

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.06.016

围压作用下 TBM 双刃中心滚刀破岩特性研究

张旭辉¹, 夏毅敏¹, 刘杰², 谭青¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为了研究不同围压作用下双刃中心滚刀破岩规律,运用颗粒离散元建立其破岩数值模型,分析不同围压与刀间距对双刃中心滚刀破岩过程中裂纹扩展、比能耗等规律的影响. 研究表明:双刃中心滚刀侵入破岩时,围压增加会抑制裂纹沿岩体垂直方向扩展. 刀间距不同,围压增加对双刃之间的裂纹扩展影响不同;岩石破碎存在三种破碎模式且刀间距适中时,围压增加会促进破碎模式转变;存在最优刀间距使比能耗最小且最优刀间距随围压增加而增加;实验观测不同围压下双刃中心滚刀破岩过程裂纹扩展、破碎模式转变规律与数值模拟结果具有很好的一致性.

关 键 词: 双刃中心滚刀;围压;刀间距;裂纹;比能耗

中图分类号: TP 391.9; U 455.31 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)06-0839-06

Study on Characteristics of Breaking Rock by Double Edge Central Disc Cutter Under Confining Pressure

ZHANG Xu-hui¹, XIA Yi-min¹, LIU Jie², TAN Qing¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. College of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.
Corresponding author: XIA Yi-min, E-mail: xiaymj@csu.edu.cn)

Abstract: In order to study the law of rock-breaking by double edge central disc cutter under different confining pressure, a numerical simulation model was established based on particle discrete element. The change laws of crack propagation and specific energy were analyzed. The results show that, as the double edge central disc cutter invades into the rock, the crack propagation along the vertical direction will be constrained with the increase of confining pressure. The influence of confining pressure on the crack propagation is different between the two cutter edge when the cutter spacing is different. There exists three kinds of breaking modes as the confining pressure and cutter spacing change. The increase of confining pressure will change the breaking mode when cutter spacing is moderate. There exists an optimal cutter spacing and the optimal cutter spacing tends to increase with the increase of confining pressure. The experimental results show that the double edge central disc cutter invaded into rock under different confining pressure is in good agreement with the simulation results in the effect of crack propagation and the change of breaking mode.

Key words: double edge central disc cutter; confining pressure; cutter spacing; crack; specific energy

全断面隧道掘进机(TBM)作为地下空间开挖的主要工具,由于掘进的安全性、高效性、低污染性等众多优点广泛应用于我国隧道掘进开挖. TBM通过滚刀与掌子面相互作用,促进岩石发生破坏,滚刀破岩效果的优劣直接影响TBM掘进效率以及掘进可靠性. 关于TBM滚刀破岩已有许多研究成果. Gertsch等^[1]研究了滚刀线性切割岩石的特点,分析了切深和刀间距对滚刀所受三

收稿日期: 2016-04-20
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB035401); 国家自然科学基金资助项目(51475478, 51274252); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016zzts043); 湖南省研究生科研创新资助项目(CX2017B048).
作者简介: 张旭辉(1989-),男,湖南株洲人,中南大学博士研究生; 夏毅敏(1967-),男,江西吉安人,中南大学教授.

向力变化规律. Cho 等^[2-3]利用线性切割试验台开展了滚刀切割不同岩石的破岩实验,得到了不同岩石的最优刀间距,并且利用有限元法对其进行数值模拟,与实验结果十分相近. 王召迁等^[4]利用线性切割试验台研究了切深、切削速度以及刀间距对滚刀破岩受力以及能耗等变化规律,获得了最优切深以及最优切削速度. 夏毅敏等^[5]采用自主研发的回转切割试验台开展了不同切深以及不同刀间距下的滚刀切削实验并获得了滚刀受力变化规律. 霍军周等^[6]采用有限元法开展了不同模式下以及不同切削顺序下的 TBM 滚刀破岩规律研究,确定了最优刀间距以及顺次切削角度. 刘建琴等^[7]采用有限元法研究了切深以及刀间距对滚刀回转破岩过程中的受力影响规律,并基于比能耗指标确定了最优刀间距和最优相位角.

上述研究成果对于揭示滚刀破岩机理以及指导滚刀设计、布置具有很好的参考作用. 依据安装位置,滚刀分为中心滚刀、正滚刀和边缘滚刀^[8],目前正滚刀和边缘滚刀主要以单刃滚刀居多,而中心滚刀往往以双刃甚至多刃滚刀为主,双刃相比于单刃,可以在有限的中心安装区域有更多刀刃且单次破岩量更多. 上述研究几乎均集中于单刃正滚刀破岩研究,而关于双刃中心滚刀破岩研究鲜见报道. 另外,TBM 滚刀破岩过程中往往遭遇复杂地层^[9],如围压、渗流水以及复杂节理等,当处于这些复杂地层时,滚刀破岩特性也存在差异,具体表现出滚刀破岩效率低、刀圈消耗量大等地质不适应性. 其中,围压是 TBM 滚刀破岩过程中常见的地质条件,而现有滚刀破岩研究往往忽视围压.

本文借助于颗粒离散元方法(PFC2D),在考虑围压这一地质条件的基础下,建立 TBM 双刃中心滚刀破岩模型,模拟不同围压条件下双刃中心滚刀侵入破岩过程,并通过围压作用下双刃中心滚刀侵入破岩实验进行观测验证,为针对存在围压地质环境作用下的 TBM 双刃中心滚刀设计及其布置提供参考.

1 双刃中心滚刀破岩数值计算模型

1.1 岩石材料的宏细观参数确定

TBM 所掘进地层主要以硬岩为主,所研究的硬岩为常见的花岗岩,其宏观力学参数见表 1.

颗粒离散元模拟方法在模拟真实的岩石时一般要对其进行标定,标定过程主要有单轴压缩以及巴西劈裂等数值实验,Moon 等^[10]根据上述方法标定得到了不同岩石的细观力学参数. 本文在

上述基础上,对表 1 中所对应的花岗岩进行了标定,得到其在颗粒离散元中的细观参数见表 2. 选用接触黏结模型来模拟颗粒之间的接触关系.

表 1 岩石试样的宏观力学参数
Table 1 Macro mechanical parameters of the rock specimen

密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比
2 700	40	100	15	0. 18

表 2 细观力学参数
Table 2 Micro-mechanical parameters

颗粒密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	法向强度 /MPa	切向强度 /MPa	法向刚度 /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度 /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
3 375	87. 5	87. 5	12×10^{10}	$4. 8\times10^{10}$

1.2 双刃中心滚刀破岩数值模型

真实滚刀破岩为三维滚动破岩过程,文献[10-12]将其简化为滚刀二维侵入破岩过程,并通过研究表明该方法是合理可行的. 在上述基础上,建立如图 1 所示的双刃中心滚刀在不同围压下侵入破岩数值模型. 岩石试样按表 2 中细观参数产生,岩石的尺寸为 300 mm×160 mm,岩石两侧箭头为所加围压,岩石的上表面为自由面. 滚刀破岩主要由刀圈主导,数值模拟中只将双刃中心滚刀的刀圈表示出来,如图 1 所示,两刀刃尺寸一致,刀宽为 10 mm,刀刃角为 20°,刀刃上的过渡圆弧半径为 4 mm,定义两刀刃中心之间的距离为刀间距(S). 根据 TBM 真实的掘进地层中可能出现的围压值,设定岩石两侧的围压分别为 1, 5, 10, 15, 20, 25 MPa,刀间距分别为 60, 70, 80, 90, 100 mm,设定侵深为 10 mm,模拟双刃中心滚刀在不同围压与刀间距下的侵入破岩过程.

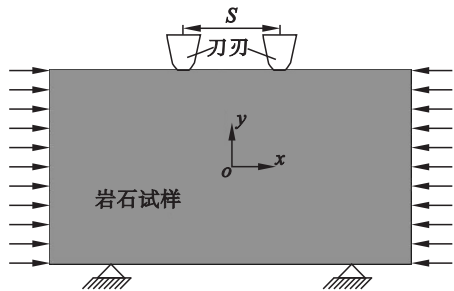


图 1 滚刀破岩数值模型
Fig. 1 Numerical model of breaking rock by disc cutters

2 数值计算结果分析

2.1 裂纹扩展规律

图 2 所示为双刃中心滚刀侵入岩体裂纹扩展状态图(限于篇幅,只列出围压为 1, 10, 20 MPa,

刀间距为 60,80,100 mm 的破岩状态图). 对比各子图可知,当刀间距一定,围压值较小时(1~5 MPa),双滚刀下的裂纹更倾向于岩体垂直方向,深入岩体内部. 随围压增大,裂纹沿垂直方向扩展受到抑制,如图 2a~2c 所示.

依据 Erdogan 等^[13-14]理论获得垂直方向裂纹的扩展判据见式(1)和式(2),其中 σ 为围压; σ_{II} 为远场应力; K_{Ic} 为岩体材料的断裂韧性; α 为常数. 由两式可知,当围压增加后,垂直方向的裂纹尖端应力强度因子 K_I 减小,使得式(2)不再成立,即围压增加后会抑制垂直方向裂纹扩展,与上述数值分析结果一致.

$$K_I = (\sigma_{II} - \sigma) \sqrt{\pi(\sigma_{II} - \sigma)} \alpha, \tag{1}$$

$$K_I \geq K_{Ic}. \tag{2}$$

无论何种围压,刀间距较小时(小于70 mm),双刃之间的裂纹容易贯通,刀刃之间的岩脊容易

被剥落,但随围压增加双刃之间的裂纹贯穿更加剧烈,双刃之间的岩石发生过度破碎. 如图 2a~2c 所示,双刃之间的裂纹均发生贯穿,但围压为 20 MPa 比围压为 10 MPa 时双刃之间的裂纹扩展更剧烈;当刀间距适中时(80 mm 左右),围压小于 5 MPa,双刃之间的裂纹无法贯通,存在岩脊,而当围压增加到 20 MPa 后,双刃之间的裂纹贯通,将双刃之间的岩脊剥掉,如图 2d~2f 所示,这说明当刀间距适中时,随围压的增加,双刃之间的裂纹扩展能从未贯通到贯通并促使岩脊剥落;刀间距过大时(大于 90 mm),双刃之间几乎无协同作用,即使围压增加也不能促使双刃之间的裂纹贯穿,如图 2g~2i 所示,此时刀间距为 100 mm,发现三种围压情况下,双刃之间的裂纹均未贯穿. 说明当刀间距增加到一定程度后,围压的增加不能起到促使裂纹贯穿进而剥落岩脊的效果.

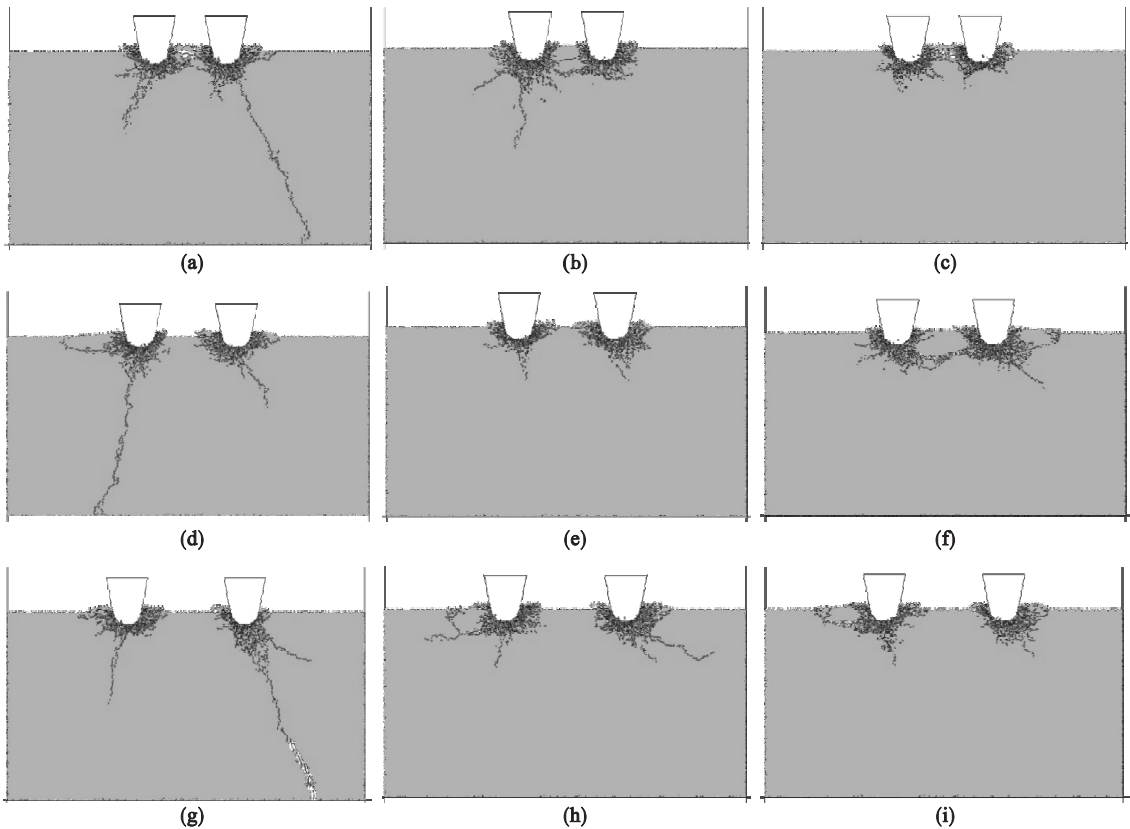


图2 不同围压和不同刀间距下的破岩效果图

Fig. 2 State diagram of breaking rock under different confining pressure and cutting spacing

(a)一刀间距=60 mm,围压=1 MPa;(b)一刀间距=60 mm,围压=10 MPa;(c)一刀间距=60 mm,围压=20 MPa;
(d)一刀间距=80 mm,围压=1 MPa;(e)一刀间距=80 mm,围压=10 MPa;(f)一刀间距=80 mm,围压=20 MPa;
(g)一刀间距=100 mm,围压=1 MPa;(h)一刀间距=100 mm,围压=10 MPa;(i)一刀间距=100 mm,围压=20 MPa.

2.2 破碎模式转变规律

通过对上述双刃中心滚刀破岩状态图观察可以归纳出三种经典的破碎模式. 图 3a 为过度破碎模式(破碎模式 a),该破碎模式下双刃之间的岩脊发生过度破碎,具体表现为破碎块度细小,碎渣

数量多;图 3b 为适度破碎模式(破碎模式 b),双刃之间的岩脊恰好被剥落,形成较大的破碎块,具体表现为破碎块度较大,碎渣数量少;图 3c 为无协同破碎模式(破碎模式 c),该破碎模式下双刃之间的裂纹未贯穿,双刃几乎无协同作用. 应该说

明的是破碎模式都是相对的,如在区分破碎模式 a 和破碎模式 b 时,只观察中间是否形成较为完整的破碎块,如果有较大的破碎块则定义为破碎模式 b. 通过对不同围压和不同刀间距下的破岩效果状态进行观察和统计得到不同围压与刀间距下的破碎模式(表 3).

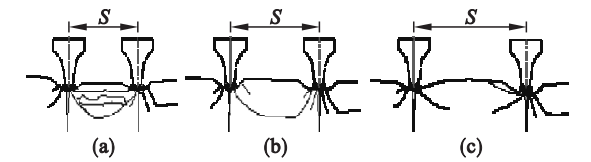


图 3 三种破碎模式

Fig. 3 Three kinds of breaking modes

(a)—过度破碎模式;(b)—适度破碎模式;
(c)—无协同破碎模式.

分析表 3 可知,当刀间距为 60 mm 时,无论何种围压均为破碎模式 a,即刀间距过小,双刃之间的岩石始终发生过度破碎. 当刀间距为 100 mm 时,无论何种围压均为破碎模式 c,即刀间距过大,双刃之间无协同作用,类似于单刃滚刀破岩. 当刀间距在 70~90 mm 之间时,围压对岩石的破碎模式影响明显,破碎模式会发生转变.

表 3 不同围压和刀间距下的破碎模式					
Table 3 Breaking modes with different confining pressure and cutting spacing					
围压 /MPa	刀间距/mm				
	60	70	80	90	100
1	a	b	c	c	c
5	a	b	c	c	c
10	a	b	c	c	c
15	a	a	b	c	c
20	a	a	b	c	c
25	a	a	b	b	c

2.3 破碎块度分布特征

破碎块度是岩石破碎的重要指标之一,块度过小破岩效率低,块度过大则不利于排碴. 根据仿真结果分析双刃相互作用后产生的最大破碎块面积(双刃之间无破碎块形成则认为其产生的破碎块度为 0),其分布特征如图 4 所示. 当围压一定时,破碎块度随刀间距增加呈先增加后减小的趋势,整体上在刀间距为 70~80 mm 时取得最大块度值. 当刀间距一定时,刀间距在 60~70 mm 时,随围压增加破碎块度整体上呈减小趋势. 而当刀间距在 70~90 mm 时,破碎块度随围压变化呈现一定的波动性. 当刀间距超过 100 mm 后,破碎块度不随围压改变,基本为 0.

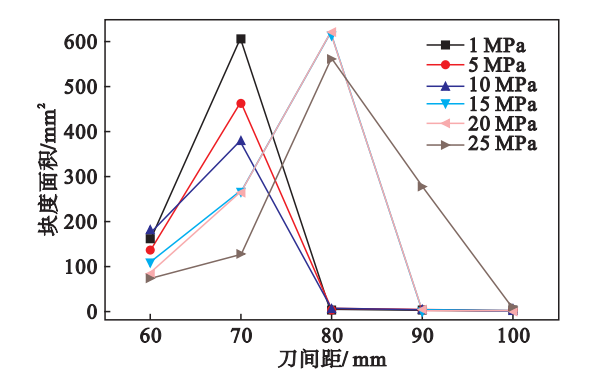


图 4 不同围压和刀间距下的块度情况
Fig. 4 Rock chip size under different confining pressure and cutting spacing

2.4 破岩效率规律

滚刀的破岩效率一般用破岩比能耗来表征,比能耗是指单位体积岩石发生破碎所消耗的能量,比能耗越大则破岩效率越低,其表达式为

$$E = W/V = 2FL/V . \tag{3}$$

其中:W 为双刃中心滚刀破岩所消耗的能量;F 为两刃所受的 Y 向平均力;L 为贯入度;V 为破碎体积, $V = St$, S 表示破碎面积之和, t 为单位厚度.

将双刃中心滚刀破岩结果进行统计,按照式 (3) 得到不同工况下的比能耗并对数据点进行拟合得到关系图 5. 对比各曲线可知,当刀间距在 60 或者 100 mm 时,随围压增加双刃中心滚刀破岩比能耗呈递增趋势,而当刀间距在 70~90 mm 范围内时,随围压增加双刃中心滚刀破岩比能耗呈现一定的波动性.

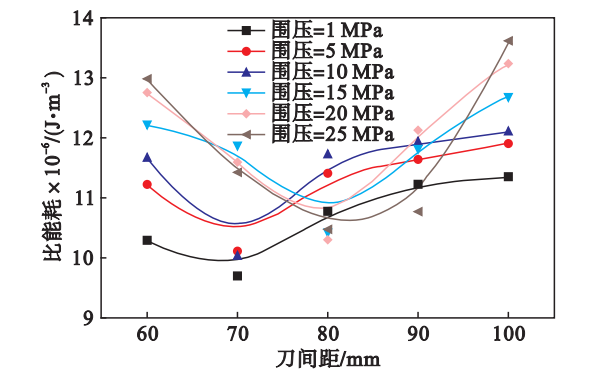


图 5 不同围压和刀间距下的比能耗情况
Fig. 5 Specific energy conditions under different confining pressure and cutting spacing

当围压一定,随刀间距增加,破岩比能耗呈先减小后递增的趋势,即存在一个最优刀间距使双刃中心滚刀破岩比能耗最小,破岩效率最高. 这主要是因为当刀间距过小时,双刃之间的裂纹过度破碎,而刀间距过大时,双刃之间的裂纹无法贯通,无协同破岩效果,导致破岩效率降低,因此刀间距不宜过大也不宜过小,存在最优刀间距使得

破岩效率最高. 另外, 随围压增加, 最优刀间距呈增大趋势. 当围压为 1 ~ 10 MPa 时, 最优刀间距在 70 mm 附近; 当围压增加到 15 ~ 20 MPa 时, 最优刀间距在 80 mm 附近; 当围压为 25 MPa 时, 最优刀间距在 85 mm 附近.

2.5 破碎模式、块度与比能耗之间的关联

通过上述分析可知, 不同围压与刀间距作用下的双刃中心滚刀破岩中对应的破碎模式、块度与比能耗之间存在一定的对应关系. 结合表 3 中的破碎模式分布规律以及图 4 中的块度分布规律可知, 破碎模式 b 相比另外两种破碎模式, 其对应的块度一般要大. 对比表 3 和图 5 可以发现, 破碎模式 b 对应的比能耗一般最小. 为此, 可以通过观察 TBM 掘进排渣时岩石破碎块度的相对大小判断 TBM 掘进效率的高低及刀具布置的合理性.

3 实验观测

利用中南大学岩石剪切流变仪开展双刃中心滚刀破岩实验, 图 6a 为侵入破岩所用的相似双刃中心滚刀, 其刀刃参数与数值模拟中的刀刃参数一致, 刀间距为 70 mm. 剪切流变仪由加载装置和加压装置组成, 如图 6b 和 6c 所示, 加载装置上安装双刃中心滚刀. 实验操作如下: 通过控制加压装置, 使得岩板两侧增加到相应设定围压后, 将加压装置推入加载装置下方, 然后控制加载装置, 使得双刃中心滚刀缓慢侵入岩石, 图 6d 为侵入破岩后的效果图. 岩石宏观力学参数见表 1, 其尺寸为 300 mm × 150 mm × 75 mm.

3.1 裂纹扩展分析

不同围压下的双刃中心滚刀破岩状态图如图 7 所示, 当围压为 1 MPa 时有明显的长裂纹, 该裂纹几乎延伸到岩石底部, 如图 7a 所示. 而当围压增加后岩体内部很难发现几乎贯穿岩体的长裂纹, 如图 7c, 7d 所示. 对比图 8 中刀间距为 70 mm 不同围压下的数值模拟结果可知, 同样在围压为 1 MPa 时出现长裂纹, 当围压增加后, 垂直方向的裂纹长度变短, 即实验和仿真得到关于围压较小时裂纹易沿垂直方向扩展, 而围压增加会抑制裂纹沿岩体内部垂直方向扩展的结论一致.

3.2 破碎模式转变分析

图 9 为不同围压下双刃中心滚刀侵入破岩后对应的破碎状态图, 随围压的增加双刃之间的岩脊越来越小直到最后被剥落, 这说明围压的增加有利于岩脊的剥落, 改变了岩石的破碎模式, 如图 9c 和 9d 所示, 当围压由 15 MPa 增加到 20 MPa

后, 由破碎模式 c 转变为破碎模式 b. 上述实验现象表明当刀间距合适时, 围压增加会加剧双刃之间的岩石破坏, 进而促使岩脊被剥落且破碎模式发生转变, 这与 2.2 节分析所得的结论一致.

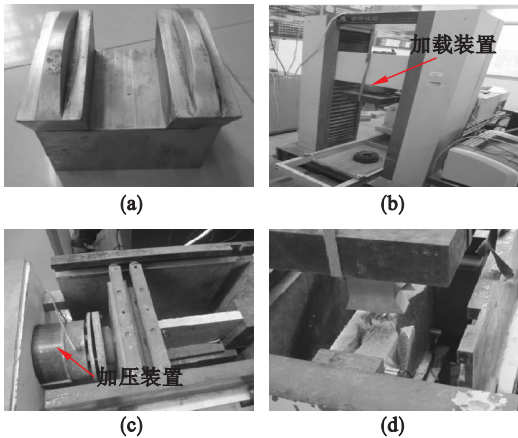


图 6 实验设备介绍
Fig. 6 Introduction of laboratory equipment
(a)—双刃滚刀刀头; (b)—加载装置;
(c)—加压装置; (d)—破碎装置.

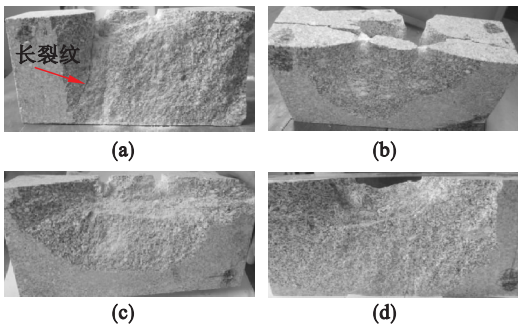


图 7 不同围压下裂纹扩展实验图
Fig. 7 Experimental results of crack propagation under different confining pressures
(a)—1 MPa; (b)—5 MPa; (c)—15 MPa; (d)—20 MPa.

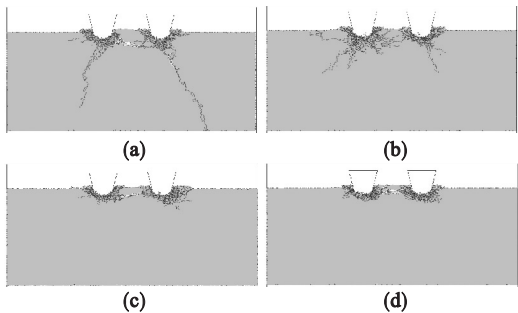


图 8 不同围压下裂纹扩展模拟图
Fig. 8 Simulation results of crack propagation under different confining pressures
(a)—1 MPa; (b)—5 MPa; (c)—15 MPa; (d)—20 MPa.

该实验与二维数值仿真存在一定的区别, 实验中岩石前后两面为临空面, 有利于裂纹扩展, 因

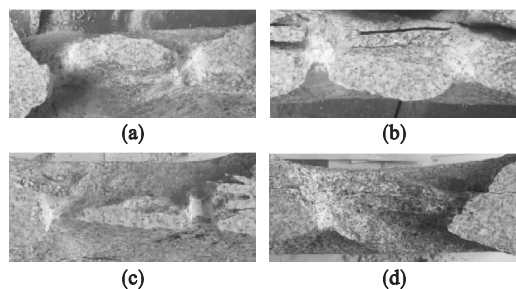


图 9 不同围压下岩脊破碎情况

Fig. 9 Rock ridge breaking under different confining pressure

(a)—1 MPa; (b)—5 MPa; (c)—15 MPa; (d)—20 MPa.

此围压对中间裂纹扩展会有影响,在数值模拟中当刀间距为 70 mm 时,上述不同围压情况下双刃之间的岩脊都被剥落甚至过度破碎,而在实验时围压达到 20 MPa 后才被剥落,这主要是由岩石前后两临空面引起的,但围压对滚刀破岩这一影响因素不会因为临空面的存在而消失,只是削弱了效果,因此通过该实验依然可以观测到围压对双刃中心滚刀破岩过程中裂纹扩展以及破碎模式转变规律的影响。

4 结 论

1) 双刃中心滚刀侵入破岩过程中,围压较小有利于裂纹沿垂直方向扩展,随围压增加裂纹沿垂直方向扩展受到抑制. 刀间距小于 70 mm 时,双刃之间的裂纹随围压增加贯穿程度更加剧烈. 刀间距在 80 mm 附近时,随围压增加,双刃之间的裂纹扩展从未贯通到贯通. 刀间距大于 90 mm 时,双刃之间的裂纹随围压增加仍无法贯通.

2) 不同围压和刀间距下的双刃中心滚刀破岩存在三种经典的破碎模式:过度破碎模式、适度破碎模式、无协同破碎模式.

3) 破碎块度随刀间距增加而先增加后减小,整体在刀间距为 70 ~ 80 mm 时取得最大值,在该刀间距以内破碎块度随围压增加呈现波动.

4) 比能耗随刀间距增加先减小后增大,存在最优刀间距,且随围压增加最优刀间距呈递增趋势.

5) 不同围压下双刃中心滚刀侵入破岩实验验证了数值模拟中围压对裂纹扩展、破碎模式转变规律的影响,说明数值模拟结果可靠.

参考文献:

[1] 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.

[2] Cho J, Jeon S, Yu S, 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.

[3] Cho J, Jeon S, Jeong H, 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.

[4] 王召迁, 王吉业, 张志敏, 等. 盘形滚刀破岩力影响因素试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(7): 1015 – 1018.

(Wang Zhao-qian, Wang Ji-ye, Zhang Zhi-min, et al. Experimental study on influencing factors of disc cutter performance[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2014, 35(7): 1015 – 1018.)

[5] Xia Y M, Ouyang T, Zhang X M, et al. Mechanical model of breaking rock and force characteristic of disc cutter [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(7): 1846 – 1852.

[6] 霍军周, 杨静, 孙伟, 等. 不同模式下 TBM 刀群三维回转切削仿真与优化设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(11): 1403 – 1408.

(Huo Jun-zhou, Yang Jing, Sun Wei, et al. Simulation and optimization design of three-dimensional rotating cutting action of TBM cutter group with different modes[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(11): 1403 – 1408.)

[7] 刘建琴, 刘蒙蒙, 郭伟. 硬岩掘进机盘形滚刀回转破岩仿真研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(9): 199 – 205.

(Liu Jian-qin, Liu Meng-meng, Guo Wei. Research on the simulation of cutting rock rotary by hard rock tunnel boring machine disc cutters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(9): 199 – 205.)

[8] Geng Q, Wei Z, Meng H, et al. An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 52: 182 – 191.

[9] Farrokh E, Rostami J. Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 436 – 446.

[10] Moon T, Oh J. A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 837 – 849.

[11] Innaurato N, Oggeri C, Oreste P P, et al. Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(5): 429 – 451.

[12] Liu J, Cao P, Du C, et al. Effects of discontinuities on penetration of TBM cutters [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(9): 3624 – 3632.

[13] Erdogan F, Sih G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1963, 85(4): 519 – 525.

[14] Irwin G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate [J]. *SPIE Milestone Series*, 1997, 137: 167 – 170.