

# 剪切过程中岩石节理宏观力学特征研究

郇久阳, 张志强, 李 宁

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 岩石节理剪切过程中, 节理面局部细观破坏控制着节理剪切强度与破坏过程。借助离散元软件 PFC(Particle Flow Code)建立了不同起伏角规则岩石节理试样, 在编制了伺服模块的基础上, 模拟了试样在不同法向应力下的直剪试验。通过监测剪切位移和剪力, 对节理试样在不同法向应力下的剪切应力-剪切位移曲线规律和剪切应力峰值特征进行了细致讨论。基于 PFC 内嵌的 fish 语言, 编制了裂纹扩展监测模块, 从细观角度描述了岩石试样的破坏模式。试样破坏主要集中在节理凸起附近, 主要分为滑移破坏、凸起中部剪断破坏和凸起根部剪断破坏三种, 破坏模式和规模受节理起伏度以及法向应力影响较大。将剪切应力变化曲线和裂纹扩展曲线综合分为四个阶段, 试样裂纹扩展对剪切应力增长有抑制作用, 但相比其存在滞后效应。试验过程中节理凸起抵抗剪切荷载的能力越强, 破坏程度会越大, 表现为试样产生裂纹数与剪切应力峰值符合正相关趋势。

**关键词:** 岩石节理; 起伏角; 裂纹扩展; 剪切过程; PFC; 破坏模式

**中图分类号:**

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)06-0852-08

## Research of macro- and meco-mechanical characteristics of rock joints during shear process

HUAN Jiuyang, ZHANG Zhiqiang, LI Ning

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** During shear process, shear strength and failure process of joint are controlled by local micro damage. Model of rock joint having different sloop angle are generated by discrete element software PFC, and direct shear tests under different normal stresses are conducted on the basis of servo module. The law of shear stress-shear displacement curves of samples and characteristics of peak shear stresses under different normal stresses has been carefully discussed by monitoring shear displacement and shear force. In addition, the monitoring module of crack propagation has been prepared by fish language embedded in PFC, and failure mode of rock joint is described from the microscopic point of view during the shearing process. The failure of sample is mainly concentrated on the vicinity of joint, and they are mainly divided into three kinds including slip failure, shear failure in the central of asperity and shear failure in the root of asperity. The failure mode and scale are greatly influenced by the sloop angle of joint and normal stress. Change curve of shear stress and crack growth curve are divided into four stages integrally. It is found that the growth of shear stress is inhibited by crack growth in the sample, but there is a lag effect. During the test, the stronger ability to resist the shear load, the greater damage degree will be. Results show that crack number and peak shear stress are in accordance with the positive correlation trend.

**Key words:** rock joint; sloop angle; crack propagation; shear process; PFC; failure mode

岩体内存在着错综复杂的节理是其区别于完整岩块的重要特征, 前人研究表明岩体中的节理控制着岩体的变形及稳定性<sup>[1-3]</sup>。最早 Patton<sup>[4]</sup>在总结了大量含节理岩体的剪切试验结果的基础上, 发现节理表面的粗糙起伏是影响节理抗剪强度的重要因素。之后 Barton<sup>[5-6]</sup>在室内倾斜试验以及节理剪切试验基础上对节理面的粗糙起伏进行了重新定义, 提出了著名的粗糙度系数 JRC。

近些年大量学者围绕节理的强度、变形特性

进行了许多有益的研究。物理试验方面, 李海波等<sup>[7]</sup>研究了不同剪切速率对节理强度特征的影响; 沈荣明等<sup>[8]</sup>采用水泥砂浆材料制作了不同起伏度的节理试样, 得到了节理的抗剪强度参数及经验公式; 罗战友等<sup>[9]</sup>对岩石节理峰值摩擦角应力效应进行了相应的物理试验研究。数值研究方面, 沈荣明等<sup>[10]</sup>采用有限元软件 ANSYS 对节理的变形特性进行了模拟; 周峰等<sup>[11]</sup>采用离散元软件 UDEC 在考虑节理吻合度的基础上进行了相应的数值试验;

收稿日期: 2016-12-04

修改稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572246, 51179153); 陕西省教育厅科研计划资助项目(17JS091)

第一作者: 郇久阳(1990—), 男, 博士生, 主要从事岩体裂隙力学及渗流分析方面的研究。E-mail: 424139375@qq.com

宋英龙<sup>[12]</sup>在离散元 PFC 基础上研究了不用接触状态节理的力学性质, 规律与物理试验结果吻合较好. 黄达等<sup>[13]</sup>利用 PFC 模拟了贯通节理的剪切试验, 对剪切破坏模式进行了定义.

根据前人研究可知目前对于岩石节理宏观力学性质的研究较多, 而对于剪切过程中宏观力学性质的细观力学机制的系统研究还很少, 例如节理剪切过程中节理凸起的破碎模式和微裂纹扩展及剪切应力变化之间的对应关系等. 另外部分学者仅对某一特定节理进行了研究, 并没有考虑节理表面形态差异对其力学性质的影响. 鉴于此, 本文在现有成果的基础上, 采用离散元 PFC 对含规则节理岩石试样进行模拟, 研究节理起伏角和法向应力不同时试样的宏观、细观破坏特征以及剪切过程中微裂纹扩展规律, 本文拟从宏观、细观两个方面对比揭示节理试样剪切破坏的本质规律.

1 直剪试验模拟方法

1.1 试验模型方案及力学参数标定

岩石节理试样模型示意如图 1 所示, 模型尺寸为 100 mm×100 mm, 颗粒半径符合  $R_{\max} \sim R_{\min}$  的平均分布,  $R_{\min} = 0.2 \text{ mm}$ ,  $R_{\max} = 0.4 \text{ mm}$ , 孔隙率  $prop = 0.14$ , 总颗粒数为 30 062 个.

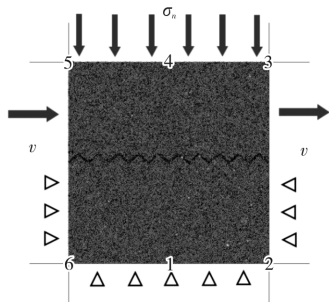


图 1 岩石节理直剪试验模型  
Fig. 1 Rock joint model of the direct shear test

上剪切盒由 3#、4#、5# 墙组成, 下剪切盒由 1#、2#、6# 墙组成. 试验过程中, 固定住下剪切盒, 给定上部剪切盒一定速度使其向右移动, 即可模拟直接剪切过程. 试样方案中锯齿型节理起伏角  $\alpha$  分别取  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$ , 尺的宽度定义为 10 mm, 数量为 10 个. 试验中剪切应力通过记录特定计算步 2# 墙与 6# 墙的水平合力与剪切面积的比值来获取, 相应的, 剪切位移定义为 5# 墙的水平位移, 根据后处理程序即可得到节理岩石直剪试验完整的剪应力应变关系.

通过模拟岩石试样单轴压缩试验来对试样的宏观参数进行标定, 压缩试验设为无围压条件, 试样宽度取 50 mm, 高度取 100 mm. 试样模型由颗粒和接触组成, 本文模拟岩石材料采用接触黏结模型中的平行黏结模型(Parallel Bond), 其不仅可以模拟颗粒间的力, 还可以模拟力矩. 通过对细观参数进行调整, 得到试样单轴压缩应力应变曲线如图 2 所示, 试样的抗压强度  $\sigma$  为 127.04 MPa, 弹性模量为 33.79 GPa. 数值试样参数与自然界中岩石的力学性质吻合, 细观参数如表 1 所示. 根据试样的单轴抗压强度选取节理直剪试验的法向压力分别为 6, 9, 12 和 15 MPa, 取上剪切盒的加载速度为 0.2 m/s.

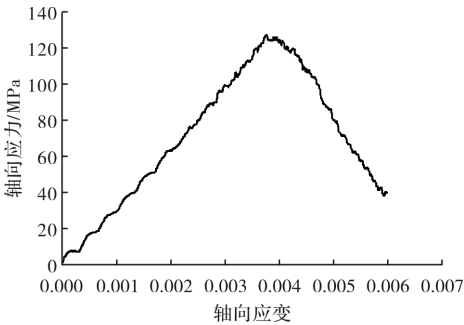


图 2 单轴压缩试验应力应变曲线  
Fig. 2 Stress-strain curve of uniaxial compression test

表 1 试样细观参数  
Tab. 1 Sample mesoscopic parameters

参数	$W-Kn/$ $N \cdot m^{-1}$	$Kn/$ $N \cdot m^{-1}$	$Ks/$ $N \cdot m^{-1}$	$pb-Kn/$ $N \cdot m^{-1}$	$pb-Ks/$ $N \cdot m^{-1}$	$pb-ns/Pa$	$pb-ss/Pa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$fric$
试样	$1.1 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	$4.8 \times 10^{13}$	$4.8 \times 10^{13}$	$1.12 \times 10^8$	$1.12 \times 10^8$	2 650	1.35
节理		$1.1 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	0	0	0	0	2 650	0

1.2 伺服控制原理

本文研究内容为岩石节理在固定法向荷载边界条件下的直接剪切力学响应, 但是由于在 PFC 中不能直接给墙体施加荷载, 因此只能通过添加伺服控制函数控制顶部墙体(图 1 中 4#)的加载速

度  $v^{(4\#)}$  来实现, 伺服控制函数由软件内置的 FISH 语言编写而成. 节理剪切过程命令每循环一次就会自动调用一次伺服函数来减小 4# 墙上的实际法向应力( $\sigma^{measure}$ )与目标法向应力( $\sigma^{require}$ )的差值, 目的是使 4# 上的实际法向应力始终保持恒定. 试样顶

部墙体的加载速度  $v^{(4\#)}$  为:

$$v^{(4\#)} = G(\sigma^{measured} - \sigma^{require}) = G\Delta\sigma \quad (1)$$

式中:  $G$  为伺服控制参数. 计算 4# 的最大力增量为:

$$\Delta F^{(4\#)} = k_n^{(4\#)} N_c v^{(4\#)} \Delta t \quad (2)$$

式中:  $k^{(4)}$  为与 4# 墙接触颗粒的平均刚度, 为这些颗粒的数目, 4# 墙上的最大应力增量为力增量与墙面积  $A$  的比值, 在本文中  $A$  等于试样宽度  $b$ . 因此 4# 墙的最大应力增量为

$$\Delta\sigma^{(4)} = \frac{k_n^{(4\#)} N_c v^{(4\#)} \Delta t}{A} \quad (3)$$

4# 墙的最大应力增量的绝对值应该小于实测法向应力与目标法向应力差值的绝对值, 这样可以保证剪切过程节理试样的整体稳定性, 因此采用一个放松系数  $\alpha$  ( $0 \sim 1$ ), 有:

$$|\Delta\sigma^{(4\#)}| < \alpha |\Delta\sigma| \quad (4)$$

将式(1)和(3)代入式(4)有:

$$\frac{k_n^{(4\#)} N_c G |\Delta\sigma| \Delta t}{A} < \alpha |\Delta\sigma| \quad (5)$$

综合可知, 伺服控制参数  $G$  的计算公式为

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^{(4\#)} N_c \Delta t} \quad (6)$$

将  $G$  代回式(1)便可以得到顶部墙体的加载速度  $v^{(4\#)}$ , 即可实现恒定法向荷载的施加.

## 2 直剪试验宏观力学性质分析

### 2.1 剪切应力-剪切位移曲线规律

图 3 为具有代表性的剪切应力-剪切位移曲线, (a) 图为法向应力为 12 MPa 条件下不同起伏角的情形, (b) 图节理起伏角为  $30^\circ$  时不同法向应力的情形. 从(a)图中可以看出, 随着剪切位移的增加, 剪切应力首先快速增加, 节理起伏角对剪切应力增长速度没有影响. 当剪切位移达到 0.1 mm 时, 剪切应力增长速度开始下降, 节理起伏角越大, 下降地越晚、越慢. 这一过程一直持续到剪切应力达到峰值, 导致节理起伏度越大, 剪切应力峰值也越大. 随后剪切应力出现大幅度的降低, 降低速度基本不受节理起伏度的影响, 最后在一定范围内保持不变, 随即进入峰后残余阶段.

(b) 图中剪切一开始, 剪切应力增长很快, 法向应力对剪切应力增长速度有微弱影响. 当剪切位移增加至 0.1 mm 剪切应力增长速度开始降低, 法向应力越大, 降低的越缓慢, 直到剪切应力达到峰值. 之后, 剪切应力下降, 速度受法向应力影响较小. 最后残余阶段, 平均剪切应力与节理起伏度和法向应力均近似保持正相关趋势, 即节理起伏

度越大, 残余剪切强度越大. 法向应力越大, 残余剪切应力也越大.

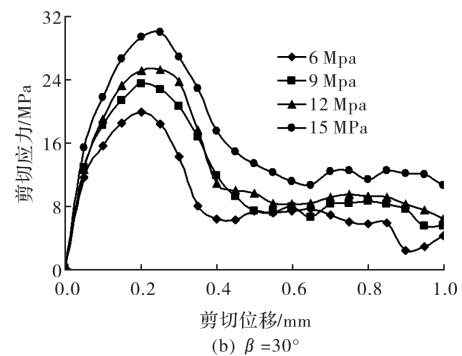
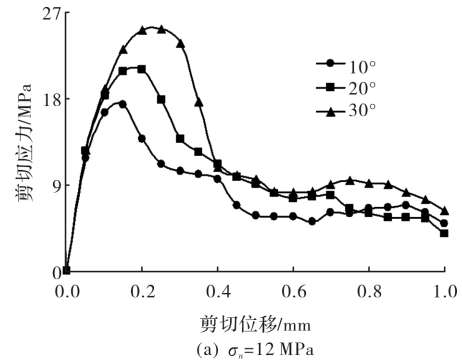


图 3 剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stresses-shear displacement curves

### 2.2 剪切应力峰值特征

从岩石节理剪切应力-剪切位移曲线中获取剪切应力峰值数据汇总在表 1 中. 试验数据表明剪切应力峰值随着节理起伏角的增加有明显的增大趋势, 当起伏角从  $10^\circ$  增加至  $30^\circ$  时, 剪切应力峰值在法向应力为 6、9、12 和 15 MPa 时分别增加 57.4%、49.6%、45.8% 和 41.6%, 平均增加 48.5%. 增加趋势明显, 且法向应力越小, 起伏角增大引起的剪切应力峰值增加幅度越大. 不同法向应力情况下的变化趋势如图 4 所示, 采用线性拟合得到的相关系数平方  $R^2$  平均高达 0.984.

表 2 剪切应力峰值汇总

Tab. 2 Summary of peak shear stress

起伏角/ $^\circ$	法向应力/MPa			
	6	9	12	15
10	12.60	15.67	17.29	21.21
20	15.15	18.39	20.96	26.22
30	19.82	23.44	25.20	30.04

另外可知, 岩石节理试样的剪切应力峰值随法向应力的增加而明显增加, 保持正相关趋势. 当法向应力从 9 MPa 增加至 15 MPa 时, 起伏角为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  时剪切应力峰值分别增加 68.39%、73.11% 和 51.52%, 平均增加约 64.3%. 不同起

伏角的情形如图5所示, 可以看出法向应力与剪切应力峰值之间保持着很高的相关性。

### 3 直剪试验细观力学性质分析

#### 3.1 起伏度对试样裂纹扩展规律的影响

在PFC岩石试样模型中, 当作用在颗粒之间的应力大于表1中定义的法向黏结强度(pb-ns)或者切向黏结强度(pb-ss)时, 接触将破坏并产生裂纹。通过编写特定的命令流来追踪含节理岩石试样在剪切过程中产生的微裂纹。当节理凸起中有裂纹贯通并与节理面组成连通通道时, 则表明有岩石破碎体产生, 采用cluster簇集合方法可以追踪剪切过程试样碎屑的产生情况, 实时监测试样的破坏规律。

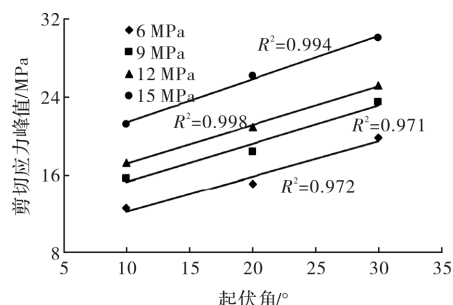


图4 不同法向应力条件下起伏角与剪切应力峰值关系曲线

Fig. 4 Relation curves of slope angle vs. peak shear strength under different normal stresses

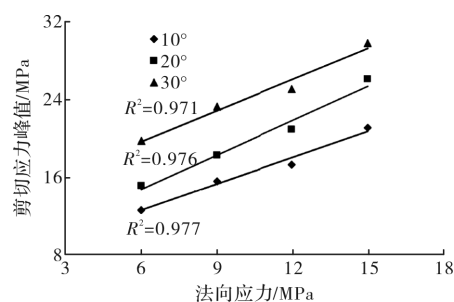


图5 不同起伏角条件下法向应力与剪切应力峰值关系曲线

Fig. 5 Relation curves of normal stresses and peak shear strength under different slope angles

图6为岩石节理试样剪切完成后的局部直观裂纹扩展图, 左图中, 黄色为节理面壁岩石, 红色为节理, 绿色为拉裂纹, 蓝色为剪裂纹。右图中, 绿色为节理面壁岩石, 红色为破碎体。白色均为间隙。图(a)~(c)给出了试样法向应力为12 MPa时不同起伏度的情形。

可以看出岩石节理试样在剪切后裂纹主要产生在节理附近, 主要以拉裂纹为主。节理凸起破坏类型主要分为3种情形, 分别为滑移破坏、凸起中部剪断破坏, 凸起根部剪断破坏。节理起伏度为10°时, 节理凸起主要以滑移形式破坏, 裂纹主要集中在节理表面, 形成的碎裂体极少。节理起伏度为20°时, 节理凸起发生剪断破坏的比例增大, 主要表现为凸起中部剪断破坏, 节理处已有些许小

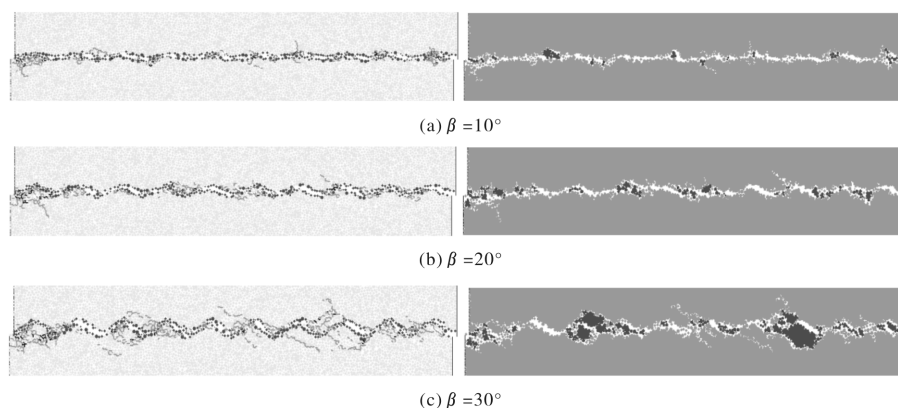


图6 不同起伏角节理试样裂纹扩展图( $\sigma_n = 12$  MPa)

Fig. 6 Crack propagation diagram of jointed samples under different slope angles ( $\sigma_n = 12$  MPa)

块破碎体产生。节理起伏度为30°时, 节理凸起发生滑移破坏的比例大大减小, 产生了凸起根部破坏, 伴随部分凸起发生中部剪断破坏。相应地, 节理处产生了大块破碎体。从图中规律来看, 节理起伏度增加, 剪切过程中试样产生的裂纹数越多, 凸起发生整体剪断的情况增多, 产生的破碎体越多, 节理凸起的破坏程度越大。

图7所示为节理起伏度不同、法向应力为12

MPa时试样产生裂纹数随剪切位移的变化曲线。试样裂纹扩展曲线分为四个阶段, 以曲线( $\beta$ 为30°)为例, 剪切位移为0~0.05 mm为初始阶段, 试样内并没有裂纹产生。

剪切位移为0.05~0.2 mm为起裂阶段, 试样内裂纹开始扩展且速度持续增加。剪切位移为0.2~0.35 mm为高速扩展阶段, 此阶段试样内裂纹扩展速度最快, 节理凸起破坏最严重。最后剪切位

移为 0.35~0.1 mm 时为低速扩展阶段, 进入低这一阶段节理裂纹扩展曲线出现明显拐点, 凸起破坏速度降低, 但裂纹仍稳定增长。

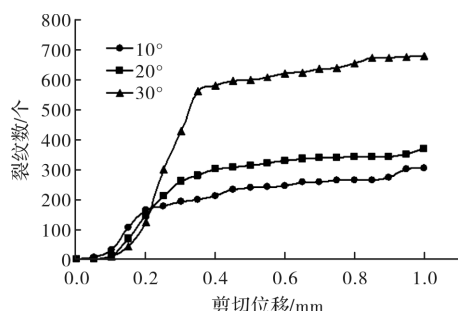


图7 不同起伏角时节理试样裂纹数目与剪切位移关系曲线

Fig. 7 Relation curves between number of cracks and shear displacement in sample under different slope angle

节理起伏度不同, 除了第一阶段在剪切位移

区间上保持不变, 均为 0~0.05 mm, 后续三个阶段的持续区间有所不同。节理起伏度越小, 二、三阶段的持续区间越短, 第三阶段相应较长, 第三阶段裂纹扩展速度也越小。当剪切位移在 0~0.05 mm 时, 试样内均没有裂纹产生。剪切位移在 0.05~0.2 mm 时,  $\beta$  为 10° 时试样裂纹扩展曲线最早进入第三阶段, 因此裂纹扩展速度相对较快。其次为  $\beta=20^\circ$  的情形, 最后为  $\beta=30^\circ$  的情形。剪切位移为 0.2 mm~1 mm 时, 节理起伏为 10°、20° 和 30° 时, 裂纹扩展曲线分别在剪切位移 0.2 mm、0.3 mm 和 0.35 mm 处出现拐点, 之后裂纹扩展速度明显降低并稳定持续到剪切结束, 且不受节理起伏度大小的影响。节理起伏度  $\beta$  越大, 剪切过程试样产生裂纹数越多, 主要影响裂纹扩展曲线的第三阶段。

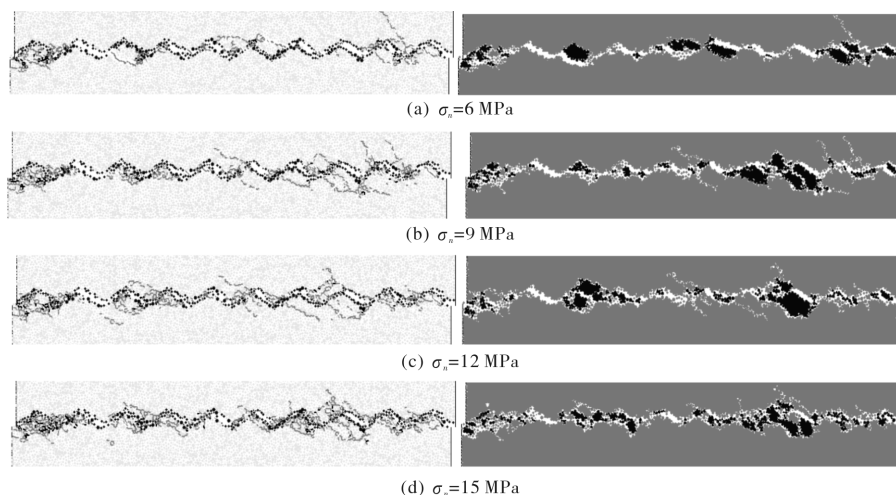


图8 不同法向应力节理试样裂纹扩展图( $\beta=30^\circ$ )

Fig. 8 Crack propagation diagram of jointed samples under different normal stresses( $\beta=30^\circ$ )

### 3.2 法向应力对试样裂纹扩展规律的影响

图8给出了试样节理起伏角为 30°、法向应力分别为 6、9、12 和 15 MPa 时剪切完成后的裂纹扩展直观图以作代表性说明, 其他结果规律类似。不同法向应力条件下, 试样节理凸起破坏程度不同, 破坏形式如 3.1 中所述。

裂纹扩展图中, 随着法向应力的增大, 节理凸起的破坏程度加剧, 主要表现为三种典型情况。其一, 在较低法向应力下发生滑移破坏的凸起在较大法向应力下发生了剪断破坏; 其二, 在较低法向应力发生中部破坏的凸起在较高法向应力下延凸起顶部至根部的破坏加剧。其三, 在较低法向应力发生根部破坏的凸起延凸起根部至顶部的破坏程度加大。岩石节理凸起破坏随机性较大, 其他情形暂不做分析。从试样破碎图中可以看出, 第

二、三种破坏加剧情形导致的直观现象是节理凸起破碎体比例增大, 破碎体的碎裂程度加大, 破碎体平均尺寸减小。图9给出了法向应力不同时试样内裂纹数随剪切位移的变化曲线。

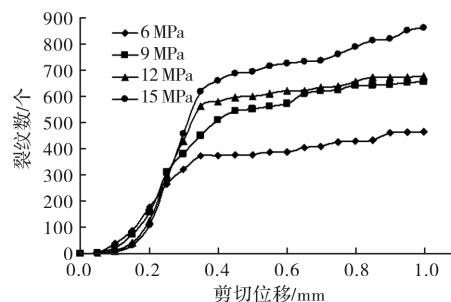


图9 不同法向应力节理试样裂纹数目与剪切位移关系曲线

Fig. 9 Relation curves between number of cracks and shear displacement in sample under different normal stresses

结合 3.1 中对裂纹扩展曲线四个阶段的划分原则,可以看出在剪切位移为 0~0.05 mm 时试样内均没有裂纹产生.法向应力越小,裂纹扩展曲线第二阶段(起裂阶段)的持续区间越短,进入第三阶段(高速扩展阶段)越快,因此在剪切位移在 0.05~0.25 mm 期间,法向应力越小时裂纹整体扩展越快.裂纹扩展曲线的第三阶段,法向应力越大,裂纹扩展速度越大,在剪切位移从 0.25 mm 继续增加至 0.35 mm 时,裂纹数已经与法向应力保持正相关趋势.随后各裂纹扩展曲线分别在不同剪切位移出现拐点进入第四阶段(低速扩展阶段),这个阶段各个曲线裂纹扩展速度相同,不受法向应力的影响.法向应力对试样裂纹数的影响主要集中在裂纹扩展曲线的第三阶段,与起伏度的影响规律一致.

#### 4 剪切应力变化与裂纹扩展关系讨论

图 10 给出了直剪试验剪切应力与裂纹数随剪切位移的变化曲线,取法向应力分别为 9 和 15 MPa 以及起伏角分别为 20°和 30°时共 4 种情况以作示意.结合 3.1、3.2 中对裂纹扩展曲线的阶段划分原理,对图 10 中剪切应力及裂纹数两者随剪切位移的曲线的相互影响机制进行细致讨论.

图 10(a)~(d)中,剪切位移在 0~0.05 mm 时均为第一阶段,可看出试样内几乎没有产生裂纹,而此阶段对应的剪切应力增长速度却是剪切过程中最快的.第二阶段开始,试样内裂纹开始持续增

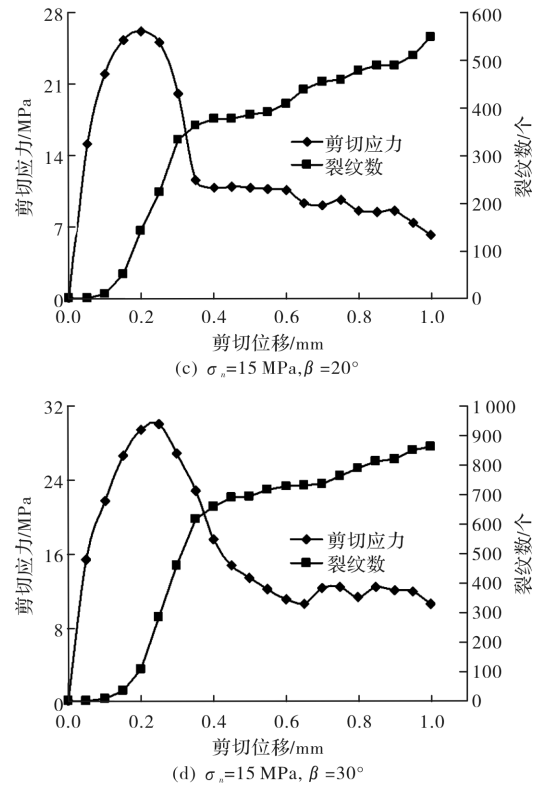
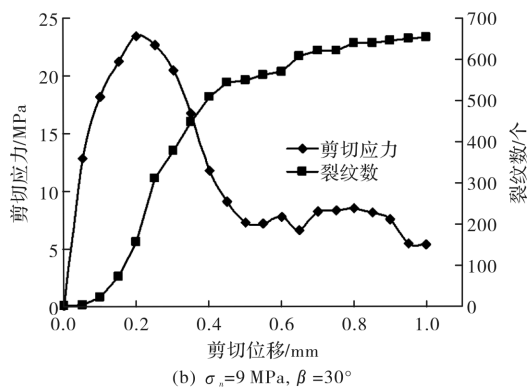
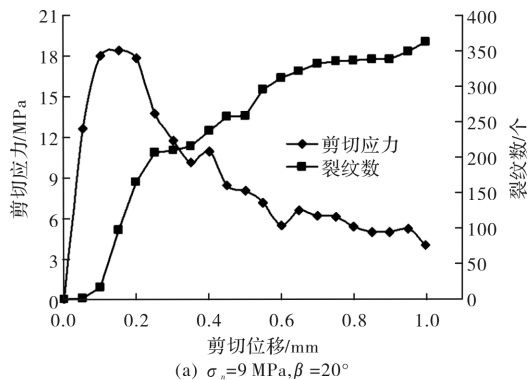


图 10 剪切应力及裂纹数随剪切位移变化曲线

Fig. 10 Change curves of shear stress and crack number with shear displacement

长,剪切应力也持续增大,但增长速度已经有部分降低.各图中此阶段的持续区间有所不同.

随后各图中裂纹扩展曲线均进入扩展阶段,从上文及图 10 中可知此阶段裂纹扩展速度是剪切过程中最快的.但是从剪切应力曲线可以发现,其增长速度出现大幅下跌,随后降为 0,此刻剪切应力达到峰值.之后,剪切应力开始出现急剧下降.各图中此阶段的持续区间有所差异,阶段末裂纹扩展出现明显拐点.最后阶段,首先剪切应力出现惯性式下降,之后进入残余阶段,在一定范围内保持恒定.而此阶段裂纹扩展速度较前阶段明显降低且基本不变,试样内裂纹数缓慢提高.

表 3 直剪试验产生的总裂纹数汇总

Tab. 3 Summary of total crack number produced in

起伏角/ $^\circ$	direct shear tests			
	法向应力/MPa			
	6	9	12	15
10	187	208	304	344
20	255	363	368	549
30	463	655	678	862

综合上述规律,二至四阶段剪切应力变化与裂纹扩展之间的关系密切,当把第三阶段剪切应力下降理解为增长速度降低时,可知试样内裂纹

发育对剪切应力的增长有抑制作用. 剪切过程中试样裂纹扩展较剪切应力变化有明显的滞后效应. 第一阶段, 剪切应力已经开始增长, 而试样内裂纹还未发育. 第三阶段中剪切应力已经达到峰值并开始下降, 而此时试样裂纹依然在迅速扩展.

从表2、3中提取共12组剪切试验产生裂纹数与对应的剪切应力峰值数据, 法向应力为6、9、12和15 MPa、节理起伏角为 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ , 图11给出了两者的之间关系曲线. 可以看出两者近似满足正相关趋势, 剪切过程中试样产生裂纹数越多, 对应的剪切应力峰值也越大, 线性关系拟合得到相关系数平方 $R^2$ 为0.876.

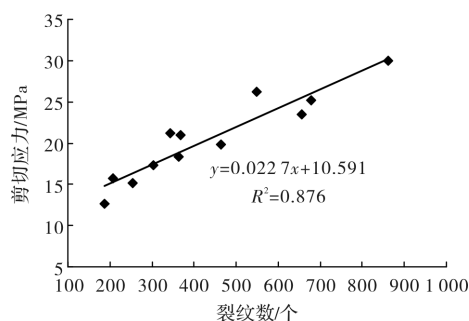


图11 直剪试验裂纹数与剪切应力峰值关系图

Fig. 11 Relationship between crack number and peak shear stress in direct shear tests

剪切初期, 岩石试样节理凸起吻合度很好, 剪切开始后凸起之间的挤压效应明显, 导致凸起产生裂纹、生成破碎块, 最终产生不同程度破坏. 这部分破坏的凸起在抵抗剪切应力时贡献很大, 从前文可知, 节理起伏度和法向应力增大时, 节理剪切应力峰值也相应增大, 裂纹扩展曲线第三阶段末生成的裂纹也越多. 第四阶段裂纹增长主要是节理残余凸起与破碎体之间的摩擦挤压产生的, 但增长速度均不受节理起伏度和法向应力的影响. 因此, 剪切过程试样产生的总裂纹数与节理起伏度和法向应力也保持正相关趋势.

岩石试样节理起伏度和法向应力越大, 节理凸起抵抗剪切应力的能力越强, 凸起的破坏程度越大. 抵抗剪切应力的能力表现为剪切应力峰值, 试样产生的裂纹数可以反映节理凸起的破坏程度. 因此试验产生裂纹数越多, 剪切应力峰值越大, 这即是岩石节理剪切破坏力学机制的内在表现.

## 5 结论

基于离散元 PFC 软件建立了含有规则节理的岩石试样, 很好地模拟了岩石节理直接剪切试验, 从宏观和细观方面分别对岩石节理的剪切力学机

制进行了探讨. 得到的结论主要如下:

(1) 试样剪切过程中, 节理起伏角和法向应力对剪切应力的变化速率有明显影响, 对应的剪切应力峰值与节理起伏角和法向应力保持正相关趋势.

(2) 剪切过程中试样裂纹主要产生在节理周围, 凸起的破坏情形分为滑移破坏、凸起中部剪断破坏以及凸起根部剪断破坏. 节理起伏度越大, 节理凸起发生剪断破坏的比例增加. 随着法向应力的增加, 节理凸起破坏程度加剧, 主要表现为三种典型情况.

(3) 裂纹扩展曲线有四个阶段, 最初阶段, 起裂阶段, 高速扩展阶段和低速扩展阶段. 高速扩展阶段裂纹扩展速度为剪切过程中最快, 受节理起伏度和法向应力的影响最大.

(4) 裂纹扩展在剪切过程中相比剪应力变化有滞后效应, 对剪应力增长有抑制作用. 剪切过程试样产生裂纹数与剪切应力峰值之间近似保持线性关系, 内在原因是节理凸起抵抗剪切荷载的能力越强, 凸起的破程度越大.

## 参考文献 References

- [1] 夏才初, 孙宗颀. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.  
XIA Caichu, SUN Zongqi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [2] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 不同应变速率下非贯通裂隙介质的力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 750-755.  
ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruolan, et al. Mechanical properties of fractured media containing intermittent fractures at different strain rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 750-755.
- [3] SCHNEIDER H J. The friction and deformation behaviour of rock joints[J]. Rock Mechanics, 1976, 8(3): 169-184.
- [4] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of the 1st Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon: [s. n.], 1966: 509-513.
- [5] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [6] BARTON N, BANDIS S. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock[C]// Proceedings of

- the 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics. Berkeley:[s. n.],1982:739-760.
- [7] 李海波,刘博,冯海鹏,等.模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J].岩土力学,2008,29(7):1741-1746,1752.  
LI Haibo, LIU Bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1741-1746, 1752.
- [8] 沈明荣,张清照.规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.  
SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713-719.
- [9] 罗战友,杜时贵,黄曼,等.岩石结构面峰值摩擦角应力效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1142-1148.  
LUO Zhanyou, DU Shigui, HUANG Man, et al. Experimental study of stress effect on peak friction angle of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1142-1148.
- [10] 沈明荣,张清照.规则岩体结构面的蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(z2):3973-3979.  
SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study on creep characteristics of regular rock mass discontinuity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(z2): 3973-3979.
- [11] 周峰,张鹏,王旭东,等.吻合度对节理力学特性影响的细观数值试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2015,37(2):85-90.  
ZHOU Feng, ZHANG Peng, WANG Xudong, et al. Influence of matching coefficient on joint mechanics characteristics based on meso-numerical analysis[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 37(2): 85-90.
- [12] 宋英龙,夏才初,唐志成,等.不同接触状态下粗糙节理剪切强度性质的颗粒流数值模拟和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2028-2035.  
SONG Yinglong, XIA Caichu, TANG Zhicheng, et al. Numerical simulation and test validation for direct shear properties of rough joints under different contact states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2028-2035.
- [13] 黄达,黄润秋,雷鹏.贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J].煤炭学报,2014,39(7):1229-1237.  
HUANG Da, HUANG Runqiu, LEI Peng. Shear deformation and strength of through-going saw-tooth rock dis-continuity[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1229-1237.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D (particle flow code in 2D) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group.

(编辑 吴海西)

(上接第851页)

- [11] 毛雪松,侯仲杰,孔令坤.风积砂水分迁移试验研究[J].水利学报,2010,41(2):142-147.  
MAO Xuesong, HOU Zhongjie, KONG Lingwei, et al. Experimental study on moisture migration of wind-blown sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 142-147.
- [12] ZHU Xianmo, LI Yushan, PENG Xianglin, et al. Soils of the loess region in China[J]. Geoderma, 1983, 29(3): 237-255.
- [13] GENUCHTEN Van M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [14] 王铁行,卢靖,岳彩坤.考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J].岩土力学,2008,29(1):1-5.  
WANG Tiehang, LU Jing, YUE Caikun. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 1-5.

(编辑 桂智刚)