

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1593

利用近场动力学方法模拟隧道掘进机 滚刀三维贯入破岩

周 建^{1,2}, 尚肖楠^{1,2}, 刘福深^{1,2,3}, 沈君逸^{1,2}, 廖星川^{1,2}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江大学 岩土工程计算中心, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 近场动力学方法是一种非局部无网格数值方法, 在模拟固体的动力损伤断裂方面具有优势, 首次提出采用近场动力学方法模拟隧道掘进机 (tunnel boring machine, 简称 TBM) 滚刀三维贯入破岩, 并模拟了 7 组试验来验证。通过模拟压头贯入试验, 展示了近场动力学方法模拟刀具贯入破岩的可行性。同时, 提出了非线性短程力接触模型, 证明了该接触模型可以较好地反映 TBM 滚刀法向力随贯入深度的变化趋势, 还能够反映滚刀在贯入过程中与岩石接触面积的变化情况。利用所提非线性短程力接触模型模拟了 5 组不同围压作用下的 TBM 滚刀三维贯入试验, 并与试验结果比对。模拟结果表明, 提出的接触模型能够计算滚刀峰值力随不同围压的变化, 并且可以得到合理的岩石表面破坏形式。近场动力学方法使用简便, 仅需要两个标定参数便可以模拟 TBM 滚刀三维贯入破岩, 具有实际工程应用前景。

关 键 词: 近场动力学; 三维 TBM 滚刀破岩; 贯入试验; 围压

中图分类号: O242

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 09-2732-13

Numerical simulation of three-dimensional rock fragmentation by disc cutters of tunnel boring machine using peridynamics

ZHOU Jian^{1,2}, SHANG Xiao-nan^{1,2}, LIU Fu-shen^{1,2,3}, SHEN Jun-yi^{1,2}, LIAO Xing-chuan^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

3. Computing Center for Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Peridynamics is a non-local mesh-free numerical method which has great advantages in simulating dynamic damage and fracture. This work proposes to use the peridynamics to simulate rock fragmentation by TBM disc cutters and seven tests are simulated to verify this idea. The feasibility of peridynamics in simulating rock fragmentation by TBM disc cutters is demonstrated by comparisons with the punch penetration tests. A nonlinear short-range force contact model is proposed to better reflect the variation of the disc cutter normal force with respect to penetration depth, and can also calculate the changing contact area between the disc cutter and the rock during the penetration. In addition, the proposed non-linear short-range force contact model is used to simulate five 3D TBM disc cutter penetration tests with different bi-directional confining stress conditions, and the numerical results are compared with the experimental results. The simulation results show that the proposed contact model is able to calculate the variation of the cutter peak force with different confining stress and to obtain a reasonable form of rock surface damage. Peridynamics approach is easy to operate and requires only two calibration parameters to simulate the 3D rock fragmentation by disc cutters, which is promising for practical engineering applications.

Keywords: peridynamics; three-dimensional rock fragmentation by TBM disc cutters; penetration tests; confining stress

1 引 言

随着对地下空间的不断开发, 以及公路网与铁

路网的不断延伸, 隧道工程的需求也逐渐增多。全断面隧道掘进机 (tunnel boring machine, 简称 TBM) 凭借其自动化程度高, 对周围影响小, 施工效率高

收稿日期: 2022-10-13

录用日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.52179112, No.51338009)。

This work was supported by National Natural Science Foundation of China (52179112, 51338009).

第一作者简介: 周建, 女, 1970 年生, 博士, 教授, 主要从事软黏土力学、软土地基处理、非饱和土本构模型等方面的研究工作。E-mail: zjelim@zju.edu.cn

通讯作者: 刘福深, 男, 1980 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事多场耦合断裂问题的研究工作。E-mail: fushenliu@zju.edu.cn

等优势已经成为隧道施工的主要方式之一。在 TBM 掘进过程中,刀盘上的滚刀是使掌子面岩石破碎的主要工具,因此关于滚刀破岩的研究至关重要。

目前,滚刀破岩的研究手段主要分为室内试验与数值模拟。其中,滚刀贯入试验是一种常见的室内试验,已经被广泛的应用于滚刀破岩的相关研究中。该类试验通过将滚刀缓缓压入岩石试样来观察岩石裂纹的萌生与发展规律。Chen 等^[1]通过贯入试验得到了岩石在楔形刀贯入作用下的破坏过程,并研究了楔形刀角度、岩石力学特性以及岩石侧向围压对岩石破坏过程的影响。莫振泽等^[2]结合声发射试验研究了楔形刀贯入岩石的破坏过程,从微观的角度阐释了岩石发生宏观破裂的原因。邹飞等^[3]利用楔形刀贯入试验研究了节理倾角和节理间距对楔形刀法向力以及岩石裂纹发展形态的影响。刘泉声等^[4]通过常截面滚刀贯入试验研究了 4 种不同强度岩石在无侧向约束条件和有侧向约束条件下的破坏形态。刘京铄等^[5]进行了双向围压条件下常截面滚刀的顺次贯入试验,得到了围压变化对滚刀比能的影响规律。

虽然国内外学者在滚刀贯入试验方面取得了一系列研究成果,但是室内试验存在成本较高、可重复性较差等缺点。随着计算能力的大幅度提升,利用数值方法模拟滚刀破岩凭借其成本较低,可重复性好等优点逐渐成为学者们青睐的研究手段。目前,用于模拟滚刀贯入破岩的数值方法主要包括有限元法、离散元法、光滑粒子流法与广义粒子动力学法。

在有限元法方面,Liu 等^[6]分别模拟了单滚刀与双滚刀贯入作用下岩石的二维破坏过程,解释了岩石破坏的机制。Ma 等^[7]通过模拟得到了在不同围压条件下滚刀贯入导致岩石发生破碎的二维过程,并分析了围压对裂纹角度与有效裂纹长度的影响。梁正召等^[8]模拟了多把滚刀的二维破岩过程,分析了滚刀间距对破岩效率的影响。

在离散元法方面,莫振泽等^[9]利用通用离散单元程序(universal distinct element code,简称 UDEC)得到了在不同的滚刀刀角与刃宽、岩石软硬程度以及节理方向下岩石内部破坏的情况。Liu 等^[10]采用 PFC^{2D} 程序研究了滚刀贯入过程中岩石内部的应力演化特性,其模拟结果表明,滚刀法向力增加会导致剪应力与拉应力在裂纹尖端出现应力集中;当裂纹发生扩展后,由于裂纹尖端的应力释放导致滚刀法向力下降。Li 等^[11]利用离散元法研究了楔形刀刀角与贯入速度等对岩石破碎的影响。蒋明镜等^[12-13]

建立了二维离散元模型,研究了滚刀破岩的机制,将滚刀破岩过程划分为 3 个阶段,揭示了岩石内部中裂纹与斜裂纹产生的原因,并且针对软硬结合的复合岩体进行了多把滚刀破岩的模拟,发现 2 把滚刀的破岩效率最高,3 把滚刀的破岩效率次之,1 把滚刀的破岩效率最低。

在光滑粒子流法方面,Dong 等^[14]模拟了软硬复合地层的滚刀贯入破岩过程,其结果表明:复合地层会导致滚刀法向力的不同,从而使得 TBM 产生振动和损坏。在广义粒子动力学法方面,翟淑芳^[15]进行了一系列的研究,包括围压、节理与复合地层对滚刀贯入破岩的影响。

综上所述,在数值模拟方面,当前的数值方法都存在其局限性。有限元法是基于连续介质力学的数值方法,其在模拟岩石断裂方面存在一定的不足;而离散元法虽然在模拟不连续问题方面有较大的优势,但是需要标定的微观参数较多;光滑粒子流法不能准确地描述裂纹的萌生、发展与融合^[16];广义粒子动力学法在模拟 TBM 滚刀方面还有待进一步完善。另外,学者们大多通过建立二维模型进行相关的研究,二维模型忽略了盘形滚刀的曲面形状,与实际的滚刀贯入破岩过程存在一定差距,而如今在滚刀三维贯入破岩方面的研究还不充分。近年来,近场动力学方法(peridynamics,简称 PD)在模拟物体断裂方面展现出很大的优势,由于其控制方程是积分形式,可以避免传统连续介质力学的微分方程在裂纹尖端很难定义的缺陷^[17]。在岩土工程领域,学者们已经利用近场动力学方法较好地模拟了岩石的断裂过程,并与试验结果进行比对,证明了该方法的可行性^[18-21]。因此,本文提出利用 PD 模拟滚刀三维贯入破岩。

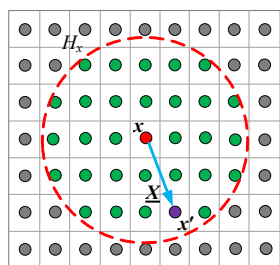
目前,由于作者尚未见到利用近场动力学方法模拟滚刀贯入破岩的相关研究,因此本文首先对近场动力学方法的理论方面进行了简要的介绍;然后通过模拟压头贯入试验证明了该方法的有效性;接着,本文提出了非线性短程力接触模型使近场动力学方法能够进一步较好地模拟 TBM 盘形滚刀法向力随贯入深度的变化,并通过模拟 5 组不同围压作用下 TBM 盘形滚刀的贯入试验证明了非线性接触模型的可行性。

2 近场动力学方法

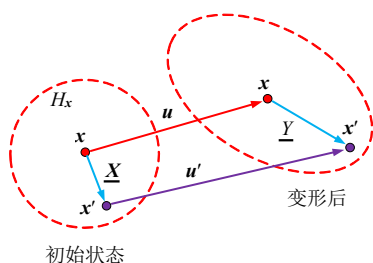
2.1 基本理论

近场动力学方法属于非局部方法。如图 1(a)所示,在近场动力学中,任一质点 x (图中红色质点)

要受到近场范围 H_x 内其他质点 (图中绿色质点) 对其的作用力^[17]。质点之间的相互作用力通过连接键来传递, 如图 1(b) 中, 质点 x 与质点 x' 在初始状态下的连接键长度为 $|\underline{X}|$, 当质点 x 与质点 x' 分别发生位移 $\underline{u}$ 与 $\underline{u}'$ 后, 其连接键的长度变为 $|\underline{Y}|$ 。



(a) 近场范围及质点之间的连接键



(b) 质点之间连接键的变形

图 1 近场动力学理论示意图

Fig.1 Schematic diagram of peridynamics theory

在近场动力学中, 任一质点的平衡方程为

$$\rho(\underline{x})\ddot{\underline{u}}(\underline{x}, t) = \int_{H_x} [\underline{T}[\underline{x}, t] \langle \underline{x}' - \underline{x} \rangle - \underline{T}[\underline{x}', t] \langle \underline{x} - \underline{x}' \rangle] dV_{x'} + \underline{b}(\underline{x}, t) \quad (1)$$

式中: $\rho(\underline{x})$ 代表质点 $\underline{x}$ 处材料的密度, $\ddot{\underline{u}}(\underline{x}, t)$ 为质点 $\underline{x}$ 在 t 时刻的加速度; $\underline{b}(\underline{x}, t)$ 为外力密度; H_x 代表质点 $\underline{x}$ 近场范围内所有质点的集合; 力向量 $\underline{T}$ 状态为质点间相互作用力密度; V_x 为近场范围内所有质点构成的体积。由于平衡方程为积分形式, 使其在裂纹尖端仍然存在定义。

2.2 力密度计算模型

由式 (1) 可以看出, 近场动力学的核心是质点间相互作用力密度的表达, 按照质点间相互作用力密度大小和方向的不同可以将近场动力学分为键型近场动力学^[22], 常规态型近场动力学和非常规态型近场动力学^[23] 3 种模型。其中, 键型近场动力学使得材料的泊松比固定, 限制模拟的灵活性^[24], 而非常规态型近场动力学存在零能模式, 会导致数值结果的不稳定^[25]。值得指出的是, 目前学者们在克服上述两种近场动力学模型的缺陷方面已经做了很多的工作^[26-27], 而本文选用常规态型近场动力学来

弥补以上模型的不足。本文质点之间力密度的计算选为 LPS (linear peridynamic solid) 模型^[23], 其计算公式表示为

$$\underline{T}(\underline{x}, t) = \underline{t} \underline{M}(\underline{Y}) \quad (2)$$

式中: $\underline{M}(\underline{Y})$ 为单位方向向量; $\underline{t}$ 为标量力态, 其具体计算过程可参考文献^[23]。

2.3 接触模型

滚刀贯入岩石是一种动态过程, 因此滚刀与岩石之间接触模型的设置至关重要。本文的接触模型选用短程力接触模型^[28], 该模型已被应用于模拟两个物体的接触过程^[29], 其接触力 $\underline{f}_c$ 的计算公式为

$$\underline{f}_c = \begin{cases} \underline{0}, & \|\underline{y}_m - \underline{y}_n\| > d_{mn} \\ \frac{18k}{\pi\delta^5} (\|\underline{y}_m - \underline{y}_n\| - d_{mn}) \frac{\underline{y}_m - \underline{y}_n}{\|\underline{y}_m - \underline{y}_n\|}, & \|\underline{y}_m - \underline{y}_n\| \leq d_{mn} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为接触刚度; δ 为近场范围的半径; $\underline{y}_m$ 与 $\underline{y}_n$ 分别代表刀具质点与岩石质点的坐标; $\|\underline{y}_m - \underline{y}_n\|$ 为刀具质点与岩石质点之间的距离; d_{mn} 为接触半径。因此, 滚刀贯入岩石的近场动力学控制方程将由式 (1) 变为

$$\rho(\underline{x})\ddot{\underline{u}}(\underline{x}, t) = \int_{H_x} [\underline{T}[\underline{x}, t] \langle \underline{x}' - \underline{x} \rangle - \underline{T}[\underline{x}', t] \langle \underline{x} - \underline{x}' \rangle + \underline{f}_c] dV_{x'} + \underline{b}(\underline{x}, t) \quad (4)$$

由于刀具质点与岩石质点有不同的属性, 所以在计算的过程中要防止刀具质点与岩石质点之间建立连接键, 从而使得接触模型能够有效定义。

2.4 损伤模型

由于滚刀与岩石的刚度差别很大, 因此本文仅计算岩石的损伤, 忽略滚刀的损伤。岩石损伤的计算采用临界伸长率损伤准则^[28]。当质点间连接键的伸长率超过临界伸长率时, 连接键将发生断裂且消失。通过统计各质点近场范围内断裂连接键的百分比来计算质点的损伤。当质点近场范围内的连接键完整时, 损伤值等于 0; 当质点近场范围内的连接键全部断裂时, 损伤值等于 1。

3 刀具贯入破岩的模拟

3.1 模型描述

本小节主要通过模拟压头贯入试验来验证近场动力学方法的可行性。参照 Cook 等^[30]做的压头贯入试验建立如图 2(a) 所示的模型。岩石模型为直径和高度均为 89 mm 的圆柱体; 压头的直径为 10 mm, 假设压头高度为 6 mm。由于试验中没有提

供所用花岗岩的密度, 本文选用文献[31]中 6 组花岗岩的平均密度 2780 kg/m^3 作为模拟材料的参数, 岩石的其他材料参数与试验保持一致; 压头的密度、弹性模量以及泊松比参照钢材的材料参数取值, 岩石与压头模型材料参数的具体取值列于表 1 中。

表 1 压头贯入模拟中岩石和压头模型的材料参数

Table 1 Material parameters of rock and punch model in punch indentation test

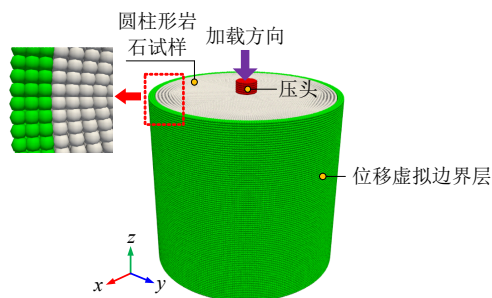
材料类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
岩石	62.17	0.2	2 780
压头	200.00	0.3	7 700

岩石和压头模型的质点间距设置为 1 mm 。近场范围的选取将影响计算结果, 根据文献[20–21, 32–33]的相关研究, 近场范围取质点间距的 3 倍时可以达到理想的计算结果, 因此该算例的近场范围设置为 3 mm 。在近场动力学方法中, 位移边界条件通过位移虚拟边界层来施加, 位移虚拟边界层的厚度等于近场范围^[34], 即 3 层质点。因此在岩石模型外围建立圆筒形位移虚拟边界层, 并保证边界层粒子沿试样径向分布, 如图 2(a)中放大部分所示。模型的边界条件为, 限制岩石 x 和 y 方向的位移来还原试验中的侧限条件, 底面边界层限制岩石 z 方向的位移。该模型的质点总数为 783 628。由于近场动力学方法适合进行并行计算, 为了提高计算效率, 本文对模型进行了 120 核的并行计算, 计算模型的区域分解如图 2(b)所示, 其中不同的颜色代表处理器的编号。压头的加载速度为 50 mm/s , 由于计算过程中, 模型的稳定时间步长为 $1.54039 \times 10^{-7} \text{ s}$, 因此压头每向前运动 1 mm , 需要 129 837 个时间步来计算, 可以认为是拟静力加载。

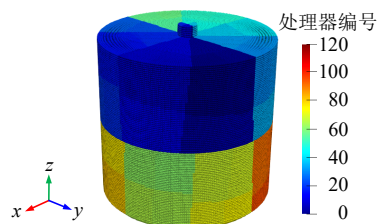
3.2 模拟结果

综上所述, 利用近场动力学方法模拟压头贯入试验需要确定损伤模型的临界伸长率, 接触模型的接触刚度与接触半径。其中接触半径的取值应该使得压头与岩石一经接触便产生接触力, 因此可以通过模拟得到的压头法向力–贯入深度曲线来确定。而临界伸长率与接触刚度这两个参数很难通过试验获得, 因此本文根据试验得到的压头峰值力以及其对应的贯入深度来标定这两个参数的具体取值。其中临界伸长率的取值可以根据下式来估算其初始值:

$$s_c = \sqrt{\frac{G_c}{\left[3G + \left(\frac{3}{4}\right)^4 \left(K - \frac{5G}{3}\right)\right] \delta}} \quad (5)$$



(a) 计算几何与边界条件示意图



(b) 模型区域分解示意图

图 2 压头贯入试验模型及分区

Fig.2 Punch indentation test model and domain decomposition

式中: s_c 为临界伸长率; G_c 为临界能量释放率; G 为材料的剪切模量; K 为材料的体积模量。

通过上述方法, 最终确定的参数如表 2 所示, 其对应的计算结果如图 3 所示。可以看出在压头的法向力达到峰值力之前, 模拟结果基本可以反映压头法向力随贯入深度的变化。本文选用的 LPS 模型没有反映岩石在法向力峰值后的软化现象, 但是由于本小节参照的试验^[30]重点研究压头峰值力前的加载阶段, 因此本文未考虑岩石峰后的塑性软化是可行的。

表 2 压头贯入模拟的近场动力学参数取值

Table 2 Values of peridynamics parameters for punch indentation test

临界伸长率	接触刚度/GPa	接触半径/mm
0.000 67	500	1.0

如图 4 所示, 将岩石试样沿 y 轴切开, 观察不同加载阶段下岩石内部的损伤演化情况。当压头法向力为峰值力的 15% 时, 在压头下方首先形成一个扇形的损伤区, 而与压头直接接触的岩石几乎没有损伤发生, 该现象在试验^[30]和数值分析^[35–36]结果中都有所提到。当压头法向力增加到峰值力的 45% 时, 在压头的边缘首先产生赫兹裂纹, 与试验结果^[30]一致。随着法向力的继续增加, 赫兹裂纹以近似 45° 的方向向下扩展。当压头的法向力达到峰值时, 压头边缘的岩石发生破碎。模拟得到的结果和

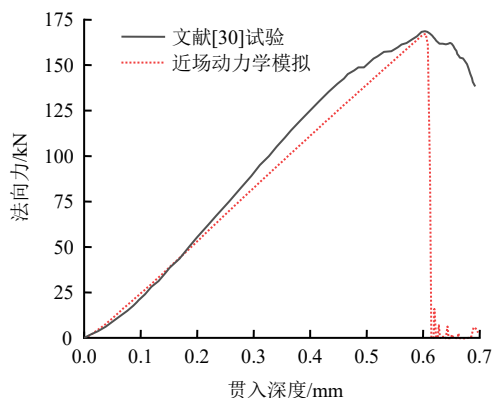


图3 压头法向力-贯入深度曲线

Fig.3 Punch normal force-penetration depth curves

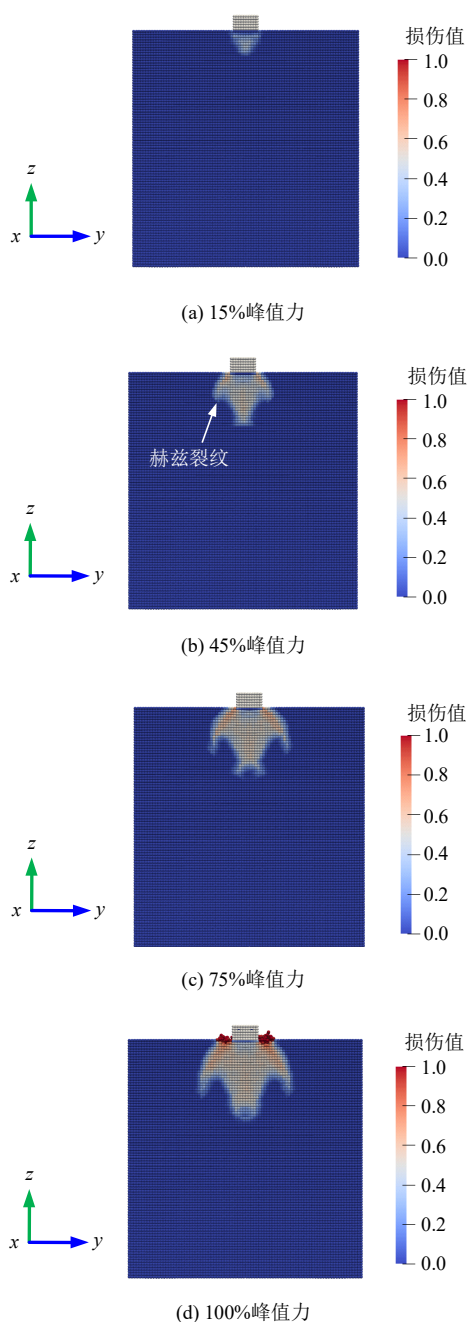


图4 不同加载阶段岩石内部的损伤

Fig.4 Damage values within rock at different loading stages

试验现象^[30]与数值结果^[36]大致相同,表明近场动力学能够相对合理地模拟刀具作用下岩石损伤的演化。

3.3 质点间距对岩石损伤的影响

为了验证本小节算例质点间距设置的合理性,增加了质点间距为 1.5 mm 与 2.5 mm 的模型。此时,上述间距对应的稳定时间步长分别为 2.53×10^{-7} 、 5.02×10^{-7} s。为了保证压头每向前运动 1 mm 需要计算的时间步和 1 mm 质点间距模型基本一致,压头的加载速度分别设置为 30、15 mm/s。在不同质点间距下的曲线如图 5 所示。

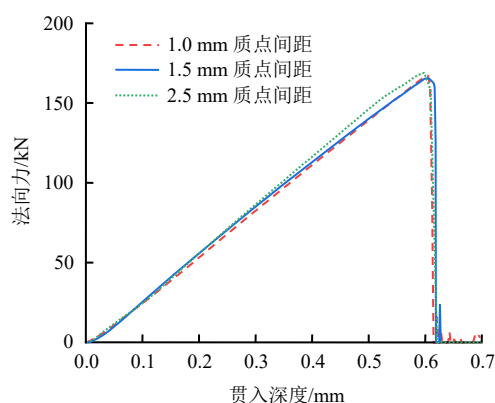


图5 不同质点间距模型压头法向力-贯入深度曲线

Fig.5 Punch normal force-penetration depth curves at different particle spacings

图 6 为不同质点间距的模型在压头达到峰值力时所对应岩石损伤。可以看出不同质点间距的模拟结果大致相同,都可以模拟出赫兹裂纹。从定性的角度讲,表明本文 1 mm 模型得到的岩石损伤结果没有受到质点间距的影响。在近场动力学中,需要指出的是质点间距的选择对计算结果的准确性和精度都有较大的影响,需要针对具体的问题,通过将模拟结果与对应的试验结果相吻合作为判定原则来确定质点的最优间距,然后利用得到的最优间距进行后续相关研究的模拟^[37]。

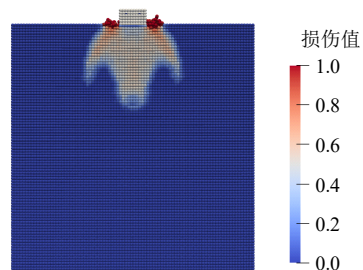
4 TBM 盘形滚刀贯入破岩的模拟

上述算例仅仅展示了近场动力学方法模拟贯入破岩的可行性,但是在前一个算例中压头与岩石的接触面积是恒定的,与实际 TBM 盘形滚刀的贯入破岩存在一些差异。因此本小节将模拟 TBM 盘形滚刀贯入岩石的过程。

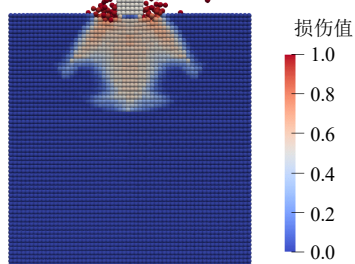
4.1 模型描述

本文参照文献^[38]所述的试验,建立如图 7(a)

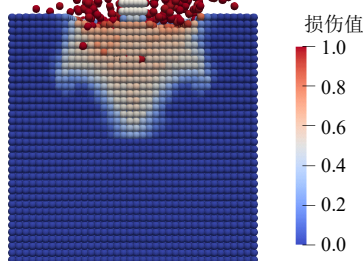
所示滚刀破岩模型,岩石模型的长、宽、高分别为150、150、120 mm,与试验保持一致。将试验所用的滚刀模型简化为直径为120 mm、宽为13 mm的圆柱,岩石的材料参数与试验保持一致,如表3所示。



(a) 1 mm 质点间距



(b) 1.5 mm 质点间距



(c) 2.5 mm 质点间距

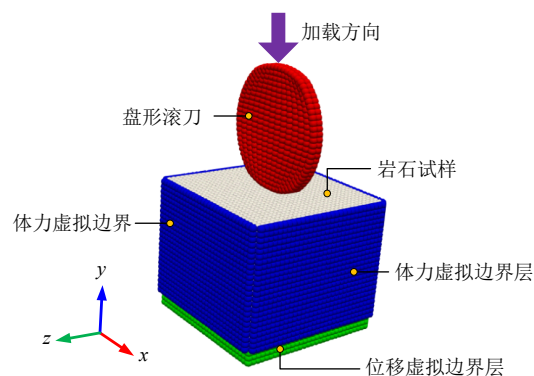
图6 不同质点间距下压头贯入试验的模拟结果

Fig.6 Simulation results of punch indentation tests with different particle spacings

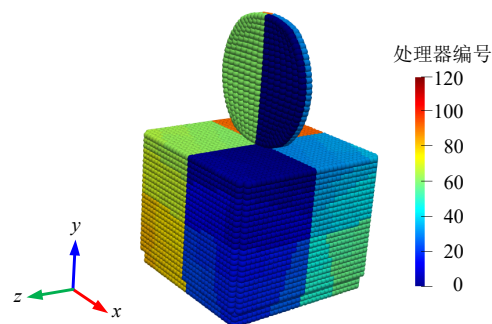
由于该模型的尺寸较大,为了降低模型的计算成本,滚刀和岩石模型的质点间距设置为5 mm,近场范围为3倍的质点间距,即15 mm。在试验中,岩石还受到了0.1 MPa的围压,由于在常规态近场动力学中没有应力的概念,需要将围压转化为质点的体力密度;与位移虚拟边界不同的是体力虚拟边界只需要一层质点^[34],如图7(a)所示的蓝色质点集,不同围压对应的体力密度可以通过下式计算:

$$b = \frac{\sigma lh}{lhd} = \frac{\sigma}{d} \quad (6)$$

式中: b 为体力密度; σ 为相应的围压; l 为岩石试



(a) 几何与边界条件模型示意图



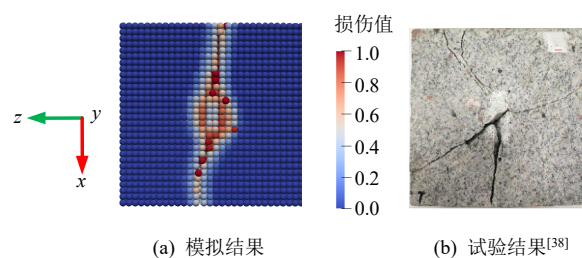
(b) 模型区域分解示意图

图7 滚刀贯入试验模型及分区

Fig.7 Disc cutter indentation test model and domain decomposition

表3 滚刀贯入模拟中岩石和滚刀模型的材料参数
Table 3 Material parameters of rock and cutter model in disc cutter indentation test simulation

材料类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
岩石	37.22	0.26	2 640
滚刀	200.00	0.30	7 700



(a) 模拟结果

(b) 试验结果^[38]

图8 岩石表面损伤

Fig.8 Rock surface damage

样长度; h 为岩石试样高度; d 为体力边界层的厚度。因此, 0.1 MPa 围压换算得到的体力密度为 $2.0 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 。本文将体力密度施加在试样边缘增加的一层虚拟质点上。在位移边界方面, 利用虚拟边界层限制岩石试样底面 y 方向的位移, 并选择虚拟边界层的棱边来限制岩石的刚体位移。滚刀的加载速

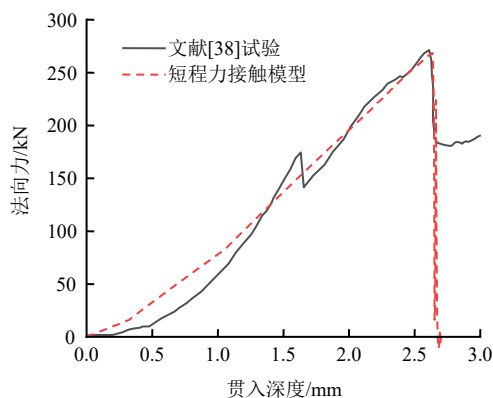
率选为 10 mm/s, 该模型的稳定时间步长为 9.86×10^{-7} mm, 因此压头每向前运动 1 mm, 需要 101 419 个时间步来计算, 可以认为是拟静力加载。本文用 120 核计算机进行并行计算分析, 相应模型的区域分解如图 7(b)所示。

4.2 非线性短程力接触模型

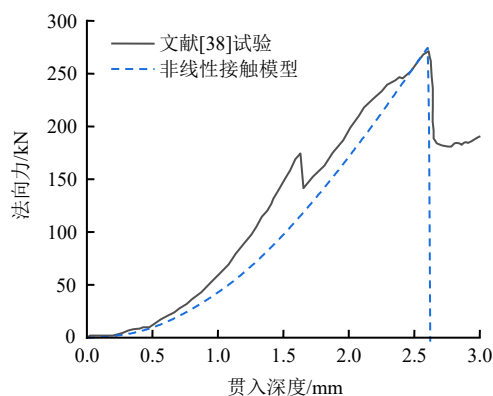
利用上述短程力接触模型, 即式 (3), 模拟得到的结果如图 9(a)所示。可以看出, 短程力接触模型的模拟结果使得滚刀的法向力随着贯入深度的增加呈线性变化, 没有反映出滚刀法向力的非线性增加。因此, 为了模拟盘形滚刀法向力非线性的变化情况, 本文提出了非线性短程力接触模型:

$$f_c = \begin{cases} 0, & \|y_m - y_n\| > d_{mn} \\ \frac{18k}{\pi\delta^5} \left(\frac{d_{mn} - \|y_m - y_n\|}{d_{mn}} \right) (\|y_m - y_n\| - d_{mn}) \frac{y_m - y_n}{\|y_m - y_n\|}, & \|y_m - y_n\| \leq d_{mn} \end{cases} \quad (7)$$

模拟结果如图 9(b)所示, 可以看出, 本文提出的非线性接触模型可以较好地反映滚刀法向力的非线性变化。图 9(b)模拟结果对应的参数如表 4 所示。



(a) 短程力接触模型模拟结果



(b) 非线性接触模型模拟结果

图 9 两种接触模型模拟结果对比

Fig.9 Comparison of simulation results of two contact models

表 4 滚刀贯入模拟的近场动力学参数取值

Table 4 Values of peridynamics parameters for disc cutter indentation test

临界伸长率	接触刚度/GPa	接触半径/mm
0.000 75	325	5.15

利用非线性接触模型得到的岩石破坏模式如图 8 所示, 岩石试样被中间的宏观裂纹分成两半。而试验结果存在沿着 xz 方向斜向发展的宏观裂纹。根据刘泉声^[4, 39]得到的滚刀贯入试验结果, 当岩石周围无围压时, 岩石试样发生破坏时会产生中央宏观裂纹。由于本小节参照的试验同样属于无围压的情况, 因此本文得到的模拟结果是合理的, 而试验结果没有产生中央裂纹的原因可能是试样本身的不均匀性以及滚刀加载难以做到完全对称造成的。

4.3 接触模拟的验证

由于盘形滚刀的轮廓是圆形, 因此在滚刀贯入过程中, 滚刀与岩石的接触面积在不断的增加, 又因为滚刀的宽度是恒定的, 所以接触面积的增加主要体现在接触长度的增加。

本文首先计算了不同贯入度下滚刀与岩石接触区域的理论长度, 其计算思路如图 10 所示。其中 $|OA|$ 为滚刀的半径, $|BD|$ 为滚刀的贯入深度, 圆弧 ABC 为滚刀与岩石的接触长度, 由于滚刀贯入的深度 $|BD|$ 相对于滚刀半径 $|OA|$ 很小, 导致 $\angle AOD$ 的角度非常小, 因此圆弧 ABC 可以近似用弦长 $|AC|$ 代替, 于是可以用式 (8) 计算滚刀与岩石接触区域的理论长度:

$$|AC| = 2\sqrt{|OA|^2 - (|OB| - |BD|)^2} \quad (8)$$

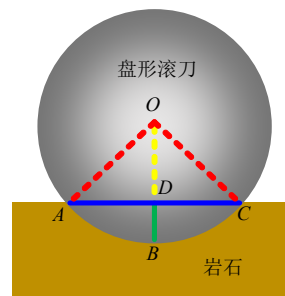


图 10 滚刀与岩石接触区域长度计算示意图

Fig.10 Schematic diagram of calculation of contact length between disc cutter and rock

根据式 (8), 当滚刀贯入深度为 1、2 mm 时, 滚刀与岩石的接触区域的理论长度分别为 21.8 mm 与 30.7 mm。在数值结果中可以通过 y 方向接触力

的分布范围来反映滚刀与岩石的接触长度, 相应贯入深度的接触力分布如图 11 所示。可以看出, 接触力的分布范围为长方形, 中间部分的接触力大, 并且沿着 x 方向逐渐递减, 这是由于滚刀与岩石接触部分是弧形的缘故。从接触力分布的长度可以看出, 滚刀贯入 1 mm 时在长度方向包含 4 个质点, 滚刀贯入 2 mm 时包含 6 个质点, 由于每个质点的尺寸为 5 mm, 因此当滚刀贯入深度为 1、2 mm 时, 滚刀与岩石的模拟接触长度分别为 20、30 mm。接触区域的理论长度与模拟结果的误差分别为 8.3%与 2.4%, 表明接触模型可以较好地计算滚刀与岩石接触过程中接触面积的不断变化。

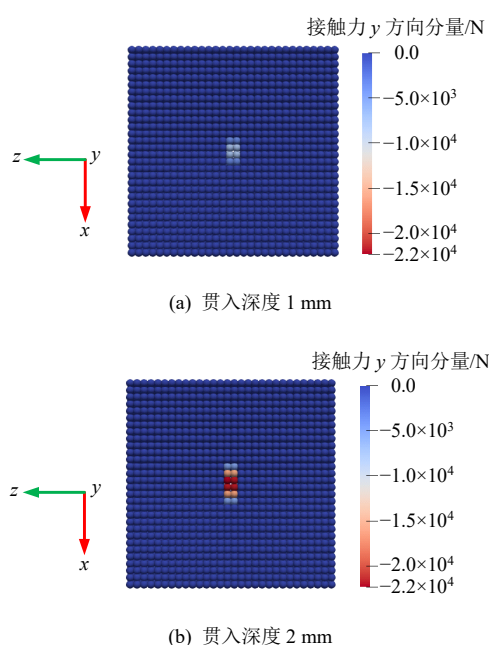


图 11 不同贯入深度下滚刀与岩石的接触面积

Fig.11 Contact area between cutter and rock at different penetration depths

4.4 质点间距对岩石损伤的影响

为了验证本小节算例质点间距设置的合理性, 增加了质点间距为 7.5、3.0 mm 的模型。此时, 上述间距对应的稳定时间步长分别为 1.7×10^{-6} 、 4.8×10^{-7} s, 为了保证滚刀每向前运动 1 mm, 需要计算的时间步和 5 mm 质点间距模型基本一致, 滚刀的加载速度分别设置为 5、20 mm/s。不同质点间距下的曲线如图 12 所示。

图 13 为上述质点间距模型在破坏时所对应的岩石损伤结果。可以看出不同质点间距的模拟结果大致相同, 7.5 mm 质点间距模拟得到的侧向裂纹属于次生裂纹, 是在中央裂纹扩展之后产生的。试样的主要破坏还是中央裂纹导致的。所以本小节选用 5.0 mm 的质点间距是合理的, 岩石损伤结果基本没

有受到质点间距的影响。

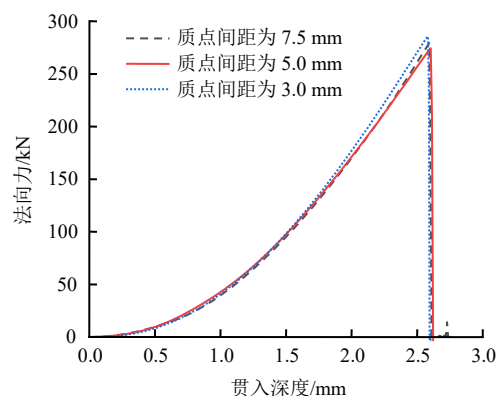


图 12 不同质点间距模型滚刀法向力-贯入深度曲线

Fig.12 Punch normal force-penetration depth curves at different particle spacings

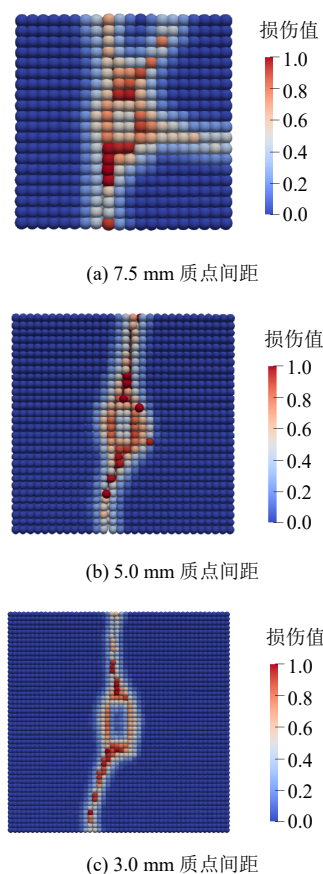


图 13 不同质点间距下滚刀贯入试验的模拟结果

Fig.13 Simulation results of disc cutter indentation tests with different particle spacings

5 不同围压下滚刀贯入破岩的模拟

本文第 4 节参考的文献[38]在完成了 0.1 MPa 围压的试验后, 又分别探究了 5、10、15、20、25 MPa 围压对滚刀破岩的影响。因此本文参照文献[38]的思路, 利用第 4 节围压为 0.1 MPa 模型标定得到的近场动力学参数(表 4)作为输入参数, 仅改变岩

石所受围压的大小,来计算上述 5 组围压作用下的滚刀贯入破岩,并与文献[38]的试验结果比对,从而进一步证明本文所提非线性短程力接触模型的可行性。

5.1 围压的施加

利用式(6)换算围压分别为 5、10、15、20、25 MPa 所对应的体力和体力密度值如表 5 所示。

表 5 不同围压对应的体力与体力密度
Table 5 Body force and body force density corresponding to different confining stresses

围压/MPa	体力/N	体力密度/(N·m ⁻³)
5	9.0×10^4	1.0×10^9
10	1.8×10^5	2.0×10^9
15	2.7×10^5	3.0×10^9
20	3.6×10^5	4.0×10^9
25	4.5×10^5	5.0×10^9

由于本文所采用的 LPS 模型本质是线弹性模型,再加上岩石本身存在惯性,若直接施加体力密度,所产生的应力波在计算区域内无法快速衰减,从而使得围压产生较大的震荡,干扰滚刀破岩过程的模拟,如图 14 曲线 1 所示,因此为了降低这种数值震荡,本文建议体力密度的施加方式采用线性加载的方式,加载时间为 0.025 s,其得到的效果如图 14 中曲线 2 所示,能够显著降低数值震荡,使围

压在计算过程中保持稳定。

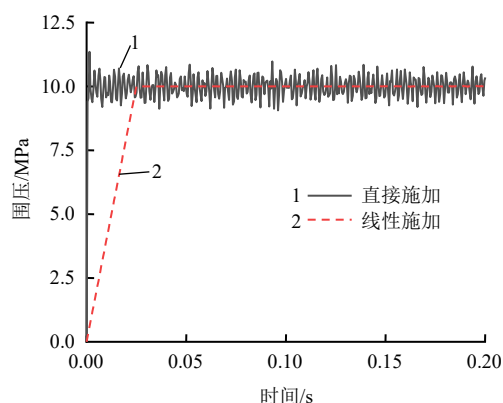


图 14 直接施加围压与线性施加围压的对比
Fig.14 Directly applied confining stress versus linearly applied confining stress

文献[40]指出,在给岩石施加围压的过程中要避免岩石因变形而提前与滚刀接触。因此,本文在初始阶段使得滚刀离岩石上表面保持一定的距离。

5.2 模拟结果

当围压发生变化时,计算得到的法向力-贯入深度曲线如图 15 所示,滚刀峰值力与试验结果的相对误差如表 6 所示。可以看出模拟得到的围压为 5、15、20 MPa 的滚刀法向力-贯入深度曲线的峰值力和试验结果接近,而且误差较小。围压为 10、25 MPa

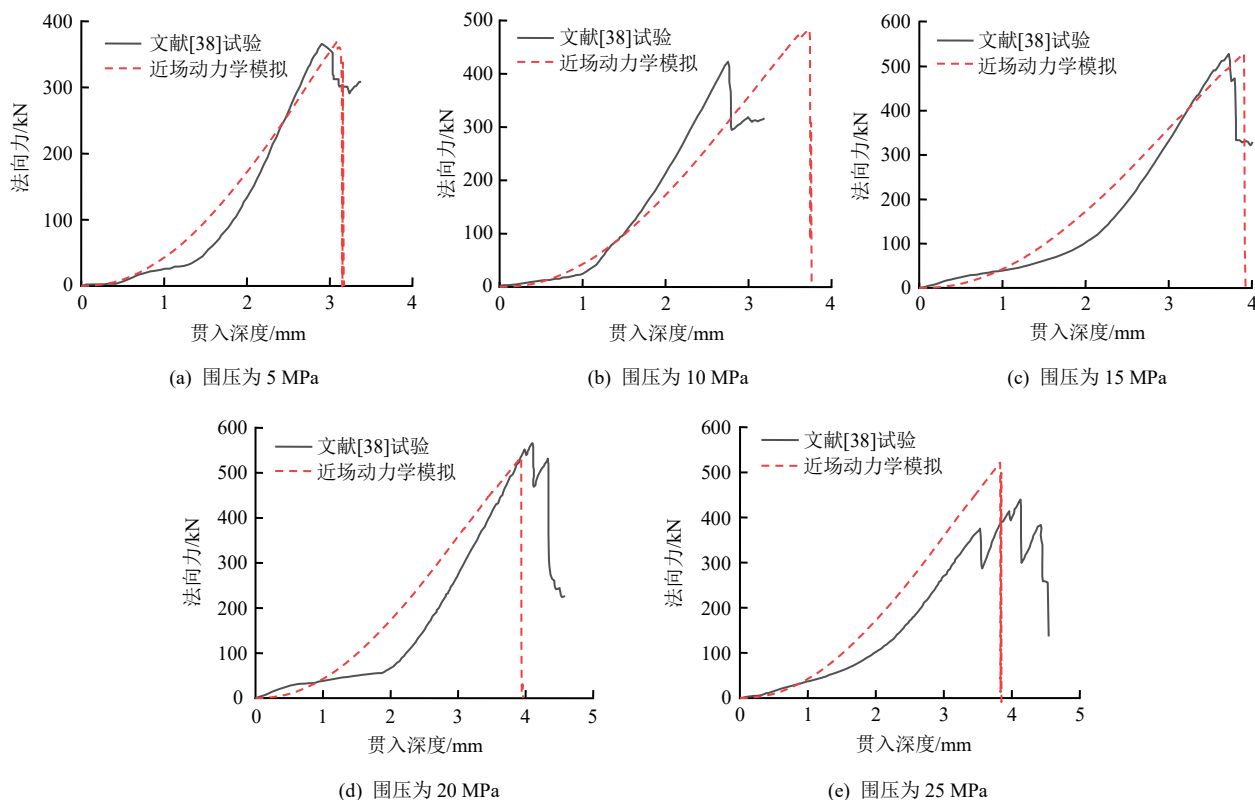


图 15 不同围压下滚刀的法向力-贯入深度曲线

Fig.15 Disc cutter normal force-penetration depth curves at different confining stresses

表6 滚刀峰值力的试验结果与模拟结果的相对误差
Table 6 Relative error of disc cutter peak force between test results and simulation results

围压/MPa	峰值力/kN		相对误差
	试验结果	模拟结果	
5	365.89	369.71	0.010 4
10	422.54	483.27	0.143 7
15	528.27	529.01	0.001 4
20	565.84	534.97	0.054 5
25	439.75	521.64	0.186 2

模拟得到的峰值力偏大,误差较大。计算结果偏大的原因可能是试验所用岩石的内部存在初始缺陷以及岩石本身的不均匀性造成的试验结果偏小。而模拟所用的岩石模型没有考虑内部缺陷与岩石的不均匀,因此导致了计算结果偏大。以上结果证明了所提接触模型能够计算滚刀峰值力随不同围压的变

化。

Liu 等^[41]通过试验研究将滚刀贯入岩石的过程分为了3个阶段,而本文的模拟结果只能得到第3个阶段之前滚刀法向力的第1个峰值,没有反映法向力之后的波动现象。这是因为本文采用的LPS材料本构模型相对简单,无法反映真实的峰后行为。后续研究需要从岩石材料的本构模型入手,进一步完善该方法在滚刀破岩中的应用。

图16是当围压为5~25 MPa时,岩石试样邻近失效前岩石表面的损伤分布图。可以看出,当围压为5、10 MPa时,模拟结果与试验结果一致,岩石都产生了中央宏观裂纹。当围压为15~25 MPa时,由于围压值较大,对中央裂纹的产生有很强的抑制作用,导致模拟结果并未出现中央裂纹,对应于试验中的现象为中央裂纹在围压为15~25 MPa

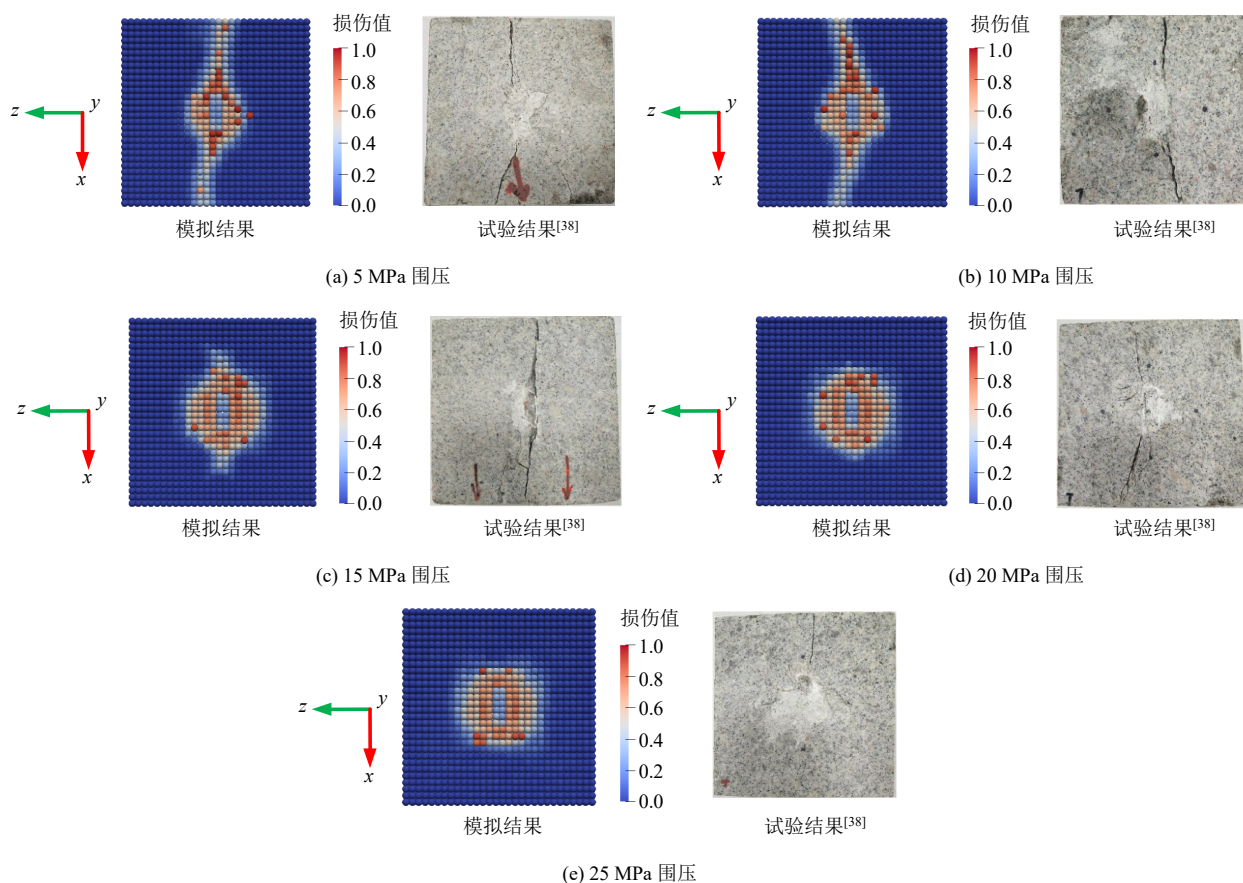


图16 不同围压下岩石的表面损伤值

Fig.16 Surface damage values of rock under different confining stresses

时逐渐不明显。因此本文的模拟结果也是合理的。

可以发现,随着围压的增大,损伤区向着 z 方向逐渐变宽。根据Ma等^[7]的结论,当围压增大时,岩石内部平行于岩石表面的裂纹增多,并逐渐扩展到岩石表面导致岩石的破碎,因此导致本文模拟得到的岩石表面损伤区的范围逐渐变宽。这与Ma等^[7]

通过数值模拟得到的二维结果相呼应,进一步证明了利用近场动力学得到的模拟结果的正确性。

6 结 论

(1) 本文建立了压头贯入试验的三维近场动力学模型,并将模拟结果与试验现象比对,证明了近

场动力学模拟刀具贯入破岩的可行性。

(2) 本文提出了非线性短程力接触模型, 并通过模拟 TBM 盘形滚刀贯入试验, 证明所提接触模型能够较好地反映滚刀法向力随贯入深度的非线性变化情况, 还可以计算滚刀在贯入过程中与岩石接触面积的不断变化。

(3) 通过模拟 5 组不同围压作用下 TBM 滚刀三维贯入试验, 证明了所提接触模型能够计算滚刀峰值力随不同围压的变化, 并且可以得到合理的岩石表面破坏形式。

(4) 本文的验证算例表明, 在近场动力学中, 除常规的材料参数外, 仅需要两个标定参数便可以模拟滚刀破岩的过程, 具有实际工程应用前景。

参考文献

- [1] CHEN L H, LABUZ J F. Indentation of rock by wedge-shaped tools[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1023-1033.
- [2] 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]. **岩土力学**, 2012, 33(5): 1333-1340.
MO Zhen-ze, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1333-1340.
- [3] 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 Hai-bo, ZHOU Qing-chun, 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.
- [4] 刘泉声, 潘玉丛, 刘建平, 等. 常截面滚刀贯入试验中岩石破坏行为分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(增刊 2): 3516-3525.
LIU Quan-sheng, PAN Yu-cong, LIU Jian-ping, et al. Analysis on fragmentation behavior of rocks in indentation tests by disc cutter[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.2): 3516-3525.
- [5] 刘京铄, 曹平, 范金星, 等. 不同双向侧压作用下 TBM 滚刀侵入破岩特征及效率研究[J]. **岩土力学**, 2017, 38(6): 1541-1549.
LIU Jing-shuo, CAO Ping, FAN Jin-xing, et al. A study on rock breaking characteristics and efficiency with TBM cutters in a biaxial state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1541-1549.
- [6] 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.
- [7] MA H, YIN L, JI H. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(6): 1021-1033.
- [8] 梁正召, 于跃, 唐世斌, 等. 刀具破岩机理的细观数值模拟及刀间距优化研究[J]. **采矿与安全工程学报**, 2012, 29(1): 84-89.
LIANG Zheng-zhao, YU Yue, TANG Shi-bin, et al. Numerical modeling of rock fracture mechanism under disc cutters and associated cutter spacing optimization[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(1): 84-89.
- [9] 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): 1196-1202, 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): 1196-1202, 1209.
- [10] LIU J, WANG J, WAN W. Numerical study of crack propagation in an indented rock specimen[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 96: 1-11.
- [11] LI X F, LI H B, LIU Y Q, et al. Numerical simulation of rock fragmentation mechanisms subject to wedge penetration for TBMs[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 53: 96-108.
- [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 Ming-jing, SUN Ya, WANG Hua-ning, 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.
- [13] 蒋明镜, 傅程, 王华宁, 等. 简单复合岩体中 TBM 多滚刀破岩机理离散元分析[J]. **土木工程学报**, 2019, 52(增刊 1): 120-126.
JIANG Ming-jing, FU Cheng, WANG Hua-ning, et al. Distinct element analysis of mechanism of rock fragmentation induced by TBM cutting in simply composite rock mass with multiple cutters[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(Suppl.1): 120-126.

- [14] DONG A, MA G, GONG Q, et al. Numerical simulation on rock cutter performance in mixed face ground[C]// Geoshanghai: Soil and Rock Behavior and Modeling International Conference. Shanghai: [s. n.], 2006: 199-204.
- [15] 翟淑芳. 深部复杂地层的 TBM 滚刀破岩机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- ZHAI Shu-fang. Rock fragmentation by TBM cutters in deep complicated formation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [16] ZHOU X P, ZHAI S F, BI J. Two-dimensional numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutting tools in mixed-face ground[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2018, 18(3): 06018004.
- [17] 余音, 胡祎乐. 近场动力学理论及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
- YU Yin, HU Yi-le. Peridynamic theory and its application[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2019.
- [18] WANG Y, ZHOU X, WANG Y, et al. A 3-D conjugated bond-pair-based peridynamic formulation for initiation and propagation of cracks in brittle solids[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2018, 134: 89-115.
- [19] WANG Y, ZHOU X, XU X. Numerical simulation of propagation and coalescence of flaws in rock materials under compressive loads using the extended non-ordinary state-based peridynamics[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2016, 163: 248-273.
- [20] 马鹏飞, 李树忱, 袁超, 等. 基于 SED 准则的近场动力学及岩石类材料裂纹扩展模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1109-1117.
- MA Peng-fei, LI Shu-chen, YUAN Chao, et al. Simulations of crack propagation in rock-like materials by peridynamics based on SED criterion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(6): 1109-1117.
- [21] 谷新保, 周小平. 裂纹扩展和连接过程的近场动力学数值模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 610-616.
- GU Xin-bao, ZHOU Xiao-ping. Numerical simulation of propagation and coalescence of cracks using peridynamic theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 610-616.
- [22] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2000, 48(1): 175-209.
- [23] SILLING S A, EPTON M, WECKNER O, et al. Peridynamic states and constitutive modeling[J]. **Journal of Elasticity**, 2007, 88(2): 151-184.
- [24] REN H, ZHUANG X, RABCAZUK T. Dual-horizon peridynamics: a stable solution to varying horizons[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2017, 318: 762-782.
- [25] 陈智勇, 苏国韶, 黄小华, 等. 近场动力学研究进展与岩石破裂过程模拟[J]. 固体力学学报, 2019, 40(4): 354-371.
- CHEN Zhi-yong, SU Guo-shao, HUANG Xiao-hua, et al. Recent progress in peridynamics and its numerical simulation in rock fracture process[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2019, 40(4): 354-371.
- [26] 周小平, 王允腾, 钱七虎. 爆破荷载作用下岩石破坏特性的“共轭键”基近场动力学数值模拟研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2020, 50(2): 52-64.
- ZHOU Xiao-ping, WANG Yun-teng, QIAN Qi-hu. Numerical simulations of failure characteristics of rock materials under blasting loads using the conjugated bond-pair-based peridynamics[J]. **Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)**, 2020, 50(2): 52-64.
- [27] CUI H, LI C, ZHENG H. The generation of non-ordinary state-based peridynamics by the weak form of the peridynamic method[J]. **Mathematics and Mechanics of Solids**, 2020, 25(8): 1544-1567.
- [28] PARKS M, LITTLEWOOD D, MITCHELL J, et al. Peridigm users' guide. V1.0.0.[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories (SNL), 2012.
- [29] ZHU F, ZHAO J. A peridynamic investigation on crushing of sand particles[J]. **Geotechnique**, 2019, 69(6): 526-540.
- [30] COOK W, HOOD M, TSAI F. Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1984, 21(2): 97-107.
- [31] ZHAO T, ZHANG W, GU S, et al. Study on fracture mechanics of granite based on digital speckle correlation method[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2020, 193-194: [2020-06-01]Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.02.026.
- [32] 孙伟, 包世诚, 张嘎. 基于近场动力学均匀化的混凝土防渗墙等效损伤模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1240-1250.
- SUN Wei, BAO Shi-cheng, ZHANG Ga. An equivalent damage model of concrete cut-off wall based on homogenization of peridynamics[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2022, 50(9): 1240-1250.