

节理倾角和间距对 TBM 双刃盘形滚刀破岩效率的影响

曹平¹, 林奇斌¹, 李凯辉^{1,2}, 韩东亚^{1,2}

- (1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 香港理工大学 土木与环境工程系, 中国 香港, 999077)

摘要: 通过实验研究不同节理倾角和间距对 TBM 双刃滚刀破岩的影响效果。实验采用预制节理水泥砂浆试件模拟节理岩体, 节理面与侵入力方向夹角 α 分别为 0° , 30° , 60° 和 90° , 节理面间距分别为 20, 30, 40 和 50 mm, 采集整个加载过程中滚刀的侵入深度和侵入力, 并采用相机进行实时拍摄, 获得试件表面破坏的发展过程以及最终破坏形态。研究表明: 节理岩体存在 3 种基本破碎模式, 主要与节理倾角有关; 相邻滚刀的协同破岩作用导致滚刀间岩体产生贯通裂纹, 形成片状岩碴; 当节理倾角为 60° 时, 破岩比能耗最小, 滚刀破岩效率最高; 节理间距对岩碴的形成有较大影响, 比能耗随着节理间距增大而增大, 破岩效率降低。

关键词: 节理倾角; 节理间距; TBM 双刃滚刀; 破岩模式; 破岩效率

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)05-1293-07

Effects of joint angle and joint space on rock fragmentation efficiency by two TBM disc cutters

CAO Ping¹, LIN Qibin¹, LI Kaihui^{1,2}, HAN Dongya^{1,2}

- (1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Based on laboratory tests, the effects of joint angle and joint space on the penetration of two TBM disc cutters were studied. In the test, concrete jointed specimens were adopted to simulate jointed rock mass. The angle α between joint plane and tunnelling axis were 0° , 30° , 60° and to 90° , and four joint spaces were 20, 30, 40 and 50 mm respectively. Penetration depth and penetration force were collected during the loading process. Shooting with the camera in real time, photographs of the damage of specimen and failure mode of the development process were taken. The results show that there exists three basic modes of rock fragmentation which are mainly related to the joint orientation. The interaction between rock and TBM double disc cutter leads to cracks coalescence and chips formation. The specific energy achieves the minimum at the joint angle $\alpha = 60^\circ$ and the fragmentation efficiency of two TBM disc cutters can reach the highest. The joint space has significant impact on the formation of rock chips. Specifically, the specific energy increases with the increase of the joint space, but the fragmentation efficiency presents the opposite trend.

Key words: joint angle; joint space; two TBM disc cutters; fragmentation modes; fragmentation efficiency

收稿日期: 2016-05-19; 修回日期: 2016-07-01

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB035401); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015zzts262) (Project(2013CB035401) supported by the National Basic Research Development Program (973 Program) of China; Project(2015zzts262) supported by the Central University Special Fund For Basic Scientific Research Business Expenses)

通信作者: 曹平, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石力学与工程应用研究; E-mail: pcao_csu@sina.com

随着全断面隧道掘进机 TBM(tunnel boring machine)技术的不断提高, TBM 被广泛应用于隧道工程建设中, 在不同岩体中, 破岩效率已经成为项目规划和选择隧道开挖方法的一个重要工具。很多地质因素如节理性质(节理倾角、节理间距、有无充填节理等)、岩溶、高地应力、渗流等均会影响 TBM 破岩效率^[1-4]。目前, 对于节理倾角和间距因素, 国内外众多学者采用理论分析、数值模拟、现场实验数据分析及室内实验等手段对其进行了研究^[5-12], 如 BRULAND^[5]提出了 NTNU 模型, 对节理倾角影响 TBM 破岩速率进行了定性分析; BARTON^[6]提出 Q_{TBM} 模型来预测不同地质条件下 TBM 破岩速率, 并将节理倾角作为 1 个重要的影响因素; HOWARTH 等^[7]通过线性切割实验研究了节理间距对破岩效果的影响; GONG 等^[8-9]通过离散元软件 UDEC 分析了不同节理倾角、不同节理间距时的破岩过程; HADI 等^[10]研究了节理间距和节理倾角对 TBM 单刀破岩速率的影响; GONG 等^[11]通过离散元软件 UDEC 对 TBM 双刀破岩进行了数值模拟; LIU 等^[12]通过数值模拟研究了单双滚刀对破岩的影响。现有的关于节理对 TBM 破岩的研究大多是基于数值模拟和节理性质对 TBM 单刀滚刀破岩的影响, 而在实际 TBM 的掘进施工过程中, 并不是采用滚刀单独破岩, 而是刀盘上的滚刀群对岩体协同破岩。为此, 本文作者将通过室内实验研究不同节理倾角和间距条件下对 TBM 双刀滚刀破岩的影响, 并对 TBM 双刀滚刀破岩时裂纹的形成和扩展过程进行研究, 通过总结裂纹的变化规律研究节理岩体的破岩模式, 同时分析节理倾角和间距对双刀滚刀破岩效率的影响, 以便为 TBM 在不同节理岩体中的施工应用中提供参考。

1 实验概况

1.1 实验仪器

本实验在中南大学岩土力学流变实验室进行。实验仪器为长春朝阳公司生产的 RYL-600 微机控制岩石剪切流变仪。该仪器是由德国进口全数字伺服控制器(EDC)与计算机控制的高精度岩石剪切流变实验设备, 主要由轴向主机、横向剪切框架、松下伺服电机及控制系统、德国 DOLI 测控系统、计算机系统等组成, 可完成横向最大剪应力为 200 kN、横向位移加载速率为 0.001~50 mm/min 的实验, 在实验过程中能够同时记录时间、横向位移、法向位移、剪应力、应变等参数。

1.2 试样制备

本实验选用的试件为水泥砂浆试件, 选用标号为

30 的快硬水泥和细砂, 拌和水泥砂浆。在水泥砂浆中, 水、水泥、细砂体积比为 1:1:2。试件采用特制的钢模具进行浇注, 模具内部涂专用脱模剂, 使试件脱模后的表面有很高的平整度。浇注时采用预埋云母片制作充填节理试件。在常温下, 养护 28 d, 达到预定的抗压强度即可。试块长×高×宽为 200 mm×140 mm×30 mm, 材料基本力学参数见表 1。

表 1 材料基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of material

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	单轴抗 压强度/ MPa	泊松 比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
2.024	3.22	32.40	0.28	6.22	47.96

1.3 实验方案

实验采用双刀滚刀破岩, 刀间距为 70 mm, 实验在经改装的 RYL-600 岩石剪切流变仪上进行。实验中, 采用 4 种节理倾角和 4 种不同的节理间距, 实验模型如图 1 所示(图 1 中, D 为节理面间距, α 为岩体中节理面与滚刀贯入方向的夹角)。实验时, 将试样放置于经改装好的实验平台上, 在整个实验过程中满足试样水平方向围压为 5 MPa(实际开挖中围岩处于地应力作用下)。实验中, 以 0.01 mm/s 的加载速度通过刀具对试样进行轴向加载, 并观察侵入力-侵深曲线变化趋势。曲线越过峰值便进入残余阶段, 每次实验的滚刀侵深均为 10 mm, 卸除轴压并结束实验。在剪切过程中, 与剪切流变仪相配套的控制记录软件 Test 记录时间、侵入力、侵深等。

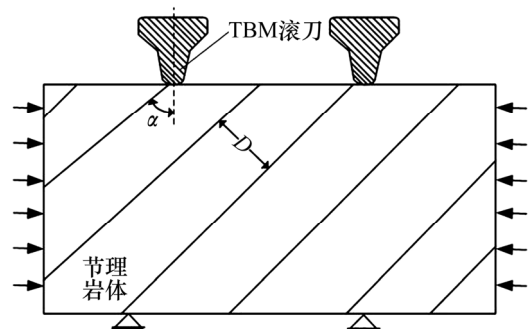


图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

2 实验结果及其分析

2.1 不同节理倾角和间距下的侵入力-侵深曲线

图 2 所示为不同节理倾角条件下滚刀侵入力-侵深曲线。侵入力所反映的是试件对滚刀贯入过程中的

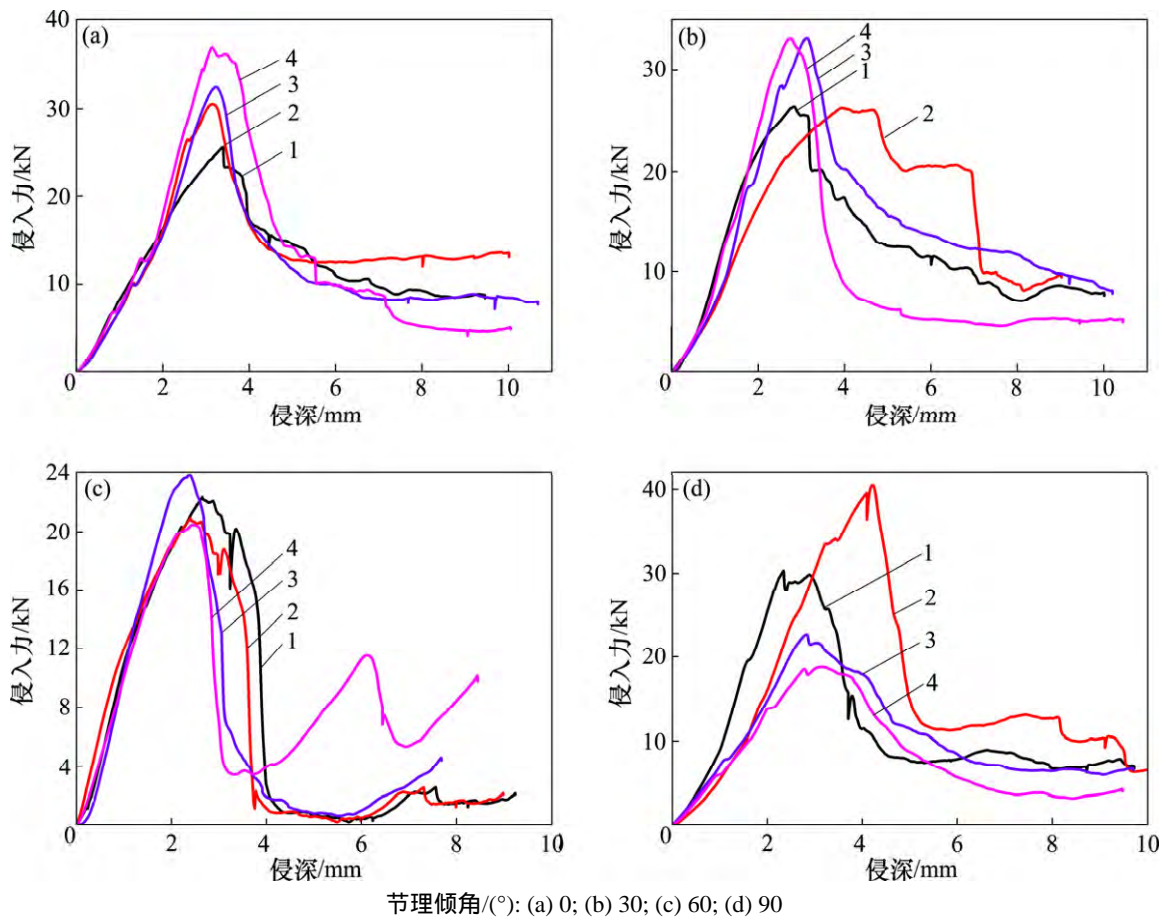


图 2 侵入力-侵深曲线

Fig. 2 Penetration force-penetration depth curves

抵抗力, 侵深则是滚刀贯入试件中的深度。从图 2 可见: 在加载初期, 侵入力与侵深呈比例增加, 每个滚刀单独作用于试件上, 这个阶段和 1 个滚刀压入过程类似; 当侵入力持续增加时, 破碎区形成; 当侧向裂缝传播到破碎区时, 由于 2 个滚刀的相互作用, 2 个刀刃之间的侧向裂缝相互交汇贯通, 形成一道几乎平行于自由面的贯通裂缝, 并导致 2 个刀刃之间的岩体形成整块破碎岩碴, 大面积地从试件剥落, 说明相邻滚刀下产生的裂缝相互影响, 并使得 2 个刀刃下的裂缝交汇贯通, 产生了协同破岩作用。

峰值倾入力与节理倾角的关系如图 3 所示。由图 3 可知: 当节理倾角 α 为 30°与 60°时, 峰值侵入力较小; 在 α 为 0°与 90°时, 峰值侵入力较大。结合试件的破坏情况也可得知当节理倾角 α 为 30°与 60°时试件的破坏情况较严重, 刀具更容易破碎岩石。

峰值侵入力与节理间距的关系如图 4 所示。由图 4 可知: 峰值侵入力随着节理间距的变化而变化, 如当节理倾角 $\alpha = 0^\circ$ 时, 峰值侵入力随着节理间距的增

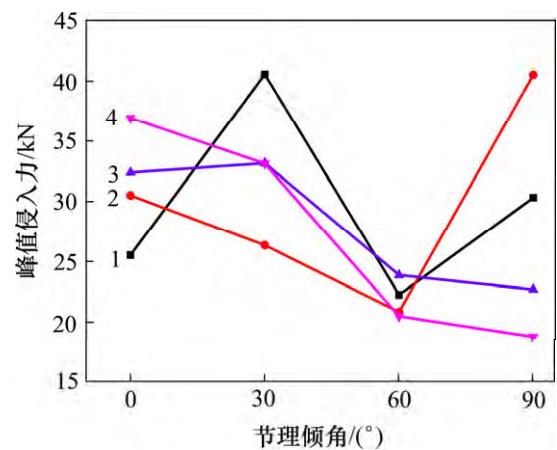
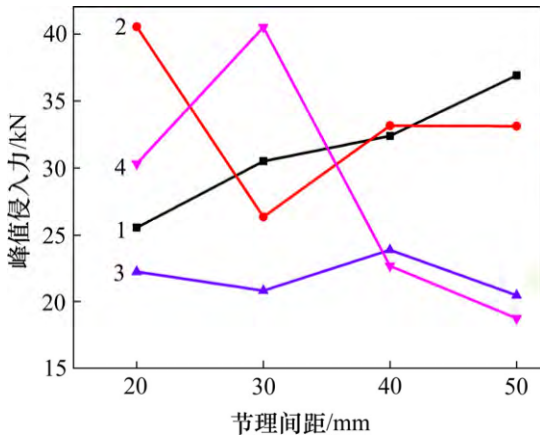


图 3 峰值倾入力与节理倾角的关系

Fig. 3 Relationship between peak penetration force and joint angle

大而增大; 当节理倾角 $\alpha = 90^\circ$ 时, 峰值侵入力随着节理间距的增大先增大后减小。这说明破岩效率与节理

间距有关，结合试件的破坏情况也可得知节理间距对岩碴的块状体积有较大影响，对破岩效率有影响。



节理倾角/(°)：1—0；2—30；3—60；4—90。

图 4 峰值侵入力与节理间距的关系

Fig. 4 Relationship between peak penetration force and joint space

2.2 不同节理倾角和间距下的试样破坏特征

2.2.1 节理倾角对破岩过程的影响

滚刀侵入岩石过程可分为破碎区形成、裂纹产生与扩展、破岩碎片形成 3 部分。当滚刀作用于岩石上时，首先紧邻刀具下方的岩石发生塑性变形，出现挤压破坏区，这个过程和 1 个滚刀单独压入过程一样。当 2 个滚刀继续侵入时，由于抗拉破坏而在受压区外围延伸出大量微裂纹，与挤压破坏区构成刀具下的破碎区。岩石破碎区向内及两侧扩张，扩张的趋势造成岩石中部及侧向产生放射状裂纹即中间裂纹和侧向裂纹。当侵入力持续增加时，随着侧向裂缝传播到破碎区，由于 2 个滚刀相互作用，2 个刀刃之间的侧向裂纹相互交汇贯通。裂纹尖端受拉力作用而促使裂纹不断扩展，当侧向裂纹达到岩石表面时则形成岩石碎片。随着滚刀继续侵入，侵入力继续增大，形成一道几乎平行于自由面的贯通裂纹，并导致 2 个刀刃之间的岩体形成整块的破碎岩碴，大面积地从试件剥落，说明相邻滚刀下产生的裂纹相互影响，并使得两滚刀下的裂纹交汇贯通，产生了协同破岩作用。裂纹角示意图如图 5 所示^[13]。

不同节理倾角和间距下试样破坏图如图 6 所示，其中虚线表示宏观裂纹^[14]。由图 6 可知：1) 当 $\alpha = 0^\circ$ 时，试件所受力呈对称分布，节理对侧向裂纹的扩展有明显的控制作用，对中间裂纹的影响则较小，中间裂纹由节理面引导向岩石深部扩展；2) 当 $\alpha = 30^\circ$ 时，中间裂纹由节理面引导向岩石深部扩展，从刀具两侧

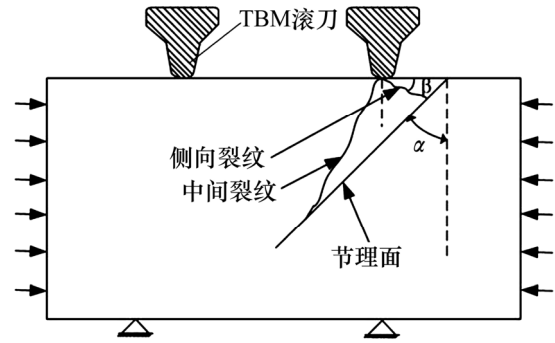
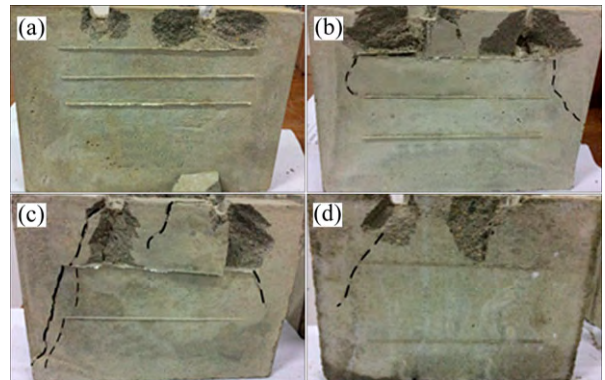


图 5 裂纹角示意图

Fig. 5 Sketch of crack angle

生成侧向裂纹向自由面或节理面扩展形成碎块；3) 当 $\alpha = 60^\circ$ 时，节理面受到刀具的剪切作用，致使裂纹从节理面起裂并向节理面或自由面扩展形成碎块；4) 当 $\alpha = 90^\circ$ 时，在双刀荷载作用下，试件所受力呈对称分布，由于节理的水平分割，节理面上与侵入方向相交点的拉应力迅速集中，当节理间距偏小时，首先达到抗拉极限，裂纹起裂，并迅速向滚刀端部扩展。



(a) 节理倾角为 90° ，节理间距为 20 mm；(b) 节理倾角为 90° ，节理间距为 30 mm；(c) 节理倾角为 90° ，节理间距为 40 mm；(d) 节理倾角为 90° ，节理间距为 50 mm

图 6 不同节理倾角和间距情况下试样破坏形式

Fig. 6 Sample failure shapes under different joint angles and spaces

可见，不同节理倾角的岩体主要存在 3 种破碎模式：1) 当 α 较小时，中间裂纹由节理面引导向岩石深部扩展，从刀具两侧生成侧向裂纹向自由面或节理面扩展形成碎块；2) 当 α 较大时($\alpha > 60^\circ$)时，节理面受到刀具的剪切作用，致使裂纹从节理面起裂并向节理面或自由面扩展形成碎块；3) 当 α 接近于 90° 时，在刀具作用下方的压碎区产生裂纹，并扩展到节理面

或自由面形成碎块。

2.2.2 节理间距对破岩过程的影响

对比不同节理间距可以发现 TBM 双刃滚刀破岩过程可分为 2 个阶段^[15]: 正常破岩和节理面破岩。当节理间距较小时, 滚刀作用于岩体, 形成的裂纹能达到节理面, 并与节理面贯通形成大块碴片; 当节理面间距较大时, 滚刀下形成的裂纹不足以达到节理面, 裂纹的扩展、贯通以形成岩片为主。在实际工程中, TBM 处于连续掘进状态, 这 2 种破岩状态交替进行, 进而会出现薄岩片和大块岩碴交替出现的情况。

在节理岩体中, 通过水泥砂浆模拟岩样实验可发现: 由于节理的存在使破碎区的形状尤其裂纹的起始及扩展方向、破岩碎片的体积发生了明显改变, 如图 7 所示的中间裂纹方向发生偏转, 侧向裂纹从节理端开裂并向自由面扩展。

2.3 节理倾角和间距对滚刀破岩效率的影响

节理倾角和间距对 TBM 破岩效率可采用破碎功与破碎体积之比来衡量^[9]。破岩所需破碎功越小, 破岩体积越大, 则破碎功与破碎体积之比越小; 比能耗越小, 则破岩效率越高。不同节理间距及倾角的破岩实验结果如表 2 所示。破碎功 W 按下式进行计算:

$$W = \int F(u)du \approx \sum_{i=1}^n F_i \Delta u_i$$

式中: F_i 为第 i 加载步的轴向力; u_i 为第 i 加载步的轴

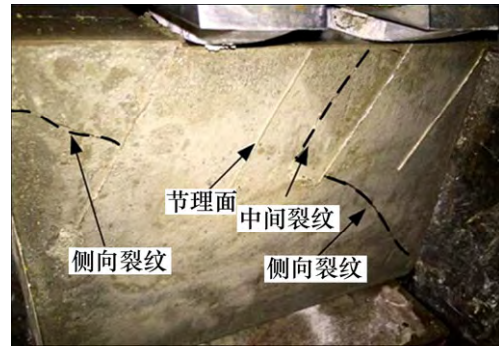


图 7 节理对破岩的影响

Fig. 7 Effect of joint on fragmentation

向位移; n 为求和步数。

岩石比能耗 S_E 是反映 TBM 机械破岩效率的重要指标, 定义为开挖单位体积 V 的岩石所消耗的能量^[16-22], 即 $S_E=W/V$ 。破碎功 W 与节理倾角 α 的关系如图 8 所示。从图 8 可见: 当节理间距为 20 mm, α 由 30°向 60°增大时, 破碎功随之降低(从 126.62 J 降低到 64.23 J); 当 α 增大到 90°时, 所需破碎功明显增加(增加至 115.66 J)。

比能耗与节理倾角的关系如图 9 所示。从图 9 可见: 当节理倾角 α 从 0°增大到 60°时, 破岩效率明显增大; 当节理倾角 α 从 60°增大到 90°时, 破岩效率明

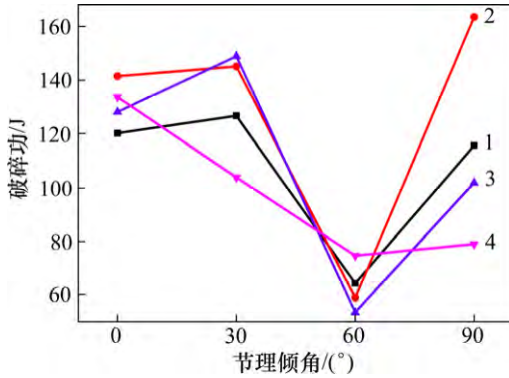
表 2 不同节理间距及倾角的破岩实验结果

Table 2 Results of indentation test with different joint angles and spacings

节理间距 D/mm	节理倾角 $\alpha /(^{\circ})$	峰值侵入力 F/kN	侵深/ mm	岩片质量/ g	破碎功 W/J	破碎体积 V/cm^3	单位破碎功 $S_E/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
20	0	25.54	3.40	166.15	120.22	82.09	1.46
	30	40.55	2.83	183.41	126.62	90.62	1.40
	60	22.25	2.63	136.07	64.23	67.23	0.96
	90	30.32	2.35	156.81	115.66	77.48	1.49
30	0	30.50	3.16	179.25	141.54	88.56	1.60
	30	26.35	3.96	188.69	145.15	93.23	1.56
	60	20.84	2.38	110.15	58.80	54.42	1.08
	90	40.51	4.22	184.62	163.53	91.22	1.79
40	0	32.39	3.24	121.03	128.06	59.80	2.14
	30	33.16	3.13	173.50	148.98	85.72	1.74
	60	23.88	2.39	137.59	53.36	67.98	0.78
	90	22.69	2.83	105.96	101.82	52.35	1.94
50	0	36.91	3.16	120.04	133.61	59.31	2.25
	30	33.13	2.74	104.02	103.84	51.40	2.02
	60	20.49	2.47	115.94	74.53	57.28	1.30
	90	18.78	3.16	76.68	78.89	37.89	2.08

显降低。从破岩效率来看,在岩石中存在 1 个最优倾角,当节理倾角 $\alpha = 60^\circ$ 时,比能耗最低, TBM 双刃盘形滚刀的破碎效率最高。

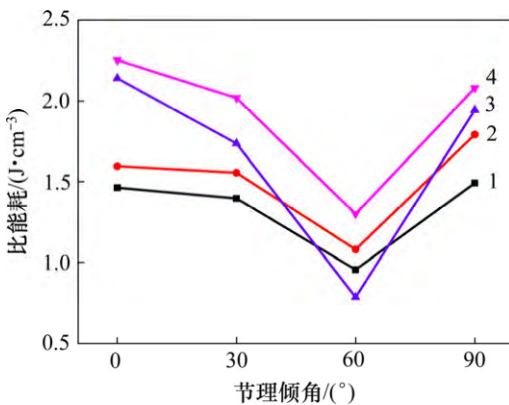
比能耗与节理间距的关系如图 10 所示。从图 10



节理间距/mm: 1—20; 2—30; 3—40; 4—50。

图 8 破碎功与节理倾角的关系

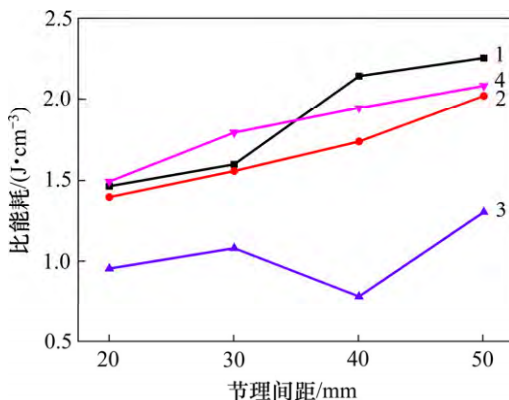
Fig. 8 Relationship between fragmentation work and joint angle



节理间距/mm: 1—20; 2—30; 3—40; 4—50。

图 9 比能耗与节理倾角的关系

Fig. 9 Relationship between specific energy and joint angle



节理倾角/°: 1—0; 2—30; 3—60; 4—90°。

图 10 比能耗与节理间距的关系

Fig. 10 Relationship between specific energy and joint spacing

可知:当节理倾角一定时,随着节理间距不断增大,比能耗也不断增大,破岩效率降低。

3 结论

1) 当节理倾角一定、节理间距较小时,滚刀作用于岩体,形成的裂纹能达到节理面,并与节理面贯通形成大块碴片;当节理面间距较大时,滚刀下形成的裂纹不足以达到节理面,裂纹的扩展、贯通以形成岩片为主。在实际工程中, TBM 处于连续掘进状态,这 2 种破岩状态交替进行,进而薄岩片和大块岩碴交替出现。

2) 当节理间距一定、 α 较小时,中间裂纹由节理面向岩石深部扩展,从刀具两侧生成侧向裂纹向自由面或节理面扩展形成碎块;当 α 较大时($\alpha = 60^\circ$),节理面受到刀具的剪切作用,致使裂纹从节理面起裂并向节理面或自由面扩展形成碎块;当 α 接近于 90° 时,在刀具作用下方的压碎区产生裂纹,并扩展到节理面或自由面形成碎块。

3) 相邻滚刀下产生的裂纹相互影响,使得两刀刃下的裂纹交汇贯通,产生协同破岩作用,形成片状岩碴。

4) 从滚刀破岩效率来看,破岩比能耗随着节理倾角的增加有 1 个逐渐减少然后增大的过程,在岩石中存在 1 个最优节理倾角,当节理倾角 $\alpha = 60^\circ$ 时,破岩比能耗最小, TBM 双刃盘形滚刀的破碎效率达到最高值;当节理倾角一定时,随着节理间距不断增大,比能耗也不断增大,破岩效率降低。

参考文献:

- [1] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]// Proceedings of RETC. Boston, USA, 1993: 793-809.
- [2] 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.
- [3] YAGIZ S. Recent advancement in the predicting TBM performance[C]// Proceedings of Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul, Turkey, 2006: 11-13.
- [4] ROSTAMI J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure[D]. Colorado:

- Colorado School of Mines. Department of Mining Engineering, 1997: 142-146.
- [5] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998: 14.
- [6] BARTON N. TBM tunnelling in jointed and faulted rock[M]. Rotterdam, Brookfield: AA Balkema, 2000: 172.
- [7] HOWARTH D F, ROWLANDS J C. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987, 20(1): 57-85.
- [8] 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(1): 183-191
- [9] GONG Qiuming, JIAO Yuyong, ZHAO Jian. 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.
- [10] HADI B, REZA K, MOHAMMAD A, et al. Simultaneous effects of joint spacing and joint orientation on the penetration rate of a single disc cutter[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2011, 21(4): 507-512.
- [11] GONG Qiuming, ZHAO Jian, HEFNY A M. Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 263.
- [12] LIU Hongyuan, KOU Shaoquan, LINDQVIST P A, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(4): 491-505.
- [13] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对TBM滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155-163.
MA Hongsu, JI Hongguang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate under TBM disc cutters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 155-163.
- [14] 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 Haibo, ZHOU Qingchun, 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.
- [15] 孙金山, 陈明, 陈保国, 等. TBM滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1891-1897.
- SUN Jinshan, CHEN Ming, CHEN Baoguo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1891-1897.
- [16] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2453-2464.
TAN Qing, YI Nian'en, XIA Yimin, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2453-2464.
- [17] 谭青, 朱逸, 夏毅敏, 等. 节理特征对TBM盘形滚刀破岩特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4040-4046.
TAN Qing, ZHU Yi, XIA Yimin, et al. Influence of joint characteristics on rock fragmentation induced by TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10): 4040-4046.
- [18] 刘红岩, 黄妤诗, 李楷兵, 等. 预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1235-1241.
LIU Hongyan, HUANG Yushi, LI Kaibing, et al. Test study of strength and failure mode of pre-existing jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1235-1241.
- [19] 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 Xuhui, XIA Yimin, et al. Numerical study on breaking rock by disc cutter at different confining pressures and joint characteristics cases[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1220-1228.
- [20] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 掘进机刀盘滚刀间距对北山花岗岩破岩效率的影响实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 54-60.
GONG Qiuming, HE Guanwen, ZHAO Xiaobao, et al. Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 54-60.
- [21] 孙建中, 杨圣奇, 温森. 深部节理岩体TBM滚刀破岩效果及最优刀间距研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 126-131.
SUN Jianzhong, YANG Shengqi, WEN Sen. Research on deep jointed rock fragmentation by TBM cutters and cutters spacing optimization[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(1): 126-131.
- [22] YANG Haiqing, WANG He, ZHOU Xiaoping. Analysis on the damage behavior of mixed ground during TBM cutting process[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57(1): 55-65.

(编辑 陈灿华)