

郑植,马洪素,殷丽君,等.基于侵入试验的不同磨损滚刀下北山花岗岩破岩机理研究[J].世界核地质科学,2025,42(3):618-629.doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.012

ZHENG Zhi, MA Hongsu, YIN Lijun, et al. Study on rock fragmentation mechanism of Beishan granite under different worn cutters by indentation test[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 618-629 (in Chinese).

## 基于侵入试验的不同磨损滚刀下北山花岗岩破岩机理研究

郑植<sup>1,2</sup>, 马洪素<sup>1,2</sup>, 殷丽君<sup>3</sup>, 孙健<sup>1</sup>, 王驹<sup>1,2</sup>

1 核工业北京地质研究院, 北京 100029

2 中国国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029

3 北京工业大学, 北京 100029

**摘要** 不同磨损量滚刀的破岩机理是TBM换刀的重要理论依据,为研究不同磨损量滚刀破岩时滚刀力与贯入度(侵入深度)的对应关系、破岩效率,并获得完整极硬岩条件下不同磨损量的单把滚刀破岩机理,采用不同刃宽表征不同磨损量,选择刃宽为17 mm的新刀与4种不同刃宽的平刃磨损刀对尺寸为420 mm×400 mm×500 mm北山花岗岩进行组合累次侵入破岩试验,并对各刀侵入试验全过程、侵入力、破岩体积及比能进行分析。试验结果表明:1)不论新刀或是磨损刀,在单次侵入岩石过程中,均先后经历岩石压密阶段和线性变形阶段,并不时出现力降现象。2)新刀以相同贯入度累次侵入岩石过程中,其最大侵入力和侵入力-侵入深度曲线线性阶段增长速率均呈现先升高、后降低的趋势。3)对于不同平刃磨损刀累次侵入,刃宽越大,其整个累次侵入过程中平均单位侵入深度所需侵入力也越大;而对于每把磨损刀,其单次侵入时单位侵入深度所需的侵入力在整个累次侵入过程均处于上下波动的状态,印证了侵入破岩是一个能量积蓄-能量释放-能量再次积蓄的一个循环往复过程。4)随着磨损刀刃宽增大,其总比能呈线性升高,侵入能力呈线性降低;本试验用于接续侵入的磨损刀中刃宽为18 mm破岩效率最高,侵入更容易。

**关键词** 磨损刀;累次组合侵入破岩试验;刃宽;侵入力;比能;破岩效率

中图分类号 TU94 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)03-0618-12

## Study on rock fragmentation mechanism of Beishan granite under different worn cutters by indentation test

ZHENG Zhi<sup>1,2</sup>, MA Hongsu<sup>1,2</sup>, YIN Lijun<sup>3</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, WANG Ju<sup>1,2</sup>

1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

2 CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China

3 Beijing University of Technology, Beijing 100029, China

**基金项目:**中核集团基础科研项目——完整极硬岩双滚刀协同破岩机理研究(编号:CNNC-JCYJ-202307)资助。

**收稿日期:**2025-04-21 **改回日期:**2025-05-06

**第一作者:**郑植,男,2000年生,在读硕士研究生,研究方向:TBM滚刀破岩。E-mail:zhengzhi0010@163.com

**通信作者:**马洪素,女,1982年生,正高级工程师,博士,主要从事高放废物地质处置工程、地下工程施工技术等领域的科研工作。E-mail:mahongsu2012@163.com

Supported by CNNC Basic Research Project—Study on the mechanism of rock fragmentation by double disc cutters in intact and extremely hard rock(No. CNNC-JCYJ-202307)

**Received date:** 2025-04-21 **revised date:** 2025-05-06

**First author:** ZHENG Zhi, male, born in 2000, master's degree candidate, focusing on rock fragmentation by TBM disc cutters. E-mail: zhengzhi0010@163.com

**Corresponding author:** MA Hongsu, female, born in 1982, senior engineer, PhD, focusing on scientific research on geological disposal engineering of high-level radioactive waste and underground engineering construction technologies. E-mail: mahongsu2012@163.com

**Abstract:** The rock fragmentation mechanism of worn disc cutters provides theoretical guidance for TBM cutter changing. To investigate the correlation between cutter force and penetration depth, evaluate rock fragmentation efficiency, and elucidate the fragmentation mechanism of single worn cutter in extremely hard rock conditions, different blade widths were utilized to represent different wear levels. This study employed sequential indentation tests using both a new cutter with blade width of 17 mm and worn cutters with different blade widths on Beishan granite specimens with dimension of 420 mm×400 mm×500 mm. The penetration process, force characteristics, rock fragmentation volume, and specific energy were systematically analyzed. The key findings include: 1) Both new and worn cutters exhibited consistent rock failure phases – initial compaction followed by linear deformation, with intermittent force drops during single penetration, 2) During sequential penetrations with the same depth for the new cutter, both the maximum penetration force and the force growth rate in linear–deformation stage demonstrated an initial increase then decrease, 3) Worn cutters with larger blade widths required higher average force per unit penetration depth. For each kind of worn cutter, the force–depth ratio of each penetration showed fluctuating tendency during the whole sequential penetration process, confirming the cyclic process of energy accumulation, release and then re–accumulation, 4) Specific energy increased linearly with blade width while the penetration capability decreased correspondingly. The 18 mm–blade cutter exhibited optimal rock fragmentation efficiency and penetration performance in sequential penetration.

**Keywords:** worn disc cutters; sequential indentation test with combination of new cutter and worn cutter; blade width; penetration force; specific energy; rock fragmentation efficiency

北山地下实验室是我国建设的首座高放废物地质处置地下实验室,是列入我国国民经济和社会发展规划“十三五”规划的国家重点项目,在国际上被定义为“第三代地下实验室”即特定场区地下实验室<sup>[1]</sup>。该工程地下主体结构由3条竖井、一条螺旋斜坡道和两层试验水平组成,其中螺旋斜坡道直径7.03 m,长约7.5 km,坡度10%,水平转弯半径255 m,采用TBM开挖,是世界上首条采用TBM开挖的螺旋斜坡道。北山地下实验室工程于2021年开工建设<sup>[2]</sup>,由于北山预选区具有岩体完整、岩石强度高的地质特点,盘形滚刀作为“北山1号”TBM开挖螺旋斜坡道的刀具,在实际施工过程中存在滚刀磨损快、换刀频繁等问题,进而导致TBM贯入度低、施工速度变慢。因此需对滚刀不同磨损程度后的侵入破岩机理进行分析研究,为提高磨损刀破岩效率,优化换刀策略提供依据。

针对单一不同刃型滚刀破岩问题,已有学者进行了大量的试验研究。例如:黄土芳等<sup>[3]</sup>研究了圆柱平头齿、球齿、弹头齿和楔形齿等多种齿形和平头、尖头和钝头滚刀侵入岩石的过程,并根据声发射事件的频率分布图像将岩

石的破裂过程分为接触面边缘环状裂纹产生并慢扩展的弹性压缩阶段、承压核体出现体积膨胀且张性微裂纹明显增多的荷载增加段、水平裂纹朝自由面方向快速失稳扩展的卸载段3个阶段;马亚楠<sup>[4]</sup>等设计并制作直径为11英寸(279.4 mm)的平刃、楔刃及圆刃三种滚刀压头,对北山花岗岩岩样进行了侵入试验,通过对岩样切片并进行荧光法处理,获得了不同刃型滚刀压头作用下岩样内部的损伤变化,发现相同贯入度下,圆刃压头作用下接触应力较大,且会产生较长的侧向裂纹,压头两侧还有较多与岩石表面夹角较小的径向裂纹出现;龚秋明等<sup>[5]</sup>分别应用V刃、平刃和圆刃滚刀对重庆青砂岩进行线性切割破岩试验,发现圆刃滚刀比能最低,破岩效率最优,平刃滚刀破岩效率最差,V刃滚刀则介于两者之间。一般来说,同尺寸的条件下,平刃滚刀的破岩性能较差,但在实际施工中因成本控制等问题,不可避免地会大量使用正常磨损后的平刃滚刀。

在滚刀破岩过程中,能量的损耗问题备受关注。例如:Teale<sup>[6]</sup>提出了比能(specific energy)的概念;Cho等<sup>[7]</sup>对韩国花岗岩进行滚刀线性破岩试验,得到了最大破岩效率(也即

最小比能)对应的刀间距与贯入度的比值,试验中使用三维岩石测量系统 Shape Metrix3D 测量破碎岩片的体积,比简单的公式计算和清扫破碎后岩片称重法更加准确;Li 等<sup>[8]</sup>利用回转切割设备,开展不同切削方式下三滚刀切割红砂岩、石灰岩和花岗岩试验,通过对比顺次回转切割和同时回转切割的比能,发现顺次切削的破岩效率更高;谭青等<sup>[9]</sup>用离散元方法建立了岩石与平刃盘形滚刀的二维数值模型,模拟滚刀结构参数与岩石破碎特性的规律,并指出滚刀刃角在  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  之间、刃宽在  $10 \sim 15 \text{ mm}$  之间时,破岩比能降低,能提高滚刀的破岩效率;曹久磊等<sup>[10]</sup>根据其提出的具有更高计算精度的滚刀破岩力新公式推导出了比能表达式,得到随着刀间距增大,滚刀最优贯入度增大而最小比能减小,且在同一刀间距条件下贯入度增大时,比能先减小后增大,这种变化趋势与相关破岩试验结果一致。

为研究各类刀具破岩后岩石内部损伤及裂纹扩展特征,国内外学者也开展了大量研究。例如: Cook 等<sup>[11]</sup>采用圆形平底压头进行侵入试验,研究了压头作用下岩体破岩裂纹扩展情况,指出岩石可在拉伸或者压缩作用下产生失效破坏,同时,借助声发射监测系统发现侵入力达到峰值力的 45% 时,微裂纹率先在压头圆形的边缘出现,然后在压头下方才出现大量微裂纹并逐渐发育;胡俊伟<sup>[12]</sup>等应用大型机械破岩试验平台及 RSM-SY6 基桩声波检测仪对大岩样破岩前后的声波波速进行测试,研究了不同刀间距条件下 TBM 破岩对岩样损伤深度

的影响,试验结果表明:其他破岩参数都相同条件下,随着刀间距的增大,岩样的损伤深度也增加; Ma<sup>[13]</sup> 等通过数值模拟研究围压对 TBM 滚刀破岩效果的影响,得出裂纹角度随围压比(围压与单轴抗压强度之比)增大而增加,有效裂纹长度在一临界围压比时达到最小,当围压比超过这个临界值时促进岩体破碎,反之亦然。

综上所述,国内外对各种不同刀具在不同刀间距、贯入度等条件下的破岩效果进行了大量研究,取得的成果促进了对 TBM 破岩机理的认识。但对于极硬岩条件 TBM 施工所需解决的大尺寸滚刀磨损后破岩机理及换刀优化等科学问题,仍缺乏深入研究。本文以北山花岗岩为研究对象,选用以“北山 1 号”所用滚刀为原型的不同磨损刀,通过新刀与磨损刀组合侵入破岩试验,对不同侵入深度下的磨损刀破岩过程、侵入力及破岩效率进行分析,为换刀策略优化提供指导。

## 1 磨损滚刀侵入破岩试验设计

### 1.1 刀形参数及岩样制备

应用 YDL-1000 电液伺服万能试验机及不同刃宽(即不同磨损量)的盘形滚刀压头进行侵入破岩试验,如图 1 所示。滚刀压头以“北山 1 号”所用滚刀刀圈为原型,截取弦长为  $160 \text{ mm}$  的一段制作而成,直径 20 英寸( $508 \text{ mm}$ ),刃宽分别为 17、18、24、27 和  $30 \text{ mm}$ (分别表示为 X17、M18、M24、M27 和 M30),表征不同的磨损量,具体刃形参数如表 1 所示。



图 1 侵入试验设备及新刀、磨损刀压头

Fig. 1 Penetration testing equipment with indenters for new and worn disc cutters

表1 不同磨损量滚刀压头刃型参数

Table 1 Blade geometry parameters of disc cutter indenters with different wear

刀头编号	刀刃角/(°)	新刀刃宽/mm	实际刃宽/mm	磨损量/mm
X17	10	17	17	0
M18		17	18	4.15
M24		17	24	21.16
M27		17	27	29.67
M30		17	30	38.18

注: X—楔刃新刀; M—平刃磨损刀。

试验所用花岗岩试样取自甘肃北山预选区,试样尺寸为420 mm×400 mm×500 mm

(长×宽×高)。试样的基本物理力学指标见表2。

表2 北山花岗岩试样的物理力学指标

Table 2 Physical-mechanical parameters of Beishan granite samples

天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
2.61	44.3	0.20	141.7	7.4

## 1.2 不同磨损量滚刀连续侵入破岩试验设计

首先采用新刀(X17)分别对4块岩样进行累次侵入破岩试验,以进行岩样表面处理。每次侵入的贯入度设为0.5 mm,直至侵入后的深度达到1.2 mm。然后选择不同磨损量(刃宽大于新刀刃宽)的磨损刀头接续累次侵入,贯入度设为4组,先后以0.5 mm一次、1.0 mm一次、1.5 mm和2.0 mm各两次的顺序侵入,对应滚刀贯入度逐步增大的破岩过程。通过4组新刀与磨损刀的组合侵入破岩试验,分析17 mm刃宽新刀与不同磨损量的磨损刀组合时在不同侵入深度下的破岩力特征、破岩效率,以获得磨损刀侵入破岩机理,并依据破岩效率分析选出最优磨损量的磨损刀。

侵入试验预加载方式为轴向力加载,加载速率0.1 kN·s<sup>-1</sup>;正式试验加载方式为轴向位移加载,加载速率为0.006 mm·s<sup>-1</sup>。试验过程中实时采集刀头侵入力与侵入深度数据;每次侵入达到预设深度后,停止试验,收集岩粉、岩渣并称量。

## 2 新刀侵入破岩预试验

### 2.1 新刀侵入试验现象分析

X17新刀在每次0.5 mm贯入度条件下累次侵入的岩石碎片和破碎坑如表3所示。由表3可知:1)新刀在初次侵入时,未能形成明显破碎坑,仅有一条中间略宽、两端窄的小裂缝,随

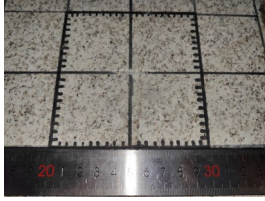





着侵入次数的不断增加,新刀两侧开始出现裂纹并不断向四周扩展,破碎坑逐渐增大。2) X17在每次侵入0.5 mm深度的破岩过程均主要产生细小岩粉,颗粒细腻质地均匀。

### 2.2 新刀侵入力特征分析

侵入试验中侵入力和侵入深度的关系可用于预测机械开挖设备的掘进性能<sup>[14]</sup>。X17新刀在整个侵入过程中的侵入力随侵入深度的变化如图2所示(与表3对应)。由图2可知:1)新刀每次侵入的侵入力随侵入深度的变化趋势大致相同,先后经历岩石压密阶段、岩石线性变形阶段,侵入力随侵入深度线性增长;仅有少数侵入会在达到某一峰值后,侵入力迅速下降,此时新刀下方岩石破碎形成细小岩片,X17仅在第6次侵入有小幅力度降。2)每次侵入结束,提升压头后,岩样存在一定量回弹,当下一次侵入开始时,其侵入起始位置高于上一次侵入的结束位置;每次侵入的平均回弹量为0.3 mm,为贯入度的60%。3)新刀在累次侵入过程中,随着侵入次数的增加,其最大侵入力和侵入力-侵入深度曲线线性阶段增长速率均呈现先升高、后降低的趋势,说明达到相同贯入度的破岩效果存在先难,后易的特点。分析其主要原因为:初始岩样完整,内部无损伤,破岩困难,需要累次侵入,以使岩石内部逐步产生损伤,因此前三次侵入力增长快速,且最大侵入

表 3 新刀每次侵入后的破碎坑及岩石碎片

Table 3 Fracture pits and rock fragments after each penetration by new disc cutters

侵入深度/mm-次序	X17
0.5-1	
0.5-2	
0.5-3	
0.5-4	
0.5-5	
0.5-6	

力由 154 kN 增大到 253 kN; 当岩石内部产生损伤后, 破岩难度开始降低, 后三次随着压头不断侵入, 岩石损伤逐步增大, 达到相同贯入度所需的侵入力逐步降低。这一特征与岩石单轴压缩循环加卸载的应力-应变曲线

特征类似, 反映了岩石由完整到逐步产生损伤的过程。4) 岩石内部产生损伤后, 后三次侵入力-侵入深度曲线的压实阶段逐渐加长, 曲率变化增大, 压实深度增加, 反映了岩石损伤破碎区增大。

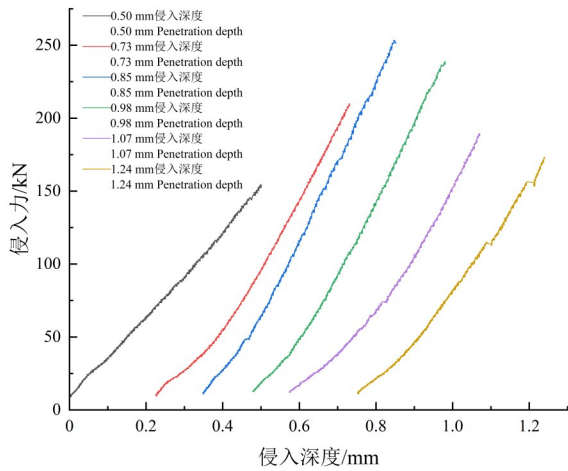


图 2 X17 新刀侵入力随侵入深度的变化曲线

Fig. 2 Curve of penetration force with penetration depth for X17 new disc cutter

### 3 不同刃宽磨损刀侵入破岩试验

#### 3.1 不同刃宽磨损刀侵入试验现象分析

4 种刃宽的磨损刀在不同贯入度条件下累次侵入的破岩情况如表 4 所示。由表 4 可知: 1) 4 种刃宽磨损刀在首次侵入时, 均只有岩粉产生, 形成的破碎坑较 X17 侵入后的无明显变化; 随着贯入度增加, 破碎坑显著增大, 并产生破岩岩片。2) 刃宽较小的磨损刀

M18 开始有岩片产生的贯入度为 1.5 mm, 高于另外三把磨损刀产生岩片时的 1.0 mm 的贯入度; 但刃宽越小的磨损刀, 在整个 6 次侵入过程中产生的大岩片尺寸更大。3) 随着滚刀刃宽的增大, 磨损刀 6 次侵入后形成的破碎坑形状从狭长形逐渐变得方正; 滚刀刃宽越窄, 破碎坑在长度方向的扩展优于宽度方向, 而对于宽刃滚刀 M30, 其破碎坑宽度方向先于长度方向扩展。

表 4 磨损刀不同侵入深度的破碎坑及岩石碎片

Table 4 Fracture pits and rock fragments at different penetration depths for worn disc cutters

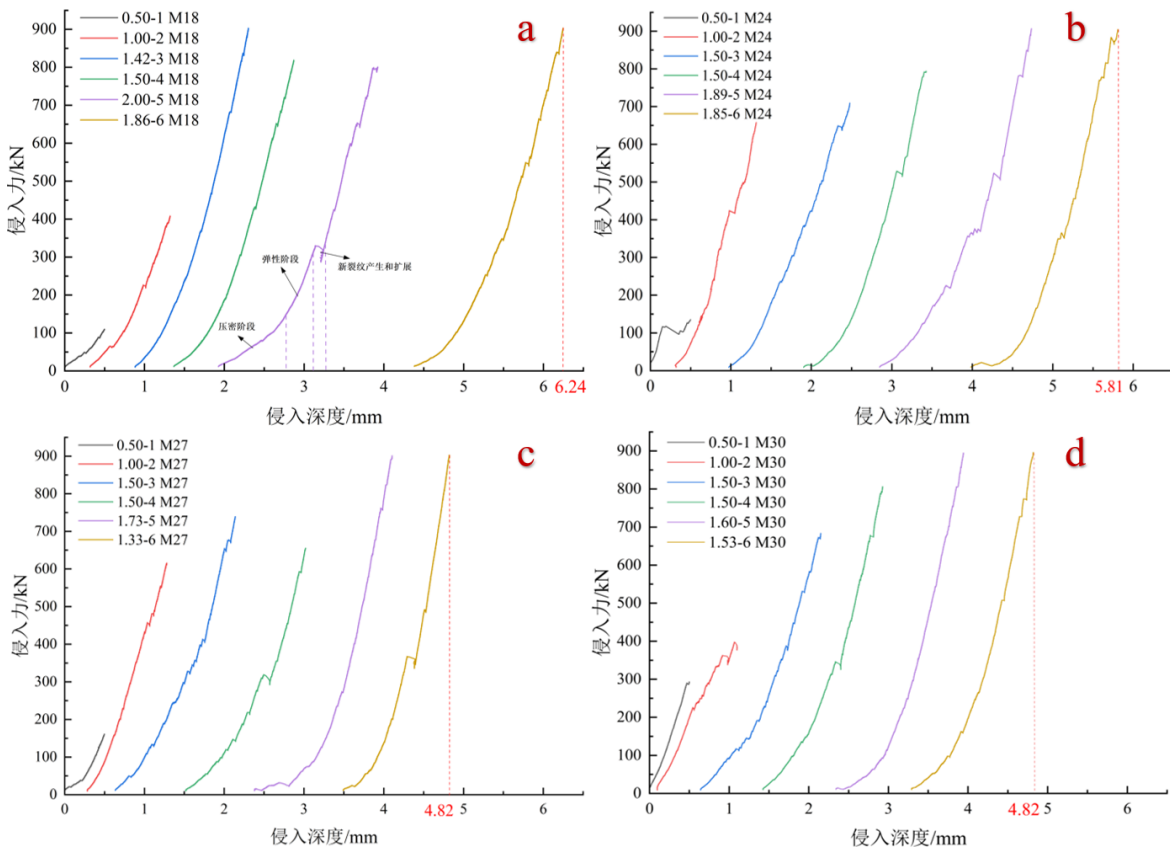
贯入度/mm-次序	M18	M24	M27	M30
0.5-1				
1.0-2				
1.5-3				
1.5-4				
2.0-5				
2.0-6				

### 3.2 不同刃宽磨损刀侵入力特征分析

#### 3.2.1 侵入力-侵入深度曲线特征分析

不同刃宽磨损刀 6 次侵入的侵入力随实际侵入深度的变化如图 3 所示。由图 3 可知：1) 各磨损刀的侵入力随侵入深度的变化过程大致类似，如图 3a 所示，磨损刀在每次侵入初期经历岩石的压密阶段后，岩石处于线性变形阶段，侵入力随侵入深度线性增长；当侵入力到达某一峰值后，侵入力迅速下降，新裂纹扩展至岩样表面，岩石发生破碎，此时的峰值力称之为破岩力。由于磨损刀为平刃，且刃宽较大，因此大部分侵入力的下降幅度较小。2) 随着侵入次数和贯入度增长，对于窄刃磨损刀

M18, 6 次的侵入力-侵入深度曲线线性阶段斜率逐渐降低，最大侵入力呈现先增大，后减小，再增大的趋势；而对于宽刃磨损刀 M30, 其侵入力-侵入深度曲线线性阶段斜率变化不明显，且最大侵入力持续增大，说明对于宽刃滚刀破岩难度增大。3) 随着侵入次数和贯入度增长，不同刃宽磨损刀 6 次侵入下的压密阶段均呈现变长趋势，说明岩石损伤破碎区深度增大。4) 在试验设备极限力 900 kN 限制下，仅 M18 刃宽较小滚刀能贯入度为 2 mm 的侵入，刃宽更大的三把磨损刀最后两次侵入均未达到，其实际贯入度均小于 2 mm，同样说明刃宽越大，达到较大贯入度的破岩难度更大。



a—M18；b—M24；c—M27；d—M30。

图 3 4 种磨损刀侵入全过程侵入力随侵入深度的变化曲线

Fig. 3 Penetration force vs. depth curves during full penetration process for four worn disc cutters

#### 3.2.2 单位侵入深度所需侵入力分析

为表征磨损刀在累次侵入过程中破岩的难易程度变化，计算得到各磨损刀每次侵入最后的峰值力与该次侵入深度增加量的比值（即本次侵入单位侵入深度下所需的侵入力），并通过每把磨损刀 6 次侵入取平均得到平均单

位侵入深度所需侵入力来反映不同磨损刀整体累次侵入破岩的难易程度，具体数据见表 5。不同刃宽磨损刀各次侵入的单位侵入深度所需侵入力和不同刃宽磨损刀累次侵入整体平均单位侵入深度所需侵入力分别如图 4、5 所示。由图 4 和 5 可知：1) 随着累次侵入次数的

表5 磨损刀每次侵入的单位侵入深度所需侵入力及平均单位侵入深度所需侵入力

Table 5 Penetration force per unit depth for each penetration of worn disc cutters and average penetration force per unit depth

磨损刀	侵入次序	单位侵入深度所需侵入力/( $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ )	平均单位侵入深度所需侵入力/( $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ )
M18	1	217.53	447.68
	2	405.27	
	3	634.90	
	4	543.41	
	5	401.32	
	6	483.67	
M24	1	271.25	483.09
	2	659.74	
	3	471.35	
	4	521.12	
	5	480.06	
	6	495.02	
M27	1	323.92	511.09
	2	615.89	
	3	490.93	
	4	436.20	
	5	521.61	
	6	677.96	
M30	1	584.64	517.11
	2	384.37	
	3	451.88	
	4	536.73	
	5	558.78	
	6	586.23	

增加,每把磨损刀单位侵入深度所需的侵入力处于上下波动的状态,这印证了侵入破岩是一个能量积蓄-能量释放-能量再次积蓄的循环往复过程;M18在第3次侵入达到首个单位侵入深度所需侵入力峰值,M24和M27在第2次、M30在首次侵入即达到第1个峰值,说明相同贯入度条件下,磨损刀刃宽越大,其能量积蓄更快。2)除M30以外,其余磨损刀的最小单位侵入深度所需侵入力均出现在首次侵入;M30首次侵入时的单位侵入深度所需侵入力反而接近其在6次侵入中的最大值,其原因是M30

刃宽过大,其宽度显著大于前序X17新刀形成的破碎坑宽度,首次需侵入破碎坑宽度方向外缘岩体,待这部分岩体损伤后才有利于后续的累次侵入,这与前文所述其破碎坑宽度方向先于扩展的现象一致。3)在磨损刀首次侵入时,单位侵入深度所需侵入力呈现随磨损刀刃宽的增大而增加的规律,由 $217.53\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 增大到 $584.64\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;而从整个累次侵入的角度分析(图5),各磨损刀的平均单位侵入深度所需侵入力也随磨损刀刃宽的增大而增大,由 $447.68\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 增大到 $517.11\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

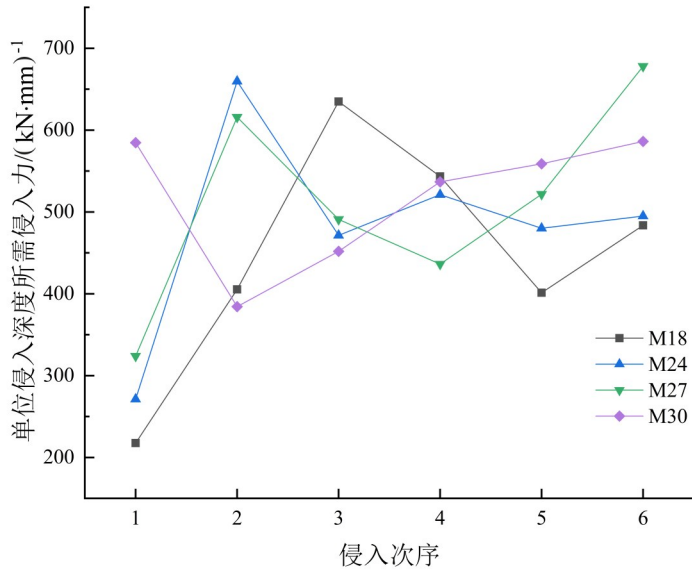


图 4 4 种磨损刀各次侵入单位侵入深度所需侵入力曲线图

Fig. 4 Curves of penetration force per unit depth for each penetration of four worn disc cutters

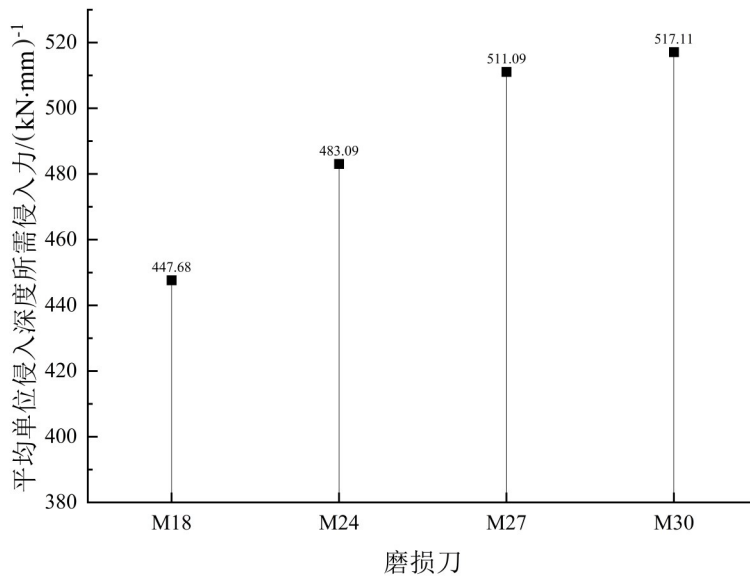


图 5 4 种磨损刀累次侵入条件下平均单位侵入深度所需侵入力

Fig. 5 Average penetration force per unit depth under sequential penetrations for four worn disc cutters

### 3.3 不同刃宽磨损刀破岩效率分析

由侵入力及破岩体积可获得不同磨损刀的破岩比能。破岩比能是磨损刀破碎单位体积岩石所需的能量,其计算式如式(1)。

$$SE = \frac{W}{V} \quad (1)$$

式(1)中:SE—破岩比能,  $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; W—破碎功,通过对侵入力-侵入深度曲线积分面积获得,  $\text{kJ}$ ; V—磨损刀破岩体积,  $\text{cm}^3$ 。

为比较不同磨损刀累次侵入的整体破岩

效率和侵入难易度,对磨损刀6次侵入的总比能进行计算,同时引入一个新指标——侵入能力。在6次侵入完成清渣之后,再用磨损刀进行预压,此时位移传感器示数即为该破碎坑深度,将该深度与每次侵入过程中侵入深度增加量之和的比值定义为侵入能力。从定义可以看出,侵入能力值越接近1,说明该磨损刀侵入能力更强,侵入岩体也就越容易。磨损刀侵入破岩试验各级贯入度下的破碎功、破岩体积及破碎坑深度等见表6。

表 6 磨损刀侵入试验数据

Table 6 Penetration test data of worn disc cutters

磨损刀 类型	贯入度/ mm	破碎功/ J	破碎体积/ cm <sup>3</sup>	总破碎功/ J	总破碎体积/ cm <sup>3</sup>	总比能/ (kJ·cm <sup>-3</sup> )	最终破碎坑深度/ mm	侵入 能力
M18	0.5	25.88	0.19	2 336.73	20.56	0.1136	6.07	0.733
	1.0	165.88	0.75					
	1.42	496.60	2.25					
	1.5	468.40	2.06					
	2.0	568.25	8.66					
	1.86	611.72	6.65					
M24	0.5	47.72	0.39	2 411.84	18.11	0.1332	5.18	0.629
	1	284.02	1.46					
	1.5	461.2	4.11					
	1.5	443.93	2.73					
	1.89	609.35	4.70					
	1.85	565.62	4.72					
M27	0.50	31.60	0.37	1 942.60	13.69	0.1419	4.53	0.599
	1.00	277.46	1.37					
	1.50	429.67	3.40					
	1.50	360.27	2.69					
	1.73	446.67	2.56					
	1.33	396.93	3.30					
M30	0.50	73.70	0.16	2 081.37	14.63	0.1423	4.18	0.548
	1.00	223.07	2.52					
	1.50	398.12	1.89					
	1.50	452.74	3.57					
	1.60	462.66	2.95					
	1.53	471.08	3.54					

不同磨损刀破岩总比能和侵入能力随刃宽的变化如图 6 所示。由图 6 可知,磨损刀破岩总比能和侵入能力均与刃宽呈现较好的线性关系,总比能随磨损刀刃宽的增大线性升高,侵入能力则与刃宽呈反比。当刃宽

由 18 mm 增加到 30 mm 时,破岩比能增加了 25%,侵入能力降低了 25%,说明在逐渐增大贯入度的累次侵入作用下,磨损刀刃宽越大,总体破岩效率和侵入能力降低,侵入更加困难。

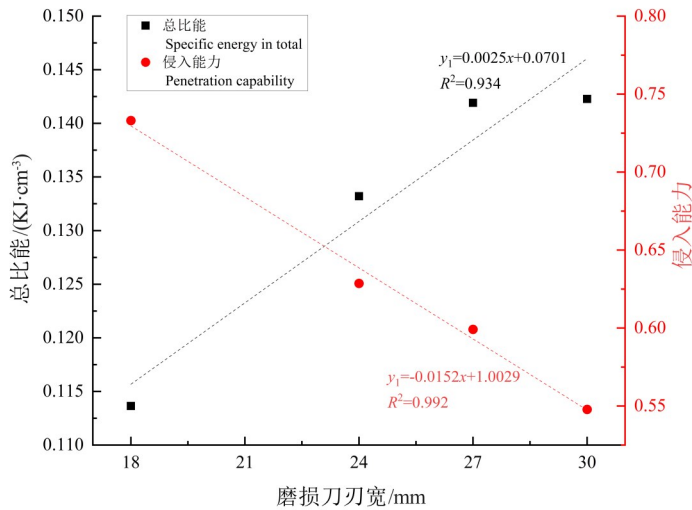


图 6 不同磨损刀破岩总比能和侵入能力随磨损刀刃宽的变化趋势

Fig. 6 Variation trends of total specific energy and penetration capacity with blade width for differently worn disc cutters

#### 4 结论与建议

1) 滚刀单次侵入岩石过程中,其侵入力-侵入深度曲线先后经历压密阶段、线性变形阶段。当新刀以相同贯入度累次侵入岩石过程中,其最大侵入力和侵入力-侵入深度曲线线性阶段增长速率均呈现先升高,后降低的趋势,说明达到相同贯入度的破岩效果存在先难,后易的特点,反映了岩石由完整到逐步产生损伤的过程。

2) 对于平刃磨损刀累次侵入,窄刃磨损刀 M18 的侵入力-侵入深度曲线线性阶段斜率逐渐降低,最大侵入力呈现先增大,后减小,再增大的趋势;宽刃磨损刀 M30 的侵入力-侵入深度曲线线性阶段斜率变化不明显,且最大侵入力持续增大,说明对于宽刃滚刀破岩难度增大。

3) 以破岩比能和侵入能力为指标评价磨损刀破岩效率,试验结果表明:随着磨损刀刃宽增大,总比能呈线性升高,侵入能力呈线性降低,说明在逐渐增大侵入深度的累次侵入作用下,磨损刀刃宽越大,总体破岩效率降低,侵入更加困难。对于北山花岗岩,在刃宽为 17 mm 的新刀侵入后,本试验用于接续侵入的 4 种磨损刀中 M18 的破岩效率最高,侵入更容易。

4) 本文研究成果可为“北山 1 号”TBM 滚刀换刀优化提供试验参考和理论依据。当新刀因异常磨损需要更换成磨损刀时,应尽量选择

磨损量较小的磨损刀(刃宽较小,与新刀刃宽接近),其侵入能力高,可提高破岩效率。

5) 本研究的侵入试验是在单压头无围压条件下进行的,今后可开展围压条件下不同间距双压头侵入试验,以对磨损滚刀的协同破岩机理等进行深入研究。

#### 参考文献

- 1 王驹,陈亮,苏锐,等.中国高放废物地质处置北山地下实验室重大进展[J].世界核地质科学,2023,40(增刊1):473-490.  
WANG Ju, CHEN Liang, SU Rui, et al. Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China—update 2023 [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(Sup.1):473-490(in Chinese).
- 2 WANG Ju, CHEN Liang, SU Rui, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3):411-435.
- 3 黄士芳,金国栋.静压侵入作用下的岩石声发射[J].东北工学院学报,1981(2):91-100.  
HUANG Tufang, JIN Guodong. Acoustic emission characteristics of rock under static pressure indentation [J]. Journal of Northeast Institute of Technology, 1981(2):91-100(in Chinese).
- 4 马亚楠,龚秋明,殷丽君,等.适用于北山花岗岩的小直径盲井掘进机滚刀刃型初探[J].世界核地

- 质科学,2023,40(4):992-1001.
- MA Yanan, GONG Qiuming, YIN Lijun, et al. Preliminary study on the shape of disc cutters for small-diameter blind shaft boring machine used in Beishan granite [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023,40(4):992-1001(in Chinese).
- 5 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.
- GONG Qiuming, WU Fan, MA Shuai, et al. Effect of cutter tip type parameters on rock-breaking by linearcutting experiments [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(3):1098-1108(in Chinese).
- 6 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.
- 7 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(3):37-54.
- 8 Li Xing, Chen Kun, Fu Jinwei, et al. Experiment study on high-efficiency rock-breaking mechanism of TBM with a varying number of disc cutters [C]//3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME 2017). Atlantis Press, 2017: 251-255.
- 9 谭青,李建芳,夏毅敏,等.盘形滚刀破岩过程的数值研究[J].岩土力学,2013,34(9):2707-2714.
- TAN Qing, LI Jianfang, XIA Yimin, et al. Numerical research on rock fragmentation process by disc cutter [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2707-2714(in Chinese).
- 10 曹久磊,俞缙,张竹清,等.考虑破岩模式的TBM滚刀破岩力计算模型[J].煤炭学报,2023,48(8): 3300-3311.
- CAO Jiulei, YU Jin, ZHANG Zhuqing, et al. Force calculation model of TBM disc cutter based on rock breaking mode [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023,48(8):3300-3311(in Chinese).
- 11 Cook N G W, Hood M, Tsai F. Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter [C]// *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1984,21(2):97-107.
- 12 胡俊伟,龚秋明,殷丽君,等.滚刀线性切割破岩的损伤深度分析[C]//《工业建筑》编委会,工业建筑杂志社有限公司.《工业建筑》2018年全国学术年会论文集(下册).北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室,河南省吴鼎建筑基础工程有限公司,2018:938-942.
- HU Junwei, GONG Qiuming, YIN Lijun, et al. Analysis of damage depth of rock fragmentation of the linear cutting by TBM cutter [C]//Editorial Committee of Industrial Building, Industrial Building Magazine Press Co., Ltd. (Eds.). 2018. *Proceedings of the 2018 National Academic Annual Conference on Industrial Building (Volume II)*. Co-organized by Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education (Beijing University of Technology), Henan Haoding Construction Foundation Engineering Co., Ltd., 2018:938-942(in Chinese).
- 13 Ma Hongsu, Yin Lijun, Ji Hongguang. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011,48(6):1021-1033.
- 14 Aydin S, Hanifi C, Cemal B, et al. Suggestion of new models for predicting performance of raise boring machines based on indentation tests [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 138(8): 105181.