

层理性页岩岩石力学特性数值模拟

刘佰衢, 刘诗琼, 刘向君, 熊 健, 梁利喜

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:为了探究层理性页岩在不同层理条件下的力学性质,以四川盆地龙马溪组页岩为研究对象,基于岩石破裂过程分析系统RFPA^{2D}数值模拟软件,模拟了在不同层理密度、层理角度的情况下,页岩的抗压强度、弹性模量、泊松比、抗张强度和断裂韧性的变化。随着页岩层理密度的增大,抗压强度、弹性模量、抗张强度和断裂韧性均出现不同程度减小,而泊松比呈现增大趋势;在层理密度不变的条件下,随着层理角度的增加,页岩的抗压强度、弹性模量、抗张强度和断裂韧性均呈现先减小再增大的趋势,而泊松比则先增加后减小。其中,抗压强度和弹性模量在层理角度约40°时出现最小值,抗张强度在层理角度约20°时出现最小值,断裂韧性在层理角度约30°时出现最小值。研究表明:层理密度、层理角度均对页岩的破坏形式和力学性质具有显著影响,且随着层理条件的改变,页岩的抗压强度、抗张强度、弹性模量和断裂韧性变化趋势相同,泊松比变化趋势则相反。

关键词:页岩; RFPA^{2D}; 层理角度; 层理密度; 力学特性; 破坏形态

中图分类号: TE371 **文献标志码:** A

Numerical simulation on mechanical properties of stratified shale rocks

LIU Baiqu, LIU Shiqiong, LIU Xiangjun, XIONG Jian, LIANG Lixi

(National Key Laboratory of Geology and Development Engineering of Oil and Gas Reservoirs, Southwest University of Petroleum, Chengdu 610500, China)

Abstract: To explore layered shale's mechanical properties under different bedding conditions, taking the Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin as the research object, based on the numerical simulation software of analysis system of rock fracture process (RFPA^{2D}), the changes of compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, tensile strength and fracture toughness of shale under different bedding densities and bedding angles were simulated. With the increase of shale laminar density, the compressive strength, elastic modulus, tensile strength, and fracture toughness are reduced to different degrees, while Poisson's ratio shows an increasing trend. Under the condition of constant laminar density, with the increase of bedding angle, the compressive strength, elastic modulus, tensile strength, and fracture toughness of shale show a trend of decreasing and then increasing. In contrast, the Poisson's ratio increases first and then decreases. Among them, the minimum values of compressive strength and elastic modulus appeared when the bedding angle was about 40°, the minimum value of tensile strength appeared when the bedding angle was about 20°, and the minimum value of fracture toughness appeared when the bedding angle was about 30°. The results show that the bedding density and the bedding angle have a significant effect on the damage form and mechanical properties of the shale, and with the change of bedding conditions, the compressive strength, tensile strength, elastic modulus, and fracture toughness of the shale have the similar change trend, while the Poisson's ratio changes in reverse.

Key words: shale; RFPA^{2D}; bedding angle; bedding density; mechanical properties; failure pattern

引用格式: 刘佰衢, 刘诗琼, 刘向君, 等. 层理性页岩岩石力学特性数值模拟[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 410-419.

LIU Baiqu, LIU Shiqiong, LIU Xiangjun, et al. Numerical simulation on mechanical properties of stratified shale rocks [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 410-419.

近年来,我国油气资源的需求量逐年增加而常规油气供应占比逐渐降低,非常规油气资源的开发利用得到了国内外油气勘探开发工作者的广泛关注^[1]。在各类非常规油气资源当中,页岩气具有相当可观的开发潜力。据预测,2025年中国天然气年产量将达到 $2\ 270\times 10^8\text{ m}^3$ ^[2],页岩气的工业化开采将

收稿日期: 2023-02-15; 改回日期: 2023-05-04。

第一作者简介: 刘佰衢(1998—), 硕士研究生, 研究方向为二氧化碳作用后页岩岩石力学性质劣化问题。E-mail: 304907121@qq.com。

基金项目: 中国石油科技创新基金项目“基于“数据+知识”协同驱动的深层陆相页岩油储层工程甜点预测方法研究”(No.2023DQ02-0101)。

成为缓解我国能源危机,维护我国能源安全的重要举措。而页岩油气资源深埋地下,其勘探、开采等过程中都涉及对地层物理力学性质的研究,从而确定更加合理、高效、安全的技术路线和方法。因此,对地层中岩石力学特性进行研究,掌握岩石各项力学参数的规律特征就具有重要的意义。

由于页岩矿物组成定向排列形成的弱层理面,使页岩力学特性和强度特征以及加载后的破坏形式等具有明显的各向异性^[3],由此获取的页岩力学参数也将受到各向异性的影响。为了探究层理面特征对页岩力学参数的影响形式,张伯虎、解元、陈天宇、贾锁刚、李军润、解经宇^[4-9]等对层状页岩进行了单轴压缩试验或三轴压缩试验,试验结果表明,页岩在加载方向与层理角度之间的夹角为 0° 和 90° 的时候抗压强度分别取得最大值,而最小值在层理倾角为 $22.5^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 内出现,总体呈现出两边高而中间低的凹形变化规律。侯鹏、曾健新、王辉^[10-12]等对层状页岩进行了不同加载角度的巴西劈裂试验,试验结果表明,随着加载方向的变化,页岩抗张强度的变化趋势和抗压强度类似,也呈现出两边高而中间低的曲线,其最小值一般出现在 $17.5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间。马立科等^[13]对层状页岩进行了不同加载角度三点弯曲I型断裂韧性试验,发现随着预制裂缝方向与层理面夹角的增大,页岩的I型断裂韧性不断增加,页岩断裂韧性与层理角度之间呈现二次函数曲线关系。张景轩等^[14]通过数值模拟探索了不同加载角度下页岩的CCNBD断裂韧性变化趋势,发现页岩断裂韧性仍然随着加载角度增长而呈现凹形变化。

由于岩石样品内部存在孔喉、天然裂隙、弱结构面等,即便一批岩心样品取自同一位置,也无法保证其微观结构和各向异性彼此相同。因此前人在试验室条件下对加载方向与层理方向夹角变化与力学参数之间关联性的探索,无法排除试验样品本身的差异性这一无关变量。至于对层理密度与岩石力学参数之间变化规律的探索,取自不同位置的岩心样品固然层理密度可能不同,其矿物组分、孔喉裂隙、弱结构面等必将存在更大的区别,在试验室条件下更加难以实现,必须诉诸数值模拟。为排除无关变量,本文以龙马溪组页岩为研究对象,运用结合了统计损伤的本构关系与连续型有限单元法的RFPA^{2D}岩石破裂过程数值模拟软件,模拟了在不同层理密度、层理角度下特定页岩的

单轴压缩试验、三轴压缩试验、巴西劈裂试验和CCNBD断裂韧性试验,以探索其宏观力学参数的变化规律。

1 参数选取与模型验证

1.1 模拟软件原理介绍

RFPA^{2D} (Rock Failure Process Analysis) 是一种以弹性力学为应力分析工具、以弹性损伤理论及其修正后的Coulomb破坏准则为介质变形和破坏分析模块的演示破裂过程分析系统,基于弹性损伤力学的本构关系对岩石细观单元之力学性质进行描述,同时考虑岩石模型单元的非均质性。其基本思路是:将岩石介质模型离散化为由细观基元组成的数值模型,岩石介质在细观上视为各向同性的弹—脆性介质。假定离散化后的细观基元的力学性质服从某种统计分布规律(Weibull分布),由此建立细观与宏观介质力学性能的联系。基于弹性力学中的基元线弹性应力应变求解方法,分析模型的应力应变状态。然后引入基元破坏准则和损伤规律,基元相变临界点为修正的Coulomb准则。以上思路还包括了几个假定,即:假定基元的力学性质随着演化进程的发展是不可逆的、基元相变前后均为线弹性体、岩石介质的裂纹扩展是准静态过程,忽略因快速扩展而引起的惯性力。

1.2 页岩基质与层理面细观参数确定

RFPA^{2D}数值模拟软件采用了统计损伤的本构关系来描述岩石基质力学参数的非均质性和随机分布。因此在进行模型建立之前,必须确定一套具有可信度的细观参数。本文以四川盆地龙马溪组页岩岩心的岩石力学试验结果为参数标定参照,设计了如图1所示的技术流程对细观参数进行多次调整,最终将之确定。

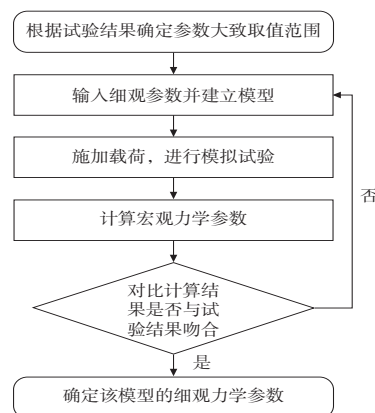


图1 参数标定技术流程

由于RFPA^{2D}软件的直观结果侧重于对岩石模型裂缝的发生与扩展的描述,孔隙度、渗透率和岩石密度三个参数对模拟结果影响很小,故本次研究的细观参数着重于弹性模量、泊松比、抗压强度及其均质度系数的标定。最终标定的模型各参数如表1所示。

表1 页岩基质与层理面细观参数

细观参数	页岩基质	层理面
弹性模量/MPa	11 000	2 750
弹性模量均质度系数	10	10
泊松比	0.3	0.4
泊松比均质度系数	100	100
抗压强度/MPa	60	18
抗压强度均质度系数	30	25
压拉比	10	9
内摩擦角/°	30	30
层理面密度/(条·mm ⁻¹)		0.2

1.3 宏观参数验证

以表1所示的参数建立标准三轴压缩试验的岩心模型,模型尺寸为50 mm×25 mm,取层理面密度为0.2条/mm,划分网格为300×150个,围压为10 MPa,使用位移控制加载,单步增量为3×10⁻⁶ m。模拟破坏图如图2所示。

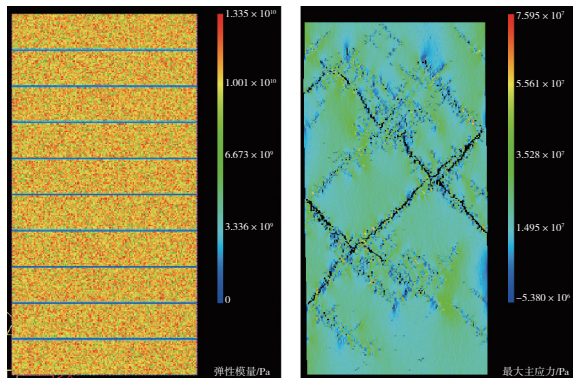


图2 模型建立与破坏图

根据模拟所得数据,绘制该三轴压缩模拟试验的应力—应变曲线(见图3)。该曲线的峰值为岩心模型抗压强度。再取该曲线中岩心弹性阶段,拟合其相应数据的斜率即可得弹性模量与泊松比。如表2所示,在10 MPa的围压下,抗压强度为70.739 MPa,弹性模量为10 042 MPa,泊松比为0.247 7。将数值模拟结果与力学试验结果进行对比,抗压强度相对误差为1.9%,弹性模量相对误差为1.9%,泊松比相对误差为2.7%,均不超过5%。因此,可以认为

该岩心模型与真实岩心的宏观力学参数相近,所设定的细观参数适用于该岩心的模拟计算。

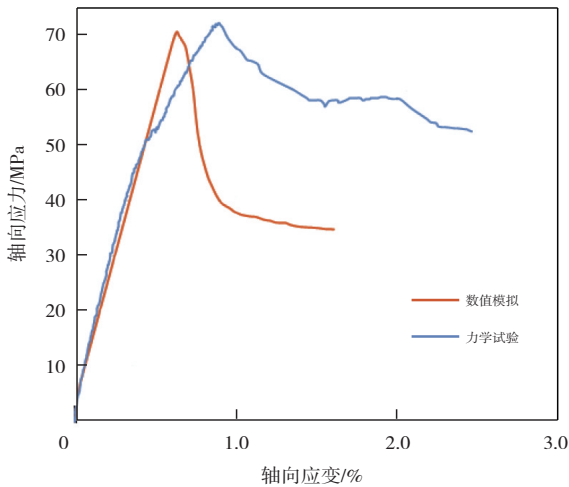


图3 应力—应变曲线

表2 数值模拟与力学试验的宏观力学参数对比

方法	围压 /MPa	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比
数值模拟	10	70.739	10 042	0.247 7
力学试验	10	72.145	10 243	0.241 3

2 层理特征对页岩模型破裂形态的影响

模拟试验包括了单轴压缩试验模拟、三轴压缩试验模拟、巴西劈裂试验模拟和CCNBD断裂韧性试验模拟。设计层理密度变化梯度为:0.2条/mm、0.4条/mm、0.6条/mm、0.8条/mm、1.0条/mm;层理角度变化范围:0~90°,每10°设置为一个变化梯度。在层理角度为90°的情况下,对不同层理密度分别进行单轴和三轴模拟试验;在层理角度为60°的情况下,对不同层理密度分别进行巴西劈裂和CCNBD断裂韧性模拟试验;在层理密度为0.2条/mm的情况下,对不同层理角度进行上述四种类型模拟试验。

采集各项模拟试验所得应力—加载步数曲线和数据,取曲线顶点为相应抗压强度,取曲线弹性阶段数据计算其弹性模量和泊松比;对于巴西劈裂模拟试验和CCNBD断裂韧性模拟试验,取其最大加载受力为相应的抗张强度和断裂韧性。

2.1 层理密度对页岩模型单轴压缩与三轴压缩试验的破裂形态影响

采用表1中所确定的细观参数建立单轴压缩试

验模型,加载方式设定为位移加载,单步加载量为 3×10^{-6} m。首先模拟了层理密度依次为0.2条/mm、0.4条/mm、0.6条/mm、0.8条/mm、1.0条/mm的情况下页岩的压缩试验。破坏图如图4所示。

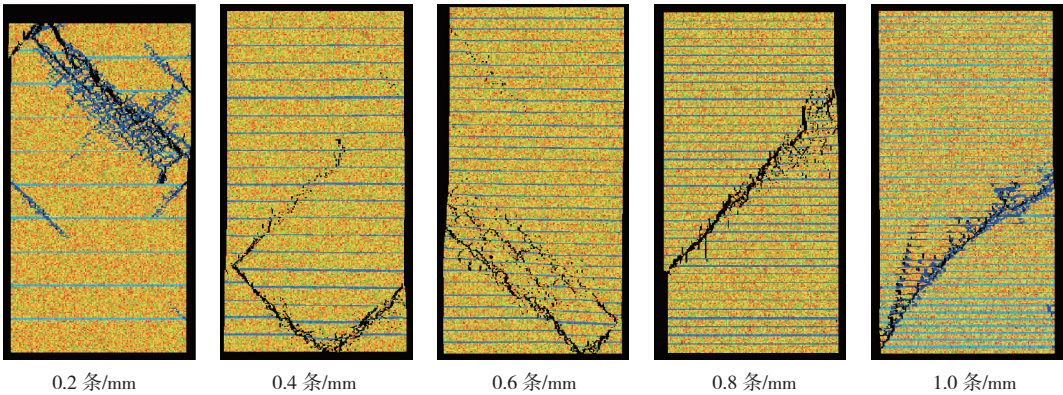


图4 层理密度变化下单轴压缩试验破坏图

从图4中可以看出,单轴压缩条件下,当层理密度较低,岩石破裂形态为贯穿页岩的剪切破坏,同时伴随着连通相邻层理的次要剪切裂缝。随着层理密度的增加,独立于主要裂缝的次要剪切裂缝逐渐减少至几乎消失,页岩呈现出被单条剪切裂缝贯

穿破坏的形态。当层理密度增加到1条/mm时,甚至出现了沿着水平层理面方向的小型裂缝。

保持以上模型和压缩条件不变,在此基础上加以10 MPa的恒定围压,进行三轴压缩模拟试验。破坏图如图5所示。

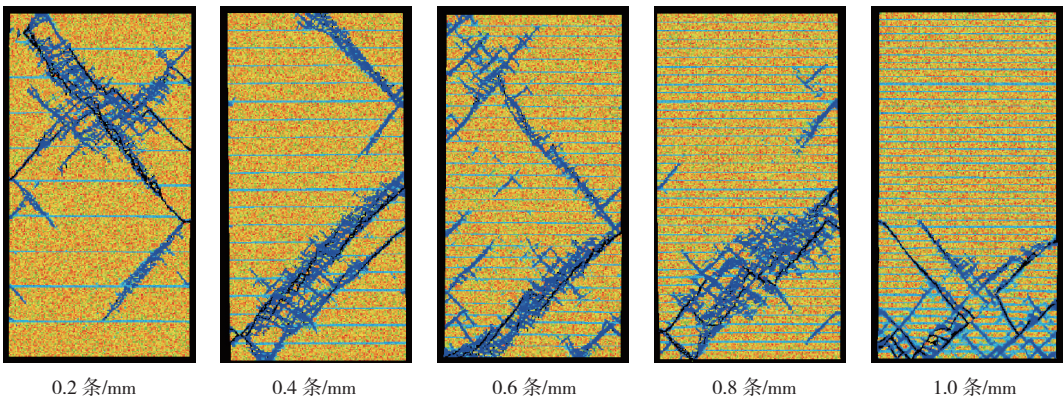


图5 层理密度变化下三轴压缩试验破坏图

从图5中可以看出,三轴压缩条件下,页岩不再呈现出被明显的单一裂缝贯穿的剪切破坏,而是出现数条主要剪切裂缝,同时伴随着诸多细小的次要剪切裂缝。在低层理密度的情况下,剪切裂缝出现的位置及分布相对均匀。而层理密度增加至0.8条/mm时,剪切裂缝主要分布在模型的下侧。继续增加层理密度至1.0条/mm,剪切裂缝完全分布在模型的下侧。由于页岩模型本身体积很小,其上部重力与加载所产生的应力相比可忽略不计。如图6所示,将层理密度为1.0条/mm条件下的三轴压缩试验进行专门考察,发现当加载步为180步时,页岩模型

的最大主应力云图尚且十分均匀,几乎没有应力集中点。加载至183步,页岩模型下侧开始出现少许有线性连通趋势的应力集中点。这些集中点在接下来的几步里迅速连通,至188步时连通起来的高应力区域应力达到峰值,其形状初步具有了裂缝形态。在第189步时,上一步的应力集中区域应力值突然下降,同时出现裂缝,说明模型单元已经破坏。从190步开始,裂缝迅速延伸扩展,页岩模型应力急剧下降,失去承载能力。从图7所示应力—加载步曲线可以看出,页岩模型的峰值应力为58.35 MPa,出现在第186步。

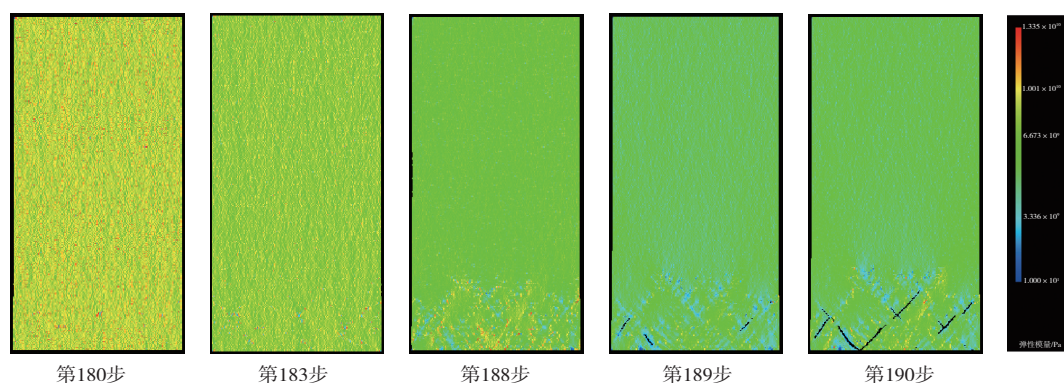


图6 层理密度1.0条/mm破坏前后最大主应力云图

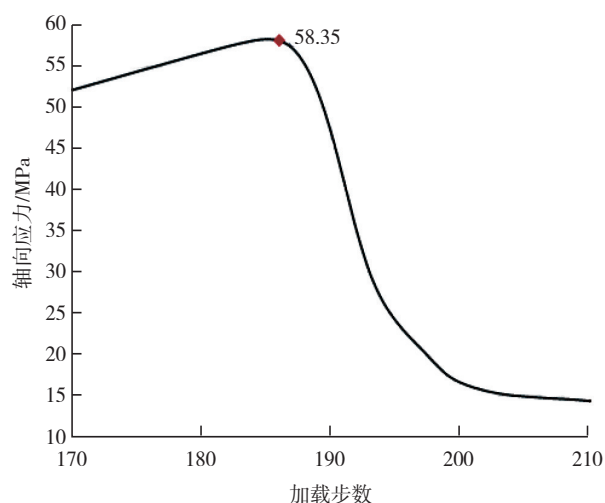


图7 第170步至第210步的应力—加载步数曲线

因此随着层理密度增加,剪切裂缝的非均匀分布现象主要是在模拟加载过程中,页岩的某一部分率先出现应力集中区,然后该区域页岩基质首先失稳破坏,形成最初的微小裂缝。由于高层理密度页岩的抗压强度较低,微小裂缝迅速扩展,很快失去承载能力,在其他区域出现裂缝之前页岩基质就被破坏,最终导致剪切裂缝非均匀分布。

2.2 层理角度对页岩模型单轴压缩与三轴压缩试验的影响

将层理密度定为0.2条/mm,当层理面与加载方向的夹角在 $0 \sim 90^\circ$ 之间变化时,以 10° 为最小角度增量,模拟层理角度变化所引起的页岩单轴压缩试验。破坏图如图8所示。

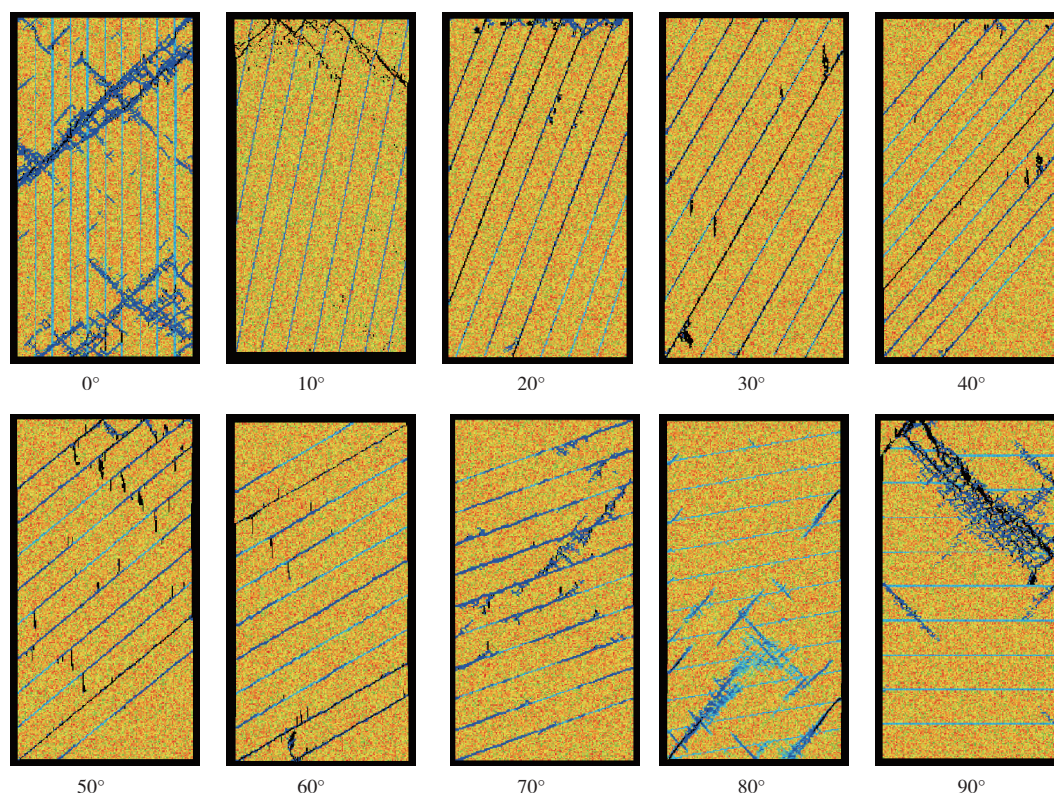


图8 层理角度变化下单轴压缩试验破坏图

从图8中可以看出,当层理角度为 0° 和 10° 时,页岩模型的主要破坏形式仍然是贯穿层理面的大裂缝剪切破坏,但在 10° 时出现了沿着层理面方向破坏的裂缝。而层理角度为 20° 时,沿层理面方向的破坏形式成为主要的破坏形式,但模型顶部仍然可见明显的剪切裂缝。可以认为,在层理角度为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间,存在着一个主要破坏形式转变的过渡。层理角度在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间变化时,沿层理面方向的破坏形式仍然是主要破坏形式,但层理面之间普遍存在一些有贯通趋势的细小裂缝。尤其是层

理角度为 50° 时,页岩模型右上侧的细小裂缝有贯通成剪切裂缝的趋势。当层理角度增加至 70° ,层理之间的细小裂缝贯通成了明显的剪切裂缝,两种破坏形式再次同时出现。最后,层理角度增加至 80° 和 90° 时,沿着层理面破坏的裂缝消失了,贯穿层理面的剪切裂缝再次成为页岩模型破坏的主要形式。

保持以上模型各项参数和加载速度不变,分别加以10 MPa的恒定围压进行三轴压缩模拟试验,破坏图如图9所示。

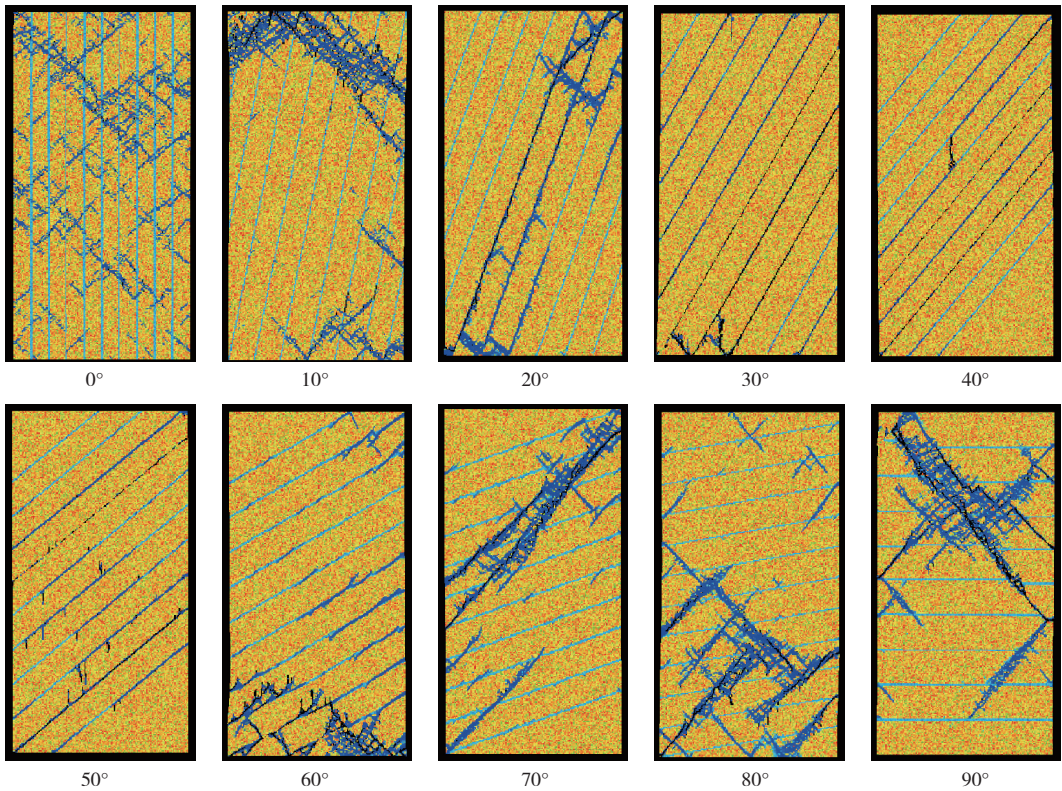


图9 层理角度变化下三轴压缩试验破坏图

从图9中可以看出,当层理角度为 0° 和 10° 时,页岩模型的主要破坏形式仍然是裂缝贯穿层理面的剪切破坏,但在 10° 时出现了少许沿着层理面方向破坏的裂缝。而层理角度为 20° 时,沿层理面方向的破坏形式成为主要的破坏形式,此外仍然存在明显的连通相邻层理的剪切裂缝。层理角度在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时,页岩模型沿着层理面破坏的形式很明显,层理面之间的剪切裂缝较不明显。层理角度为 60° 时,模型沿着层理面方向破坏的情况明显减弱,局部出现碎片式剪切破碎区域,且相邻层理之间出现了具有连通趋势的细小裂缝。这些裂缝在层理角度为

70° 时相互贯通,形成完整的、贯穿页岩模型的破坏。层理角度为 80° 和 90° 时,沿层理面方向的破坏消失殆尽,代之以“X”型剪切裂缝。但可以看出,主裂缝之外的细小裂缝,往往以层理面为起点而扩展。

2.3 层理密度对页岩模型巴西劈裂试验和CCNBD断裂韧性试验的破裂形态影响

以表1所示的参数建立岩心模型,模型半径为25 mm,层理面密度变化梯度与单轴模拟试验相同,将层理面与加载方向的角度设置为 60° ,划分网格为 200×200 个,使用位移控制加载,单步增量为 2×10^{-6} m。所得破坏形态如图10所示。

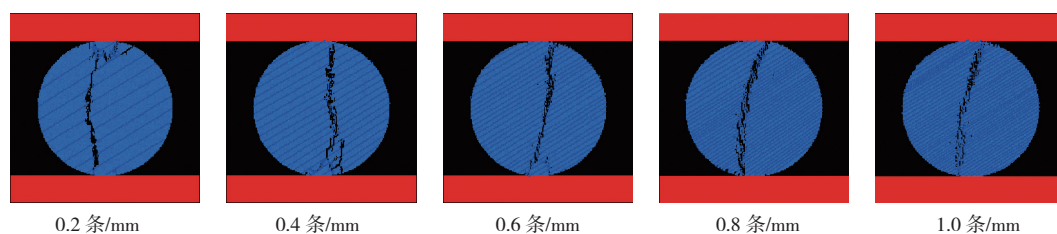


图10 层理密度变化下巴西劈裂试验破坏图

从图10中可以看出,当层理密度较低时,页岩模型与加载承压板模型的接触点附近存在着裂缝分岔的现象。这是由于模型在该区域出现了应力集中导致的张—剪混合破坏,分岔的裂缝实际上是剪切裂缝。层理密度为0.2条/mm时,该局部剪切裂缝明显沿着层理面扩展,但这种扩展形式在层理密度为0.4条/mm和0.6条/mm的情况下逐渐消失。至层理密度0.8条/mm时,剪切裂缝完全消失,页岩模

型被贯穿其中的张拉裂缝完全破坏。

保持以上模型各项参数和加载速率不变,分别在模型中央预制一条长32 mm的裂缝,以模拟CCNBD断裂韧性试验(见图11)。可以看出,就破裂形态而言,层理密度对页岩断裂韧性的影响不是很突出,在层理密度较高、页岩抗压强度较弱的情况下,预制裂缝前缘区域会在剪应力的作用下变得更容易破碎,从而导致裂缝呈树枝状分岔。

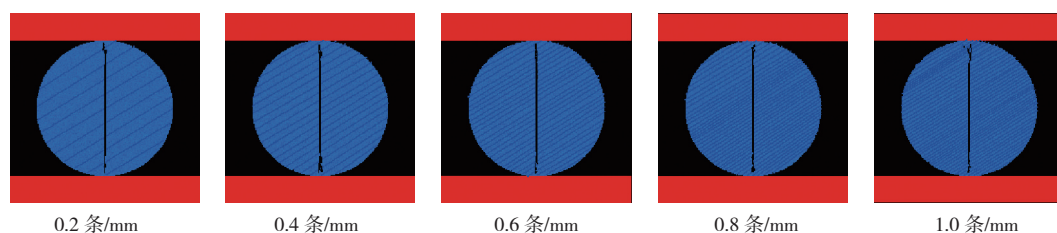


图11 层理密度变化下CCNBD断裂韧性试验破坏图

2.4 层理角度对页岩模型巴西劈裂试验和CCNBD断裂韧性试验的破裂形态影响

仍然以表1所示的参数建立岩心模型,模型各

项参数、加载方式与前述相同,但固定层理密度为0.2条/mm,设置10个层理角度。所得破坏图如图12所示。

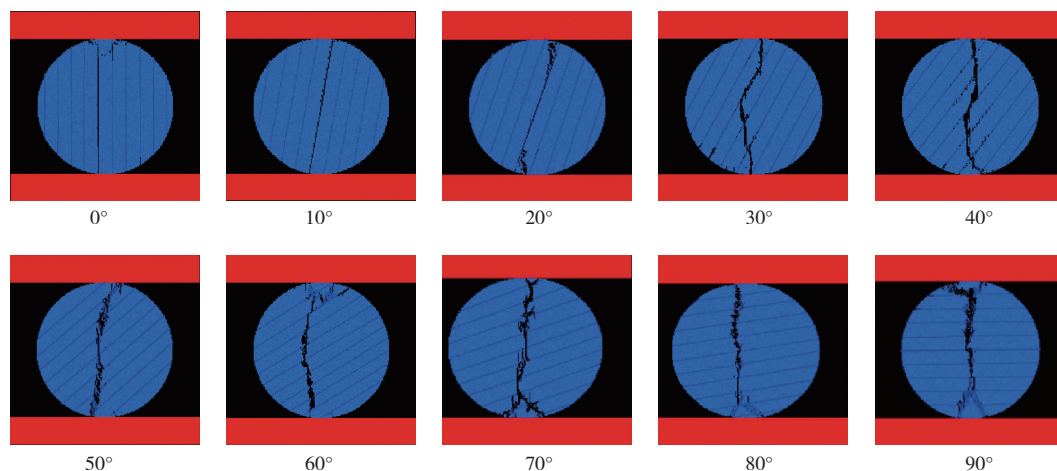


图12 层理角度变化下巴西劈裂试验破坏图

从图12中可以看出,当层理面方向与加载方向一致,即层理角度为0°时,页岩层理因其薄弱的抗

张强度而首当其冲受拉破坏,但在加载板与模型接触的区域存在细小的剪切缝,这是由于模型中间部

分的受力和破坏类似于单轴压缩。层理角度在10~30°之间变化时,页岩模型明显呈现出沿着中部层理面方向受拉破坏的现象,同时仍伴随接触区的张一剪混合破坏。层理角度达到40°时,沿层理面方向受拉破坏的现象基本消失,代之以贯穿各层理面的劈裂裂缝和接触区张一剪混合破坏。此外,在层理角度30~70°之间时,张拉裂缝或向左倾斜,或

呈现向左凸出的弧形。这种裂缝偏转现象是由层理面倾斜方向导致的。若将层理倾斜方向进行轴对称变换,则裂缝偏转亦随之变化,此处不详细说明。

保持以上模型各项参数和加载速率不变,分别在模型中央预制一条长32 mm的预制裂缝,以模拟CCNBD断裂韧性试验,其破坏形态如图13所示。

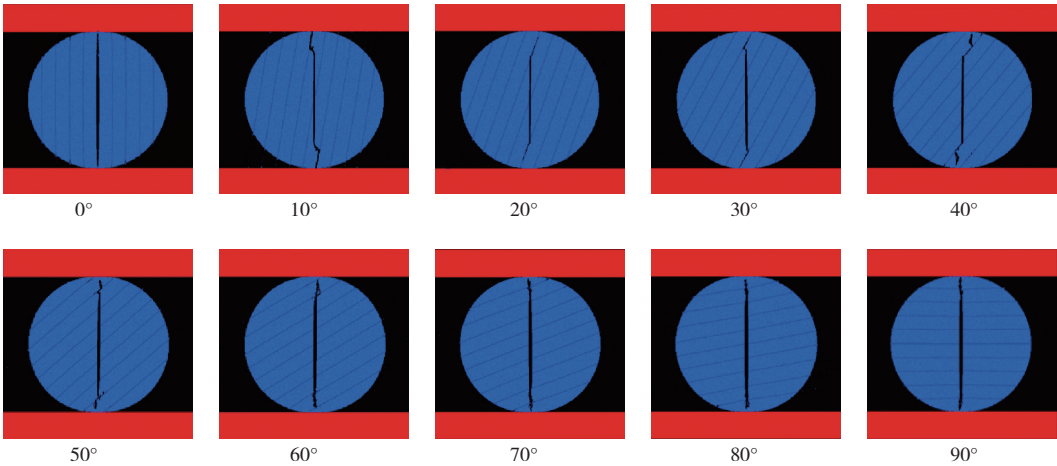


图13 层理角度变化下CCNBD断裂韧性试验破坏图

从图13中可以看出,每一个页岩模型均在预制裂缝端部开始出现宏观裂纹,但裂纹扩展之路径略有区别。层理角度为0°时,裂纹不发生转向,直接沿着最薄弱的层理面扩展延伸至边缘。当层理角度在10~30°之间时,预制裂缝扩展过程中遇到弱层理面,将沿着弱层理面发展,并不穿越之。至层理角度40°时,裂缝沿着层理面扩展一段时间后偏离了层理面方向。层理角度超过40°以后,裂缝几乎不沿着层理面发展,而直接穿过它向模型边缘开裂。

3 层理特征对页岩模型力学参数的影响

3.1 层理密度对页岩模型力学参数的影响

将前述模拟破裂图的力学参数进行拟合与整理,形成了如下趋势图(见图14)。从图中可以看出,随着层理密度的增加,页岩模型的弹性模量、抗压强度、抗张强度和断裂韧性均逐渐降低,而泊松比逐渐增大。在单轴压缩条件下,层理密度1条/mm与层理密度0.2条/mm相比,页岩模型弹性模量下降了26.1%,抗压强度下降27.9%,泊松比上升

26.1%;在三轴压缩条件下,相应变化幅度依次为-25.6%、-24.6%、+31.9%。抗张强度下降28.1%,断裂韧性下降33.9%。随着层理密度的变化,页岩模型各项参数变化趋势比较稳定,呈现出较为明显的线性变化。这是由于页岩模型中力学强度薄弱的层理面密度增大后,使得模型整体力学性质被劣化。

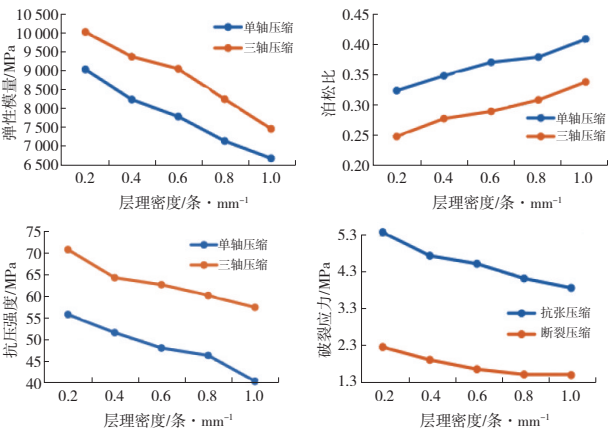


图14 层理密度变化下页岩模型各力学参数变化趋势

3.2 层理角度对页岩模型力学参数的影响

将前述模拟破裂图的力学参数进行拟合与整理,形成了如下趋势图(见图15)。

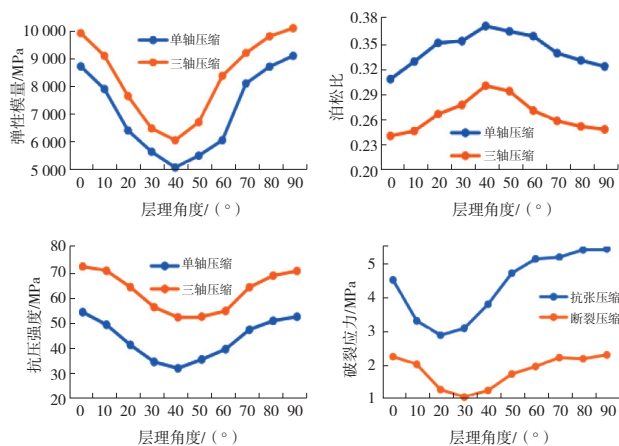


图15 层理角度变化下页岩模型各力学参数变化趋势

从图15中可以看出,页岩模型的弹性模量、抗压强度、抗张强度和断裂韧性都随着层理角度的变化而呈现出先降低再升高的凹形趋势,而泊松比则呈现出相反的凸形趋势。其中,当层理角度为 40° 时,页岩模型的抗压强度和弹性模量最低。结合图8、图9所得破裂形态图,发现在该层理角度下页岩模型沿着层理面破坏的特征最为明显,破坏图上层理面以外的次生裂缝数量最少。这可能是因为在该层理角度下,弱层理面方向与最大切应力方向夹角很小,导致层理面率先被剪切破坏。而在劈裂模拟试验中,抗张强度最小值出现在层理角度 20° ,CCNBD断裂韧性最小值出现在层理角度 30° 。与压缩试验最低强度出现在 40° 左右不同,劈裂试验模型上下边缘存在着张一剪混合破坏,或导致了最低峰值应力出现的角度不同。此外,两种劈裂试验的峰值应力在层理角度 $0\sim 20^\circ$ 之间下降很快,抗张强度下降了36.4%,断裂韧性下降了43.9%。以巴西劈裂试验模拟结果为分析对象,结合图12所得破裂形态图变化规律,低层理角度时,层理面抵抗张拉应力的能力最弱,并出现抗张强度最小值。高层理角度时,劈裂破坏图中出现了明显的裂缝分岔,即剪切破坏带。由于张一剪混合破坏模式的存在,显然高层理角度情况下页岩模型受剪切破坏的影响有所增加。此外,层理角度为 90° 时的抗张强度比 0° 时增加了20.5%,再次证明高层理角度时页岩模型抵抗剪切破坏的能力也增加了其抗张强度。

3.3 页岩模型力学参数之间的关系

为探究页岩模型各力学参数之间的关系,将以上模拟结果在图16中进行对比:

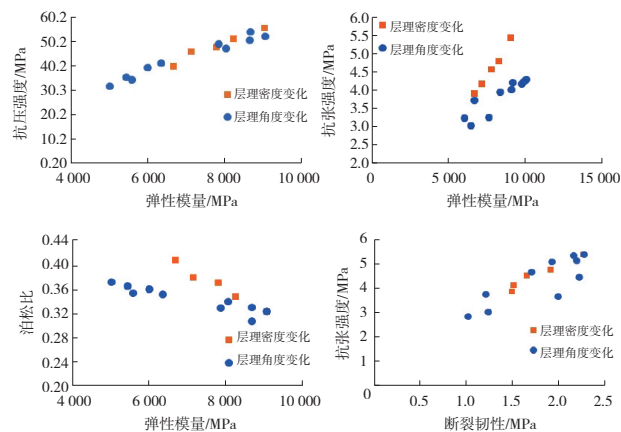


图16 页岩模型各力学参数对比

从图中可以看出:在层理角度保持不变的情况下,随着层理密度的变化,页岩模型的弹性模量与抗压强度抗张强度都呈正相关,与泊松比呈反相关;而断裂韧性与抗张强度呈正相关。

在层理密度不变的情况下,随着层理角度的变化,页岩模型的弹性模量与抗压强度呈和抗张强度呈正相关,与泊松比呈反相关;断裂韧性与抗张强度呈正相关。

将两组单一变量(层理密度或者层理角度)情况下的力学参数拟合趋势进行对比,发现两组弹性模量与抗压强度的拟合趋势较为相近;两组弹性模量与抗张强度的拟合趋势相差较大,且层理密度变化组趋势更陡;两组弹性模量与泊松比的拟合趋势相差较大,且层理密度变化组趋势更陡;两组断裂韧性与抗张强度的拟合趋势较为相近。

4 结论

(1)层理密度对页岩的破裂形式有显著的影响:层理密度越高,页岩的抗压强度、抗张强度、弹性模量和断裂韧性都将受到不同程度的劣化,泊松比会随之增加。

(2)层理角度对页岩破裂形式及力学参数也有显著影响。低层理角度和高层理角度条件下,页岩破坏形式以贯穿相邻层理面的剪切裂缝为主,页岩模型的抗压强度、抗张强度、弹性模量和断裂韧性都较高;在层理角度 $30\sim 60^\circ$ 条件下,主要裂缝沿层理面延伸扩展,层理面会成为次要裂缝的发育起点,在这个角度区间内相应的力学参数均较低。

(3)页岩模型的抗压强度、抗张强度、弹性模量和断裂韧性的变化趋势相同,而泊松比的变化趋势则与之相反。

参考文献:

- [1] 李国欣,雷征东,董伟宏,等.中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):1-11.
- [2] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.
- [3] 张永泽.鄂西渝东页岩力学性能的各向异性研究[D].绵阳:西南科技大学,2016.
- [4] 张伯虎,马浩斌,田小鹏,等.层状页岩力学参数的各向异性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):634-638.
- [5] 解元.层状页岩强度参数与剪胀角演化特征及模型研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- [6] 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.
- [7] 贾锁刚,万有余,王倩,等.页岩各向异性力学特性微观测试方法研究[J].地质力学学报,2021,27(1):10-18.
- [8] 李军润,尹彬瑞,刘俊新,等.陆相泥页岩层理脆—延转化特性的研究[J].工业建筑,2022,52(8):168-174.
- [9] 解经宇,陆洪智,陈磊,等.龙马溪组层状页岩微观非均质性 & 力学各向异性特征[J].地质科技通报,2021,40(3):67-77.
- [10] 侯鹏,高峰,杨玉贵,等.黑色页岩巴西劈裂破坏的层理效应研究及能量分析[J].岩土工程学报,2016,38(5):930-937.
- [11] 曾健新,刘俊新,张永泽.层理效应对黑色页岩抗拉强度影响及其能量分析[J].高速铁路技术,2019,10(2):38-43,59.
- [12] 王辉,李勇,曹树刚,等.基于巴西劈裂实验的层状页岩断裂特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):604-612.
- [13] 马立科,曹函,张政,等.不同层理倾角页岩 I 型裂缝断裂表现实验研究[J].石油科学通报,2019,4(4):347-353.
- [14] 张景轩,范晓,陈波,等.硬脆性页岩断裂韧性二维数值模拟研究[J].复杂油气藏,2019,12(1):73-80.

(编辑 卞 炜)