

DOI: 10.11779/CJGE201501005

# 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

龚秋明<sup>1</sup>, 何冠文<sup>1</sup>, 赵晓豹<sup>2</sup>, 马洪素<sup>3</sup>, 李晓昭<sup>2</sup>, 张 浩<sup>1</sup>, 苗崇通<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 南京大学华东有色地质局地下空间与地质环境研究所, 江苏 南京 210093;  
3. 核工业北京地质研究院环境工程研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 掘进机 (TBM) 开挖隧道过程中, 其刀盘上滚刀间距设计的合适与否关系着破岩效率的高低。由于岩石非均匀、非连续、各项异性的特性, 使用数值模拟方法研究滚刀破岩过程存在局限性。现场掘进实验主要是针对特定的掘进机做出机械运行参数优化, 无法研究不同刀间距对破岩的影响。全尺寸滚刀破岩实验可以人为调整刀间距, 且实验中采用大体积岩石可以避免尺寸效应的影响, 因此受到了广泛的关注。采用北京工业大学自制的机械破岩试验平台, 安装 17 英寸 (432 mm) 盘形滚刀, 选取尺寸为 1000 mm×1000 mm×600 mm 的北山完整花岗岩试样, 进行了 5 组刀间距的线性切割试验。实验中采集滚刀三向力, 分层收集岩片且对其进行称重。对不同刀间距作用下的平均法向力、平均滚动力和比能进行了分析研究。当贯入度较小时, 刀间距对平均法向力和平均滚动力的影响都不明显, 随着贯入度的增加, 刀间距对平均法向力和平均滚动力的影响增加。对于所有的刀间距而言, 增加贯入度会产生更多的岩片, 但并不一定会提高破岩效率, 对于北山花岗岩而言, 当刀间距与贯入度的比值为 30 左右时, 比能值最低, 此时破岩效率最高。

**关键词:** 隧道掘进机; 盘形滚刀; 滚刀间距; 滚刀破岩实验; 滚刀力; 比能

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)01-0054-07

**作者简介:** 龚秋明 (1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域有掘进机、盾构机隧道开挖、岩土工程监测、边坡稳定性分析、岩土工程勘察及评价。E-mail: gongqiuming@bjut.edu.cn。

## Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM

GONG Qiu-ming<sup>1</sup>, HE Guan-wen<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-bao<sup>2</sup>, MA Hong-su<sup>3</sup>, LI Xiao-zhao<sup>2</sup>,  
ZHANG Hao<sup>1</sup>, MIAO Chong-tong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. NJU-ECE, Institute for Underground and Geo-environment, Nanjing 210093, China; 3. Division of Environment Engineering, CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In tunnel construction by tunnel boring machine (TBM), the excavation efficiency is highly related to cutter spacing. Due to the inhomogeneous, discontinuous and anisotropic characteristics in rocks, there are limitations to study rock fragmentation process by using numerical simulation. The purpose of in-situ penetration tests is to optimize the operational parameters for a specific TBM, thus this kind of tests cannot consider the effect of different cutter spacings on rock breaking process. The full-scale cutting experiment can minimize the size effect by using a large rock sample and the cutter spacing is able to be adjusted during the experiment, therefore the full-scale cutting experiment has been widely used in recent years. In order to study the influence of different cutter spacings on excavation efficiency by TBM cutter, the mechanical rock fragmentation experimental platform of Beijing University of Technology is used to conduct a series of rock cutting tests with five sets of cutter spacings. In these tests, the diameter of the disc cutter with a constant cross section is 432 mm. The size of test granite rock sample is 1000 mm×1000 mm×600 mm, taken from Beishan, Gansu Province of China. During the experiments, the three dimensional forces acting on the rolling cutter are recorded, and the rock chips collected after each cutting pass are weighed respectively. The impact of cutter spacing on excavation efficiency is analyzed by use of the

基金项目: 国防科技重点项目 (科工二司[2012]492 号); 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB04690x)

收稿日期: 2014-02-19



obtained average normal force, average rolling force and specific energy. The results show that when penetration is small, the cutter spacing has no obvious effect on the average normal force and rolling force. However, with the increasing penetration, the cutter spacing has significant impact on both the average normal force and the rolling force. For all of the cutter spacings arranged in the tests, the increase in penetration will produce more rock chips but not always improve the efficiency of rock fragmentation at the same time. For Beishan intact granite, when the ratio of spacing to penetration is around 30, the specific energy reaches the minimum value, which means that the highest rock fragmentation efficiency can be expected under this condition.

**Key words:** TBM; disk cutter; cutter spacing; rock fragmentation experiment by rolling cutter; cutter force; specific energy

## 0 引言

机械开挖法具有对围岩扰动小, 施工速度快, 成洞质量高等钻爆法无法企及的优点, 且对于长度大于 3 km 的隧道, 机械开挖法比钻爆法更经济<sup>[1]</sup>。科学技术的不断进步也使得掘进机的类型和使用范围不断扩大。

掘进机开挖隧道时, 岩片的形成主要依靠刀盘上滚刀之间的相互作用, 其破岩过程可分为两个阶段<sup>[2]</sup>: 首先是滚刀侵入岩石, 随着滚刀侵入深度或荷载增加, 在岩石表层产生碎片及岩石内部产生裂纹; 其次为相邻滚刀间的相互作用, 随着滚刀之间裂纹的发展并相互接合, 两滚刀之间形成岩片。因此, 掘进机滚刀间距与破岩效率紧密相关, 即使实际使用的刀间距与最优刀间距之间存在细微的误差, 也会使掘进效率大幅度降低<sup>[3]</sup>, 所以滚刀间距的选取是掘进重要的设计环节。

通过数值模拟的方法可以揭示滚刀破岩的过程, Gong 等<sup>[4]</sup>应用离散元模拟了滚刀侵入过程并把侵入过程分为 3 个阶段, 即为压碎区的形成、小裂隙区的形成与大裂隙的扩展阶段, 并研究了节理间距和角度对破岩过程的影响。Cho 等<sup>[5]</sup>使用 AUTODYN 3D 软件对模拟了滚刀破岩过程, 并与真实的滚刀破岩实验结果进行了对比, 发现对于均质且各向同性的岩石而言, 数值模拟结果和实验结果达到了高度的吻合。

针对隧道开挖过程中遇到的变化的地质条件, Bruland<sup>[6]</sup>提出了掘进机的现场掘进实验, 通过实验找到合适的运行参数, 优化掘进机的施工。目前, 在国内的硬岩隧道施工中, 现场掘进实验的应用尚未普及。龚秋明等<sup>[7]</sup>在锦屏的隧道施工中使用现场掘进实验的方法, 总结了适合高地应力条件下的掘进机运行参数。

然而实际工程中遇到的岩石往往是非均质、非连续、各向异性的, 这就使得应用数值模拟的方法研究破岩过程受到了局限。而现场掘进实验是针对已经投入使用的掘进机, 此时掘进机刀盘上的刀间距是固定的, 无法研究不同的刀间距对破岩的影响。因此, 越来越多的学者将目光转向了室内的滚刀破岩实验。该

实验通过变换不同组合的刀间距和贯入度, 切割大尺寸的岩石试样, 得到的数据避免了尺寸效应带来的影响, 可以直接指导掘进机的设计和施工。Roxborough 等<sup>[8]</sup>使用 V 型滚刀对体积为 500 mm×500 mm×300 mm 的小试样岩石进行线性切割实验, 提出了 V 型滚刀法向力和滚动力的计算方法。Sonwdown 等<sup>[9]</sup>发现滚刀间的优化间距主要由岩石特性及 TBM 每转进尺来决定, 其中岩石脆性对滚刀间距的影响较大。Rostami 等<sup>[10]</sup>发现岩片形成模式受滚刀间距的影响而发生变化, 当滚刀间距过大或载荷过小, 裂纹朝着自由面扩展, 形成较小的三角形碎片; 当滚刀间距过小或载荷过大, 较长但无效的裂纹向岩石内部扩展, 在两滚刀之间形成凹槽。当滚刀间距、载荷与岩石的力学特性达到优化状态时, 裂纹平直地向着邻近滚刀扩展。Chang 等<sup>[11]</sup>用 17 英寸的盘形滚刀对花岗岩进行线性破岩实验, 发现当 S/P 的值为 10~12 之间时, 比能的值最小, 破岩效率最高, 并将三维岩石测量系统 Shape Metrix 3D 应用于测量岩片的体积。Balci 等<sup>[12]</sup>选择 V 型盘形滚刀对 3 种不同的岩石进行滚刀破岩实验, 发现实验测得的滚刀力很接近施工现场的滚刀力。Cho 等<sup>[13]</sup>线性切割韩国花岗岩, 总结出当滚刀间距与贯入度的比值达到 15 时, 相邻切槽间的相互作用不再明显。

本文采用 5 组不同的刀间距和 7 组不同的贯入度对北山花岗岩进行了线性切割试验, 研究不同刀间距对破岩过程及破岩效率的影响, 其实验结果可为掘进机刀盘滚刀间距的设计及掘进机的现场施工提供参考和依据。

## 1 实验设计

### 1.1 机械破岩实验平台介绍

机械破岩实验平台的机械系统由钢结构框架组成, 为实验平台的刚度提供保障(图 1)。破岩使用的刀具安装在顶部框架下方的调模移动刀盘上, 采集三向力的传感器位于刀具和刀盘之间, 刀具通过框架上部的调模机构和两侧滑移组件的协调工作, 可以进行

Z 方向的运动, 模拟不同的贯入度。岩石试样箱最大能容纳大小为  $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 600\text{ mm}$  的岩石试样, 在试样箱的底部安装有横向和纵向的移动平车, 液压系统提供动力使平车运动, 进而带动试样箱进行 X 方向和 Y 方向的运动, 依靠 X 方向的运动可以使岩石和刀具产生相对运动, 进行破岩实验; 依靠 Y 方向的运动可以调整滚刀间距的大小。测试系统采集到的滚刀三向力和试样箱及滚刀的实时位移可以生成以时间为横坐标、力和位移为纵坐标的函数图像, 显示在计算机的屏幕上, 供实验人员在破岩过程中查看。实验完成后, 实验数据保存为 EXCEL 文档的形式储存在计算机的硬盘内, 方便日后的分析及管理。

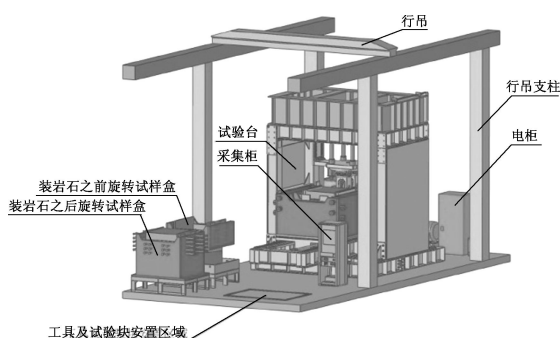


图 1 机械破岩实验平台

Fig. 1 Rock cutting machine

## 1.2 岩石试样

实验中采用的岩石试样采自于甘肃省玉门市北山的芨芨槽, 体积满足试样箱的要求, 选择长 $\times$ 宽 $\times$ 高为  $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 600\text{ mm}$  的大体积岩石试样。滚刀破岩实验开始前, 进行了花岗岩的物理力学参数的测定, 抗压强度采用单轴压缩实验, 抗拉强度采用劈裂法, 所有的实验均符合规范的要求。波速的测试采用  $800\text{ kHz}$  的纵波探头对大样岩石试样进行测试。实验结果经过处理后, 得到的北山花岗岩物理力学参数: 天然密度为  $2.60\text{ g/cm}^3$ , 弹性模量为  $23.01\text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.188$ , 抗压强度为  $105.6\text{ MPa}$ , 抗拉强度为  $6.4\text{ MPa}$ , 纵波波速为  $3345.72\text{ m/s}$ 。

## 1.3 滚刀破岩实验设计

本次实验选用 17 英寸 ( $432\text{ mm}$ ) 的常切面盘形滚刀, 刀刃宽度为  $21\text{ mm}$ , 切割速度选择  $20\text{ mm/s}$ , 数据采集频率选择为  $100\text{ 次/s}$ , 刀间距选取 5 组, 分别为  $60, 70, 80, 90, 100\text{ mm}$ ; 贯入度选取 7 组, 分别为  $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5\text{ mm}$ , 每一个刀间距和贯入度的组合为一组实验内容, 本次共需进行 35 组破岩实验。

对于同一块岩石试样而言, 若在破岩过程中更换刀间距, 此时切槽下已经存在的微裂纹会影响新的刀

间距下的破岩实验结果, 为了避免这种影响, 本次实验中每块岩石只进行同一个刀间距的破岩实验, 因此共需要 5 块岩石试样。

滚刀间距的先后顺序对于实验结果没有任何影响, 此次实验选取刀间距的顺序依次为  $80, 90, 70, 60, 100\text{ mm}$ 。对于相同的刀间距, 贯入度按照由小到大的顺序从  $0.5\text{ mm}$  开始进行破岩实验, 依次增大直到  $3.5\text{ mm}$  为止。

## 1.4 滚刀破岩实验步骤

破岩实验开始时, 岩石表面是平整光滑的岩面, 此时的岩面与正常破岩过程中滚刀作用下的岩面是不同的。因此, 必须对岩样表面进行处理, 使其与破岩过程中的岩面相同。处理岩石表面时, 先以第一级贯入度切割岩石表面, 在岩石表面形成一系列等间距的切槽, 并获稳定的三向力读数。然后可以进行第一级贯入度试验。

对于相同的刀间距, 按照设计的由小到大的 7 个贯入度进行破岩实验, 并记录在不同贯入度下的实验数据。实验过程中, 每个贯入度需要做 4~6 层的切割, 直到数据有重复规律为止, 以检验数据的正确性。以相同的刀间距和贯入度做完每一层的切割后, 仔细收集该层所产生的岩片及岩粉, 并对其称重及筛分。

实验中, 当更换不同的贯入度进行试验, 开始切割的层数为试验过渡间段, 由于贯入度加大, 此时获得的滚刀三向力可能存在过高的情况, 等到连续两层切割后, 滚刀三向力会较为平稳, 此时记录的数据方为真实有效的数据。

当更换刀间距时, 需要更换新的岩石。更换岩石后的实验步骤同上所述。

## 2 滚刀破岩实验过程分析

### 2.1 实验现象描述

在不同的刀间距作用下, 当贯入度较小时, 如贯入度为  $0.5\text{ mm}$  时, 岩石对滚刀的抵抗作用不明显, 滚刀容易侵入岩石, 各个刀间距下的破岩现象无明显差异; 随着贯入度的增加, 只要贯入度大于  $1.0\text{ mm}$  时, 刀间距对破岩的影响开始变得明显, 不同的刀间距下, 岩石对滚刀的抵抗作用也显现出差异, 对于相同的贯入度而言, 刀间距越大时, 滚刀侵入岩石越困难, 在破岩过程中刀盘的振动现象越显著。对于所有刀间距而言, 当贯入度达到一定的数值后, 再进行下一级贯入度的实验时, 滚刀侵入岩石会会比前几级的侵入变得容易一些, 同时可以观察到滚刀的竖向振动减弱, 但其切向振动变得明显, 严重时会导致试样箱在行进过程中偶尔出现停滞的现象。

在所有的刀间距下, 当贯入度较小时, 滚刀在破岩过程中都会产生大量的岩粉及小碎片, 很难产生两刀之间的宽且扁平的大岩片。滚刀往复对岩石进行多层切割, 直到相邻切槽间的微裂纹彻底贯通, 才会产生少量的岩片, 并且刀间距越大, 微裂纹扩展贯通越不容易, 越难产生岩片。如贯入度为 0.5 mm 时, 刀间距为 60 mm 滚刀需要对岩石往复切割 4 层左右才会有岩片产生, 而刀间距增大到为 100 mm 时, 需要切割 10 层以上, 才会有岩片产生。

刀间距越宽, 相邻切槽间的微裂纹越不容易贯通, 产生岩片越困难, 因此需要更大的贯入度才会有岩片产生。如刀间距为 60 mm 和 70 mm 时, 贯入度达到 2 mm 时就会产生较多的又长又直大岩片; 当刀间距增大到 80 mm 时, 贯入度需要达到 2.5 mm, 才会产生大量的岩片; 当贯入度增加到 90 mm 和 100 mm 时, 贯入度为 3.0 mm 才能产生大量的岩片; 对于所有的刀间距而言, 虽然贯入度越大, 产生岩片的数量越多, 但是, 贯入度过大会为破岩带来负面影响, 使岩石产生过度破碎的现象, 破岩过程中会产生大量的岩粉和碎石, 大岩片的所占的比例反而降低。

## 2.2 实验数据整理

在滚刀破岩实验中, 采集系统采集到的滚刀三向力是瞬时波动力, 如图 2 所示。在分析实验结果时需要将波动力处理为平均力。平均法向力和平均滚动力的计算方法是对破岩过程中采集到的波动力取算数平

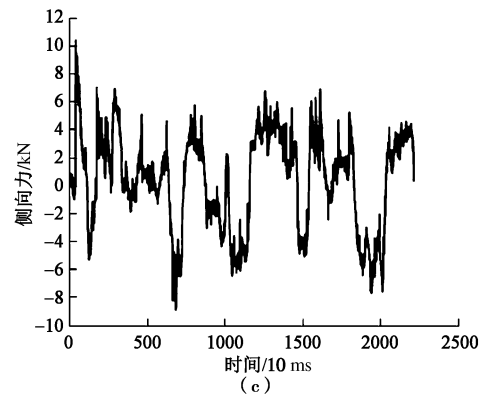


图 2 破岩阶段法向力、滚动力、侧向力和时间

Fig. 2 Normal force, rolling force, side force and time during rock fragmentation stage

均值, 在计算时, 需要剔除最边缘切槽的滚刀力数值和更换贯入度时前 1~2 层采集到的滚刀力数值。因为最边缘的切槽缺少相与邻一侧切槽的相互作用, 其滚刀力数值会比中间切槽的数值大; 更换贯入度时, 新贯入度下的滚刀力会受到上一级贯入度的影响, 滚刀力会大于该贯入度下的滚刀力数值, 因此这两种情况下的滚刀力数值都需要剔除。

比能是反应破岩效率的一个重要指标<sup>[14]</sup>,

$$S_E = \frac{F_R \cdot L}{V}, \quad (1)$$

式中,  $S_E$  为比能 ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ),  $F_R$  为滚动力 (kN),  $L$  为滚刀切割岩石的切割长度 (mm),  $V$  为破岩实验过程中产生岩片的体积, 计算时用岩片的质量除以岩石的密度 ( $\text{m}^3$ )。

处理后得到的实验数据结果如表 1 所示。

## 3 实验结果分析

### 3.1 滚刀间距对滚刀力的影响

在 5 个不同的刀间距下, 平均法向力随贯入度的变化曲线如图 3 所示。由图 4 可知, 在不同的刀间距下, 平均法向力与贯入度二者之间的关系存在共性, 即当贯入度加大时, 对于任何刀间距而言, 平均法向力会随着贯入度的加大相应的增加, 并且当贯入度增大到一定数值后, 滚刀下方破碎区变大, 滚刀再次以每级相同的贯入度切割岩石时所增加的平均法向力会越来越小。但是, 刀间距不同时, 平均法向力与贯入度之间也存在各自的特性。刀间距由 60 mm 增大到 100 mm 时, 当贯入度较小时, 平均法向力的数值随刀间距变化不大, 刀间距对平均法向力的影响不明显, 如贯入度为 0.5 mm 时, 刀间距每增大 10 mm 时, 平均法向力仅增大 3 kN 左右, 原因是当贯入度很小时, 对于所有的刀间距而言, 滚刀对岩石的作用力也很小,

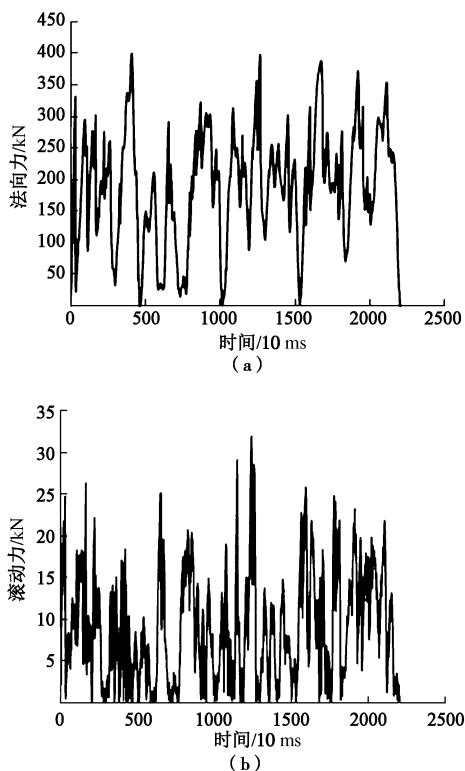


表 1 实验结果汇总

Table 1 Summary of test results

贯入度 $P/\text{mm}$	$s=60\text{ mm}$			$s=70\text{ mm}$			$s=80\text{ mm}$			$s=90\text{ mm}$			$s=100\text{ mm}$		
	$F_N$ /kN	$F_R$ /kN	$S_E$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )	$F_N$ /kN	$F_R$ /kN	$S_E$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )	$F_N$ /kN	$F_R$ /kN	$S_E$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )	$F_N$ /kN	$F_R$ /kN	$S_E$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )	$F_N$ /kN	$F_R$ /kN	$S_E$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )
0.5	90.8	2.7	76.6	92.3	2.9	78.1	96.6	2.9	82.1	98.9	3.1	90.5	100.2	3.5	104.9
1.0	112.1	3.8	51.6	120.5	4.2	51.2	126.2	4.1	52.0	127.9	4.3	64.3	136.3	4.7	70.4
1.5	126.9	4.7	43.7	145.9	5.7	44.3	148.7	5.7	45.0	160.0	5.8	45.4	170.4	6.3	48.1
2.0	142.9	6.2	40.8	165.2	7.0	41.6	174.2	7.9	42.9	190.2	8.0	43.7	20.10	8.3	44.4
2.5	157.9	7.9	47.7	177.0	9.0	45.5	197.6	10.1	41.5	216.7	10.8	40.9	226.5	11.0	41.3
3.0	173.8	9.7	57.9	195.4	11.4	53.3	210.4	12.5	48.9	236.5	13.5	40.0	255.8	15.9	41.6
3.5	183.2	12.9	67.9	205.9	14.9	60.4	227.1	16.7	55.4	255.0	18.3	52.4	273.7	21.0	49.6

在滚刀破岩过程中对切槽下产生的微裂纹数量少，长度足以贯穿相邻的两切槽的微裂纹数量更少，各个切槽间的相互作用不明显，滚刀法向力变化不大。随着贯入度增加，滚刀对岩石的作用力增加，滚刀下的微裂纹数量增加，长度变大，切槽间的相互作用明显，所以不同刀间距下的平均法向力不再相近，而是当贯入度相同时，刀间距越大，平均法向力越大。

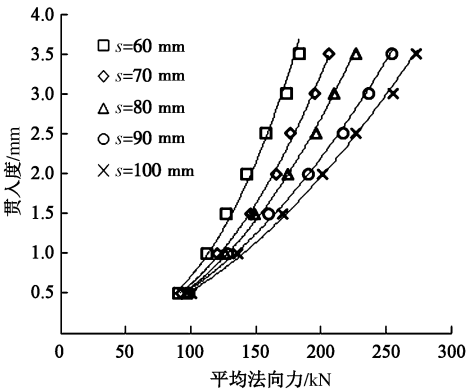


图 3 平均法向力和贯入度

Fig. 3 Average normal force vs. penetration

平均滚动力随贯入度的变化曲线如图 4 所示。在不同的刀间距作用下，平均滚动力和贯入度二者的关系也存在共性，即当贯入度增大时，平均滚动力也会相应的增加，但是增长模式却与平均法向力的增长模式不同。

当贯入度增大到一定的数值后，再次以每级相同的贯入度切割岩石时，滚刀与岩石的接触面积会变大，其滚动时会受到更大的摩擦阻力，因此对于每级相同的贯入度而言所增加平均滚动力会越来越大。当刀间距不同时，平均滚动力与贯入度之间的特性与平均法向力随贯入度之间的特性类似，即当贯入度较小时，平均滚动力的数值随刀间距变化也不大，刀间距对滚动力的影响不大，如贯入度为 0.5 mm 时，刀间距每增大 10 mm 时，滚动力仅增大 0.2 kN 左右，原因是与刀间距对平均法向力的影响类似，在此不再赘述。

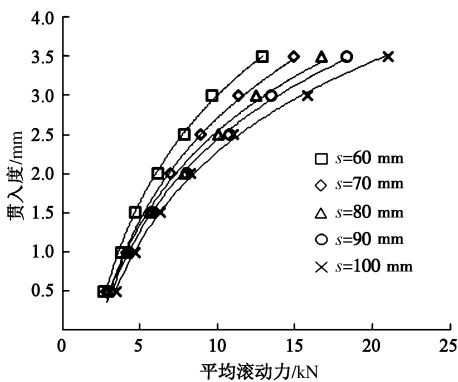


图 4 平均滚动力和贯入度

Fig. 4 Average rolling force vs. penetration

3.2 滚刀间距对破岩效率的影响

不同刀间距下，比能和贯入度的关系如图 5 所示。由图 5 可以发现，在刀间距不同的情况下，比能与贯入度之间的变化趋势存在相似之处，即随着贯入度的增加，比能会逐渐降低，破岩效率逐渐提高，直到达到临界的贯入度，此时比能值最低，破岩效率最高；超过临界贯入度之后，比能又出现增大的趋势，破岩效率又会降低。但是，对不同的刀间距而言，比能最低时，所对应的贯入度却不一样。如刀间距为 60 mm 和 70 mm 时，对应比能最低、破岩效率最高的贯入度为 2.0 mm 左右；刀间距为 80 mm 时，对应比能最低、破岩效率最高的贯入度为 2.5 mm 左右；刀间距为 90 mm 和 100 mm 时，对应比能最低、破岩效率最高的贯入度为 3.0 mm 左右。因此，为了提高破岩效率，当滚刀的刀间距增大时，需要同时增大贯入度。

比能既受到刀间距的影响，又受到贯入度的影响，因此将比能值和刀间距与贯入度的比值做回归分析，如图 6 所示，由图发现比能随刀间距与贯入度的比值呈现先降低后增加的趋势，对于北山花岗岩而言，当刀间距与贯入度的比值为 30 左右时，比能的值达到最小，此时破岩效率最高。按照此规律计算，得出当刀间距为 60 mm 时，最优的贯入度为 2 mm；当刀间距为 70 mm 时，最优的贯入度为 2.3 mm；当刀间距为 80 mm 时，最优的贯入度为 2.7 mm；当刀间距为 90

mm 时, 最优的贯入度为 3 mm; 当刀间距为 100 mm 时, 最优的贯入度为 3.3 mm。此规律很好的印证了各个刀间距下的破岩效率最高时所对应的最优贯入度。

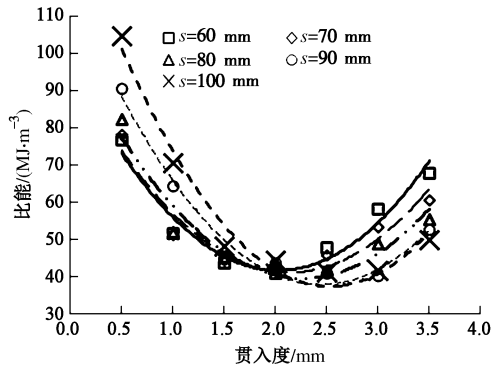


图5 比能和贯入度

Fig. 5 Specific energy vs. penetration

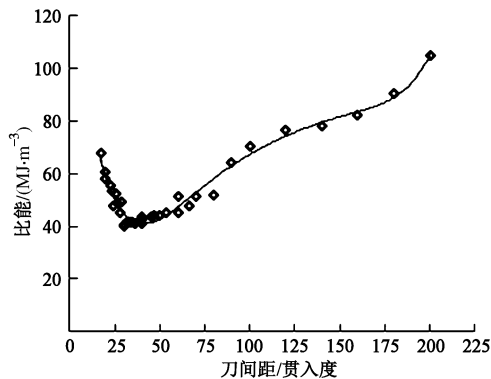


图6 比能和刀间距/贯入度

Fig. 6 Specific energy vs. spacing/penetration

### 3.3 与其他滚刀破岩实验结果的对比及讨论

文献[13, 15]同样应用安装 17 英寸的常切面盘形滚刀的实验仪器对大尺寸的花岗岩进行了线性切割实验, 但這些實驗中所採用的花崗岩與本文的花崗岩的力學參數存在較大的差異, 另外實驗目的不同導致實驗設計時選取的參數不一樣。因此僅針對與本文內容相關部分的数据进行比较。

文献[15]的滚刀破岩实验中, 切割的花岗岩的单轴抗压强度为 158 MPa, 抗拉强度为 6.78 MPa, 弹性模量为 41.0 GPa, 泊松比为 0.234, 纵波波速为 4557 m/s。在实验中共采用了 25, 51, 76 mm 这 3 组不同的刀间距对岩石进行切割, 实验中 76 mm 的刀间距与本文 80 mm 刀间距的实验接近, 因此将二者的数据作为一组样本进行比较。在相似刀间距下, 平均法向力随贯入度的变化曲线如图 7 所示, 平均滚动力随贯入度的变化如图 8 所示。由图 7, 8 可知, 在相似刀间距条件下, 二者的平均法向力和平均滚动力随着贯入度的增加呈现出类似的增长趋势。但在相同的贯入度, 本文的平均法向力和平均滚动力的数值大很多。从已有花岗岩类完整岩体的现场掘进试验结果来看, 文献[2]中新加坡武吉知马花岗岩单轴抗压强度为 172.9

MPa, 点荷载强度为 7.84 MPa, 巴西抗拉强度为 10.55 MPa。贯入度为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm 时, 单滚刀推力分别为 179, 208, 227, 241, 253 kN, 通过对比发现, 本文的实验数据与现场掘进试验结果更接近, 具有实用性。

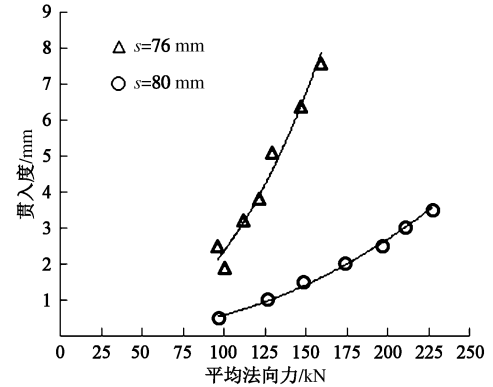


图7 平均法向力和贯入度

Fig. 7 Average normal force vs. penetration

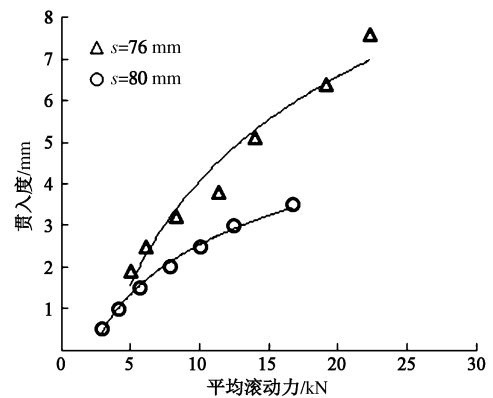
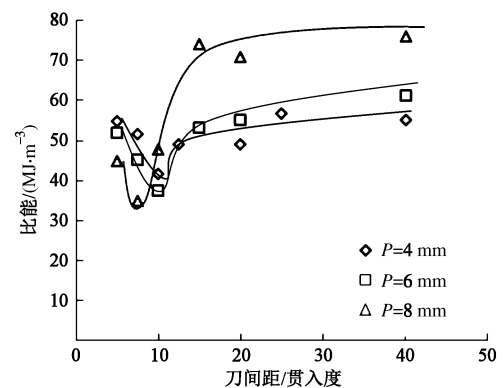


图8 平均滚动力和贯入度

Fig. 8 Average rolling force vs. penetration

文献[13]中, 实验所采取的花岗岩的单轴抗压强度为 209 MPa, 抗拉强度为 9.2 MPa, 弹性模量为 54.5 GPa, 泊松比为 0.15。比能随刀间距与贯入度的比值变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 该实验中, 当刀间距和贯入度的比值为 10 左右时, 比能值达到最小,

图9 比能和刀间距/贯入度<sup>[13]</sup>Fig. 9 Specific energy vs. spacing/penetration<sup>[13]</sup>

此时破岩效率达到最高, 其实验规律与本文相似, 但

最小比能值及对应刀间距与贯入度比值均比本文实验结果小。文献[16]中 Snowdown 等通过一系列不同岩性的岩石滚刀线性破岩试验,研究了不同贯入度下单位能耗、刀间距与贯入度比之间的关系。研究发现,优化刀间距与贯入度比跟岩石脆性指数相关,随着岩石脆性指数的增加而减小。造成这些差别的原因还有很多,如试验机的刚度、岩石结构等,这些因素还有待进一步研究。

## 4 结 语

应用机械破岩实验平台,安装 17 英寸 (432 mm) 的常切面盘形滚刀,选取 5 个刀间距、7 个贯入度对北山花岗岩试样进行线性切割实验。结果表明在贯入度较小时,滚刀间相互作用不明显,因此刀间距对平均法向力和平均滚动力的影响不大。随着贯入度的增加,滚刀对岩石的作用力增加,切槽间产生的微裂纹数量增多,长度变大,刀间距会对平均法向力和平均滚动力产生的影响逐渐变明显,在贯入度相同的情况下,刀间距变大,平均法向力和平均滚动力会相应变大。

在 5 个不同的刀间距下,破岩过程中若增加贯入度,产生的岩片及岩粉会增加,但是岩片占的比例却不一定一直增大,因此增加贯入度并不总是提高破岩效率。对于每一个刀间距而言,增加贯入度会使比能出现先降低后升高的趋势,即破岩效率会先增加后降低,存在一个临界的贯入度使比能值最低,破岩效率最高。破岩效率同时与刀间距和贯入度相关。对于北山花岗岩而言,当刀间距与贯入度的比值为 30 左右时,比能值最低,破岩效率最高。

## 参考文献:

- [1] ZHAO J. Tunnelling in rock-present technology and future challenges[C]// Proceedings of World Tunnel Congress. Prague, 2007: 22 - 32.
- [2] GONG Q M. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2005: 256.
- [3] ACAROGLU O, OZDEMIR L, ASBURY B. A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(5): 600 - 608.
- [4] GONG Q M, JIAO Y Y, ZHAO J. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunnelling and Underground Spacing Technology, 2006, **21**(1): 46 - 55.
- [5] CHO J W, JEON S, YU S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamicfracturing method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, **25**(3): 230 - 244.
- [6] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- [7] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生, 等. 高地应力作用下大理岩岩体的 TBM 掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2522 - 2532. (GONG Qiu-ming, SHE Qi-rui, HOU Zhe-sheng, et al. Experimental study of TBM penetration in marble rock mass under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 2522 - 2532. (in Chinese))
- [8] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H R. Rock excavation by disc cutter[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, **12**(12): 361 - 366.
- [9] SNOWDOWN R A, RYLEY M D, TEMPORAL J. A study of disc cutting in selected British rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech, Abstr, 1982, **19**: 107 - 121.
- [10] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]// Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference. Boston, 1993: 793 - 809.
- [11] CHANG S H, CHOI S W, BAE G J, et al. Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, **21**(3): 271.
- [12] BALCI C, TUMAC D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **30**: 183 - 193.
- [13] 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.
- [14] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, **2**(1): 57 - 73.
- [15] 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.
- [16] SNOWDOWN R A, RYLEY M D, TEMPORAL J. A study of disc cutting in selected British rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, **19**(3): 107 - 121.