

# 层状页岩巴西劈裂破坏特征颗粒流模拟研究

黄 薇<sup>1</sup>, 闫治涛<sup>2</sup>, 孙 峰<sup>1</sup>, 赵兵兵<sup>1</sup>, 薛世峰<sup>1</sup>, 周 博<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580

2. 胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东 东营 257051)

**摘要:**页岩储层是非常规油气资源开发研究的热点之一,层理面性质对页岩的力学行为有重要影响。针对层状页岩巴西劈裂载荷下的破裂特征,采用颗粒流软件研究层理面倾角、黏结强度比值及天然裂缝等因素对层状页岩巴西劈裂试验抗拉强度及破裂模式的影响,结合颗粒细观力链及裂纹动态变化过程分析页岩细-宏观破裂演化机制。结果表明:层状页岩巴西劈裂试样呈现 3 种破坏模式:页岩基质劈裂拉伸破坏、沿层理的劈裂拉伸破坏和沿层理和页岩基质的拉伸、剪切复合型破坏;微裂纹萌生于圆盘顶部与底部加载处,峰值荷载后,微裂纹扩展贯通并出现较为密集的力链直至岩石形成宏观破坏;层理面黏结强度比值的大小影响着试样的破坏形态与峰值强度;随着层理角度的增加,抗拉强度逐渐减小;考虑天然裂缝的影响后页岩的抗拉强度更低,裂纹扩展模式更为复杂。

**关键词:**层状页岩;巴西劈裂;破坏特征;颗粒流;细-宏观演化

中图分类号:TU458

文献标志码:A

## Particle flow simulation of Brazilian splitting failure characteristics of layered shale

HUANG Wei<sup>1</sup>, YAN Zhitao<sup>2</sup>, SUN Feng<sup>1</sup>, ZHAO Bingbing<sup>1</sup>, XUE Shifeng<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>1</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum,

Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Dongsheng Jinggong Petroleum Development

Group Co. Ltd, Shengli Oil Field, Dongying, Shandong 257051, China)

**Abstract:** Shale reservoir is one of the research hotspots in the development of unconventional oil and gas resources. The properties of bedding plane have an important influence on the mechanical behavior of shale. According to the fracture characteristics of layered shale under Brazilian splitting load, the effects of bedding angle, bond strength ratio and natural fractures on the tensile strength and fracture pattern of layered shale in Brazilian splitting test were studied by adopting the particle flow code. The evolution mechanism of meso-macro fracture of shale was analyzed by combining the dynamic change process of particle microscopic force chain and crack. The results show that three types of fracture patterns are observed: Splitting tensile failure of shale matrix, splitting tensile failure along bedding, and tensile and shear composite failure along shale matrix and bedding. Microcracks initiate at the top and bottom loading points of the disk. After the peak load, microcracks propagate through and dense force chains appear until macroscopic failure occurs. The bond strength ratio of bedding plane affects the failure pattern and peak strength of specimen. With the increase of the bedding angle, the tensile strength decreases gradually. After the influence of natural fractures is taken into consideration, the tensile strength of shale becomes lower and the crack propagation becomes more complex.

**Key words:** layered shale rock; Brazilian split; failure pattern; particle flow; meso-macro evolution

收稿日期:2021-09-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509202)

作者简介:黄 薇(1997—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事岩石力学特性方面的研究.E-mail:hwupc@foxmail.com

孙 峰(1979—),男,山东荣成人,副教授,博士,主要从事油气田地下工程力学、多物理场耦合数值模拟研究,本文通信作者.E-mail:upcsfeng@upc.edu.cn

页岩油气是具有巨大开发潜力的非常规油气资源。页岩储层的致密性强,渗透率极低,难以开采<sup>[1-2]</sup>,为了实施增产,必须对其储层进行压裂改造。页岩的抗拉强度与破坏模式与压裂设计密切相关<sup>[3-4]</sup>,对页岩力学性质开展研究可以为压裂施工提供重要的依据。

由于矿物颗粒排列作用,页岩在沉积成岩的过程中内部天然裂缝较为发育,其外观也具有明显的层状结构<sup>[5-6]</sup>。国内外学者针对层状岩石的力学行为进行了相关试验研究。王洪建等<sup>[7]</sup>对页岩进行了单轴试验,讨论了层理角度对岩石脆性的影响;Yu等<sup>[8]</sup>以砂岩为研究对象,进行了具有渗透性的三轴压缩试验,揭示了不同层理倾角下砂岩的破坏特性和渗透性演化规律。Li等<sup>[9]</sup>对不同尺寸、不同层理角度下的板岩进行了巴西劈裂试验测试,揭示了岩石抗拉强度、试样尺寸与层理角度之间的关系。对含有天然裂缝的岩石,学者对其力学性质也做了相关研究。魏元龙<sup>[10]</sup>等对含天然裂隙脆性页岩在单轴循环荷载作用下的变形及破坏特性进行了试验研究;牛亮等<sup>[11]</sup>对含天然裂缝白云岩进行劈裂试验,分析了含天然裂缝白云岩的劈裂破坏模式及抗拉强度变化规律。结合宏观试验,利用数值模拟方法研究岩石细-宏观破裂力学行为是目前研究的热点。Yang等<sup>[12]</sup>在完整的巴西圆盘岩石试验结果的基础上,结合二维颗粒流模型(particle flow code in 2 dimensions, PFC<sup>2D</sup>)研究了层理岩石的细观力学机制;王莉<sup>[13]</sup>则借助 PFC<sup>2D</sup>研究了初始单裂隙对岩石抗拉特性的影响;Bahaaddini等<sup>[14]</sup>基于单轴压缩试验的结果,利用三维颗粒流模型(particle flow code in 3 dimensions, PFC<sup>3D</sup>)研究了层理几何参数对岩石强度及力学特性的影响。

以上研究主要针对层理的影响,关于天然裂缝对岩石细观机理及力学性质的研究相对较少。本研究利用 PFC<sup>2D</sup>软件建立了反映页岩层理几何结构和天然裂缝分布两类因素的颗粒流模型,开展层状页岩细观破裂机理及力学特性研究并结合巴西劈裂试验对研究结果进行验证,从细-宏观角度探讨层理角度、黏结强度比值及天然裂缝分布等因素对层状页岩抗拉强度、破裂演化特征的影响。

## 1 颗粒流模型构建

在颗粒流模型中,为了表征宏观材料的本构,从而反映材料真实的宏观力学特性,需要赋予细观颗粒间相应的接触模型,因此选择合适的接触模型是至关重要的。本研究构建的层状页岩颗粒流模型如图 1 所示,主要包括页岩基质接触模型、层理面接触模型及天然裂缝模型 3 个部分。

### 1.1 层状页岩基质接触模型

页岩基质颗粒之间的接触模型选用线性平行黏结模型(linear parallel bond model, PB 模型)<sup>[15-16]</sup>。该模型将岩石看作由黏结颗粒组成的非均匀物质,假定颗粒之间存在黏结,能够传递拉、压、剪力以及弯矩。颗粒之间的黏结破坏模式分为拉伸破坏和剪切破坏。

PB 模型提供了两种相互作用行为:一种是非黏结型,该模型等效于线性模型,颗粒间的相互滑移满足库伦摩尔理论;第二种是平行黏结型,当颗粒间有黏结键存在时,与第一种行为平行作用且能抵抗张力与弯矩。当作用力超过相应黏结强度时,黏合键断裂,之后黏结破坏应力重新分布,可能导致相邻黏结破坏,也可能导致局部渐进破坏<sup>[17]</sup>,最终模型退化为线性模型。

在每个计算的时步中,PB 接触模型的力与力矩的大小更新为:

$$\bar{\mathbf{F}}_n = (\bar{\mathbf{F}}_n)_0 + \bar{k}_n \bar{A} \Delta \boldsymbol{\delta}_n, \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{F}}_s = (\bar{\mathbf{F}}_s)_0 - \bar{k}_s \bar{A} \Delta \boldsymbol{\delta}_s, \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{M}}_b = (\bar{\mathbf{M}}_b)_0 - \bar{k}_n \bar{\mathbf{I}} \boldsymbol{\theta}_b. \quad (3)$$

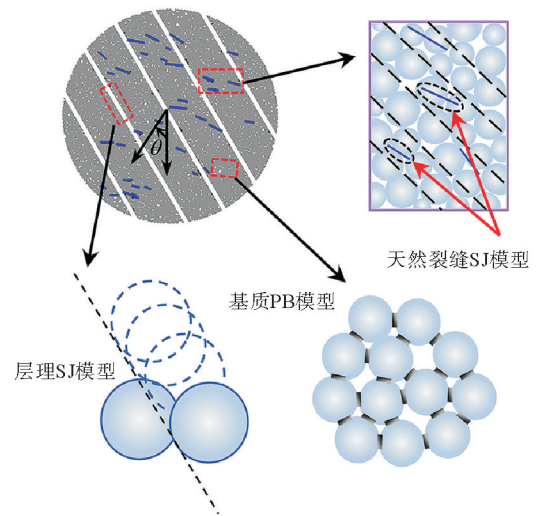


图 1 层状页岩接触模型

Fig. 1 Contact model of layered shale

式中:  $\bar{F}_n$  为平行黏结模型当前时步内更新的法向接触力, N;  $(\bar{F}_n)_0$  为计算时步内  $\bar{F}_n$  的初始值,  $\bar{k}_n$  为黏结法向刚度, N/mm<sup>3</sup>;  $\bar{A}$  为黏结接触面积, mm<sup>2</sup>;  $\Delta\delta_n$  为法向位移相对增量, mm;  $\bar{F}_s$  为当前时步内更新的切向接触力, N;  $(\bar{F}_s)_0$  为计算时步内  $\bar{F}_s$  的初始值,  $\bar{k}_s$  为黏结切向刚度, N/mm<sup>3</sup>;  $\Delta\delta_s$  为切向位移相对增量, mm;  $\bar{M}_b$  为当前时步内更新的力矩, N·mm;  $(\bar{M}_b)_0$  为计算时步内的初始值,  $\bar{I}$  为惯性矩, mm<sup>4</sup>;  $\theta_b$  为相对角位移增量。

平行黏结模型颗粒间的黏结受力强度包络线方程:

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}_n}{\bar{A}} + \frac{\bar{M}_b}{\bar{I}} \bar{R}, \tag{4}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{F}_s}{\bar{A}}. \tag{5}$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为平行黏结最大拉应力, MPa;  $\tau_{\max}$  为平行黏结最大切应力, MPa;  $\bar{R}$  为平行黏结接触有效半径, mm。

如果  $\sigma_{\max} \geq \bar{\sigma}_c$ , 则平行黏结发生拉伸破坏; 如果  $\tau_{\max} \geq \bar{\tau}_c$ , 则发生剪切破坏。其中  $\bar{\sigma}_c$  为平行黏结法向强度, MPa,  $\bar{\tau}_c$  为平行黏结切向强度, MPa。

### 1.2 层状页岩层理模型

页岩的各向异性很大程度上与层理面性质相关<sup>[18-19]</sup>, 因此本研究在页岩接触中进一步嵌入了不同角度的层理面来研究其力学性质。定义加载方向与层理面法线的夹角为层理面角度  $\theta$ , 在设置层理的位置指定新的接触模型来替换原来的 PB 模型, 利用层理两侧颗粒间的不同接触状态, 模拟不同的力学行为。

通过模型“dfn addfracture command”命令流来生成不同角度的层理面, 建立新的接触模型。新的接触模型采用光滑节理模型(smooth-joint model, SJ 模型)<sup>[15]</sup>, 相邻两个颗粒间允许发生错动和滑移。与 PB 模型相似, SJ 模型也有黏结型和非黏结型两种状态, 且也具有一定的抗拉强度和抗剪强度, 但不具备抗转动能力。

SJ 模型在每个计算时步中其力与大小更新为:

$$\mathbf{F}_n = (\mathbf{F}_n)_0 - k_n A \Delta\delta_n^e, \tag{6}$$

$$\mathbf{F}_s = (\mathbf{F}_s)_0 - k_s A \Delta\delta_s^e. \tag{7}$$

式中:  $\mathbf{F}_n$  为 SJ 模型当前时步更新的法向接触力, N;  $\mathbf{F}_s$  为当前时步更新的切向接触力, N;  $(\mathbf{F}_n)_0$  是时步开始时  $F_n$  的初始值;  $(\mathbf{F}_s)_0$  是时步开始时  $F_s$  的初始值;  $A$  为黏结接触面积, mm<sup>2</sup>;  $k_n$ 、 $k_s$  为法向刚度和剪切刚度, N/mm<sup>3</sup>;  $\Delta\delta_n^e$ 、 $\Delta\delta_s^e$  为法向位移增量和剪切位移增量的弹性部分, mm。

根据模型的黏结状态系数  $s_j$ , 可以将光滑节理接触模型分为黏结型( $s_j = 3$ )和非黏型( $s_j < 3$ )。

1) 当黏结状态系数  $s_j < 3$  时, 在非黏结型模型中, 若  $F_s < \mu F_n$ , 则  $(F_s)_0 = F_s$ , 颗粒不会发生相互滑动。否则颗粒发生相互滑动, 此时  $(F_s)_0 = \mu F_n$  为定值, 而法向接触力会因切向位移增大而变化为:

$$(\mathbf{F}_n)^* = \mathbf{F}_n + \left( \frac{|\mathbf{F}_s| - \mu \mathbf{F}_n}{k_s} \right) k_n \tan\psi. \tag{8}$$

式中:  $(\mathbf{F}_n)^*$  为法向接触力的更新值, N;  $\mu$  为摩擦系数;  $\psi$  为剪胀角, (°)。

2) 当黏结状态系数  $s_j = 3$  时, 在黏结模型中, 若  $F_n \geq \sigma_c A$ , 则层理会发生拉伸破坏, 若  $F_s \geq \tau_c A$ , 则层理发生剪切破坏。其中:  $\sigma_c$  为层理法向黏结强度, MPa;  $\tau_c$  为切向黏结强度, MPa。

SJ 黏结模型可以设定比 PB 模型更弱的抗拉、抗剪强度参数, 当其强度达到或超过抗拉、抗剪强度后, SJ 模型黏结键发生断裂会产生相应的拉伸或者剪切裂纹, 从而更精确地描述页岩的破坏情况。因此 SJ 模型经常被用来模拟页岩的层理、断层等。

### 1.3 天然裂缝模型

利用“dfn addfracture command”命令定义新的随机函数, 生成离散裂隙模型表征天然裂缝, 模拟天然裂缝对层状页岩力学特性的影响。为了使天然裂缝模型的分布具有统计意义, 定义天然裂缝模型的倾角服从

高斯分布<sup>[20]</sup>,该分布通过将返回的高斯随机数乘以一个因子或添加偏移量来修改倾角的均值和方差。为了体现较强的规律性,定义概率密度函数:

$$f(\alpha) = \frac{1}{30\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha-30)^2}{2 \times 30^2}} \quad (9)$$

式中:随机变量 $\alpha$ 为天然裂缝倾角; $f(\alpha)$ 为天然裂缝倾角 $\alpha$ 的概率密度分布函数。

天然裂缝的尺寸和位置坐标在圆盘剖面上服从均匀分布<sup>[21]</sup>,最终在圆盘的四个象限中会随机生成一定尺寸、角度、数目的微裂缝。与层理面接触模型相同,天然裂缝被赋予 SJ 模型。

## 2 层状页岩巴西劈裂模拟试验

### 2.1 试样制备

利用现场获取的岩心开展巴西劈裂试验测试,校准颗粒流模型系数。页岩试样采自长庆油田,如图 2 所示,页岩试样外观为灰、黑色,显示出明显的层理线。试样的抗拉强度计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (10)$$

式中: $\sigma_t$ 为试样的抗拉强度,MPa; $P$ 是样品失效时施加的载荷,N; $D$ 和 $t$ 是试样的直径和厚度,mm。

以现场岩心为基准,构建层状页岩巴西劈裂颗粒流试样,制备过程如下:

1) 生成初始颗粒。将直径 25 mm,厚 20 mm 的真实圆柱体试样简化模拟为直径 25 mm 的圆盘。为了降低模型粒径尺寸及数量对宏观力学特性的影响,采用周喻等<sup>[22]</sup>的建议,模型最小尺度颗粒数大于 10。基于石崇等<sup>[23]</sup>的研究,模型颗粒数目大于 3 000 时,模型的轴向应力峰值基本维持稳定。因此,设定该试样共由 5 000 个相互黏结的颗粒组成,其中最大粒径与最小粒径比为 5。为了保证模拟的准确性,颗粒生成后,通过“cycle”命令流使模型内部颗粒受力均匀,从而减小颗粒间的重叠量。

2) 试样伺服。利用 Fish 语言编制的伺服程序对试样进行伺服处理使得试样压实均匀。

3) 赋予颗粒接触模型。首先,层状页岩基质颗粒之间赋予 PB 模型;其次,通过模型“dfn addfracture command”命令流定义各个方向层理面的尺寸及位置坐标生成完整层理面;最后,结合 Fish 语言定义服从统计规律的随机函数生成一定数量的天然裂缝模型。层理面和天然裂缝都赋予 SJ 模型。

4) 模型加载。通过对上、下加载墙施加一定的速度来加载巴西圆盘试样直至模型失效。试样加载方式如图 3 所示。

### 2.2 颗粒流模型结果与试验对比

模型的细观参数反映了岩石的宏观力学特性。为了选择能够真实体现页岩试样宏观力学特性的微观参数,采用“试错法”进行细观参数的模拟校准,并将模拟结果与室内试验结果进行对比。接触模型具体的微观参数如表 1、表 2 所示。

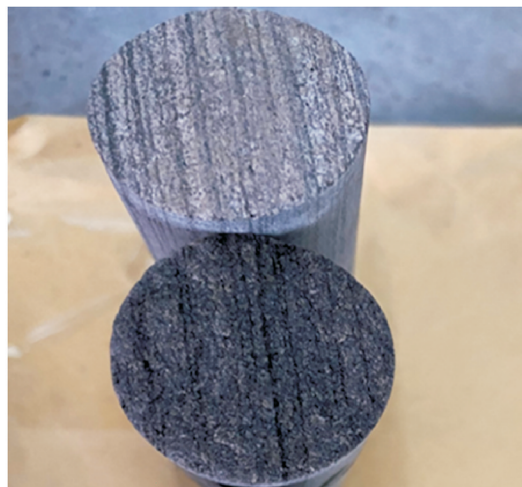


图 2 层状页岩巴西劈裂试验样品

Fig. 2 Brazilian splitting test sample of bedding shale

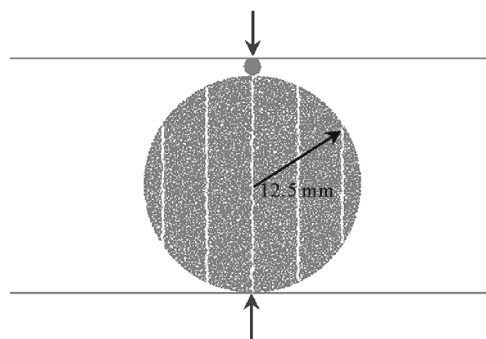


图 3 层状页岩巴西圆盘颗粒流模型

Fig. 3 Brazilian disk particle flow model of layered shale



表1 层状页岩PB模型微观参数

Tab. 1 Micro-parameters of PB model for layered shale

特征参数	数值
平行黏结有效模量 $\bar{E}$ /GPa	4.00
平行黏结法向切向刚度比 $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)$	2.25
平行黏结内摩擦系数 $\bar{\mu}$	0.35
平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c$ /MPa	8.82
平行黏结内聚力 $\bar{c}$ /MPa	7.44

表2 层状页岩SJ模型微观参数

Tab. 2 Micro-parameters of SJ model for layered shale

特征参数	数值
层理法向切向刚度比 $(k_n/k_s)$	6.20
层理内摩擦系数 $\mu$	0.70
层理法向黏结强度 $\sigma_c$ /MPa	3.60
层理黏结内聚力 $c$ /MPa	6.00
天然裂缝法向黏结 $\sigma_{c,n}$ /MPa	3.00
天然裂缝黏结内聚力 $c_n$ /MPa	3.80

图4给出了通过巴西劈裂试验和数值模拟得到的荷载-位移曲线和最终破坏模式。为了使模拟过程更加贴近真实试验结果,在平行黏结模型中预先设置离散裂隙模型来模拟研究天然裂缝对层状页岩力学特性的影响。

图4荷载-位移曲线显示,只考虑层理影响时,其峰值荷载约为0.9 kN,与实际试验峰值接近,峰值位移约为0.012 mm。考虑天然裂缝影响之后,峰值荷载约为0.8 kN,峰值位移约为0.016 mm,其峰值强度比单独考虑层理影响时更低,峰值位移增大。由于天然裂缝也是黏结强度较低的弱面,与层理面共同作用时,页岩的抗劈裂能力会更差,当受荷载压缩时,裂缝连通层理与天然裂缝扩展,峰值位移增大。

综上所述,单纯考虑层理的影响时,PFC数值模拟曲线与试验曲线在弹性阶段的斜率近似相等,其峰值强度也大致相同,但变形相对较小。同时考虑层理和天然裂缝的影响后,数值模拟曲线能较为真实地反映层状页岩的力学状态。通过与试验测试结果对比,采用平行黏结PB模型与光滑节理SJ模型组合的形式较为准确地反映出层状页岩巴西劈裂荷载-位移变化规律,验证了本构模型的有效性。

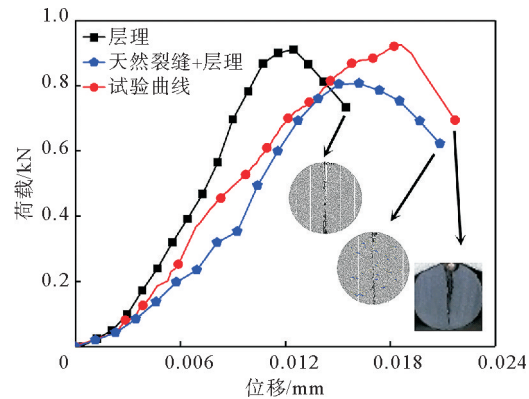


图4 巴西试验荷载-位移曲线对比图

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves in Brazilian splitting test

### 3 层状页岩巴西劈裂破坏特征分析

#### 3.1 层理角度对破坏模式的影响

图5展示了不同层理角度破坏后的巴西圆盘破坏模式、裂纹的分布情况。试样呈现3种主要破坏模式:页岩基质劈裂的拉伸破坏、沿层理劈裂的拉伸破坏及沿页岩基质和层理的拉伸、剪切复合型破坏。圆盘红色线段代表拉伸裂纹,黑色代表剪切裂纹。

当 $\theta=0^\circ$ 时,页岩基质黏结强度达到抗拉强度而发生拉伸破坏,试样沿着页岩基质产生拉伸裂纹,裂纹沿着垂直于层理面的方向扩展。当 $\theta=90^\circ$ 时,页岩层理黏结强度达到抗拉强度而发生拉伸破坏,试样沿着层理产生拉伸裂纹,裂纹扩展的方向平行于荷载和层理面的方向。当 $15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ 时,除了基质破坏产生的拉伸裂纹之外,由于层理面的滑移作用,试样还产生一些沿着层理方向但不沿着荷载方向扩展的剪切裂纹。剪切裂纹主要沿着层理面以中等或高层理角度出现,如层理倾角 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 的圆盘试样所示。研究结果与杨志鹏等<sup>[24]</sup>的物理试验结果相吻合,验证了本研究模拟结果的可靠性。

为了从细观角度解释岩石的细-宏观破裂机制,以裂纹扩展情况较为复杂的 $15^\circ$ 、 $75^\circ$ 试样为例,详细探讨层状页岩细观力链及裂纹演化过程。图6给出了 $15^\circ$ 、 $75^\circ$ 层状页岩细观力链演化图,黑色代表压缩,红色代表拉伸。在初始加载阶段,颗粒受压缩荷载的作用相互挤压,力链在圆盘中部沿着作用力的方向集中,颗粒

间接触力较小,力链较为稀疏,此时几乎没有明显的裂纹出现。

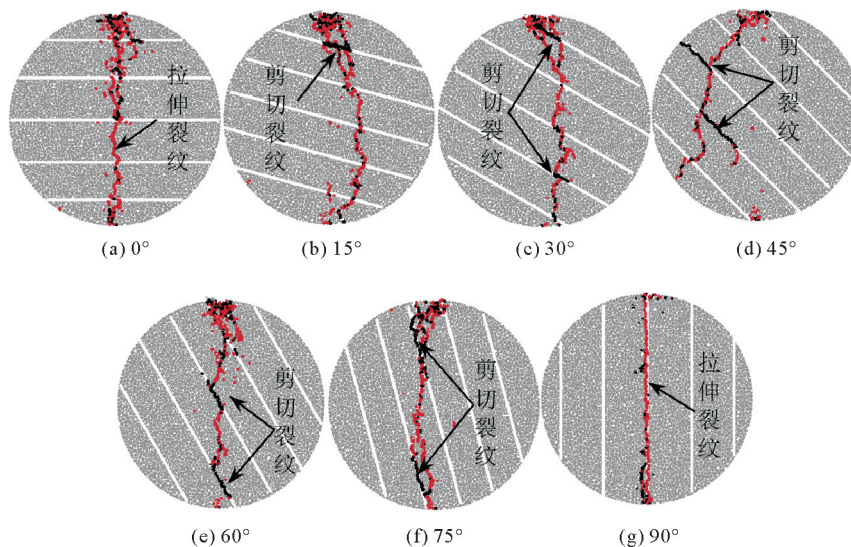


图 5 不同层理角度下的页岩破坏行为

Fig. 5 Failure behavior of shale with different bedding angles

随着荷载的增加,颗粒间的挤压不断增大,拉伸裂纹开始从圆盘试样的顶部与底部萌生。当载荷达到峰值时,接触力达到最大,圆盘内微裂纹扩展形成初始断裂带,并出现较为密集的力链。由图 6(b)、图 6(e)可以看出,由于试样顶部和底部的压缩量较大,试样发生局部破坏,颗粒间的距离增大,接触力减小,使得颗粒间产生相对滑动,导致圆盘中剪切裂纹的产生。同时,圆盘内未出现裂纹区域仍然存在接触力较低的情况,体现了岩石的不均匀性。峰后阶段,裂缝通过不断扩展贯通形成宏观断裂带,此时试样已完全破坏,颗粒间接触力减小,力链明显减弱。

### 3.2 层理黏结强度比值对破坏特性的影响

层理面黏结强度比值对岩样破裂特征

影响显著,试样的拉伸或剪切破坏模式与层理面法向黏结强度、黏结内聚力的大小息息相关。本研究定义黏结强度比值为层理面法向黏结强度与黏结内聚力的比值。保持层理面法向黏结强度不变,逐渐降低黏结内聚力的大小,研究黏结强度比值对巴西圆盘试样的破坏模式及峰值强度的影响。以层理角度 75°为例,图 7 给出了黏结强度破坏特性演化规律。

从图 7 的演化过程中可以看出,试样在不同层理面黏结强度比值的破坏形态和峰值强度有所不同。当黏结内聚力逐渐减小至黏结强度比值达到 1.8 时,试样表现出由拉伸破坏逐渐向层理弱面剪切破坏转变的趋势,裂纹逐渐向着层理面扩展,试样的峰值强度略有降低;然而,当黏结强度比值超过 1.8 时,随着黏结内聚力强度的进一步降低会显著降低试样的峰值强度,此时裂纹已完全沿着层理面扩展。即随着层理黏结内聚力的逐渐减小,层理面黏结强度比值的增加,层理面抗剪能力逐渐减弱,圆盘试样更容易沿着层理面发

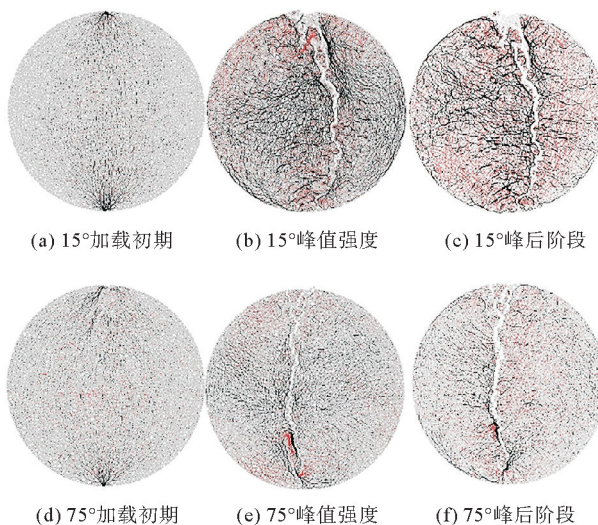


图 6 层状页岩细观力链演化过程

Fig. 6 Evolution process of mesoscopic force chain of layered shale



生剪切破坏,试样的峰值强度也随着比值的增大而逐渐减小。

### 3.3 天然裂缝对破裂特征的影响

图8展示了考虑天然裂缝影响后0°、30°、60°、90°层状页岩试样的破坏模式和裂纹分布,圆盘蓝色线段表示天然裂缝。对于层理角度 $\theta=0^\circ、90^\circ$ 时,拉伸裂纹近似平行于荷载方向,试样发生拉伸破坏;而剪切裂纹在 $\theta=30^\circ、60^\circ$ 时沿着层理面扩展。从破坏模式来看,0°圆盘的破坏模式是页岩基质劈裂拉伸破坏,30°、60°圆盘的破坏模式是页岩基质和层理的拉伸、剪切复合型破坏,90°圆盘的破坏模式是沿层理劈裂的拉伸破坏。

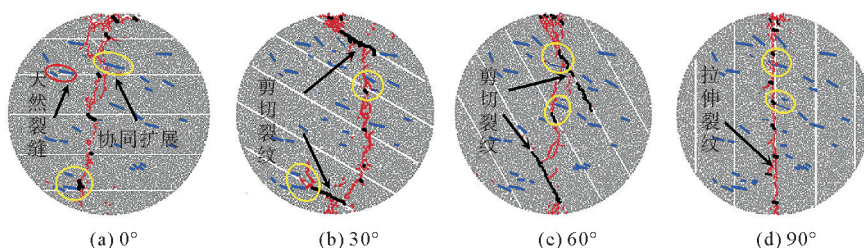


图8 考虑天然裂缝影响后的层状页岩破坏行为

Fig. 8 Failure behavior of layered shale considering natural fractures

考虑天然裂缝因素后,岩样劈裂裂缝在扩展过程中遇到天然裂缝会产生拉伸裂缝、层理缝、天然裂缝协同扩展模式,由于天然裂缝黏结强度较弱,易连通扩展成新的裂缝系统,如图中黄色圆圈标识。同时在30°、60°圆盘中沿层理面扩展的剪切裂纹也明显增加。

### 3.4 层状页岩抗拉强度变化特征

图9呈现了页岩试样抗拉强度随层理角度的变化关系。由于层理弱面的影响,页岩抗劈裂能力较差,随着层理角度的增大,抗拉强度逐渐降低。仅考虑层理影响时,抗拉强度最大值出现在0°处,为1.28 MPa;最小值出现在90°处,抗拉强度为1.02 MPa,在 $30^\circ < \theta < 60^\circ$ 内,抗拉强度随着层理角度的增大而迅速减小,下降速率较大。

考虑层理和天然裂缝共同影响时,抗拉强度随着层理角度的增大大幅降低,抗拉强度为1.15~0.89 MPa。在 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 区间内,抗拉强度变化幅度较大,当 $\theta=30^\circ$ 时,抗拉强度下降为1.0 MPa,降幅达19.4%;当 $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时,抗拉强度波动较小。由此可见,天然裂缝对层理抗拉强度影响明显。

上述 PFC 数值模拟结果表明:巴西劈裂条件下的层状页岩在宏观上表现出3种典型破裂模式。在细观上,随着荷载增加至峰值强度时,微裂纹扩展形成初始拉伸断裂带,并出现较为密集的力链,颗粒间发生相对

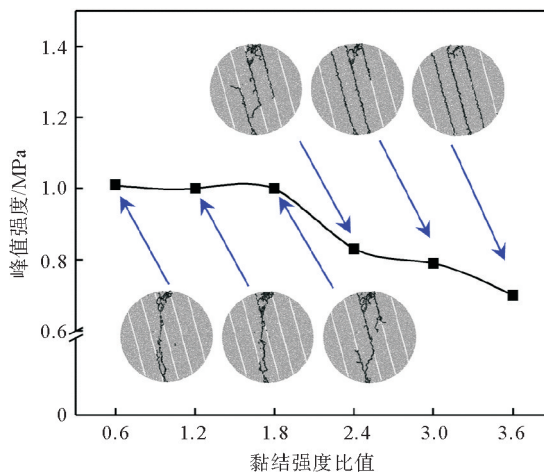


图7 黏结强度破坏特性演化规律

Fig. 7 Evolution law of bond strength failure characteristics

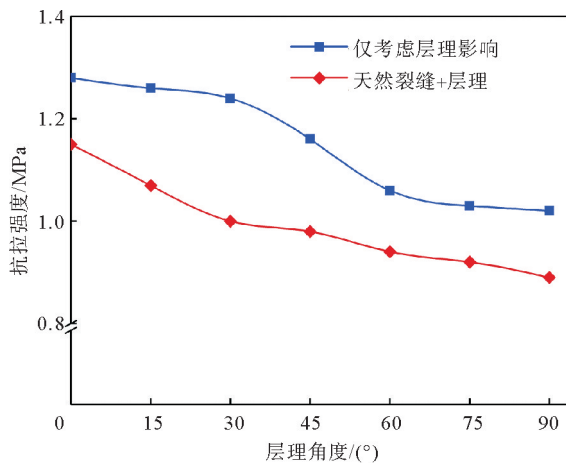


图9 抗拉强度与层理角度关系

Fig. 9 Relationship between tensile strength and bedding angle

滑动,会产生局部剪切裂纹;峰后阶段,颗粒间接触力减小,力链明显减弱。层理角度、黏结强度及天然裂缝等因素对层状页岩力学特性影响显著。

#### 4 结论

1) 结合颗粒流平行黏结模型与光滑节理模型建立的页岩基质、层理及天然裂缝数值模型能够有效反映层状页岩在巴西劈裂试验条件下的宏观力学行为。

2) 当层理角度  $\theta=0^\circ$  时,表现为页岩基质劈裂拉伸破坏;当层理角度  $\theta=90^\circ$  时,表现为沿层理的劈裂拉伸破坏;当层理角度  $15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  时,表现为页岩层理和基质的拉伸、剪切复合型破裂。岩石的宏观破裂是颗粒间细观力链与微裂纹不断演化的结果。

3) 试样在不同层理面黏结强度比值下的破坏形态与抗拉峰值强度有所差异。随着黏结内聚力的逐级递减,层理面黏结强度比值的增加,圆盘试样更容易沿着层理面发生剪切破坏,其峰值强度随着层理面黏结强度比值的增加而减小。

4) 页岩试样抗拉强度的各向异性特征表现明显。随着层理角度的增大,试样的抗拉强度逐渐减小,嵌入天然裂缝模型后,试样抗拉强度大幅度降低,由于劈裂裂缝、层理缝、天然裂缝的共同响应,形成新的裂缝系统。

#### 参考文献:

- [1] 王书彦,胡润,任东超,等.页岩孔隙成因类型及其演化发育机理—以川东南地区页岩为例[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(6):9-15.  
WANG Shuyan, HU Run, REN Dongchao, et al. Genetic types and development mechanism of shale pores: With the example of shale in southeast Sichuan[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(6):9-15.
- [2] 张鹏,黄宇琪,张金川,等.黔西北五峰-龙马溪组页岩气成藏条件综合评价[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3):25-34.  
ZHANG Peng, HUANG Yuqi, ZHANG Jinchuan, et al. Comprehensive evaluation of shale gas reservoir conditions of Wufeng-Longmaxi formation in Northwest Guizhou[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(3):25-34.
- [3] YANG S Q, YIN P F, HUANG Y H. Experiment and discrete element modelling on strength, deformation and failure behaviour of shale under Brazilian compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(7):4339-4359.
- [4] 张矿生,唐梅荣,王成旺,等.致密砂岩储层抗拉强度评价方法研究[J].地球物理学进展,2021,36(1):318-324.  
ZHANG Kuangsheng, TANG Meirong, WANG Chengwang, et al. Study on prediction method of tensile strength for tight sandstone formation[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1):318-324.
- [5] 季永新,袁超,黄春,等.考虑层状岩体结构的深基坑开挖力学效应分析[J].工业建筑,2018,48(3):97-102.  
JI Yongxin, YUAN Chao, HUANG Chun, et al. Mechanics analysis of deep excavation considering stratified rock mass structure[J]. Industrial Construction, 2018, 48(3):97-102.
- [6] GENG Z, CHEN M, JIN Y, et al. Experimental study of brittleness anisotropy of shale in triaxial compression[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36:510-518.
- [7] 王洪建,刘大安,黄志全,等.层状页岩岩石力学特性及其脆性评价[J].工程地质学报,2017,25(6):1414-1423.  
WANG Hongjian, LIU Da'an, HUANG Zhiquan, et al. Mechanical properties and brittleness evaluation of layered shale rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6):1414-1423.
- [8] YU J, YAO W, DUAN K, et al. Experimental study and discrete element method modeling of compression and permeability behaviors of weakly anisotropic sandstones[J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 134. DOI:10.1016/j.ijrmms.2020.104437.
- [9] LI K, CHENG Y, YIN Z Y, et al. Size effects in a transversely isotropic rock under Brazilian tests: Laboratory testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(6):2623-2642.
- [10] 魏元龙,杨春和,郭印同,等.单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J].岩土力学,2015,36(6):1649-1658.  
WEI Yuanlong, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Experimental investigation on deformation and fracture characteristics



- of brittle shale with natural cracks under uniaxial cyclic loading[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(6):1649-1658.
- [11]牛亮,穆锐,陈俊.含天然微裂隙岩石的力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):141-146.  
NIU Liang,MU Rui,CHEN Jun.Experimental study on mechanical properties of rock containing natural micro-fractures [J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(2):141-146.
- [12]YANG S Q,HUANG Y H.Particle flow study on strength and meso-mechanism of Brazilian splitting test for jointed rock mass[J].Acta Mechanica Sinica,2014,30(4):547-558.
- [13]王莉.初始裂隙对岩石抗拉特性的影响[J].煤炭科学技术,2020,48(增1):66-70.  
WANG Li.Effect of initial flaw on tensile properties of rock[J].Coal Science and Technology,2020,48(S1):66-70.
- [14]BAHAADDINI M,SHARROCK G,HEBBLEWHITE B K.Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression[J].Computers and Geotechnics,2013,49(20):206-225.
- [15]Itasca Consulting Group Inc.PFC 5.0 documentation[Z].Minneapolis:Itasca Consulting Group,Inc.,2016.
- [16]赵同彬,尹廷春,谭云亮,等.基于颗粒流理论的煤岩冲击倾向性细观模拟试验研究[J].煤炭学报,2014,39(2):280-285.  
ZHAO Tongbin,YIN Yanchun,TAN Yunliang,et al.Bursting liability of coal research of heterogeneous coal based on particle flow microscopic test[J].Journal of China Coal Society,2014,39(2):280-285.
- [17]DUAN K,KWOK C Y,PIERCE M.Discrete element method modeling of inherently anisotropic rocks under uniaxial compression loading[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2016,40(8):1150-1183.
- [18]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(增2):634-638.  
ZHANG Bohu,MA Haobin,TIAN Xiaopeng,et al.Deep layered shale mechanical parameters anisotropy study[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S2):634-638.
- [19]解经宇,陆洪智,陈磊,等.龙马溪组层状页岩微观非均质性及力学各向异性特征[J].地质科技通报,2021,40(3):67-77.  
XIE Jingyu,LU Hongzhi,CHEN Lei,et al.Microscopic heterogeneity and mechanical anisotropy of the laminated shale in Longmaxi Formation[J].Bulletin of Geological Science and Technology,2021,40(3):67-77.
- [20]惠鑫,马凤山,徐嘉谟,等.考虑节理裂隙尺寸与方位分布的岩石统计损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增1):3233-3238.  
HUI Xin,MA Fengshan,XU Jiemo,et al.Study on statistical damage constitutive model for rocks considering length and occurrence distribution of joint fissures[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(S1):3233-3238.
- [21]何易东.随机天然裂缝分布下的页岩裂缝扩展模拟研究[D].成都:西南石油大学,2018.  
HE Yidong.Simulation of fracture propagation in shale reservoir under random natural fractures[D].Chengdu:Southwest Petroleum University,2018.
- [22]周喻,吴顺川,焦建津,等.基于BP神经网络的岩土体细观力学参数研究[J].岩土力学,2011,32(12):3821-3826.  
ZHOU Yu,WU Shunchuan,JIAO Jianjin,et al.Research on mesomechanical parameters of rock and soil mass based on BP neural network[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(12):3821-3826.
- [23]石崇,徐卫亚.颗粒流数值模拟技巧与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.  
SHI Chong,XU Weiya.Numerical simulation techniques and practice of particle flow[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2015.
- [24]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.  
YANG Zhipeng,HE Bai,XIE Lingzhi,et al.Strength and failure modes of shale based on Brazilian test[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(12):3447-3455.

(责任编辑:吕海亮)