

马函,殷丽君,龚秋明,等.基于线性破岩试验的小直径盲井掘进机边缘滚刀破岩振动特征分析[J].世界核地质科学,2025,42(2):329-342. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.009

MA Han, YIN Lijun, GONG Qiuming, et al. Analysis for the vibration characteristics of gage cutter of small diameter blind shaft boring machine based on linear cutting test[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 329-342 (in Chinese).

基于线性破岩试验的小直径盲井掘进机边缘滚刀破岩振动特征分析

马函¹, 殷丽君¹, 龚秋明¹, 马洪素^{2,3}

1 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124

2 核工业北京地质研究院, 北京 100029

3 中国国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029

摘要 我国北山高放废物处置坑拟采用小直径盲井掘进机开挖, 而边缘滚刀作为掘进机控制成洞精度和最易损耗的关键部件, 其合理设计与布置是实现高放废物处置坑高效开挖的前提。应用小直径盲井掘进机预选的11英寸(279 mm)圆刃盘形滚刀, 针对北山花岗岩开展边缘滚刀线性切割破岩试验研究, 分析不同贯入度、安装倾角下的边缘滚刀破岩过程及滚刀振动特征。试验结果表明: 相同贯入度下, 20°安装倾角滚刀的平均法向力总体较大, 侧向力较小, 但平均滚动力两滚刀较为接近。相同贯入度下, 不同安装倾角滚刀破岩时的三轴振动加速度平均峰值均以侧向加速度最大, 法向次之, 切向最小; 安装倾角越大, 滚刀三轴振动加速度的差异越大, 侧向振动强度越大, 且侧向高幅值振动的频率越高; 随贯入度的增加边缘滚刀的三轴振动加速度均增大, 且滚刀破岩中强振动的频次增大, 贯入度对边缘滚刀侧向振动加速度的影响比法向及切向更为显著。本研究还可为小直径盲井掘进机刀盘优化布置提供参考。

关键词 小直径盲井掘进机; 边缘滚刀; 安装倾角; 贯入度; 振动特征

中图分类号 TU45 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636 (2025) 02-0329-14

Analysis for the vibration characteristics of gage cutter of small diameter blind shaft boring machine based on linear cutting test

MA Han¹, YIN Lijun¹, GONG Qiuming¹, MA Hongsu^{2, 3}

1 Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

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

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

Abstract: The Beishan high-level radioactive waste disposal pit in China is planned to be excavated by a small-diameter blind shaft boring machine, and the gage cutter is the key component of the boring machine to control the accuracy of the hole and the most vulnerable to loss. Its reasonable design and layout are the premise to realize the efficient excavation of the high-level radioactive waste disposal pit. In this paper, the

基金项目: 中国国家原子能机构核设施退役治理专项(编号: 科工二司[2020]194号)资助

收稿日期: 2025-02-25 **改回日期:** 2025-03-17

第一作者: 马函, 女, 1997年生, 在读硕士研究生, 主要从事隧道掘进机破岩方面的研究工作。

Supported by the National Atomic Energy Agency of China Special Fund for Decommissioning of Nuclear Facilities Research Project Science and Industry Division (No. 科工二司[2020]194)

Received date: 2025-02-25 **revised date:** 2025-03-17

First author: MA Han, female, born in 1997, master's degree candidate, focusing on the research work of tunnel boring machine rock breaking. E-mail: mahan0430@163.com

linear cutting test of gage cutter is carried out for Beishan granite by using 11 inch round edge cutter preselected by small diameter blind shaft boring machine. The rock breaking process and vibration characteristics of gage cutter under different penetration depth and installation angle are analyzed. The test results show that under the same penetration depth, the average normal force of the 20° installation angle cutter is generally larger, the lateral force is smaller, but the average rolling force of the two cutters are closer. Under the same penetration depth, the average peak value of triaxial vibration acceleration of gage cutters with different installation angles is the largest in the lateral vibration acceleration, followed by the normal vibration acceleration and the tangential vibration acceleration. The larger the installation angle, the greater the difference in the triaxial vibration acceleration of the gage cutters, the greater the lateral vibration intensity, and the higher the frequency of the lateral high-amplitude vibration. With the increase of penetration depth, the triaxial vibration acceleration of the gage cutter increases, and the frequency of strong vibration in the rock breaking of the gage cutter increases. The influence of penetration depth on the lateral vibration acceleration of the gage cutter is more significant than that in the normal and tangential vibration accelerations. This study can also provide a reference for the optimal layout of the cutterhead of small-diameter blind shaft boring machine.

Keywords: small-diameter blind shaft boring machine; gage cutter; installation angle; penetration depth; vibration characteristics

深部地质处置作为高放废物处置方法之一,已被国际一致认可和接受^[1]。中国高放废物地质处置地下实验室选址于甘肃省北山地区,岩体以高强度高磨蚀性的花岗岩为主^[2-4],从长期稳定性和安全性角度出发,因机械开挖法能满足处置坑成洞精度高、洞壁光滑、围岩损伤控制要求高的需求而被选为高放废物处置坑的主要施工方法。Posiva Oy在芬兰奥尔基洛托地下500 m隧道中采用盲井掘进机开挖直径1.5 m处置坑^[5],施工过程中楔齿滚刀断齿严重。瑞典使用Robbins公司研制的KBS-3竖井掘进机开挖直径1.75 m的核废料处置坑^[6],该掘进机首先将边缘滚刀由双排镶齿滚刀全部更换成单刃盘形滚刀,解决了洞壁大量环形凹槽的问题,但仍存在滚刀布置不合理,造成滚刀磨损严重,破岩效率未达到预期。因此边缘滚刀合理布置是处置坑开挖设备研制的关键。

滚刀根据安装位置的不同分为中心滚刀、正滚刀和边缘滚刀,其中在过渡区的边缘滚刀法线与刀盘中心线的夹角即为安装倾角。边缘滚刀在受力方式、裂纹扩展模式及破岩效率等方面都与正滚刀有较大的差异^[7-8]。滚刀破岩过程比较复杂,压头侵入试验是早期研究滚刀破岩机理普遍采用的方法。马亚楠等^[9]采用

平刃、楔刃及圆刃共3种刃型滚刀对北山花岗岩进行侵入试验,分析认为圆刃滚刀破岩效率较好。当压头斜向侵入时,材料内的应力场将显著区别于仅有法向或切向荷载单独作用的情况^[10]。Mishnaevsky^[11]采用RB-24型切割器对脆性玻璃材料进行切削试验发现,当刀具倾斜切削时,损伤区域内的主裂纹方向与切削力的方向一致。Shah和Wong^[12]计算了切向和法向荷载同时作用下材料内的应力分布,发现与竖向荷载单独作用相比,其应力等值线形状偏向横向荷载作用方向,并认为切向力可以降低产生赫兹裂纹时所需要的临界破坏荷载。

与压头侵入试验相比,室内全尺寸破岩试验可以消除尺寸效应并采用工业用TBM刀具真实模拟滚刀开挖,更精确分析滚刀受力及破岩效率变化。Geng^[13-14]通过插入楔形钢架,在边缘滚刀倾角分别为10°、20°和30°条件下进行线性切割试验,指出倾斜滚刀较垂直滚刀法向力与比能均更小,破岩效率更高。Zhao等^[15]基于全尺寸线性切割试验对垂直和倾斜滚刀破岩对比分析得出,倾斜滚刀侧向力较大,法向力与裂纹扩展范围都较小,裂纹倾向于加载方向扩展。李侠^[16]与张恒毅^[17]分别利用室内试验与数值计算的方法均得出安装倾角过大会导致破岩效率降低,滚刀磨损量和偏磨情况增

加。另外滚刀作用下岩石特有的阶跃破碎特征使得滚刀在破岩过程中不可避免地发生振动,剧烈振动将造成刀盘变形及损伤。薛亚东^[18]等通过对砂浆试件线性切割试验中的滚刀振动监测,发现贯入度越大,滚刀振动越强;节理面对振动波的传递有一定的阻隔作用;最优的刀间距与贯入度比值可使得滚刀运行更平稳。李英涛^[19]将滚刀三轴振动采集系统应用到室内线性破岩试验,分析滚刀三轴加速度峰值、振动信号能量与贯入度的关系,结果显示:当滚刀倾斜安装时,总振动信号能量显著增大,即滚刀振动更为剧烈。目前全尺寸线性切割试验大部分针对边缘滚刀破岩效率及影响因素进行研究,而针对边缘滚刀破岩过程中的振动特征研究较少。

本文依据马亚楠等^[9]的北山处置坑小盲井掘进机预选刀具的研究成果,并综合考虑处置坑开挖对边缘滚刀高效破岩及控制洞壁损伤的要求,选取直径11英寸且刃口半径9 mm圆

刃盘形滚刀作为边缘滚刀,针对北山花岗岩开展线性切割破岩试验研究,分析不同贯入度、安装倾角下的边缘滚刀破岩过程及其振动特征,为后续北山处置坑小直径盲井掘进机的刀盘优化布置及高效破岩提供依据。

1 边缘滚刀线性破岩试验设计

1.1 试验设备及岩样制备

北京工业大学的机械破岩实验平台主要由机械系统、液压系统、电控系统和数据采集系统4部分组成,如图1所示。该平台可通过更换试样箱来实现线性切割和旋转切割两种方式破岩,试样箱能够容纳的岩样最大尺寸为1.0 m×1.0 m×0.6 m。该平台可以通过调整刀具类型、安装倾角和试样类型等条件参数和刀间距、贯入度和围压大小等破岩参数来模拟多种工况的破岩过程^[20]。平台还配备有滚刀力及振动采集系统用以实时采集滚刀破岩时的三向力(法向力、侧向力及滚动力)及振动特征。



图1 机械破岩实验平台

Fig. 1 The experimental platform for mechanical rock fragmentation

试验采用取自甘肃北山高放废物地质处置地下实验室场址区的地表完整花岗岩试样,

试样尺寸为980 mm×980 mm×600 mm,其物力学指标见表1。

表1 北山花岗岩试样物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical property of Beishan granite samples

天然密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
2.60	38.90	0.19	124.50	6.50

1.2 试验设计

试验用边缘滚刀为 11 英寸且刃口半径为 9 mm 的圆刃盘形滚刀,因小盲井掘进机的刀盘直径为 1.4 m,其刀盘的过渡区半径较小故最外侧边刀安装角度不宜大于 30° ,且因机械破岩实验平台刀架最大安装角度限制,故本试验边缘滚刀安装倾角设为 10° 和 20° 。此外依据马亚楠^[21],王鹏超等^[22]针对小盲井掘进机预选的 11 英寸正滚刀

进行的刀间距对破岩效率的影响分析,边缘滚刀破岩刀间距设定为 35 mm,破岩贯入度设定 1.0~4.0 mm 共 5 级。 20° 安装倾角滚刀的安装如图 2 所示,刀架上方安装滚刀三向力及振动传感器,破岩过程中对滚刀的三向力及振动进行实时采集,滚刀三向力传感器采集频率为 100 Hz,振动传感器采集频率为 3 200 Hz,量程为 ± 200 G,具体破岩试验设计参数见表 2。

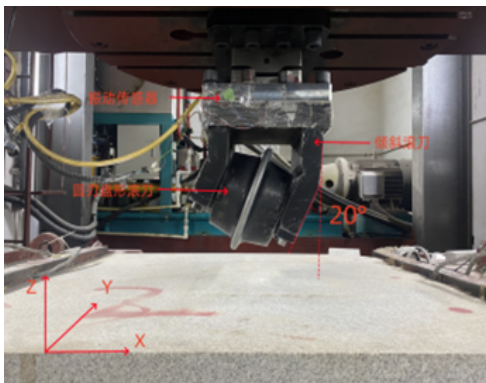


图 2 20° 安装倾角滚刀及振动传感器安装

Fig. 2 Installation of gage cutter with 20° installation angle and vibration sensor

表 2 破岩试验设计参数

Table 2 Design parameters for the linear cutting test of gage cutter

试验工况	安装倾角/ $^\circ$	刀间距/mm	贯入度 P /mm	线性切割速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	振动监测
1	10	35	1.0、2.0、2.5、3.0、4.0	20	滚刀振动三轴加速度
2	20	35			

不同安装倾角边缘滚刀线性破岩试验步骤:

1) 固定花岗岩试样,安装 20° 边缘滚刀、滚刀三向力传感器及振动传感器。

2) 正式破岩试验前需进行岩样表面处理。即先以最小贯入度 1.0 mm,刀间距 35 mm 进行线性切割破岩,使岩样表面形成一系列等间距的切槽,模拟 TBM 滚刀实际破岩过程中的岩面,进行多层切割后直至获得稳定的滚刀三向力后即完成了表面处理,消除了岩样平整表面对滚刀破岩的影响。每级贯入度下按设定刀间距完成所有切槽后为完成一层切割,如图 3 所示。

3) 完成表面处理,依据设计贯入度进行正式的逐级破岩试验,为消除上一级贯入度影响,每级贯入度进行 4 层切割破岩。破岩过程中实时采集滚刀三向力及振动三轴加速度。

4) 每层切割破岩完成后,拍照记录清渣前后岩面并收集破岩产生的岩渣进行称重,对各级贯入度产生的岩渣进行筛分试验。筛分试验后,选取各级贯入度下 30 块典型岩片进行三轴尺寸测量。

5) 上述试验工作完成后,更换 10° 安装倾角滚刀,按试验参数设计再重复以上试验步骤开展 10° 边缘滚刀的破岩试验,其边缘滚刀破岩示意图如图 3 所示。

2 滚刀破岩过程分析

在岩样表面处理初始阶段,岩样内存在的微小裂隙随着应力增加而闭合,滚刀破岩过程中仅在与岩面接触时发出轻微闷响声,滚刀侵入岩石并在岩面产生岩粉,岩面在挤压作用下形成一排刃痕。当开始正式破岩时,贯入度设定为 1.0 mm,此时滚刀对岩石

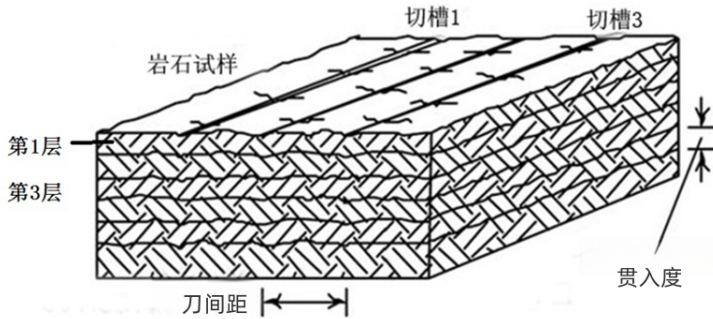
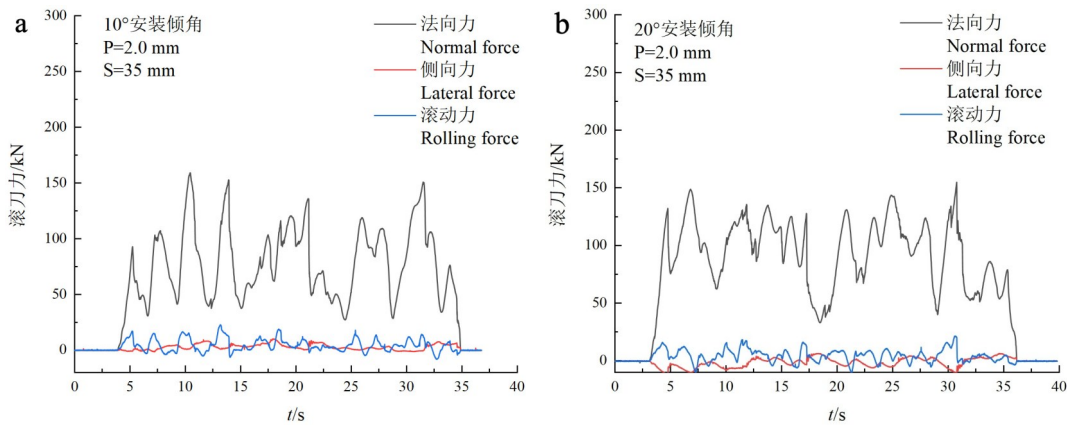


图 3 边缘滚刀破岩示意图
Fig. 3 Rock-breaking schematic diagram of gage cutter

的破坏作用略微加强, 刀刃在切槽底部形成压碎区, 压碎区的岩粉在刀刃的法向压力和原岩的侧向压力限制下被重新压实, 形成长条状的灰白色密实核。破岩振动较小, 在刀刃两侧会产生一系列细小的岩石碎片, 仅在偶尔形成相互贯通的岩片时有剧烈振动。随着贯入度增加至 2.0~3.0 mm 时, 破岩现象剧烈, 声响极大, 滚刀两侧有碎片崩出。法向力

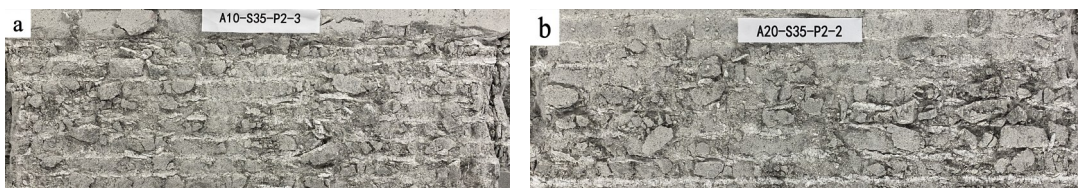
变化频率加快, 如图 4 所示, 呈现快速上升和陡降状态, 同时贯入度增加造成滚刀振动频次和幅值显著增加。破岩产生的岩渣量显著增多, 各切槽间岩片分布较为均匀, 贯入度 2.0 mm 破岩后岩面及典型岩片如图 5~6 所示。滚刀 20° 安装倾角破岩产生的岩片与 10° 安装倾角破岩产生的岩片相比尺寸更大, 形状更加趋近扁平状。



a—10° 安装倾角滚刀力; b—20° 安装倾角滚刀力。
a-The cutting forces of the cutter with 10° installation angle; b-The cutting forces of the cutter with 20° installation angle.

图 4 不同安装倾角滚刀贯入度 2.0 mm 时滚刀力曲线

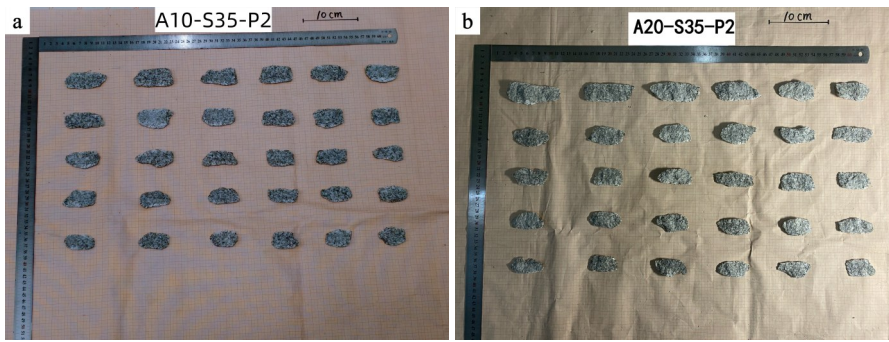
Fig. 4 The force curve of gage cutter with different installation angles at penetration depth of 2.0 mm



a—10° 安装倾角滚刀破岩面; b—20° 安装倾角滚刀破岩面。
a-Rock cutting surface for the cutter with 10° installation angle; b-Rock cutting surface for the cutter with 20° installation angle.

图 5 贯入度 2.0 mm 不同安装倾角滚刀破岩岩面

Fig. 5 The rock cutting surface for the cutter with different installation angles at the penetration depth of 2.0 mm



a—10°安装倾角滚刀破岩典型岩片；b—20°安装倾角滚刀破岩典型岩片。

a- Typical rock chips for the cutter with 10° installation angle; b- Typical rock chips for the cutter with 20° installation angle.

图6 不同安装倾角在贯入度2.0 mm破岩产生典型岩片

Fig. 6 Typical rock chips produced by the cutter with different installation angles at penetration depth of 2.0 mm

贯入度2.0 mm滚刀法向力、Z轴振动加速度与岩面破碎情况如图7所示。由于滚刀切槽不平整,滚刀力处于波动变化。滚刀力上升过程中滚刀下形成密实核、岩粉或局部产生微小岩片此时滚刀力出现连续的小幅力降,该阶段滚刀以低加速度为特征的法向振

动,其Z轴加速度一般在 $\pm 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 范围内。滚刀力上升至较大值后有较大岩片形成,滚刀力大幅骤降并使滚刀产生较高加速度的强烈振动。如图7中12、14、16和29 s左右,法向力的瞬时变化可达75 kN,Z轴加速度超过 $\pm 350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

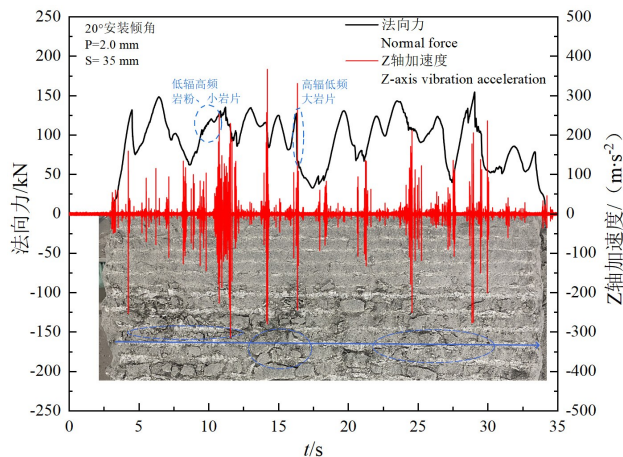


图7 2.0 mm贯入度破岩阶段滚刀法向力、Z轴加速度与岩面关系

Fig. 7 Relationship between normal force of gage cutter, Z-axis acceleration and rock surface in rock breaking stage with penetration depth of 2.0 mm

通过上述分析可知,滚刀力上升阶段,滚刀刀刃以及与其接触的岩体所受应力逐渐增大。首先,与刀刃接触的岩石矿物颗粒发生破碎,形成密实核与岩粉。滚刀出现抖动,伴随连续振动,但滚刀应力无法完全释放,振动幅值有限。当应力超过岩石强度后,滚刀下方裂纹扩展,岩片形成并崩出,应力释放的瞬间形成剧烈振动,滚刀力也出现不同程度突降。一般而言,滚刀力越大,滚刀变形储能越高,岩体发生破碎时,振动也更加剧烈。

3 滚刀力及破岩效率分析

3.1 滚刀破岩结果处理

滚刀破岩过程中采集的滚刀力均为瞬时力,为消除岩样边界及上一级贯入度的岩下损伤的影响,数据处理时将临近边界和每一级贯入度的第1层破岩数据剔除掉,滚刀三向力取滚刀力曲线的算术平均值,平均法向力以 F_N 表示,平均侧向力以 F_S 表示,平均滚动力以 F_R 表示。

比能(SE)是衡量破岩效率的重要指标,可以定义为切削单位体积岩体所消耗的能量,计算方法如式(1):

$$SE = \frac{F_R \times L}{V} \quad (1)$$

式(1)中: F_R —切割过程中的平均滚动力, kN; L —滚刀切割岩石的长度, mm; V —破岩试验过程中产生岩片的体积,由岩渣的质量与岩样密度相除所得, m^3 。

表 3 滚刀破岩试验结果汇总

Table 3 Summary of test results for the linear cutting tests

贯入度 $P/$ mm	安装倾角 10°					安装倾角 20°				
	F_N/kN	F_S/kN	F_R/kN	$SE/ (MJ \cdot m^{-3})$	CI	F_N/kN	F_S/kN	F_R/kN	$SE/ (MJ \cdot m^{-3})$	CI
1.0	70.29	4.13	2.40	110.25	290.22	72.40	3.49	2.55	71.05	321.05
2.0	90.06	4.54	5.16	80.73	332.53	92.93	3.50	5.19	70.87	332.57
2.5	91.87	4.57	6.40	83.55	320.61	98.78	3.97	7.08	83.59	318.40
3.0	104.06	5.94	7.96	85.61	312.5	104.78	5.13	7.98	80.64	327.14
4.0	114.44	8.63	11.17	100.99	301.48	109.51	7.78	10.04	95.47	310.43

3.2 滚刀破岩效率分析

在相同贯入度条件下, 20° 安装倾角滚刀的平均法向力总体上大于 10° 安装倾角, 平均法向力随贯入度的增加而增大, 但增长速率逐渐降低; 而贯入度对平均侧向力影响较大, 随着贯入度增加平均侧向力增大且增长速率逐渐升高, 且相同贯入度下 10° 安装倾角滚刀的平均侧向力大于 20° 安装倾角; 在相同贯入度下滚刀平均滚动力随安装倾角的变化较小且较为接近。

粗糙度指数(CI)可以表征破岩效率的高低, 该值越大, 代表大岩片占比越多, 破岩效率也越好。其值可以定义为筛分后各个筛网的累计筛余率之和, 计算方法如式(2):

$$CI = \sum \frac{W_i}{W_a} \quad (2)$$

式(2)中: W_i —大于第 i 层筛分孔径的岩片质量, kg; W_a —筛分的岩渣总质量, kg。

经计算处理后的试验结果见表 3。

不同安装倾角滚刀的破岩比能随贯入度的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 边缘滚刀破岩比能整体上均随贯入度呈先减小后增大的趋势。 10° 安装倾角滚刀的破岩比能在贯入度为 2.0 mm 时最低为 $80.73 MJ \cdot m^{-3}$ 。而 20° 安装倾角滚刀在贯入度 1.0~2.0 mm 时破岩比能变化不大, 贯入度 2.0 mm 时最小破岩比能为 $70.87 MJ \cdot m^{-3}$ 。而相同贯入度下, 20° 安装倾角滚刀破岩比能均小于 10° 安装倾角。

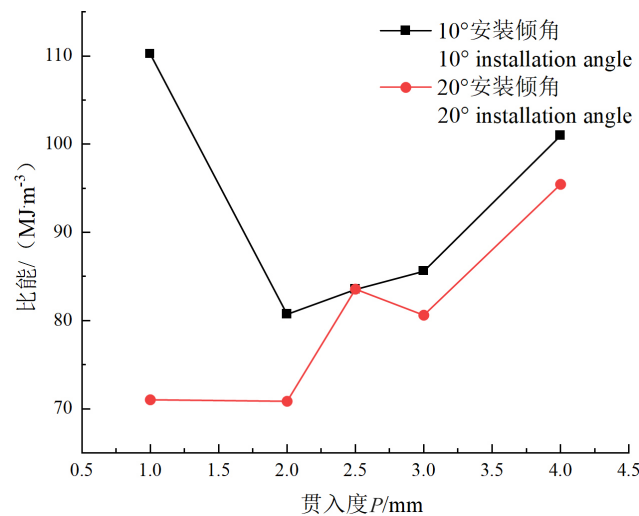
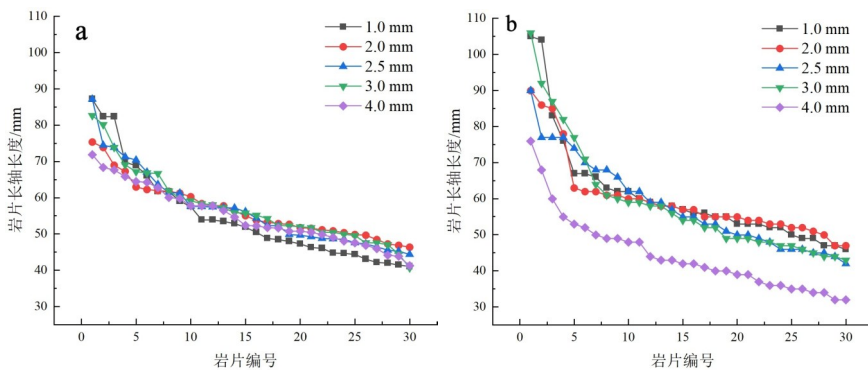


图 8 比能随贯入度变化曲线

Fig. 8 The variation curve of coarseness index with penetration depth

不同安装倾角滚刀的破岩粗糙度指数在贯入度介于 2.0~2.5 mm 之间时的数值均较大,表明滚刀在此贯入度下破岩产生的大块岩片占比最高,岩粉和碎片占比最低,破岩效率较高。一般而言,岩片长轴尺寸可以反应岩片的块度大小,长轴尺寸越大,岩片越大,破岩效率就越高^[23]。

不同安装倾角条件下典型大岩片长轴测量曲线如图 9 所示。由图 9 可知,20°安装倾角滚刀在各级贯入度下破岩产生的典型岩片长轴曲线比 10°安装倾角滚刀更为离散,且 20°安装倾角滚刀在 2.0 mm 贯入度下破岩的岩片长轴尺寸更大,滚刀在对应贯入度下的破岩效率更高。



a—10°安装倾角滚刀典型岩片长轴分布; b—20°安装倾角滚刀典型岩片长轴分布。

a- The long axis distribution of typical rock chips for the cutter with 10° installation angle; b- The long axis distribution of typical rock chips for the cutter with 20° installation angle.

图 9 典型大岩片长轴分布

Fig. 9 The long axis distribution of typical large rock chips

3.3 滚刀破岩振动特征分析

滚刀破岩是岩石内部能量不断积累与释放的过程,因此滚刀作用下岩石具有阶跃破碎特征,同时也导致了滚刀的振动。通过破岩过程中滚刀振动特征的分析不仅可以评价滚刀的破岩效率,而且对于优化刀盘布置降低盲井掘进机滚刀非正常磨损具有重要意义。

3.3.1 安装倾角对滚刀振动影响分析

滚刀破岩时会在法向(Z轴)、侧向(X轴)、切向(Y轴)产生不同程度的振动,在室内全尺寸线性切割试验中,滚刀每一次线性切割过程均获得一条独立的振动数据。对不同安装倾角滚刀破岩时的三轴加速度进行采集,为消除每个切槽破岩时自身岩体条件造成的随机性,取各贯入度下滚刀破岩的 200 个较大振动加速度数值进行分布统计,并作算数平均处理记为振动加速度平均峰值。贯入度 2.0 mm 时滚刀破岩三轴振动加速度峰值分布统计如图 10 所示,不同安装倾角条件下的滚刀三轴振动加速度平均峰值见表 4。由分析可知,不同安装倾角滚刀破岩时的三轴振动加速度平均峰值均以侧向加速度最大,法向次之,切向最小。但

10°安装倾角滚刀的三轴振动加速度峰值分布特征较为接近,而 20°安装倾角滚刀的三轴振动加速度峰值分布差异较大,且其侧向振动加速度平均峰值显著高于法向及切向。此外,20°安装倾角滚刀的侧向振动加速度平均峰值明显高于 10°安装倾角滚刀,而其切向振动加速度平均峰值低于 10°安装倾角滚刀。其原因为贯入度 2.0 mm 时,20°安装倾角滚刀破岩效率高,此时在滚刀侧向力较小情况下两相邻切槽间即可形成较大的贯通岩片,大岩片破碎释放较大能量导致滚刀侧向振动较强;同时贯通岩片导致切槽岩面较平整,滚刀切向力较小因此切割方向即(切向)滚刀振动较小。

依据滚刀振动数据可得出滚刀法向、侧向和切向加速度分别与时间 t 的函数关系,分别以 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 表示。以侧向(X轴)加速度为例,单次切割振动信号能量 VSE_X,计算方法如式(3):

$$\text{VSE}_X = \sum x^2(t) \quad (3)$$

式(3)中: x —消除趋势项并降噪处理后的滚刀加速度取值, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

表 4 不同贯入度下滚刀三轴振动加速度平均峰值汇总/ (m·s⁻²)

Table 4 The average peak values of triaxial vibration acceleration at different penetration depth/ (m·s⁻²)

贯入度 P/mm	安装倾角 10°			安装倾角 20°		
	Acc_X _{max}	Acc_Y _{max}	Acc_Z _{max}	Acc_X _{max}	Acc_Y _{max}	Acc_Z _{max}
1.0	140.06	106.05	117.58	246.98	100.01	154.40
2.0	249.94	196.48	221.33	330.38	152.61	256.40
2.5	340.66	276.06	328.54	384.68	174.25	313.69
3.0	346.07	293.91	321.19	366.98	150.87	322.87
4.0	390.26	341.25	378.19	451.05	188.76	403.63

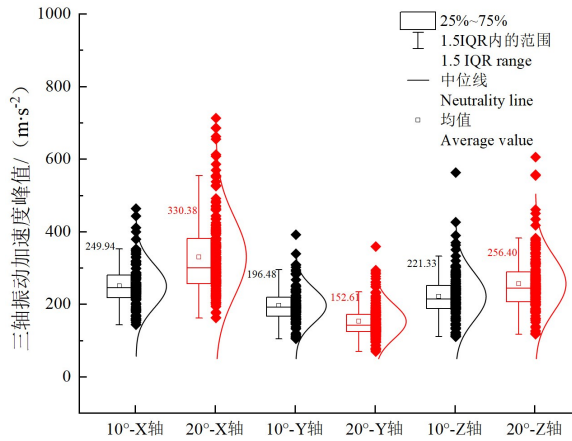


图 10 不同安装倾角滚刀三轴振动加速度峰值统计

Fig. 10 Statistics for the peak value of triaxial vibration acceleration of the gage cutters

振动能量是评价振动强度的重要指标,不同安装倾角在各级贯入度破岩时平均每个切槽的侧向、切向和法向振动能量(VSE_X、VSE_Y、VSE_Z)统计见表 5。贯入度 2.0 mm 破岩时不同安装倾角滚刀三轴振动信号能量对比如图 11 所示。由图 11 可知,20°安装倾角滚

刀破岩时在法向和侧向的振动信号能量均大于 10°安装倾角,在切向的振动信号能量小于 10°安装倾角。此外,不同安装倾角滚刀破岩时均以侧向振动能量最大,即滚刀在该向的振动强度最大,可见安装倾角对滚刀侧向振动强度影响较大。

表 5 不同贯入度下滚刀平均振动信号能量汇总/ (m²·s⁻⁴)

Table 5 The average vibration signal energy of each notch at different penetration depth/ (m²·s⁻⁴)

贯入度 P/mm	安装倾角 10°			安装倾角 20°		
	VSE_X	VSE_Y	VSE_Z	VSE_X	VSE_Y	VSE_Z
1.0	2.86 × 10 ⁶	1.56 × 10 ⁶	1.90 × 10 ⁶	5.58 × 10 ⁶	1.32 × 10 ⁶	3.14 × 10 ⁶
2.0	8.03 × 10 ⁶	5.86 × 10 ⁶	6.44 × 10 ⁶	9.83 × 10 ⁶	2.54 × 10 ⁶	8.29 × 10 ⁶
2.5	1.03 × 10 ⁷	6.75 × 10 ⁶	8.05 × 10 ⁶	1.26 × 10 ⁷	2.92 × 10 ⁶	8.02 × 10 ⁶
3.0	9.11 × 10 ⁶	6.87 × 10 ⁶	7.29 × 10 ⁶	1.51 × 10 ⁷	3.05 × 10 ⁶	1.59 × 10 ⁷
4.0	1.74 × 10 ⁷	1.29 × 10 ⁷	1.35 × 10 ⁷	2.00 × 10 ⁷	3.77 × 10 ⁶	2.09 × 10 ⁷

贯入度 2.0 mm 时滚刀破岩三轴振动时域曲线如图 12 所示。由图 12 可知,不同安装倾角滚刀的三轴振动在时间上具有一致性,但各轴的振动强度差异明显,即侧向振动强度最大,法向次之,切向最小。滚刀破岩过程中振

动信号能量的增幅大小与振动加速度时域变化也具有一致性,即振动加速度幅值较大处,振动信号累计能量激增。

贯入度 2.0 mm 时滚刀破岩三轴振动频域曲线如图 13 所示。由图 13 可知,不同安装倾角下

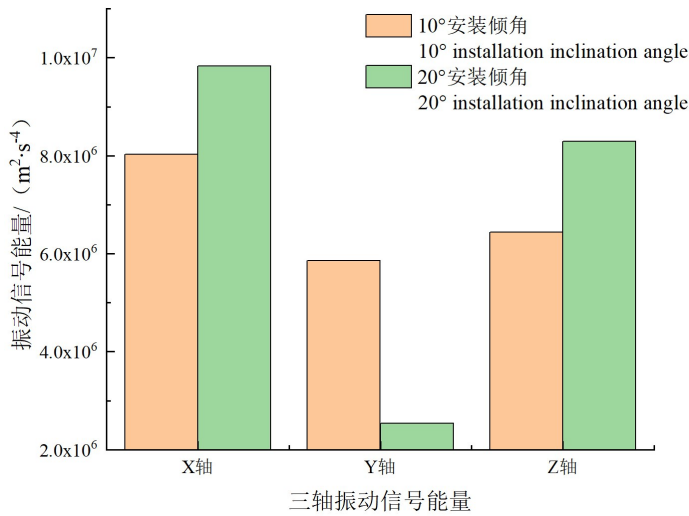
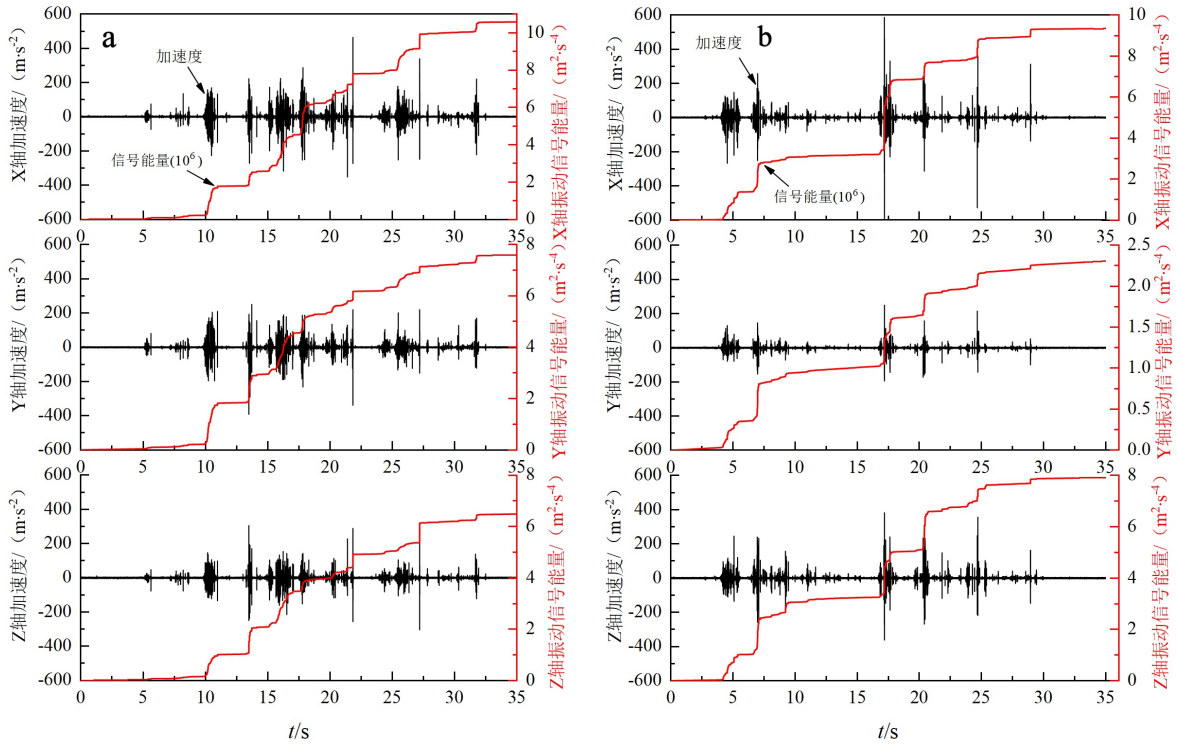


图 11 贯入度 2.0 mm 时边缘滚刀三轴振动信号能量统计

Fig. 11 Energy of triaxial vibration signal of the gage cutters at the penetration depth of 2.0 mm



a—10° 安装倾角滚刀振动加速度时域分析；b—20° 安装倾角滚刀振动加速度时域分析。

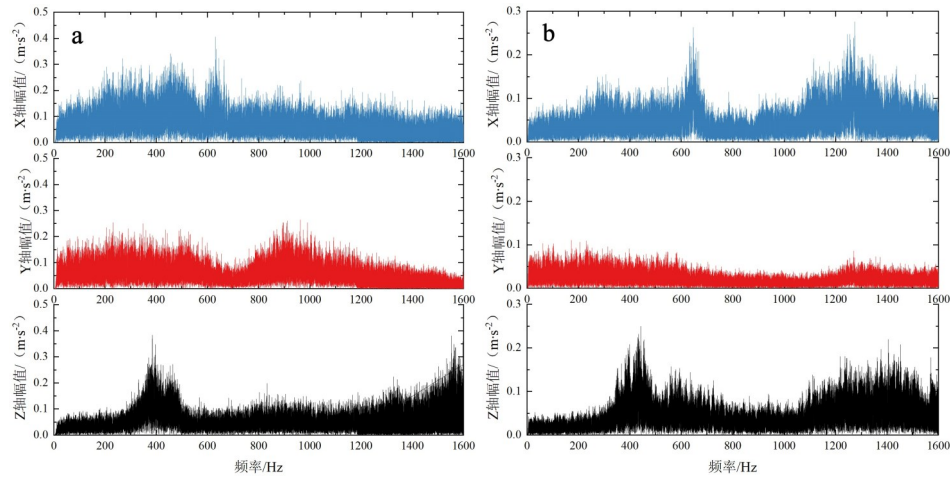
a-Time domain analysis of triaxial acceleration for the cutter with 10° installation inclination angle; b-Domain analysis of triaxial acceleration time for the cutter with 20° installation inclination angle.

图 12 贯入度 2.0 mm 时滚刀三轴加速度时域分析图

Fig. 12 Time domain analysis diagram of triaxial acceleration at penetration depth of 2.0 mm

滚刀在同一方向的振动频率存在差异,即安装倾角对振动的频率分布有显著影响。滚刀 10° 安装倾角破岩时,X 轴较大振幅的频率分布为 200~600 Hz,Y 轴较大振幅的频率分布为 200~400 Hz、800~1 000 Hz,Z 轴较大振幅频率分布为 300~500 Hz、1 500~1 600 Hz;而滚刀 20° 安装倾角破岩的

较大振幅频率分布更广,X 轴较大振幅的频率分布为 650 Hz 附近、1 100~1 400 Hz,Y 轴较大振幅的频率分布为 100~600 Hz 附近,Z 轴较大振幅频率分布为 300~500 Hz、1 300~1 500 Hz,因此安装倾角对 X 轴的振动频率分布范围影响最大,即 20° 安装倾角滚刀振动较为剧烈。



a—10°安装倾角滚刀三轴加速度频域分析; b—20°安装倾角滚刀三轴加速度频域分析。
a- Frequency domain analysis of triaxial acceleration for the cutter with 10° installation inclination angle; b- Frequency domain analysis of triaxial acceleration for the cutter with 20° installation inclination angle.

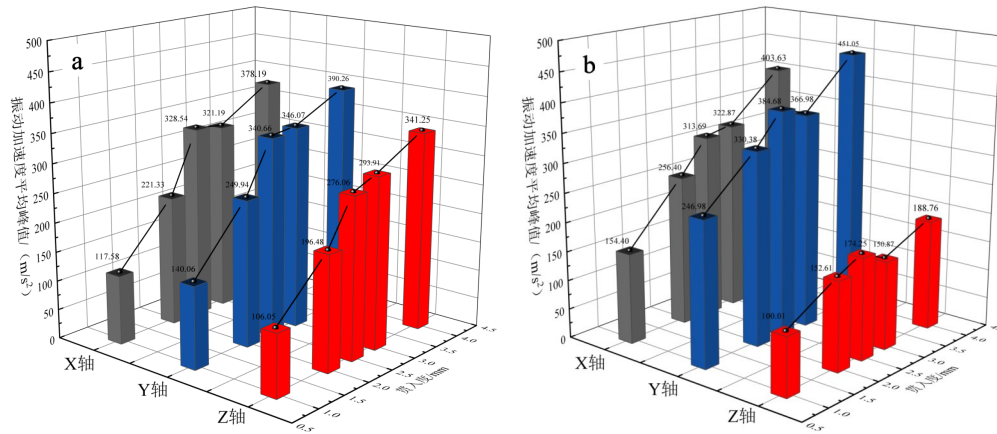
图 13 不同安装倾角滚刀三轴加速度频域分析图

Fig. 13 Frequency domain analysis diagram of triaxial acceleration for the gage cutters

3.3.2 贯入度对滚刀破岩振动特征的影响分析

不同安装倾角的滚刀三轴振动加速度平均峰值与贯入度的关系如图 14 所示。由图 14 可知,三轴振动加速度平均峰值整体上均随贯入度的增加而增大。滚刀贯入度较小时,即贯入度介于 1.0~2.5 mm 之间时,滚刀三轴振动加速度峰值随贯入度增加其增长速率较大,当滚

刀贯入度大于 2.5 mm 后,滚刀三轴加速度峰值随贯入度增加其增长速率降低。各级贯入度下,20°安装倾角滚刀的 X 轴、Z 轴振动加速度总体稍大于 10°安装倾角,且在较小贯入度 (1.0~2.5 mm) 时,两轴振动加速差距较大;而各级贯入度下 20°安装倾角滚刀的 Y 轴振动加速显著低于 10°安装倾角滚刀,且在较大贯入度 (大于 2.5 mm) 时,振动加速差距较大。



a—10°安装倾角三轴振动加速度平均峰值; b—20°安装倾角三轴振动加速度平均峰值。
a- Triaxial vibration acceleration peak of 10° installation angle; b- Triaxial vibration acceleration peak of 20° installation angle.

图 14 不同贯入度滚刀三轴振动加速度平均峰值

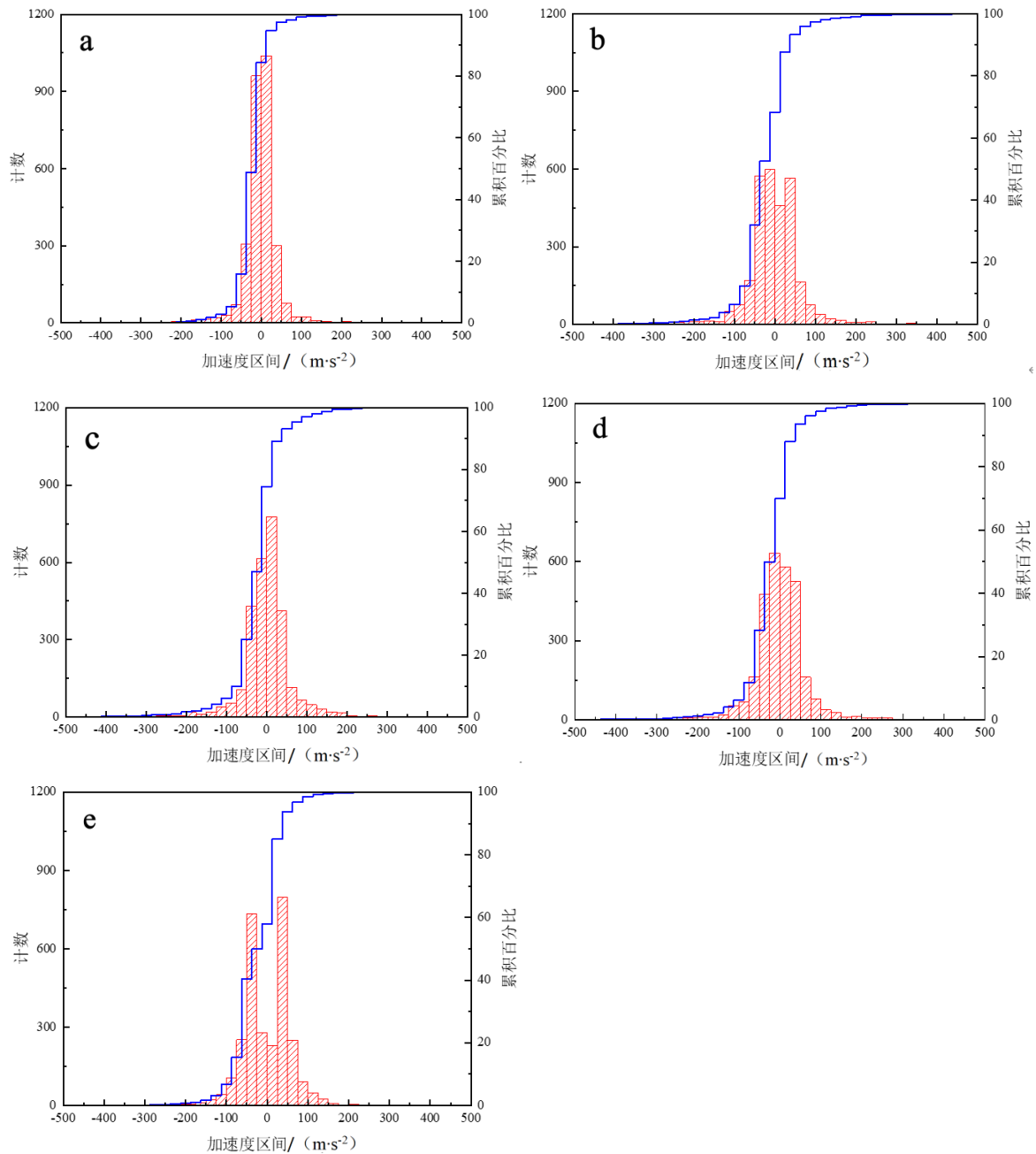
Fig. 14 Triaxial vibration acceleration peak of different penetration

不同贯入度下 20°安装倾角滚刀破岩时 X 轴振动加速度的频率直方图汇总如图 15 所示。由图 15 可知,贯入度较小时,X 轴振动加速度

较小且其变化范围较小,总体处于较弱的振动状态。如贯入度 1.0 mm 时,在 $\pm 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 区间内的振动加速度占比超过 70%;随着贯入度增

加, X 轴振动加速度逐渐增大, 且较小的振动加速度占比呈现降低趋势, 如贯入度 2.0 mm 时, 振动加速度在 $\pm 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 区间的占比降低至 35% 以下, 而 $\pm 25 \sim \pm 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 区间的振动加速度占比达到 55%。贯入度 4.0 mm 时, 振动加速度在 $\pm 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 区间的占比降低至 19% 以下, $\pm 25 \sim \pm 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 区间的振动加速度占比达到

78%。由以上分析可知, 贯入度的增加可增大滚刀破岩中强振动的频次, 一方面滚刀振动与岩片形成直接相关, 贯入度增大, 滚刀下方裂纹扩展密集, 破岩形成的岩片振动、滚刀振动更加频繁。另一方面, 贯入度增加, 破岩滚刀力增大, 滚刀刀刃变形储能更高, 岩片产生时释放的能量越高, 振动也更加剧烈。



a—贯入度 1.0 mm; b—贯入度 2.0 mm; c—贯入度 2.5 mm; d—贯入度 3.0 mm; e—贯入度 4.0 mm。
a—Penetration depth of 1.0 mm; b—Penetration depth of 2.0 mm; c—Penetration depth of 2.5 mm; d—Penetration depth of 3.0 mm; e—Penetration depth of 4.0 mm.

图 15 不同贯入度下 X 轴振动加速度的频率直方图

Fig. 15 Frequency histogram of X-axis vibration acceleration under different penetration depths

4 结 论

通过对不同安装倾角(10°和20°)的边缘滚刀破岩滚刀力、破岩效率、破岩岩渣及振动特征分析,可得如下结论:

1)在相同贯入度下,20°安装倾角滚刀的平均法向力总体较大,侧向力较小,但平均滚动力两滚刀较为接近。随着贯入度的增加,两滚刀的平均法向力及侧向力均增大,但平均侧向力增长速率较快。

2)不同安装倾角滚刀破岩比能整体上都随贯入度呈先减小后增大的趋势。相同贯入度下,20°安装倾角滚刀破岩比能均小于10°安装倾角,且两滚刀均在贯入度2.0 mm时,破岩效率最高。粗糙度指数及典型岩片统计分析结果与破岩效率分析结果相一致。

3)相同贯入度下,不同安装倾角滚刀破岩时的三轴振动加速度平均峰值均以侧向加速度最大,法向次之,切向最小;安装倾角越大,滚刀三轴振动加速度的差异越大,侧向振动强度越大,且侧向高幅值振动的频率越高。

4)随贯入度的增加边缘滚刀的三轴振动加速度均增大,且滚刀破岩中强振动的频次增大。各级贯入度下,20°安装倾角滚刀的X轴、Z轴振动加速度总体稍大于10°安装倾角,且在较小贯入度时,两轴振动加速差距较大;而各级贯入度下20°安装倾角滚刀的Y轴振动加速显著低于10°安装倾角滚刀,且在较大贯入度时,振动加速差距较大。

致谢:感谢审稿专家和编辑部老师为本文撰写和修改提出的建设性意见。

参考文献

- 1 潘自强,钱七虎.高放废物地质处置战略研究[M].北京:原子能出版社,2009.
PAN Ziqiang, QIAN Qihu. A strategic study on geological disposal of high-level radioactive waste in China[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009 (in Chinese).
- 2 王驹.中国高放废物地质处置21世纪进展[J].原子能科学技术,2019,53(10):2072-2082.
WANG Ju. Advances in the 21st century geological

disposal of high level radioactive waste in China[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 2072-2082(in Chinese).

- 3 王驹,苏锐,陈亮,等.中国高放废物地质处置地下实验室场址筛选[J].世界核地质科学,2022,39(1): 1-13.
WANG Ju, SU Rui, CHEN Liang, et al. Site selection of underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 1-13 (in Chinese).
- 4 陈亮,王驹,杨峰,等.高放废物地质处置地下实验室开挖及精细探测关键技术[J].世界核地质科学,2023,40(1):1-16.
CHEN Liang, WANG Ju, YANG Feng, et al. Excavation and fine detection technology of the underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(1): 1-16(in Chinese).
- 5 Jorma Autio, Timo Kirkkomaki. Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring method [R]. Forsmark: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1996.
- 6 Andersson C, Johansson Å. Boring of full scale deposition holes at the Äspö Hard Rock Laboratory. Operational experiences including boring performance and a work time analysis [R]. Forsmark: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2002.
- 7 杨志法,王思敬,高丙丽.坐标投影图解法及其在岩石块体稳定分析中的应用[M].北京:科学出版社,2009:85-97.
YANG Zhifa, WANG Sijing, GAO Bingli. Coordinate projection graphic method and its application in stability analysis of rock blocks[M]. Beijing: Science Press, 2009: 85-97(in Chinese).
- 8 孙玉科,古迅同.赤平极射投影在岩体工程地质学中的应用[M].北京:科学出版社,1980:103-112.
SUN Yuke, GU Xuntong. Application of stereographic projection in geomechanics of rock mass engineering [M]. Beijing: Science Press, 1980: 103-112 (in Chinese).
- 9 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).
- 10 BORESI A P, SCHMIDT R J, SIDEBOTTOM O M. Advanced mechanics of materials [M]. New York: Wiley, 1993.
- 11 MISHNAEVSKY Jr L L. Investigation of the cutting of brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1994, 34(4): 499-505.
- 12 SHAH K R, WONG T F. Fracturing at contact surfaces subjected to normal and tangential loads [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(5): 727-739.
- 13 GENG Q, WEI Z, MENG H. 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.
- 14 TUMAC D, FERIDUNOGLU C, ERGIN H. Estimation of rock cuttability from shore hardness [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 5 (40): 477-490.
- 15 Zhao X B, Yao X H, Gong Q M, et al. Comparison study on rock crack pattern under a single normal and inclined disc cutter by linear cutting experiments[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 479-489.
- 16 李侠. TBM 边缘滚刀破岩效率及岩下损伤特征的试验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
LI Xia. Experimental study on rock breaking efficiency and rock damage fracture by TBM gage disc cutters[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019 (in Chinese).
- 17 张衡毅. 基于数值方法的 TBM 滚刀破岩机理及破岩效率影响因素研究[D]. 北京:北京工业大学, 2022.
ZHANG Hengyi. Numerical study on rock fragmentation mechanism and the influence factors of breaking efficiency by TBM cutters [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022(in Chinese).
- 18 薛亚东, 廉旭, 李兴, 等. 滚刀破岩引致岩石振动特性试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018(增刊 2): 337-344.
XUE Yadong, QIAN Xu, LI Xing, et al. Experimental study on rock vibration characteristics induced by rock breaking of rock cutter[J]. Tunnel Construction, 2018 (Sup.2): 337-344(in Chinese).
- 19 李英涛. 临空面辅助 TBM 滚刀破岩机理及效率研究[D]. 北京:北京工业大学, 2022.
LI Yingtao. Study on the rock breaking mechanism and efficiency by TBM cutter assisted with a free surface [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022 (in Chinese).
- 20 龚秋明, 张浩, 李真, 等. 机械破岩试验平台研制[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2): 17-25.
GONG Qiuming, ZHANG Hao, LI Zhen, et al. Development of a testing platform for mechanical rock breaking[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (2): 17-25(in Chinese).
- 21 马亚楠. 特硬岩地层小直径盲井掘进机刀具选型与布置研究[D]. 北京:北京工业大学, 2023.
MA Yanan. Study on the cutter selection and layout for small diameter blind shaft boring machine in extremely hard rocks[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023(in Chinese).
- 22 王鹏超, 殷丽君, 龚秋明, 等. 高放废物处置坑小直径盲井掘进机预选刀具破岩性能对比分析[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(4): 792-804.
WANG Pengchao, YIN Lijun, GONG Qiuming, et al. Comparative analysis of rock breaking performance based on preselected cutters of small-diameter blind shaft boring machine in high-level radioactive waste disposal pit[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41 (4): 792-804(in Chinese).
- 23 龚秋明, 周小雄, 殷丽君, 等. 基于线性切割试验碴片分析的滚刀破岩效率研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 363-368.
GONG Qiuming, ZHOU Xiaoxiong, YIN Lijun, et al. Study of rock breaking efficiency of TBM disc cutter based on chips analysis of linear cutting test [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (3): 363-368 (in Chinese).