文章编号:1009-6582(2021)06-0077-08
DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.06.009

基于三维RBD-DEM耦合方法的贯入角度对滚刀冲击影响分析

徐公允[1] 徐汪豪[1,2] 姚志刚[1] 方 勇[1] 刘四进[3]
(1 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031;2 浙江杭海城际铁路有限公司,嘉兴 314499;3 中铁十四局集团有限公司,济南 250014)

摘 要 盾构在软硬不均地层中施工易诱发滚刀出现偏磨、断裂等问题,造成换刀频率大幅增加。因此,文章采用EDEM离散元软件,基于RBD(刚体动力学)-DEM的耦合方法考虑滚刀与地层的相互作用,实现滚刀在仿真模拟中的被动运动;建立相交角分别为15°、30°、45°、60°、75°和90°共6种工况,研究滚刀在软硬不均地层中贯入角度的变化对其所受冲击的影响。研究结果表明,贯入角度主要影响切向和法向平面的法向荷载,当贯入角度达到45°时,滚刀切向和法向平面在冲击阶段所受的峰值荷载均达到最大;贯入角度从90°变化到45°的情况下,法向平面和切向平面的法向荷载峰值提升幅度分别达到原来的18.74倍和3.53倍,法向平面中法向荷载的突变是诱发滚刀脱落、偏移和断裂的主要原因。

关键词 土压平衡盾构 RBD-DEM 数值模拟 滚刀 贯入角度 复合地层
中图分类号:U455.43 **文献标识码:A**

1 引 言

在我国地下工程的建设过程中,盾构法以其施工速度快、机械化程度高、对交通影响小等优点得到了广泛的应用。在盾构施工中,主要有土压平衡盾构和泥水平衡盾构两种,其中土压平衡盾构在复合地层施工过程中,滚刀易发生异常磨损,已有许多学者对此进行了相关研究,如Gong等[1,2]采用UDEC软件模拟了节理间距与方向对滚刀破岩的影响。苏利军等[3]利用离散元软件模拟了TBM滚刀对强度较高硬岩的破坏程度。Cho等[4]使用AUTODYN 3D软件模拟了滚刀破岩过程,发现对于均质各向同性的岩石,数值模拟结果可反映出试验真实情况;张 魁等[5]通过2D离散单元法模拟了滚刀破岩与围压和刀间距的关系。吴起星[6]通过对滚刀破岩的仿真分析发现,滚刀破岩过程中,滚刀刀圈外侧的磨损较大。夏毅敏等[7]通过有限元方法,模拟得到了刀具切削过程中荷载的波动变化关系。莫振泽等[8]通过UDEC软件模拟了不同形式滚刀的破岩机制。谭 青等[9]通过数值模拟发现,滚刀径向受力远大于切向受力。梁立唯等[10]通过对MatDEM离散元软件的二次开发发现,滚刀在切割软硬不均地层时会造成刀盘的受力不均。王浩杰等[11]通过对广州地铁18号线土压平衡盾构机的分析,得到异常磨损是造成滚刀移位、断裂等的主要原因。李克金等[12]通过常截面滚刀贯入试验,模拟了滚刀破岩过程,并将该过程细分成五个阶段。史 越等[13]通过研究发现,侧向力是造成滚刀偏磨的主要原因。Fang等[14]运用离散元软件,考虑了刀盘与地层之间的相互作用,分析了滚刀切削软土地层时的偏磨现象。

在实际施工中,滚刀破岩的过程是通过刀盘转动后滚刀与岩土体产生摩擦进而带动滚刀的被动滚

修改稿返回日期:2021-01-18
基金项目:国家自然科学基金(52078428);四川省杰出青年基金(2020JDJQ0032).
作者简介:徐公允(1996-),男,硕士研究生,主要从事盾构施工控制技术相关研究工作,E-mail:gongyunxu@qq.com.
通讯作者:方 勇(1981-),男,博士,教授,主要从事盾构隧道方面的相关研究及教学工作,E-mail:fy980220@swtju.cn.

动，而在传统的滚刀分析模型中，大都是假定滚刀不动或通过设置固定的线速度和角速度来分析滚刀的接触受力，即主动运动，这与实际施工中滚刀的运动形态存在较大差异。另外，目前对于滚刀的研究主要集中在贯入度、贯入速度和贯入荷载等方面，针对滚刀贯入角度的研究还较少。

针对上述问题，本文采用三维RBD-DEM耦合方法，考虑滚刀与地层的相互作用，根据滚刀接触受力的变化来调节运动形态；通过改变滚刀贯入复合地层软硬岩分界面的角度并记录刀具的受力状态，分析其受到的冲击效应。

2 复合地层滚刀破岩状态分析

盾构法适用于匀质软岩地层，而在复合地层中，存在着软硬岩夹杂的问题，在软硬岩分界面处，两种岩石物理力学性质的差异会使得滚刀在进入硬岩后破岩力剧烈起伏变化[7]，从而使得盾构机在推进过程中滚刀很容易出现受力不均的现象，若刀圈本身存在结构裂缝等隐患，突变荷载将可能导致刀圈损坏。又因复合地层中硬岩分布的不规律性，滚刀在破碎岩石中很容易发生贯入角度的变化。因此，明确贯入角度对滚刀在进入硬岩时受到瞬时荷载的影响规律十分必要。

3 三维RBD-DEM耦合方法

刚体动力学(RBD)广泛用于描述刚体在外力作用下的运动状态，将离散元计算得到的滚刀受力进行相应的刚体动力学计算，可得到滚刀当前的转动速度和转动加速度，从而实现滚刀的被动滚动过程。具体的计算方法如下：

(1) 确定滚刀转轴位置和初始转动惯量

滚刀跟随刀盘一起运动，因此线速度可认为是定值，在该步骤中将滚刀的几何中心即转轴的中点位置设置为滚刀全局的移动中心，根据模拟过程，可将滚刀的运动视为围绕移动中心的坐标轴旋转，因此可确定初始惯性张量I。

(2) 滚刀的移动过程

滚刀在计算过程中的移动可以认为是平动，将滚动中心设置为局部坐标系的原点，设定滚刀运动速度向量为$\boldsymbol{V}$，则移动中心的向量计算公式为：

$$\begin{cases} \mathbf{L} = \mathbf{L}' + \boldsymbol{V}\cdot \mathrm{d}t \\ \mathbf{AP} = \mathbf{O_AP} + \mathbf{L} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\mathbf{L}$为已移动位置；$\mathbf{L}'$为上一步移动位置；$\mathbf{AP}$为滚刀当前位置；$\mathbf{O_AP}$为滚刀初始位置；$\mathrm{d}t$为计算循环步。

(3) 滚刀旋转矩阵的计算

通过设置滚刀计算过程中旋转矩阵的变化可以模拟地层与滚刀的相互作用。滚刀运动过程中的角加速度为：

$$\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{T}\cdot \boldsymbol{I}^{-1} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\alpha}$为三维角加速度向量；$\boldsymbol{T}$为受到的三维扭矩向量。

根据角加速度即可得到运动中的角速度为：

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}' + \boldsymbol{\alpha}\cdot \mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\omega}$为三维角速度向量；$\boldsymbol{\omega}'$为上一步的三维角速度计向量。角速度的大小即为向量$\boldsymbol{\omega}$的模，而向量$\boldsymbol{\omega}$的单位向量$\mathbf{axis}$为物体的转动轴。

为了模拟刀盘的旋转过程，在局部坐标系O中引入旋转矩阵$\boldsymbol{M}$，只改变向量的方向而不改变向量的大小，计算公式为：

$$O' = O\cdot \boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \tag{4}$$

根据计算过程中局部坐标系的变换，得到每一循环中旋转矩阵的变化，当前循环中旋转矩阵为：

$$\boldsymbol{M}(\mathbf{axis},\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta + (1-\cos\theta)\cdot x^2 & (1-\cos\theta)\cdot xy - (\sin\theta)\cdot z & (1-\cos\theta)\cdot xz + (\sin\theta)\cdot y \\ (1-\cos\theta)\cdot yx + (\sin\theta)\cdot z & \cos\theta + (1-\cos\theta)\cdot y^2 & (1-\cos\theta)\cdot yz - (\sin\theta)\cdot x \\ 1-\cos\theta)\cdot zx - (\sin\theta)\cdot y & (1-\cos\theta)\cdot zy + (\sin\theta)\cdot x & \cos\theta + (1-\cos\theta)\cdot z^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中θ可以根据公式(6)计算：

$$\theta = |\boldsymbol{\omega}|\cdot \mathrm{d}t \tag{6}$$

(4) 更新旋转张量

由于转动张量与局部坐标系有关，随着滚刀的移动，初始的局部坐标系发生变化，新的转动张量为：

$$\boldsymbol{I}' = O'\boldsymbol{I}O'^{T} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{I}'$为局部坐标系发生变化后新的转动惯性张量。

根据上述基于刚体动力学算法的步骤，采用C++语言开发的RBD耦合程序可实现滚刀破岩过程中的被动滚动。

4 数值模型

通过EDEM建立离散元模型，如图1所示，模拟滚刀在硬岩破岩过程中的受力情况，软岩侧受力远小于硬岩，故软岩用墙体单元代替，通过设置刚度来反映软岩侧的地层性质。模型尺寸大小为200 mm×400 mm×220 mm，为了提高计算速度，颗粒大小从上

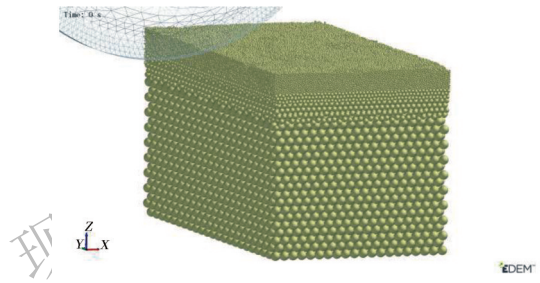


图1 滚刀贯入角度模型

Fig.1 Penetration angle model of disc cutters

到下逐渐增大，上层颗粒半径设置为1 mm，采用随机堆积的方式，下层采用密集堆积，颗粒数量达到262 352个。颗粒模型四周使用墙体单元固定。由于主要考虑刀具受荷特征，且盾构隧道一般属于浅埋隧道，故未考虑地应力的影响。滚刀采用刚性墙体单元模拟。

盾构机在复合地层中施工，在总推力一定的情况下，贯入度一般在17 mm以下[15,16]，当地层中明确存在硬岩时，滚刀的贯入度会明显下降，尤其是在花岗岩地层中，贯入度基本集中在1~6 mm之间，故本文贯入度设置为5 mm，滚刀的运动速度设置为1 m/s。

由于盾构掘进过程中实际以固结土为开挖岩土体，并且削掘较快，故选择使用南京土壤厂生产的TSZ10-1.0型应变控制式三轴仪对广州地区强风化花岗岩进行固结不排水试验，获取试样的主应力差-应变曲线并得到拟合参数粘聚力为38 kPa，内摩擦角为27°，以此数据作为参考，对离散元计算中的软岩细观参数进行标定。

由于本文主要分析滚刀穿越角度对刀具的力学响应，所以对离散元模型中硬岩细观参数的探讨是次要的。基于针对不同地区、不同风化程度岩石的已有试验研究数据[17~19]，依此设定硬岩细观参数，使得离散元岩土体的宏观规律处于合理区间，能够表现出硬岩的“硬脆性”即可，故最终确定硬岩弹性模量为36.3 GPa、破坏峰值应力为127 MPa。颗粒参数设置如表1所示。

表1 颗粒模型计算参数取值

Table 1 Calculation parameter values in particle model

围岩类别	静摩擦系数 μ	滚动摩擦系数 μ_{Roll}	粘结键法向刚度 K_n/(N/m³)	粘结键法向阈值 σ_n^{max}/Pa	粘结键切向刚度 K_s/(N/m³)	粘结键切向阈值 σ_s^{max}/Pa
软岩	0.5	0.5	1×10^5	2×10^6	1×10^5	2×10^6
硬岩	0.5	0.9	1×10^{12}	5×10^{11}	5×10^{13}	2.5×10^{13}

如图1所示，滚刀依照一定的速度转动从模型的一侧贯入。滚刀的贯入角度在空间中为0~90°，如图2所示，将刀具所在平面与模型贯入侧软硬岩分界面的夹角定义为相交角，通过控制相交角的大小达到控制贯入角度的目的，相交角从15°到90°间隔15°按等差数列设置，如图3所示。

滚刀尺寸如图4所示，将刀盘上安装的滚刀的正视和侧视图定义为法向和切向，并将滚刀在xy平面内的分量荷载转换成刀盘的法向和切向荷载，如图5所示，计算公式见式(8)：

$$\begin{cases} F_n = F_x\cdot\cos\alpha + F_y\cdot\sin\alpha \\ F_t = F_x\cdot\sin\alpha + F_y\cdot\cos\alpha \end{cases} \tag{8}$$

式中：α为刀具所在平面与模型贯入侧软硬岩分界面的夹角；F_x和F_y分别表示图2中力在x和y方向的分量；F_n和F_t分别表示图5中的法向和切向荷载。法向荷载定义为滚刀轴承方向荷载；切向荷载与法向荷载呈90°。

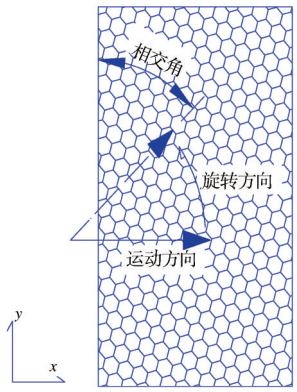


图2 滚刀运动设定示意

Fig.2 Schematic diagram of setting disc cutter motion

5 计算结果分析

5.1 法向平面滚刀受荷载情况分析

以滚刀刀圈为载体，可从数值模拟中提取其受

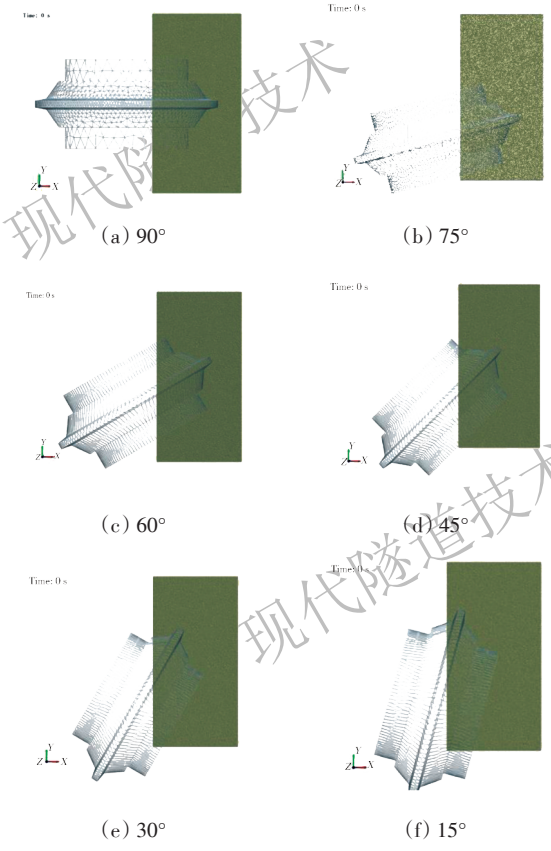


图3 滚刀贯入角度工况

Fig.3 Penetration angle conditions of disc cutter

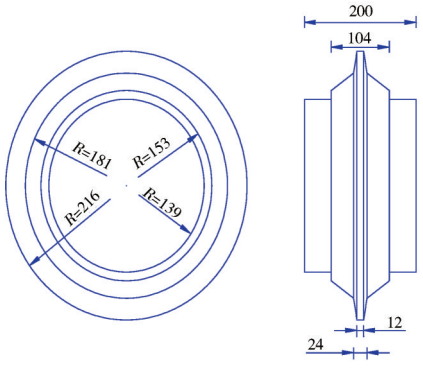


图4 滚刀法向平面和切向平面(单位:mm)

Fig.4 Normal and tangential planes of disc cutter (Unit: mm)

力情况,如图6所示。从图中可以看出,当相交角为90°时,即滚刀垂直于软硬分界面贯入时,法向荷载变化很小,全程在0附近徘徊。当滚刀以一定角度贯入硬岩后,即相交角小于90°时,在贯入冲击阶段,滚刀的法向平面受力会在短时间内增大到峰值后迅速下降到0,随后出现反向受力,滚刀所受的反向力的峰值变化明显小于初始阶段荷载的突变程

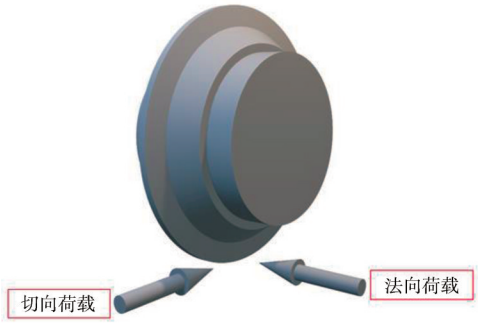


图5 滚刀法向平面上的法向和切向荷载

Fig.5 Normal and tangential loads on normal plane of disc cutter

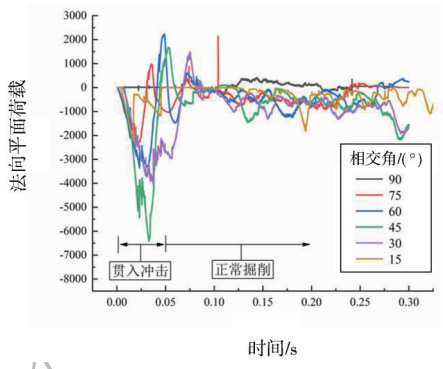


图6 滚刀法向平面荷载变化情况

Fig.6 Curves of load on normal plane of disc cutter

度,且衰减的速度明显更快,在正常掘削一段时间后,即近似掘削2倍贯入冲击时间后,滚刀法向荷载变化基本保持稳定,切向力基本在0附近波动。贯入冲击阶段荷载变化剧烈,相交角为45°时,滚刀法向平面的峰值荷载最大,相交角度的变化对滚刀法向平面的受力具有较大的影响。

为了研究相交角度对法向平面受力的影响程度,绘制了不同相交角下峰值力的变化情况,如图7所示,图中峰值力为滚刀荷载时程谱的最大荷载。从图中可以看出,法向平面上的峰值力在45°附近达到最大,并近似以45°为对称轴,其中45°情况下的峰值力为90°情况下的18.74倍,故相交角对法向平面的受荷冲击影响十分巨大。

当滚刀进入软硬岩分界面时,法向平面的荷载变化规律可以总结为:在贯入冲击阶段,本文设置其时间为0.05 s,该平面上的法向荷载发生突变,并在很快时间到达稳定。由于硬岩本身的力学性质,稳定后的受力较原来滚刀切割软岩时有所增长,如图8所示。根据图8中瞬时突变值与时间Δt的比值得

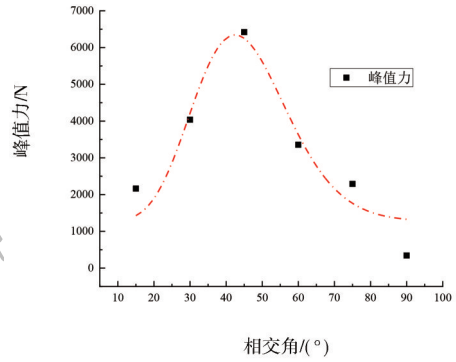


图7 法向平面峰值力随相交角的变化情况

Fig.7 Curve of peak force on normal plane as function of intersection angle

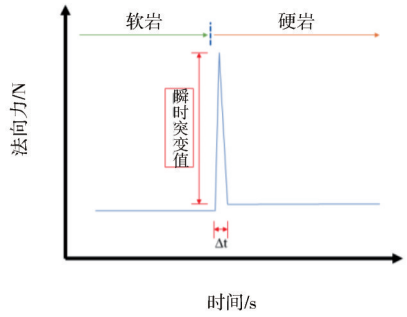


图8 法向平面荷载突变示意

Fig.8 Schematic diagram of abrupt change of load on normal plane

到横向峰值瞬时力变化率情况，如图9所示。从图9可以看出，荷载变化率在45°左右发生突变。

冲量可以反映物体一段时间的运动状态，反映力的作用效应，为荷载时程谱曲线的面积，冲击荷载分析后如图8所示，为三角形荷载，可近似计算相关面积得到冲量。当相交角为45°时，硬岩对滚刀的作用效应最大，且此时的冲量分别是15°和75°时的5.79倍和4.11倍，如图10所示。

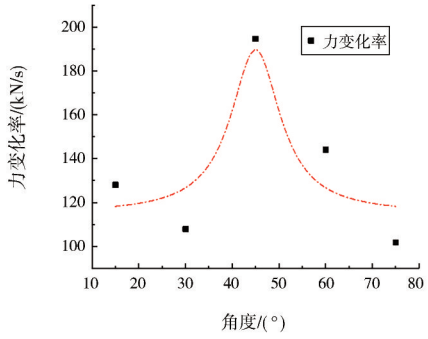


图9 法向平面最大峰值力变化率

Fig.9 Curve of change rate of maximum peak force on normal plane

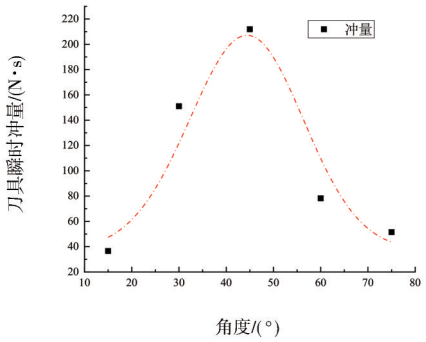


图10 法向平面峰值力作用下冲量变化情况

Fig.10 Curve of impulse under peak force on normal plane

5.2 切向平面滚刀受荷载情况

从图11可以看出，贯入冲击初始阶段，相交角为45°的峰值力达到最大，随后在短时间内滚刀切向平面受到反向力的作用，且在60°时反向力达到最大。切向平面的荷载变化和法向平面有一定的相似性，当相交角逐渐增大后，荷载的峰值逐渐增大，达到一定程度后，峰值逐渐减小，相交角为90°时，在滚刀进入硬岩阶段有一定的增长，随后在0附近起伏变化。切向平面的荷载峰值变化如图12所示，可知其变化规律与法向平面相似，但两者数值上的变化有较大的差异。

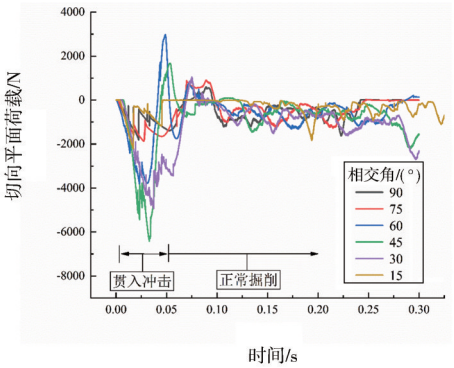


图11 滚刀切向平面荷载变化情况

Fig.11 Curves of load on tangential plane of disc cutter

当滚刀在硬岩上运动时，由于接触作用，在切向平面上必定产生作用力，故相交角为90°时，虽然荷载峰值较小，但仍然没有出现法向平面上受力为0的情况。从图12中可以看出，峰值力近似以相交角为45°为对称轴，相交角小于15°后峰值力的变化幅度很小，45°时的峰值力可以达到90°情况下的3.53倍。由于初始值较大，突变的幅度不大。

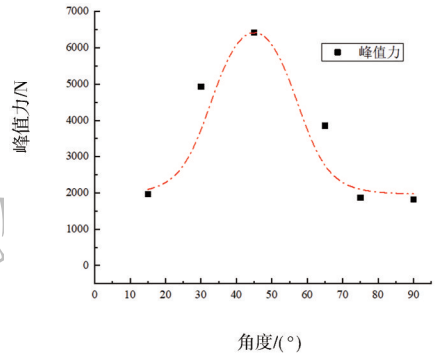


图12　切向平面峰值力随相交角的变化情况

Fig.12　Curve of peak force on tangential plane as function of intersection angle

图13反映出了切向平面下冲量变化情况，相交角为45°情况下峰值力的冲量分别达到了75°和15°时的4.05和6.62倍，切向和法向情况下的冲量数值相差不大，相对而言切向平面冲量随相交角的变化更为平缓。

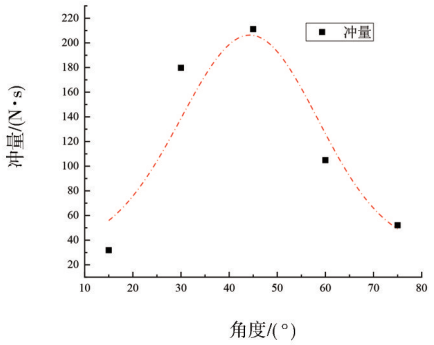


图13　切向平面峰值力作用下冲量变化情况

Fig.13　Curve of impulse under peak force on tangential plane

5.3　竖向荷载变化情况

切向荷载方向和法向荷载方向构成一平面，将垂直于该平面的荷载定义为竖向荷载。从图14中可以看出，滚刀破岩时竖向荷载变化情况十分复杂，随着相交角的变化，各工况下的荷载峰值起伏变化，不同相交角的荷载峰值呈现波动变化，因此可以认为相交角对竖向荷载影响有限。

6　结　论

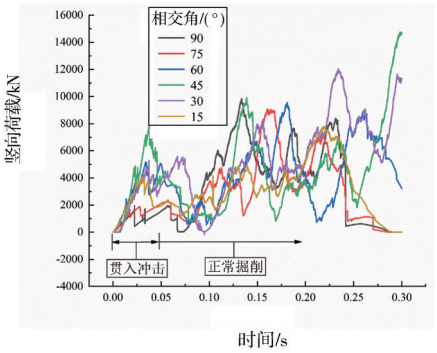


图14　滚刀竖向荷载变化情况

Fig.14　Curves of vertical load of disc cutter

本文针对传统数值模拟方法的局限性，采用RBD-DEM耦合的方法，考虑了滚刀与地层的相互作用，将数值模拟中滚刀的运动过程和实际施工中滚刀的运动机理联系起来。通过分析可以看出，贯入角度对滚刀影响较大，具体结论如下：

（1）采用离散元软件，基于刚体动力学，将滚刀随刀盘的运动简化为平移运动，滚刀在地层作用下的被动转动简化成随滚刀转动中心的滚动，并通过引入旋转矩阵更新每一循环过程中的转动张量，可实现滚刀运动状态为随地层变化而产生的被动运动，更符合实际情况。

（2）相交角对法向荷载的影响较大，随着相交角的变化，滚刀的法向荷载会发生突变。滚刀进入软硬岩分界面后，以45°的相交角为对称轴，法向和切向平面的法向荷载峰值和冲量大小都在45°左右达到最大值。以45°为基准，相交角增大或减小荷载峰值也会同等减小。

（3）相交角从45°变化到90°的情况下，滚刀在法向平面的法向荷载突变幅度达到18.74倍，远大于切向平面下法向荷载的变化情况，法向平面荷载的剧烈突变将诱使刀圈发生断裂或者脱落等情况。

（4）竖向荷载峰值在相交角变化时呈现波动起伏，无明显规律，可以认为相交角对竖向荷载影响不大。

在做好地质勘探，明确软硬不均地层下硬岩的走向和倾向后，研究结果可用来计算滚刀受冲击影响最大时盾构隧道的埋深及横向位置；当施工达到最不利位置时，宜降低掘进速度并做好滚刀动态监测。

参考文献

References

[1] GONG Qiuming, ZHAO Jian, JIAO Yuyong. 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.

[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 吴起星. 复合地层中盾构机滚刀破岩力学分析[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
WU Qixing. Mechanical Analysis of Rock Breaking by Disc Cutter during Shield Tunneling in Mixed Face Ground Conditions[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
[7] 夏毅敏, 薛 静, 周喜温. 盾构刀具破岩过程及其切削特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 954-959.
XIA Yimin, XUE Jing, ZHOU Xiwen. Rock Fragmentation Process and Cutting Characteristics on Shield Cutter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(4): 954-959.
[8] 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 Zhenze, LI Haibo, ZHOU Qingchun, 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.
[9] 谭 青, 史余鹏, 曾桂英, 等. TBM盘形滚刀破岩刀刃应力分布研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1743-1751.
TAN Qing, SHI Yupeng, ZENG Guiying, et al. Study on the Stress Distribution on the Blade in the Process of Rock Breaking by the TBM Disc Cutter[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(8): 1743-1751.
[10] 梁立唯, 刘 春, 秦 岩, 等. 基于MatDEM的盾构滚刀破岩离散元建模与数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(3): 116-122.
LIANG Liwei, LIU Chun, QIN Yan, et al. Discrete Element Modeling and Numerical Simulation of Rock Breaking by Hob Based on MatDEM[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(3): 116-122.
[11] 王浩杰, 王志勇, 周 智, 等. 复合地层土压平衡盾构滚刀磨损规律及切削距离寿命预测分析[C]//2019年全国工程地质学术年会论文集, 北京: 中国地质学会, 2019: 104-112.
WANG Haojie, WANG Zhiyong, ZHOU Zhi, et al. Prediction and Analysis on the Wear Law and Cutting Life of Disc Cutter of Earth Pressure Balanced Shield TBM in Composite Strata[C]//Proceedings of 2019 National Academic Annual Conference on Engineering Geology. Beijing: Geological Society of China, 2019: 104-112.
[12] 李克金, 张德文, 李 文, 等. 复合地层不同岩石强度下滚刀贯入试验研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 148-155.
LI Kejin, ZHANG Dewen, LI Wen, et al. Penetration Test of Cutter in Mixed Stratum with Different Rock Strengths[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(1): 148-155.
[13] 史 越, 傅鹤林, 张加兵, 等. 真三轴状态下盘形滚刀破岩特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 147-156.
SHI Yue, FU Helin, ZHANG Jiabing, et al. Rock Breaking Characteristics of Disc Hob under True Triaxial Condition[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 147-156.
[14] FANG Yong, YAO Zhigang, XU Wanghao, et al. The Performance of TBM Disc Cutter in Soft Strata: A Numerical Simulation Using the Three-Dimensional RBD-DEM Coupled Method[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104996.
[15] 占传忠. 复合地层盾构的适应性及掘进参数的关联性分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(增1): 97-104.
ZHAN Chuanzhong. Relevance Analysis of Composite Strata Shield Tunneling Adaptability and Tunneling Parameters[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(S1): 97-104.
[16] 程永亮. TBM盘形滚刀破岩最优贯入度的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 936-943.
CHENG Yongliang. Numerical Simulation on Optimal Penetration of TBM Disc Cutter′s Rock Fragmentation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 936-943.
[17] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HE Xiangfan. Research on the Disturbance Mechanism and Counter Measures of Shield Tunnel Crossing Upper-Soft Lower-Hard Stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
[18] 刘 泉. 石棉至泸定段花岗岩风化的物理力学性质与微观特征指标之间的相关性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
LIU Quan. Shimian-Luding Section Physical and Mechanical Parameters of Granite Weathering and Microscopic Study on Correla-

tions between Characteristic Index[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
[19] 刘建国. 深圳地铁盾构隧道施工技术与经验[J]. 隧道建设, 2012, 32(1): 72-87.
LIU Jianguo. Overview of Shield Tunneling in Construction of Shenzhen Metro[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(1): 72-87.

Analysis on Influence of Penetration Angle on Disc Cutter Impact Based on Three-dimensional RBD-DEM Coupling Method

XU Gongyun[1] *XU Wanghao*[1,2] *YAO Zhigang*[1] *FANG Yong*[1] *LIU Sijin*[3]
(1 Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 2 Zhejiang Hanghai Intercity Railway Co., Ltd., Jiaxing 314499; 3 China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd ., Jinan 250014)

Abstract In the soft-hard composite stratum, shield tunnelling may easily induce such problems as eccentric wear and fracture of disc cutters, so that the replacement frequency of cutter tools may increase largely. Therefore, considering the interaction between the disc cutter and strata based on RBD (rigid body dynamics)-DEM coupling method, the EDEM discrete element software is adopted to realize the passive motion of disc cutters in numerical simulation. Six working conditions with intersection angles of 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° are established to study the effect of changing penetration angles on impact of disc cutters in the soft-hard composite stratum. The results indicate that the penetration angle mainly affects the normal load on the tangential and normal planes. When the penetration angle is up to 45°, the peak load on the tangential and normal planes of the disc cutters might reach the maximum in the impact phase. When the penetration angle changes from 90° to 45°, the increase amplitude of peak normal load on normal and tangential planes might reach 18.74 times and 3.53 times, respectively. The abrupt change of normal load on normal plane is the main cause of falling off, offset and fracture of the disc cutter.

Keywords Earth pressure balance shield; RBD-DEM; Numerical simulation; Disc cutter; Penetration angle; Composite stratum

汕头湾海底隧道单洞掘进突破1 000 m

12月11日上午，世界首条设计时速350 km的单洞双线高铁海底隧道——汕头湾海底隧道矿山段完成单洞掘进1000 m大关，这是汕头湾海底隧道继两座斜井贯通后的又一重要节点工程突破。

汕头湾海底隧道矿山段进口长1 971 m，约占汕头湾海底隧道总长的20%，位于汕头市濠江区境内，由中铁十四局集团承建。隧址区共穿越3条断层破碎带，集花岗岩不均风化、岩体崩塌、表层溜塌及危岩落石、砂土液化与软土震陷等不良地质于一体。受地质构造及花岗岩差异风化影响，汕头湾海底隧道矿山段进口围岩变化频繁，每日出水可达800方以上。

针对这样的施工环境，汕汕铁路站前六标施工人员将超前地质预报、超前水平探孔及监控量测纳入工序管理，及时掌握围岩变化及支护变形情况，以调整开挖进尺及支护结构参数，优化施工工艺；同时，项目多次邀请中国工程院院士、隧道工程专家勘察隧道施工情况，针对隧道施工出现的新情况提出合理化改进意见，确保隧道结构安全、防水可靠、运营成本可控。

目前，隧道矿山段进口已穿过第一处长达70 m的F_0断层破碎带，施工抵达第二处F_1断层破碎带，成功突破千米大关，1号斜井进入正洞550 m，2号斜井进入正洞245 m，盾构段已掘进900 m。

据悉，汕汕铁路建成通车后，汕头至广州时间将缩短至1.5 h，潮汕地区与粤港澳大湾区的联系将更为紧密，对于促进粤港澳大湾区协同发展有着重要意义。

（摘自　隧道大联盟）