉伸裂纹具有释放能量高、持续时间短的特征,剪切裂纹具有释放能量低、持续时间长的特征。为区分岩石类材料内部产生裂纹的类型,参数RA和参数AF被定义如下,AF为“上升时间”与“最大幅值”的比值,RA为“振铃计数”与“持续时间”的比值。综上可知,高AF值、低RA值的声发射事件被认为由剪切裂纹产生,低AF值,高RA值的声发射事件被认为由拉伸裂纹产生。如图10所示,通过在RA-AF坐标系中定义一条 $AF=RA/k$ 的曲线,可将试件内部拉伸裂纹与剪切裂纹更为直观的分开,Wang等<sup>[26]</sup>表示对于岩石类材料而言, $k=1/200$ 的取值是合理的。

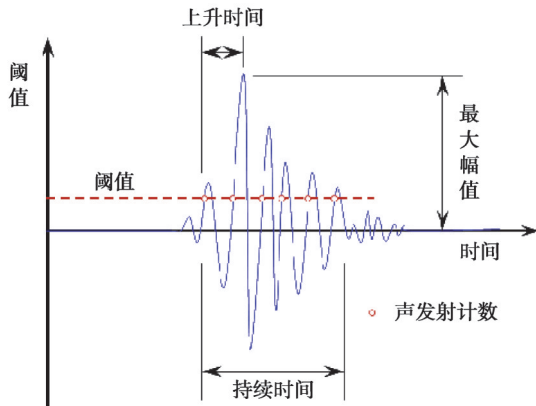


图 9 声发射特征参数示意图

Fig. 9 Schematic diagram of acoustic emission characteristic parameters

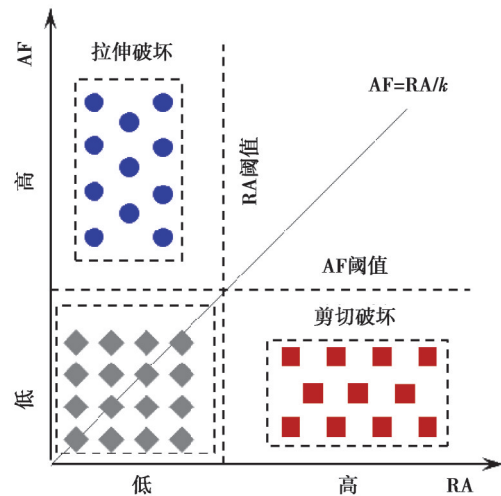


图 10 裂纹类型划分示意图

Fig. 10 Crack type division

单轴荷载下,不同层理角度的页岩试件,在不同的变形阶段,内部的声发射特征参数AF和RA值的分布规律如图11所示。由图11可知,单轴荷载下,在无论何种层理角度的孔隙压密阶段以及弹性变形阶段,页岩试件内部的声发射特征参数AF和RA的值均处于较低水平,而在微裂纹发育阶段,声发射特征参数AF和RA的值则均有显著的提升;此外,0°和90°层理角度下的声发射特征参数AF与RA的比值要明显小于30°和60°层理角度下的比值。这说明单轴荷载作用下,页岩试件内部微裂纹发育过程中,裂纹发育程度受加载阶段的影响,而其裂纹发育的类型则受层理角度的影响。

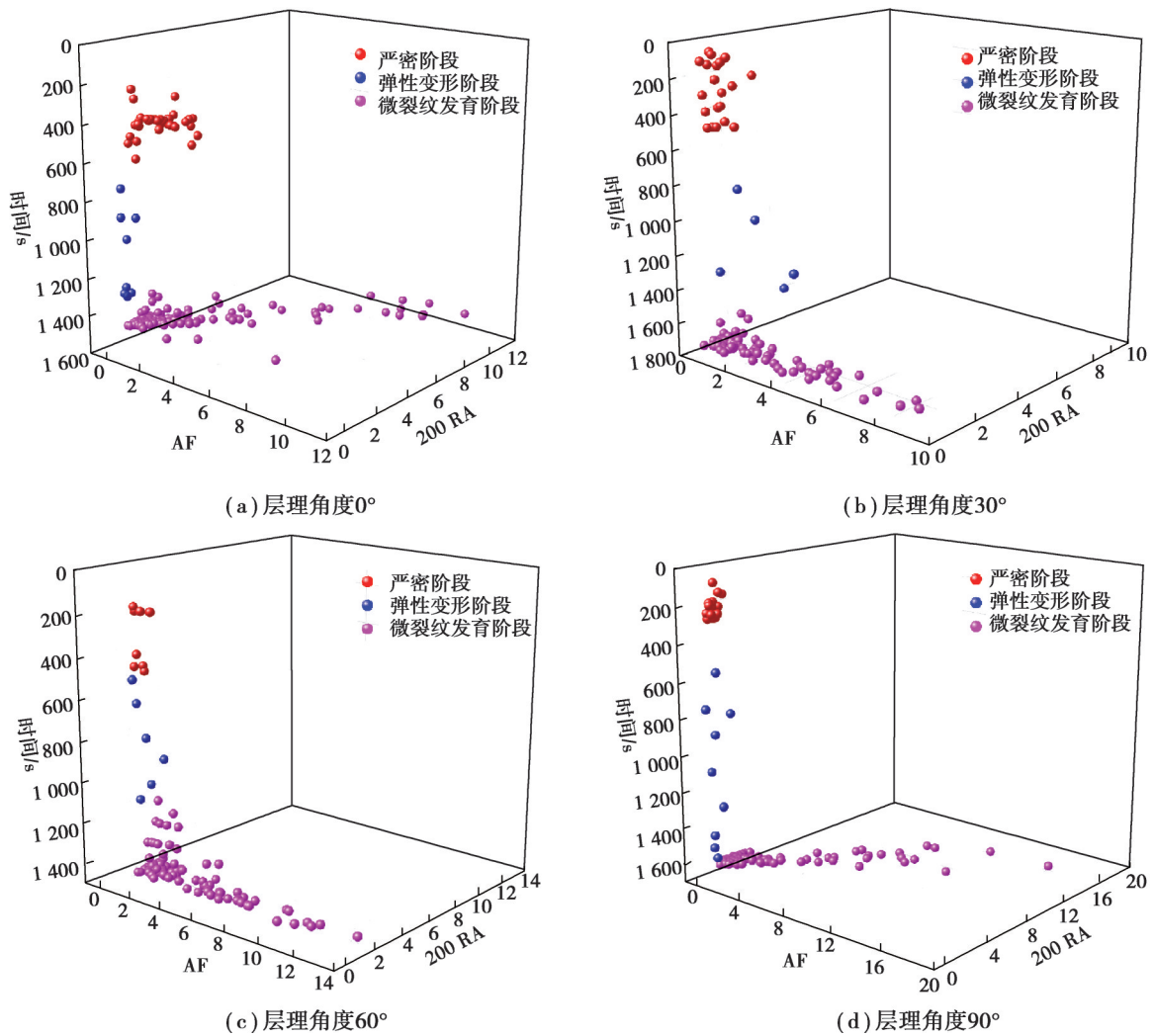


图11 AF和RA值在不同变形阶段的分布图

Fig. 11 Distribution of AF and RA at different deformation stages

表1为不同层理角度下的页岩试件在不同变形阶段的内部发育裂纹类型占比。由表1可知,0°层理角度下,在孔裂隙压密阶段、弹性变形阶段以及微裂纹发育阶段,试件内部拉伸裂纹的占比依次为88.6%、100%和94.7%,说明在0°层理角度下,试件内部微裂纹主要以拉伸裂纹发育为主;30°层理角度下,在孔裂隙压密阶段、弹性变形阶段以及微裂纹发育阶段,试件内部剪切裂纹的占比依次为85%、80%和65%,说明在30°层理角度下,试件内部微裂纹主要以剪切裂纹发育为主;60°层理角度下,在孔裂隙压密阶段、弹性变形阶段以及微裂纹发育阶段,试件内部剪切裂纹的占比依次为100%、100%和86.9%,说明在60°层理角度下,试件内部微裂纹主要以剪切裂纹发育为主;90°层理角度下,在孔裂隙压密阶段、弹性变形阶段以及微裂纹发育阶段,试件内部拉伸裂纹的占比依次为95.2%、100%和96%,说明在90°层理角度下,试件内部微裂纹主要以拉伸裂纹发育为主。此外,对比0°和90°层理角度下页岩试件内部拉伸裂纹的占比,可以知道,90°层理角度下,拉伸裂纹占比略微高于0°层理角度下的占比;对比30°和60°层理角度下页岩试件内部剪切裂纹的占比,可以知道,



60°层理角度下,剪切裂纹占比要明显高于30°层理角度下的占比。这说明单轴荷载作用下,0°和90°层理试件内部以拉伸裂纹发育为主,相较0°层理试件,90°层理试件内拉伸裂纹要略有强化;而30°和60°层理试件内部则以剪切裂纹发育为主,相较30°层理试件,60°层理试件内部剪切裂纹的发育则更为显著。

表 1 不同裂纹类型在不同变形阶段占比分布表

Table 1 Proportion distribution of different crack types in different deformation stages

层理角度	加载阶段	裂纹事件数		事件占比/%	
		拉伸裂纹	剪切裂纹	拉伸裂纹	剪切裂纹
0°	压密阶段	31	4	88.6	11.4
	弹性变形阶段	9	0	100	0
	微裂纹发育阶段	143	8	94.7	5.3
30°	压密阶段	3	17	15	85
	弹性变形阶段	1	4	20	80
	微裂纹发育阶段	36	67	35	65
60°	压密阶段	0	8	0	100
	弹性变形阶段	0	6	0	100
	微裂纹发育阶段	17	113	13.1	86.9
90°	压密阶段	20	1	95.2	4.8
	弹性变形阶段	9	0	100	0
	微裂纹发育阶段	96	4	96	4

### 2.3 宏观裂纹分形特征

试验所用CT扫描仪的分辨率可达 $10^{-1}$  mm,其CT扫描图能清晰表达裂纹在试件内部的发育程度以及分布规律;并且裂纹在试件轴线切面上的分布规律能更加充分地表达试件的破坏形式。采用破坏试件CT扫描的轴线切片来分析破坏形式,如图12所示。由图12可知,0°层理角度下,试件主要表现为沿轴向方向的拉伸破坏,且在主拉伸裂纹之间有剪切裂纹零星发育;30°层理角度下,试件主要表现为沿对角线方向的剪切破坏,且在主剪切裂纹附近沿近似垂直层理方向有大量拉伸裂纹发育;60°层理角度下,主要表现为沿层理方向的剪切破坏,且在主剪切裂纹之间有拉伸裂纹零星发育,相较30°层理试件而言,60°层理下的剪切破坏更为显著;90°层理角度下,试件主要表现为沿层理方向的拉伸破坏,且在试件中部沿近似横向方向有剪切裂纹零星发育,相较0°层理试件而言,90°层理角度下的拉伸破坏较为明显。

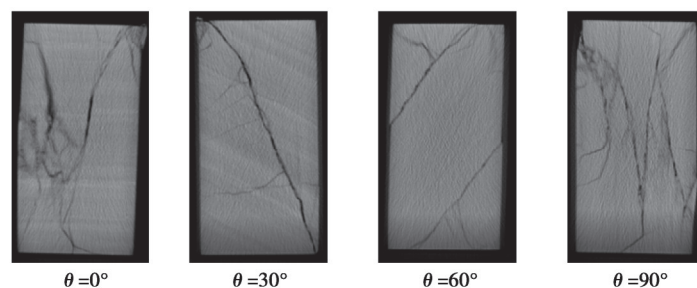


图 12 试件破坏模式图

Fig. 12 Failure mode of specimen

可见,层理角度0°、30°、60°和90°条件下,页岩试件的主要破坏模式依次表现为拉伸破坏、剪切破坏、剪切破坏和拉伸破坏,该结论与2.2节所述的不同层理角度下试件内部占绝对优势的裂纹类型相一致,说明试件的宏观破坏模式是微观裂纹类型的外在表现;此外,随着层理角度的增加,层理的主控作用逐渐增强,例如,相较30°层理试件,60°层理试件的剪切破坏更多沿层理面发生,相较0°层理试件,90°层理试件的拉伸破



坏更多沿层理面发生。

页岩试件的最终破碎程度对于页岩气开采效率而言是一项重要评价指标。试件的破碎程度可通过裂纹的空间分形维数定量描述<sup>[35-36]</sup>,分形维数越大,代表裂隙结构越复杂,该储层中的页岩气开采效率便越高。鉴于此,利用 Avizo 软件对单轴荷载下不同层理角度页岩试件最终破坏后内部的裂隙进行三维重构,重构结果如图 13 所示。

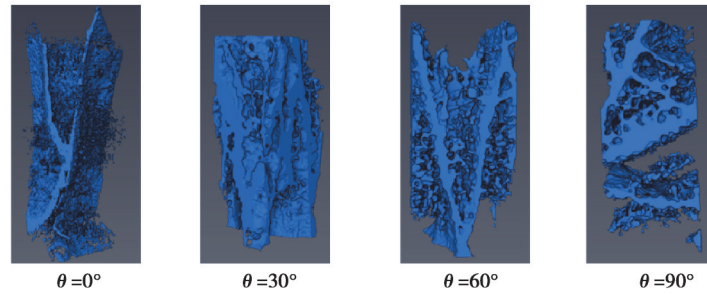


图 13 不同层理角度下破坏裂隙三维重构图

Fig. 13 Three-dimensional reconstructions of fracture at different bedding angles

此外,利用盒维数<sup>[37]</sup>对裂纹的分形维数进行定量计算。利用盒维数法计算裂纹空间分形维数时,用边长为  $\varepsilon$  的立方体盒子覆盖目标集合,  $N(\varepsilon)$  记为盒子的最小数目,定义盒维数  $D$  为

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg(1/\varepsilon)} \quad (1)$$

利用不同尺寸盒子去覆盖目标,便可得到关于  $\varepsilon - N(\varepsilon)$  的一系列数据,采用最小二乘法拟合  $\lg \varepsilon$  与  $\lg N(\varepsilon)$  的关系,其斜率即为空间裂隙的分形维数。

单轴荷载下,不同层理页岩试件在破坏的宏观裂隙的三维分形维数如图 14 所示。由图 14 可知,层理角度  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  条件下,破坏裂纹的分形维数依次为 4.25、3.44、2.06、3.60,随着层理角度的增加,破坏裂纹的分形维数呈“先减后增”的变化趋势;不同层理角度下,破坏裂纹分形维数由高到低所对应的层理角度依次为  $0^\circ > 90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$ 。

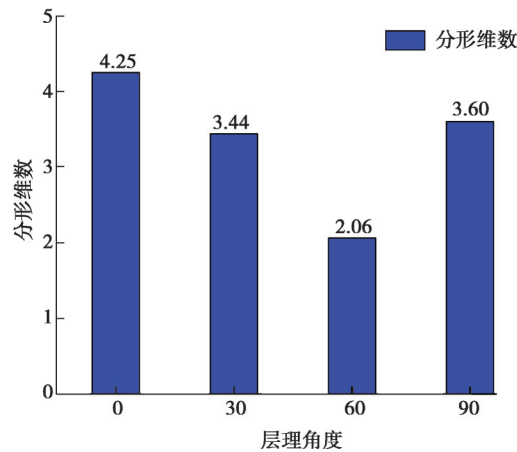


图 14 不同层理角度下破坏裂隙分形维数分布图

Fig. 14 Fractal dimension distribution of fracture at different bedding angles

#### 2.4 损伤整体发育过程

利用数值模拟技术可重现试件内部损伤的演化过程。相较于室内试验,基于数值模拟的损伤演化具有可视化以及可重复性等优势,并且,在成本控制方面也具有很大的优势,因此,拟通过 COMSOL 数值模拟软件重现单轴荷载下含层理页岩试件的损伤演化,以便更好地揭示试件内部的损伤演化规律。为方便起见,数值模拟采用 2D 模型,试件被  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  矩形代替,层理被若干平行线代替;基质采用弹脆性模型,假设

基质由微单元体构成,微单元体的弹性模量服从正态分布,根据试验结果,不同层理角度下的弹性模量的均值依次设为 21.52、21.36、21.25、19.06 GPa,而方差则取值为 0.1 倍的弹性模量的均值,微单元体的强度依次取值为 291.95、255.22、204.65、219.34 MPa;此外,层理结构则通过弹性薄层来建模,即通过刚度系数来描述其力学属性,假设层理的法向和切向刚度相等,取值为 20 GPa/m;与室内试验类似,模拟采用位移控制,顶部边界为 0.01 mm/s 的位移边界,底部边界为固定边界,左右边界为自由边界。

随着顶部位移的增加,试件内部的微单元体内的应力逐渐增加,当达到峰值强度时,微单元体发生破坏,损伤变量由 0 变为 1。不同层理角度的试件,在不同顶部荷载下,内部的损伤演化仿真结果如图 15 所示。由图 15 可知,不同层理角度下,试件内部的损伤演化过程呈现出显著的差异性。

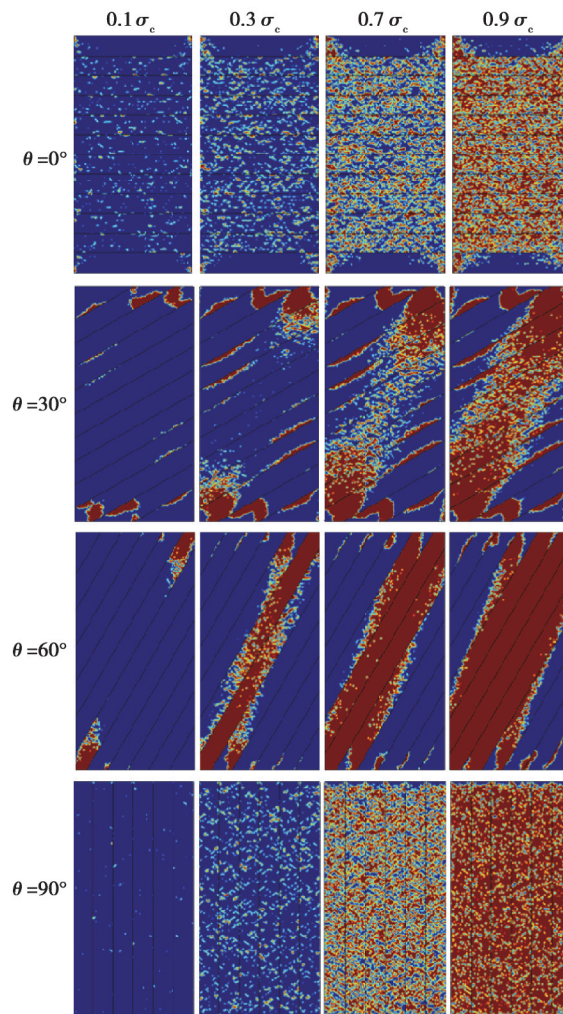


图 15 不同层理角度下试件损伤演化过程图

Fig. 15 The damage evolution process of specimens under different bedding angles

对于 0°层理试件而言,轴向荷载作用下,损伤优先在各个水平层状岩体内强度薄弱的位置优先发育,由于岩石强度在各个水平层状岩体内呈随机分布,各岩层内部的初始损伤亦呈随机分布状态。随着轴向应力的增加,各个水平层状岩体内的损伤主要来源于以下两个方面,其一,轴向应力和初始损伤诱导下的沿试件轴向方向的张拉损伤;其二,微元体达到强度极限后的随机损伤。水平层理的存在仅起到不同层理间应力传导的缓冲作用,并不改变各个岩层内部的应力状态,使得各个岩层内部的损伤具有一定的相似性;而顶部岩层和底部岩层在端部效应的作用下,岩层内部将产生应力集中效应,从而使得其内部损伤主要集中于沿端部两侧发育。综上所述,水平层状围岩,在单轴荷载作用下,除端部效应下的顶底部岩层除外,损伤均匀分布于各个水平岩层内,试件最终呈现横向膨胀破坏。

对于含 $30^\circ$ 层理的试件,层理的存在,一方面弱化了层理所在处岩体的强度,另一方面又明显改变了层间岩体的受力状态,此外,试验过程中端部效应的影响,使得单轴荷载作用下,试件内部的损伤优先沿端部层理展布方向发育;随着轴向应力的增加,试件内部的损伤主要表现为初始损伤、层理弱化以及剪切应力共同作用下的端部层理的剪切损伤,层理弱化、剪切应力作用下的中部层理的剪切损伤,以及各向异性与剪切应力作用下的沿试件对角线方向的层间岩体的剪切损伤;需要说明的是,在层间岩体内强度随机分布以及应力沿试件对角集中共同作用下,层间岩体内的损伤呈现沿试件对角线一定范围内随机分布的特征。综上所述, $30^\circ$ 层理页岩试件,在单轴荷载作用下,主要表现为沿试件对角方向的剪切破坏,并伴随层理间的剪切破坏。

类比 $30^\circ$ 层理试件,在层理弱化、层间岩体应力调整以及试件端部效应的共同作用下,单轴荷载下含 $60^\circ$ 层理的页岩试件,其内部损伤起始于试件对角线的端部;随着轴向应力的增加,试件内部损伤沿其对角线方向逐渐由端部向中部扩展、相交,继而横向涉及范围逐渐扩展;同样地,由于层间岩体强度具有随机分布的特征,使得层间岩体损伤呈现随机分布的特点,但是,相较 $30^\circ$ 层理试件而言,其应力集中程度更为显著,因此,其对角线损伤分布更为集中。综上所述, $60^\circ$ 层理页岩试件,在单轴荷载作用下,主要表现为沿试件对角线方向的剪切破坏。

对于 $90^\circ$ 层理试件,由于垂直层理的存在,可将单轴荷载下的试件视为多个壳单元的组合体,一方面起到分割试件的作用,另一方面又阻碍了不同岩层之间裂纹的交叉与融合。单轴荷载下,损伤在层间岩体内沿强度薄弱位置优先发育;与水平层状试件类似,随着轴向应力的增加,损伤主要来自于层间岩体初始损伤诱导下的张拉损伤以及微元体达到强度极限后的破断损伤;对于每个壳单元而言,由于试件的端部效应以及强度的随机分布特征,使得单个壳单元内的损伤在端部以外的部分呈随机分布的状态。综上所述,类似于 $0^\circ$ 层理页岩试件,单轴荷载下的 $90^\circ$ 层理页岩试件,亦主要表现为横向膨胀破坏。此外,相较 $0^\circ$ 层理试件而言,同等轴向荷载下, $90^\circ$ 层理试件内部的损伤要明显高于 $0^\circ$ 层理试件,其主要原因在于 $0^\circ$ 层理对轴向应力起到了明显的缓冲作用。

## 2.5 损伤影响因素分析

图16为页岩切片的微观电镜扫描图。由图16可知,页岩基质内发育有大量微孔隙和微裂隙,而微孔隙和微裂隙的发育致使页岩力学性质呈非均质的特点。图17为页岩切片的细观显微成像图,由图17可知,页岩试件内有定向层理发育,定向层理的发育致使页岩力学特性呈各向异性的特征。综上所述,含层理页岩力学特性主要表现为非均质性和各向异性,并分别由试件内部的微孔隙和微裂隙以及定向层理所决定。

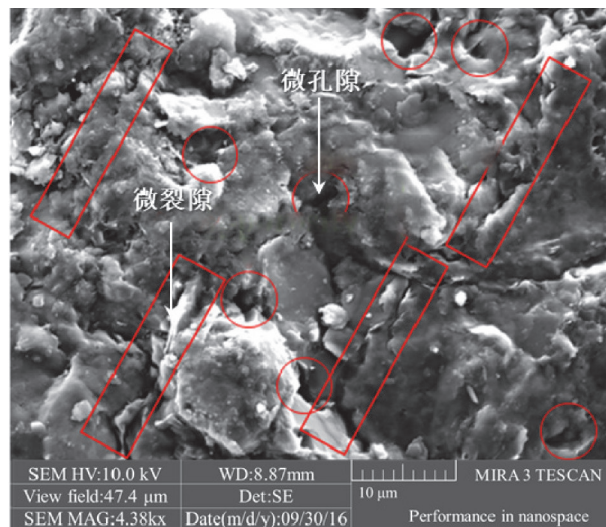


图16 页岩切片电镜扫描图

Fig. 16 Electron microscope scanning of shale sections



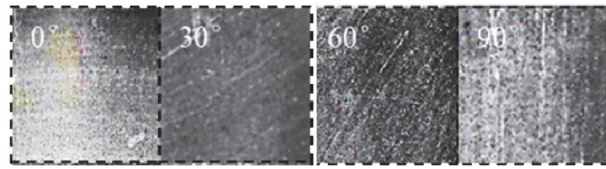


图 17 页岩切片显微照射图

Fig. 17 Microscopic irradiation of shale slices

为探究页岩试件的非均质性以及各向异性对其损伤演化规律的影响,拟对不同均质性和各向异性下,含层理页岩试件在单轴荷载下的损伤演化规律进行数值模拟。其中,试件的均质性主要通过模型中弹性模量的正态分布参数(均值和方差)进行表征,而试件各向异性则主要通过层理的刚度系数进行表征。

在试件内部层理刚度系数和弹性模量均值恒定的情况下,弹性模量在不同方差下的损伤演化规律如图 18 所示。由图 18 可知,弹性模量的方差越大,微单元体的弹性模量分布就越离散,试件的非均匀性就越强,相同荷载下,试件内部的损伤范围越大。此外,在试件内部弹性模量的均值和方差恒定情况下,不同层理刚度系数的损伤演化规律如图 19 所示。由图 19 可知,层理刚度系数越大,试件各向异性特征越弱,相同荷载下,试件内部的损伤范围越大。

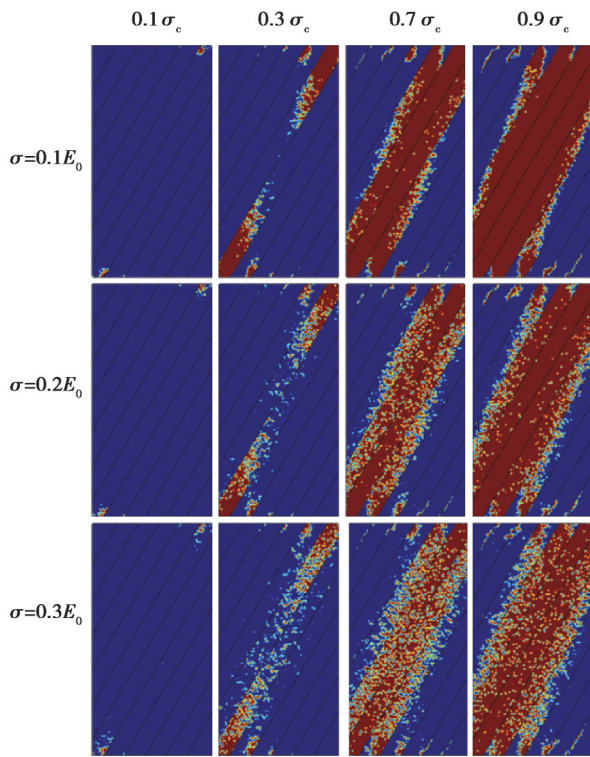


图 18 弹性模量不同方差下含层理页岩试件损伤演化规律  
Fig. 18 Damage evolution of shale specimens with bedding under different variances of elastic modulus

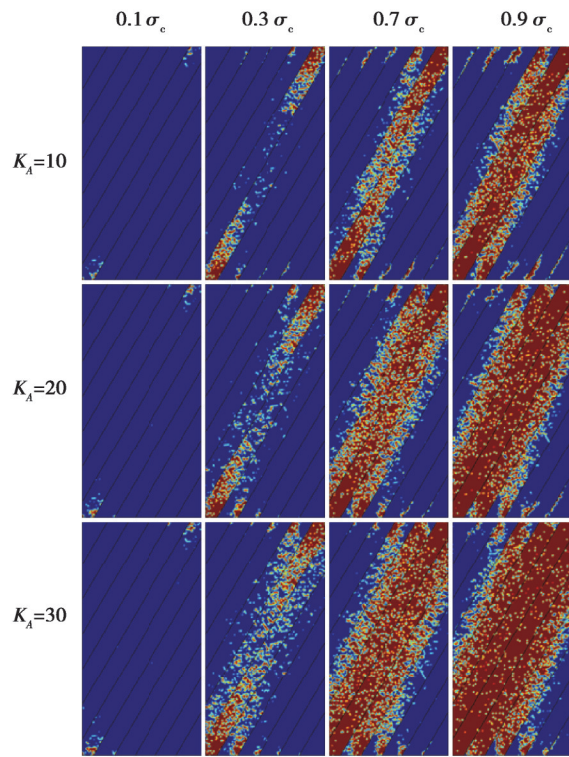


图 19 不同刚度系数下含层理页岩试件损伤演化规律  
Fig. 19 Damage evolution of shale specimens with bedding under different stiffness coefficients

### 3 结 论

1)单轴荷载下,含层理页岩的宏观力学参数呈现明显的各向异性。峰值强度随层理角度的增加呈现先减后增的变化趋势,弹性模量呈逐渐降低的变化趋势。

2)随轴向应变的增加,微裂纹的发育整体呈“平稳上升—基本稳定—快速上升”的变化趋势;裂纹类型受层理角度的影响,就微裂纹发育阶段而言,0°和90°层理下,微裂纹以拉伸裂纹发育为主,占比依次为94.7%



和96%,而30°和60°层理角度下,裂纹则以剪切裂纹发育为主,其占比为65%和86.9%。

3)宏观破坏裂纹具有明显的分形特征。0°、30°、60°和90°层理角度下,裂纹的分形维数依次为4.25、3.44、2.06和3.60,整体呈现先减后增的变化趋势,说明当外在荷载与层理角度相互垂直时,试件内部更易形成复杂的裂隙网络,进而大大提升其渗透性,更利于页岩气的开采。

4)损伤发育规律受层理角度的影响。0°和90°层理角度下,损伤集中于基质内部发育,层理主要起缓冲与隔绝应力传播的作用;30°和60°层理角度下,损伤集中于裂隙所在位置发育,层理主要起弱化岩石强度的作用。

5)损伤受非均质性和各向异性的影响。随着弹性模量方差的增加,试件的均质性减弱,同等荷载下的损伤范围增强;随着层理刚度的增加,试件各向异性减弱,同等荷载下的损伤范围增强。

## 参考文献

- [1] 胡嘉,姚猛.页岩气水平井多段压裂产能影响因素数值模拟研究[J].石油化工应用,2013,32(5):34-39.  
Hu J, Yao M. Multiple fracturing of horizontal well in shale gas productivity factors numerical simulation researching[J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(5): 34-39.(in Chinese)
- [2] 曾波,王星皓,黄浩勇,等.川南深层页岩气水平井体积压裂关键技术[J].石油钻探技术,2020,48(5):77-84.  
Zeng B, Wang X H, Huang H Y, et al. Key technology of volumetric fracturing in deep shale gas horizontal wells in southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 77-84.(in Chinese)
- [3] 梁兴,朱炬辉,石孝志,等.缝内填砂暂堵分段体积压裂技术在页岩气水平井中的应用[J].天然气工业,2017,37(1):82-89.  
Liang X, Zhu J H, Shi X Z, et al. Staged fracturing of horizontal shale gas wells with temporary plugging by sand filling[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 82-89.(in Chinese)
- [4] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.  
Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178. (in Chinese)
- [5] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].石油勘探与开发,2015,42(6):689-701.  
Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects(I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.(in Chinese)
- [6] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J].天然气地球科学,2017,28(12):1781-1796.  
Zou C N, Zhao Q, Dong D Z, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.(in Chinese)
- [7] 卢义玉,赵贵林,汤积仁,等.页岩平行/垂直层理剪切裂缝导流特性对比研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(2):298-307.  
Lu Y Y, Zhao G L, Tang J R, et al. Comparative study of shale parallel/vertical laminar shear fracture inflow characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 298-307.(in Chinese)
- [8] 张闯,任松,吴斐,等.循环荷载下含层理页岩渗透特性试验研究[J].岩土力学,2022,43(3):649-658.  
Zhang C, Ren S, Wu F, et al. Experimental study on the permeability characteristics of laminated shale under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 649-658.(in Chinese)
- [9] Jin Z F, Li W X, Jin C R, et al. Anisotropic elastic, strength, and fracture properties of Marcellus shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109: 124-137.
- [10] 腾俊洋,张宇宇,唐建新,等.单轴压缩下含层理加锚岩石力学特性研究[J].岩土力学,2017,38(7):1974-1982,1998.  
Teng J Y, Zhang Y N, Tang J X, et al. Mechanical behaviors of anchored bedding rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1974-1982, 1998.(in Chinese)
- [11] Li C B, Xie H P, Wang J. Anisotropic characteristics of crack initiation and crack damage thresholds for shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126: 104178.
- [12] 陈天宇,冯夏庭,张希巍,等.黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):

- 1772-1779.
- Chen T Y, Feng X T, Zhang X W, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1772-1779. (in Chinese)
- [13] 王辉,李勇,曹树刚,等.含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 912-926.
- Wang H, Li Y, Cao S G, et al. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 912-926. (in Chinese)
- [14] 侯鹏,高峰,杨玉贵,等.考虑层理影响页岩巴西劈裂及声发射试验研究[J].岩土力学, 2016, 37(6): 1603-1612.
- Hou P, Gao F, Yang Y G, et al. Effect of bedding plane direction on acoustic emission characteristics of shale in Brazilian tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1603-1612. (in Chinese)
- [15] 杨志鹏,何柏,谢凌志,等.基于巴西劈裂试验的页岩强度与破坏模式研究[J].岩土力学, 2015, 36(12): 3447-3455, 3464.
- Yang Z P, He B, Xie L Z, et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3447-3455, 3464. (in Chinese)
- [16] Li C B, Bažant Z P, Xie H P, et al. Anisotropic microplane constitutive model for coupling creep and damage in layered geomaterials such as gas or oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104074.
- [17] Li C B, Gao C, Xie H P, et al. Experimental investigation of anisotropic fatigue characteristics of shale under uniaxial cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: 104314.
- [18] Park B, Min K B. Bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 243-255.
- [19] Park B, Min K B, Thompson N, et al. Three-dimensional bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 120-132.
- [20] Chong Z H, Li X H, Hou P, et al. Numerical investigation of bedding plane parameters of transversely isotropic shale[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1183-1204.
- [21] 蒋翔.基于声发射的煤岩单轴压缩雪崩动力学及其应用研究[D].重庆:重庆大学, 2017.
- Jiang X. Avalanches dynamics and its application in mining materials under uniaxial compression based on acoustic emission[D].Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [22] Wang M M, Xiao L H. The  $b$ -value analysis of bedded shale under cyclic loading tests[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(4): 1291-1299.
- [23] 龚鹵,李长洪,赵奎.红砂岩短时蠕变声发射 $b$ 值特征[J].煤炭学报, 2015, 40(S1): 85-92.
- Gong C, Li C H, Zhao K. Characteristics of acoustic emission  $b$ -value of short-term creep of red sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 85-92. (in Chinese)
- [24] Ohno K, Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2339-2346.
- [25] Md Nor N, Ibrahim A, Muhamad Bunnori N, et al. Acoustic emission signal for fatigue crack classification on reinforced concrete beam[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 583-590.
- [26] Wang M M, Tan C X, Meng J, et al. Crack classification and evolution in anisotropic shale during cyclic loading tests by acoustic emission[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(4): 930-938.
- [27] 腾俊洋,唐建新,张宇宁,等.单轴压缩下层状含水页岩损伤破坏过程及特征[J].岩土力学, 2017, 38(6): 1629-1638, 1646.
- Teng J Y, Tang J X, Zhang Y N, et al. Damage process and characteristics of layered water-bearing shale under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1629-1638, 1646. (in Chinese)
- [28] Chen H R, Di Q Y, Zhang W X, et al. Effects of bedding orientation on the failure pattern and acoustic emission activity of shale under uniaxial compression[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 7(1): 20.
- [29] 申海萌,李琦,李霞颖,等.川南龙马溪组页岩不同应力条件下脆性破坏特征室内实验与数值模拟研究[J].岩土力学, 2018, 39(S2): 254-262.

- Shen H M, Li Q, Li X Y, et al. Laboratory experiment and numerical simulation study on brittle failure characteristics of shale in Longmaxi Formation in southern Sichuan under different stress conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 254-262. (in Chinese)
- [30] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 407-414.
- Hou Z K, Yang C H, Wang L, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 407-414. (in Chinese)
- [31] Rybacki E, Reinicke A, Meier T, et al. What controls the mechanical properties of shale rocks? -Part I: strength and Young's modulus[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 135: 702-722.
- [32] Bourne S J. Contrast of elastic properties between rock layers as a mechanism for the initiation and orientation of tensile failure under uniform remote compression[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B8): 2395.
- [33] Amann F, Button E A, Evans K F, et al. Experimental study of the brittle behavior of clay shale in rapid unconfined compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(4): 415-430.
- [34] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. *无损检测*, 2002, 24(2): 72-77.
- Shen G T, Geng R S, Liu S F. Parameter analysis of acoustic emission signals[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(2): 72-77. (in Chinese)
- [35] 王登科, 魏强, 魏建平, 等. 煤的裂隙结构分形特征与分形渗流模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(1): 103-109, 122.
- Wang D K, Wei Q, Wei J P, et al. Fractal characteristics of fracture structure and fractal seepage model of coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(1): 103-109, 122. (in Chinese)
- [36] 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等. 基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2659-2671.
- Zhang Y B, Xu Y D, Liu X X, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2659-2671. (in Chinese)
- [37] 付裕, 陈新, 冯中亮. 基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 568-578.
- Fu Y, Chen X, Feng Z L. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 568-578. (in Chinese)

(编辑 郑洁)