

贯入度对 TBM 滚刀线性切割复合岩体的影响

翟淑芳¹, 田博宁¹, 常连远², 田浩¹

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 复合地层是一种不良地质结构, TBM 在复合地层掘进时经常面临剧烈的刀盘振动和刀具磨损。为了提高复合地层中 TBM 掘进速率, 有必要研究 TBM 滚刀贯入度对破岩过程的影响。本文采用颗粒流数值模拟方法, 分析贯入度对滚刀法向力滚动力、TBM 破岩效率以及复合岩体裂纹扩展深度、裂纹破坏模式等的影响, 并采用室内滚刀线性切割实验进行验证分析, 主要得到以下结论: ①贯入度为 2.0 mm 时, 复合岩体比能最小, 滚刀破岩效率最高; ②随着贯入度的增加, 花岗岩和青砂岩中裂纹扩展深度增加, 贯入度大于 1.0 mm 时青砂岩中裂纹深度大于花岗岩; ③不同贯入度下, 花岗岩中裂纹破坏模式以拉伸破坏为主, 青砂岩则在低贯入度下以剪切破坏为主, 但随着贯入度的增加, 仍以拉伸破坏为主。数值模拟结果将室内试验中对裂纹扩展深度和破坏模式的定性分析扩展为定量计算, 对复合地层 TBM 滚刀操作参数的设置具有重要意义。

关键词: TBM; 复合岩体; 滚刀; 贯入度; 颗粒流数值模拟

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.06.006

全断面隧道掘进机 (tunnel boring machine, TBM) 作为新一代的自动化地下隧道施工机械, 具有开挖效率高、安全性好、对周围环境扰动小等优点, 被广泛应用于隧道建设中^[1-2]。TBM 掘进过程中会遇到各种不良的地质状况, 软硬复合地层是其中典型的一种。盘型滚刀作为 TBM 刀盘上破碎岩体最主要的刀具, 其贯入度 (TBM 刀盘旋转一周, 盘型滚刀切入岩石的深度) 是 TBM 掘进过程中的一个核心参数^[3], 直接影响掘进效率, 为了提高 TBM 掘进速率, 有必要研究复合地层中贯入度对 TBM 盘型滚刀力和破岩过程的影响, 优化复合地层中滚刀的操作参数^[4]。

目前, 国内外学者针对复合地层中 TBM 盘型滚刀破岩的研究主要采用两种手段^[5]: 室内物理试验和数值模拟试验。在室内试验中, 滚刀线性切割试验采用大尺寸的岩石试样和全尺寸的滚刀, 是研究 TBM 滚刀破岩的最佳方法^[6-7]。龚秋明等^[8-9]通过滚刀线性切割试验研究了滚刀切割复合岩体时滚刀力差异较大, 且随着贯入度的增加, 这种差异迅速加大; Zhou 等^[10]利用室内滚刀线性切割试验研究滚

刀在不同贯入度下切割复合岩体的受力特征、破岩效率及岩屑产生特征, 得到滚刀切割复合岩体的软硬岩石时滚刀法向力和滚动力均存在较大差异; 翟淑芳等^[11]采用滚刀线性切割试验研究双侧围压条件下滚刀切割复合岩体时, 贯入度和复合岩体倾角对破岩效率和滚刀受力的影响, 得到随着复合岩体倾角的增加, 滚刀上平均法向力和平均滚动力呈现先减小后增大的趋势。

在数值模拟试验中, 离散单元法中的颗粒离散元 (particle flow code, PFC) 基于细观非连续力学理论, 从微观结构角度研究介质的力学特征, 可有效分析滚刀作用下岩石内部的渐进式微观损伤和破坏过程^[12]。刘予会等^[13]采用 PFC^{2D} 研究不同围压下复合地层裂纹拓展机制, 得到岩层夹角为 45°、90°时破岩效率较高, 滚刀破岩以张拉破坏为主, 剪切破坏为辅; 温森等^[14]利用 PFC^{3D} 建立了滚刀破岩的三维数值模型, 通过多组模拟试验分析, 发现层理参数对比能效率的影响极小可以忽略不计, 最优刀间距和贯入度的比值跟围压和贯入度有关; 蒋明镜等^[15] PFC^{2D} 研究复合地层中单滚刀、双滚刀和三滚刀破

收稿日期: 2026-02-10; 修订日期: 2026-03-18

基金项目: 河南省科技攻关项目 (212102210228); 河南省教育厅自然科学项目 (25A560005)

作者简介: 翟淑芳 (1989—), 女, 河南郑州人, 河南工业大学副教授, 博士, 主要从事 TBM 破岩机制方面的研究工作,

E-mail: zhaishufangcq@126.com.

岩过程,将滚刀破岩过程分为加载、卸载和残余跃进三个阶段;汪平等^[16]利用 PFC^{2D} 建立复合式 TBM 中心滚刀与围压相互作用模型,得到中心滚刀的受荷规律与布置方式的关系。

综上,滚刀线性切削试验可靠性高,却存在耗材耗时、缺乏岩体内部裂纹时空演化表征结果等缺点,而离散元数值模拟可用于验证、补充并推广室内试验获得的结果和规律。采用离散元法研究 TBM 滚刀破岩的研究主要集中在不同工况下滚刀破岩过程和破岩效率的讨论,对不同贯入度下复合岩体中裂纹扩展深度、裂纹破坏模式的研究较为缺乏。本文采用室内滚刀线性切割试验和颗粒流数值模拟方法 PFC^{3D},研究贯入度对 TBM 滚刀线性切割复合岩体的影响,分析贯入度对滚刀法向力滚动力、TBM 破岩效率以及复合岩体裂纹扩展深度、裂纹破坏模式等的影响。

1 PFC^{3D} 数值模拟

1.1 模型的建立

如图 1(a)为离散元数值模拟中的复合岩体模

型,长度为 300 mm,宽度为 150 mm,高度为 150 mm,复合岩体由花岗岩和青砂岩组成;利用离散元法进行模拟分析时,首先需要对模型进行颗粒离散化,复合岩体试样中的颗粒在 1~2 mm 粒径范围内随机生成,整个试样共计八万颗粒;试样生成后,首先施加 1 MPa 的预压应力,以还原岩层在原始地应力环境中的赋存状态;随后采用颗粒分组胶结技术对离散元模型进行岩相划分,并分别赋予两相岩体对应的强度参数及变形参数,具体物理力学参数如表 1 所示。胶结结束删除模型上侧和右侧墙体,通过伺服进行应力释放,模拟真实的开挖情况。

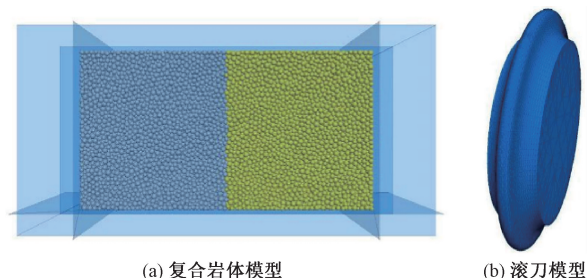


图 1 数值试验模型

Figure 1 Numerical test model

表 1 花岗岩和青砂岩基本物理力学参数^[17]

Table 1 Basic physics-mechanical parameters of granite and bluish sandstone

材料类型	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	单轴抗压强度/MPa	巴西劈裂强度/MPa
花岗岩	2.64	41.07	0.273	66	31	172	9
青砂岩	2.31	13.63	0.25	20.19	36	60.7	1.81

如图 1(b)为模拟中建立的 17 英寸盘形滚刀模型,滚刀直径为 432 mm,刀刃角为 12°,刀刃宽度 12 mm,刀尖角度 120°;模拟过程中滚刀假定为刚体不发生变形。采用以下方式进行预处理:①利用三维 CAD 软件完成滚刀轮廓的几何建模;②通过犀牛建模软件对模型进行网格重构;③将模型转换为三角网格拓扑结构导入 PFC^{3D} 软件。

数值模拟过程中,滚刀切削间距保持 80 mm,滚刀切削速度保持 80 mm/s;试验过程中设置平行和垂直于滚刀切割方向的压力为 10 MPa,这通过采用伺服原理对模型前后左右四个面的墙体施加一定的速度来实现。为提高数值计算收敛性,将滚刀侵入速度设定为 0.4 m/s,滚刀设置 5 个级别的贯入度,分别为 1.0、2.0、2.5、3.0、3.5 mm,模拟过程中通过编写 fish 函数对试验中滚刀受力状态、裂纹扩展数量及破碎颗粒体积等关键参数进行实时监测与量化分析。

1.2 接触模型和细观参数标定

在运用 PFC^{3D} 进行模拟分析时,无需定义材料的本构关系,材料的宏观力学性质主要由颗粒间接

触关系决定。平行黏结模型中的面黏结,能够较好的传递力和弯矩,该模型既能抗压又能抗拉,常用来模拟岩石、混凝土等胶结程度高、能够承受弯矩的材料^[18]。故本文采用 PFC^{3D} 程序中的平行黏结模型,模拟滚刀线性切割复合岩体时岩石裂隙细观演化特征与宏观破坏模式。

通过参数反演方法进行细观参数标定。本文通过单轴压缩和巴西劈裂试验,不断调整其有效模量、刚度、抗拉强度、内聚力,直至应力—应变曲线与试验曲线一致(如图 2),最终校准的细观参数见表 2。

1.3 数值模拟结果

如图 3(a)~(d)为滚刀贯入度为 1.0 mm 时,用 PFC^{3D} 模拟滚刀线性切割复合岩体的过程,观察到裂纹首先在滚刀下方形成,随后扩展到左右侧 1~2 cm 处,并沿着滚刀加载方向不断发展;滚刀在切割复合岩体过程中单元破坏类型包含剪切破坏和张拉破坏,在花岗岩中张拉裂纹数量占比 49.7%,剪切裂纹数量占比 50.3%,可知在花岗岩中张拉裂纹和剪切裂纹数量相当;在青砂岩中张拉裂纹数量占比

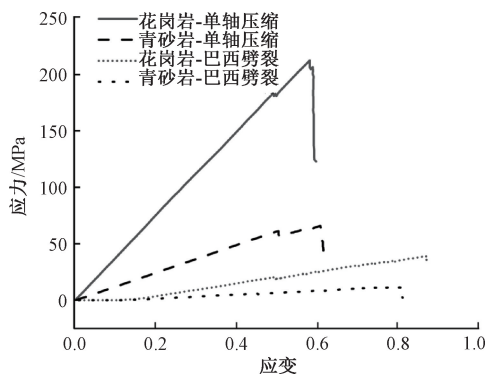


图2 参数标定曲线

Figure 2 Parameter calibration curve

表2 复合岩体细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of composite rock mass

参数类别	参数名称	花岗岩	青砂岩
模型通用参数	颗粒直径下限/mm	1	2
	颗粒直径上限/mm	1	2
	颗粒密度/(kg · m ⁻³)	2 640	2 310
	阻尼系数	0.7	0.7
线性接触参数	等效模量/GPa	25	8.5
	摩擦系数	0.2	0.5
	刚度比	1.25	1.5
平行胶结参数	等效模量/GPa	25	8.5
	刚度比	1.25	1.5
	抗拉强度/MPa	138	50
	摩擦角/(°)	25	30
	内聚力/MPa	138	50

42.3%,剪切裂纹数量占比 57.7%,可知在青砂岩中剪切裂纹数量明显高于张拉裂纹数量;花岗岩中裂纹扩展深度约为 2.5 mm,青砂岩中裂纹扩展深度约为 2 mm。

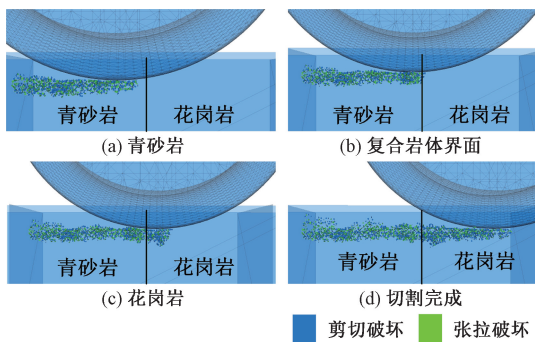


图3 PFC^{3D} 模拟滚刀贯入度为 1.0 mm 时滚刀线性切割复合岩体过程

Figure 3 Process of the linear rock-breaking test when the penetration is 1.0mm in PFC^{3D}

PFC^{3D} 模拟滚刀切割复合岩体过程中,滚刀法向力和滚动力的变化趋势如图 4(a)(b)所示,可以看出花岗岩中的法向力和滚动力均值均大于青砂

岩,花岗岩中法向力峰值约为 225 kN,滚动力峰值约为 14 kN,青砂岩中法向力峰值约为 100 kN,滚动力峰值约为 4 kN;当滚刀切割至花岗岩与青砂岩交界面处,法向力和滚动力均出现突变;与相对平稳的法向力变化曲线相比,滚动力曲线表现出更为明显的波动特征。

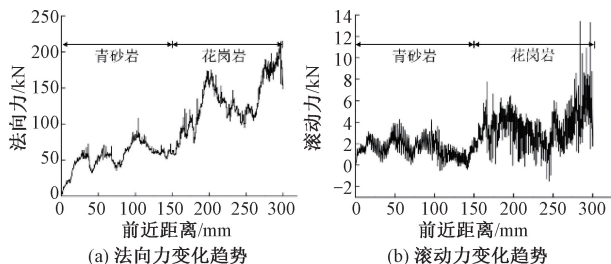


图4 PFC^{3D} 模拟过程中滚刀的法向力和滚动力

Figure 4 Normal and rolling forces of disc cutter in PFC^{3D}

2 实验验证

2.1 滚刀线性切割实验

试验在北京工业大学机械破岩平台上进行,如图 5(a)所示;复合岩体试样由北山花岗岩和重庆青砂岩组成,尺寸为 980 mm(长)× 980 mm(宽)× 600 mm(高);线性切割试验中选用 17 英寸的常截面盘形滚刀,如图 5(c)所示。试验中记录滚刀由青砂岩线性切割至花岗岩过程中,滚刀的受力状态和破岩效率。

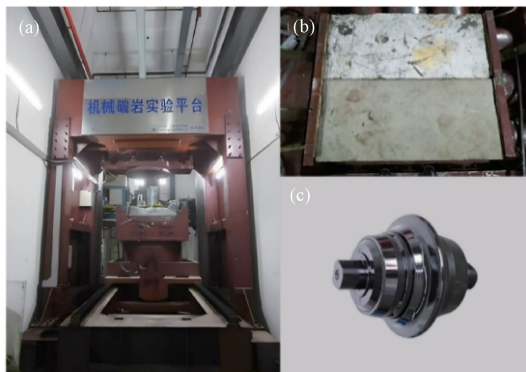


图5 试验设备、试样及刀具

Figure 5 Test equipment, specimens and cutting tool

图 6(a)为贯入度为 1.0 mm 时,盘形滚刀线性切割复合岩体时的工作状态,图 6(b)为滚刀切割后复合岩体岩面状态。试验中观察到,滚刀切割后复合岩体产生裂纹,在单一岩体中切割时滚刀无明显振动,切割至复合岩体交界面时振动明显加剧;花岗岩中产生较多岩粉,岩片相对较少,说明贯入度为 1.0 mm 时,滚刀对花岗岩的破岩效果较差,清理后花岗岩岩面平整度较好;青砂岩中

有一定的岩粉和岩片产生,说明该贯入度下滚刀对青砂岩有一定的破碎效果,偶尔产生的青砂岩岩片长度和厚度均较大,清理后青砂岩岩面偶现较大的凹坑。



(a) 滚刀线性切割复合岩体 (b) 切割后的复合岩体岩面

图6 滚刀贯入度为 1.0mm 时复合岩体滚刀线性破岩试验

Figure 6 The linear rock-breaking test of the composite rock mass by disc cutter at 1.0 mm penetration

试验过程中,有代表性的滚刀法向力和滚动力的变化趋势如图 7(a)(b)所示。可以看出,滚刀切割青砂岩时其平均法向力和滚动力均明显低于切割花岗岩。滚刀在青砂岩上切割时,滚刀法向力较小,最大值为 150 kN;滚刀在花岗岩上切割时,滚刀法向力较大,最大值可达 250 kN;滚刀切割至复合岩体交界处时,滚刀上的法向力变化较大,滚刀会出现较大幅度的振动。

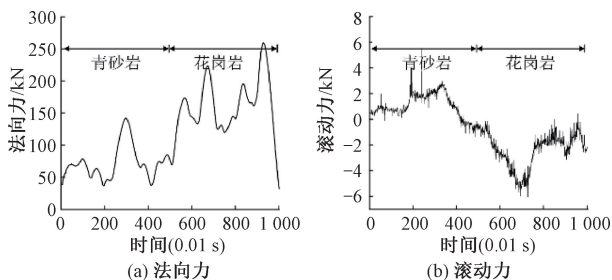


图7 滚刀贯入度为 1.0 mm 时滚刀的法向力、滚动力

Figure 7 Normal and rolling forces of disc cutter at 1.0 mm penetration

2.2 数值结果与实验结果对比分析

(1)滚刀力的分析。图 8 为滚刀线性切割复合岩体室内试验与数值模拟试验中,不同贯入度对滚刀上平均法向力与平均滚动力的影响。可以看出:①对于花岗岩和青砂岩而言,随着贯入度的增加,平均法向力逐渐增加。在相同贯入度下,滚刀切割花岗岩时的平均法向力远大于切割青砂岩。数值分析结果与室内试验结果进行对比,青砂岩中法向力平均误差约为 14.4%,花岗岩中法向力平均误差约为 5.5%,且随着贯入度的增加,误差减小,证实了数值模拟仿真的可靠性。②随着贯入度的增加,平均滚动力逐渐增加。在相同

贯入度下,滚刀切割花岗岩时的平均滚动力大于切割青砂岩,并且花岗岩的平均滚动力曲线斜率比青砂岩大,这意味着在滚刀切割复合地层时,随着贯入度的增加,花岗岩和青砂岩上的滚刀滚动力差异会增大。因此,TBM 在复合地层中掘进时,应将滚刀贯入度控制在合适范围,不宜过大,否则会导致滚刀上的力变化幅度过大,导致滚刀异常磨损,引起刀盘剧烈的振动,使复合地层中刀盘的方向难以控制,进而影响掘进速率。

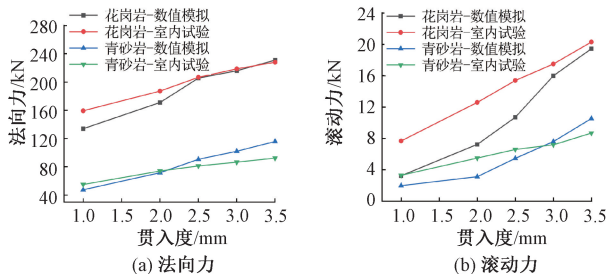


图8 滚刀法向力和滚动力的对比分析

Figure 8 Comparative analysis of normal and rolling forces of disc cutter

(2)TBM 滚刀破岩效率分析。刀具的破岩比能(SE)是指破碎单位体积的岩石所做的功^[19-20],比能越小,刀具的破岩效率越高,其计算式如下:

$$SE = F_r L / V. \quad (1)$$

式中: F_r 为平均滚动力; L 为岩体切割长度; V 为破岩过程中产生的岩渣体积。

在滚刀线性切割破碎岩体的过程中,比能主要受刀间距和贯入度的影响,图 9 给出了刀间距为 80 mm 时,随着贯入度的增加,滚刀切割复合岩体时比能的变化。可以看出:①对于花岗岩而言,当贯入度为 1.0 mm 时,比能最大,此时滚刀破岩效率最低;当贯入度增加到 2.0 mm 时,比能最小,滚刀破岩效率最高;随着贯入度的继续增加,比能增加,滚刀破岩效率反而减小。②对于青砂岩而

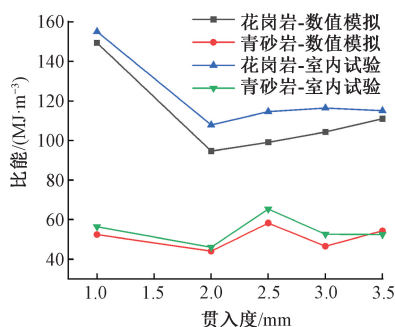


图9 贯入度对滚刀破岩效率的影响

Figure 9 Influence of penetration depth on rock-breaking efficiency of disc cutter

言,当贯入度为 2.0 mm 时,比能最小,滚刀破岩效率最高;当贯入度增加到 2.5 mm 时,比能最大,此时滚刀破岩效率最低。数值分析结果与室内试验结果进行对比,滚刀切割花岗岩时两者的比能平均误差约为 8.7%,滚刀切割青砂岩时两者的比能平均误差约为 6.1%。由此可知,所构建的 PFC^{3D} 数值模型可以较好的研究滚刀线性切割复合岩体时破岩效率。

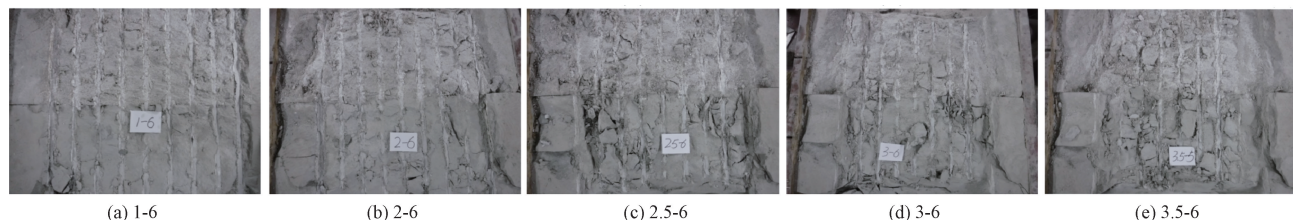


图 10 不同贯入度下复合岩体表面裂纹扩展状态

Figure 10 Crack propagation status on composite rock mass surface under different penetration depths

数值模拟试验可以准确统计裂纹的扩展深度,图 11 为 PFC^{3D} 数值模拟结果,得到随着滚刀贯入度的增加花岗岩和青砂岩中平均裂纹扩展深度的变化。可以看出:①随着滚刀贯入度的增加,青砂岩中裂纹深度逐渐增加(2.1 cm→3.3 cm→3.5 cm→3.7 cm→3.9 cm),花岗岩中裂纹深度逐渐增加(2.8 cm→3.1 cm→3.1 cm→3.4 cm→3.8 cm);②当滚刀贯入度为 1.0 mm 时,青砂岩中裂纹扩展深度小于花岗岩;当滚刀贯入度大于 1.0 mm 时,青砂岩中裂纹扩展深度均大于花岗岩。

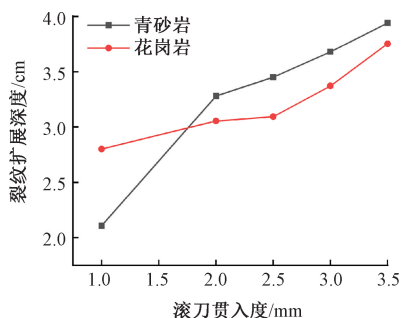


图 11 贯入度对复合岩体裂纹扩展深度的影响

Figure 11 Influence of penetration on the depth of crack propagation

3.2 裂纹破坏模式的统计

图 12 为不同滚刀贯入度下,PFC^{3D} 数值模拟线性切割复合岩体过程中内部微裂纹数量及不同种类微裂纹所占比例变化统计。由图 12(a) 可知,不同贯入度下,花岗岩中张拉裂纹总数始终大于剪切裂纹总数;随着贯入度的增大,花岗岩内部微裂隙数目逐渐增多,张拉裂纹占比逐渐增加(49.7%→52.5%→52.6%→55%→55.8%),剪切裂纹占比逐

3 贯入度对复合岩体裂纹扩展的影响

3.1 裂纹扩展深度分析

室内试验无法准确统计滚刀切割复合岩体时,岩体内部的裂纹扩展情况。如图 10 所示为不同贯入度下,岩体表面裂纹的扩展情况,可以看出随着贯入度的增加,复合岩体破裂加剧,裂纹增加,但准确统计岩体内部裂纹的扩展深度存在一定困难。

渐减小(50.3%→47.5%→47.4%→45%→44.2%)。即贯入度越大,花岗岩张拉破坏裂纹越多。

由图 12(b) 可知,随着贯入度的增大,青砂岩内部微裂隙数目逐渐增多,张拉裂纹占比逐渐增加(42.3%→48.1%→51%→51.2%→51.7%),剪切裂纹占比逐渐减小(57.7%→51.9%→49%→48.8%→48.3%)。当贯入度为 1.0, 2.0 mm 时,青砂岩中剪切裂纹数量大于张拉裂纹,随着贯入度的增加,青砂岩中张拉裂纹数量超越剪切裂纹。

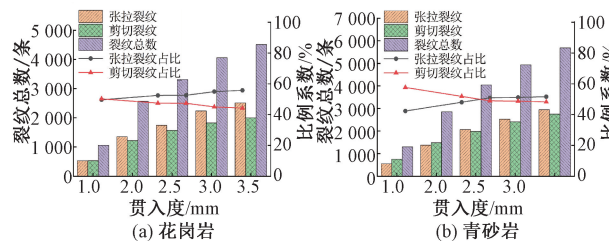


图 12 PFC^{3D} 数值模拟过程中复合岩体内部微裂纹统计

Figure 12 Statistics of internal microcracks in PFC^{3D}

由此可得,在不同贯入度下,花岗岩均以拉伸破坏为主导,剪切破坏为辅助;青砂岩则在低贯入度下以剪切破坏为主导,以拉伸破坏为辅助,但随着贯入度的增加,仍以拉伸破坏为主。裂纹破坏模式的统计反映了岩体细观损伤累积规律,量化了滚刀贯入度对破岩效果的影响,对指导 TBM 在复合地层中掘进具有重要意义。

4 结论

本文通过离散元 PFC^{3D} 数值模拟,研究了滚刀贯入度对复合岩体破岩的影响,得到贯入度对 TBM

滚刀线性切割复合岩体时刀具破岩力、破岩效率、裂纹扩展深度、裂纹破坏模式的影响,定量分析了复合岩体裂纹扩展深度和扩展模式,主要得到以下结论:

(1)滚刀切割复合岩体时,随着贯入度的增加,花岗岩和青砂岩中的滚刀法向力、滚动力均增加,花岗岩中的平均法向力和滚动力均大于青砂岩,滚刀切割至复合岩体交界处,法向力和滚动力均出现突变;

(2)随着贯入度的增加,花岗岩和青砂岩内部微裂隙数目逐渐增多,裂纹扩展深度增加,贯入度大于 1.0 mm 时青砂岩中裂纹深度大于花岗岩,裂纹深度的准确统计有利于评估滚刀贯入度对复合岩体的影响;

(3)TBM 在由花岗岩和青砂岩组成的复合地层中掘进时,应将滚刀贯入度设置在 2.0 mm 附近,以提高破岩效果和施工效率;

(4)在不同贯入度下,花岗岩均以拉伸破坏为主导,剪切破坏为辅助;青砂岩则在低贯入度下以剪切破坏为主导,以拉伸破坏为辅助,但随着贯入度的增加,仍以拉伸破坏为主。裂纹破坏模式的统计反映了岩体细观损伤累积规律,量化了滚刀贯入度对破岩效果的影响,对指导 TBM 在复合地层中掘进具有重要意义。

参考文献:

[1] Qian Qihu, Li Chaofu, Fu Deming. Spreading the use of TBM, promoting development of underground space in China[J]. *Construction Machinery*, 2002(5): 28-35. [钱七虎, 李朝甫, 傅德明. 全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望[J]. *建筑机械*, 2002(5): 28-35.]

[2] Zhai Shufang, Yue Qichao, Zhou Xiaoxiong, et al. Optimal penetration analysis of disc cutter under different cutter-spacings based on characteristic particle size [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2025, 21(4): 1306-1312. [翟淑芳, 岳奇超, 周小雄, 等. 基于特征粒径的不同刀间距下滚刀最优贯入度分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2025, 21(4): 1306-1312.]

[3] 范维唐. 跨世纪煤炭工业新技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.

[4] Ji Guodong, Fu Boyi, Zhang Huijian, et al. Study on the influence law of TBM disc cutter penetration on the rock-breaking efficiency[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(12): 4755-4768. [冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(12): 4755-4768.]

[5] Lian Jiye, Wang Xuxiang, Zhu Haiping, et al. Breaking rock mechanism of shield machine with double hobs in composite stratum[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(13): 5340-5347. [连继业, 王绪湘, 朱海平, 等. 盾构机双滚刀在复合地层中破岩机理[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(13): 5340-5347.]

[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): 238-246.

[7] Cho J W, Jeon S, Jeong H Y, et al. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 35: 37-54.

[8] Gong Qiuming, Wu Fan, Yin Lijun. Experimental study on the rock mixed ground under disc cutter by linear cutting[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2019, 1(2): 67-73. [龚秋明, 吴帆, 殷丽君. 岩石复合地层滚刀线性切割破岩试验研究[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(2): 67-73.]

[9] Gong Qiuming, Wu Fan, Ma Shuai, et al. Effect of cutter tip type parameters on rock-breaking by linear cutting experiments [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(3): 1098-1108. [龚秋明, 吴帆, 马帅, 等. 刃型参数对滚刀破岩影响的线性切割试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(3): 1098-1108.]

[10] Zhou Xiaoping, Zhai Shufang, Bi Jing. Two-dimensional numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutting tools in mixed-face ground[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 06018004.

[11] Zhai Shufang, Du Hongkun, Tian Hao, et al. Numerical simulation of TBM three rolling cutters cooperative linear and rotary cutting rock breaking fragmentation[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2025, 46(6): 118-126. [翟淑芳, 杜红坤, 田浩, 等. TBM 三滚刀协同线性切割和回转切割破岩数值模拟[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2025, 46(6): 118-126.]

[12] Zhang Zhaohuang, Lan Yue, Han Jialin, et al. Numerical simulation and analysis of 3D cutter spacing for disc cutter[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2024, 52(6): 9-16. [张照煌, 兰越, 韩佳霖, 等. 盘形滚刀三维刀间距数值模拟与分析[J]. *矿山机械*, 2024, 52(6): 9-16.]

[13] Liu Yuhui, Wen Sen, Sheng Guilin. Numerical study of interaction mechanism between TBM cutters and surrounding rock in composite rock strata[J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(13): 1514-1519. [刘予会, 温森,

- 盛桂琳. 复合岩层中 TBM 滚刀与围岩相互作用机理的数值模拟研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(13): 1514-1519.]
- [14] Wen Sen, Gao Mengmeng. Numerical study of confining pressure influencing on efficiency of rock fragmentation by disc cutter in mixed rock strata[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(19): 2195-2202. [温森, 高萌萌. 围压作用下复合岩层滚刀破岩效率数值模拟[J]. 中国科技论文, 2018, 13(19): 2195-2202.]
- [15] Jiang Mingjing, Fu Cheng, Wang Huaning, 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(S1): 120-126. [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.]
- [16] Wang Ping, Zhang Kangjian, Li Jin, et al. Research on arrangement form and load law of center cutter of compound TBM cutterhead based on Chongqing rock stratum [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 123-129. [汪平, 张康健, 李进, 等. 基于重庆岩层的复合式 TBM 刀盘中心滚刀布置形式及受荷规律研究 [J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 123-129.]
- [17] Zhai Shufang. Rock fragmentation by TBM cutters in deep complicated formation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. [翟淑芳. 深部复杂地层的 TBM 滚刀破岩机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.]
- [18] Zhao Guoyan, Dai Bing, Ma Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1491-1498. [赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1491-1498.]
- [19] Yan Tie, Li Wei, Bi Xueliang, et al. Fractal analysis of energy consumption of rock fragmentation in rotary drilling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3649-3654. [闫铁, 李玮, 毕雪亮, 等. 旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3649-3654.]
- [20] Zhang Jiale, Chu Yuelang, Yang Ming, et al. Research on multi-objective optimization design and rock breaking performance of disc cutter on TBM cutterhead in complex strata of coal mine[J]. Mining & Processing Equipment, 2025, 53(12): 6-14. [张家乐, 初月朗, 杨明, 等. 煤矿复杂地层 TBM 刀盘滚刀多目标优化设计与破岩性能研究[J]. 矿山机械, 2025, 53(12): 6-14.]

Effect of Penetration Rate on Linear Cutting of Composite Rock Masses by TBM Disc Cutters

ZHAI Shufang¹, TIAN Boning¹, CHANG Lianyuan², TIAN Hao¹

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: Composite strata are a type of adverse geological structure, and Tunnel Boring Machines often face significant cutterhead vibrations and tool wear during excavation in such strata. In order to increase the TBM tunneling rate in composite strata, it is necessary to study the influence of the TBM cutter penetration depth in the rock breaking process. This study investigated the effect of roller cutter penetration on the rock-breaking force, rock-breaking efficiency, crack propagation depth, and failure modes of cutters in composite rock masses through discrete element numerical simulations. Moreover, the linear cutting experiment of the roller was conducted for verification and analysis. The main conclusions drawn from the study are as follows: ① At a penetration depth of 2.0 mm, the specific energy of the composite rock mass is minimal, and the roller cutter's rock-breaking efficiency is the highest. ② With the increase in penetration, the crack propagation depth increases in both granite and bluish sandstone. When the penetration is greater than 1.0 mm, the crack depth in sandstone is greater than that in granite. ③ At different penetration depths, the crack failure mode in granite is predominantly tensile failure, while in sandstone, shear failure predominates at low penetration depths. However, as the penetration increases, tensile failure becomes the dominant mode. The numerical simulation results extend the qualitative analysis of crack propagation depth and failure modes from the laboratory experiments to quantitative calculations, which is of significant importance for the setting of TBM roller cutter operating parameters in composite strata.

Keywords: TBM; Composite rock mass; Disc cutter; Penetration depth; particle flow numerical simulation