

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2389

TBM 滚刀破岩的广义粒子动力学数值模拟

翟淑芳¹, 周小平^{2,3}, 毕 靖^{2,3}

(1. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450000; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 提出了一种新的无网格数值模拟计算方法——广义粒子动力学法(GPD), 并在 GPD 算法中引入了粒子损伤理论。运用 GPD 方法, 建立了 TBM 单滚刀、双滚刀作用下的完整岩体破岩模型, 成功模拟了 TBM 滚刀破岩过程。通过与数值模拟结果及室内试验结果的对比分析, 验证了 GPD 法模拟 TBM 滚刀破岩过程的有效性。同时, 运用 GPD 方法建立了含节理岩体及高围压条件下岩体的 TBM 滚刀破岩模型, 研究了节理及围压条件下 TBM 滚动破岩过程。得到了节理对 TBM 滚刀破岩效率的影响, 既可能是促进作用又可能是抑制作用, 高围压对 TBM 滚刀破岩过程中裂纹的起裂及扩展和破岩深度有较大的影响。

关 键 词: 广义粒子动力学 (GPD); 全断面隧道掘进机 (TBM); 节理; 围压; 破岩

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2699-09

Numerical study of rock fragmentation by TBM cutters using general particle dynamics (GPD)

ZHAI Shu-fang¹, ZHOU Xiao-ping^{2,3}, BI Jing^{2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Department of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In this paper, a general particle dynamics (GPD) was proposed to reveal the mechanism of rock fragmentation by TBM cutters. The GPD method is regarded as a novel meshless numerical method by introducing the particle failure criterion. The numerical models were established for intact rock fragmentation by a single TBM cutter and double TBM cutters using the GPD method, and the whole processes were successfully investigated. It was found that numerical results obtained by the GPD method were in good agreement with experimental results and previous numerical results, which verified the validity of GPD method for rock fragmentation by TBM cutters. Moreover, the GPD method was adopted to establish numerical models by considering the influences of joints and high confining pressure on rock fragmentation by TBM cutters. The results showed that the inclination angle of joints significantly affected the efficiency of TBM cutting, and the effects were quite different with increasing the inclination angle of joints. The high confining pressure greatly influenced the characteristics of crack initiation, propagation and even the depth of rock fragmentation by TBM cutters. Therefore, the GPD method demonstrates great potential to investigate rock fragmentation by TBM cutters.

Keywords: general particle dynamics (GPD); tunnel boring machine (TBM); joints; confining pressure; rock fragmentation

1 引 言

根据工程实践经验, 当隧道的长度与直径之比大于 600 时, 采用全断面隧道掘进机 (tunnel boring

machine, TBM) 进行隧道施工是经济的^[1]。随着 TBM 在隧道施工中发挥的作用日趋重要, 为了节约成本、提高隧道施工效率, 我国已把自主研发 TBM 作为一项首要任务^[2]。为了指导 TBM 刀盘、刀具的

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 河南工业大学博士科研启动基金资助项目 (No. 2018BS005); 中央高校基本科研业务费资助 (No. 0903005203452); 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) (No. 2014CB046903); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51325903, No. 51279218)。

This work was supported by the Doctoral Scientific Research Foundation of Henan University of Technology (No. 2018BS005), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (0903005203452), the National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (2014CB046903) and the National Natural Science Foundation of China (51325903, 51279218).

第一作者简介: 翟淑芳, 女, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事 TBM 破岩机制方面的研究工作。E-mail: zhaishufangcq@126.com

通讯作者: 毕靖, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事无网格数值模拟方法的研究工作。E-mail: demonjjun@outlook.com

研制和不同地质条件下刀盘、刀具的选型, TBM 破岩机制的研究成为相关研究的核心。在 TBM 滚刀的作用下, 岩体中裂纹的萌生、扩展和连接规律的研究是深刻理解 TBM 破岩机制的前提。对于这一问题, 目前主要的研究方法包括: 室内线性切割试验、冲压试验和数值模拟等。Lawn 等^[3-5]通过试验研究了在楔形刀具作用下, 被侵入体内的圆锥形裂纹、硬币状裂纹和中间主裂纹的衍生和扩展行为。Cook 等^[6]通过试验研究了压头贯入硬币时微观裂纹的衍生和扩展, 进而得到硬币宏观破坏的整个过程。刘泉声等^[7]进行了滚刀贯入过程中泥岩破坏特征的试验研究, 分析了岩体破坏时细观和宏观裂纹形成过程。Yin 等^[8]借助声发射技术, 通过室内贯入试验得到随着围压的增加, 裂纹的起裂应力和破碎面积均增加。近年来, 尹喜云等^[9]对动静组合加载破岩理论进行了研究, 得到了岩石中裂纹的真实扩展模式。然而, 由于室内试验中大型岩石试件和加载装置的制备需要耗费大量成本, 使得试验研究具有一定的局限性。

随着计算机性能的不断提高, 数值模拟作为一种重要的研究岩石材料破坏的有效手段, 被各国研究者广泛使用。Liu 等^[10-11]通过建立有限元模型, 成功模拟了 TBM 刀具侵入岩体时, 岩体裂纹的生成和扩展过程。Gong 等^[12]运用离散单元模型考虑了节理的几何特征参数对岩体中裂纹的扩展过程的影响。张魁等^[13]运用离散单元法得到不同围压下存在 4 种 TBM 刀具破岩模式。莫振泽等^[14]利用离散元软件模拟了不同形状刀刃作用下岩体裂纹的扩展规律及其对破岩效果的影响。谭青等^[15]采用颗粒离散元法对不同节理围压和节理特征下的盘形滚刀破岩模型进行数值模拟, 得到破岩模式、比能耗和裂纹数目与围压大小密切相关的结论。

本文提出了一种新的无网格数值模拟计算方法——广义粒子动力学(简称 GPD)来模拟 TBM 滚刀破岩过程, 研究滚刀破岩机制。这种数值方法是一种基于粒子的无网格动力学计算方法, 可以方便地研究非连续性介质在动力加载条件下的问题。将 GPD 方法用于 TBM 滚动破岩研究时, 不仅可以方便地建立各种含有节理的岩体模型, 还可以研究不同地质因素条件下 TBM 破岩模式和破岩效率, 如高围压等。

本文对 GPD 方法进行了简要介绍; 利用单滚刀、双滚刀完整岩石模型验证了 GPD 方法模拟

TBM 滚刀破岩过程的有效性; 对节理岩体和高围压作用下的岩体 TBM 滚刀破岩过程进行数值模拟。

2 广义粒子动力学(GPD)方法简介

2.1 本构关系

总应力张量 $\sigma^{\alpha\beta}$ 是由两部分组成, 一部分是体积应力 p , 另外一部分为偏应力张量 $\tau^{\alpha\beta}$:

$$\sigma^{\alpha\beta} = \tau^{\alpha\beta} - p\delta^{\alpha\beta} \quad (1)$$

式中: $p = k\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)$, ρ 为实时点的密度, ρ_0 为初始密度, k 为体积弹性模量; $\delta^{\alpha\beta}$ 为 Kronecker 符号。偏应力张量 $\tau^{\alpha\beta}$ 为

$$\hat{\tau}^{\alpha\beta} = \dot{\tau}^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\gamma} \dot{R}^{\beta\gamma} + \tau^{\gamma\beta} \dot{R}^{\alpha\gamma} \quad (2)$$

式中: $\hat{\tau}^{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 方向的修正剪切应力率; $\dot{\tau}^{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 方向的应力率; $\tau^{\alpha\gamma}$ 、 $\tau^{\gamma\beta}$ 分别为 $\alpha\gamma$ 、 $\gamma\beta$ 方向的应力; $\dot{R}^{\beta\gamma}$ 、 $\dot{R}^{\alpha\gamma}$ 分别为 $\beta\gamma$ 、 $\alpha\gamma$ 方向的旋转速率。

应变率为

$$\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (3)$$

旋转率为

$$\dot{R}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} - \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (4)$$

式中: x^α 和 v^α 分别为沿 α 方向的空间坐标向量和速度向量; x^β 、 v^β 分别为沿 β 方向的空间坐标向量和速度向量;

应力率由应变率和剪切模量计算可得

$$\dot{\tau}^{\alpha\beta} = 2G\bar{\epsilon}^{\alpha\beta} \quad (5)$$

式中: $\bar{\epsilon}^{\alpha\beta} = \dot{\epsilon}^{\alpha\beta} - \frac{1}{3}\delta^{\alpha\beta}\dot{\epsilon}^{\gamma\gamma}$, 其中, $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 方向的应变率; $\dot{\epsilon}^{\gamma\gamma}$ 为 $\gamma\gamma$ 方向的应变率; G 为剪切模量。

由此可得

$$\hat{\tau}^{\alpha\beta} = 2G \left(\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} - \frac{1}{3}\delta^{\alpha\beta}\dot{\epsilon}^{\gamma\gamma} \right) + \tau^{\alpha\gamma} \dot{R}^{\beta\gamma} + \tau^{\gamma\beta} \dot{R}^{\alpha\gamma} \quad (6)$$

2.2 控制方程

GPD 算法中, 质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程可表达为^[16-18]

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (7)$$

$$\frac{dv^\alpha}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \quad (8)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (9)$$

式中: e 为比内能; d/dt 为拉格朗日描述下的时间导数。

在两种不同密度的物体接触面上, 式(7)~(9)会在界面上显示出不稳定性, 这种不稳定性会随着时间的推移影响到最终的计算结果。本文采用的修正方法为^[19-20]

$$\rho_i = \frac{\sum_j m_j W_{ij,\beta}}{\sum_j \left(\frac{m_j}{\rho_j} \right) W_{ij,\beta}} \quad (10)$$

式中: $W_{ij,\beta} = \frac{\partial W(x_j - x_i, h)}{\partial x_i^\beta}$ 是核函数的梯度; h 为光滑长度; m_j 为粒子 j 的质量; ρ_i 和 ρ_j 分别为粒子 i 和 j 的密度; x_i 和 x_j 分别为粒子 i 和 j 的空间坐标。

2.3 粒子损伤理论

通常情况下, 岩石材料表现出脆性特性。在模型中, 所有的粒子具有和材料模型相同的强度参数, 因此在 GPD 模型中, 粒子损伤的起裂和扩展均采用与材料模型相同的损伤模型。在下文中, 笔者将介绍 GPD 法中的损伤算法。

在本文中, 采用 Hoek-Brown 强度对损伤的开始和扩展进行判断, 当粒子应力满足 Hoek-Brown 强度准则时, 认为损伤从该粒子开始扩展。当损伤从某一个粒子开始时, 这个损伤粒子和周围相邻粒子的相互作用与材料未损伤时不同, 损伤粒子不再与其他粒子有其他相互作用, 并且会产生新的边界, 如图 1 所示, $2h$ 表示粒子的影响半径。

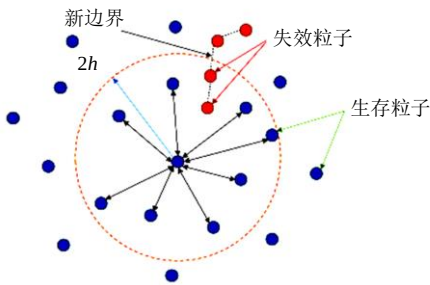


图 1 粒子离散化分布图

Fig.1 Distribution of particle discretisation

Hoek-Brown 强度准则可以表述为^[21]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (11)$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; σ_c 为岩石的单轴抗压强度。强度参数 m 和 s 可以通过 GSI 来确定, GSI 是表征节理、裂隙的结构及表面

状态的参数, 完整岩石的单轴抗压强度可以通过试验来确定。

引进一个参数 f , 称为相互作用因子, 相互作用因子 f 是由粒子的损伤状态定义的, 可以反映粒子 i 和粒子 j 之间的相互作用水平。当粒子未发生破坏时, $f=1$; 粒子发生破坏时, $f=0$, 即

$$D_m = 0, f = 1 \quad (\sigma_{\text{particle}} < \sigma_{\text{max}}) \quad (12)$$

$$D_m = 1, f = 0 \quad (\sigma_{\text{particle}} \geq \sigma_{\text{max}}) \quad (13)$$

式中: D_m 为损伤因子; σ_{particle} 为粒子上的应力分量, σ_{max} 为引起粒子破坏的应力分量。

为模拟滚刀作用下压碎区的形成和裂纹的起裂、扩展问题, 粒子采用弹脆性本构关系, 如图 2 所示。

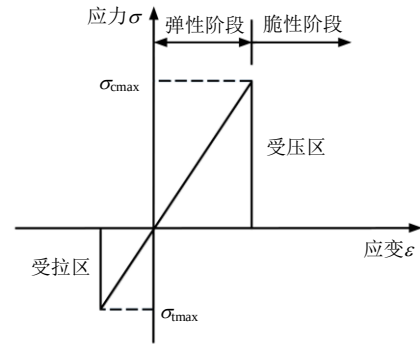


图 2 线性弹脆性法则

Fig.2 Linear elastic-brittle law

因此, GPD 算法的离散化方程可以表述为^[22-23]

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j \in U} m_j v_{ij}^\beta W_{ij,\beta} + f \cdot \sum_{j \in D} m_j v_{ij}^\beta W_{ij,\beta} \quad (14)$$

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = - \sum_{j \in U} m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) W_{ij,\beta} - \quad (15)$$

$$f \cdot \sum_{j \in D} m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) W_{ij,\beta}$$

式中: U 为未损伤粒子; D 为损伤粒子; Π_{ij} 为为了减小计算过程中粒子间的数值震荡并将粒子动能转化为内能的人工黏度。

3 TBM 滚刀破岩有效性的验证

3.1 单滚刀作用下 TBM 滚刀破岩过程模拟

如图 3 所示, 为了验证 GPD 方法能有效地模拟滚刀破岩过程, 建立了单滚刀完整岩石的破岩模型。该模型尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 在模拟过程中, 用 $100 \times 100 = 10\,000$ 个粒子来描述模型尺寸。模型中采用位移加载方式模拟滚刀的法向作用力, 法向作用力与上边界接触宽度为 15 mm , 加载速率为

0.01 m/s。上边界为自由边界，左、右、下边界为固定位移边界。岩体材料为典型的新加坡花岗岩，岩体的力学参数如表 1 所示。

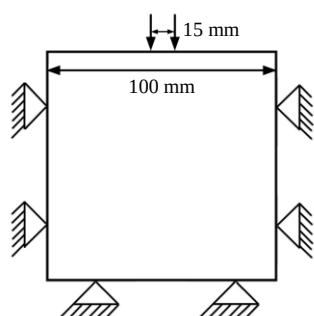


图 3 单滚刀侵入岩体模型

Fig.3 Numerical simulation model of indentation by one cutter

表 1 花岗岩的力学参数^[24-25]

密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	单轴抗压强度 /MPa
2 600	82.5	32	233

图 4 显示了单滚刀侵入岩体的过程中压碎区的形成和裂纹的起裂、扩展过程。图 4 中的图例代表

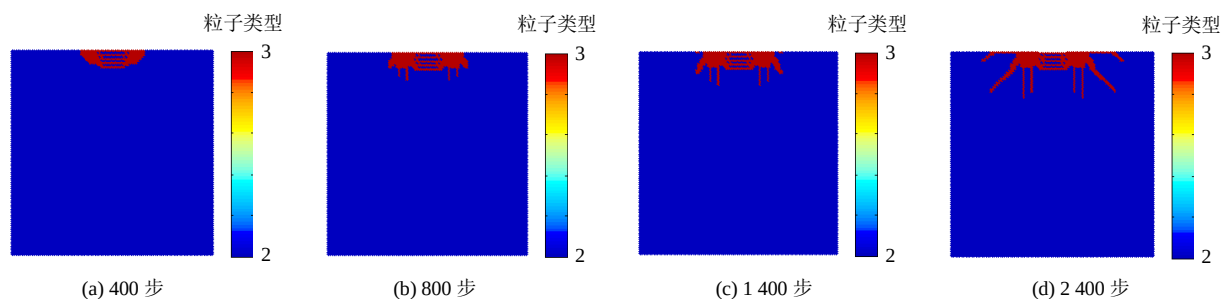


图 4 单滚刀侵入岩体的过程

Fig.4 Process of indentation into rock by one cutter

图 5 为单滚刀作用下最大主应力图。图中拉应力为正，压应力为负。从图中可以看到，在压碎区内，未破坏点的应力较高，破坏点的应力为 0；中央裂纹与赫兹裂纹处的应力为 0。这与 GPD 的基本思想和所采用的弹脆性破坏准则相照应。在 GPD 中，我们根据破坏准则来判定每一个粒子的“生死”，若某一点的应力状态满足破坏准则，则将此粒子“杀死”，成为无效粒子，同时应力降为 0，它也将不再对周边其他粒子产生相互作用；而没有满足破坏准则的粒子则是有效粒子，它的应力不为 0，会对周边粒子产生相互作用。在压碎区的下方，是高应力区，且随着距离加载点的距离的增加，应力逐渐减小，这与 DEM 数值模拟方法的结果相一致^[12]。

粒子编号，其中粒子类型 3 代表破坏粒子，粒子类型 2 代表非破坏粒子。后文所有描述滚刀破岩过程的图中，图例含义均与此相同。如图 4(a)所示，滚刀向岩体加载时，在滚刀的下方出现一个扇形压碎区，压碎区的中间存在完整岩块，这是因为这个区域有高约束力存在，处于静水压力状态^[26]，这与滚刀侵入试验中观察到的现象一致^[27]。当时间步达到 800 步时，压碎区的面积不再增加，压碎区的正下方出现垂直向下的裂纹，称之为中央裂纹^[27]；压碎区的侧边缘出现侧向裂纹，称之为赫兹裂纹^[27]。这与试验过程中观察到的现象也相同。随着时间步的不断加，中央裂纹和赫兹裂纹沿着原来的方向持续扩展，形成裂纹区。

从图 4 可以看出，单滚刀侵入岩体的过程主要分为两个阶段：①压碎区形成阶段；②裂纹区形成阶段。从 TBM 破岩效率出发，压碎区形成阶段会吸收大量的能量，但它对破岩面积的贡献远不如裂纹区，这从下面的双滚刀破岩过程中可以明显看出。所以在 TBM 滚刀破岩过程中，裂纹区的扩展长度是重点控制的因素，由此合理的滚刀旋转速度和 TBM 掘进速率就显得非常重要。

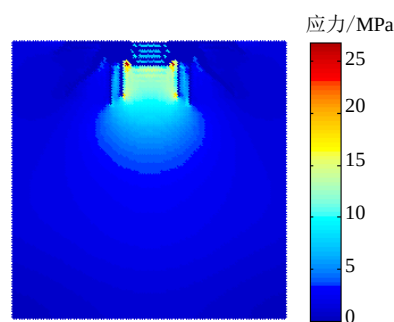


图 5 滚刀作用下的最大主应力

Fig.5 Principal stress contour with one cutter

为了验证 GPD 方法模拟滚刀破岩过程的有效性，下面采用 Chen 等^[28]试验采用的参数，用 GPD

方法模拟楔形刀头贯入岩体时的破坏情况,并将得到的数值结果与试验结果相对比。图 6 显示的是试验过程中,声发射检测到的破坏区的大小和破坏点的位置;图 7 是采用相同参数的 GPD 数值模拟结果;表 2 为试验数据和 GPD 模拟结果中的压碎区的对比。

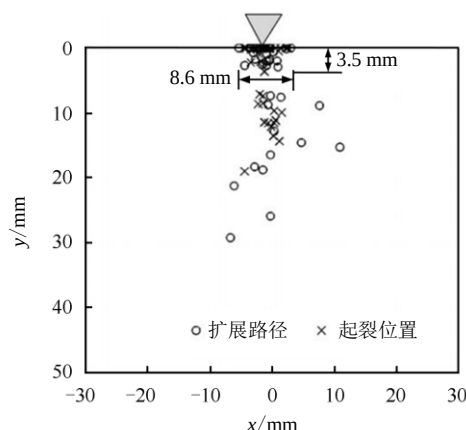


图 6 试验结果^[28]
Fig.6 Testing results

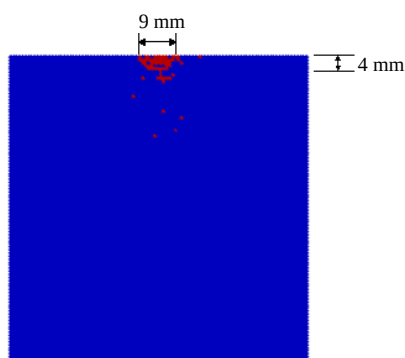


图 7 相同条件下 GPD 模拟结果
Fig.7 GPD results under the same condition

表 2 试验结果和 GPD 模拟结果对比
Table 2 Comparison between experimental and GPD numerical results of crushed zone

结果类型	压碎区深度/mm	压碎区宽度/mm
试验结果	3.5	8.6
GPD 模拟结果	4.0	9.0

注:压碎区深度与宽度的试验结果与 GPD 模拟结果的相对误差分别为 14.28%和 4.65%。

3.2 双滚刀作用下 TBM 滚刀破岩过程模拟

为了验证 GPD 模拟 TBM 滚刀破岩过程的有效性,下面对双滚刀作用下,滚刀破岩效果进行数值模拟。如图 8 所示,建立了双滚刀完整岩石的破岩模型,模型尺寸为 200 mm×100 mm,两滚刀的中心刀间距为 65 mm。加载方式、加载条件、边界条件和岩体参数与单滚刀破岩模型相同。

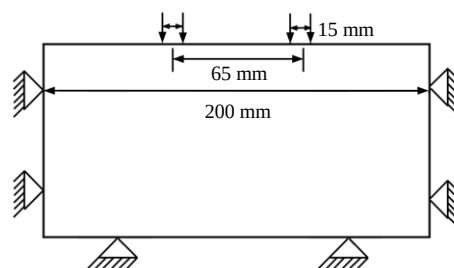


图 8 双滚刀破岩模型
Fig.8 Numerical simulation model of indentation by two cutters

图 9 显示了双滚刀作用下的 TBM 滚刀破岩过程,可知双滚刀破岩过程与单滚刀基本相同,主要分为压碎区形成阶段和裂纹区形成阶段。与单滚刀侵入岩体的不同为:如图 9(d)所示,双滚刀破岩时,在裂纹区形成的后期,由于滚刀之间的相互作用,两滚刀中间的赫兹裂纹会改变方向,沿水平方向向

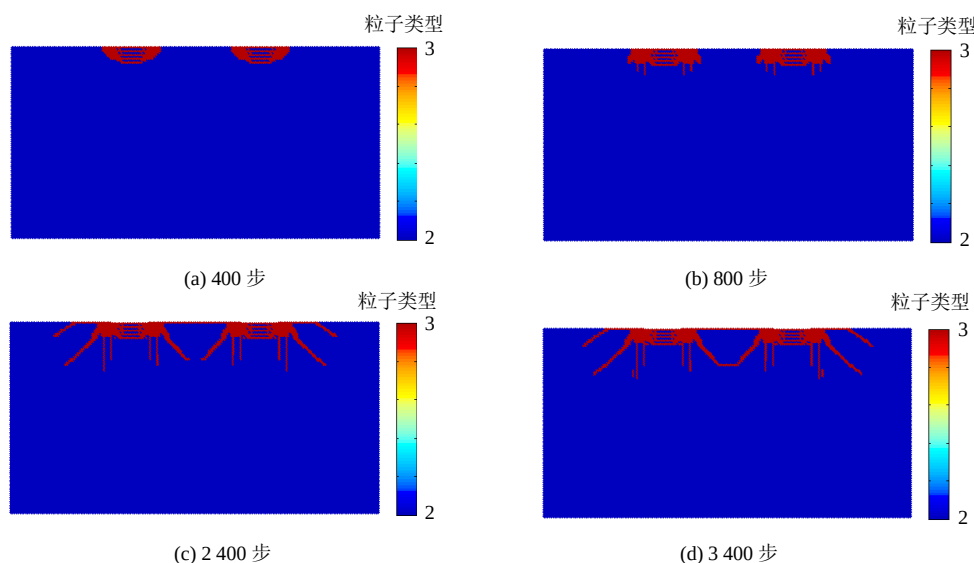


图 9 双滚刀破岩过程
Fig.9 Process of indentation by two cutters

着彼此扩展并最终连接。两滚刀间赫兹裂纹的相互连接在 TBM 破岩过程中有重要意义, 实际 TBM 掘进过程中, 正是相邻刀具之间的相互作用, 使破岩面积增大、破岩效率提高。由此可知, 刀间距的大小对破岩面积有很大影响, 最优刀间距问题也一直是国内外研究者们研究的热点。

图 10 为双滚刀作用下最大主应力分布图, 应力场是对称的。从图中可以看出, 在双滚刀之间形成的岩块处于拉应力状态, 中央裂纹和赫兹裂纹尖端也为拉应力, 由此可知, 裂纹的扩展主要是由拉应力引起的。

为了进一步验证 GPD 研究 TBM 破岩过程的有效性, 通过改变图 8 所示模型的刀间距实现刀间距的优化, 并与以前的数值结果进行对比分析。引入一个可以反映破岩效率的参数——单位面积上的破岩力 A_s [29], A_s = 破岩面积/破岩应力, A_s 的大小直接反映破岩效率的高低。在数值模拟过程中, 刀间

距依次取 60、70、80、90、100 和 110 mm。图 11 将 GPD 模拟结果与 DEM 模拟结果[12]进行对比分析, 有较好的一致性。由图 11(a)可知, 随着刀间距的增加, 破岩应力逐渐增加; 由图 11(b)可知, 当刀间距小于 100 mm 时, 随着刀间距的增加破岩面积逐渐增加, 刀间距大于 100 mm 时破岩面积反而减小; 由图 11(c)可知, 随着刀间距的增加破岩效率先增加再减少; 对于花岗岩最优刀间距在 100 mm 左右, 这与先前的试验结果相一致[30-31]。

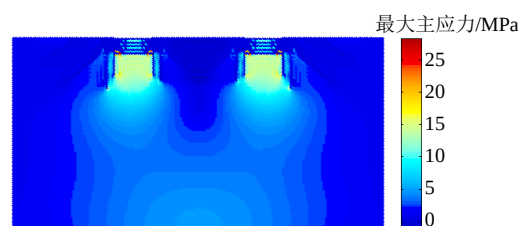


图 10 双滚刀作用下的最大主应力/MPa
Fig.10 The maximum principal stress contour with indentation by two cutters

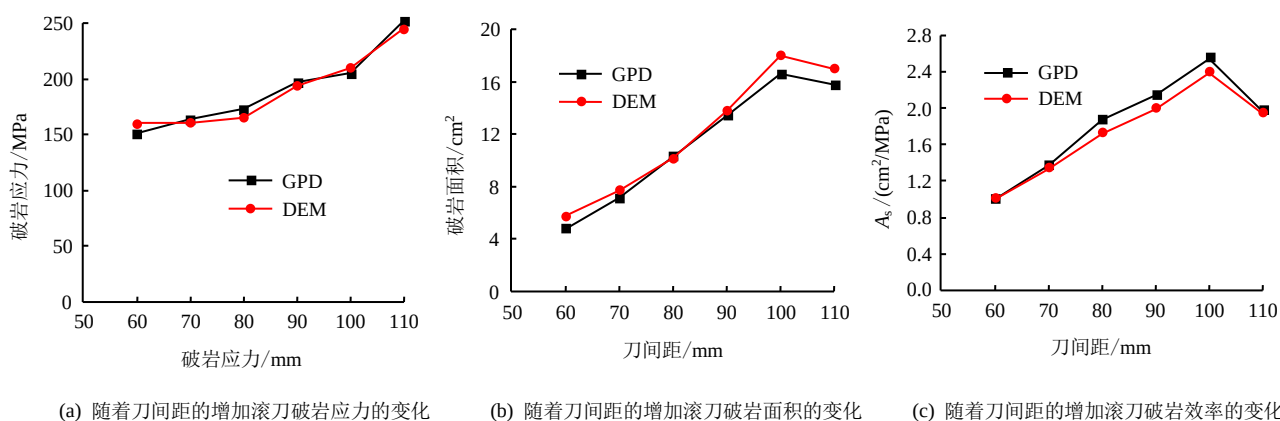


图 11 GPD 模拟结果与 DEM 模拟结果的对比
Fig.11 Comparison of results obtained by numerical simulations of GPD and DEM

4 节理岩体和高围压岩体的破岩的广义粒子动力学数值模拟

4.1 节理对 TBM 破岩过程的影响

本节对节理岩体的破岩过程进行 GPD 数值模拟。模型中布置两条平行节理, 节理倾角为 45° , 节理间距为 70 mm, 其他条件与 3.2 节的双滚刀破岩模型相同。破岩过程如图 12 所示。如图 12(a)所示, 双滚刀开始作用于岩体时与完整岩石的破岩过程相似, 首先形成扇形压碎区。如图 12(b)所示, 随着加载的继续, 出现中央裂纹和赫兹裂纹, 观察到左滚刀下方节理面处有破坏点出现; 随着加载的进一步进行, 左滚刀右侧的中央裂纹和赫兹裂纹扩展到节理面处, 并终止; 这是由于节理面的存在阻挡

了应力的传播和裂纹的扩展, 破岩点只能沿着节理面出现; 这种岩块只能产生于同一块体内的现象, 在 TBM 掘进过程中经常会遇到, 例如 TBM 开挖新加坡武吉知马花岗岩时, 常常会看到这种现象[12]。如图 12(c)所示, 当继续加载时, 可以看到右侧滚刀下方的节理面处出现了垂直于节理面的裂隙, 这些裂隙的产生, 在节理岩体破岩过程中有重要的意义, 对破岩效率有帮助, 也是区别于完整岩石破岩过程的主要特征, 这一特征在先前的 DEM 数值模拟研究中也发现[12]。如图 12(d)所示, 当中央裂纹和赫兹裂纹扩展到节理面时, 岩块产生, 破岩过程结束; 但从图 12(d)也看出, 右滚刀左尖端下方的赫兹裂纹改变原来的扩展方向, 沿水平向扩展, 但很难达到节理面而形成岩片, 这说明节理的存在也可能

会阻碍岩片的形成,减小破岩面积。由上述分析可知,节理对 TBM 破岩面积的影响是把双刃剑,具体影响情况主要取决于节理面的倾角。

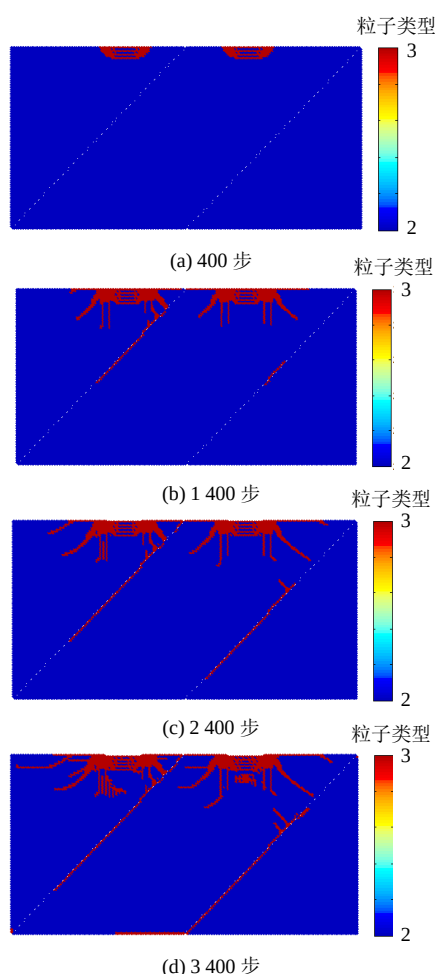


图 12 含节理岩体破岩过程
Fig.12 Process of rock fragmentation with jointed rock mass

图 13 为节理岩体破岩过程的最大主应力分布图。可以看出,节理面的存在会对应力的传播有一定的阻挡作用;由于节理面的存在,最大主应力场呈现非对称现象。从最大主应力的分布图可以更好地理解裂纹扩展的原因。

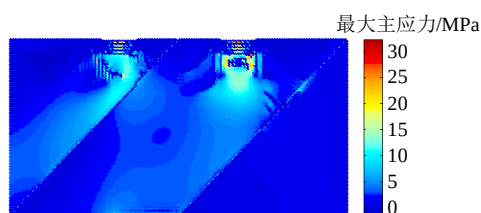


图 13 含节理岩体最大主应力分布情况
Fig.13 The maximum principal stress contour

4.2 双滚刀作用下围压对 TBM 破岩的影响

本节的模型与 3.2 节的模型相同,另外给定每

个粒子 5 MPa 的初始水平应力,用来模拟高围压下 TBM 滚刀破岩过程。图 14 显示了水平方向围压为 5 MPa 时,双滚刀的破岩过程和破岩模式。如图所示,与无围压情况下双滚刀破岩过程相比较,可以看出:①中央裂纹的扩展长度明显减小;②赫兹裂纹的扩展方向与水平面之间的夹角明显减小;③两滚刀之间的破岩深度明显变小。这与 Liu 等^[32-33]通过理论推导、数值模拟和室内试验得到的围压增加会抑制压碎区边缘裂纹的起裂和中间裂纹的扩展、影响侧向裂纹起裂角的大小和使破岩深度减小的结论相一致。这也验证了 GPD 对高围压下 TBM 破岩过程的模拟的有效性。

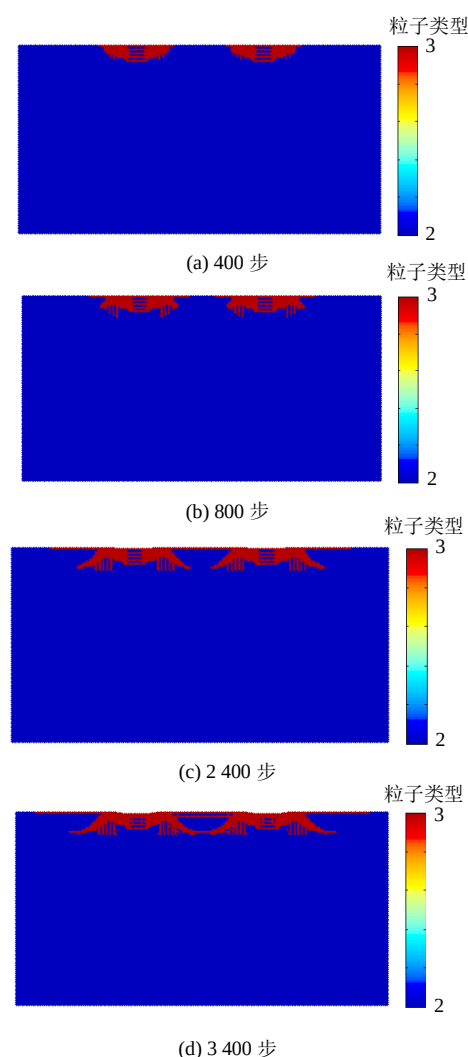


图 14 围压为 5 MPa 时滚刀破岩过程
Fig.14 Process of rock fragmentation under confining pressure of 5 MPa

图 15(a)、15(b)为围压为 5 MPa 的水平方向应力和最大主应力分布图。从图 15(a)可以看出,在初始时刻,每个粒子的初始水平应力为 5 MPa,水平方向应力场是对称的,在两滚刀下方存在应力集中。

图 15(b)为最大主应力分布图,最大主应力场是对称的,随着距离加载点的距离的增加,应力逐渐较小。

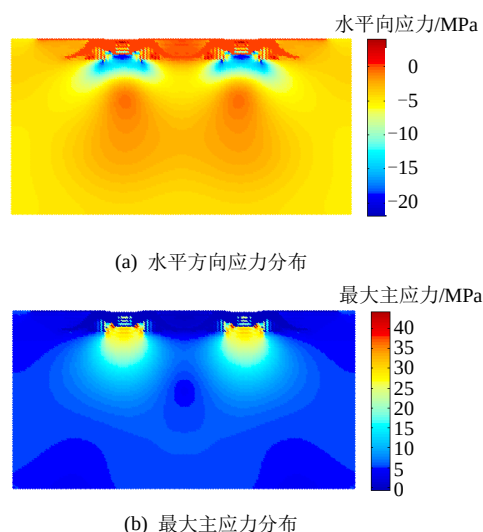


图 15 围压为 5 MPa 时应力分布情况

Fig.15 Stress distribution under confining stress of 5 MPa

5 结 论

(1) 本文建立了单滚刀、双滚刀作用下完整岩体的破岩模型,将数值模拟结果和试验结果相对比,验证了 GPD 方法模拟 TBM 滚刀破岩过程的有效性。

(2) 建立了节理岩体的滚刀破岩模型,得到节理对 TBM 滚刀破岩过程的影响与节理倾角相关。

(3) 建立了水平围压为 5 MPa 时的 TBM 滚刀破岩模型,得到:①围压抑制 TBM 滚刀破岩过程中中央裂纹的扩展;②围压影响赫兹裂纹的扩展角度;③围压影响滚刀破岩深度,进而影响破岩面积及破岩效率。

参 考 文 献

- [1] 张镜剑. TBM 的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 363—367.
ZHANG Jing-jian. Application of TBM and its related problem and prospects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(3): 363—367.
- [2] 宋克志, 李传明, 袁大军, 等. 盾构隧道施工盘形滚刀推力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3875—3881.
SONG Ke-zhi, LI Chuan-ming, YUAN Da-jun, et al. Study on distribution regularities of disc cutter thrust force for shield tunneling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp. 2): 3875—3881.
- [3] LAWN B R. Indentation of ceramics with spheres: a century after Hertz[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1978, 81: 1977—1994.
- [4] LAWN B R, EVANS A G. A Model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12: 2195—2199.
- [5] LAWN B R, FULLER E R. Equilibrium penny-like crack in indentation fracture[R]. Virginia: Department of the Navy Office of Naval Research Arlington, 1975.
- [6] COOK N G W, HOOD M TSAIF. Observation of crack growth in hard rock loaded by an indenter[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(2): 97—107.
- [7] 刘泉声, 潘玉丛, 孔晓璇, 等. TBM 滚刀贯入过程中泥岩破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 166—174.
LIU Qun-sheng, PAN Yu-cong, KONG Xiao-xuan, et al. Experimental investigation on mudstone fragmentation characteristics in indentation process by TBM disc cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Supp.1): 166—174.
- [8] YIN L J, GONG Q M, GONG B, et al. Use of indentation test to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 72: 261—276.
- [9] 尹喜云, 赵伏军. 动静组合加载作用下凿岩刀具失效的信息熵分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(4): 739—744.
YIN Xi-yun, ZHAO Fu-jun. Failure comentropy analysis of rock-drilling cutter under dynamic-static loading[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2007, 38(4): 739—744.
- [10] 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, 4(39): 491—505.
- [11] LIU H Y, KOU S Q, LINDQVIST P A, et al. Numerical modeling of the heterogeneous rock fracture process using various test techniques[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(2): 107—144.

- [12] 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.
- [13] 张魁, 夏毅敏, 徐孜军. 不同围压及切削顺序对 TBM 刀具破坏机理的影响[J]. **土木工程学报**, 2011, 44(9): 100–106.
- ZHANG Kui, XIA Yi-min, XU Zi-jun. Effects of confining pressure and cutting sequence on the rock-breaking mechanism by TBM cutter[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(9): 100–106.
- [14] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 基于 UDEC 的隧道掘进机滚刀破岩数值模拟研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(4): 1176–1209.
- MO Zhen-ze, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Research on numerical simulation of rock breaking using TBM disc cutters based on UDEC method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1176–1209.
- [15] 谭青, 张旭辉, 夏毅敏, 等. 不同围压与节理特征下盘形滚刀破岩数值研究[J]. **煤炭学报**, 2014, 39(7): 1220–1228.
- TAN Qing, ZHANG Xu-hui, XIA Yi-min, et al. Numerical study on breaking rock by disc cutter at different confining pressures and joint characteristics case[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1220–1228.
- [16] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. **Astronomical Journal**, 1977, 28(12): 1013–1024.
- [17] MONAGHAN J J, LATTANZIO J C. A refined particle method for astrophysical problems[J]. **Astronomical Astrophysics**, 1985, 149(1): 135–143.
- [18] LIBESKY L D, PETSCHKE A G, CARNEY T C, et al. High strain Lagrangian hydrodynamics: a three-dimensional SPH code for dynamic material response[J]. **Journal of Computational Physics**, 1993, 109: 67–75.
- [19] RANDLES P W, LIBESKY L D. Smoothed particle hydrodynamics: some recent improvements and applications[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1996, 139(1–4): 375–408.
- [20] CHEN J K, BERAUM J E, CARNEY T C. A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 46(2): 231–252.
- [21] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1980, 18(2): 1013–1035.
- [22] ZHOU X P, BI J, QIAN Q H. Numerical simulation of crack growth and coalescence in rock-like materials containing multiple pre-existing flaws[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015, 48(3): 1097–1114.
- [23] BI J, ZHOU X P. The 3D numerical simulation of propagation and coalescence of multiple pre-existing flaws in rock-like materials subjected to biaxial compressive loads[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(5): 1611–1627.
- [24] WALLACE J C, HO C E, BERGH C J, et al. A proposed warehouse-shelter cavern scheme in Singapore granite[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1995, 10(2): 163–167.
- [25] ZHAO J. Construction and utilization of rock caverns in Singapore Part A: the Bukit Timah granite bedrock resource[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1996, 11(1): 65–72.
- [26] CHIAIA B. Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(44): 7747–7768.
- [27] PANG S S, GOLDSMITH W. Investigation of crack formation during loading of brittle rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1990, 23: 53–63.
- [28] CHEN L H, LABUZ J F. Indentation of rock by wedge-shaped tools[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 2006, 43(7): 1023–1033.
- [29] BEJARI H, KHADEMI H. Simultaneous effects of joint spacing and orientation on TBM cutting efficiency in jointed rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46(4): 897–907.
- [30] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1965, 2(1): 57–73.
- [31] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [32] LIU J, CAO P. Study on rock fracture with TBM cutter under different confining stresses[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2016, 46(1): 104–114.
- [33] LIU J, CAO P, LI K H. A study on isotropic rock breaking with TBM cutters under different confining stresses[J]. **Geotechnical Geological Engineering**, 2015, 33(6): 1379–1394.