

简单复合岩体中 TBM 多滚刀破岩机理离散元分析

蒋明镜^{1,2,3,4} 傅程¹ 王华宁⁵ 刘俊^{3,4} 廖优斌⁶ 陈有亮⁶

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
3. 同济大学土木工程防灾重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
5. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092; 6. 上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 采用引入考虑胶结尺寸的微观接触模型的 PFC^{2D} 离散元软件, 对全断面岩石掘进机 (TBM) 盘形滚刀作用下简单形式的复合岩体破岩机理进行数值模拟研究。进行了单滚刀、双滚刀和三滚刀作用下的复合岩体破碎过程的模拟。模拟结果表明: 滚刀破岩过程可以分为三个阶段: 加载阶段、卸载阶段和残余跃进阶段。通过双滚刀和三滚刀侵入复合岩体的推力-侵深曲线分析, 软岩上的滚刀比硬岩上的滚刀进入各阶段稍慢, 略有滞后; 不同滚刀间的峰值法向推力相差较大, 易造成滚刀磨损。对于花岗岩-绿片岩复合岩体, 破岩时接触力链被岩体分界面分割, 硬岩区胶结破坏数目较多, 双滚刀、三滚刀侵入时易形成贯通裂缝; 破岩效率由大到小为双滚刀效率、三滚刀效率、单滚刀效率, 而且双滚刀能够将效率提高一倍左右。

关键词: TBM; 复合岩体; 滚刀; 破岩机理; 离散元

中图分类号: TU941 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0120-07

Distinct element analysis of mechanism of rock fragmentation induced by TBM cutting in simply composite rock mass with multiple cutters

Jiang Mingjing^{1,2,3,4} Fu Cheng¹ Wang Huaning⁵ Liu Jun^{3,4} Liao Youbin⁶ Chen Youliang⁶

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
5. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
6. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The PFC^{2D} software, incorporated with a size-dependent bond contact model, was employed to investigate the fracture mechanism induced by TBM cutting in simply composite rock mass. The rock fracture process was simulated under the action of cutting with single, double and triple cutters. The numerical results show that the process of rock fragmentation can be described with three stages: loading stage, unloading stage and residual leap stage. The analysis on the thrust-intrusion depth curve for the cutting in composite rock mass with double and triple cutters demonstrates that the cutter reaches the three stages is slightly slower on soft rock than on hard rock. A large difference was observed between/among cutters on the peak normal thrust, which will induce the wear of the cutters easily. For the rock mass composited by granite and greenschist, contact force chains are segmented by the interface between hard rock and soft rock, and bond breakage of hard rock is more than of soft rock, and through cracks form easily in double and triple cutters breaking rock. Rock breaking efficiency by double cutter is larger than by triple cutter with the latter larger than by single cutter. Besides the breaking efficiency by the double cutter is almost twice as that in other cases.

Keywords: TBM; composite rock mass; cutter; mechanism of rock fragmentation; distinct element method

E-mail: mingjing.jiang@tju.edu.cn

基金项目: 国家重点基础研究计划 (973 计划) 项目 (2014CB046901)

作者简介: 蒋明镜, 博士, 教授

收稿日期: 2019-02-28

引 言

全断面岩石掘进机 (TBM) 工法因其安全、高效、优质、环保、经济和有利于围岩稳定等优点, 将是交通、水利和矿山等重大生命线工程建设的首选工法^[1]。围绕 TBM 破岩机理的研究, 是岩体力学领域的重要课题之一。

对于 TBM 破岩机理, 许多学者进行了各类室内试验。马洪素等^[2]采用混凝土试块模拟岩石材料, 研究了节理特征对滚刀破岩模式、裂纹起裂扩展方式以及破岩效率的影响。龚秋明等^[3]采用 5 组不同滚刀间距和 7 组不同贯入深度对北山花岗岩进行了线性切割试验, 研究不同滚刀间距对破岩效率及破坏模式的影响。Geng 等^[4]采用 RCM (Rotary Cutting Machine, RCM) 试验研究了顺序侵入时不同滚刀间法向力的关系, 结果表明先行滚刀的法向力略大于后行滚刀。相关试验研究不足的是, 室内的滚刀破岩试验受限于尺寸, 缺少三滚刀甚至更多滚刀破岩过程的研究; 且由于成本较高, 常采用类岩石材料研究, 试验结论能否直接推广到岩石有待进一步研究。

Cundall 等^[5]于 1979 年提出离散单元法 (DEM), 可以再现材料的复杂变形^[6-8]与破坏过程。基于离散单元法建立的岩体模型能够很好地模拟复杂应力路径下细观裂隙扩展、细观岩体累积损伤和复杂的宏观力学行为, 已广泛运用于岩土材料的数值模拟中。部分学者采用离散单元方法模拟了 TBM 滚刀破岩过程^[9-10], 分析影响破岩效率的因素。张旭辉等^[11]采用 PFC^{2D} 离散元软件模拟了 TBM 滚刀破岩的过程, 研究了盘形滚刀的破岩特性并分析了单一岩体下单刀、双刀对破岩效果的影响。蒋明镜等^[12]模拟了滚刀破岩过程并且重点分析了滚刀破岩的各阶段的宏微观机理。Liu 等^[13]采用室内试验和二维离散单元法, 研究了滚刀侵入顺序对单一岩体破岩的影响。前人研究滚刀破岩主要集中在单一岩体和节理岩体方面, 而软硬复合岩体中的破岩机理与单一岩体有很大不同, 需要更进一步地丰富完善。除此之外, 由于尺寸效应问题, 对于多滚刀及全刀盘布置滚刀的研究也相对缺乏。

本文采取离散单元法, 通过模拟单滚刀、双滚刀和三滚刀侵入花岗岩-绿片岩复合岩体的破岩过程, 分析了破岩过程的推力-侵深曲线、宏微观信息、岩体破坏模式、胶结破坏比能耗等滚刀破岩机理,

以期为提高破岩效率提供理论依据。

1 复合岩体与滚刀的离散元模型

1.1 复合岩体模型

本文采用 Jiang 等^[14]提出的考虑胶结尺寸的微观接触模型, 该模型基于室内微观胶结试验结果得出, 能够考虑岩石颗粒之间的胶结尺寸对强度包络线的影响, 更加符合岩土材料的真实破坏特性, 已有的数值模拟结果表明, 该模型能够很好地模拟岩石的力学特性^[15]。本文选取花岗岩^[16]-绿片岩^[17]复合岩体为研究对象, 花岗岩单轴抗压强度 200.00MPa, 单轴抗拉强度 16.7MPa, 弹性模量 69.0GPa, 泊松比 0.260; 绿片岩单轴抗压强度 19.47MPa, 单轴抗拉强度 1.0MPa, 弹性模量 3.54GPa, 泊松比 0.360。选取了能够较为准确合理反应岩石类材料物理特性的级配曲线^[18], 如图 1 所示。本文所用的岩体微观接触模型参数通过单轴压缩试验、巴西劈裂试验以及常规三轴试验进行标定, 表 1 为微观接触模型的具体参数。

表 1 微观接触模型参数

Table 1 Parameters of bond contact model

类型	微观参数	花岗岩	绿片岩
颗粒部分	颗粒密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2700	2700
	颗粒法向刚度 $k_n(\text{N}/\text{m})$	6.5×10^{10}	9.00×10^9
	颗粒切线刚度 $k_t(\text{N}/\text{m})$	4.33×10^{10}	6.00×10^9
	颗粒摩擦系数 μ_p	1.0	0.3
	颗粒抗转动系数 β_p	1.5	0.5
胶结部分	最大胶结厚度 $h_{\max}(\text{m})$	1.30×10^4	1.30×10^4
	胶结弹性模量 $E_b(\text{N})$	3.75×10^9	1.50×10^8
	胶结抗压强度 $\sigma_c(\text{Pa})$	3.00×10^{10}	2.50×10^9
	胶结抗拉强度 $\sigma_t(\text{Pa})$	1.00×10^9	2.50×10^8
	胶结延伸率 sp	0.15	0.15

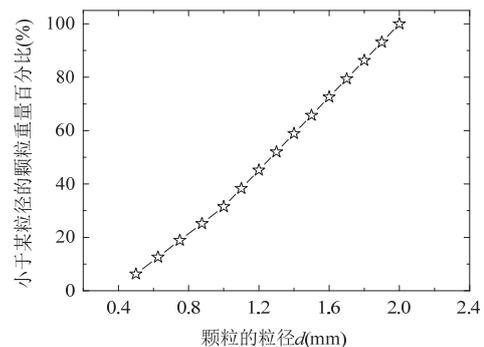


图 1 颗粒级配曲线^[18]

Fig.1 Particle size distribution

TBM 施工中,滚刀与岩体之间主要存在三个方向的接触力,一般认为法向推力是破岩的主要因素。前人研究^[19-20]表明,将滚刀破岩过程简化为滚刀侵入岩体的过程是合理的。本文采用二维离散元方法,将滚刀破岩的三维问题简化为滚刀侵入岩体的平面问题,建立尺寸为 760mm×380mm 的复合岩体模型,颗粒数目为 30 万左右,孔隙比约为 0.2。

1.2 滚刀模型

本文采用施工中运用比较广泛的常截面盘形滚刀,固定滚刀刃宽、刃角。滚刀采用 PFC^{2D} 软件中墙命令生成,整体为刚性,单个滚刀采用六面独立的墙体闭合围成,墙体的法向刚度和切向刚度比颗粒刚度略大,摩擦系数为零。

2 滚刀侵入岩体的过程模拟

滚刀侵入复合岩体的模拟主要有以下几个关键步骤:首先,采用分层欠压法^[21]制备岩石试样,保持左右墙体不动,取预压初始应力为 38.02MPa,通过上下墙体的伺服机制,进行预压固结;同时,利用微观胶结模型,模拟岩体的自然形成过程;稳定后,删除顶部刚性墙体,进行应力释放,待岩体内部速度场稳定后,生成滚刀,得到图 2 所示的模型。试样左、右侧及底部墙面均为刚性约束,限制岩体位移,顶部保持自由边界,与室内试验一致。最后,赋予滚刀恒定速度侵入岩石试样,记录整个侵入过程中岩石试样的宏微观信息。

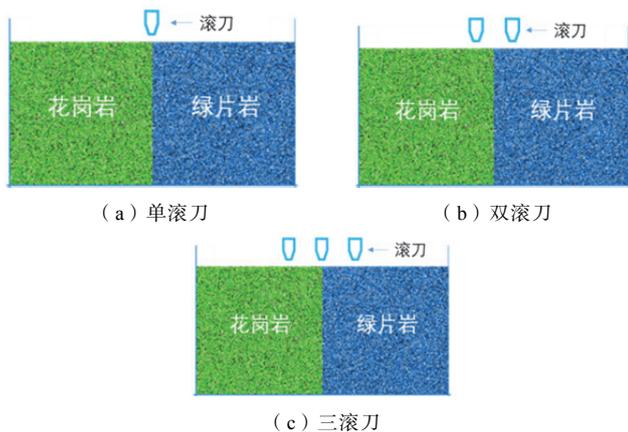


图 2 离散元破岩模型图
Fig.2 DEM model of rock cutting

3 模拟结果

本节分析了花岗岩-绿片岩复合岩体在三类滚

刀破岩时的宏微观信息,包括了推力-侵深曲线和胶结破坏-侵深曲线,并依据此信息进一步分析了滚刀数目对破岩效率影响。通过输出岩体破碎分布、接触力链及胶结破坏点分布阐述了破坏全过程的微观机理。为了便于分析,此处对滚刀进行了编号,最左侧为 1[#]滚刀。

3.1 法向推力与贯入度关系

复合岩体破岩过程中胶结破坏类型可以分成 3 种,即纯拉破坏,拉剪破坏,压剪破坏。图 3 中给出了三类滚刀下复合岩体的胶结破坏-侵深曲线,三类滚刀下胶结破坏均以拉剪破坏为主,其次为压剪破坏,纯拉破坏。

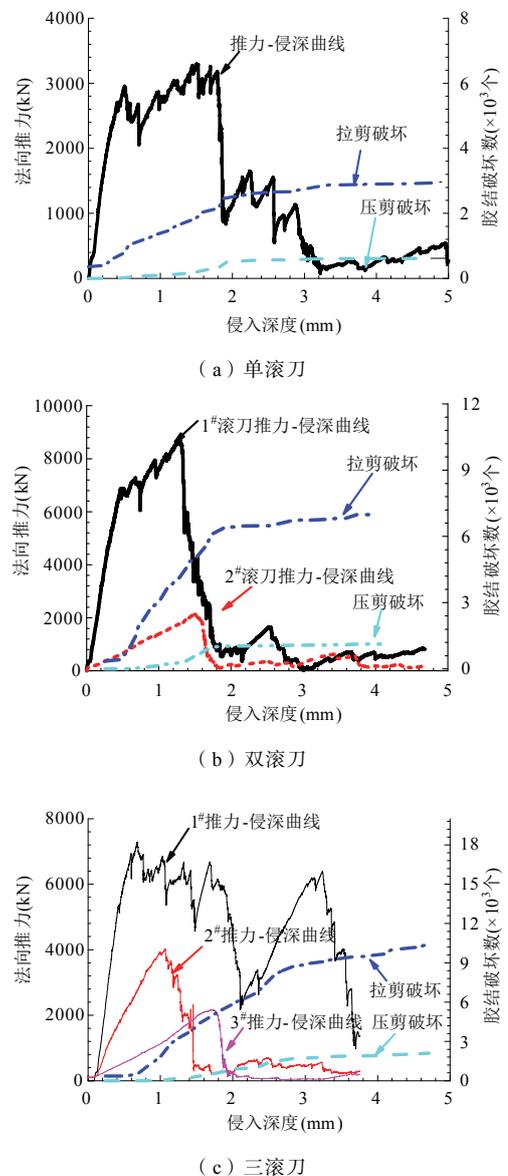


图 3 推力-侵深曲线和胶结破坏-侵深曲线
Fig.3 normal thrust-penetration relationship and bond breakage-penetration relationship

图 3 (a) 中给出了复合岩体下单滚刀破岩的推力-侵深曲线。完整的推力-侵深曲线是连续跃进的，为了简化分析，常聚焦于第一个跃进过程，之后更关注跃进幅度和频率，而这两个因素都可以由第一阶段中滚刀贯入度和贯入速度体现。所以，本文侧重于推力-侵深曲线的第一阶段分析，根据推力-侵深曲线特征可以将破岩过程分为三个阶段：加载阶段、卸载阶段和残余跃进阶段。加载阶段，滚刀推力随着侵入深度呈线性增加，直至推力峰值。卸载阶段，滚刀推力达到峰值后，迅速跌落至较小的值，这对应着滚刀前方岩体破碎，滚刀受到阻力瞬间减小，刀头出现短暂临空的现象，可能导致刀头脱落。残余跃进阶段，破岩阻力存在波动，这是岩体破碎引起的残余跃进，这种波动常伴随一个稳定值，此时对应的胶结破坏点增幅减小，趋于稳定，这说明滚刀的行进阻力在不断减小，岩体内部裂纹很难产生，试样已经破坏。

图 3 (b) 为复合岩体下双滚刀破岩的推力-侵深曲线。各阶段特征与单滚刀相似，但值得注意的是，两把滚刀推力达到峰值时的侵入深度并不相同，呈现 1# 滚刀先达到峰值强度，然后进入卸载阶段，2# 滚刀才达到峰值进入卸载阶段。

图 3 (c) 为复合岩体下三滚刀破岩的推力-侵深曲线。峰值法向推力由大到小为 1# 滚刀法向推力、2# 滚刀法向推力、3# 滚刀法向推力。

3.2 破岩过程微观机理分析

3.2.1 不同滚刀数目下岩体破碎情况

表 2 中给出了三类滚刀破岩的岩体破碎图。岩体破碎图中岩样分为两类，一类是块体最大的，称为母体；一类是小于母体的块体，称为子体，是由母体破碎下来的颗粒。母体颗粒为浅色，子体颗粒为深色。深色区域越多，表明破岩掉落的岩渣越多，破碎效果越好。在单滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，复合岩体硬岩部开裂形成一道狭长的裂缝；贯入度为 2mm 时，复合岩体出现明显的岩体破碎现象，右侧出现挤出现象；贯入度为 3mm 时，岩体进一步破碎，破碎颗粒增加较多；贯入度为 4mm 时，变化较小，趋于稳定。

在双滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，岩体还未出现破坏，处于弹性阶段；当贯入度为 2mm 时，硬岩出现了较大体积的破碎，软岩则破碎较小；贯入度为 3mm 时，复合岩体出现了贯通破坏；贯入度为 4mm 时，花岗岩出现较大裂隙，主要裂纹为表裂纹和斜裂纹，产生较大体积的碎块，

破岩贡献较高。

在三滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，复合岩体没有明显破碎现象，主要位于弹性阶段；当贯入度为 2mm 时，出现小块状破碎，没有纵向裂纹；贯入度为 3mm 和 4mm 时，2#、3# 滚刀间出现了较大体积的贯通破坏，而 1# 滚刀更偏向于独立破岩的状态。

表 2 岩体破碎

Table 2 Rock fragmentation

贯入度	单滚刀	双滚刀	三滚刀
1mm			
2mm			
3mm			
4mm			

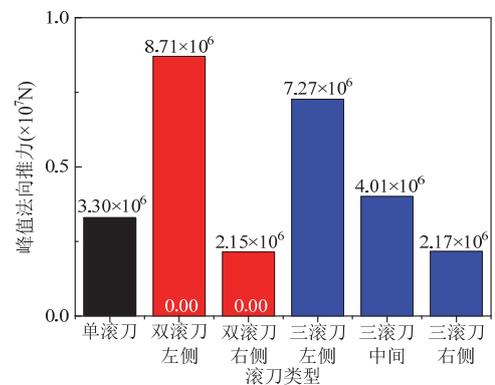


图 4 峰值法向推力

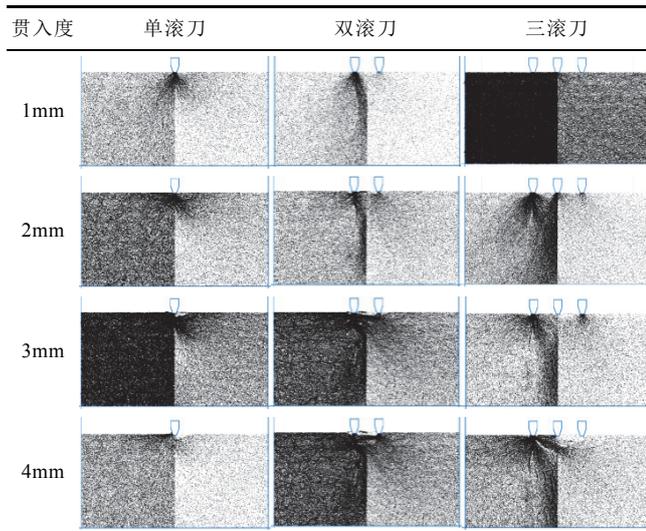
Fig.4 peak normal thrust

3.2.2 不同滚刀数目下岩体接触力链分布

表 3 中给出了三类滚刀破岩的接触力链图。接触力链图中的线条粗细表示接触力的大小，接触力越大，线条越粗。在单滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，能够明显观察到左侧浓密右侧稀疏的力链分布，这是因为硬岩承担主要的外荷载，而软岩只能承担较少的荷载。贯入度为 2mm 和 3mm 时，接触力链更加密集，表明此时应力水平逐步提高。贯入度为 4mm 时，基本趋于稳定，需要提高贯入度并及时清渣。

表 3 接触力链

Table 3 Contact force trains



在双滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，复合岩体的力链向软岩发展，主要由竖向受力。贯入度为 2mm 时，由接触力链产生的软硬岩交界面更加明显，且上一阶段的力链条明显弱化，开始向交界面外侧传递，这主要是因为硬岩滚刀下方的岩体出现破碎，导致应力重新分布，力链传递重新调整。贯入度为 3mm 时，复合岩体出现力链穿越界面形成力链簇的现象。贯入度为 4mm 时，接触力链更加密集，进入后期卸载阶段。

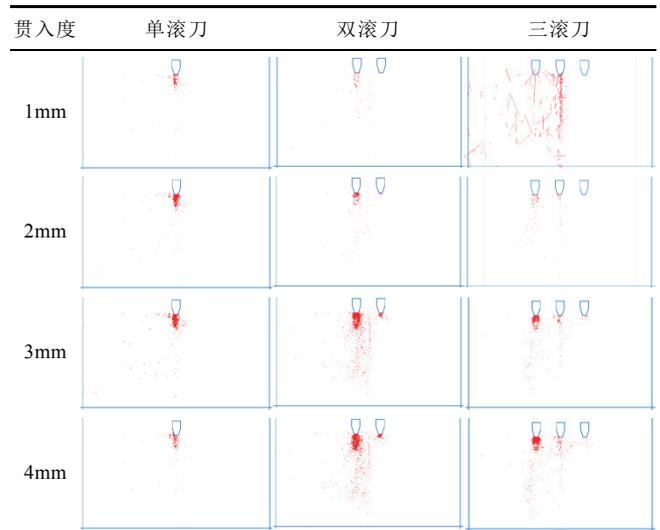
在三滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，花岗岩接触力链密集，出现整个复合岩体接触力链被岩体界面分割的现象。贯入度为 2mm 时，岩体分界面的影响更为明显，接触力链在分界面两侧出现了明显的差异，软岩的力链较浅，硬岩的力链较深，说明滚刀推力主要由硬岩承担。贯入度为 3mm 时，复合岩体在交界面出现力链界面穿越特征，形成了新的力链簇。贯入度为 4mm 时，中间滚刀从被两滚刀架空中独立出来，能够分担一定的外荷载。

3.2.3 不同滚刀数目下岩体胶结破坏点分布

表 4 中给出了三类滚刀破岩的胶结破坏点分布图。出现胶结破坏时便采用线条标记，最后形成胶结破坏点分布图，短线垂直方向便是胶结破坏所对应的微裂缝，短线越密，微小裂缝越多。在单滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，由于硬岩部分应力水平较高，导致胶结破坏并不是传统认为的主要在软岩侧，而是主要位于硬岩侧，呈现深核状，右侧软岩则呈现浅圆状。贯入度为 2mm 和 3mm 时，滚刀下方的胶结破坏数目明显增多，但还是以核状分布为主，破坏仍主要集中在滚刀正下方。贯入度

表 4 复合岩体中胶结破坏点分布

Table 4 Distribution of bond breakage in composite rock mass



为 4mm 时，胶结破坏数目相对上一贯入度有所减少，仍呈核状分布。

在双滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，胶结破坏主要集中在滚刀的正下方和岩体交界面处。贯入度为 2mm 时，胶结破坏的数目明显增多，硬岩部分增速远大于软岩，导致试样两侧胶结破坏数目差增大。当贯入度为 3mm 时，胶结数目有了更大幅度的增长，但始终保持硬岩胶结破坏集中程度高于软岩。贯入度为 4mm 时，此时胶结破坏数目与上一阶段相比变化较小，基本稳定。

在三滚刀破岩状态下，当贯入度为 1mm 时，胶结破坏比较分散，主要集中于滚刀下方及岩体交界面上。当贯入度为 2mm 和 3mm 时，胶结破坏数目增长较多，软岩部分的胶结破坏点松散且较少，硬岩破坏集中，增幅明显。当贯入度为 4mm 时，胶结破坏从核状集中向呈弥散状转变，这主要是因为滚刀下方岩体的破碎基本完成，外力开始由其他完整岩体分担。

3.3 不同滚刀数目下破岩模式

图 5 所示为三类滚刀下的破岩模式图。由图可知，破岩模式可以分为两种类型，软岩倾向模式和硬岩倾向模式。单滚刀破岩时，破坏过程是朝着软岩发展的崩碎模式，由表裂缝形成浅岩块，此时能够清晰地看出岩渣反推出大块岩体；双滚刀破岩时，则呈现硬岩倾向模式，硬岩以表裂纹和斜裂纹为主，软硬岩间裂纹扩展较易贯通；三滚刀破岩时，呈现软岩破坏模式，中间滚刀的存在弱化了界面阻隔，能够帮助滚刀间裂纹的贯通，同时提高了软岩破岩效率。

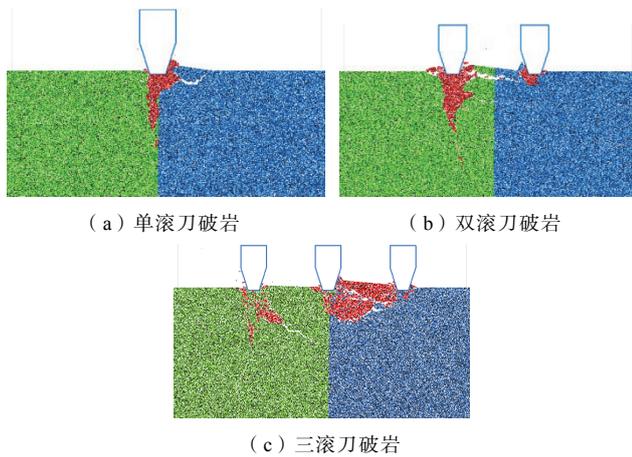


图 5 破岩模式

Fig.5 fragmentation modes

3.4 合理滚刀数目的选择

为比较破岩效率高低,孙亚^[22]采用了胶结破坏比能耗作为评价破岩效率的一个重要指标,这是对传统室内试验定义滚刀破岩效率“比能”的一个重要补充。胶结破坏比能耗的定义为:破岩过程中滚刀所消耗的能量和滚刀作用下产生胶结破坏点总数的比值。胶结破坏比能耗从微观的角度阐明了单个胶结破坏产生微小裂隙所消耗的能量,这能够在一定程度上表征破岩过程中的破岩效率,胶结破坏比能耗越低,破岩效率越高。图 6 给出了复合岩体下三类滚刀破岩时胶结破坏比能耗的变化规律。滚刀破岩所消耗的能量通过对荷载-侵深曲线积分得到,而胶结破坏总数统一取贯入度为 5mm 时胶结破坏点总数的稳定值。对于花岗岩-绿片岩复合岩体,破岩效率由大到小为双滚刀破岩效率、三滚刀破岩效率、单滚刀破岩效率,双滚刀破岩效率最高,且采用双滚刀破岩能够将效率提高一倍左右。因此,建议花岗岩-绿片岩复合岩体破岩时采用双滚刀。

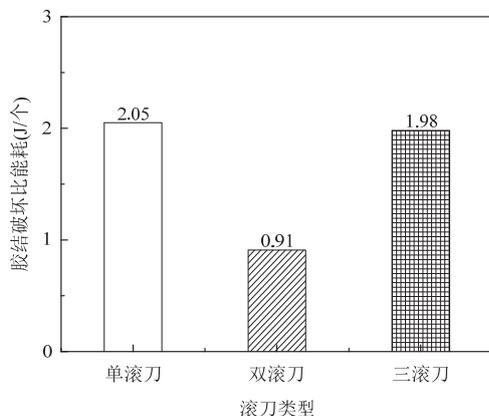


图 6 胶结破坏比能耗

Fig.6 Ratio of energy to bond breakage

4 结论

本文通过离散单元法,采用基于室内试验提取、符合岩石真实破坏特性、考虑胶结尺寸的岩石微观胶结接触模型,模拟了三类滚刀(单滚刀、双滚刀及三滚刀)侵入花岗岩-绿片岩复合岩体的过程。对岩体宏微观信息进行分析,得到以下结论。

(1) 复合岩体破岩过程中胶结破坏类型可以分成 3 种,纯拉破坏,拉剪破坏,压剪破坏;且以拉剪破坏为主,其次为压剪破坏,纯拉破坏。

(2) 在双滚刀及三滚刀破岩过程中,滚刀间的法向推力相差较大,会引起较大的不平衡力矩,可能会造成滚刀刀盘的偏心与震动,增大滚刀磨损,降低使用寿命。

(3) 对于花岗岩-绿片岩复合岩体,破坏过程中软岩区破碎体积较大,由表裂缝扩展形成小岩块;在双滚刀和三滚刀破岩的情况下,表裂缝扩展贯通,造成大块岩体破碎脱落。

(4) 接触力链受岩体分界面影响,软硬岩区存在明显差异;从胶结破坏来看,硬岩区胶结破坏数目远超过软岩区。

(5) 对于花岗岩-绿片岩复合岩体,从胶结破坏比能耗的角度看,破岩效率由大到小为双滚刀破岩效率、三滚刀破岩效率、单滚刀破岩效率,而且双滚刀破岩能将效率提高一倍左右。

参考文献

- [1] 刘泉声, 黄兴, 刘建平, 等. 深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用及安全控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1213-1224 (Liu Quansheng, Huang Xing, Liu Jianping, et al. Interaction and safety control between TBM and deep mixed ground [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1213-1224 (in Chinese))
- [2] 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 cutters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 155-163 (in Chinese))
- [3] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 掘进机刀盘滚刀间距对北山花岗岩破岩效率的影响实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 54-60 (Gong Qiuming, He Guanwen, Zhao Xiaobao, et al. Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 54-60 (in Chinese))
- [4] Geng Q, Wei Z, Ren J. New rock material definition strategy for FEM simulation of rock cutting process by TBM disc cutters[J]. Tunnelling and Underground Space

- Technology, 2017, 65: 179-186
- [5] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65
- [6] Jiang M J, Yu H S, Harris D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 340-357
- [7] Jiang M J, Shen Z F, Wang J F. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 147-163
- [8] Jiang M J, Liu J, Shen Z F, et al. Exploring the critical state properties and major principal stress rotation of sand in direct shear test using the distinct element method[J]. Granular Matter, 2018, 20(2): 25
- [9] Jiang M J, Liao Y N, Wang H N, et al. Distinct element method analysis of jointed rock fragmentation induced by TBM cutting[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(suppl.1): s79-s98
- [10] 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 (in Chinese))
- [11] 张旭辉, 夏毅敏, 谭青, 等. 节理岩体下 TBM 单刃和双刃滚刀破岩特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(10): 1424-1431 (Zhang Xuhui, Xia Yimin, Tan Qing, et al. Study on the characteristics of breaking jointed rock by tunnel boring machine single-point and double-point cutters [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(10): 1424-1431 (in Chinese))
- [12] 蒋明镜, 孙亚, 王华宁, 等. 全断面隧道掘进机破岩机理离散元分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(7): 1038-1044 (Jiang Mingjing, Sun Ya, Wang Huaning, et al. Rock Failure Mechanism Analysis With Discrete Element Method by Using Tunnel Boring Machine [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(7): 1038-1044 (in Chinese))
- [13] Liu J, Wang J. The effect of indentation sequence on rock breakages: A study based on laboratory and numerical tests[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2018, 346(1): 26-38
- [14] Jiang M J, Zhang N, Cui L, et al. A size-dependent bond failure criterion for cemented granules based on experimental studies [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 182-198
- [15] Jiang M J, Liu W, Xi B L, et al. Preliminary DEM analysis on micro-mechanical behavior of the composite cemented granules under complex stress conditions [C]//International Conference on Discrete Element Methods. Singapore: Springer, 2016
- [16] Lan H, Martin C D, Hu B. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2010, 115(B1): B01202
- [17] 吕品. 锦屏水电站绿片岩段扩挖及落底开挖稳定研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011 (Lv Pin. The research of enlarged excavation and surrounding rock stability in the green schist area of jinping hydropower station [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011 (in Chinese))
- [18] Jiang M J, Chen H, Crosta G B. Numerical modeling of rock mechanical behavior and fracture propagation by a new bond contact model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 78: 175-189
- [19] Huang H, Lecampion B, Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I : rock cutting[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13): 1913-1929
- [20] Huang H, Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction II: rock indentation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13): 1930-1947
- [21] Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 579-597
- [22] 孙亚. TBM 破岩机理及深埋节理岩体破岩规律离散元分析 [D]. 上海: 同济大学, 2016 (Sun Ya. DEM analysis of rock fragmentation mechanism and the failure law of the deeply buried jointed rock under TBM driving [D]. Shanghai: Tongji University, 2016 (in Chinese))

蒋明镜 (1965—), 男, 博士, 教授。主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏微观试验、本构模型和数值分析研究。

傅程 (1996—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程数值模拟方面的研究。

王华宁 (1975—), 女, 博士, 教授。主要从事岩土工程中的数值与解析方法研究。

刘俊 (1990—), 男, 博士研究生。主要从事深海能源土宏微观试验和数值分析研究。

廖优斌 (1991—), 男, 硕士。主要从事岩土工程中的数值模拟研究。

陈有亮 (1966—), 男, 博士, 教授。主要从事岩土力学研究。