

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.02.032

类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究

李晓锋¹, 李海波¹, 夏 祥¹, 刘 博¹, 冯海鹏²

(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.中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124)

摘 要: 节理岩体的剪切特性是主导岩体工程稳定性的关键因素。基于 PFC^{2D} 离散元颗粒流程序, 结合室内试验结果对比分析, 选取合理的细观参数进行数值模拟, 分别从细观角度研究了节理岩石的裂纹发展、能量转化及声发射现象等特性, 从宏观角度研究了节理岩石的强度模型和破坏形态。结果表明: 节理岩体主要呈现磨损和剪断两种破坏形态, 不同的破坏形态对应不同的强度模型; 随着剪切变形增加, 岩体沿节理面发生破坏, 弹性阶段以法向裂纹为主, 而塑性阶段切向裂纹起主导作用, 滑移区 R、P 裂纹贯通形成破碎带, 节理面产生较大滑移; 在应力达到峰值强度前, 边界能主要转化为应变能, 法向裂纹生成较多; 越过峰值强度后, 摩擦能快速增加, 并伴随大量切向裂纹产生。与室内试验结果相比, PFC^{2D} 较好地模拟了节理岩体剪切力学特性, 弥补了室内试验中无法进行细观特性研究的缺陷, 对于节理岩体后期研究提供了一些参考。

关 键 词: 类节理岩石; 节理; 直剪试验; PFC^{2D}; 裂纹

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 02 - 0583 - 09

Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test

LI Xiao-feng¹, LI Hai-bo¹, XIA Xiang¹, LIU Bo¹, FENG Hai-peng²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Guangdong Nuclear Power Station Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China)

Abstract: The stability of rock engineering is strongly dependent on the shear strength of jointed rock mass. Based on the particle flow code (PFC^{2D}), the reasonable mesoscopic parameters are selected in combination with experimental results to analyze the meso-properties of crack propagation, energy transmission, and acoustic emission phenomenon of jointed rock. The strength models and failure patterns of jointed rock are numerically simulated. The main research results are summarized as follows. Abrasive and shear failure patterns heavily exist in jointed rock, and different failure patterns are corresponding to different strength models. Rock mass is damaged along joint plane with the increase of shear deformation. Normal cracks prevail within elastic stage, whereas shear cracks dominate along the rough surface within plastic stage. The joint plane slides owing to appearance of crushed zone induced by the coalescence of R and P cracks. Boundary energy is mainly converted into strain energy and more normal cracks are generated prior to the peak shear strength. With the increase of shear stress, the friction energy grows rapidly and a large amount of shear cracks are produced at the same time. Compared with experiments, PFC^{2D} can be used to simulate the shear properties of jointed rock mass well, which remedies the challenge of simulating behaviors of jointed rock at meso-scale in the laboratory test and provides a useful reference for further research on direct shear tests of jointed rock mass.

Keywords: jointed rock; joint; direct shear test; particle flow code; crack evolution

1 引 言

节理作为不连续结构面广泛分布于天然岩体。岩体强度及变形特征主要受节理的力学特性影响, 在外荷载作用下, 节理两端出现应力高度集中, 萌

生次生裂纹, 裂纹发展并与岩桥断面贯通形成复合滑移面导致岩体发生破坏, 因此, 节理的力学特性常常是主导边坡、地下洞室等岩体工程稳定性的关键因素^[1-2]。

剪切强度和剪胀效应(法向变形)是研究节理

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No. 51025935); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB732001); 国家自然科学基金面上项目(No. 40872188)

This work was supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51025935) and National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2010CB732001) and National Natural Science Foundation of China (40872188).

第一作者简介: 李晓锋, 男, 1990 年生, 博士, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: xfliwhrsm@163.com

岩体力学特性的两个主要方面,其中剪切强度主要受节理的几何特性影响^[3]。通常用随机分布的起伏体定义节理的粗糙程度,李海波等^[4]研究了不同剪切速率下人工节理岩体的强度特性,并提出了考虑剪切速率的峰值剪切强度模型;沈明荣等^[5]通过规则齿形结构面的剪切试验,建立了剪切变形经验本构关系;Bandis等^[6]通过直剪试验,研究了节理剪切强度及变形的影响因素;杜守继^[7]、刘顺桂^[8]、白世伟^[9]等分别对不同变形历史条件、不同连通率、平行应力条件下的节理岩体破坏机制和强度特性进行了研究;夏才初^[10]、Jafari^[11]、Plesha^[12]等分别研究了起伏节理的剪切强度、剪切曲线及磨损效应,从一定程度上解释了起伏体的弱化机制和岩体的破坏过程。

室内试验是研究节理岩体的主要手段。直剪试验虽能够保持节理的天然状态并得到较为直观、准确的剪切参数,但无法从细观角度研究节理岩体的力学特性和破坏机制。数值模拟通过计算机建立试验模型,改变受力条件从而较为全面地研究节理的力学特性,能够克服室内试验节理几何特征多样性、不可重复性、成本高等难点。Indraratna^[13]、Vosniakos^[14]、Karami^[15]等分别采用离散元(DEM)和有限差分(FEM)/离散元(DEM)耦合法研究了节理的本构模型。上述方法虽然考虑了节理岩体的不连续性,但无法从细观角度解释起伏体的弱化机制及裂纹的演化过程。颗粒流离散元法(PFC)作为一种典型的细观数值模拟方法,在岩土工程中的运用日益广泛。Potyondy^[16]、Cho^[17]、Yoon^[18]等运用PFC分别从单轴、三轴和巴西劈裂试验研究了岩石的力学特性。Cundall^[19]、Wang^[20]等在此基础上考虑了节理影响并进行了岩体的直剪试验。

本文通过混凝土模拟试样进行起伏节理直剪试验,结合PFC^{2D}模拟其剪切受力过程,对照试验的剪应力-应变曲线选取合理的细观参数,从细观角度的裂纹演化、能量转化及声发射现象解释了节理的宏观破坏机制,并在此基础上研究了节理岩体强度本构模型和破坏形态。

2 节理强度本构模型及破坏形态

2.1 节理强度模型

节理的强度模型主要与法向应力、摩擦角、黏聚力及粗糙度等因素有关。Mohr-Coulomb准则最早被用以计算节理强度,Jaeger等^[21]则认为节理的剪切强度是一个关于摩擦角的函数,因此,忽略节理黏聚力 c ,得到简化的Mohr-Coulomb准则。

在此基础上,Patton^[22]通过锯齿形节理剪切试验,提出双线性强度理论:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_u + i) \quad \sigma_n < \sigma_T \quad (1)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi_r + c \quad \sigma_n > \sigma_T \quad (2)$$

$$\sigma_T = c / [\tan(\varphi_r + i) - \tan \varphi_r] \quad (3)$$

式中: σ_n 为法向应力; φ_u 为节理摩擦角; i 为起伏体的起伏角; φ_r 为节理的残余摩擦角, $\varphi_r < \varphi_u + i$; σ_T 为法向应力阈值。当法向应力较小时,在剪应力作用下锯齿间相互滑越;反之,锯齿间发生啃断破坏,此时需要考虑节理黏聚力。Jaeger等^[21]认为,实际节理的起伏度较为平缓,并无明显的拐点,并对上式进行修正。基于能量守恒原理,Ladanyi等^[22]提出了反映节理破坏特征的强度准则:

$$\tau = \frac{\sigma_n(1 - \alpha_s)(\dot{\nu} + t \tan \varphi_u) + \alpha_s S_R}{1 - (1 - \alpha_s)\dot{\nu} \tan \varphi_u} \quad (4)$$

$$\alpha_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1} \quad (5)$$

$$\dot{\nu} = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_2} \tan i \quad (6)$$

$$S_R = \sigma_c \frac{\sqrt{n+1}-1}{n} \left(1 + n \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^{0.5} \quad (7)$$

式中: α_s 为剪切面积比; $\dot{\nu}$ 为剪胀率; S_R 为无节理岩石强度; σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度; n 为其抗拉强度与抗压强度比值; k_1 、 k_2 分别取值为1.5、4.0。该模型较全面地考虑了节理的同时滑行和剪切破坏。

Barton^[23]通过大量的节理剪切试验,概化考虑了节理粗糙度的影响,总结了10种标准节理粗糙度包络线;Grasselli^[24]、Johansson^[25]、Ghazvinian^[26]等分别考虑了节理几何特征影响,对上述模型进行了修正,但参数计算较为冗杂,在工程应用中得不到普遍运用。

2.2 破坏形态

综合文献可知^[27],节理的剪切破坏形态主要有剪断和磨损两种(见图1),破坏形态与节理的几何特征以及受力状态有关,当起伏角较大,或法向应力较大时,节理在剪切过程中,难以克服法向应力产生滑越变形,发生啃断破坏。反之,锯齿状节理滑越,相互之间产生磨损破坏。

前者在剪切破坏中剪应力-应变曲线有明显的

峭断区，此阶段对应剪切强度下降过程，当起伏体剪断后，节理需要克服岩体间的摩擦产生剪切变形，破坏特征具有明显的峰值剪切强度 τ_p 和残余强度 τ_r ，二者相差较大。磨损破坏的节理试件的剪应力-应变曲线上主要呈现上升区和滑移区，无明显峭断区，且 τ_p 和 τ_r 相差较小。

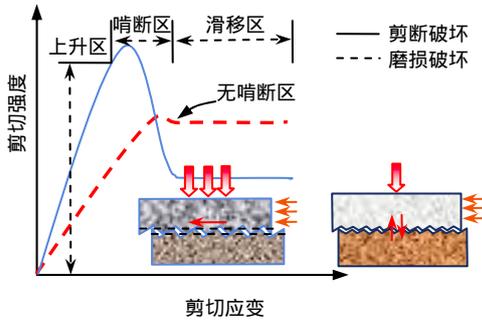


图 1 不同节理破坏形态及应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain curves of different joint failure patterns

3 直剪试验及数值模拟

3.1 室内直剪试验

由于天然节理几何特征较为复杂，存在取样困难、粗糙度难以界定等问题，因此，实验室采所用试样基本都是人工岩石节理，多为素混凝土浇筑而成。本文采用混凝土浇筑的锯齿状起伏体模拟天然节理的几何特征，试样尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm，起伏角度 α 分别为 15°、45°，法向应力为 $\sigma_n = 1、3$ MPa。试样在 RMT-150C 数控式电液伺服试验仪上进行。

3.2 直剪数值模型

PFC^{2D} 试样由一系列圆形颗粒构成。颗粒半径在 $R_{min} \sim R_{max}$ 中满足均匀分布， $R_{min} = 0.125$ mm， $R_{max} / R_{min} = 1.5$ 。考虑到试样尺寸效应及宏、细观参数比例，模型大小选取为 30 mm×30 mm 时，颗粒尺寸对模拟结果影响最小，颗粒模型为平行黏结模型。

节理模拟是建模的重点，本文采用平滑节理模型，通过编写 fish 程序生成锯齿状节理。首先生成 8 道刚性墙来模拟上、下两个剪切盒，墙的法向刚度 $k_n = 1 \times 10^{10}$ N/mm，切向刚度 k_s 和摩擦系数为 0。固定 1#、2#、3# 墙体以模拟下剪切盒，上剪切盒 4#、5#、6# 作为加载墙施加恒定的速率 $v = 0.3$ m/s，PFC^{2D} 采用的是显示时步算法，每一时步约为 4.15×10^{-8} s，因此，0.3 m/s 的水平速率相当于 1.245×10^{-8} m/步。在上、下剪切盒中分别设置 4 个监测圈，用以控制颗粒孔隙率以及监测相应设置变量。通过伺服控制在 5# 墙施加法向应力 σ_n ，不断更新墙的受

力状态使法向应力保持恒定。直剪试验 PFC 数值模拟模型见图 2。磨损模型和剪断模型的节理设置见图 3。

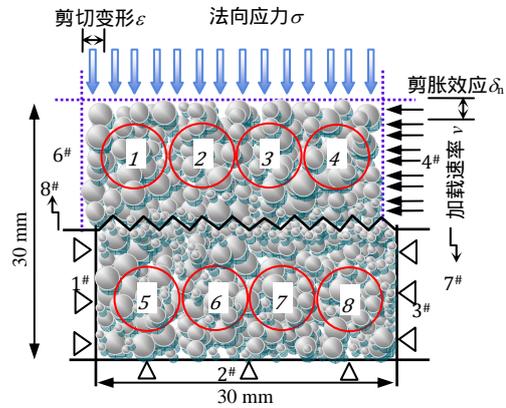


图 2 直剪试验 PFC 模拟模型

Fig.2 Direct shear model of PFC simulation

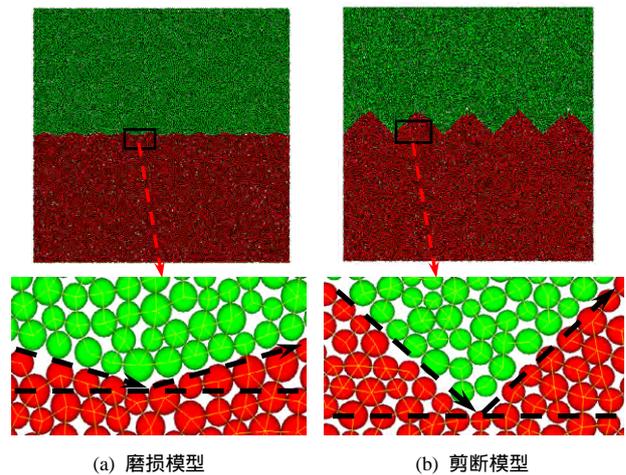


图 3 不同试验模型节理设置

Fig.3 Joint models of different numerical models

3.3 细观力学参数

合理的细观参数是模拟真实节理岩体剪切过程的关键。一般需要对照室内试验进行分析，主要从弹性模量（或剪切模量）、泊松比、峰值强度及应力-应变关系等方面初步选定细观参数，通过多次试算调整，使模拟与试验结果相接近，在此基础上再改变受力状态进行试验分析。详细的细观参数见表 1。

3.4 数据分析及对比

按照上述方法，对不同法向应力及起伏角工况进行若干组模拟试验，参照李海波等^[4, 27]节理岩石室内剪切试验，选取 $\sigma_n = 1、3$ MPa， $i = 15^\circ、45^\circ$ 试样进行分析，分别得到磨损破坏和剪断破坏的剪应力-应变曲线，如图 4 所示。由图 4(a)可知，磨损破坏中二者的应力-应变曲线基本吻合，由于加载法

向应力使颗粒间相互挤压产生初始水平应力,因此,在模型曲线初始阶段有垂直上升趋势,当剪应力抵消初始应力时,剪应力与剪应变呈线性增长至峰值强度。模拟颗粒相对实际晶体较大,在剪切过程中易产生较为明显的滑越现象,因此,在峰后阶段,强度回落较室内试验明显。

图 4(b)是节理剪断破坏的剪应力-应变曲线对

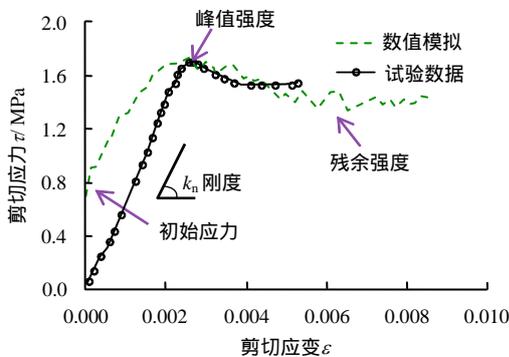
比,模拟曲线有明显的滑断区,在滑移区,由于残余起伏体产生局部滑越,所以有局部的波动现象,然后趋于稳定,二者曲线较吻合。

室内试验和数值模拟的相关参数如表 2 所示,在选定的细观参数和加载条件下,模拟得到的剪切刚度、剪切强度、残余强度及内摩擦角与室内试验较接近,可以作为选定参数进行后续计算分析。

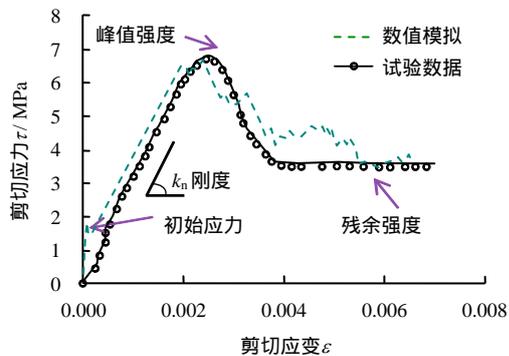
表 1 材料细观参数

Table 1 Meso-properties of materials

颗粒密度 ρ /(g/cm ³)	接触模量 E_c /GPa	摩擦系数	刚度比 k_n/k_t	平行黏结模量 \bar{E}_c /GPa	法向应力 σ /MPa	剪切应力 τ /MPa	刚度比 \bar{k}_n/\bar{k}_t
2.750	1.4	0.75	2.5	1.4	20±2	5±0.5	2.5



(a) 15° 节理岩体试样 (磨损破坏)



(b) 45° 节理岩体试样 (剪断破坏)

图 4 试验数据与数值模拟应力-应变曲线对比
Fig.4 Comparison between stress-strain curves of experiment and numerical simulation

表 2 试验及模拟参数

Table 1 Parameters obtained by experiment and numerical simulation

破坏形式	结果类型	剪切刚度 k_n / (MPa/mm)	峰值强度 τ_p / MPa	残余强度 τ_r / MPa	内摩擦角 φ_n / (°)
磨损破坏	室内试验	0.68	1.70	1.50	44.50
	数值模拟	0.74	1.72	1.46	38.77
剪断破坏	室内试验	2.69	6.71	3.50	25.73
	数值模拟	2.85	6.73	3.52	22.91

4 试验结果及数值模拟分析

4.1 节理强度模型及破坏形态

通过试算确定细观参数,在此基础上研究节理岩体强度模型,分别对剪断和磨损破坏进行模拟,对两组起伏角模型 $\alpha = 15^\circ$ 、 45° 设置法向应力 $\sigma_n = 1 \sim 10$ MPa 每隔 1 MPa 进行加载试验,得到峰值强度、残余强度、剪切变形、法向变形等参数如表 3 所示。

表 3 不同起伏角下节理力学特征
Table 3 Mechanical properties of joints with different angles

起伏角度 / (°)	法向应力 σ_n / MPa	峰值强度 τ_p / MPa	残余强度 τ_r / MPa	剪切变形 ϵ / mm	残余变形 δ_n / mm	破坏类型
15	1	1.716	1.457	0.987	1.983	磨损
	2	1.783	1.627	1.196	2.313	磨损
	3	2.114	2.033	1.364	2.077	磨损
	4	2.772	2.583	1.555	1.963	磨损
	5	3.496	3.276	2.100	2.237	磨损
	6	3.802	3.606	2.253	2.376	磨损
	7	4.401	4.203	2.017	2.633	磨损
	8	5.253	4.606	2.756	3.212	磨损
	9	5.506	4.501	2.613	3.277	剪断
	10	6.013	5.027	3.611	4.277	剪断
45	1	3.300	0.700	2.030	3.010	磨损
	2	4.510	1.620	2.070	2.660	剪断
	3	5.030	1.720	2.240	2.760	剪断
	4	5.310	2.750	1.860	2.620	剪断
	5	5.750	2.080	2.250	3.260	剪断
	6	6.210	2.440	2.310	3.250	剪断
	7	6.450	2.650	2.460	3.230	剪断
	8	6.610	2.830	2.370	3.380	剪断
	9	6.710	3.060	2.550	3.220	剪断
	10	6.730	3.520	2.480	5.830	剪断

试验结果表明，试样的受力状态（法向应力）对峰值剪切强度、破坏形态及变形有很大的影响。节理的几何特征关系到最终破坏形态，节理表面起伏较小，试样主要呈现磨损破坏，反之，则为剪断破坏，然而，当法向应力较大时，应力-应变曲线有明显的峭断区，部分试样发生剪断破坏。

随着法向应力的增大，峰值强度，残余强度均逐渐增大，45°起伏节理的二者差值较 15°节理大，且差值随应力增加逐渐增大。滑移区对应的残余变形与峰值强度对应的剪切变形之间区域为峭断区。45°节理的峭断现象比 15°节理更明显。

图 5、6 为两种节理的室内试验和数值模拟对比，对照 2.1 节中不同节理强度模型对结果进行拟合。研究发现，15°节理的 Patton 拟合（双线性）效果较 Ladanyi 拟合更显著，拟合度 $R^2 = 0.973$ ；剪断破坏的 45°节理 Ladanyi 拟合效果较好（ $R^2 = 0.993$ ），由此可知，节理强度模型的选取与节理的破坏形态有一定关系，磨损破坏主导因素为内摩擦角，Patton 模型第 1 阶段忽略节理黏聚力影响，更能解释其破坏成因；剪断破坏主要克服齿状节理的黏聚力，Ladanyi 模型通过引入岩石单轴抗压和抗拉强度来反映平断面产生原因，综合考虑了节理摩擦因素和岩石自身强度影响，能较好地反映剪断破坏原因。

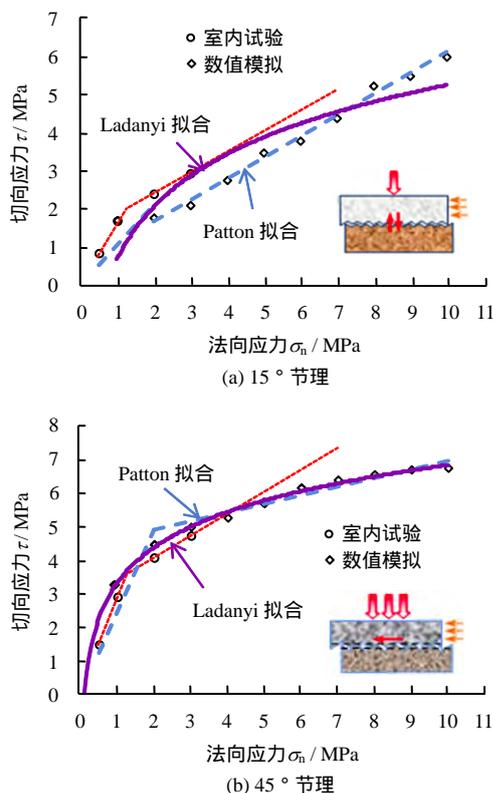


图 5 不同节理对应强度模型
Fig.5 Shear strength models for different joints

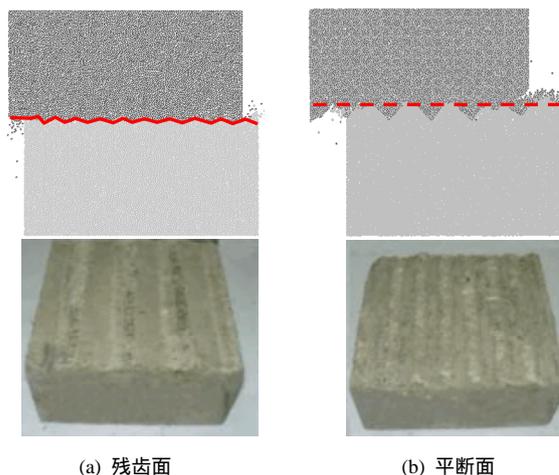


图 6 试样及模拟破坏形态对比
Fig.6 Failure shapes of experiments and PFC simulations

4.2 裂纹萌生及演化

综合文献[28]可知，剪切作用下剪切区的形成分为 4 个阶段，如图 7、8 所示。在达到峰值剪切强度之前（阶段 1），试件产生系列里德尔裂纹（R 裂纹），角度约为 $\phi_u/2$ ；随着变形增加，裂纹加速扩展（阶段 2）；在达到残余强度之前（阶段 3），R 裂纹停止扩展，试件内部开始产生与 R 裂纹对称但方向相反的剪冲裂纹（P 裂纹）；在阶段 4，剪切强度达到残余强度，R 裂纹与 P 裂纹连接形成剪切区，试件开始产生明显剪切位移。

图 9 为各阶段切向、法向裂纹角度 θ 分布情况。裂纹角度 θ 定义为裂纹开展方向与 X 轴间夹角，通过自定义 Fish 函数统计裂纹方位角，由于反对称性，文中只讨论 $0^\circ \sim 180^\circ$ 角度开展情况。

在阶段 1：应力达到峰值强度之前，裂纹数目较少，在节理面两端有少量裂纹产生，且法向裂纹数目明显多于切向裂纹，R 裂纹角度约为 9.3° ，P 裂纹角度为 169° ，法向裂纹主角度方向约为 81.2° ；在阶段 2：应力超过峰值强度，试件进入塑性区，

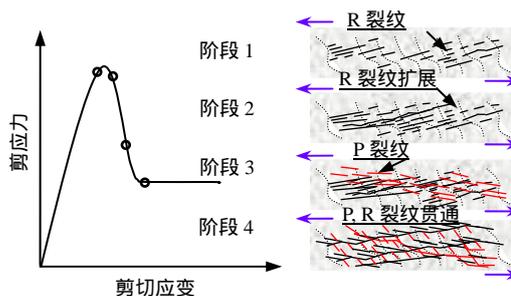


图 7 各阶段裂纹发展对应应力-应变曲线
Fig.7 Fracture patterns developed at each stage of stress-strain curve

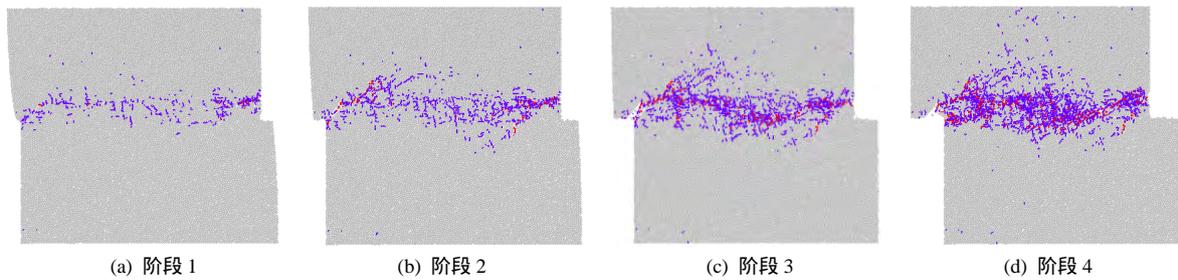


图8 模拟过程中的各阶段裂纹扩展

Fig.8 Cracks propagation at different stages during simulation process

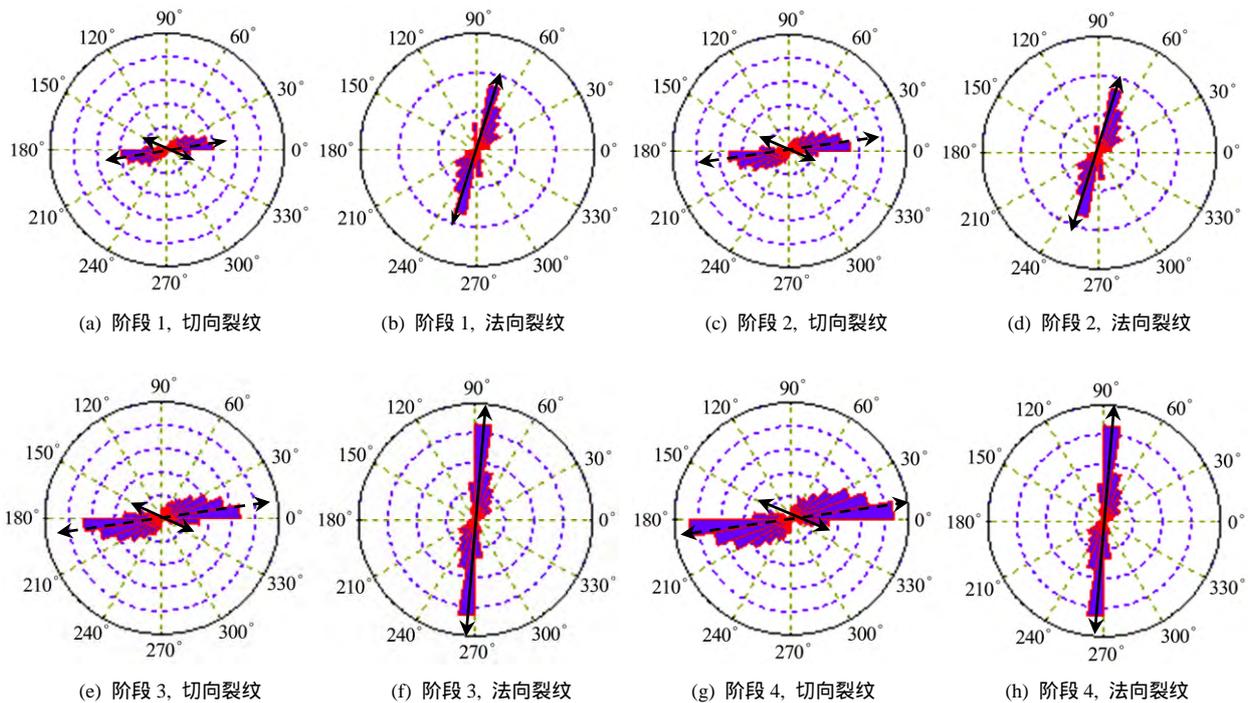


图9 裂纹萌生及演化规律

Fig.9 Crack initiation and coalescence patterns

此时切向裂纹快速开展, 逐渐向节理面中部发展, 同时 R 裂纹角度约为 10.3° , 此时法向裂纹变化较小, 二者裂纹数相当; 随着变形逐渐增加(阶段 3), 裂纹逐渐贯通扩大, 剪切带逐渐形成, 切向裂纹占主导地位, 角度不断扩大; 阶段 4: R 裂纹、P 裂纹贯通, 试样产生大的滑移, 裂纹逐步贯通扩展, 切向裂纹方位角逐步扩大 ($\theta = 12.4^\circ$), 数量呈指数增长, 法向裂纹逐步趋于稳定, 主方位角约为 $\theta = 86.4^\circ$ 。

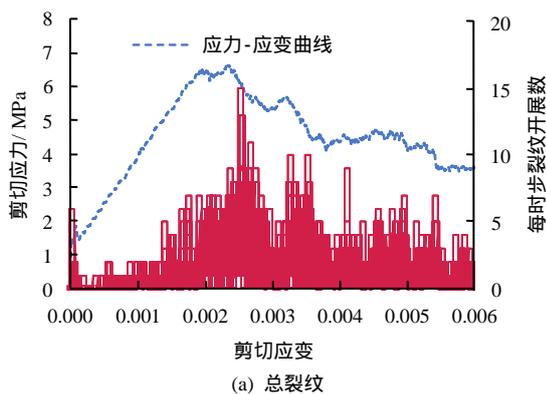
上述分析表明, 在节理岩体的直剪试验中, 切向裂纹方位角随着剪切变形的增加逐渐趋于 $\varphi_u/2$, 法向裂纹则逐渐接近 90° , 角度的分布范围均逐渐增加。

4.3 声发射现象

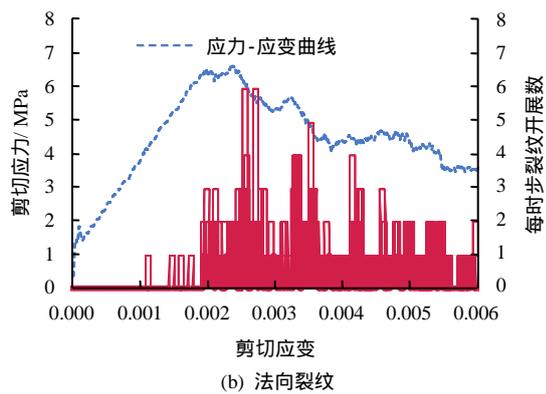
在 PFC^{2D} 中, 链接的断裂会产生能量释放, 同

时也伴随着裂纹的萌生, 因此, 定义一次断裂为一次声发射事件(简称 AE 事件), 通过编写 Fish 程序, 记录加载过程中法向及切向 AE 事件, 得到声发射时程曲线如图 10 所示。

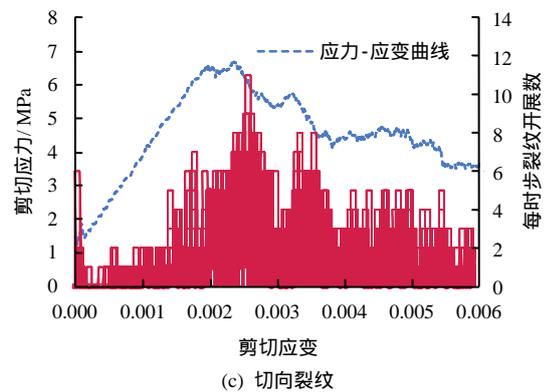
图 10 为磨损破坏标准试样模拟得到的应力-应变曲线及声发射关系。由图可知, 在加载初期, 已有裂纹产生, 但数量较少; 进入弹性阶段, 裂纹数量逐渐增多, 10(c)中切向裂纹数目明显多于 10(b)中法向裂纹; 当应力到达峰值强度时, 声发射数并未达到最大, 而是在试样进入塑性阶段(滞后于峰值强度), 声发射现象达到峰值, 最大声发射事件率出峰后峰值强度为 92%, 约落后 4 320 时步, 其后一直保持较高的水平。图 10(c)中切向声发射数明显高于图 10(b)中法向声发射数, 并且在试样进入滑移区保持残余强度时, 二者声发射数均趋于稳定。



(a) 总裂纹



(b) 法向裂纹



(c) 切向裂纹

图 10 试样应力-应变曲线及声发射曲线
Fig.10 Stress-strain and acoustic emission curves

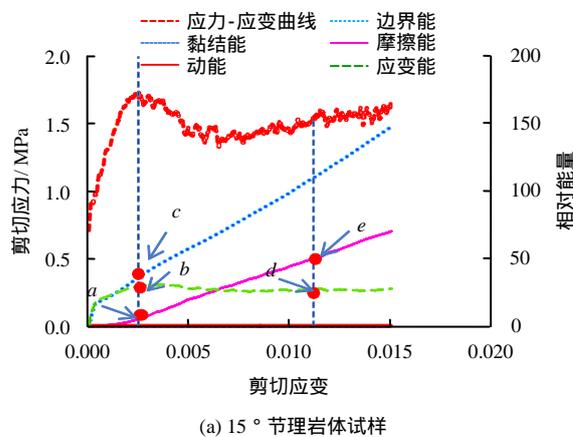
4.4 能量转化

能量演化始终伴随着试件的应力-应变状态的改变以及裂纹的萌生发展。试样的破坏归根结底是能量驱动下的状态失稳，因此，研究试样的能量转化具有一定的意义。

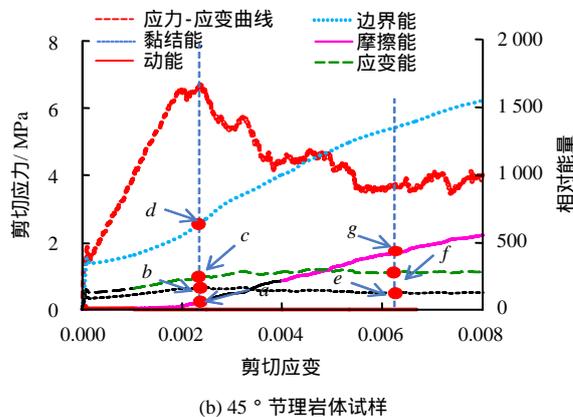
PFC^{2D} 可对加载过程中各部分能量进行精确统计，其中主要有以下 5 种能量：边界能，即外力对试样做功；摩擦能，颗粒间摩擦消耗能量；动能，颗粒运动消耗能量；应变能，接触处能量，与宏观的应变能有一定区别；黏结能，黏结处储存的能量，一般宏观应变能等于应变能和黏结能之和，耗散能 = - - -。

图 11(a)为磨损破坏下能量转化与应力-应变关系，很明显，剪应力-应变状态的改变伴随着能量的转化。在应力达到峰值强度前，试样处于线弹性阶段，应变能随边界能增加而增加，可以发现，由于法向应力较小，节理发生磨损破坏时几乎不在水平向产生裂纹，故黏结能很小（几乎为 0）；达到峰值强度时，a 点处摩擦能快速增加，说明颗粒间发生较大的滑移，此时 b 点处的应变能增长速率逐渐减小；应力超过峰值强度后，试件很快进入滑移阶段，应变能（对应 d 点）逐渐趋于稳定，此时摩擦能起主导作用（对应 f 点），约占总能量的 48.4%，试样呈现大的滑移破坏。整个过程中颗粒的动能较小，约占总能量 0.8%，变化趋势不明显。

图 11(b)对应的是剪断破坏下能量的转化过程。二者区别主要体现在剪断破坏是耗能破坏，整体消耗总能量大约是磨损破坏的 10 倍，剪断破坏伴随大量裂纹产生，所以消耗大量黏结能，黏结能的变化趋势与应变能类似；滑移区颗粒主要依靠抵消摩擦力阻止试件相对滑动，所以摩擦能为主要耗能因素，约占总能量 32.7%。



(a) 15° 节理岩体试样



(b) 45° 节理岩体试样

图 11 能量转化与应力-应变关系曲线
Fig.11 Relationships between energy transmission and stress-strain curve

能量的消耗导致裂纹的萌生和扩展。直剪试验破坏主要是剪切裂纹开展形成贯通的剪切带,图12中主要裂纹类型为切向裂纹,在应力达到峰值强度之前,几乎无法向裂纹产生,随着应力增加,裂纹快速扩展,切向裂纹约占裂纹总量81.3%;切向裂纹与耗散能增加有较好的相关性,耗散能主要为阻尼耗能及摩擦能,摩擦能导致颗粒切向链接断裂,促生切向裂纹萌生;总应变能变化导致试样体应变发生改变,体应变增加的根本原因是裂纹的产生,颗粒法向链接断裂,产生张拉裂纹,故法向裂纹随总应变能改变而改变。

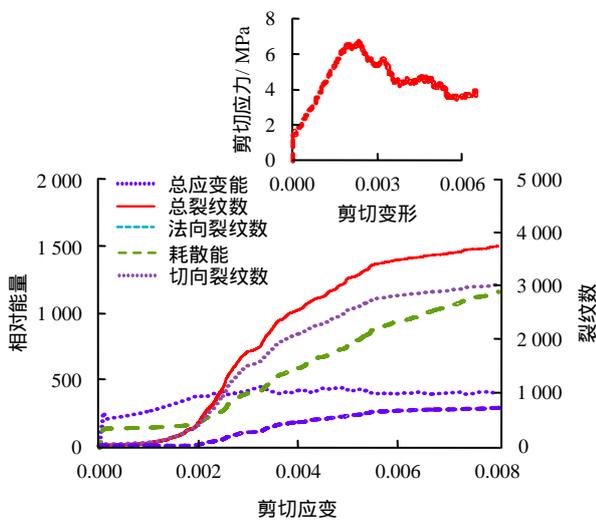


图12 能量转化与裂纹开展关系

Fig.12 Relationship between energy transmission and crack evolution

5 结论

(1) 基于离散元颗粒流的 PFC^{2D} 程序可以较好地模拟节理岩体剪切力学特性,并弥补了室内试验中无法进行细观特性研究的缺陷。

(2) 节理岩体根据其受力状态及节理几何特征,主要呈现磨损和剪断两种破坏形态,其中,Patton 强度模型更适合磨损破坏节理, Ladanyi 模型则较适合剪断破坏节理。

(3) 节理岩体的破坏主要沿节理面发生,弹性阶段法向裂纹起主导作用,应力达到峰值强度后,切向裂纹快速发展,后期 P 裂纹和 R 裂纹相互贯通形成破碎带,节理面产生大的滑移,岩体发生破坏。

(4) 岩体声发射最大强度对应峰值强度,并有一定的滞后现象,滑移区声发射现象更为明显。

(5) 裂纹的萌生和发展伴随着能量的转化,弹性阶段,边界能主要转化为应变能,塑性区则以摩擦能为主,法向裂纹随应变能增加逐渐增多,切向

裂纹随耗散能增加而增加。

综上所述,本文为节理岩体直剪试验相关研究提供一些借鉴。

参考文献

- [1] 朱维申,李术才,陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Fracture damage mechanism and anchoring effects of jointed rockmass and its application to engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 周喻,吴顺川,张晓平. 岩石节理直剪试验颗粒流宏观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1245 - 1256.
ZHOU Yu, WU Shun-chuan, ZHANG Xiao-ping. Macro-and meso-analyses of rock joint direct shear test using particle flow theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1245 - 1256.
- [3] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// 1st ISRM Congress. Lisbon, Portugal: International Society for Rock Mechanics, 1966: 509 - 515.
- [4] 李海波,冯海鹏,刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435 - 2440.
LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2435 - 2440.
- [5] 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 Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities with regular surface roughness[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 713 - 719.
- [6] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249 - 268.
- [7] 杜守继,朱建栋,职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 56 - 60.
DU Shou-ji, ZHU Jian-dong, ZHI Hong-tao. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 56 - 60.

- [8] 刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 等. 断续节理直剪试验与 PFC^{2D} 数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1828 - 1836.
LIU Shun-gui, LIU Hai-ning, WANG Si-jing, et al. Direct shear tests and PFC^{2D} numerical simulation of intermittent joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1828 - 1836.
- [9] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机理及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635 - 640.
BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 635 - 640.
- [10] 夏才初. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 108 - 109.
XIA Cai-chu. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 108 - 109.
- [11] JAFARI M K, AMINI H K, PELLET F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23(7): 619 - 630
- [12] PLESHA M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1987, 11(4): 345 - 362.
- [13] INDRARATNA B, HAQUE A. Experimental and numerical modeling of shear behavior of rock joints[C]// International Conference on Geotechnical & Geological Engineering. Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Co. Inc., 2000.
- [14] VOSINIAKOS K. Physical and numerical modeling of shear behaviour of saw-toothed filled rock joint[D]. Manchester: The University of Manchester, 2007.
- [15] KARAMI A, STEAD D. Asperity degradation and damage in the direct shear test: A hybrid FEM/DEM approach[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2008, 41(2): 229 - 266.
- [16] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329 - 1364.
- [17] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(7): 997 - 1010.
- [18] YOON J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(6): 871 - 889.
- [19] CUNDALL P A. Numerical experiments on rough joints in shear using a bonded particle model[M]. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 1 - 9.
- [20] WANG C, TANNANT D D, LILLY P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC^{2D}[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(3): 415 - 424.
- [21] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R. Fundamentals of rock mechanics[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [22] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]//The 11th US rock mechanics symposium (USRMS). Berkeley, CA: [s. n.], 1969: 105 - 125
- [23] BARTON N. The shear strength of rock and rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1976, 13(9): 255 - 279.
- [24] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 25 - 40.
- [25] JOHANSSON F. Shear strength of unfilled and rough rock joints in sliding stability analyses of concrete dams[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2009
- [26] GHAZVINIAN A H, AZINFAR M J, VANEGHI R G. Importance of tensile strength on the shear behavior of discontinuities[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(3): 349 - 359.
- [27] 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.
LI Hai-bo, LIU Bo, FENG Hai-peng, 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.
- [28] SKEMPTON A W. Some observations on tectonic shear zones[C]//1st ISRM Congress. Lisbon, Portugal: International Society for Rock Mechanics, 1966.