不同应力水平下截齿侵入角度对机械破岩效果的影响*

林卫星[1],龚永超[1],王少峰[2],尹土兵[2],陆锦涛[1],曾维豪[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;
3.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭市 411201)

摘要:非爆破机械掘进采矿相对于钻爆法具有扰动小、效率高、支护成本低、巷道成型效果好等优点,优化选取截齿参数对高效掘进具有重要意义。根据某金属矿山-525 m、-606 m、-653 m中段地应力实测数据及围岩力学试验结果,建立PFC颗粒流截齿破岩模型,在三个中段应力水平下设置90°、60°、45°三种截齿侵入角度进行单向卸荷后的截齿破岩数值模拟分析。研究结果表明,伴随应力水平上升,截齿破岩形成的密实核面积减小,条状裂纹扩展长度缩短,破岩过程中产生的微裂纹数量也随之减少,表明高应力条件对岩石破碎具有抑制作用;45°侵入角破岩工况下截齿的牵引力及切割力波动程度较小且切割力始终保持较高水平;同时,45°侵入角破岩产生的微裂纹数量也远大于60°和90°侵入角。综合力学响应与岩石破碎效果分析,45°侵入角在不同应力水平下均具有最优的破岩性能。

关键词:截齿破岩;PFC;侵入角度;单向卸荷;破岩效果

中图分类号:TD421 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0237-09

Effects of Intrusion Angle of Picks on Mechanical Rock Breaking Efficiency Under Varying Stress Levels

LIN Weixing[1], *GONG Yongchao*[1], *WANG Shaofeng*[2], *YIN Tubing*[2], *LU Jintao*[1], *ZENG Weihao*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Non-explosive mechanical excavation mining has the advantages of small disturbance, high efficiency, low support cost and good roadway shaping effect compared with drilling and blasting method, and the optimal selection of pick parameters is of great significance to efficient excavation. Based on the measured ground stress data and rock mechanics test results of the -525 m, -606 m, and -653 m sections of a certain metal mine, a PFC particle flow rock breaking model of picks was established. Numerical simulation analysis of pick rock breaking after unidirectional unloading was conducted with three types of intrusion angle of 90°, 60°, and 45° under three different stress levels in the middle section. The research results indicate that as the stress level increases, the area of dense nuclei formed by the pick breaking decreases, the length of the strip-shaped crack propagation shortens, and the number of microcracks generated during the rock breaking process also decreases, indicating that high stress conditions have a suppressive effect on rock fragmentation. Under the 45° intrusion angle rock breaking mining, the traction and cutting force fluctuations of the cutting tooth are small and the cutting force always maintains a high level. At the same time, the number of microcracks generated by rock breaking at a 45° intrusion angle is much greater than that at 60° and 90° intrusion angles. Combining the comprehensive analysis of mechanical response and rock fragmentation effect, the 45° intrusion angle has the optimal rock breaking performance at varying stress levels.

Key words: Pick rock breaking, PFC, Intrusion angle, Unidirectional unloading, Rock breaking effect

0 引言

机械掘进方法以其开采扰动小、掘进效率高、支护成本低等优点已成为金属矿山开采的重要发展方向。实现高效的开采作业需要配备高效的掘进设备[1],悬臂式掘进机是常用的选择之一[2]。悬臂式

* **收稿日期**:2024-10-14

基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404,2023YFC2907201,2023YFC2907202);长沙矿山研究院有限责任公司创新项目(ZX24J074)

作者简介:林卫星(1983—),男,湖南怀化人,博士,正高级工程师,主要从事金属矿山采矿工程技术研究。E-mail:lwx09@163.com

通信作者:龚永超(1989—),男,湖南娄底人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿及工艺研究工作。E-mail:1145233051@qq.com

掘进机通过行走机构推进,并借助工作机构中的截齿不断旋转破碎岩石,其中,截齿的侵入角对其破岩效果具有显著影响。伴随浅部资源逐渐开采枯竭,深部资源开发成为研究的主流方向[3]。在高应力地层条件下进行开挖作业,引发的应力重分布及应力集中现象会严重危害生产安全[4-5],因此,必须高度重视开挖卸荷造成的岩体应力扰动问题。在复杂的地应力条件下实现矿产资源的安全高效开采,已成为行业的核心课题。在此背景下,针对卸荷条件科学选取截齿工作参数,对于提升破岩效能与保障施工安全具有重要意义。

为研究截齿破岩效率的影响因素,国内外学者多采用试验与数值模拟相结合的方法展开研究[6-11]。LI[12]进行了岩石截割试验,探究了镐形截齿安装参数以及几何形状对截齿切削性能的影响。WANG 等[13-15]使用镐形截齿进行岩石压痕试验,研究了岩石可截割性与围压、岩石强度之间的关系。LI 等[16]使用真三轴装置,在单轴、双轴以及无围压条件下对立方体岩样施加动-静耦合荷载,论证了高应力条件下硬岩的可切削性。INNAURATO 等[17-18]通过截齿压痕试验,发现在围压为 10 MPa 时,岩石的可切削性降低了约 30%。试验研究会耗费大量的时间和成本,而传统数值模拟方法如有限差分法、有限元法在模拟复杂岩体条件时存在一定的局限性,会引起较大的计算误差。相比之下,基于细观非连续力学理论的 PFC 方法在分析岩土体等非连续介质的宏观以及微观破坏特性方面具有显著优势,近年来在截齿破岩研究中备受青睐。ZOU 等[19]使用离散元软件和正交试验方法分析了截割参数对破岩效率的影响,证明了切削深度和切削角对切削力有显著影响。廖九波[20]针对炭质板岩,使用 PFC 软件模拟了不同围压、节理倾角、加载速度对截齿破岩的影响,研究证明低围压条件、开挖诱导巷道或动力扰动条件下都可以改善岩石的可截割性。LIU 等[21]使用 PFC 软件研究了岩石预损伤对截齿破岩截割性能以及岩石破碎效果的影响机理,研究结果对深入理解岩石切削中塑性-脆性破坏模式转变机理具有重要作用。张倩倩[22]对不同截割模式下的岩石颗粒进行模拟截割试验,研究表明截齿相互作用可以有效降低破岩截齿的荷载。SU 等[23]使用 PFC3D 构建了梯度颗粒组件模型,并以恒定速度推进镐形截齿进行破岩模拟,研究结果表明,模拟结果与理论计算之间具有一致性。

本文针对某金属矿山 3 个中段原岩应力及围岩力学性能实测结果,使用 PFC 软件建立截齿破岩模型。通过设置 90°、60°、45°三种截齿侵入角度,并在与工程实际对应的三种应力水平下进行单向卸荷后的截齿破岩数值模拟研究,系统分析了不同岩石应力下截齿角度对机械破岩效率的影响。研究结果可为截齿破岩的参数设置提供一定的参考。

1 工程背景

某金属矿山深部开拓工程初步设计开采范围为-400～-650 m,矿区围岩主要为片岩、片麻岩、角闪岩、大理岩,矿体底板岩石主要为白云石大理岩,其普氏硬度系数 f 值为 8～11,岩石硬度高且围岩稳固性较好。矿山使用悬臂式掘进机掘进沿脉巷道,在掘进工程试验的统计周期(60 d 共 180 个台班时)内,掘进机系统工作时长为 444.6 h,截割时长为 314.1 h,共完成掘进进尺为 196.7 m。按断面尺寸为 3.65 m×3.45 m(宽×高)的标准巷道折算,总掘进方量为 2 289.58 m^3,计算得出平均掘进效率为 3.28 m/d、2.85 m/班,纯截割效率为 0.63 m/h。在不考虑设备折旧与人工费用的情况下,成本构成如下:油脂消耗 20 346 元;截齿消耗 95 个(单元 450 元),合计 42 750 元;电费支出 29 685 元。其中,截齿消耗费用占总成本的 46.1%。当前工况下,破岩掘进效率与截齿消耗量均存有较大的优化空间。

在-525 m、-606 m 及-653 m 掘进水平使用空心包体套孔应力解除法测量原岩应力。首先,在测试位置钻孔径为 130 mm 的水平孔,磨平孔底后钻喇叭孔及孔径为 36 mm 的同心水平孔;然后,安装空心包体应力计至同心水平孔中,并向空心包体应力计的内腔倒入黏结剂;黏结剂固化后,进行套孔应力解除测试。在应力解除过程中,岩芯因围压释放会发生弹性恢复,通过智能静态电阻应变仪每 1 min 记录一次应力解除曲线。根据实测应变数据、测点钻孔几何参数及岩石力学参数,计算得出某金属矿深部测点的主应力大小与方向,见表 1。

采用线性回归方法对采集数据进行回归分析,得到主应力随垂直深度 H 变化的回归公式:

$$\begin{cases}\sigma_1=0.041\ 4H\\ \sigma_2=0.025\ 8H\\ \sigma_3=0.016\ 7H\end{cases} \tag{1}$$

使用 TAW-2000 岩石三轴试验机对白云石大理岩分别进行了 3 组劈裂试验、单轴压缩试验及密度测试,测得白云石大理岩平均密度为 2.666 g/cm^3,并通过 ZBL-U5200 智能声波检测仪测得其平均波

速为 4 218.33 m/s。白云石大理岩物理力学试验结果见表 2。

表 1 主应力测试结果

Table 1 Results of principal stress test

测点编号	最大主应力 σ_1			中间主应力 σ_2			最小主应力 σ_3		
	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/MPa	方向/(°)	倾角/(°)
−525 m-1#	20.49	190.32	6.33	12.69	−68.81	59.55	10.27	96.70	29.65
−606 m-2#	24.18	157.62	7.81	16.67	34.56	75.90	10.50	249.24	11.67
−653 m-3#	26.32	206.98	10.10	20.07	−82.04	−61.33	11.66	122.08	−26.52
−653 m-4#	26.90	217.91	−8.29	19.79	−32.97	−66.02	11.59	124.48	−22.34

表 2 白云大理岩力学物理力学参数

Table 2 Mechanical and physical parameters of dolomitic marble

编号	密度/(g/cm³)	单轴压缩强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	波速/(m/s)	抗拉强度/MPa
1	2.622	80.86	38.852	0.136	4 237.00	7.463
2	2.656	92.58	31.789	0.241	4 032.00	7.893
3	2.720	102.56	55.258	0.175	4 386.00	9.718
平均值	2.666	92.00	41.970	0.184	4 218.33	8.358

2 截齿破岩模型的建立

岩石在高倍显微镜下呈颗粒状结构,可将其视为离散的颗粒介质。PFC 基于细观非连续力学理论,适用于研究散体材料,能够从微观层面模拟材料因黏结破坏而引起的裂纹扩展规律,同时能够考虑复杂的动力荷载问题,对岩土体等非连续介质的仿真模拟具有显著的优势。结合本文研究的卸荷及截齿破岩问题,选取 PFC 颗粒流软件进行数值模拟计算。

2.1 截齿模型

本文重点关注在工程现场围岩应力条件下,不同截齿侵入角度对破岩裂纹扩展规律的影响,不考虑截齿材料及损耗的影响。截齿主体可分为硬质合金头与齿体,设置侵入角 θ 分别为 45°、60°、90°三种工况。简化截齿示意图如图 1 所示。

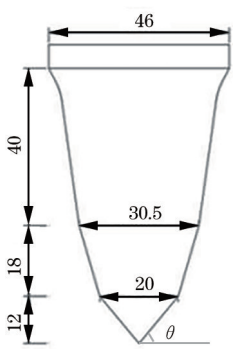


图 1 简化截齿示意(单位:mm)

Fig.1 Simplified schematic of the pick(unit:mm)

2.2 截齿破岩模型

根据工程现场的地应力测试数据及力学试验结果,确定−525 m、−606 m 和−653 m 最大主应力分别为 21.70 MPa、25.09 MPa、27.03 MPa,中间主应力分别为 13.55 MPa、15.63 MPa、16.8 MPa。为简化计算,设置 x 向初始应力分别为 20 MPa、25 MPa、30 MPa,y 向初始应力为 15 MPa。采用 PFC 中的平行黏结模型建立白云石大理岩模型,为使数值模型的物理力学表现与室内试验相符,需要对数值模型参数进行多次试错试验,最终获得的颗粒流微观参数见表 3。单轴压缩数值模拟结果表明,数值模型条件下的应力-应变曲线及破坏模式(见图 2)与室内试验基本一致,表明所选参数能较好地模拟白云石大理岩,保证模型计算的准确性。

建模过程如下:首先分别建立 wall1、wall2、wall3、wall4 刚性墙围成边界,随后使用 generate 指令在墙体内随机生成颗粒,赋予颗粒线性接触模型,并设置较大的刚度和摩擦因数以快速消除颗粒之间的重叠;删除悬浮颗粒,最终生成尺寸为 300 mm×500 mm、总颗粒数为 61 480 个的截齿破岩模型,如图 3 所示。在开挖面附近设置编号 ID 为 1～9 的应力监测圆,观察岩体在截齿破岩过程中的应力响应机理。

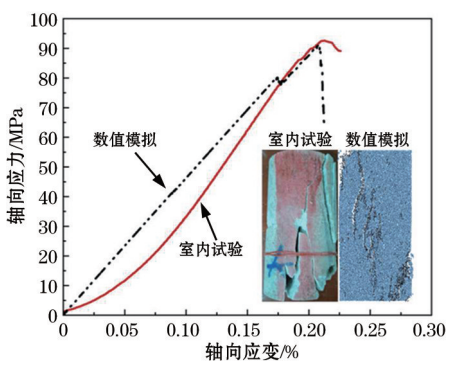


图 2 室内试验与数值模拟结果对比

Fig.2 Comparison of numerical simulation and laboratory test

表 3 颗粒流微观参数

Table 3 Microscopic parameters of particle flow

参数类型	细观参数	单位	数值
颗粒基本参数	颗粒密度 ρ	kg/m^3	2 634
	最小颗粒半径 R_{min}	mm	0.14
	粒径比 R_{max}/R_{min}	—	1.66
	颗粒接触模量 E_c	GPa	42
	颗粒刚度比 k^n/k^s	—	2.1
	颗粒摩擦因数 μ	—	0.5
平行黏结参数	平行黏结模量 $\bar{E}_c$	GPa	42
	平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c$	MPa	45
	平行黏结切向强度 $\bar{\tau}_c$	MPa	70
	黏结法向刚度与切向刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$	—	1.8

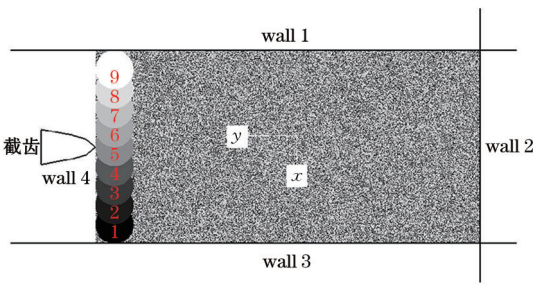


图 3 截齿破岩模型

Fig.3 Model of rock breaking by the pick

2.3 单向卸荷条件

岩体开挖会破坏岩体原有应力状态,导致应力重分布及应力集中现象。为贴近现场工程实际,对截齿破岩模型进行开挖面单向卸荷处理,以卸围压增轴压的方式模拟应力重分布及应力集中现象。已有研究表明,在开挖卸荷过程中,应力集中可使轴向应力增加至原应力的 1.2～1.6 倍。基于此,将卸荷结束时 x 向的应力设置为原应力的 1.5 倍,y 向应力统一保持在 15 MPa。

在数值模拟软件中,固定 wall2,wall4 向左侧移动以减小围压,同时令 wall1、wall3 向中间移动增加轴压,二者同时进行,最终实现沿工作面单向卸荷的目的。通过墙体的伺服系统,结合 FISH 函数控制两个过程同步进行,其原理是通过读取侧向墙的实时应力不断调整轴向墙的目标应力,伺服系统则根据接触刚度自动计算轴向墙的移动速度。三种应力状态下的卸荷曲线如图 4 所示,图 4 中横坐标时步表示系统在时间上的离散化。时步将模拟问题的时间划分为很小的时间间隔,在每一时步内根据物理规律和计算方法对模型状态进行更新和演化。

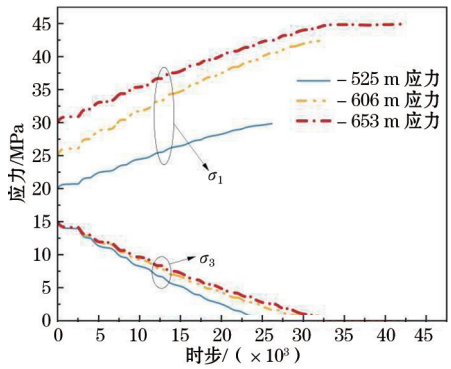


图 4 卸荷应力曲线

Fig.4 Unloading stress curves

3 截齿破岩模拟分析

在岩土体数值模拟中,岩土体材料的破坏可视为颗粒之间接触与黏结失效。平行黏结模型中包含两个界面行为:一个是无穷小的线弹性摩擦边界,等效为线性模型,该界面不抵抗旋转,其滑移行为通过对剪切力施加库仑极限进行控制;二是有限尺寸的线弹性黏结界面,可传递承载力和力矩,能够抵抗相对旋转,且其力学行为为线弹性,当应力超出其强度极限时发生破坏。通过 PFC 的 FISH 语言记录黏结接触破坏,统计裂纹数量并标记裂纹位置,从而揭示截齿破岩过程中裂纹的扩展发育规律。PFC 中赋予墙体的运动速度并无实际对应,且研究重点在于不同应力环境下的不同侵入角度的截齿破岩效果,因此,将所有模型截齿侵入速度设置为相同值。模拟以截齿侵入深度 10 mm 为结束条件,在计算过程中记录微裂纹数量的变化及截齿 x、y 方向上的截割力变化,并在截齿达到目标侵入深度后观察岩体破裂形态。

3.1 破坏形态分析

在恒定侵入速率条件下,当截齿侵入深度达到 10 mm 时,岩体裂纹的扩展形态如图 5 所示。以图 5(a)为例,30 MPa 为 x 向应力水平,90°为截齿侵入角度。在截齿初始侵入阶段,截齿尖端区域形成明显的密实核结构;随着侵入深度的增加,裂纹系统沿 x 轴和 y 轴方向呈放射状扩展,岩体破碎范围逐步扩大。值得注意的是,裂纹扩展模式显著受 x 向应力水平和截齿侵入角度的共同影响。

观察图 5 中岩体裂纹的扩展形态可知,x 向应力对裂纹扩展具有明显的约束效应。在固定侵入深度和速度条件下,随着 x 向应力水平的提升,裂纹

在 x 和 y 方向的扩展长度呈现递减趋势。与既有研究相比，本模型在单轴卸荷条件下未观察到沿侵入方向的贯穿性裂纹。这是由于在单向卸荷条件下，球体颗粒表现出向左侧迁移的趋势，当截齿向右侵入时，这种位移模式与侵入方向形成抗力耦合，不仅增大了侵入阻力，也抑制了裂纹的萌生与扩展。

对比 30 MPa、37.5 MPa、45 MPa 三种应力水平下的裂纹形态可知，密实核面积与应力水平呈负相关，条状裂纹的数量随应力增加而减少，条状裂纹的倾角随着应力水平增加而向 y 方向倾斜。产生上述现象的原因是高应力水平下，颗粒间接触应力增强，孔隙率降低，导致岩体内部黏结键断裂能垒升高，新生裂纹的萌发和既有裂纹的扩展均受到显著抑制。该结果与工程实践数据相符：－653 m 中段巷道掘进过程中出现的破岩效率低下和施工困难现象与模拟揭示的高应力抑制效应具有一致性。

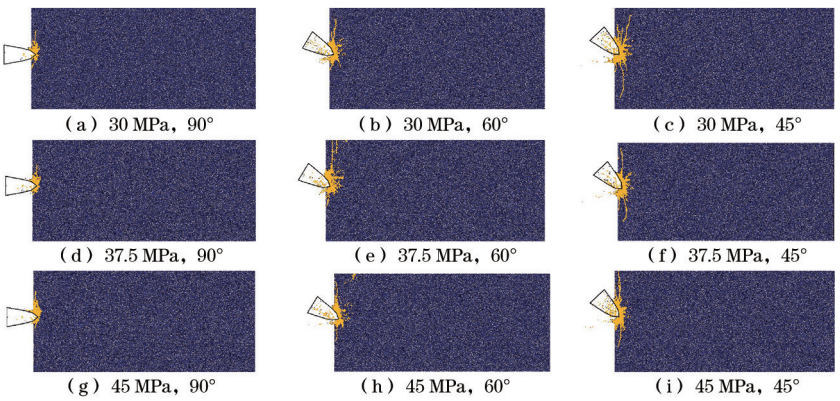


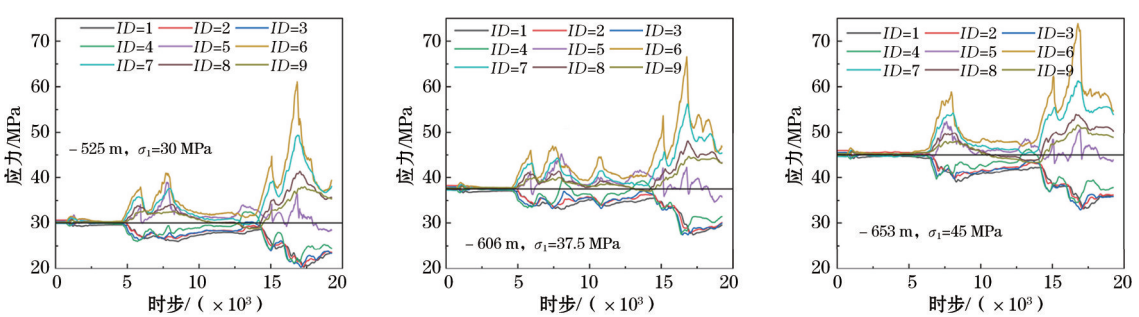
图 5　不同应力水平和截齿侵入角度下截齿破岩裂纹扩展形态

Fig.5　Crack propagation in rock breaking by the pick under different stress levels and intrusion angles

截齿侵入角对岩石破碎效果具有显著影响。在不同应力水平条件下，当侵入角度为 90°时，岩体破碎主要表现为截齿尖端区域的密实核形成，而条状裂纹的发育相对受限。随着侵入角度的减小，密实核范围逐渐扩大，条状裂纹数量增加，条状裂纹的扩展长度也随之增长。对比不同侵入角度的破碎效果，45°侵入角在各类应力水平下均表现出最优的破岩效果，其条状裂纹的发育程度及破碎范围均优于其他工况。

3.2　岩体最大主应力响应分析

基于应力监测圆监测数据，截齿破岩过程中岩体 x 向应力动态演化特征如图 6 所示。可以看出，在受到截齿扰动作用后，岩体开挖面不同区域的应力响应呈现显著的空间异质性，岩体垂直主应力伴随截齿侵入开挖面发生明显波动。主应力的波动与截齿侵入角度相关，当 $\theta=90°$ 和 $\theta=60°$ 时，开挖面下半部分（$ID=5\sim9$ 监测区域）的垂直主应力呈波动上升趋势，而其余监测区域（$ID=1\sim4$ 监测区域）则表现为应力下降；当 $\theta=45°$ 时，垂直主应力上升区域进一步扩大，$ID=4$ 监测区域垂直主应力随截齿侵入而上升。在相同侵入角度条件下，不同初始应力水平的岩体表现出相似的垂直主应力波动形态。随着埋深（σ_1）增加，应力监测圆记录的应力波动幅值显著增强，即在高埋深条件下，岩体开挖过程中受到截齿应力扰动现象更加显著，应力波动程度更高且岩爆等现象频发。横向对比相同应力水平下的三种截齿侵入角度，岩体最大垂直主应力多处在 60～70 MPa 之间，但 $\theta=45°$ 时垂直主应力突变现象较少，岩体在开挖过程中应力状态更为稳定。



(a) θ=90°

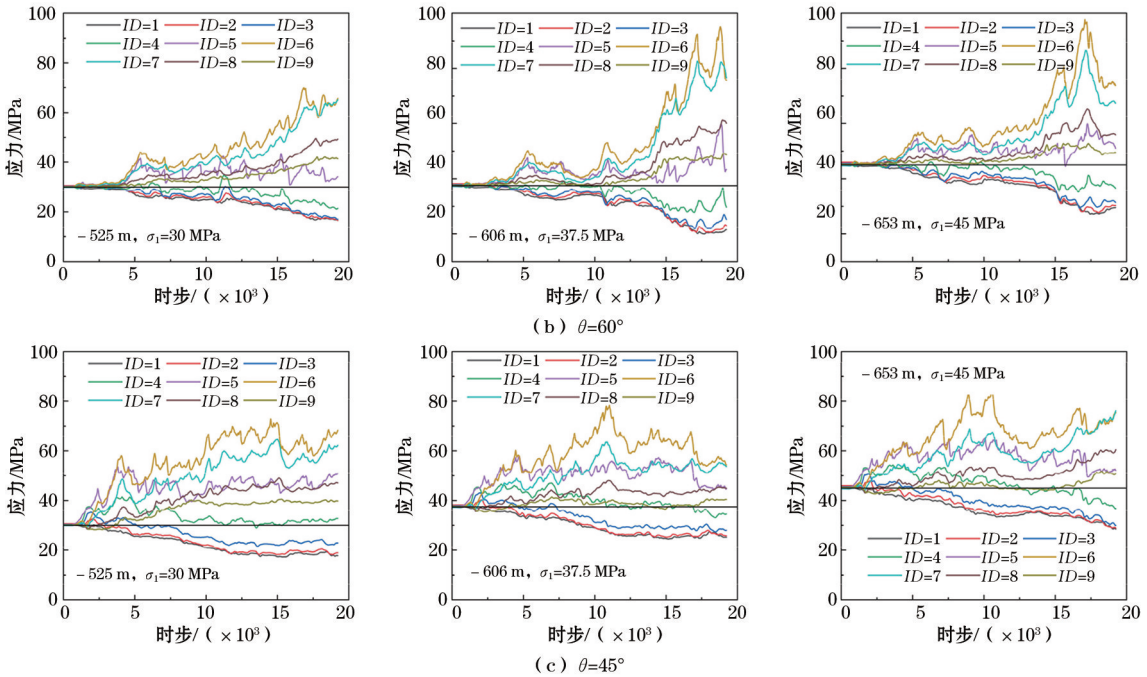


图 6 截齿侵入过程中岩体最大主应力变化曲线

Fig.6 Variation curves of maximum principal stress of rock mass during the pick intrusion process

3.3 截割牵引力响应分析

截齿破岩过程中,截齿的截割力可分解为 x 向的牵引力和 y 向的切割力,三种应力水平下不同侵入角度截齿破岩的截割力变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在所有工况条件下,y 向切割力显著高于 x 向牵引力。由图 7(a)、图 7(c)、图 7(e)可知,牵引力随侵入深度增加整体呈现上升趋势,且 45°侵入角工况下,截齿的牵引力平均值略高于 60°与 90°侵入角,其数值基本保持在 0～20×10⁶ N 之间,并伴随垂直应力增大而略微增大,相比之下,60°与 90°侵入角模型在破岩至 15 000 步后,牵引力出现突增现象。

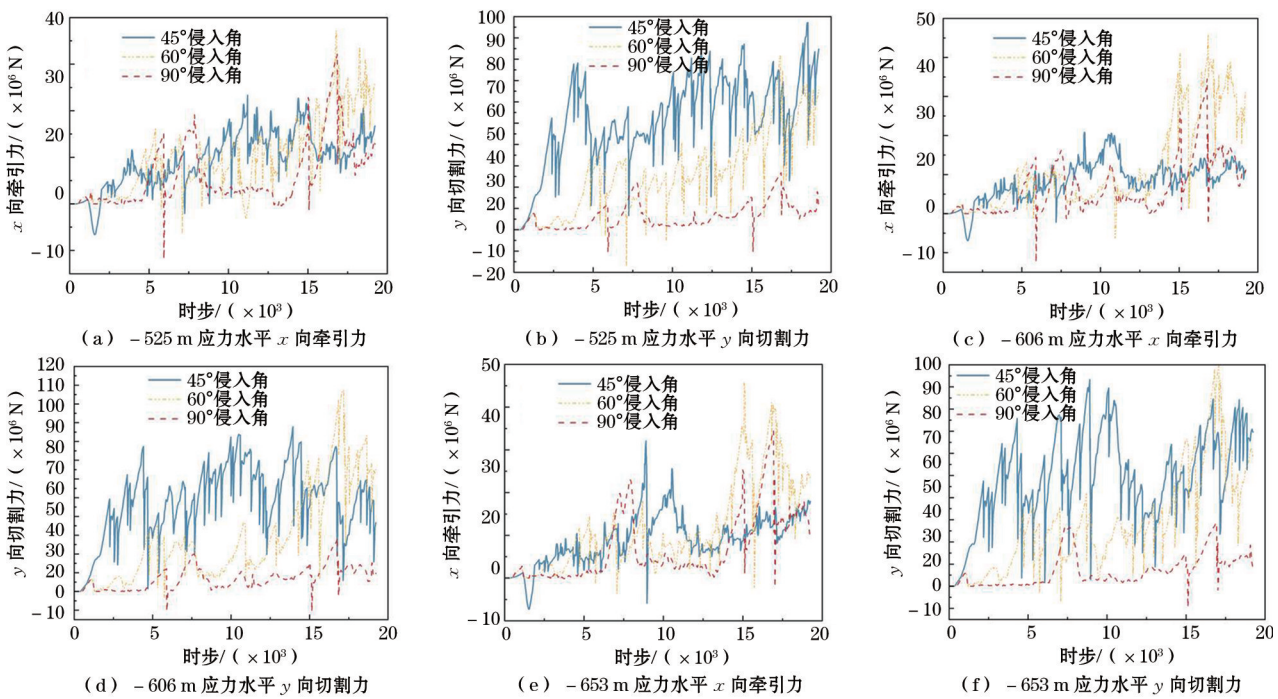


图 7 不同应力水平下截齿截割力变化曲线

Fig.7 Variation curves of cutting force of picks under different stress levels

以－606 m 应力水平为例,x 向牵引力箱型图如图 8 所示。可明显观察到,在 45°侵入角下,x 向牵引力的上四分位线与下四分位线之间的端线最短,反映其数据波动程度更小,数据更加集中。在 45°侵入角下,中位数线距箱型中央更近,且异常值分布较 60°和 90°侵入角更集中且分布数量更少,分布偏态性也更好。

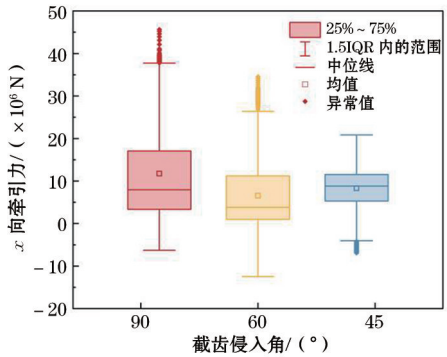


图 8 －606 m 应力水平 x 向牵引力箱型图

Fig.8 x-direction traction box plot under －606 m stress level

综上所述,45°侵入角在破岩过程中表现出较小的牵引力波动幅值和更优的统计分布特性,表明其在稳定性方面具有显著优势。

由图 7(b)、图 7(d)、图 7(f)可知,三种垂直应力水平下,45°侵入角工况截齿的切割力显著高于 60°和 90°侵入角,其中 45°与 90°侵入角的切割力在整个破岩过程中保持稳定,但 90°侵入角切割力始终保持在较低水平;60°侵入角在 12 500 步之后,切割力骤增并出现较大波动。相比之下,45°侵入角切割力基本在 30×10^6～80×10^6 N 之间变化,维持稳定高力输出的同时,波动幅度最小。

三种应力水平下,不同侵入角截齿的平均截割力如图 9 所示。可以看出,侵入角度对截齿的平均截割力的影响明显大于应力水平的影响。相同侵入角度下,各应力水平的平均截割力差异较小,且三种应力水平下,平均截割力随侵入角度的变化规律一致:平均 x 向牵引力随侵入角减小先上升后下降,平均 y 向切割力随侵入角减小呈单调递增趋势。以－653 m 应力水平为例,90°、60°、45°侵入角工况下,平均 y 向切割力分别为 6.75×10^6 N、28.42×10^6 N、49.13×10^6 N,切割力随侵入角的减小显著提升。综合 x 向牵引力与 y 向切割力分析可知,45°侵入角破岩效果最佳。

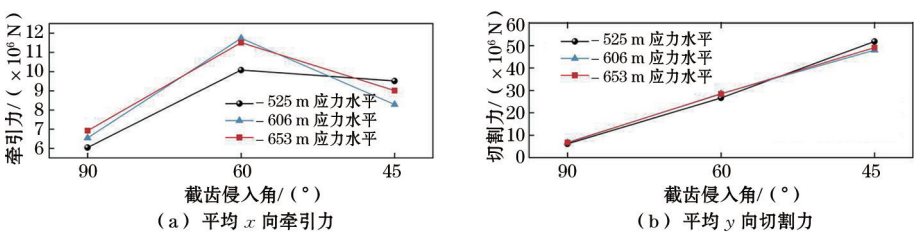


图 9 截齿平均截割力分析

Fig.9 Average cutting force of picks

3.4 裂纹数量

根据断裂机制差异,微裂纹可分为张拉裂纹与剪切裂纹,微裂纹的累计数量可作为评估岩石破碎效果的重要指标,而其时空演化速率则能有效反映截齿的破岩效率。在 PFC 颗粒流软件中,通过调用 Fracture 文件来记录计算胶结断裂产生的微裂纹数量,三种应力水平下,不同侵入角度截齿破岩的微裂纹数量如图 10 所示。统计数据显示,剪切裂纹数量仅为 20～120,较张拉裂纹显著偏低,即截齿破岩导致的黏结破坏多为张拉性破坏。－525 m 及－653 m 应力水平下,45°侵入角达到目标侵入深度时,微裂纹总数分别为 3 420 个、3 130 个,显著高于 60°侵入角(2 270 个、2 310 个)以及 90°侵入角(1 240 个、1 440 个)破岩产生的微裂纹,表明 45°侵入角具有最优的破岩效率。在－606 m 应力水平下,该规律呈现差异性,主要区别在于 60°侵入角破岩过程后半段(约 15 000 步),微裂纹数量骤增,最终累计值趋近于 45°侵入角水平,但二者微裂纹数量仍显著高于 90°侵入角模型。

从时变特征来看,45°侵入角展现出独特的裂纹演化规律,微裂纹的产生多在破岩过程的前半段(10 000步之前),表现为典型的“快速上升－渐进饱和”双阶段模式;而 60°、90°侵入角裂纹数量快速增加现象则多出现在 15 000 步之后,呈现“渐进累积－后期突增”的反转趋势;同时,45°侵入角破岩微裂纹数量的瞬时增长率高于 60°、90°侵入角。随着应力水平提升,微裂纹发育趋势基本一致,但呈现出明显的应力抑制效应,累计裂纹数量与应力水平呈负

相关。

综上所述,微裂纹数量及其时变特征分析结果表明,45°侵入角在破碎效果和初始破碎速率方面均展现出显著优势。

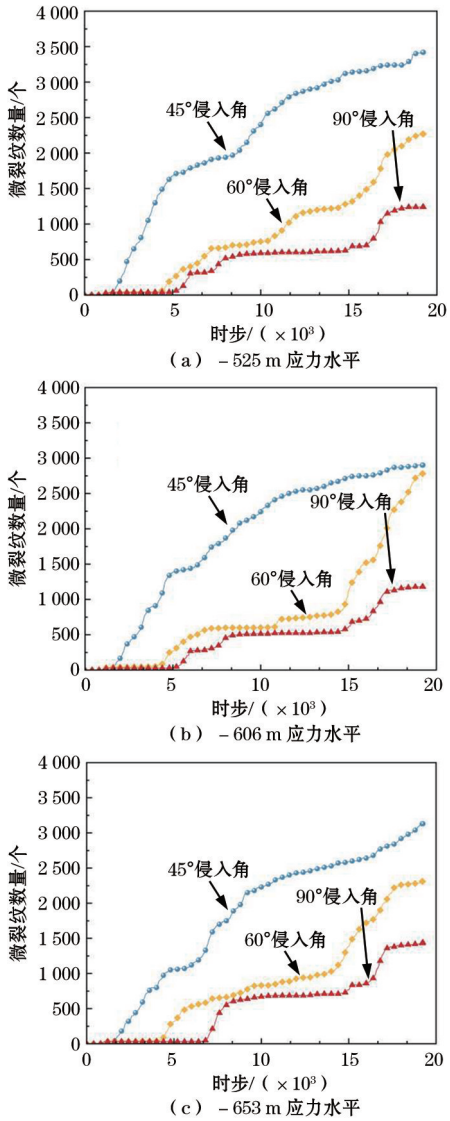


图 10 微裂纹数量

Fig.10 Number of microcracks

4 结论

针对某金属矿山三个中段的地应力测试结果及围岩力学试验结果,建立了截齿破岩模型,设置相同的截齿侵入速度与侵入深度,系统模拟了 90°、60°、45°三种侵入角度在不同应力水平下单向卸荷截齿破岩过程,得到以下主要结论。

(1) 截齿破岩初始阶段,截齿端部形成密实核及条状裂纹,随着侵入角度的减小,密实核面积增大,伴随条状裂纹扩展长度增加。应力水平提升会显著抑制围岩破碎发展,单轴卸荷引起的颗粒迁移效应产生逆向于截齿侵入的阻力,导致条状裂纹呈现明显的各向异性发育特征,条状裂纹向水平向发育困难,多沿垂直向发育。

(2) 力学响应分析表明,应力水平对峰值截割力的影响不显著,但存在弱正相关性。箱线图统计分析揭示,45°侵入角工况下的牵引力具有最小的四分位距,其波动系数显著低于 60°和 90°侵入角工况,45°侵入角的平均切割力(49.13×10^6 N)大于 90°侵入角(6.75×10^6 N)和 60°侵入角(28.42×10^6 N),表明 45°侵入角具有更好的应力稳定性与破岩效果。

(3) 应力水平对微裂纹总量影响有限,整体呈现负相关趋势,侵入角度则对微裂纹数量起决定性作用。-525 m、-606 m、-653 m 应力水平下,45°侵入角达到目标侵入深度时,分别发育出 3 420 个、2 900 个、3 130 个微裂纹,微裂纹数量远大于其他两种侵入角。微裂纹时变特征分析表明,45°侵入角微裂纹发育呈现“快速上升-渐进饱和”的双阶段模式,60°及 90°侵入角的微裂纹发育则呈现“渐进累积-后期突增”的反转趋势,表明 45°侵入角在硬岩条件下具有显著的破岩优势。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,古德生,余佑林.我国地下金属矿山连续开采技术的研究[J].金属矿山,1998(7):1-3+21.
WU Aixiang, GU Desheng, YU Youlin. Study on the continuous mining technology in China's underground metal mines[J]. Metal Mine,1998(7):1-3+21.

[2] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
LI Xibing, YAO Jinrui, GONG Fengqiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2011,21(10):2551-2563.

[3] 李夕兵,姚金蕊,杜坤,等.高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探:以开阳磷矿为例[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1101-1111.
LI Xibing, YAO Jinrui, DU Kun. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine: a case study of Kaiyang Phosphate Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(6):1101-1111.

[4] 李夕兵,李地元,郭雷,等.动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2007(5):922-928.
LI Xibing, LI Diyuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007(5):922-928.

[5] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Joumal of China Coal Society, 2019, 44(5):1283-1305.

[6] 梁运培,王想,王清峰.截割厚度与截线距对镐型截齿破岩力学参数的影响[J].振动与冲击,2018,37(3):27-33.
LIANG Yunpei, WANG Xiang, WANG Qingfeng. Effects of cut depth and cut spacing on tool forces acting on a conical pick in rock cutting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018,37(3):27-33.

[7] 张鹏,赵腾跃,李元龙,等.结泥条件下TBM滚刀破岩能量演化机制及掘进参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):201-210.
ZHANG Peng, ZHAO Tengyue, LI Yuanlong, et al. Research on the energy evolution mechanism in rock breaking and excavation parameter optimization of TBM cutters under the condition of argillization[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5):201-210.

[8] WANG Xiang, SU Okan, WANG Qingfeng. Distribution characteristics of rock chips under relieved and unrelieved cutting conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 151:105048.

[9] QIAO S, ZHANG Z Q, ZHU Z M, et al. Influence of cutting angle on mechanical properties of rock cutting by conical pick based on finite elementanalysis[J]. Mining Science, 2021, 28:161-173.

[10] JEONG Hoyoung, WICAKSANA Yudhidya, KIM Sehun, et al. Evaluation of rock cutting efficiency of the actuated undercutting mechanism[J]. Geomechanics and Engineering, 2022, 29(3):359-368.

[11] PRENDES-GERO M B, GONZÁLEZ-NICIEZA C, BETEGÓN-BIEMPICA C, et al. Design of a pendulum prototype for dynamic testing of material removal using picks[J]. Energies, 2021, 14(20):6831.

[12] LI Xuefeng. A study on the influence of pick geometry on rock cutting based on full-scale cutting test and simulation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(12):229723867.

[13] WANG Shaofeng, LI Xibing, YAO Jinrui, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 122:104063.

[14] WANG Shaofeng, LI Xibing, DU Kun, et al. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79:210-223.

[15] WANG Shaofeng, LI Xibing, YAO Jinrui, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 122:104063.

[16] LI Xibing, WANG Shaofeng, WANG Shanyong. Experimental investigation of the influence of confining stress on hard rock fragmentation using a conical pick[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51:255-277.

[17] INNAURATO N, OGGERI C, ORESTE P, et al. Laboratory tests to study the influence of rock stress confinement on the performances of TBM discs in tunnels[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2011, 18:253-259.

[18] INNAURATO N, OGGERI C, ORESTE P, et al. Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40:429-451.

[19] ZOU Jiuquan, YANG Weihao, HAN Jihua. Discrete element modeling of the effects of cutting parameters and rock properties on rock fragmentation[J]. IEEE Access, 2020, 8:136393-136408.

[20] 廖九波.掘进机镐型截齿破岩的试验及数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2023.
LIAO Jiubo. Experimental and numerical study on rock cutting by conical picks of road header[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[21] LIU Weiji, ZHU Xiaohua, JING Jun. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 163:311-319.

[22] 张倩倩.掘进机截齿截割硬岩的试验与数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2016.
ZHANG Qianqian. Experimental and numerical research onrock cutting by roadheader picks[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.

[23] SU Okan, AKCIN Nuri Ali. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3):434-442.