

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.012

炭质页岩巴西劈裂载荷下破坏过程的 时空特征研究

杜梦萍^{1,2}, 潘鹏志¹, 纪维伟¹, 张振华^{2,3}, 高要辉¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:页岩在加载过程中的破裂时机及其空间位置研究对于页岩气探测及储层评价具有重要意义,为此开展了不同层理倾角条件下页岩的巴西圆盘劈裂载荷下的破坏过程试验,采用数字图像相关技术(DIC),全程跟踪页岩裂纹萌生、扩展和贯通全过程的变形场实时演化特征,同时记录力-位移曲线,利用扫描电镜获得炭质页岩的破裂面特征及微观结构,采用宏、细观相结合的手段,研究不同层理方向炭质页岩微裂缝起裂时间、空间位置和扩展规律及其破裂机制。结果表明:页岩的巴西劈裂强度随层理方向与加载方向角度的增大而逐渐增大;随加载方向与层理面夹角的增加,裂缝萌生的时间逐渐增加,而裂缝从萌生、扩展到贯通所用时间逐渐减少。所有角度试件基本从试件端部萌生裂缝并沿层理面扩展,除 90°试件外,不同层理倾角试样主裂缝破裂的位置逐渐偏离中心位置而向试件外侧发展。各角度试件主破坏类型存在一定差异性,除 90°试件竖向主裂缝为张拉破坏外,随加载方向与层理面夹角的增加,各加载角度试件的主破裂模式从张拉剪切破坏逐渐过渡为剪切滑移破坏。

关 键 词:炭质页岩;巴西劈裂;数字图像相关;时空规律;各向异性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 12 - 3437 - 10

Time-space laws of failure process of carbonaceous shale in Brazilian split test

DU Meng-ping^{1,2}, PAN Peng-zhi¹, JI Wei-wei¹, ZHANG Zhen-hua^{2,3}, GAO Yao-hui¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: It is great crucial for shale gas exploration and reservoir evaluation to investigate the rupture time and spatial position during the loading process of shale. Brazilian tests on shale were carried out under different angles between the loading direction and bedding planes to examine failure process. The digital image correlation (DIC) technique is adopted to track shale real-time deformation field evolution of crack initiation, propagation and coalescence during entire process, meanwhile, the force-displacement curve is recorded. Scanning electron microscopy (SEM) is applied to obtain fracture surface characteristics and microstructure of carbonaceous shale. Based on experimental data, the relationships between the loading direction and the micro fracture initiation time, spatial location, propagation rules and fracture mechanism of shale are explored. The results show that shale Brazilian disc split strength gradually increases with the increase of the angle between the loading direction and bedding plane. With the increase of the angle, the crack initiation time gradually increases, but the consumed time from crack initiation, propagation to damage decreases. The cracks basically produce from the ends of the specimen and propagate along the bedding plane. The cracks gradually develop from the middle of the specimen to the outside along with loading angle from 0° to 90° except the vertical main fracture of 90° sample. There exists a certain difference between main damage types of different shale specimen with loading directions. The fracture mode gradually transits from tension shear failure to shear sliding failure except the vertical main fracture of 90° sample with the increase of the angle between the loading direction and bedding plane.

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(No.51322906, No.41272349)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51322906, 41272349).

第一作者简介: 杜梦萍, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石裂纹扩展方面的研究工作。E-mail: 18627926605@163.com

通讯作者: 潘鹏志, 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 主要从事多场耦合下岩体连续-非连续变形破坏机制与模拟方法方面的研究工作。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn.

Keywords: carbonaceous shale; Brazilian split test; digital image correlation (DIC); temporospatial; anisotropy

1 引 言

页岩气是一种重要的非常规战略性补充能源,其分布广泛,开采潜力巨大,是常规能源的理想接替。世界页岩气资源丰富,但由于页岩地层渗透率很低,目前还没有广泛开发。页岩气井钻完后只有极少量天然裂缝特别发育的井可直接投入生产,大部分都需要压裂改造后才能得到可观的经济产量^[1]。由于沉积过程中矿物颗粒的择优取向,页岩具有明显的层理结构特点。受层理面影响,页岩地层的力学性质、强度特征和破裂模式均表现出明显的各向异性,这在分析水平井井壁稳定性和水力裂缝的扩展问题时应予以足够重视^[2]。页岩的变形破坏特征及破裂机制对于钻井及储层改造有重要影响,其强度影响井壁稳定以及可压性,形变影响着井筒完整,脆性及破坏模式影响着压裂效果的好坏。目前,国内外对各向异性岩石的强度特征和破裂模式进行了大量研究。

Niandou 等^[3]研究了页岩的力学各向异性,并将其破裂模式分为剪切破坏和张拉破坏。Vernik 等^[4]研究了黑色有机页岩的波速各向异性特征,得出黑色页岩的各向异性主要由于其自身微观结构引起。Tavallali 等^[5]通过对层状砂岩的破坏模式、抗拉强度以及能量的各向异性,确定了两种破裂模式的相对重要的角度范围。Chu 等^[6]通过不同角度下片麻岩、页岩和片岩的单轴压缩和巴西劈裂试验,研究了这 3 种岩石弹性参数及强度的各向异性。高春玉等^[7]研究了板岩力学特性的各向异性,并分析了层理倾角对岩石变形特性、强度特征及其参数的影响。刘胜利^[8],刘运思^[9]等研究了板岩的破坏模式、抗拉强度、弹性模量和泊松比的各向异性,并通过试验研究了绿泥石片岩的各向异性特征。谭鑫等^[10]对含层理构造的非均质片麻岩进行了多组加载角度的巴西劈裂试验,并用 UDEC 程序建立离散单元数值模型,解释了劈裂破坏形式产生的机制。Kuila 等^[11]研究了低孔隙页岩的应力、波速各向异性以及二者之间的关系。衡帅等^[12,13]开展了不同角度页岩的直接剪切试验、单轴和三轴压缩试验以分析其力学特性、强度特征和破裂模式的各向异性,并揭示了其破坏机制的各向异性。陈天宇等^[14]对不同层理角度的黑色页岩试样进行三轴压缩试验,研究黑色页岩的力学特性、各向异性特征及破坏模式,并对比分析围压和层理角度对黑色页岩力学行为和破坏模式的影响。

由上分析可见,国内外学者对岩石强度和破裂

模式的各向异性以及岩石裂纹的扩展机制研究较多^[15,16],但对页岩在加载过程中微裂纹萌生、扩展和贯通过程的时空特征研究很少见文献报道。岩石是一种非均质材料,在加载过程中裂纹萌生的位置和时间以及后续的扩展具有很强的不确定性,岩石破裂过程的时空演化规律对于岩石破裂机制的研究具有重要的意义。近些年来发展起来的数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法,为该项研究提供了较好的解决方案,该方法除具有一般光测方法的特点外,还有测量过程自动化程度高且操作简单、试验消耗小、对不同尺度的试验适用性强、可自行编制软件对数据进行处理等优点^[17],越来越受到国内外学者的广泛关注与尝试^[18-23]。

为此,本文开展不同层理方向炭质页岩的巴西劈裂载荷作用下破裂全过程试验,运用 DIC 技术记录炭质页岩裂纹从萌生、扩展、贯通及最终破裂的全过程,结合电镜扫描(SEM)结果和宏观力-位移曲线,研究不同层理倾角条件下,页岩破裂的时间、位置、类型等的规律,该项研究对于页岩气探测及储层力学性能评价具有重要意义。

2 试件制备及试验方法

2.1 试件制备

本文选择的炭质页岩取自陕西安康,岩样为灰黑色,试样层理面微观结构 SEM 扫描结果显示其具有薄层状层理(见图 1),其成分复杂,主要由 23.4% 的方解石,19.44% 的石英,31.22% 的伊利石,以及 23.95% 的绿泥石等成分组成。

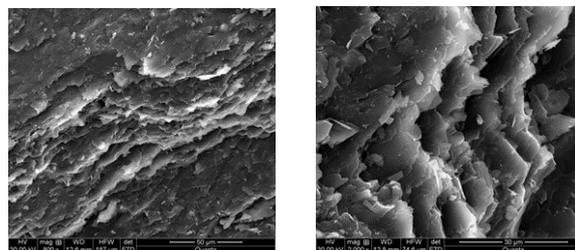


图 1 炭质页岩试样层理微观结构

Fig.1 Microstructure of carbonaceous shale bedding

页岩圆盘试件根据国际岩石力学学会(ISRM)推荐标准进行制备。首先通过钻具在完整页岩块内钻取直径为 50 mm 岩芯,且保证岩芯的轴向与页岩层理面的走向垂直。然后通过切割、打磨制成直径为 50 mm、厚度为 25 mm 的标准圆盘试件,上下表面的平行度控制在 0.5 mm 以内,表面的平整度控制在 0.1 mm 以内。所有试件保存于室温干燥环境

中。

2.2 试验方法

采用 RMT-150C 岩石力学压缩试验机进行巴西劈裂试验 (见图 2(a))。该试验机采用全伺服控制, 垂直液压缸最大出力 1 000 kN, 活塞行程 50 mm, 水平液压缸最大出力 1 000 kN, 活塞行程 50 mm, 变形速率 0.000 1 ~ 1 mm/s, 加载速率 0.01 ~ 100 kN/s。

巴西劈裂试验竖向加载方向与炭质页岩试件层理方向夹角为 θ (见图 2(b)), 分别取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° , 根据加载角度变化共设 7 组试验, 每组测试 3 个试样。圆盘试件在弧形加载鄂下, 通过恒定的加载速率 (0.001 mm/s) 加载直至丧失承载力, 发生破坏。试验中记录全程力-位移曲线。

2.3 巴西劈裂强度计算方法及讨论

为简便起见, 采用下式计算试样的巴西劈裂强度:

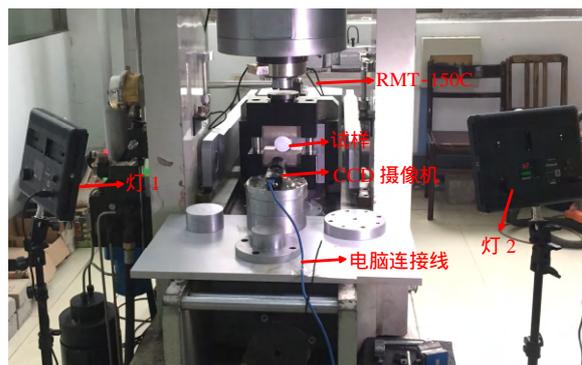
$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dt} \quad (1)$$

式中: F 为试样丧失承载力时所承受的荷载 (N); D 为试样直径 (mm); t 为试样厚度 (mm)。

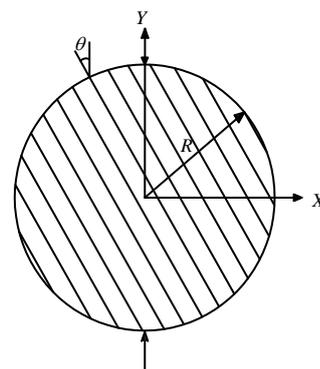
需要注意的是, 巴西圆盘抗拉强度 (即式 (1)) 试验是基于圆盘中心点的应力状态计算的^[24, 25], 如果开裂不是出现在中心, 采用该公式得出的强度并非岩石的巴西圆盘抗拉强度, 而仅仅是巴西圆盘岩样在巴西劈裂这种载荷下的一种强度表征。本文的页岩具有不同的层理倾角, 在巴西劈裂载荷作用下, 主破裂有可能沿着层理剪切滑移而破坏, 此时由式 (1) 计算得到的岩样强度不能认为是岩样的抗拉强度。尽管如此, 为分析方便, 本文仍然采用式 (1) 来评价不同层理倾角页岩的承载力特征。由式 (1) 可见, 对于不同层理倾角的页岩试样, 如果假设圆盘直径和厚度相同, 岩样的巴西劈裂强度是由承载力 F 决定的。事实上, 国内外有一些学者^[5, 8-10] 也采用该公式来描述横观各向同性岩样或者带裂纹岩样的巴西劈裂强度。因此, 采用式 (1) 可以表征不同层理倾角页岩在巴西劈裂载荷作用下的承载能力。

试验中采用 DIC 技术监测试样表面的位移场演化。DIC 技术包含试验前散斑喷射、试验中图像获取及试验数据后处理等步骤。DIC 图像获取系统由 CCD 相机、计算机及稳定光源等组成 (见图 2(a))。CCD 相机负责拍摄岩石加载全程的试件表面图

像, 图像传输到计算机进行数字化后存贮到计算机中; 计算机实时显示试验过程中的图像并保存。试验数据后处理系统对试验中采集到的散斑图像进行处理获得所需的位移场、应变场等信息。本试验中采用一台高分辨率数码相机用于记录试件表面散斑点的灰度变化, 可以保证图像采集的高精度。试验过程中采集的图像经过数字相关技术处理, 可得到试件变形过程中的应变和位移。



(a) 试验系统



(b) 层理及其倾角示意图

图 2 试验仪器及试验简图

Fig.2 Experimental apparatus and test diagram

3 页岩巴西劈裂强度与破裂模式

获得的页岩试件巴西劈裂强度如表 1 和图 3 所示, 从图 3 可以看出, 不同层理方向的页岩巴西劈裂试验抗拉强度均有一定离散性, 因此, 能够明显观察到页岩层理方向对巴西劈裂强度的强烈影响。页岩的巴西劈裂强度呈现随层理方向与加载方向角度 (θ) 的增大而逐渐增大趋势。最大巴西劈裂强度为 12 ~ 20 MPa, 出现在层理方向与加载方向相垂直 ($\theta = 90^\circ$) 的情况下, 并随着层理方向角 θ 减小而迅速减小, 最小巴西劈裂强度出现在 0° 和 15° 层理的页岩试样, 大约 3 MPa 左右。

表 1 页岩巴西劈裂试验强度

Table 1 Strength of shale from Brazilian split tests

角度/(°)	巴西劈裂强度/MPa	平均巴西劈裂强度/MPa
0	2.753, 4.810, 2.145	3.236
15	3.352, 3.873, 2.802	3.342
30	4.389, 2.581, 4.545	3.838
45	4.902, 5.602, 4.726	5.077
60	5.504, 5.991, 6.745	6.080
75	5.930, 10.510, 10.858	9.100
90	12.675, 16.033, 20.458	16.389

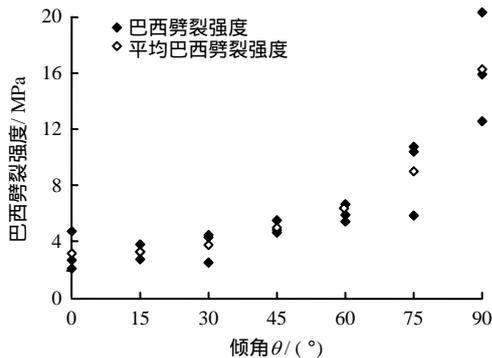


图 3 不同层理方向角 θ 下的圆盘试件巴西劈裂强度
Fig.3 Brazilian disc split strength of shale samples with different bedding orientations

需要注意的是，本文获得的不同层理倾角下页岩的巴西劈裂强度规律，与某些层状岩石的抗拉强度规律有些差别，例如，谭鑫等^[10]对片麻岩的研究结果表明，加载方向与层理面的角度为 30° 或者 45° 时抗拉强度增强，60° 试件抗拉强度降低，之后呈增长趋势，呈现出区间性的特点，而本文的获得的强度区间性不明显，说明岩石的非均质性对其力学性能有重要的影响。

将每个角度圆盘试件破坏形态于图 4 中绘出，圆盘试件劈裂产生的宏观裂纹除了在特定情况下 ($\theta = 0^\circ, 90^\circ$)，基本不通过圆盘中心。当层理方向 $\theta = 0^\circ$ 时，主要为通过圆盘中心的并平行于层理面的竖向裂缝。当层理方向 $\theta = 15^\circ$ 时，试件主要产生沿层理面的裂缝，裂缝通过试件中部，并不通过试件中心。当层理方向 $\theta = 30^\circ$ 时，试件主要产生沿层理面的裂缝，裂缝基本不通过试件中部，其中有试件裂缝上端部出现垂直加载方向的竖向裂缝。当层理方向 $\theta = 45^\circ$ 时，试件主要产生沿层理面的裂缝，裂缝主要沿试件上半部分发展。当层理方向 $\theta = 60^\circ$ 时，试件主要产生沿层理面的裂缝，裂缝不通过试件中部，其中有试件裂缝上端部出现垂直加载方向的竖向裂缝。当层理方向 $\theta = 75^\circ$ 时，试件主要产生沿层理面的裂缝，裂缝主要在试件端部产生，部分试件裂缝端部出现垂直加载方向的竖向裂缝。

当层理方向 $\theta = 90^\circ$ 时，竖向主裂纹通过试件中心线并垂直层理面发展，在试件端部出现水平裂缝。

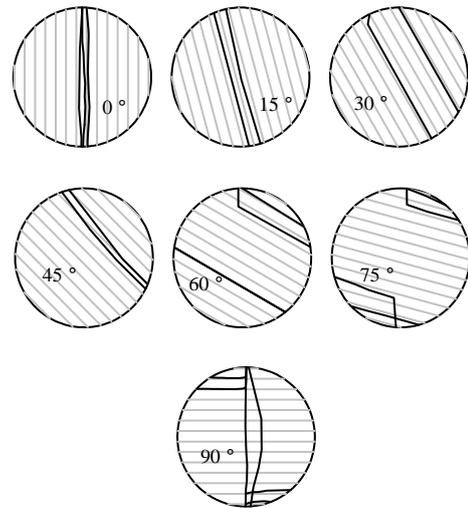


图 4 不同层理方向 θ 下的页岩圆盘破坏模式
Fig.4 Fracture patterns of shale disc with different bedding orientations θ

从破坏模式可以看出，除 90° 试件的主裂缝以外，层理倾角不同，主裂缝的破裂位置也不同，如 0° 试件产生竖向主裂缝，主裂缝通过中心或者中心附近位置，但随着层理倾角的增加逐渐，受层理的影响，主裂缝破裂的位置逐渐偏离中心位置而向试件外侧发展（见图 4 中层理倾角从 15° ~ 75° 的破裂模式），层理倾角为 90° 的试件，初始破裂（图 4 中 90° 试样端部附近的水平裂纹）也是远离试样的中心位置。说明层理与加载方向的夹角对页岩的力学性质有重要影响。

4 页岩裂纹萌生与扩展的时间特征

采用数字图像相关技术 (DIC)，能够跟踪试样表面任意点的位移演化过程，通过分析表面位移场的变化，可以较好地确定微裂纹萌生与扩展的时机。本文数字图像相关技术 (DIC) 采用清华大学潘兵的 RG-DIC (Reliability-guided DIC) 算法^[26]，亚子集大小为 32 个像素，步长为 7 个像素。试验之前对 DIC 误差进行了测试，其误差小于 1 μm 。

为便于分析，将试验所得位移云图转换到沿层理和垂直于层理的方向。为此，建立局部坐标系，根据以下公式进行坐标转换：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

即可得到沿层理方向（即切向）以及垂直于层理方向（即法向）位移场演化云图。

图 5(a)是倾角 60°的试件加载全程的力-位移曲线。通过分析并根据加载曲线的特点，选取加载过程中 5 个典型时刻进行标识，图 5(b)~5(e)给出了不同加载水平下(加载点 0~4)所对应的试样沿层理方向(即切向)位移场演化云图，从而直观地表现试件加载全程中变形局部化和各向异性现象与宏观力学行为的关系。

图 5(a)表明，在加载前中期(阶段 I)，试件在压密阶段后所受应力基本呈线性增加，由于加载速率恒定，试件位移均匀增加，此阶段可近似认为试件处于弹性变形阶段；而在此期间，基于 DIC 细观

变形场观测(见图 5(b)载荷点 0)，位移场的分布没有表现由于层理的存在而产生的各向异性现象，此时没有明显的裂纹出现，位移场分布比较均匀，尚未表现出非连续的特征。随着载荷的继续增加，到载荷点 1 时，位移场的连续性开始出现波动，如图 5(c)所示。

当进入第 II 阶段时，试件局部位移场增长速率发生很大变化。如载荷点 2(应力峰值的 48%左右)，从位移场演化过程图(见图 5(d))中可看出，此时已有裂纹发展的趋势，可以清楚地看出位移场的分布受层理的显著影响。

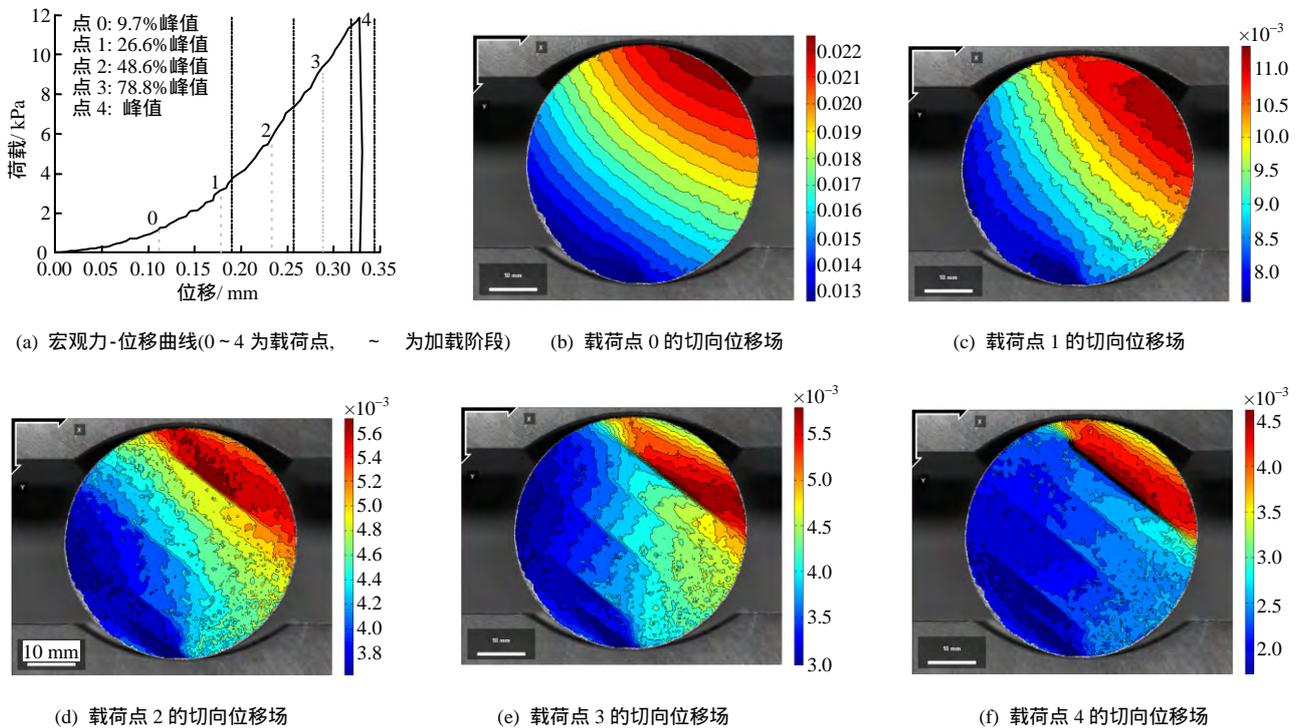


图 5 层理倾角为 60°试件的力-位移曲线和沿层理方向(切向)位移场分布(单位: mm)

Fig.5 Force-displacement curve of specimen with bedding plane angle of 60°and tangential displacement field(unit: mm)

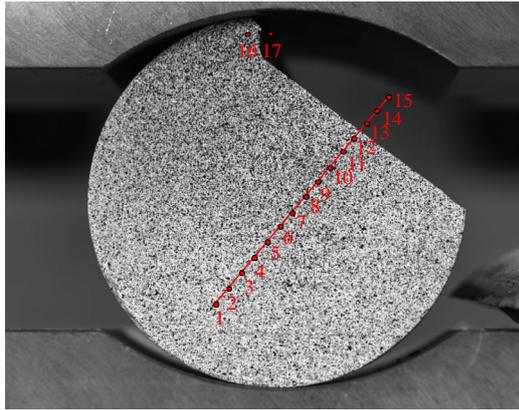
第 II 加载阶段中，载荷点 3(峰值的 80%左右)表现为受层理面影响的明显的各向异性位移场分布(见图 5(e))，越往后变形局部化越明显。随着载荷的继续施加，试件右上方沿层理面方向产生位移差较大，裂纹沿右上方层理面萌生、扩展和滑移，最终形成破裂面。

第 III 加载阶段中，当荷载达到峰值(载荷点 4)以后，试样沿着层理面继续滑移扩展，位移场局部化更加严重(见图 5(f))，随着裂纹不断扩展，应变能不断释放，之后在很短的时间内，裂纹迅速贯通，承载力亦呈现出陡降现象，试件发生沿层理面滑移的整体破坏，其破坏模式如图 6(a)所示。

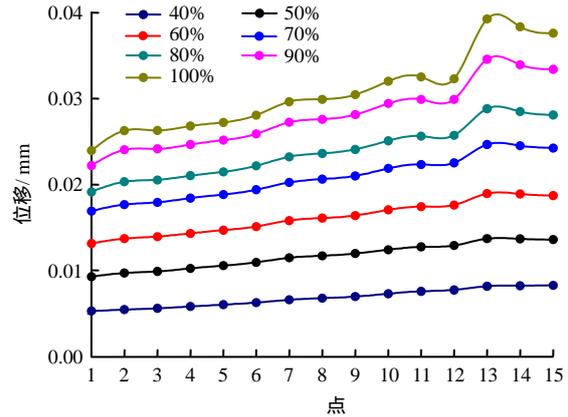
为更清楚地描述裂纹萌生、扩展和滑移的时机，

沿试样垂直层理方向取若干标识点(见图 6(a))，研究这些点在不同加载时刻的切向位移演化过程(见图 6(b))，将加载起始对应的位移作为基准帧分析，可以看出，在加载到峰值的 40%和 50%左右，切向位移保持连续，此时，沿层理方向没有出现剪切滑移的情况，加载到 60%峰值开始，标识点 12 和 13 的位移开始出现波动，表明在这两个点之间的层理有微裂纹产生，并开始滑移，随着载荷的继续施加，位移的这种跳跃越来越明显，层理的微裂纹继续扩展、滑移，直至峰值，位移跳跃达到最大值，试样产生宏观破裂。

图 7(a)是标识点 12 和点 13 沿层理方向(即切向)的位移演化过程，在加载初期，两点的切向位



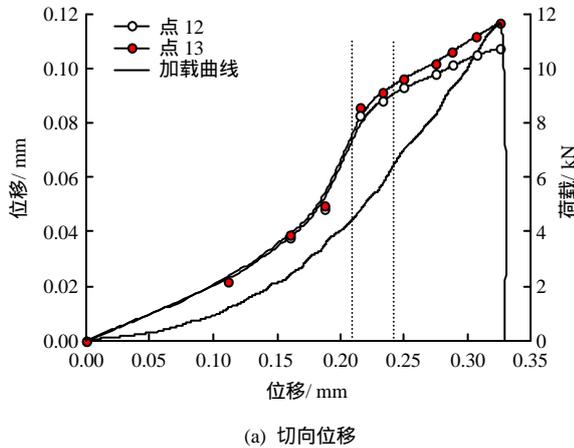
(a) 试样破裂模式和标识点示意图



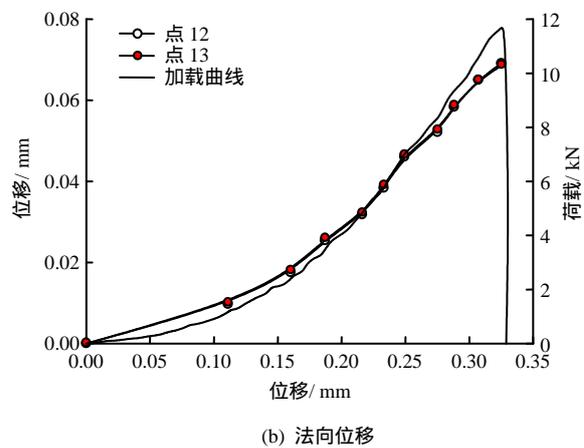
(b) 不同加载时刻点的位移曲线图(40%表示峰值的40%,其他同)

图6 层理倾角为60°试样标识点示意图和相应的不同加载时刻点的位移曲线图

Fig.6 Sketch of mark points on specimen and curves of displacement at different loading points corresponding to different times



(a) 切向位移



(b) 法向位移

图7 试件特征点12和13的加载全程位移演化

Fig.7 Displacement evolution of the mark point 12 and mark point 13 during loading process

移几乎重合,表明两者之间没有发生错动,第阶段,点12和点13的切向位移开始出现分离,表明层理上、下层之间有错动产生,归因于微裂纹的扩展和层理两边的剪切滑移,随着载荷的继续施加,裂纹继续发展,至峰值附近,裂纹迅速与点16和点17之间产生的裂缝贯通,并对整体承载力造成严重影响,峰值时刻,应变能不断释放,承载力迅速降低。另外,从图7(b)可知,加载全程标识点12和点13之间的法向方向的位移基本重合,表明层理间没有发生张拉破坏,试样主破裂基本属于剪切滑移破坏。

进一步分析其他层理角度的页岩试样,可以看出,0°试件在峰值的20%萌生裂缝;15°试件在加载前期萌生裂缝;30°试件在峰值50%左右萌生裂缝;60°试件在50%~70%萌生裂缝;75°试样在峰值80%左右萌生裂缝;90°试件在峰值80%左右

试件上部产生水平裂缝,峰值95%左右萌生竖向主裂缝。随加载方向与层理面夹角的增加,主裂缝萌生时间大体呈增加的趋势,而裂缝从萌生、扩展到贯通所用时间逐渐减少。

5 页岩裂缝萌生与扩展的空间特征

由于岩石的非均质性,页岩在加载过程中,裂纹会在不同的位置产生,而且,在主破裂发生前,在其他部位会有裂纹产生,例如,图8为层理倾角为90°试样的破裂过程,可以看出,除了贯通的竖向裂纹外,在其他位置还产生了水平裂纹,哪个位置先出现裂纹,以及什么样的破裂类型(张拉、剪切或者压剪等)对于研究页岩的破裂机制有重要意义,为此,与前述类似,在裂纹的两侧布置标识点(见图8(c)),研究这些点在加载过程的切向和法向位移的演化,通过两侧位移的变化,可以大致判断

破裂的类型。

图 9 为层理倾角为 90°试样不同位置裂纹两侧标识点全程切向和法向位移演化图，在加载到 30% 峰值点左右，标识点 1 和 2 处的法向位移开始出现分离，表明有张拉微裂纹产生，该微裂纹一直到峰值 80% 以前，都处于张开状态，80% 后裂纹切向位移开始分离，表现裂纹两边的滑移行为。点 11 和点 12 处也是在 30% 峰值左右出现张拉裂纹，但直到 97% 峰值左右，才表现滑移行为。点 9 和点 10 处的

张开破裂发生在峰值 80% 左右，标识点 7 和点 8 处的张拉破裂出现在 90% 峰值附近，标识点 3 和点 4 处，点 5 和点 6 处的张拉破裂在峰值 97% 附近，随后试样发生宏观破裂，承载力降低。由此可见，试样在巴西劈裂破坏过程中，主裂纹的破坏从靠近端部的两侧开始萌生，逐步向中间扩展，采用 DIC 方法获得细观变形场的演化特征，可以清楚地描述这一破裂过程，这是采用宏观的试验测试方法无法实现的。

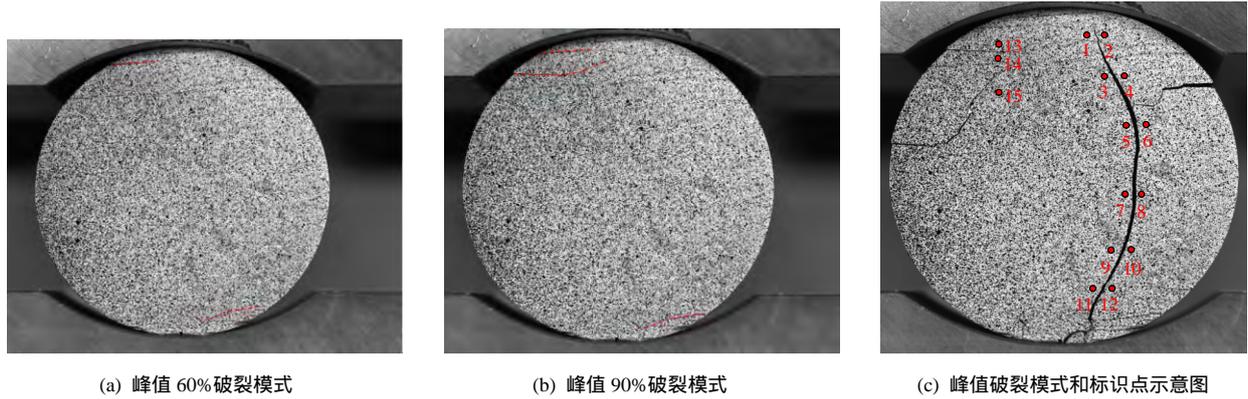
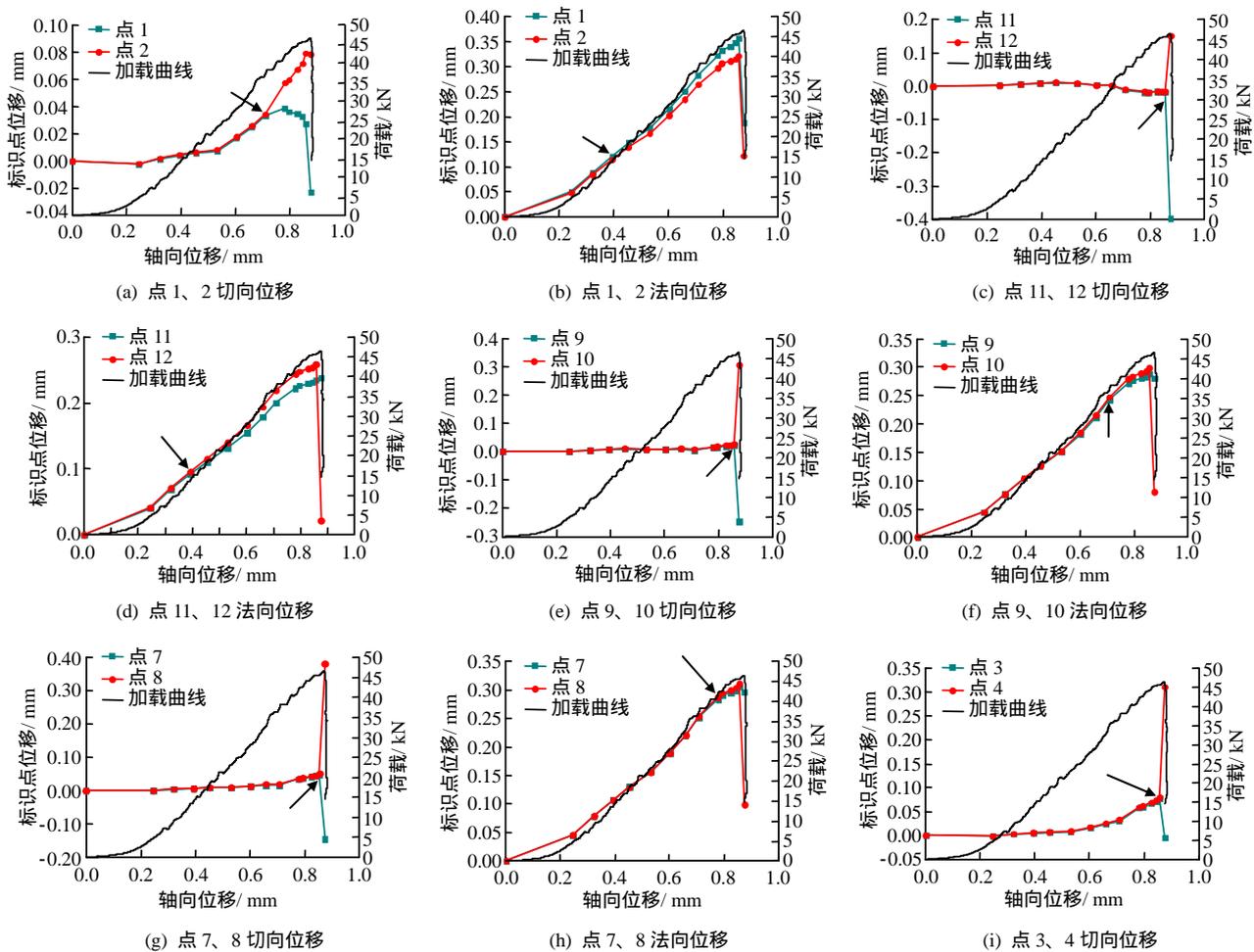


图 8 90°试样破坏过程

Fig.8 Failure process of specimen with 90° bedding plane



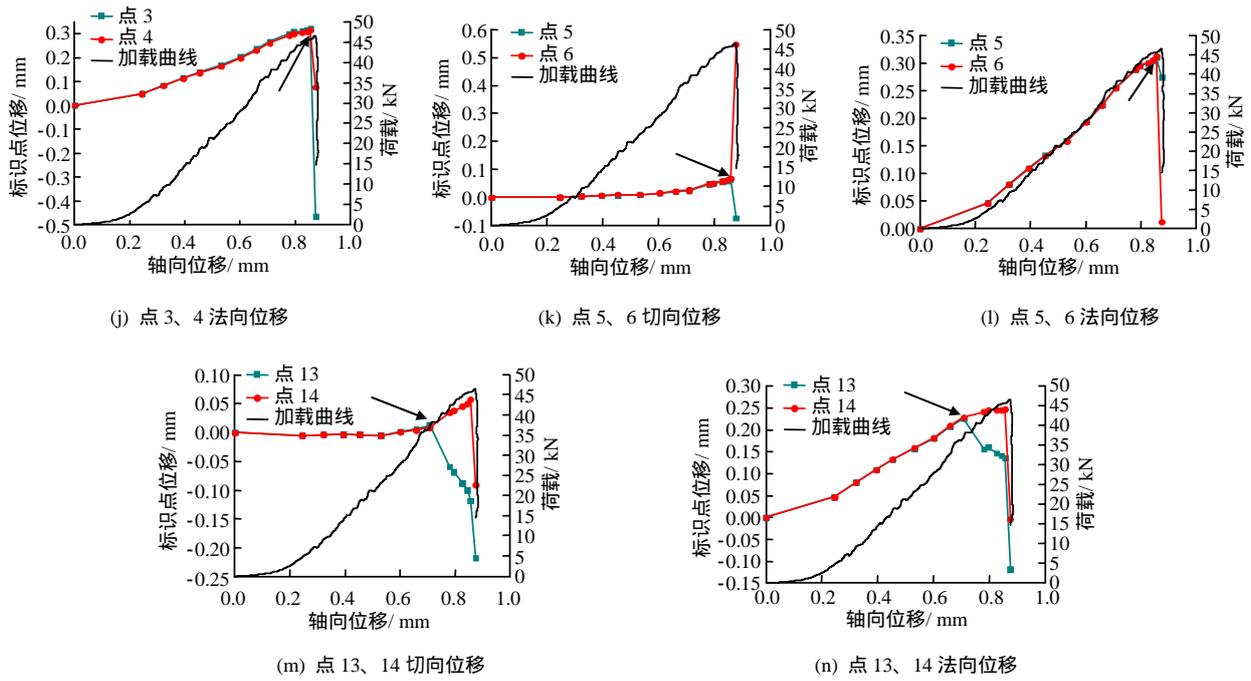


图 9 标识点位移演化 (图中箭头表示裂纹两侧位移开始出现分离)
 Fig.9 Displacement evolution of mark points

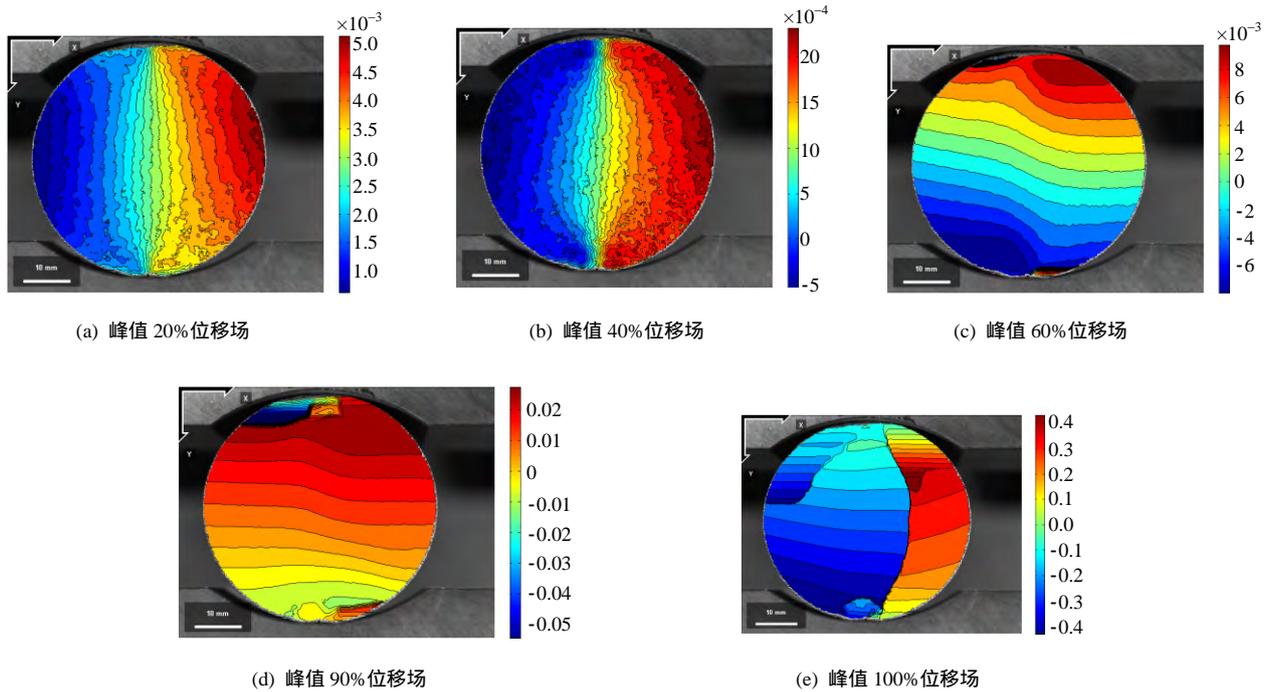


图 10 90°试件加载过程不同峰值载荷处的位移云图 (单位: mm)

Fig.10 Displacement nephograms of specimen with 90° of bedding plane corresponding to different peak loads (unit: mm)

除了主裂纹之外,在试件端部和其他位置也出现了破裂,例如,标识点 13 和点 14 之间在峰值 70%左右产生剪切裂缝,80%峰值附近,该裂纹出现张拉行为,但这些破裂的出现,对主破裂的产生会有影响,但对试件承载力的影响较小。

图 10 为层理倾角为 90°的试件在加载过程不同峰值载荷处的位移云图,可以看出,峰值 20%与

峰值 40%,试件整体位移均匀变化,峰值 60%时刻,试件上、下端部位移出现局部化,表明有微破裂产生,峰值 90%时刻,上、下端部破裂明显,峰值时刻主裂缝迅速贯穿,并伴有其他位置裂缝产生。图 8 揭示了破裂过程。

进一步分析其他层理角度的页岩试样,可以得出所有角度试件基本从试件端部萌生裂缝,然后沿

层理面扩展。90°试件水平裂缝从试件上端沿层理面扩展，竖向裂缝从试件端部萌生逐步向试件中部扩展。各角度试件从试件端部萌生裂缝，逐渐沿层理面向试件中部发展。各角度试件破坏类型存在一定差异性，0°试件并非完全是单纯的张拉破坏模式，而是剪切和张拉破坏共同作用的结果。15°试件既有张拉破坏，又存在剪切破坏，30°~60°试件主要为沿层理面的滑移破坏。90°试件水平裂缝并非完全是单纯的张拉破坏模式，而是剪切和张拉破坏共同作用的结果。90°试件竖向裂缝为张拉破坏。

6 结 论

(1) 页岩的巴西劈裂强度（或承载力）随层理与加载方向角度的增大而逐渐增大。

(2) 随加载方向与层理面夹角的增加，裂缝萌生时间逐渐增加，裂缝从萌生、扩展到贯通所用时间逐渐减少。

(3) 层理倾角不同，主裂缝的破裂位置也不同，如0°试件产生竖向主裂缝，主裂缝通过中心或者中心附近位置，但随着层理倾角的增加逐渐，受层理的影响，主裂缝破裂的位置逐渐偏离中心位置而向试件外侧发展；层理倾角为90°的试件，初始破裂也是远离试样的中心位置，在峰值附近突然产生竖向拉伸主裂纹。所有角度试件基本从试件端部萌生裂缝，并沿层理面扩展。90°试件水平裂缝从试件上端沿层理面扩展，竖向裂缝从试件端部萌生逐步向试件中部扩展。

(4) 各角度试件破坏类型存在一定差异性，除90°试件竖向主裂缝为张拉破坏外，随加载方向与层理面夹角的增加，各加载角度试件的主破裂模式从张拉剪切破坏逐渐过渡为剪切滑移破坏。0°并非完全是单纯的张拉破坏模式，而是剪切和张拉破坏共同作用的结果。15°试件既有张拉破坏，又存在剪切破坏，30°~60°试件主要为沿层理面的滑移破坏。90°试件水平裂缝并非完全是单纯的张拉破坏模式，而是剪切和张拉破坏共同作用的结果。

参 考 文 献

[1] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 393 - 399.
TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guang-yuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011,

30(2): 393 - 399.
[2] BUSTIN R M. Barnett shale play going strong[J]. *AAPG Explorer*, 2005, 26(5): 4 - 6.
[3] NIANDOU H, SHAO J F, HENRY J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1): 3 - 6.
[4] VERNIK L, NUR A. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks[J]. *Geophysics*, 1992, 57(5): 727 - 735.
[5] TAVALLALI ABBASS, VERVOORT ANDER. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47: 313 - 322.
[6] CHO JUNG-WOO, KIM HANNA, JEON SEOKWON, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 50: 158 - 169.
[7] 高春玉, 徐进, 李忠洪, 等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1360 - 1364.
GAO Chun-yu, XU Jin, LI Zhong-hong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng mountain tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1360 - 1364.
[8] 刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3616 - 3623.
LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3616 - 3623.
[9] 刘运思, 傅鹤林, 饶军应, 等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 785 - 791.
LIU Yun-si, FU He-lin, RAO Jun-ying, et al. Research on Brazilian disc splitting tests for anisotropy of slate under influence of different bedding orientations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 785 - 791.
[10] 谭鑫, HEINZ KONIETZKY. 含层理构造的非均质片麻岩巴西劈裂试验及离散单元法数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 938 - 946.

- TAN Xin, HEINZ KONIETZKY. Brazilian Split tests and numerical simulation by discrete element method for heterogeneous gneiss with bedding structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 938 - 946.
- [11] KUILAA U, DEWHURSTB D N, SIGGINSB A F, et al. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale[J]. **Tectono Physics**, 2011, 503(1/2): 34 - 44.
- [12] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(5): 874 - 883.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, et al. Anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 874 - 883.
- [13] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(3): 609 - 616.
- HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 609 - 616.
- [14] 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 Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, 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.
- [15] BOBET A. Modelling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000, 33(2): 119 - 139.
- [16] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture Coalescence in Rock-type Materials under Uniaxial and Biaxial Compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(7): 863 - 888.
- [17] 马少鹏, 赵永红, 金观昌, 等. 光测方法在岩石力学试验观测中的应用评述[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(10): 1794 - 1799.
- MA Shao-peng, ZHAO Yong-hong, JIN Guan-chang, et al. Review on application of optical measurement methods to experimental inspection of rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1794 - 1799.
- [18] YAMAGUCHI I. A Laser-speckle strain gage[J]. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, 1981, 14: 1270 - 1273.
- [19] RANSON W F, PETERS W H. Digital image techniques in experimental stress analysis[J]. **Optical Engineering**, 1982, 21(3): 427 - 431.
- [20] QING Lin. Identification of rock fracture by imaging techniques[Ph. D. Thesis D]. Minneapolis: The University of Minnesota, 2010.
- [21] LIN QING, LABUZ JOSEPH F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2013, 60: 235 - 245.
- [22] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(1): 170 - 177.
- SONG Yi-min, MA Shao-peng, YANG Xiao-bin, et al. Experimental investigation on failure of rock by digital speckle correlation methods[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 170 - 177.
- [23] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 35(4): 763 - 770.
- ZHAO Cheng, TIAN Jia-shen, MATSUDA Hiroshi, et al. Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 35(4): 763 - 770.
- [24] LI DIYUAN, WONG LOUIS NGAI YUEN. The brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46: 269 - 287.
- [25] WONG LOUIS NGAI YUEN, ZOU CHUNJIANG, CHENG YI. Fracturing and failure behavior of carrara marble in quasistatic and dynamic Brazilian Disc tests[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47: 1117 - 1133.
- [26] BING Pan. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. **Applied Optics**, 2009, 48(8): 1535 - 1542.