

杨圣奇, 黄彦华. TBM 滚刀破岩过程及细观机理颗粒流模拟 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1235–1244. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.3036

Yang Shengqi, Huang Yanhua. Particle flow simulation on rock fragmentation process and meso-mechanism by a single TBM cutter [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1235–1244. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.3036

TBM 滚刀破岩过程及细观机理颗粒流模拟

杨圣奇, 黄彦华

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 江苏 徐州 221116)

摘 要: 采用颗粒流再现了锦屏大理岩脆—延—塑性转化特征, 利用获得的细观参数建立 TBM 滚刀破岩离散元模型, 模拟了单个 TBM 滚刀侵入断续单裂隙岩体过程, 分析了裂隙倾角和围压对滚刀破岩效果的影响规律, 最后从细观层面探讨了滚刀破岩机理。结果表明: 含单裂隙岩体在单刀作用下, 总体上表现为压缩性破坏、规则裂纹萌生与扩展、粉核区形成和主裂纹贯通 4 个阶段; 当裂隙水平时翼裂纹萌生于裂隙中部, 裂隙倾角较小时翼裂纹萌生于距尖端一定距离处, 随着裂隙倾角的增大翼裂纹在裂隙尖端萌生。随着围压的增大, 粉核区的范围逐渐变大, 在高围压作用下出现侧向裂纹向自由面扩展; 裂隙岩体比完整岩石更容易发生破坏, 而且不同倾角裂隙岩体破坏难易程度也有所不同, 总体上表现为: $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ$ 破岩由易到难。有围压条件下破岩难于无围压条件, 且困难程度随着围压的提高而增大。

关键词: TBM; 滚刀破岩; 颗粒流模拟; 细观机理; 大理岩

中图分类号: U451.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253–9993(2015)06–1235–10

Particle flow simulation on rock fragmentation process and meso-mechanism by a single TBM cutter

YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Particle flow code was used to reconstruct the brittle-ductile-plastic transition behavior of Jinping marble, and obtained micro-parameters were used to construct the discrete element model of rock fragmentation with disc cutter. The process of a single TBM disc cutter intruding into rock with a single fissure was simulated, the effect law of fissure angle and confining pressure on rock fragmentation was analyzed, and finally the microscopic mechanism of rock fragmentation was discussed. The results show that: Under the action of a single disc cutter, the rock mass with a single fissure shows four phases consisting of compression failure, regular cracks initiation and propagation, crushed zone formation and main cracks coalescence; Wing crack appears at the central section when the fissure is horizontal, and it appears at the section near the fissure tip while the fissure angle is small, with the increase of fissure angle, wing crack appears at the fissure tip. The crushed zone increases with the confining pressure, and the lateral crack propagates towards free surface under high confining pressure; Fissured rock mass is easier to be damaged compared to intact rock, and the difficulty degree of rock mass failure varies with fissure angle, which is $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ$. It is more difficult to be damaged under the confining pressure than that without the confining pressure, and the difficulty degree increases with the confining pressure.

收稿日期: 2015-02-06 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046905)

作者简介: 杨圣奇(1978—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 0516–83995031, E-mail: yangsqi@hotmail.com

Key words: TBM; rock fragmentation; particle flow simulation; mesoscopic mechanism; marble

全断面岩石掘进机(tunnel boring machine, TBM)具有施工快、质量高和操作环境好等优点,已被应用与公路隧道、水利隧洞等岩石工程中。TBM 滚刀处于掘进机的最前端,与围岩直接接触,滚刀直接关系到掘进机的破岩效率。因此,研究 TBM 滚刀破岩机理对于提高滚刀使用寿命和保证高效安全隧道掘进具有重要意义。

对于滚刀破岩机理除了从理论上进行相应研究外,更为直观的是采用试验和数值模拟的方法。Innaurato 等^[1]进行了石灰岩和花岗岩在无侧限和侧限作用下单刀破岩试验,分析了岩样尺寸、岩石类别和围压对破岩的影响。谭青等^[2]在原有线切割试验台的基础上设计观测试验,分析作为辅助刀具之一的球齿滚刀侵入砂岩过程,利用高速摄像机捕捉到岩石崩裂直至整体破碎的现象,并记录了球齿下密实核的产生过程。莫振泽等^[3]通过改装 RMT-150C 系统研究花岗岩在楔形刀具贯切作用下损伤劣化破坏的全过程,声发射定位显示在岩石破碎区的密实核下方存在“损伤核”,为滚刀破岩宏观破裂现象提供依据。由于条件的限制,通过大尺度的现场试验或室内试验来研究刀具破岩的机理还存在很多困难。随着计算机技术和数值计算方法的发展,数值模拟方法成为研究刀具破岩的主要手段之一。Liu 等^[4]基于 RFPA 发展的 R-T2D 建立刀盘破岩模型,进行单刀和双刀侵入岩石规律数值模拟,模拟能够获得岩石破裂全过程。Gong 和 Zhao^[5]采用二维离散元 UDEC 对单刀侵入花岗岩过程进行模拟,分析岩石脆性指数对破岩效率的影响,随着脆性指数的减小,岩石损伤区减小,而 TBM 贯入率也会随之减小。Cho 等^[6]利用三维有限元 AUTODYN-3D 建立刀盘切割岩石模型,模拟结果与线性切割试验结果相吻合,并分析了切割速率和模型尺寸对比能的影响。谭青等^[7]通过二维离散元 PFC 建立刀具与岩石相互作用模型,分析了滚刀的刀刃宽和刀刃角对破岩过程中贯入度、切削力和裂纹数的影响规律,模拟结果显示 PFC 能够有效模拟滚刀破岩过程。此外,TBM 在施工过程中会遇到各种影响破岩效率的地质因素,如节理、裂隙、断层以及高围压等。马洪素和纪洪广^[8]采用 2 种不同强度的混凝土分别模拟大理岩和石灰岩,通过对 TBM 滚刀破岩时不同节理面与掘进方向夹角的影响效果进行了试验研究。邹飞等^[9]通过改进的 RMT-150C 试验系统进行了含节理相似材料盘形滚刀破岩效果试验,分析了节理间距和节理倾角对破岩效果的影响。Gong

等^[10-11]采用 UDEC 分别进行了 TBM 滚刀对不同节理方向和节理间距岩石侵入数值模拟研究。孙金山^[12]和谭青^[13]等分别利用 PFC 研究了节理特征对 TBM 盘形滚刀破岩特性的影响,模拟结果表明结构面对裂纹扩展具有显著的控制性作用。张魁等^[14-15]采用 UDEC 建立双刀切削岩石模型,分析了围压对破岩的影响,模拟结果显示随着围压的增加,刀具的破岩效率与裂纹扩展能力降低。

然而,在目前的研究中,对岩石中含有断续张开裂隙滚刀破岩机理研究鲜有报道,且高围压作用下破岩效果还较少涉及。鉴于此,本文采用二维离散元方法 PFC2D 建立 TBM 盘形滚刀与裂隙岩石相互作用模型,综合考虑裂隙分布特性以及围压作用下对滚刀破岩效率的影响,并从细观层面探讨滚刀破岩机理。

1 细观参数的选择

1.1 锦屏大理岩室内试验概况

室内单轴及三轴压缩试验大理岩采自锦屏二级水电站白山组。按照国际岩石力学学会试验规程规定,将现场取得岩芯进行精细加工,制备直径 50 mm、高度 100 mm 标准试样,加工后试样如图 1 所示。

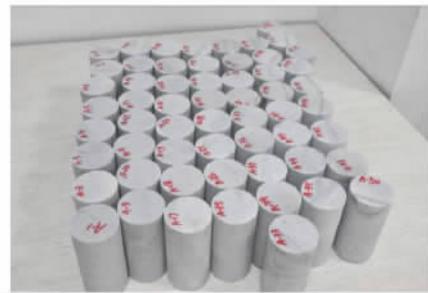


图 1 锦屏二级水电站大理岩试样

Fig. 1 Marble samples from Jinping II hydropower project

加工好的大理岩试样分别在中国矿业大学的法国 TOP INDUSTRY 公司生产的多功能岩石三轴测试系统上进行单轴压缩及三轴压缩试验,获得锦屏大理岩的强度、弹模、黏聚力和内摩擦角等基本力学参数,为后续 PFC 数值模拟提供力学参数基础。

1.2 簇单元模型简介

为了克服黏结颗粒模型(bonded-particle model, BPM)中模型颗粒形状及排列方式单一、咬合力弱的缺陷,PFC 在 BPM 的基础上发展了簇单元模型(clumped-particle model, CPM)。CPM 能够很好地克服 BPM 中内摩擦角偏低等固有问题^[16],更适合模拟岩石材料的破裂。另外,根据余华中^[16-17]和崔臻^[18]

等的研究结果显示,锦屏大理岩在不同围压作用下出现脆—延—塑性转化特征,采用 CPM 能够更好地反映这一特性。簇单元(clump)考虑颗粒形状的影响,是由多个圆形颗粒组成非规则形状或块体的超级颗粒^[19],由 clump 原理(clump logic)控制,其参数有:组成 clump 颗粒的圆球数目、clump 的半径等,详细内容参见文献^[20]。

图 2 为采用簇单元模型构建的大理岩数值试样,采用的簇单元模板为“花生”(peanut)模板,即采用 3 个圆形颗粒组合成花生形状的簇单元,其几何形态如图 2(b)所示,几何参数主要包括 3 个圆盘颗粒的半径 R_1 、 R 和 R_2 ,以及两端颗粒之间的距离 L 。在 PFC 中生成由 10 349 个簇单元模板,约 30 831 个圆盘颗粒组成的宽 50 mm、高 100 mm 的矩形试样,如图 2(a)所示。采用伺服控制系统,左、右两面的墙对试样施加围压,上、下两面的墙对试样进行位移加载,从而实现对室内大理岩单轴及三轴压缩试验的模拟。

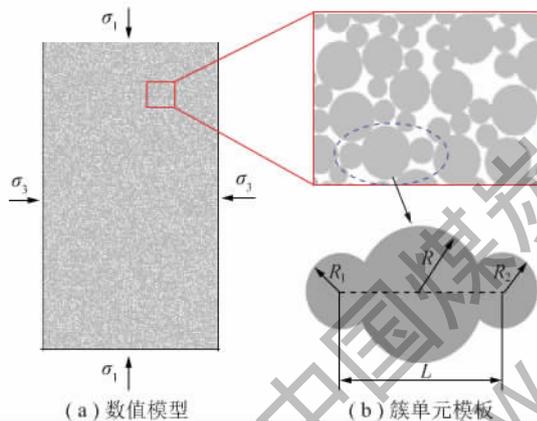


图 2 数值模型及簇单元模板

Fig. 2 Numerical model and clump template

1.3 细观参数标定

PFC 细观参数标定是一个极为费时的过程,目前主要采用的是“试错法”^[21],即首先赋予完整数值模型一组假定的细观参数,进行模拟计算;将模拟计算得到的宏观参数与室内试验结果进行对比;通过不断调整细观参数,当模拟结果与试验结果基本一致时,认为该细观参数合理。在调试细观参数前,应首先明确细观参数对岩石宏观力学参数之间的响应关系,才能较为快速地进行细观参数匹配。为此,周博^[22]、赵国彦^[23]、黄彦华和杨圣奇^[24]、夏明和赵崇斌^[25]等均进行了 PFC 中细观参数对宏观力学参数的影响关系的相关研究工作,而参数调试过程可参考 PFC2D 用户手册^[26]。

经过对一系列室内试验结果的反复模拟校准,最终得到一组能够反映锦屏大理岩宏观力学特性的

PFC 细观参数(表 1)。

表 1 大理岩 PFC 细观参数

Table 1 Micro-parameters in PFC for marble specimen

参数	取值	参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.3	摩擦因数	0.45
颗粒粒径比	1.6	平行黏结模量/GPa	30.0
平行黏结半径因子	1.0	平行黏结刚度比	2.0
颗粒模量/GPa	30.0	平行黏结法向强度/MPa	70 ± 7.0
颗粒刚度比	2.0	平行黏结切向强度/MPa	165 ± 16.5
颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 710	$L: R: R_1: R_2$	2.8: 1.0: 0.5: 0.5

为评价表 1 细观参数的合理性和可靠性,图 3 给出了部分不同围压作用下模拟和试验获得的应力—应变曲线对比(直线为试验曲线,虚线为模拟曲线)。由图 3 可见,随着围压的增大,大理岩峰后由脆性破坏逐渐向延性破坏转变。当围压增大至 40 MPa 时,峰值强度之后应力强度没明显降低,接近理想塑性变形。因此,大理岩随着围压的增大,呈现显著的脆—延—塑性转换特征。另外,模拟和试验获得应力—应变曲线较为相近,由此说明采用表 1 细观参数的簇单元模型可以很好地再现锦屏大理岩的脆—延—塑性转换特征。

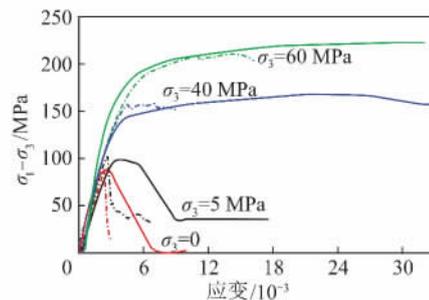


图 3 模拟和试验应力—应变曲线对比

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves obtained from simulation and experiment

图 4 给出了模拟和试验获得的峰值强度对比。由图 4 可见,试验峰值强度与围压之间呈较好的线性关系,模拟峰值强度与试验值吻合度很高。

综上所述,采用表 1 的细观参数能够较好地再现锦屏大理岩脆—延—塑转化特征,并且模拟获得的强度值与室内试验值相近。由此说明表 1 细观参数能够反映锦屏大理岩宏观力学特征,可以用于后续相应的模拟研究。

2 单刀破岩过程模拟

2.1 滚刀破岩数值模型简化

TBM 盘形滚刀随着刀盘的旋转,盘形滚刀绕刀

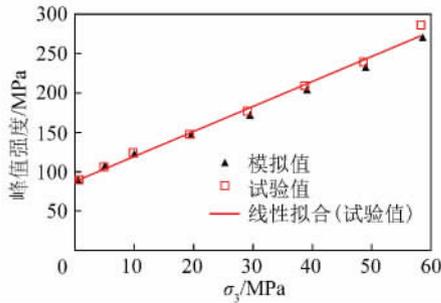


图4 模拟和试验峰值强度对比

Fig. 4 Comparison of peak strength obtained from simulation and experiment

盘中心轴公转,同时还绕自身轴线自转。滚刀在与岩石相互作用中受力较为复杂,作用过程会对岩石施加法向推压力、切向滚动力和侧向力。因此,采用数值模拟方法时需将模型简化,一般将模型简化为二维平面问题,不考虑切向滚动,将三维滚动和压入运动简化为二维侵入运动,如 Liu^[4]、Gong^[5,10-11]、孙金山^[12]、谭青^[7,13,27]、苏利军^[28]和廖志毅^[29]等的模拟研究表明 TBM 滚刀破岩过程简化为平面等效模型是基本可行的。

图5为采用 PFC2D 建立的单刀侵入大理岩数值模型。其中,刀圈的刚度和强度都非常高,因此采用 PFC 中刚性墙体 wall 来模拟。因为平刃刀圈在工程中广泛应用^[7],因此本文以平刃刀圈为研究对象。建立的数值模型,长 $L = 140 \text{ mm}$,高 $H = 100 \text{ mm}$,刀盘的刀刃宽 $B = 5 \text{ mm}$ 。在完整岩石的基础上,通过删除特定区域的颗粒形成张开裂隙^[30-32],张开裂隙分布在岩体的中央,裂隙与水平方向的夹角为 α ,裂隙长度 $2a = 16 \text{ mm}$ 。

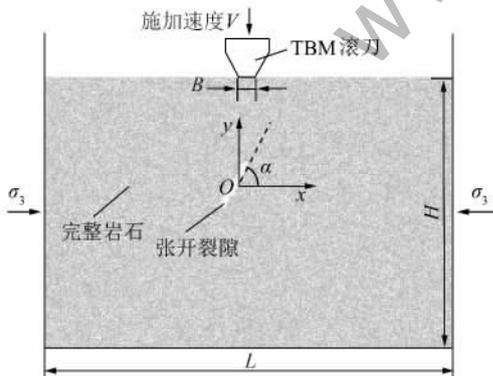


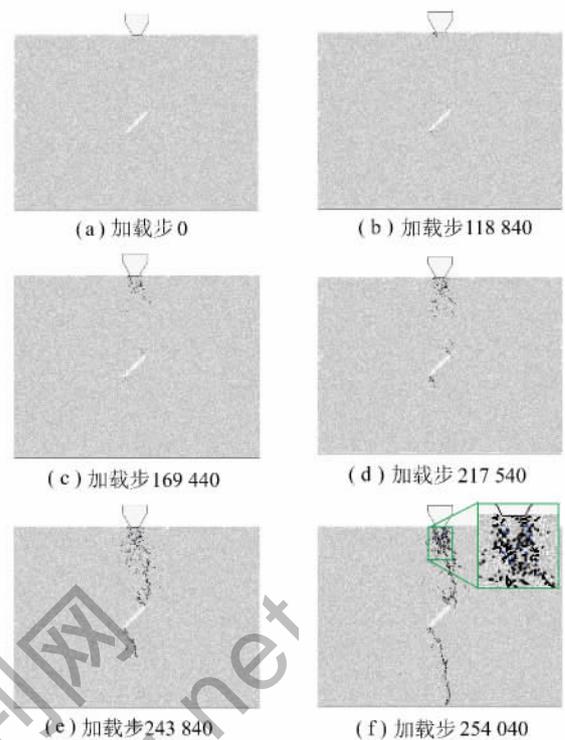
图5 单滚刀破岩过程的颗粒流模型

Fig. 5 Particle flow model of rock fragmentation by a single TBM disc cutter

2.2 裂隙倾角的影响

裂隙倾角 α 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 。保持裂隙长度 $2a = 16 \text{ mm}$ 。图6给出了倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时,裂隙岩体在单刀作用下不同加载步对应的

裂纹扩展过程。

图6 倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时单刀破岩过程Fig. 6 Rock fragmentation process by a single cutter when $\alpha = 45^\circ$

由图6(b)可见,当刀盘侵入岩石时,与刀刃接触的岩石表面部分首先产生了少许微裂纹,说明接触处应力集中最先达到岩石破裂的临界值。随着刀盘继续贯入,在刀盘正下方产生了较多的微裂纹,并逐渐向下发展,如图6(c)所示。当刀盘继续向下运动时,裂隙岩体的破裂形态如图6(d)所示,此时裂隙尖端开始萌生裂纹,这意味着裂隙尖端颗粒之间的黏结发生断裂损伤。随着刀盘的继续贯入,裂纹不断扩展,如图6(d)所示,在刀盘正下方已经产生了一定数量的微裂纹,裂隙上、下尖端产生的翼裂纹也扩展至一定长度,同时在裂隙与刀盘之间区域萌生了一条规则裂纹,与加载方向近似平行,如图6(e)所示。当刀盘继续侵入裂隙岩体时,刀盘下方的微裂纹汇集形成了一个显著的损伤区,称为粉核区^[7],该部分岩体被微裂纹分割成破碎区,因此刀盘下方易出现粉碎渣土。再观察损伤区的局部放大图可见,裂纹是由拉伸微裂纹和剪切微裂纹组成(黑色线段表示拉伸微裂纹,蓝色线段表示剪切微裂纹),如图6(f)所示。此时,竖直裂纹上、下两端分别向上、下方向不断扩展,最终分别与裂隙尖端和刀盘下方损伤区相连,由此造成了裂纹与裂隙之间的贯通。裂隙上尖端翼裂纹扩展至一定长度后,处于“睡眠”状态,即不再延伸,可能的原因是其附近的竖直裂纹的扩展抑制了该翼裂纹的扩

展。但是,裂隙下尖端翼裂纹逐渐扩展至岩体下边缘,其扩展路径并不是非常光滑,但总体上平行于最大主应力方向,由此也使得试样最终失稳破坏为两块。

图7给出了不同裂隙倾角下单刀侵入裂隙岩体破裂形态,为方便比较,同时还给出了完整岩石在单刀贯入作用下破裂模式。刀盘贯入完整岩石引起岩石的破碎过程较为简单,首先在刀盘正下方产生一系列微裂纹,微裂纹达到一定数量规模后,粉核区逐渐形成。在微裂纹不断产生和汇聚的过程中,粉核区不断扩大,同时还产生了规则裂纹。随着刀盘的继续侵入,规则裂纹不断向下延伸,最终将完整岩石分割为两半,破裂模式如图7(a)所示。而对于裂隙岩体在刀盘作用下的破坏过程则较为复杂,由图6分析已经知道裂隙岩体的破坏是由粉核区、规则裂纹、张开裂隙以及翼裂纹共同作用造成的。具体对于裂隙倾角为 0° 时,最大的不同在于裂隙上端裂纹萌生于裂隙的中间位置,而不在与裂隙尖端。这与水平裂隙在单轴压缩作用^[33]和间接拉伸作用^[34]试验中起裂现象

相同,对于倾角为 15° 和 30° 倾角裂隙岩体,上端翼裂纹萌生在距裂隙尖端一定距离处,这同样与单轴压缩作用^[35]和间接拉伸作用^[36]起裂相同,而对于较大裂隙倾角($45^\circ \sim 90^\circ$)则在裂隙尖端起裂,这可能是由于水平及较小倾角裂隙中部受到的横向拉伸作用要大于裂隙尖端的应力集中影响,所以在距裂隙尖端一定距离位置萌生初始裂纹。另外,不同裂隙倾角上端产生的翼裂纹有一个相似之处就是均生长到一定长度之后及停止扩展,随后便一直处于“睡眠”状态。接着分析不同裂隙倾角岩体粉核区形态,对于完整岩石粉核区近似于竖直向下延伸发展。与完整岩石相比,裂隙岩体粉核区向下发展过程中会发生扩散,即向下延伸的同时会向左、右两边扩展。但是粉核区受裂隙倾角的影响并不明显,扩散角(定义为扩展方向与水平方向之间的夹角)总体上分布在 $65^\circ \sim 70^\circ$,粉核区的深度受裂隙倾角的影响也不显著,分布在刀盘下方一定深度内。但同时还注意到,倾角为 75° 及 90° 裂隙岩体的粉核区裂纹密集程度要远高于其他倾角裂隙岩体。

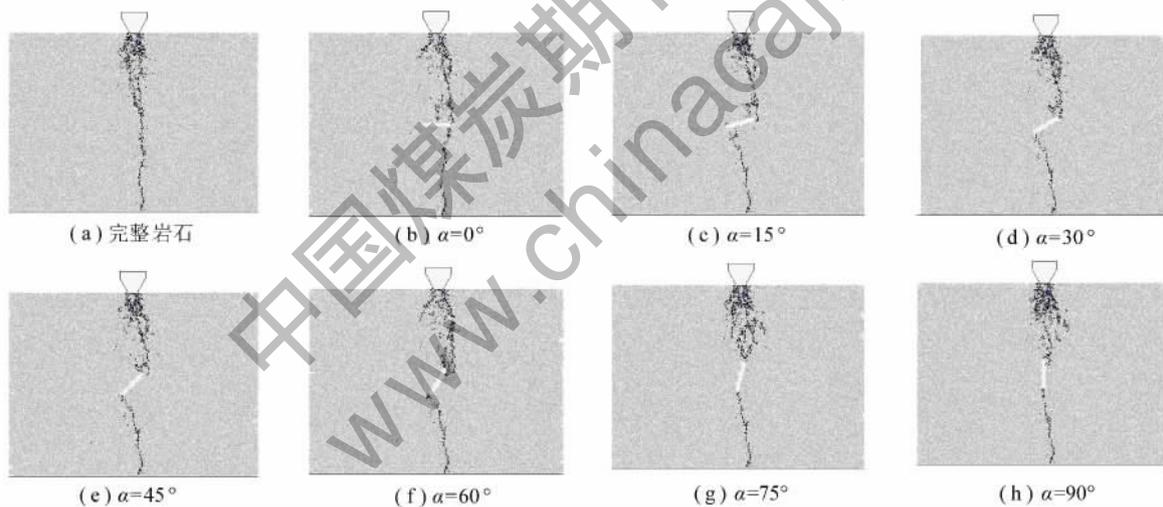


图7 单刀侵入不同裂隙倾角岩体破裂模式

Fig. 7 Fracture modes of rock mass with different fissure angles by a single cutter

2.3 围压的影响

锦屏二级水电站引水隧道处于深埋环境中,引水隧洞洞群沿线上覆岩体一般埋深 $1\ 500 \sim 2\ 000\ \text{m}$,最大埋深达 $2\ 525\ \text{m}$ 。因此模拟锦屏大理岩TBM滚刀破岩效果,需要考虑埋深的影响。为探究不同埋深对破岩效果的影响,进行不同围压作用下单刀侵入裂隙岩体颗粒流模拟。围压分别设置为 $5, 10, 15$ 和 $20\ \text{MPa}$,保持裂隙倾角为 60° ,裂隙长度为 $16\ \text{mm}$ 。图8给出了不同围压作用下单刀侵入裂隙岩体最终破裂模式,无围压情况下倾角 60° 裂隙岩体的破裂模式如图7(f)所示。

由图8可见,裂隙岩体的失稳破坏是由粉核区、规则裂纹、张开裂隙及翼裂纹造成的。裂纹扩展顺序依次为:首先在刀盘下方产生微裂纹,之后在裂隙尖端产生翼裂纹,接着刀盘与裂隙之间产生的规则裂纹不断扩展,刀盘下方微裂纹不断汇聚形成粉核区,最后下端翼裂纹扩展至岩体下边缘。围压对裂隙岩体的破裂模式有较为显著的影响,具体表现为,在无围压及较低围压作用下,粉核区的微裂纹集中程度较低,随着围压的增大,微裂纹的数量及密集程度明显提高。当围压增大至 $20\ \text{MPa}$ 时,粉核区裂纹不仅向下发展,而且还形成了明显的规则裂纹向裂隙岩体自

由面扩展。该侧向裂纹将该处岩体分隔开,形成脱落或崩裂的较大的岩石碎块,这是因为内部应力释放减少的能量一部分转化成碎块表面能,另一部分转化为碎块脱离母岩的动能^[14]。另外,裂隙岩体在高围压作用下产生侧向裂纹是因为刀盘下方岩体在受到刀盘向下作用力时,颗粒之间发生断裂损伤,并不断向下扩展,同时在较大的水平应力驱使下,裂纹有沿水平方向发展的趋势,在竖直及水平方向相互作用下形成了如图 8(d) 所示的侧向裂纹。

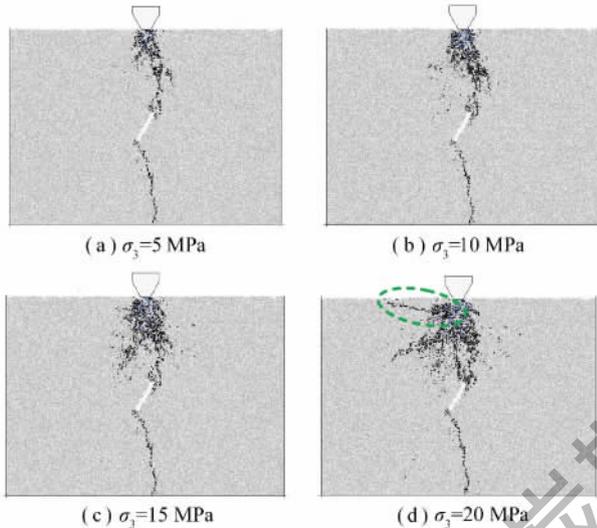


图 8 不同围压下单刀侵入岩体破裂模式

Fig. 8 Fracture modes of rock mass by a single cutter with under different confining pressure

3 滚刀破岩细观机理讨论

与其他数值方法相比,PFC 在细观场分析中有其独到的优势,它能够实时监测岩体变形破坏过程中细观力场、微裂纹发育和能量场的演化,分析滚刀破岩过程岩体内部细观力场、微裂纹发育和能量场规律,进而揭示盘形滚刀破岩细观机制。

3.1 细观力场分布特征

图 9 给出了倾角 α 为 45° 时裂隙岩体破裂过程中细观平行黏结力演化过程。在图 9 中微裂纹和细观力场以颜色加以区分,粉红色线段表示拉伸微裂纹,蓝色线段表示剪切微裂纹,黑色线段表示压力,深红色线段表示拉力。

由图 9(a) 可见,当刀盘作用在裂隙岩体上时,在刀盘正下方出现一个显著的应力集中区(体现在线段分布最为密集),距离刀盘越远,应力分布越小。同样在裂隙尖端也分布有相对应力集中区,这是由于裂隙尖端作用导致的。以裂隙左尖端为例,分析裂纹扩展过程平行黏结力演化过程。如图 9(c) 可见,在裂隙左尖端上表面被黑色线段包围,而尖端下表面被

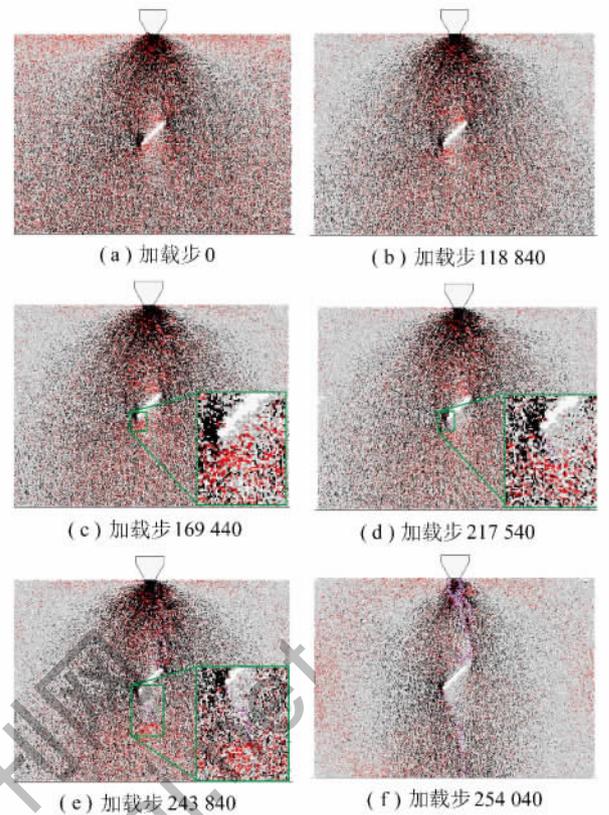


图 9 倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时单刀破岩过程平行黏结力演化

Fig. 9 Evolution of parallel bond force during rock fragmentation process by a single cutter when $\alpha = 45^\circ$

红色线段包围,说明了上表面为压力集中区,而下表面为拉力集中区。随着刀盘继续作用在岩体上,尖端开始萌生微裂纹(便于区分以粉色线段表示拉伸微裂纹),而新的拉应力集中区往下发展,如图 9(d) 所示。最终翼裂纹扩展至岩体下缘,如图 9(f) 所示。

图 10 为不同裂隙倾角以及不同围压作用下裂隙岩体平行黏结力场分布。由图 10(b) ~ (h) 可知,不同倾角裂隙岩体平行黏结力受裂隙影响较大的区域在裂隙附近,而刀盘下方受影响很小。当裂隙倾角为 0° , 15° 时,裂隙上、下表面被红色线段包围,而裂隙尖端为黑色线段区域,即裂隙上下表面为拉力集中区,而裂隙尖端为压力集中区,如图 10(b) ~ (c) 所示。随着裂隙倾角的增大,红色线段集中逐渐向裂隙尖端转移,而黑色线段集中则逐渐占据原红色线段集中区域,如图 10(d) ~ (f) 所示。当倾角增大至 75° , 90° 时,裂隙尖端为红色线段集中区,而裂隙左右表面则为黑色线段集中分布,如图 10(g) ~ (h) 所示。

另外,与无围压作用时相比,有围压作用下平行黏结力影响较大,主要表现在在围压作用后红色线段明显减小,黑色线段显著增加。这说明在有围压作用下,裂隙岩体主要受压力作用,增加了刀盘侵入岩体的难度。

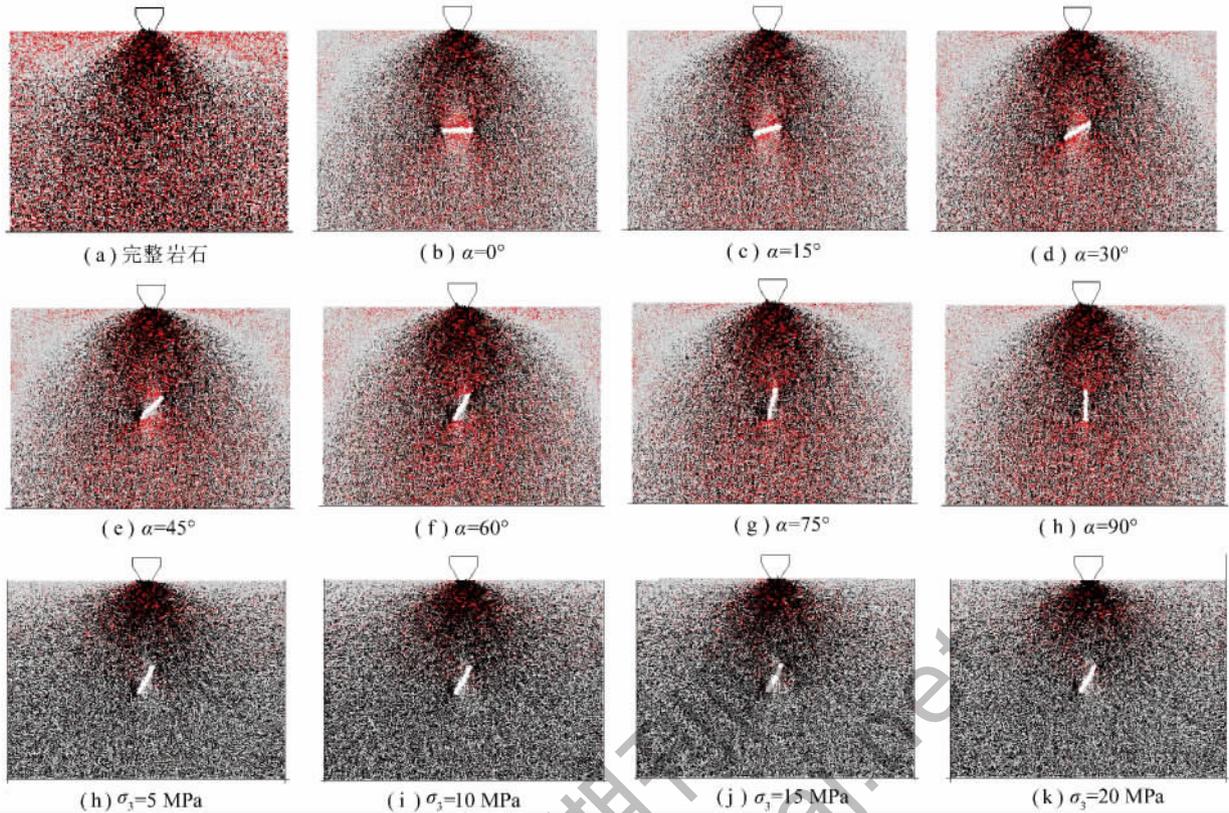


图 10 不同裂隙倾角及不同围压平行黏结力场分布

Fig. 10 Evolution of parallel bond force with different fissure angle and confining pressure

3.2 微裂纹发育特征

为分析裂隙岩体在单滚刀作用下内部微裂纹发育规律,通过 FISH 函数记录滚刀侵入过程中微裂纹的产生位置、类型及数量等信息。

图 11 给出了倾角 α 为 45° 时裂隙岩体破裂过程中微裂纹数量演化过程以及不同加载步阶段微裂纹类型及数目。由图 11 可见,在刀盘侵入裂隙岩体的过程中,微裂纹在不断的生长,但是微裂纹并不是平稳发育,而是呈平缓—陡增—平缓—陡增模式变化,这与岩石的跃进破碎相关^[7]。因为在刀盘破岩过程中,当有岩石脱落后,刀盘所需的推力减小,由此裂纹的数目趋于平缓,而推力增大时裂纹数也会相应的增加^[7]。在最后阶段,微裂纹增长速度大幅提高,这是因为裂隙岩体越接近最终破裂时刻,其承载能力越低,在刀盘作用下越容易产生裂纹。微裂纹出现骤增的拐点为裂隙岩体发生破坏的临界值。再观察微裂纹的类型可知,在破岩过程中拉伸微裂纹的数目始终远大于剪切微裂纹,这表明:含单裂隙大理岩在单滚刀作用下细观上以张性破坏为主,剪切破坏为辅。需要说明的是谭青等^[7]模拟显示张拉裂纹与剪切裂纹数目始终相差不大,本文与之不同的原因可能为:①岩性不同,本文细观参数为经室内试验标定的硬脆大理岩,而文献^[7]模拟较软岩;②与裂纹扩展程度及

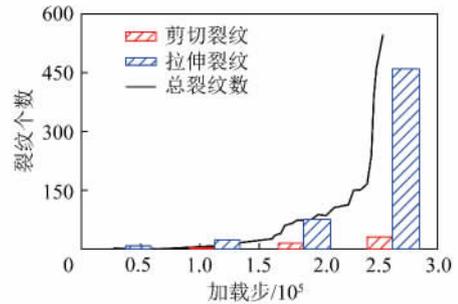


图 11 倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时单刀破岩过程微裂纹数量演化

Fig. 11 Evolution of micro-cracks number during rock fragmentation process by a single cutter when $\alpha = 45^\circ$

种类相关,剪切微裂纹主要分布在粉核区,而翼裂纹和规则裂纹主要由张性微裂纹组成。

图 12 为不同裂隙倾角及不同围压作用下微裂纹数目演化曲线。由图 12 可知,在无围压作用下,不同倾角裂隙岩体微裂纹发育特征相似。比较不同倾角裂隙岩体破裂临界值对应的加载步可知: $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ < \text{完整}$,说明裂隙岩体比完整岩石更容易发生破坏,且不同倾角裂隙岩体破坏难易程度也有所不同,总体上表现为: $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ$,破岩由易到难。

然而,在围压作用下裂纹数明显多于无围压作用,而且随着围压的增大,裂纹数量增多,说明在有围

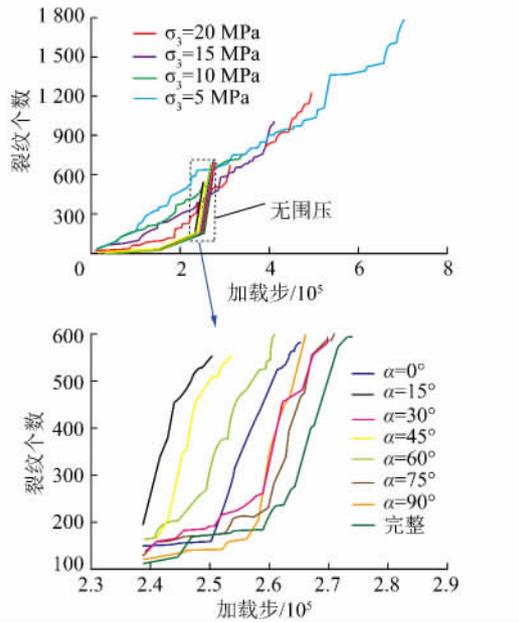


图12 不同裂隙倾角及不同围压微裂纹演化曲线

Fig. 12 Evolution of micro-cracks number with different fissure angle and confining pressure

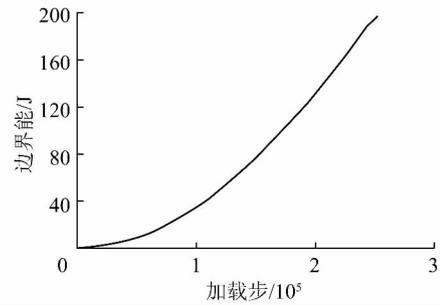
压条件下试样破坏程度更高。另外,在围压条件下裂隙岩体达到破坏时所需的加载步明显大于无围压条件,且随着围压的提高而增大,这表明在有围压条件下破岩难于无围压条件,且困难程度随着围压的提高而增大。同时还注意到,在围压作用下裂纹增长速率低于无围压作用下,不会出现裂纹骤增现象,这意味着围压会限制裂纹的扩展速率,裂隙岩体在围压情况下裂纹处于缓慢持续增长过程。

3.3 破岩过程能量演化机制

在刀盘侵入过程中,刀盘对裂隙岩体做功。在模拟过程中,对边界能(边界墙对岩体做的总功)进行跟踪记录,以探讨裂纹扩展过程中能量演化规律,进一步加深对裂纹扩展机制的认识。

图13为倾角为 45° 裂隙岩体破裂过程边界能演化曲线。由图13可见,在刀盘侵入过程中,边界能持续增长。在侵入初期,边界能还较小,同时可以看到此时边界能的涨幅较低,说明加载初期所需要的能量较低。随着刀盘继续贯入,边界能出现较大幅度的增长,因为裂纹萌生和扩展均需要消耗较大的能量。在最后破裂阶段,边界能增长速率有所减缓。

边界能值的大小在一定程度上反映刀盘破岩效率,为此对不同倾角及不同围压作用下的最终边界能进行统计(图14)。其中,图14(a)为无围压作用下不同倾角裂隙岩体和完整岩石的边界能,图14(b)为不同围压作用下裂隙倾角为 60° 岩体的边界能。比较无围压作用下边界能大小可知,裂隙岩体所需的能量均小于完整岩体,说明岩体中分布有张开裂隙有利

图13 倾角 α 为 45° 时单刀破岩过程边界能演化Fig. 13 Evolution of boundary energy during rock fragmentation process by a single cutter when $\alpha = 45^\circ$

于刀盘破岩。而且不同裂隙倾角边界能大小顺序为: $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ$,该顺序即为裂隙岩体破岩效率由高到低排序。需要注意的是,该顺序与3.2节由微裂纹演化观察破岩难易程度得到的顺序相同。其次,观察裂隙倾角为 60° 时岩体在不同围压作用下边界能大小可知:在有围压作用情况下,随着围压的增大,边界能逐渐增大,这意味着围压越大,破岩越难。

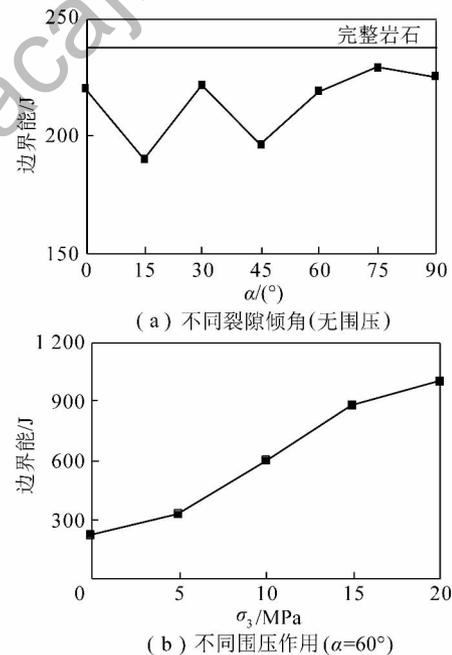


图14 不同裂隙倾角及不同围压下边界能

Fig. 14 Boundary energy with different fissure angle and confining pressure

4 结 论

(1) 锦屏二级水电站大理岩在三轴压缩下表现出明显的围压相关性,采用颗粒流模拟不仅再现了大理岩的脆—延—塑性转化特征,而且峰值强度模拟值也与试验值接近。

(2) 含单裂隙岩体在刀盘作用下,首先在刀盘下

端产生微裂纹,随后在裂隙尖端萌生裂纹,翼裂纹不断扩展,最终发生贯通破坏。总体上表现为压缩性破坏、规则裂纹萌生与扩展、粉核区形成和主裂纹贯通4个阶段。

(3) 裂隙倾角主要影响翼裂纹的萌生位置:水平裂隙翼裂纹萌生于裂隙中部,倾角较小时,翼裂纹萌生于距尖端一定距离处,随着倾角的增大翼裂纹在裂隙尖端萌生。围压主要影响粉核区:随着围压的增大,粉核区的范围逐渐变大,在高围压作用下会出现侧向裂纹向自由面扩展。

(4) 细观平行黏结力场揭示了裂纹扩展细观机理:拉应力集中区处易萌生拉伸微裂纹,拉应力集中区转移过程中,微裂纹不断扩展贯通。并且水平裂隙拉应力集中区分布在中部,较小裂隙倾角裂隙拉应力集中区分布在距裂隙一定距离,而较大倾角裂隙拉应力集中区分布在裂隙尖端。

(5) 从微裂纹和边界能角度分析破岩效率结果相同,即裂隙岩体比完整岩石更容易发生破坏,而且不同倾角裂隙岩体表现为: $15^\circ < 45^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 30^\circ < 90^\circ < 75^\circ$,破岩由易到难。有围压条件下破岩难于无围压条件,且困难程度随着围压的提高而增大。

参考文献:

- [1] Innaurato N, Oggeri C, Oreste P P, et al. Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2007, 40(5): 429-451.
- [2] 谭青,张魁,周子龙,等.球齿滚刀作用下岩石裂纹的数值模拟与试验观测[J].*岩石力学与工程学报* 2010, 29(1): 163-169.
Tan Qing, Zhang Kui, Zhou Zilong, et al. Numerical simulation and experimental observation of rock cracks under action of spherical tooth hob cutter[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2010, 29(1): 163-169.
- [3] 莫振泽,李海波,周青春,等.楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究[J].*岩石力学* 2012, 33(5): 1333-1340.
Mo Zhenze, Li Haiibo, Zhou Qingchun, et al. Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2012, 33(5): 1333-1340.
- [4] Liu H Y, Kou S Q, Lindqvist P A, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2002, 39(4): 491-505.
- [5] Gong Q M, Zhao J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite[J]. *Tunnelling and underground space technology* 2007, 22(3): 317-324.
- [6] Cho J W, Jeon S, Yu S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2010, 25(3): 230-244.
- [7] 谭青,李建芳,夏毅敏,等.盘形滚刀破岩过程的数值研究[J].*岩土力学* 2013, 34(9): 2707-2714.
Tan Qing, Li Jianfang, Xia Yimin, et al. Numerical research on rock fragmentation process by disc cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2707-2714.
- [8] 马洪素,纪洪广.节理倾向对TBM滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2011, 30(1): 155-163.
Ma Hongsu, Ji Hongguang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate under TBM disc cutter[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2011, 30(1): 155-163.
- [9] 邹飞,李海波,周青春,等.岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J].*岩土力学* 2012, 33(6): 1640-1646.
Zou Fei, Li Haiibo, Zhou Qingchun, et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(6): 1640-1646.
- [10] Gong Q M, Zhao J, Jiao Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2005, 20(2): 183-191.
- [11] Gong Q M, Jiao Y Y, Zhao J. Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2006, 21(1): 46-55.
- [12] 孙金山,陈明,陈保国,等.TBM滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J].*岩土力学* 2011, 32(6): 1891-1897.
Sun Jinshan, Chen Ming, Chen Baoguo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2011, 32(6): 1891-1897.
- [13] 谭青,朱逸,夏毅敏,等.节理特征对TBM盘形滚刀破岩特性的影响[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4040-4046.
Tan Qing, Zhu Yi, Xia Yimin, et al. Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4040-4046.
- [14] 张魁,夏毅敏,谭青,等.不同围压条件下TBM刀具破岩模式的数值研究[J].*岩土工程学报* 2010, 32(11): 1780-1787.
Zhang Kui, Xia Yimin, Tan Qing, et al. Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2010, 32(11): 1780-1787.
- [15] 张魁,夏毅敏,徐汝军.不同围压及切削顺序对TBM刀具破岩机理的影响[J].*土木工程学报* 2011, 44(9): 100-106.
Zhang Kui, Xia Yimin, Xu Zijun. Effect of confining pressure and cutting sequence on the rock-breaking mechanism by TBM cutter[J]. *China Civil Engineering Journal* 2011, 44(9): 100-106.
- [16] 余华中,阮怀宁,褚卫江.大理岩脆-延-塑转换特性的细观模拟研究[J].*岩石力学与工程学报* 2013, 32(1): 55-65.
Yu Huazhong, Ruan Huaining, Chu Weijiang. Mesoscopic simulation study of brittle-ductile-plastic transition character of marble

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013, 32(1): 55-65.
- [17] 余华中,阮怀宁,褚卫江. 岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报 2013, 32(7): 1482-1490.
Yu Huazhong, Ruan Huaining, Chu Weijiang. Particle flow code modeling of shear behavior of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013, 32(7): 1482-1490.
- [18] 崔臻,侯靖,吴旭敏,等. 脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 983-995.
Cui Zhen, Hou Jing, Wu Xumin, et al. Influence of time-dependent of crack propagation of brittle rock on long-term stability of Jinping water diversion tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014, 33(5): 983-995.
- [19] 张超,展旭财,杨春和. 粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学 2013, 34(7): 2077-2083.
Zhang Chao, Zhan Xucai, Yang Chunhe. Mesoscopic simulation of strength and deformation characteristics of coarse grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics 2013, 34(7): 2077-2083.
- [20] Cho N, Martin C D, Sego D C. A clumped particle model for rock. International [J]. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 997-1010.
- [21] Lee H, Jeon S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures 2011, 48(6): 979-999.
- [22] 周博,汪华斌,赵文锋,等. 黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究[J]. 岩土力学 2012, 33(10): 3171-3178.
Zhou Bo, Wang Huabin, Zhao Wenfeng, et al. Analysis of relationship between particle mesoscopic and macroscopic mechanical parameters of cohesive materials [J]. Rock and Soil Mechanics 2012, 33(10): 3171-3178.
- [23] 赵国彦,戴兵,马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报 2012, 31(7): 1491-1498.
Zhao Guoyan, Dai Bing, Ma Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012, 31(7): 1491-1498.
- [24] 黄彦华,杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏观细观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报 2014, 33(8): 1644-1653.
Huang Yanhua, Yang Shengqi. Particle flow simulation on macro- and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014, 33(8): 1644-1653.
- [25] 夏明,赵崇斌. 簇平行黏结模型中微观参数对宏观参数影响的量纲研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 327-338.
Xia Ming, Zhao Chongbin. Dimensional analysis of effects of microscopic parameters on macroscopic parameters for clump parallel-bond model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014, 33(2): 327-338.
- [26] Itasca Consulting Group Inc. . PFC2D(Particle flow code in 2D) , Version 4. 0 [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc. , 2008.
- [27] 谭青,易念恩,夏毅敏,等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2453-2464.
Tan Qing, Yi Nianen, Xia Yimin, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012, 31(12): 2453-2464.
- [28] 苏利军,孙金山,卢文波. 基于颗粒流模型的 TBM 滚刀破岩过程数值模拟研究[J]. 岩土力学 2009, 30(9): 2823-2829.
Su Lijun, Sun Jinshan, Lu Wenbo. Research on numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutters using particle flow method [J]. Rock and Soil Mechanics 2009, 30(9): 2823-2829.
- [29] 廖志毅,梁正召,唐春安,等. 动静组合作用下刀具破岩机制数值分析[J]. 岩土力学 2013, 34(9): 2682-2689.
Liao Zhiyi, Liang Zhengzhao, Tang Chun'an, et al. Numerical simulation of rock fracture mechanism induced by a drill bit under combined dynamic and static loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2682-2689.
- [30] Zhang X P, Wong L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: A numerical study based on parallel bonded-particle model approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering 2012, 45(5): 711-737.
- [31] Yang S Q, Huang Y H, Jing H W, et al. Discrete element modelling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression [J]. Engineering Geology 2014, 178: 28-48.
- [32] 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.
- [33] 蒲成志,曹平,陈瑜,等. 不同裂隙相对张开度下类岩石材料断裂试验与破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2394-2399.
Pu Chengzhi, Cao Ping, Chen Yu, et al. Fracture test and failure mechanism of rock-like material of relatively different fracture apertures [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2011, 42(8): 2394-2399.
- [34] Ghazvinian A, Nejadi H R, Sarfarazi V, et al. Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials [J]. Arabian Journal of Geosciences 2013, 6(11): 4435-4444.
- [35] Yang S Q, Jing H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression [J]. International Journal of Fracture 2011, 168(2): 227-250.
- [36] Al-Shayea N A. Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture [J]. Engineering Geology 2005, 81(1): 84-97.