

# 含软弱结构面石灰岩巴西劈裂破坏模式研究<sup>①</sup>

李子旋<sup>1</sup>, 雷涛<sup>\*1,2</sup>, 叶海旺<sup>1,2</sup>, 赵昀<sup>1</sup>, 王其洲<sup>1,2</sup>

(1. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

**摘 要:** 软弱结构面的分布形式和力学特性是影响岩体中劈裂破坏模式的关键因素。以秭归县某矿山石灰岩为研究对象, 进行了不同软弱结构面倾角  $\theta$  的巴西劈裂实验, 研究了石灰岩中软弱结构面倾角对岩石试样破坏模式的影响, 并探讨了相应的破坏机理。结果表明: 软弱结构面对试样的劈裂破坏模式具有控制性作用, 随着结构面倾角的增大 ( $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内), 试样破坏模式大体上可分为 4 种, 其中,  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $15^\circ$  时为岩石基质以及结构面拉裂破坏,  $\theta$  为  $30^\circ$  时为岩石基质的拉裂破坏以及结构面的拉裂和滑移破坏,  $\theta$  为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时为结构面的剪切滑移破坏,  $\theta$  为  $90^\circ$  时为结构面的拉裂破坏; 同时, 发现当  $\theta$  为  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时, 结构面对试样破坏机理的影响与层理面类似, 而当  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $30^\circ$  时, 试样的破坏机理会更为复杂。

**关 键 词:** 裂隙岩体; 巴西劈裂; 软弱结构面; 抗拉强度; 破坏模式

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号:

## Brazilian splitting failure modes of limestone with weak structural planes

LI Zixuan<sup>1</sup>, LEI Tao<sup>\*1,2</sup>, YE Haiwang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun<sup>1</sup>, WANG Qizhou<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment; 2. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The distribution and mechanical characteristics of weak structural planes are the key factors affecting the splitting failure modes of rock mass. Taking the limestone of a mine in Zigui County as the research object, the Brazilian splitting experiments under different dip angles ( $\theta$ ) of weak structural planes were carried out. The effects of dip angle of weak structural planes in limestone on failure modes of rock were studied, and the corresponding failure mechanism was discussed. The results show that the weak structural planes plays a control function to the failure modes of rock. With the increase of dip angles of structural planes (in the range of 0 to 90 degrees), the failure modes of specimens can be classified into 4 types. Among them, the failure mode of specimens for  $\theta=0^\circ$  and  $15^\circ$  is the tensile failure of matrix and structural plane; the failure mode of specimens for  $\theta=30^\circ$  is the tensile failure of matrix and the tensile and shear slip failure of structural plane; the failure mode of specimens for  $\theta=45^\circ$  and  $60^\circ$  is the shear slip failure of structural plane; the failure mode of specimens for  $\theta=90^\circ$  is the tensile failure of structural plane. Besides, when  $\theta=45^\circ, 60^\circ$  and  $90^\circ$ , it is found that the influence of the structural planes on the failure mechanism of the specimens is similar to the bedding planes, but when  $\theta=0^\circ, 15^\circ$  and  $30^\circ$ , the failure mechanism will be more complex.

**Key words:** Fractured rock mass; Brazilian splitting test; weak structural planes; tensile strength; failure modes

一般来说, 岩体内部存在着层理、节理以及裂隙等各种软弱结构面, 这些结构面的力学性质通常要弱于岩石基质, 是岩体在外力作用下发生破坏的主要影响因素之一。同时, 由于极易发生拉伸破坏, 软弱结构面的分布特征和力学条件对岩体的拉伸破坏具有控制性作用。

谭鑫等<sup>[1]</sup>利用 UDEC 数值模拟研究了片麻岩的拉伸破坏机制。叶海旺等<sup>[2-3]</sup>研究了板岩劈裂强度和破坏模式随层理夹角的变化规律, 并通过 PFC 数值模拟, 分析了圆盘试件破坏过程的能量演化规律。

李夕兵等<sup>[4]</sup>通过巴西劈裂试验和 PFC 数值模拟, 研究了硬岩与软岩交界面角度对岩石破坏形式的影响。Bona Park 等<sup>[5]</sup>建立了嵌入光滑接触面的颗粒 DEM 模型, 研究了层面角度对岩石劈裂强度、弹性模量等力学参数的影响。Peitao Wang 等<sup>[6]</sup>通过巴西劈裂实验和 PFC2D 数值模拟, 并运用“方向性”指标对层状麻粒岩受拉破坏过程的各向异性和方向性进行了评价。赵明等<sup>[7]</sup>基于改进刚体弹簧方法, 通过数值模拟研究了预制裂隙倾角对岩石劈裂破坏裂纹扩展的影响。

① 收稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51704218); 湖北省自然科学基金(编号: 2016CFB336); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: 185208011, 2018-zy-81)

作者简介: 李子旋(1993-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。

通讯作者: 雷涛(1983-), 男, 四川宜宾人, 博士, 讲师, 主要从事岩石动力破坏与安全高效采矿方面的教学与研究。

André Vervoort<sup>[8]</sup>、Gholam-Reza Khanlari<sup>[9]</sup> 等通过巴西劈裂试验,研究了层理倾角对岩石的劈裂强度和破坏特性的影响规律。Mehdi Mokhtari 等<sup>[10]</sup>研究了岩石中层合物和天然裂隙角度对岩石劈裂强度和破坏方式的影响规律。侯鹏等<sup>[11]</sup>研究了岩石破坏过程能量随层理角度的变化规律。S.W.Zhang 等<sup>[12]</sup>研究了页岩的劈裂强度和裂纹扩展随层理倾角的变化规律。刘运思<sup>[13]</sup>、董辉<sup>[14]</sup>、杨志鹏<sup>[15]</sup>和 Jun Wang<sup>[16]</sup>等人则分别总结了不同种类层状岩体的劈裂破坏模式。刘凯德<sup>[17]</sup>和刘晓峰<sup>[18]</sup>等则针对煤岩的层理特征,研究了不同层理方向和加载速率条件下煤岩的拉伸破坏形态和抗拉强度离散特征。

上述研究在揭示含结构面岩体的拉伸破坏规律和机理方面取得了很多有价值的成果,但是这些研究对象的结构面主要还是胶结程度较好的层理面,而对含有泥质、碎屑等软弱充填物结构面岩体的研究相对较少。基于此,本文选取矿山现场的含软弱结构面石灰岩,制作为含有不同结构面倾角的试样,通过室内劈裂试验研究不同条件下石灰岩劈裂破坏模式,为进一步完善含结构面岩体的力学特性和破坏机理提供基础数据。

### 1 试验设备及方法

本次试验试样为取自秭归县某水泥用矿山的石灰岩,进过切割、钻孔、打磨,得到厚度为 25mm,直径为 50mm 的圆盘试件,其上、下两端面不平行度小于 0.1mm,端面与侧面垂直角度误差不超过 0.25°,符合岩石力学试验规程标准。

试验所用加载设备为 TAW—2000 微机控制三轴试验机,该试验机最大竖向加载力为 2000KN,加载位移精度为±0.5%FS,位移分辨率为 5μm。试验前,按实际需求在试样上粘贴好多组应变片,加载时,同步采用 DH3816N 静态应变测试系统进行应变数据的采集。图 1 (a) 为试样加载示意图。

试验时,规定软弱结构面倾角  $\theta$  为结构面方向与水平方向的夹角,如图 1 (b) 所示。为了研究结构面倾角变化对试样破坏的影响,按照  $\theta$  为 0°、15°、30°、45°、60°、90° 将试样分为 6 组,每组 3 个试样。试验加载时,先以 0.5mm/min 的位移控制加载到 200N,再以 50N/S 的荷载控制加载,直到试样发生破坏。

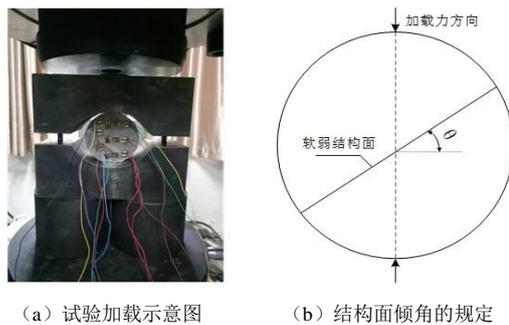


图 1 试验加载及倾角  $\theta$

### 2 试验结果分析

#### 2.1 不同倾角结构面劈裂破坏的应变分析

为了研究石灰岩的破坏特征,通过在圆盘试样上粘贴应变片来进行探究。图 2 为应变片的粘贴示意图。综合每组试验应变片所测得的数据,选取其中具有代表性的三种情况,整理如下,其中图 3 为三种圆盘试样的应变片布置图,图中红色线条代表软弱结构面所在位置,图 4 为圆盘上各应变片所测得应变-时间曲线。



图 2 应变片粘贴示意图

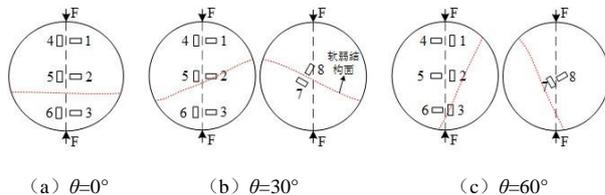
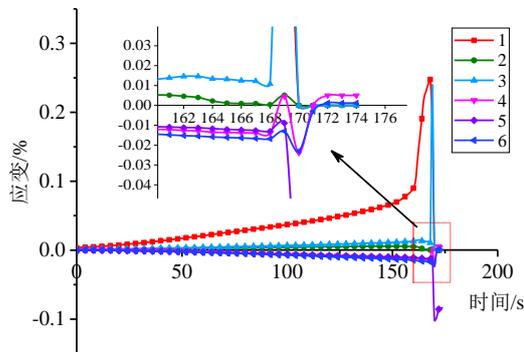


图 3 应变片布置图



(a)  $\theta=0^\circ$

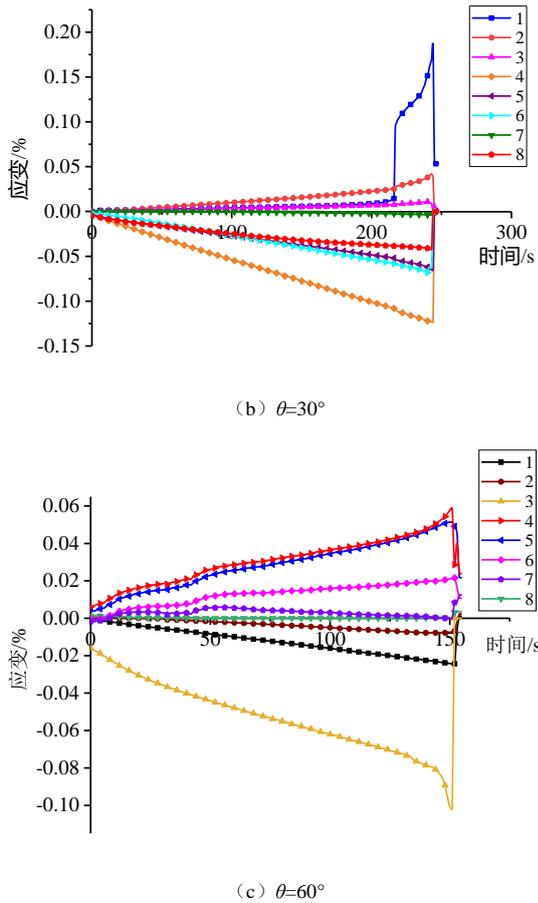


图 4 不同结构面倾角下石灰岩的应变-时间曲线

由图 4 (a) 可知, 1、2、3 号应变片主要测量水平方向的应变, 4、5、6 号应变片主要测量竖直方向的应变。开始阶段, 各应变片应变数值都在增加, 但 1 号应变片增长明显更快, 这说明岩石试样在受拉破坏时, 是先在在上端发生破坏, 后逐渐向下扩展, 以形成贯通的裂缝。在加载后期, 1 号应变片的数值又突然增加, 这是因为在加载过程中, 主裂纹右侧的次生裂纹进一步扩展, 形成了一条通过 1 号应变片的裂缝。由图 4 (a) 局部放大图还可以看到, 2、3、4、5、6 号应变片在曲线末端都有一段发生突然变化的部分, 其中 3 号和 5 号最为明显, 这是因为随着岩石试样竖直拉裂纹的产生, 继续加载时, 由于结构面强度较低, 而岩石中间压应力又较大, 岩石绕结构面中心发生转动, 水平软弱结构面受到拉应力并在其两端发生拉破坏, 随后逐渐向中间扩展, 形成贯通的拉裂缝。

由图 4 (b) 可知, 1、2、3 号应变片主要测量水平方向的应变, 4、5、6 号应变片主要测量竖直方向的应变。开始阶段, 各应变片应变数值都在增加, 但 4、5、6 号应变片增长得更快, 这主要是因为 4、5、6 号应变片连线正好是试件受拉开裂的裂缝所在, 而 4 号的增长速度又明显高于 5 号和 6 号,

这说明岩石试样在受拉破坏时, 是先在在上端发生破坏, 后逐渐向下扩展, 以形成贯通的裂缝, 这可能与加载方式有关 (加载泵控制夹具上升, 其与上端压板接触时, 试样上端先受力)。7 号和 8 号分别位于裂缝两端, 而 8 号又位于竖直开裂缝上, 因而其应变变化相对更为明显, 岩石在发生沿中心线的开裂破坏后, 继而发生沿软弱结构面的剪切滑移破坏, 因而, 7 号应变片的变化很小。

由图 4 (c) 可知, 1、2、3 号应变片主要测量竖直方向的应变, 4、5、6 号应变片主要测量水平方向的应变。其中, 3 号应变片变化最为明显, 这是因为 3 号应变片位于软弱结构面上, 随着加载力的逐渐增大, 沿结构面方向的滑移力逐渐增大而大于其抗滑力, 岩石沿结构面发生滑移破坏, 当滑移面经过 3 号应变片时, 应变片突然受压, 因而其应变值在曲线末端又突然增大。7 号和 8 号应变片都位于软弱结构面右侧, 又位于试样中心, 因而加载时, 主要受拉应力, 又试样并未发生沿中心的拉裂破坏, 因而应变值较小。

当  $\theta=90^\circ$  时, 此时软弱结构面方向与加载方向一致, 当加载时, 由于软弱结构面物理力学性质很差, 当夹具与上端固定压板一接触, 岩石很快就会发生破裂, 导致应变片来不及采集数据。这说明了结构面中充填物力学性质很差, 其抗拉强度较小。

## 2.2 软弱结构面对劈裂破坏模式的影响

图 5 为石灰岩试样的破坏结果, 岩石试样的破坏过程可以总结为以下 4 种破坏模式。

(1) 拉裂-拉裂破坏。如图 5 (a)、(b) 所示, 当  $\theta=0^\circ$  和  $15^\circ$  时, 发生此种破坏。加载初期, 结构面所受剪应力很小, 不会发生剪切破坏, 而试样中心岩石基质所受拉应力逐渐增大, 先达到岩石的抗拉强度发生开裂, 形成贯通的竖直裂纹, 随着加载的继续进行, 结构面两端发生拉破坏, 从而形成沿结构面方向的水平的裂纹。

(2) 拉裂-滑移破坏。如图 5 (c) 所示, 当  $\theta=30^\circ$  时, 发生此种破坏。加载时, 结构面上产生的法向力较大, 而沿结构面方向的滑动力较小, 从而抑制了滑移的发生。随着加载的进行, 试样中心受拉首先发生开裂, 这导致结构面处的抗滑力瞬时降低, 随后便发生了滑移破坏。

(3) 沿结构面的滑移破坏。如图 5 (d)、(e) 所示, 当  $\theta=45^\circ$  和  $60^\circ$  时, 一般发生此种破坏。加载时, 沿结构面方向的力大于其法向方向的力沿结构面的分力, 因此试样首先会产生沿滑动面滑移的趋势, 而产生微小的滑移, 随着进一步的加载, 加载

力沿结构面方向的分力大于结构面的抗滑力，而此时岩石基质受到的拉应力小于岩石的抗拉强度，从而只发生沿结构面的剪切滑移破坏。

(4) 沿结构面内软弱充填物的拉裂破坏。当  $\theta=90^\circ$  时，如图 5 (f) 所示，竖向主裂纹沿着软弱结构面发展，可以认为，是软弱结构面内的充填物

所受拉应力超过其抗拉强度，而发生破坏，形成贯通的竖直裂纹。此时，所求得的“抗拉强度”可以认为是石灰岩和充填物交界面的抗拉强度。

石灰岩的 4 种破坏模式如图 6 所示，图中红线代表软弱结构面，蓝线代表圆盘最终的破坏裂纹，箭头代表圆盘试件的破坏类型。

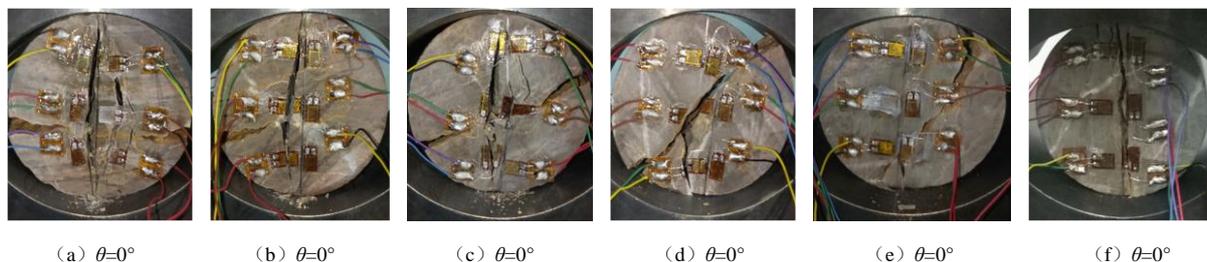


图 5 不同结构面角度下的石灰岩破坏试件

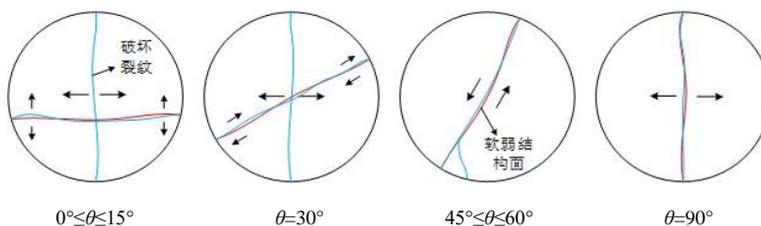


图 6 石灰岩的 4 种破坏模式

### 3 讨论

当圆盘试样中的结构面为胶结较好的层理面时，由于层理面和岩石基质胶结较好，可以利用单弱面理论，并结合摩尔-库伦破坏准则来进行解释。分析时，将圆盘中心点的应力进行分解，可求得剪切破坏面上正应力和剪应力的公式，再联立 Claesson 等<sup>[19]</sup>提出的横观各向同性巴西圆盘中心的应力公式，建立方程即可求得剪切破坏面处的正应力和剪应力，最后根据摩尔-库伦准则，得到圆盘沿层理破坏和沿基质破坏的判别条件。

刘运思等<sup>[20]</sup>利用上述理论，并结合如图 7 所示的应力莫尔圆，对岩石中弱面的破坏条件进行了分析。认为，当  $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_1$  时，层理面应力点  $M$  位于层理面强度曲线之上，圆盘发生层理面的剪切破坏；而当  $0^\circ \leq \theta \leq \theta_2$  或  $\theta_1 \leq \theta \leq 90^\circ$  时， $M$  点位于强度曲线之下，层理不发生剪切破坏，圆盘发生拉裂破坏。并据此得出板岩的 4 中破坏模式：当  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  时，为基质的拉裂破坏；当  $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  时，为结构面的剪切破坏；当  $75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  时，为结构面的拉裂破坏。

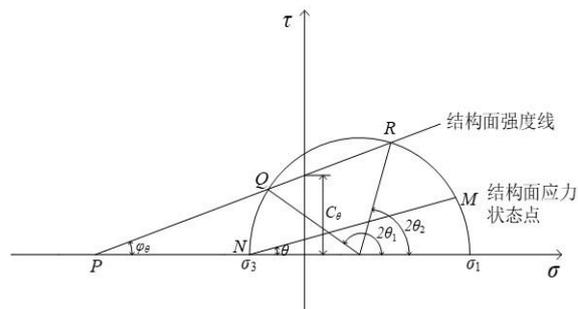


图 7 层理面的应力莫尔圆

当圆盘试样中的结构面为含有泥质、碎屑等充填物的软弱结构面时，由于软弱充填物和岩石基质胶结程度较差，其对圆盘试样的破坏模式的影响也不尽相同。结合图 5、图 6，可知，当  $\theta=90^\circ$  时，为结构面的拉裂破坏；当  $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  时，为结构面的剪切破坏，当  $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$  时，圆盘试件都有基质的拉裂破坏。这与层理对圆盘破坏机制的影响是相同的，可运用上述理论进行解释。

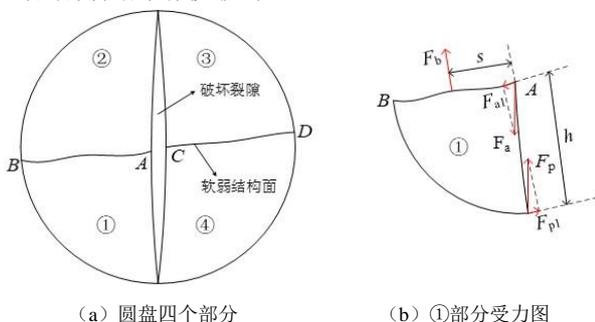
但当  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  时，圆盘试样除了有基质的拉裂破坏，还有结构面的拉裂破坏，这是因为此时结构面方向的剪应力小于其抗剪强度，因而不会发生沿结构面的剪切破坏。随着加载的进行，岩石基质受到的拉应力超过其抗拉强度，首先发生基质的拉裂破坏，形成贯通的竖直裂纹，此时，圆盘试样被分割成两个独立的个体，当继续加载时，由于软弱结构面的存在，可分成如图 8 (a) 所示的①②③④四个部分，图 8 (b) 为①部分的受力图，其中  $F_a$  为

②部分对其的压力， $F_b$  为结构面与岩石基质之间的黏结力， $F_p$  为加载下颚对其的压力。由材料力学理论，①部分在 A 点受到力矩表示如下：

$$M = F_{p1}h - F_b s \quad (1)$$

其中， $F_{p1} = F_p \sin \theta$

由于岩石基质与结构面的胶结程度较差，随着加载力的增加， $F_{p1}h$  很快就会大于  $F_b s$ ，从而  $M > 0$ ，岩石绕 A 点逆时针转动，结构面受到拉应力，首先在 B 点发生拉破坏，并逐渐向内扩展，形成沿结构面的贯通裂纹。此时，由于结构面倾角  $\theta$  较小，在结构面方向的分力  $F_{a1}$  小于其抗滑力，因此不会发生沿结构面的滑移破坏。



(a) 圆盘四个部分 (b) ①部分受力图

图 8 结构面拉裂破坏机理

当  $\theta=30^\circ$  时，圆盘试样除了发生基质的拉裂破坏，还发生结构面的拉裂和剪切破坏。其破坏过程如图 9 所示，首先是岩石基质受拉发生破坏，形成竖直裂纹，随着继续加压，与图 8 类似，岩石各部分分别绕 A 点和 C 点转动，结构面受到拉应力，并在两端发生拉裂破坏，形成沿结构面方向的裂纹，此时由于结构面发生了部分破坏，其内充填物的黏聚力减小，导致其抗滑力减小，随着加载力的继续增加，当沿结构面方向的剪切力大于抗滑力时，就会发生结构面的剪切滑移破坏。



(a) 中心起裂 (b) 结构面局部拉裂 (c) 结构面剪切破坏

图 9  $\theta=30^\circ$  试件破坏过程

## 4 结论

(1) 随着软弱结构面倾角的变化，试样的破坏模式主要有 4 种。当  $\theta=0^\circ$  和  $15^\circ$  时，试样发生基质的拉裂破坏，形成竖直的贯通裂纹；当  $\theta=30^\circ$  时，试样先发生基质的拉裂破坏，随后在结构面两端发

生拉裂破坏，最后发生沿结构面的剪切滑移破坏；当  $\theta=45^\circ$  和  $60^\circ$  时，试样发生沿结构面的剪切滑移破坏；当  $\theta=90^\circ$  时，试样发生结构面的拉裂破坏。

(2) 当  $\theta=45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时，软弱结构面对岩石试样劈裂破坏模式的影响与层理面类似，岩石的破坏机理相似；但当  $\theta=0^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $30^\circ$  时，岩石的破坏机理更为复杂。

## 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 叶海旺, 宁卫星, 雷涛, 等. 层理板岩巴西劈裂破坏模式的方向效应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(9): 91-97.
- [3] 叶海旺, 潘俊峰, 雷涛, 等. 基于 PFC 的层状板岩巴西劈裂渐进破坏能量分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(7): 38-42.
- [4] 李夕兵, 罗琳, 黎崇金. 考虑岩石交界面方向效应的巴西劈裂试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(9): 1295-1304.
- [5] Bona Park, Ki-Bok Min, Nicholas Thompson, 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.
- [6] Peitao Wang, Meifeng Cai, Fenhua Ren. Anisotropy and directionality of tensile behaviours of a jointed rock mass subjected to Numerical Brazilian tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 139-153.
- [7] 赵明, 姚池. 含预制裂隙的均质岩石巴西劈裂过程数值模拟[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 87-91.
- [8] André Vervoort, Ki-Bok Min, Heinz Konietzky, et al. Failure of transversely isotropic under Brazilian test conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 343-352.
- [9] Gholam-Reza Khanlari, Mojtaba Heidari, Ali-Asghar Sepahigero, et al. Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian tests[J]. Engineering Geology, 2014, 169: 80-90.
- [10] Mehdi Mokhtari, Azra N. Tutuncu. Impact of laminations and nature fractures on rock failure in Brazilian experiments: A case study on Green River and Niobrara

- formations[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 79–86.
- [11] 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.
- [12] S.W.Zhang, K.J.Shou, X.F.xian, et al. Fractal characteristics and acoustic emission of anisotropic shale in Brazilian tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 298–308.
- [13] 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.
- [14] 董辉, 张海明, 傅鹤林, 等. 基于巴西劈裂试验的顺层板岩边坡“滑移-拉裂”破坏研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(3): 94–100.
- [15] 杨志鹏, 何柏, 谢凌志, 等. 基于巴西劈裂实验的页岩强度与破坏模式研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3447–3455.
- [16] Jun Wang, Lingzhi Xie, Heping Xie, et al. Effect of layer orientation on acoustic emission characteristics of anisotropic shale in Brazilian tests[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 1120–1129.
- [17] 刘凯德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 3(2): 308–316.
- [18] 刘晓辉, 戴峰, 刘建峰, 等. 考虑层理方向煤岩的静动巴西劈裂试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10): 2099–2105.
- [19] J.Claesson, B.Bohlooli. Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39: 991–1004.
- [20] 刘运思, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 基于单弱面理论对板岩巴西劈裂试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1775–1780.