

全断面隧道掘进机滚刀破岩尺寸效应离散元分析

袁聚云^{1, 2}, 蒋明镜^{1, 2, 3}, 廖优斌^{1, 2}, 孙 亚^{1, 2, 3}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为了给室内模型试验或数值模拟试验提供直接的指导及实际工程间接的参考, 将基于微观胶结试验得到的合理的岩石微观力学模型植入离散元软件, 模拟了不同试样尺寸滚刀破岩过程并分析了各因素对滚刀破岩过程的影响. 结果表明, 不同试样尺寸滚刀破岩过程按破岩阻力和侵入深度的关系均可以分为 3 个阶段, 即加载阶段、卸载阶段和残余跃进阶段; 室内模型试验中, 滚刀刃宽与岩石试样宽度的比值(相对比值)存在一个临界值, 当试验中选取的相对比值小于该临界值时, 可以减小试验过程中的边界效应.

关键词: 全断面隧道掘进机(TBM); 尺寸效应; 离散元模拟
中图分类号: TU458 **文献标志码:** A

Discrete Element Method Analysis of Rock Failure Mechanism Considering Scale Effects of Tunnel Boring Machine Cutter

YUAN Juyun^{1, 2}, JIANG Mingjing^{1, 2, 3}, LIAO Youbin^{1, 2}, SUN Ya^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to guide indoor model experiments or numerical simulation directly and engineering practice indirectly, the process of rock cutting was simulated by using the DEM software where the reasonable contact model for rock summarized from the micro bond contact experiment was implanted. The influence of cutter width and rock sample size on the rock fragmentation was investigated. The results show that cutter width is too small to keep the stability of the actual TBM construction. However, large cutter width in small

sample size has a significant boundary effect which affects the test result. In the indoor model test, there exists a critical ratio of the cutter width and the rock sample width (relative ratio). If the relative ratio in the test is less than the critical ratio, the boundary effect can be reduced during the test.

Key words: tunnel boring machine (TBM); size effect; discrete element method simulation

全断面隧道掘进机(TBM)以其高效、安全、环保等诸多的优势被广泛应用于地下工程建设. TBM掘进的核心过程是滚刀与岩体相互作用的过程, 因此, 许多学者们就滚刀与岩体相互作用问题展开了理论与试验研究. 在 20 世纪 60 年代, Evans 等^[1]以滚刀与岩体相互挤压作用理论为基础, 提出了滚刀破岩推力的预测公式. 随后, Roxborough 等^[2]修正了 Evans 推力预测公式中的横截面积, 并同时给出了滚动力的预测公式. Sanio^[3]通过对滚刀与岩体的相互作用机制的分析, 认为滚刀下方存在一个被压缩的密实核, 处于类似受静水压力的受力状态. 试验方面, Ozdemir 等^[4-5]采用不同尺寸的楔形刀刃滚刀, 开展了大量的线性切割试验, 并基于试验结果建立了科罗拉多受力预测公式, 该公式至今依然被广泛运用. Gertsch 等^[6]采用 17 英寸盘形滚刀对花岗岩进行线性切割试验, 发现滚刀间距与贯入度对滚刀受力情况和比能耗有很大影响. 相关理论和试验研究不足的是, 理论研究大多基于岩石是均质且各向同性的假定, 与实际不符; 而对于室内模型试验而言, 存在成本高, 耗时多且不可重复等缺陷, 其试验结果很难具有普适性.

近几年来, 以离散元方法^[7]为代表的数值模拟方法被广泛应用于滚刀破岩问题的研究. Gong

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013504, 2014CB046901)

第一作者: 袁聚云(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程. E-mail: yuanjuyun@tongji.edu.cn

通讯作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为深海能源土、结构性砂土、太空土以及深部岩体的宏微观数值分析. E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

等^[8-9]通过 UDEC(universal distinct element code)数值模拟方法,进行了一系列滚刀破岩试验的研究,分析了节理产状对破岩规律的影响. Huang 等^[10-11]采用离散元方法分析了滚刀侵入岩体过程,发现临界贯入深度与特征长度有关,并且围压的变化会影响破碎区的发展. Su 等^[12]采用三维离散元方法模拟滚刀破岩过程,并与多种理论解对比分析,验证了该方法用于预测 TBM 掘进行为的可行性. 苏利军等^[13]采用颗粒流方法模拟了 TBM 滚刀破岩过程,研究了不同滚刀参数对破岩过程的影响. 张魁等^[14]研究了不同工况对破岩规律的影响,并总结了相应的破碎模式. 蒋明镜等^[15]将基于微观胶结试验得到的岩石微观胶结力学模型植入离散元软件,模拟滚刀破岩过程并分析滚刀破岩各阶段的宏微观机理. 虽然前人采用离散元方法针对滚刀破岩过程进行了诸多模拟工作并取得了许多研究成果,但对于破岩过程中试样尺寸效应的研究却鲜有报道. 尽管考虑到实际工程中, TBM 滚刀破岩时,滚刀面对的是比滚刀尺寸大很多的隧道开挖面,并不存在明显的尺寸效应的问题,但在室内模型试验和数值模拟过程中,这种可能存在的尺寸效应是很难避免的,为此需要分析其机理并减小其影响. 简而言之,合理的试样尺寸的选择可以使试验结果更准确,从而间接地得到有利于实际工程的结论并且更好地指导实际工程. 因此,本文采用基于室内试验的合理岩石微观接触模型,模拟不同滚刀刃宽侵入不同尺寸岩石试样的过程,分析滚刀及试样尺寸对破岩过程的影响,以为室内模型试验及实际工程提供有价值的参考.

1 滚刀侵入岩石模型的建立

1.1 岩石接触模型简介

本文基于室内水泥铝棒胶结试验^[16],根据不同加载路径下的试验结果,提取了含抗转动能力的无厚度胶结岩石微观力学模型并植入基于离散单元法的商业软件. 模型的具体推导过程见文献^[17]. 本文以 Lac du Bonnet 花岗岩^[18](硬脆性岩石)为研究对象. 该岩石材料的单轴抗压强度为 200.00 MPa,拉伸强度为 11.36 MPa,弹性模量为 67.53 GPa,泊松比 0.256. 针对此花岗岩的物理特性,选取了合适的颗粒级配曲线,如图 1 所示. 模型微观参数的选取是通过单轴压缩试验和巴西试验进行标定,其中,单轴压缩试验与巴西试验中的试样均采用 Jiang 等^[19]提出的分层欠压法生成. 试验所得应力-应变曲线如图

2 所示. 由图 2 可以看出,试验结果表现出的宏观力学特性与室内试验较为一致^[18]. 据此得到 DEM (discrete element method)模拟岩石试样的微观模型参数,如表 1 所示.

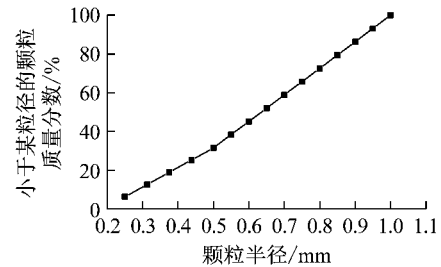


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution

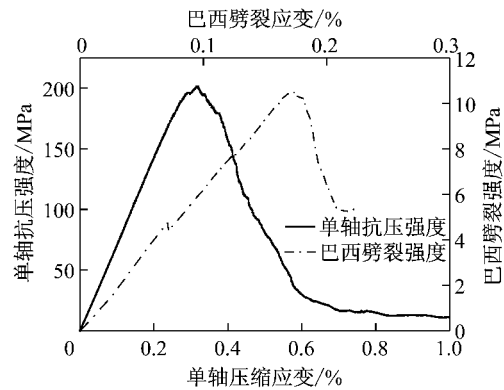


图 2 DEM 岩样单轴压缩和巴西劈裂应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain relation obtained from uniaxial compression test and Brazilian test on DEM sample

表 1 DEM 岩石试样模型参数

Tab. 1 Material parameters of DEM rock sample

参数	数值
颗粒法向刚度 $K_{np}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.8×10^{11}
颗粒切向刚度 $K_{sp}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	9.47×10^{10}
胶结法向刚度 $K_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	9.0×10^{10}
胶结切向刚度 $K_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.735×10^{10}
胶结抗压强度 F_n/kN	8.0×10^4
胶结抗拉强度 F_t/kN	65
胶结摩擦因数 μ_b	0.5
颗粒摩擦因数 μ_p	1.0
胶结抗转动系数 β_b	0.5
颗粒抗转动系数 β_p	1.5

1.2 DEM 岩石试样的建立

实际 TBM 施工中,滚刀与岩体相接触主要受 3 个方向的力^[5],而与 TBM 行进方向相一致的推力是滚刀破岩的主要作用力. 同时,前人的研究^[10-11]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. 因此,本文采用二维离散元方法,将滚刀破

岩过程简化为滚刀侵入岩石试样的平面问题。

为了研究不同尺寸岩石试样对于破岩过程的影响,设计了 4 种尺寸岩石试样,包含了 4 种颗粒总数目,长高比均为 2:1,编号分别为 I、II、III、IV。试样 I 尺寸为 300 mm×150 mm,包含颗粒数目 5 万个;试样 II 尺寸为 400 mm×200 mm,包含颗粒数目 10 万个;试样 III 尺寸为 600 mm×300 mm,包含颗粒数目 20 万个;试样 IV 尺寸为 750 mm×375 mm,包含颗粒数目 30 万个。

1.3 DEM 滚刀模型的建立

在现场施工过程中,滚刀的刀圈断面形状对破岩效率影响较大,主要分为平刃刀圈和楔刃刀圈。其中楔形刀刃与岩石接触宽度随着磨损的增大而逐渐增加,所需要的推力也在增加;而平刃滚刀与岩石表面接触在磨损前后变化很小,推力较为稳定,是当前滚刀使用的主要形式。因此,本文选取常截面盘形滚刀。滚刀形状及相关参数简化如图 3 所示。图 3 中 w 为刃宽, α 为刃角。室内试验中,滚刀的刀刃宽度对试验结果也有着显著影响,滚刀宽度的合理选取往往与试验试样的尺寸有紧密关系。参考工程常用滚刀的刀刃尺寸,本文选取刃宽依次为 5、10、15、20 mm,其对应的滚刀刃角均为 20° 。

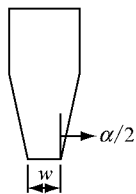


图 3 滚刀示意图

Fig. 3 Sketch of the cutter

2 滚刀侵入岩石试样的过程

对 4 种岩石试样(I、II、III、IV)进行 4 种不同滚刀刃宽(5、10、15、20 mm)的破岩试验,研究滚刀破岩过程中的尺寸效应及裂纹扩展的微观机理。为便于描述结果,本文采用 a # b 的形式来标记模拟工况,其中 a 表示试样尺寸,b 表示滚刀刃宽,如 IV # 15 表示刃宽为 15 mm,刃角为 20° 的滚刀侵入 IV 号试样的试验。滚刀侵入岩石的过程主要分为以下几个关键步骤:首先,采用分层欠压法^[19]制备好不同尺寸大小的岩石试样,其空隙比都为 0.2。然后,在竖向压力为 0.55 MPa 下固结,且同时利用微观胶结模型,模拟自然岩石地基的形成过程。待稳定后,撤掉岩石试样上部刚性墙,进行应力释放,直至试样内部

速度场稳定。左、右侧墙和底墙为刚性约束,限制其位移,顶墙删除保持自由边界,与室内试验保持一致。其次,滚刀采用软件中的墙命令生成,在整个破岩过程中认为是刚性的。生成滚刀与岩石试样后,赋予滚刀一定速度侵入岩石试样。滚刀的速度选取标准,需满足两点,一方面速度要足够小,要保证侵入的过程始终为准静态^[10-11],另一方面又要尽可能选取较高的速度。综合考虑计算效率及颗粒数量,本文选取的滚刀速度为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后,需要特别说明的是,简化后平刃滚刀的法向推力 F_v 主要包括两部分:水平墙体的垂直反力 F_0 和两侧倾斜墙体分解到垂直方向的反力 F_1 。

$$F_v = F_0 + 2F_1 \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

整个侵入过程中记录岩石试样各阶段的微观信息,滚刀破岩模型如图 4 所示。

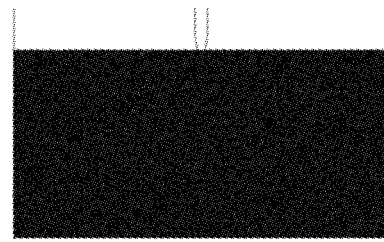


图 4 滚刀破岩离散元模型

Fig. 4 DEM model of rock fragmentation by TBM cutter

3 滚刀破岩模拟结果及微观过程分析

3.1 试样尺寸对破岩过程影响

载荷-侵深曲线是滚刀侵入岩体的最基本关系,就如应力-应变曲线是材料力学的基础一样^[20]。不同尺寸下岩石试验所得载荷-侵深曲线大体相似,限于篇幅,本文仅给出 IV # 15 试验所得到法向推力与侵入深度关系,如图 5 所示。为了在破岩过程中能够再现并验证部分经典的破岩理论,根据室内微观胶结的破坏特征,将胶结破坏类型分为拉伸破坏和剪扭破坏两种主要形式。随着滚刀侵入深度的变化,全程记录两种胶结破坏数目,如图 5 所示。根据载荷-侵深曲线特征将破岩过程主要分为 3 个阶段,即加载阶段,卸载阶段和残余跃进阶段。加载阶段中,法向推力几乎随侵入深度呈线性增长直至峰值,并伴随着胶结破坏点的产生,包括拉破坏及剪扭破坏,且以拉破坏为主。随着侵入深度的增加,由拉伸和剪扭所导致的胶结破坏点数目在不断增加,当快接近峰值应力时,胶结破坏速率最大。卸载阶段中,法向推力

达到峰值后突然跌落至较小值,这一阶段两种胶结破坏点继续增加,说明岩石试样内部裂纹继续增加,随后胶结破坏速率接近零,拉伸破坏点和剪扭破坏点达到稳定值.残余跃进阶段中,法向推力产生明显跌落后,法向推力在该阶段持续在一个很小的范围内波动,具有明显跃进破碎特征.该阶段两种胶结破坏点数目均趋于稳定,说明该阶段岩石内部很难再有裂纹产生,试样已经达到破坏状态.在整个过程中拉伸破坏所导致的胶结破坏点始终高于剪扭破坏点,从而验证了拉伸破岩机理和张拉、剪切及挤压综合破岩机理^[20].

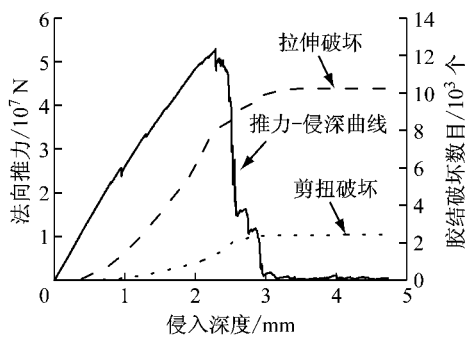


图 5 DEM 破岩过程中法向推力-侵深曲线和胶结破坏数目-侵深曲线

Fig. 5 Normal force -penetration relationship and bond breakage-penetration relationship during DEM rock cutting

图 6 为不同试验所得峰值法向推力.当滚刀的刃宽为 5 mm 时,峰值法向推力在颗粒数目为 5 万和 10 万时变化不大,当颗粒数目从 10 万增至 20 万时产生突增,而后颗粒数目从 20 万增至 30 万时变化也不大.上述现象是因为离散元模拟中贯入阻力是由滚刀与颗粒间的接触力算得,当刃宽过小时,与滚刀接触的颗粒也会随之减小,从而可能导致记录的法向推力不准确,产生明显波动,存在尺寸效应.实际 TBM 掘进过程中,当刃宽过小也会加剧刀具的磨损,使得滚刀刃宽在行进过程中不断增大,不利于掘进过程中的稳定性.当滚刀的刃宽为 10 mm 与 15 mm 时,法向推力变化趋势大致相似,峰值推力从 5 万颗粒试样到 10 万颗粒试样时突增,而从 10 万颗粒试样到 30 万颗粒试样时趋于稳定,说明 5 万颗粒组成的试样可能由于试样尺寸较小而在试验过程中存在边界效应,导致峰值推力不真实.当滚刀的刃宽为 20 mm 时,峰值推力一开始随着 5 万颗粒试样到 10 万颗粒试样有所减小,而后随着颗粒数目的增加再增大,这是因为随着刃宽的增大,会加剧试验过程存在的边界效应.当试样尺寸较小时,边界效应更加

明显,峰值推力会显著增大,随着试样尺寸的增大,边界效应有所缓解,且大试样有利于裂纹扩展滞后产生,故峰值阻力逐渐增大.

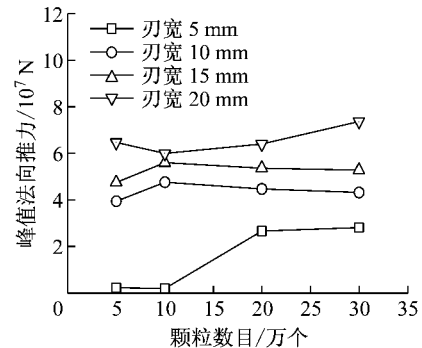


图 6 不同试样的峰值法向推力

Fig. 6 Peak normal force in different rock samples

无论室内试验还是数值模拟,破岩过程时岩石试样侧边都会固定以保证试验过程中试样不会发生侧向位移.为进一步探讨不同试样尺寸对破岩过程的影响,选取各试样在法向推力达到峰值时刻的侧向应力,得到侧向应力与试样颗粒数目的关系,如图 7 所示.从图 7 中可以看出,对于 4 种滚刀宽度,各试样峰值时刻的侧向应力随颗粒数目变化趋势均相似,峰值时刻的侧向应力均随着颗粒数目的增加而减小.5 万颗粒数目试样到 10 万颗粒数目试样减小幅度最大,从 10 万颗粒数目试样到 20 万颗粒数目试样减小幅度有所缓和,而从 20 万颗粒数目到 30 万颗粒数目变化明显趋于平缓,无明显差异.这一趋势说明当颗粒数目过少,模拟试验过程中两侧墙边界效应很明显,这会严重影响模拟过程中峰值的真实与稳定.如前文所述,随着颗粒数目及试样尺寸的增大,试样侧向边界的边界效应会逐渐缓和.

为了给室内试验及数值模拟试验中滚刀的刃宽的选取提供依据,图 8 给出了各试样峰值时刻侧向应力与刃宽对试样宽度的比值(相对比值)之间的关系.可以看出,随着相对比值的增加,峰值时刻侧向应力逐渐增大,即边界效应逐渐变得显著.另外,当上述比值小于 0.02 时,峰值时刻侧向应力较小且稳定,边界效应较小;当相对比值大于 0.02 时,峰值时刻侧向应力较大且随着比值的增大明显增大,边界效应也明显增大.故 0.02 为避免边界效应下刃宽和试样宽度的临界比值,本文将该值定义为临界尺寸比值.室内试验或数值模拟时,可根据临界尺寸比值及试样尺寸选取合适的滚刀尺寸进行试验,能有效减少边界效应的影响.

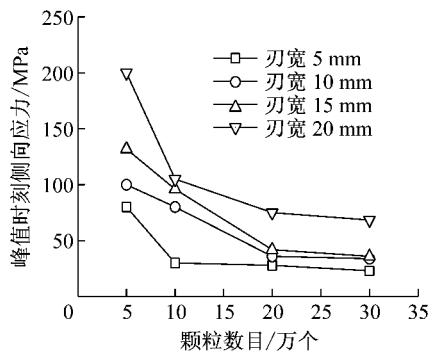


图 7 达到峰值法向推力时侧向应力与颗粒数目的关系
Fig. 7 Lateral stress versus particle number when reaching peak normal force

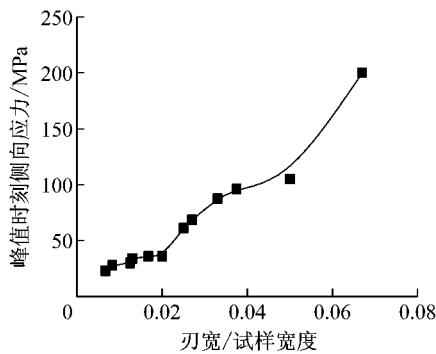


图 8 达到峰值法向推力时侧向应力与刃宽对试样宽度比值的关系
Fig. 8 Lateral stress versus ratio of cutter width and rock sample width when reaching peak normal force

3.2 裂纹扩展过程微观机理分析

为了便于观测边界效应和分析裂纹扩展的微观机制,本文给出了在刃宽为 15 mm,刃角为 20°的滚刀作用下,不同试样处在不同阶段的微观信息图,即接触力链图和胶结破坏点图,如图 9~14 所示.需要说明的是,力链图中线条的粗细表示接触力的大小,胶结破坏点图中密集程度代表胶结破坏点的数目的大小.

图 9 为不同尺寸试样处于加载阶段的力链图.从图 9 可以看出,各试样在滚刀正下方均有一个压力较集中的核心区域,压力链会从这个核心区域散射向四周分布,Sanio^[3]也提到过类似现象.随着试样尺寸的增大,滚刀下方的压力链组成的密实核的相对尺寸就会越小;反之,试样尺寸越小,底部边界处压力链密度越大,边界效应越明显,如 I 号试样力链图所示.图 10 为不同尺寸试样处于加载阶段的胶结破坏点分布图.从图 10 中可以看出,该阶段滚刀下方已有胶结破坏点产生,且随着试样的增大,胶结破坏点离底墙越远,说明大试样能够避免边界效应

的产生.

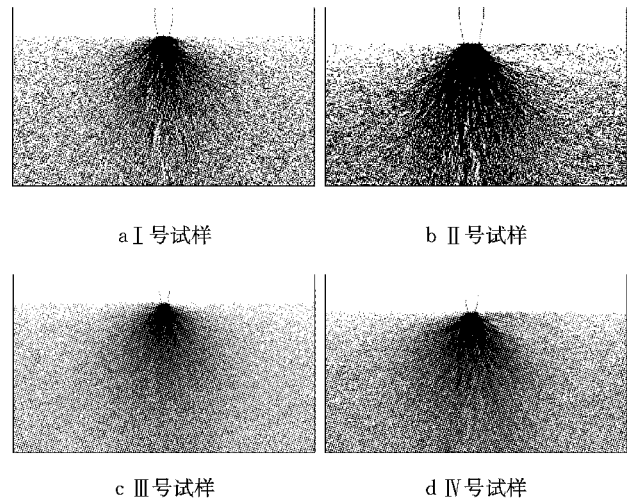


图 9 加载阶段各试样力链图
Fig. 9 Force chains in DEM samples at loading stage

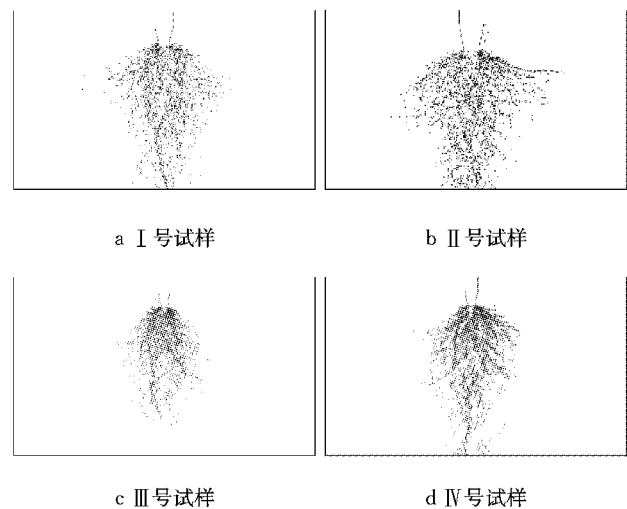


图 10 加载阶段胶结破坏点分布图
Fig. 10 Bond breakage distributions in DEM samples at loading stage

图 11 为不同尺寸试样处于卸载阶段的力链图.从图 11 中可以看出,各试样卸载阶段应力水平均有降低,这是因为卸载阶段裂纹产生,能量开始释放,导致试样应力水平降低.值得注意的是,经过卸载阶段后,滚刀下方的力链呈现非对称分布,在滚刀一侧出现了力链转移,这也就解释了滚刀单侧偏磨损的现象.图 12 为不同尺寸试样处于卸载阶段的胶结破坏点分布图.与图 10 相比,图 12 中各试样的胶结破坏点继续增多,可以看出卸载阶段时,破坏点向两侧充分发展,构成斜裂纹.斜裂纹通常被认为是滚刀破岩的关键,因此该特征可以用来证明滚刀破岩张拉破坏机制.与图 11 对应,图 12 胶结破坏点数目也呈现非对称分布,在滚刀一侧出现了胶结破坏点密集

偏移现象,这种偏移方向恰恰与力链偏移方向大致相反.这主要是因为胶结破坏点分布较多的滚刀一侧已经出现裂纹破碎现象,其降低了抵抗滚刀荷载的能力.岩石试样内部为了平衡外力,出现了应力重分布进而产生了力链转移.

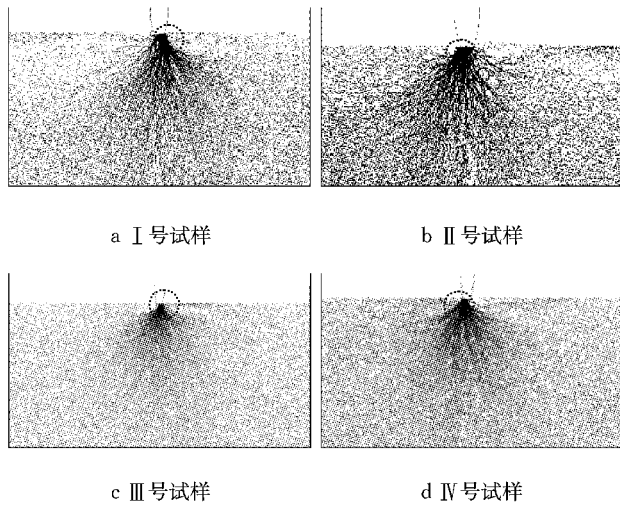


图 11 卸载阶段各试样力链图

Fig. 11 Force chains in DEM samples at unloading stage

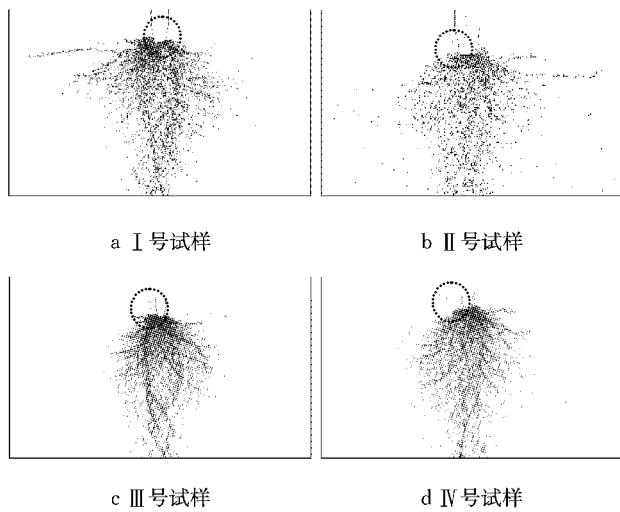


图 12 卸载阶段胶结破坏点分布图

Fig. 12 Bond breakage distributions in DEM samples at unloading stage

图 13 为不同尺寸试样处于残余跃进阶段的力链图.从力链图可以看出,残余跃进阶段各试样中力链分布与卸载阶段相似,都出现了力链转移现象,但能够观察到各试样中力链的密度继续减少,应力水平明显减少,此时的破岩过程只需要较少的能量,同时也说明从卸载阶段到残余跃进阶段,发生了岩块的产生、挤出,主要是岩体内部应力消散的过程,而岩体内部颗粒相互作用形式未发生较大变化.图 14 为不同尺寸试样残余跃进阶段的胶结破坏点分布

图.从图 14 中可以看出,残余跃进阶段各试样裂纹数目与卸载阶段相比没有显著发展,与前文图 5 所示(载荷-侵深曲线)一致,说明残余各阶段岩石内部破碎没有继续发展,趋于稳定.残余跃进阶段中可看出裂纹数目没有显著发展,与前文图 5 所述(胶结破坏数目-侵深曲线)一致,胶结破坏点不再继续增加,说明残余阶段岩石内部应力水平趋于稳定.

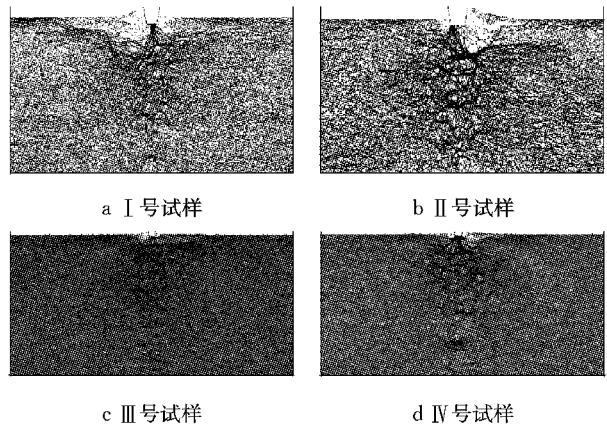


图 13 残余跃进阶段各试样力链图

Fig. 13 Force chains in DEM samples at residual leap stage

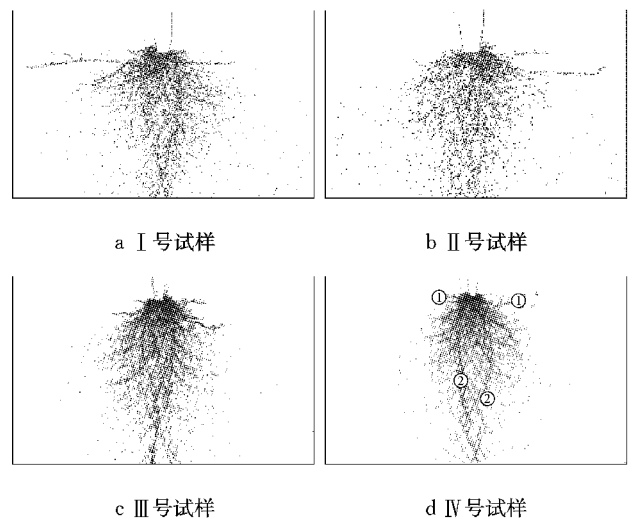


图 14 残余跃进阶段胶结破坏点分布图

Fig. 14 Bond breakage distributions in DEM samples at residual leap stage

图 15 为滚刀破花岗岩试样的室内试验^[21]结果.与图 13 和图 14 的 IV 号试样相比,可以看出,室内试验试样的破坏模式与本文离散元模拟结果较为相似.滚刀下裂纹常可以按其所在的位置分为表裂纹、斜裂纹和纵裂纹.表裂纹平行于岩石试验的自由面,如图 14 和图 15 中①所示;纵裂纹垂直于岩石试样的自由面,如图 14d 和图 15 中②所示;介于表裂纹和纵裂纹之间的倾斜裂纹称为斜裂纹.首先,室内试

验中滚刀下方白色部分为聚集着的小裂纹,DEM 模拟中表征小裂纹的胶结破坏点也构成裂纹团簇,两者都形成了密实核.其次,两者的表裂纹与纵裂纹从该裂纹团边界产生并沿各自的方向不对称扩展,这主要是因为岩石试样内部存在诸多不规则的且有利于能量释放和裂纹扩展的微小裂纹,从而很大程度上决定了滚刀侵入岩石试验后破坏模式的非对称性.而采用离散元方法模拟滚刀破岩时,在裂纹扩展即能量释放的过程中,可能存在某一侧的胶结点更容易破坏,从而使能量集聚释放,这种“集聚效应”的产生会进一步诱发应力重分布,导致附近的胶结点相继破坏,进而形成宏观的裂纹.试验与模拟均表明,试样内部初始缺陷引起的不均匀能量释放是导致裂纹扩展非对称性的主要原因.

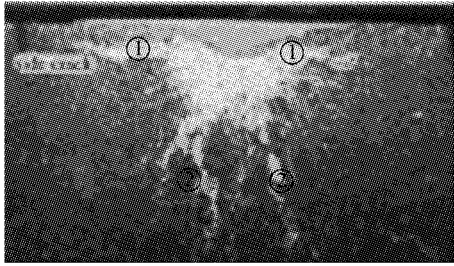


图 15 室内侵入试验岩石破坏形态^[21]

Fig. 15 Failure rock model in indoor penetration test^[21]

4 与经典破岩公式对比及推广应用

破岩过程中的法向推力,即破岩阻力是破岩过程中的重要参数.国内外学者对滚刀破岩理论进行了大量模型假设,并提出了相应的推力预测公式.

比较经典的有 Evans 公式^[1], Roxborough 公式^[2]和东北工学院岩石破碎研究室提出的推力预测公式^[20],分别如式(2)~(4)所示.

$$F_v = \frac{4}{3} \sigma_c h \sqrt{R^2 - (R-h)^2} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

$$F_v = 4 \sigma_c h \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2Rh - h^2} \quad (3)$$

$$F_v = \frac{4}{3} k_d \sigma_c h \sqrt{R^2 - (R-h)^2} \tan \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: σ_c 为岩石单轴抗压强度; k_d 为滚压换算系数,本文根据花岗岩选取范围取 0.67; α 为滚刀刃角; φ 为岩石破碎角,根据模拟结果选取 145°^[20]; R 为滚刀半径; h 为滚刀侵入深度;各参数取值见表 2.

考虑到早期的破岩公式都是基于楔刃滚刀,而

表 2 岩石试验对应的公式参数取值

Tab. 2 Formula parameters of rock sample					
σ_c /MPa	k_d	α /°	φ /°	R /mm	h /mm
200	0.67	20	145	100	0.5/1.0/1.5/2.0

数值模拟选取的是当前最为广泛使用的带一定倾角的平刃滚刀,所以在尺寸效应较小的 IV 号岩石试样上选取刃宽 w 为 20、15、10 和 5 mm 的平刃滚刀,来逐步逼近楔刃滚刀,并保持其他变量一致,刃角为 20°,滚刀半径为 0.1 m.在贯入深度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 时,滚刀在破岩过程中的法向推力数据与理论公式进行对比,如图 16a 所示.首先,DEM 试验结果与理论解,从定性上吻合较好,变化趋势大体相同,都随着贯入深度的增加而增大,总体上数值解均大于理论解,较为合理.原因如下:一方面,理论解整体上比实际值偏小,如试验已经证明^[20],按 Evans 公式计算得到的推力仅为实际破岩推力的三分之一;另外一方面,带倾角的平刃滚刀可以看成是由楔刃滚刀磨损后的滚刀形式,其受到岩石试样的摩阻力更大,则滚刀的法向推力也更大.其次,随刃宽的逐步减小,法向推力的增长速率也相应地有所下降,和基于楔刃滚刀为基础的理论解愈加接近.可以这样理解,当平刃滚刀的刃宽无限逼近于 0 时,且贯入深度足够小时^[20],平刃滚刀就退化为楔刃滚刀,受到几乎一样的法向阻力.

将图 16a 中的法向推力对各自的初值($h=0.5$ mm 时的法向推力)进行归一化处理,结果如图 16b 所示.3 种经典破岩公式归一化后得到的法向推力重合为一条曲线,数值解归一化后比理论解小.3 种理论解归一化后公式简化如下:

$$\bar{F} = \frac{\frac{4}{3} \sigma_c h_1 \sqrt{R^2 - (R-h_1)^2} \tan \frac{\alpha}{2}}{\frac{4}{3} \sigma_c h_0 \sqrt{R^2 - (R-h_0)^2} \tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{h_1 \sqrt{2Rh_1 - h_1^2}}{h_0 \sqrt{2Rh_0 - h_0^2}} \quad (5)$$

$$\bar{F} = \frac{4 \sigma_c h_1 \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2Rh_1 - h_1^2}}{4 \sigma_c h_0 \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2Rh_0 - h_0^2}} = \frac{h_1 \sqrt{2Rh_1 - h_1^2}}{h_0 \sqrt{2Rh_0 - h_0^2}} \quad (6)$$

$$\bar{F} = \frac{\frac{4}{3} k_d \sigma_c h_1 \sqrt{R^2 - (R-h_1)^2} \tan \frac{\varphi}{2}}{\frac{4}{3} k_d \sigma_c h_0 \sqrt{R^2 - (R-h_0)^2} \tan \frac{\varphi}{2}} = \frac{h_1 \sqrt{2Rh_1 - h_1^2}}{h_0 \sqrt{2Rh_0 - h_0^2}} \quad (7)$$

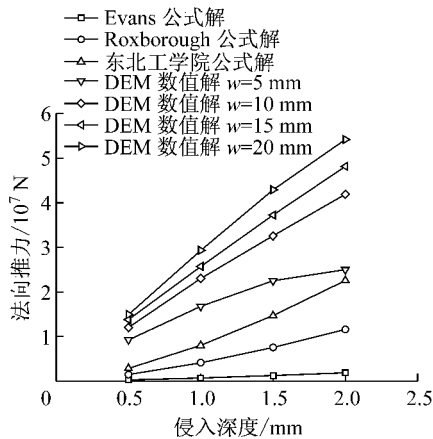
式(5)~(7)中: h_1 为任意深度; h_0 为初始深度.

对比分析可知,尽管式(2)、(3)和(4)不一样,但通过对初值归一化处理,发现 3 种经典法向推力

公式几乎完全吻合,呈类似抛物线状.需要特别说明的是,以上 3 种经典公式都是基于一个假设:盘形滚刀所需要的垂直推力 F_v 与盘形滚刀压岩石区域的投影面积成正比,其比值为等效的单轴抗压强度,3 种理论解的本质区别在于投影面积的取法不同,但归一化后,其物理意义是一致的,即为滚刀在两种侵入深度下滚刀投影面积的比值.受此启发,DEM 数值解的归一化结果也应该对应某种物理意义.自然地,由于滚刀断面与岩体试样之间的投影线段的长度为

$$W = w_0 + 2h \tan \frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

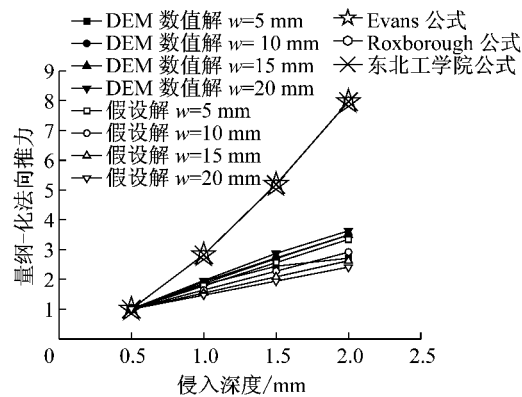
则根据本次模拟的数值解,反推得到的经验的推力归一化公式为



a 法向推力与贯入深度关系

$$\bar{F} = \frac{w_0 + 2h_1 \tan \frac{\alpha}{2}}{w_0 + 2h_0 \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (9)$$

代入不同的滚刀宽度和不同的滚刀角度即能得到归一化后的增长曲线的 4 种假设解,如图 16b 所示.可以看出,根据经典公式合理外推之后的假设解和数值解也吻合比较好.从另一个角度看,Evans 的假设相对比较合理,在数值模拟中也能得到验证.所以归一化之后法向推力的数值解和理论解的较大的偏差主要是因为数值模拟中滚刀的投影线段是线性增长的,而基于半经验半理论的理论解时,滚刀的投影面积随着侵入深度的增加是以抛物线型增长的,除此之外,滚刀断面的差异也是造成归一化法向推力增长速率不一致的重要原因.



b 量纲一化法向推力与贯入深度的关系

图 16 DEM 数值解与理论解结果之间的关系

Fig. 16 DEM numerical solution versus theoretical solution

5 结论

本文通过离散元方法,采用从室内接触试验提取的无胶结厚度含抗转动能力的岩石微观力学模型,模拟了不同刃宽滚刀侵入不同尺寸 DEM 岩石模型的全过程,得到结论如下:

(1) 不同工况下滚刀破岩的力学响应大体相似,主要分为 3 阶段:加载阶段、卸载阶段和残余跃进破碎阶段.滚刀刃宽过小不利于实际 TBM 施工的稳定性;滚刀刃宽过大或试样尺寸过小会导致试验过程中的边界效应明显,对试验结果造成不利影响.

(2) 进行室内破岩试验时,应该考虑到滚刀刃宽与岩石试样宽度的相对关系,尽量减小边界效应对试验结果的影响.根据本文模拟结果,对于长高比为 2:1 的岩石试样,临界尺寸比值为 0.02.试验中

应根据试样的尺寸选择合适的滚刀刃宽进行破岩试验.

(3) 通过的微观信息输出,验证了密实核原理.与经典的破岩公式对比,DEM 数值解与理论解的变化趋势大体相同,都随着贯入深度的增加而增大,总体上数值解均大于理论解,较为合理.

参考文献:

- [1] EVANS I, POMEROY C D. The strength fracture and workability of coal [M]. Pergamon: [s. n.], 1966.
- [2] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H R. Rock excavation by disc cutter [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(12): 361.
- [3] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1985, 22 (3): 153.

- [4] OZDEMIR L, WANG F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design[J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1979, 80: 90.
- [5] OZDEMIR L, MILLER R. Cutter performance study for deep based missile egress excavation[J]. Golden, Colorado, Earth Mechanics Institute Colorado School of Mines, 1986, 12 (23): 105.
- [6] GERTSCH R, GERTSCH L, ROSTAMI J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite; implications for TBM performance prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(2): 238.
- [7] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47.
- [8] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(2): 183.
- [9] GONG Q M, JIAO J J, ZHAO J. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21 (1): 46.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] SU O, AKCIN N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3): 434.
- [13] 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. 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.
- [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. ZHANG Kui, XIA Yimin, TAN Qing, *et al.* Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1780.
- [15] 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. 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.
- [16] JIANG M J, SUN Y G, XIAO Y. An experimental investigation on the mechanical behavior between cemented granules [J]. Geotechnical and Testing Journal, 2012, 35(5): 678.
- [17] 蒋明镜, 白闰平, 刘静德, 等. 岩石微观颗粒接触特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1121. JIANG Mingjing, BAI Runping, LIU Jingde, *et al.* Experimental study of inter-granular particles bonding behaviors for rock microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6):1121.
- [18] MEGLIS I L, CHOW T M, YOUNG R P. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet Granite-I acoustic emission source location and velocity measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics Sciences and Geomechanics Abstract, 1995, 32(8): 741.
- [19] 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.
- [20] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. XU Xiaohu, YU Jing. Rock fragmentation [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984.
- [21] LINDQVIST P A. Rock indentation database-testing procedures, results and main conclusions [M]. [S. l.]: SKB, 1994.