

截齿侵入角度对重力式竖井掘进机掘进滚筒旋转破岩机理影响研究

霍诚¹, 郑典涛², 杨志², 焦华喆^{2*}, 刘晓辉³, 孙金字², 韩玉龙², 刘自扬²

1. 山西汾西矿业集团南关煤业有限责任公司, 山西 晋中 030600;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003;

3. 华北科技学院安全工程学院, 河北 廊坊 065201



摘要:为了明晰截齿侵入角度对重力式竖井掘进机掘进滚筒旋转破岩机理的影响,采用数值模拟与相似试验相结合的手段,对不同截齿侵入角度下掘进滚筒旋转破岩展开一系列研究。开展了滚动截齿破岩有限—离散元(FDEM)数值模拟,总结了不同截齿侵入角度对重力式竖井掘进机滚动截齿破岩机理的影响规律;通过相似试验,进一步验证了不同截齿侵入角度下截齿破岩机理,同时验证了数值模拟的合理性。结果表明:随着截齿侵入角度的增加,岩石主要破坏形式以拉伸为主,剪切为辅;岩石破碎体积随之增大的幅度较小,截齿破岩作用力随之减小;破碎比能逐渐降低,截齿破岩效率越高。该研究为实际竖井施工提供了有效参考。

关键词:重力式竖井掘进机;有限—离散元;裂隙演化;破碎比能;相似试验

中图分类号:TD80 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0188-10 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.033

引用格式:霍诚,郑典涛,杨志,等.截齿侵入角度对重力式竖井掘进机掘进滚筒旋转破岩机理影响研究[J].黄金科学技术,2026,34(1):188-197.HUO Cheng, ZHENG Diantao, YANG Zhi, et al. Study on the Influence of the Intrusion Angle of Pick on the Rotating Rock-Breaking Mechanism of Digging Drum of Gravity Shaft Boring Machine[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1):188-197.

随着人类对地下空间利用规模加大,竖井被广泛应用于地下矿产资源开采、交通隧道和废弃物封存等工程中(刘翔宇等,2024;杨小聪等,2024)。然而,竖井施工常见的方法包括爆破法和机械法,目前多采用爆破法进行施工。爆破法是以钻眼爆破为基础,需大量下井人员,工作条件艰苦且作业环境危险系数大,由于工序机械化程度低,只能通过人海战术提高掘进速率(Jin et al,2025)。随着金属矿山开采向深部和高强度围岩条件推进,在高地应力、硬岩及复杂构造条件下传统爆破施工面临着安全性差和成井质量难以控制等问题(唐宇等,

2021)。因此,寻找合适的替代方法已成为岩石工程界面临的主要问题,为此具有破岩安全性好、效率高和投入小等优点的机械法施工成为竖井施工技术的发展方向(王少锋等,2021;刘志强等,2022;付鸿鑫等,2023)。

机械法中的竖井掘进机作为用于竖井施工的现代化复杂掘进装备具有明显优势,作业时由上而下在地层中钻进,为矿体开采和地下空间建设提供了通道。竖井掘进机采用机械破岩的方式将岩石从岩体上连续分离出来,依靠机械或自重掉落方法排出岩渣,利用辅助吊盘等配套设备完成井筒支

收稿日期:2024-12-30;修订日期:2025-08-25

基金项目:国家重点研发计划项目“金属矿深部规模化安全高效连续智能开采技术与装备”(编号:2023YFC2907203)资助

作者简介:霍诚(1974—),男,山西襄汾人,高级工程师,从事安全生产与技术管理工作。E-mail:15838667629@163.com

*通信作者:焦华喆(1985—),男,河南商丘人,博士研究生,从事围岩控制及灾害防治工作。E-mail:jiaohuazhe@126.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

护,依靠地面上的提绞设备完成人员、材料和破碎岩石的提升(吕旦等,2023)。相对于爆破法和传统机械法,竖井掘进机施工方法可极大地减少竖井内作业人员数量,降低工人劳动强度,改善作业环境。针对目前竖井施工现有设备及工艺存在的问题,自主研发了一种重力式竖井掘进机,该设备对地层适应能力强,可实现连续掘进,提高施工效率。在重力式竖井掘进机中,截齿侵入角度是制约重力式竖井掘进机截齿滚动破岩效率和能耗水平的关键参数,直接影响截齿—岩体接触状态及岩石破裂方式。因此,系统研究其破岩机理对优化掘进参数具有重要意义。

张鑫(2022)通过可控试验研究系统揭示了切入角度等参数对盘形滚刀截割性能的影响规律,明确了侵入角度变化对截割效率与比能耗的主导作用。武茂超等(2023)基于多工况现场数据分析指出,截齿破岩效率对截割角度变化高度敏感,且法向力与切向力比值随截割角度的增大呈现先增大后减小的非线性关系。刘先珊等(2023)从理论力学角度建立了截齿破岩受力模型,阐明了侵入相关角度对破岩力大小及分布特征的控制作用,为截齿结构参数优化提供了理论依据。肖建成等(2022)采用数值模拟方法揭示了贯入角度对截齿破岩效果的影响规律,表明较小贯入角度有利于增强岩体破碎程度。以上研究均是对截齿以不同角度垂直侵入岩进行研究,对于截齿基于设备自身重力及掘进滚筒旋转产生的旋转力与惯性力作用下以不同角度旋转破岩的研究鲜有涉及。

因此,针对重力式竖井掘进机独特的破岩方式,本研究基于 MultiFracS 有限—离散元(FDEM)数值模拟软件和相似理论,采用数值模拟与相似试验相结合的方法,对滚动不同截齿侵入角度下掘进滚筒旋转破岩展开一系列研究。通过上述研究,为实际竖井施工提供有效参考,为重力式竖井掘进机的研发提供理论基础。

1 滚动截齿破岩 FDEM 分析

1.1 截齿破岩模型建立

重力式竖井掘进机由前置掘进系统、后置驱动系统、液压系统和控制系统组成。其利用设备的自

身重力及掘进滚筒旋转产生的旋转力和惯性力,通过掘进滚筒传递给截齿,即随着掘进滚筒高速旋转,截齿在机身自重力及掘进滚筒旋转产生的旋转力和惯性力共同作用下以不同角度旋转破碎岩石。截齿在岩石中往复旋转破碎,由于插入的路径与拔出的路径存在一定偏角,使得作用区域的岩石在滚动截齿作用下发生剪切和拉压破坏。

滚动截齿破坏岩石是一个极为复杂的过程,通过探究岩石在单个截齿不同作用下产生不同程度的损伤,科学描述了单个截齿对岩体的破坏,进一步探究了单截齿滚动作用下岩石破坏特性。在构建单截齿滚动破岩有限元模型时,将截齿简化为刚性截齿。本文采用 MultiFracS 有限—离散元(FDEM)数值模拟软件,基于滚动截齿破岩连续性建立了相应的滚动截齿作用下岩石破坏 FDEM 数值模型。通过建模软件 Gmsh 将截齿破岩模型划分为三节点三角形单元实体有限元网格,并在实体单元的边界上插入初始零厚度的四节点节理单元,从而实现模型的离散化,所构建的单截齿破岩模型如图 1 所示。考虑到模拟掘进滚筒旋转 360° 破岩的工作存在耗时过长的问題,为兼顾计算效率和精度(Rostami et al, 2020; Guo et al, 2023),对不同区域岩石采用不同密集程度网格进行划分,即截齿与岩石接触区域的网格进行加密细化。为了真实有效地模拟竖井中的施工环境,对岩石试件左右下表面施加约束条件,上表面为自由面。

1.2 材料标定

截齿采用新型钛合金材料,密度为 7 900 kg/m³,弹性模量为 270 GPa,泊松比为 0.3。选取新乡某矿

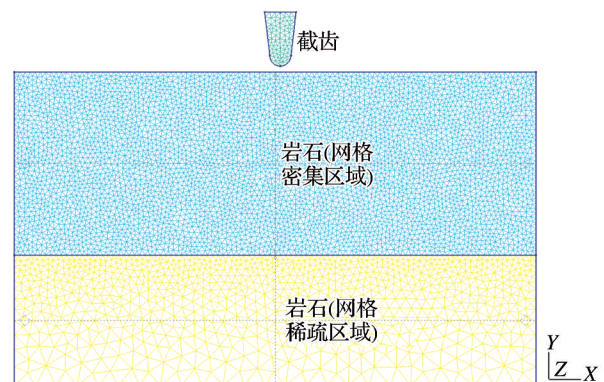


图1 截齿破岩 FDEM 模型

Fig. 1 FDEM model of rock breaking by picks

西风井地层较为常见的砂岩作为试验对象;根据一维条件、均匀性假设和试验设备的尺寸要求,将岩石试样的尺寸(直径×高度)设计为50 mm×100 mm和50 mm×25 mm的标准尺寸的圆柱体,如图2所示。

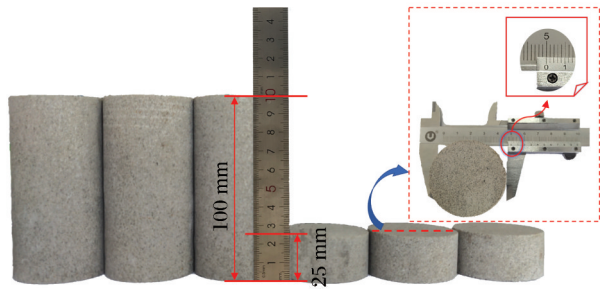


图2 取芯后的岩石试样

Fig. 2 Rock samples after coring

如图3所示,分别开展岩石单轴压缩试验和巴西劈裂试验,测得砂岩力学特性参数用于岩石有限元模型的细观参数匹配。最终测定岩石的抗压强度为45.4 MPa,抗拉强度为7.4 MPa。

参数标定过程中有诸多调整策略,合适的方法能够大大减轻标定工作量。为此,学者们普遍认为可以通过单轴压缩和巴西劈裂试验结果反演进行

标定,当某一组参数条件下模拟得出的荷载一位移曲线与试验结果一致时,认为该组参数是合理的,该试验方法比较成熟,已成功应用于数值仿真中参数标定环节(任义等,2022;张开雨等,2022)。对岩石试样开展单轴压缩和巴西劈裂试验模拟,如图3所示。对比分析裂纹情况可知断裂位置基本一致,因此仿真对应的细观参数能够很好地反映真实砂岩的宏观参数,说明标定的颗粒细观参数是合理的。

对单轴压缩试验和巴西劈裂试验的数值仿真与室内试验数据进行统计,结果如表1所示。

从表1可以看出,单轴压缩强度的数值仿真结果与试验结果相近,数值试验所得值为45.2 MPa,二者相对误差仅为0.4%;岩石抗拉强度的数值试

表1 物理试验的数值仿真与室内试验数据

Table 1 Numerical simulation of physical experiments and laboratory test data

试验名称	指标	数值仿真数据	室内试验数据
单轴压缩	荷载/kN	88.7	89.1
	强度/MPa	45.2	45.4
巴西劈裂	荷载/kN	14.3	14.5
	强度/MPa	7.3	7.4

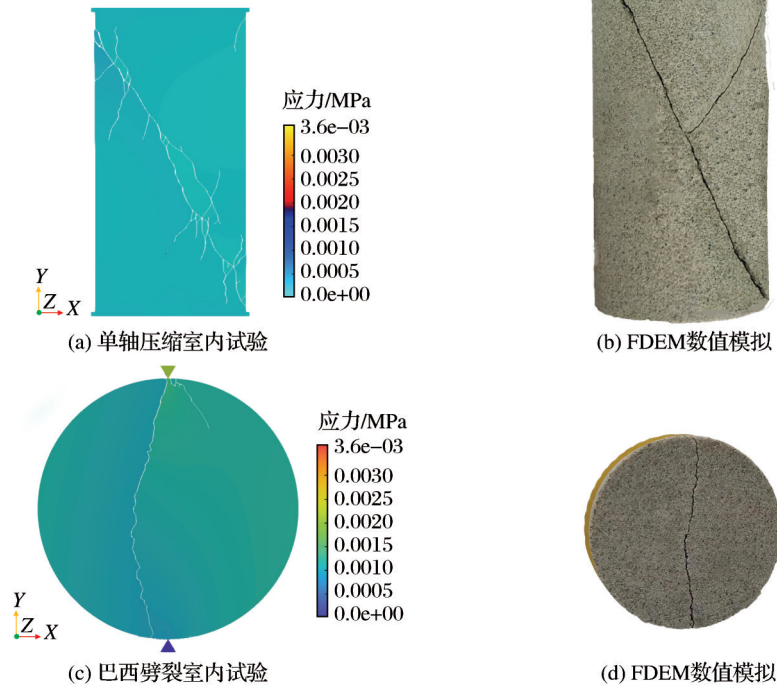


图3 岩石试样力学性能室内试验与FEM试验对比

Fig. 3 Comparison of mechanical properties of rock specimens between laboratory test and FEM test

验值为 7.3 MPa, 与室内试验值的相对误差为 1.35%。单轴压缩试验与巴西劈裂试验结果的数值试验均与室内试验参数差距小, 验证了 FDEM 方法的准确性, 说明该组数据可作为 FDEM 模拟中岩石模型参数的依据。最终获得离散元仿真模型中所采用的细观参数如表 2 所示。

表 2 岩石模型输入参数
Table 2 Input parameters of rock model

参数	数值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 689
弹性模量 E / GPa	23.44
泊松比	0.31
初始法向刚度 $k_n / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	1.5×10^9
法向牵引力峰值 t_n^0 / MPa	15.70
I 型断裂能 $G_{Ic} / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.24
初始切向刚度 $k_s / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	1.5×10^9
切向牵引力峰值 t_s^0 / MPa	46.70
II 型断裂能 $G_{IIc} / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.44

1.3 不同侵入角度对截齿滚动破岩机理的影响

为验证截齿侵入角度对单截齿破岩行为的影响, 通过控制变量法, 即保持截齿侵入深度为 5 mm, 滚筒旋转速度为 35 r/min, 对不同侵入角度下单截齿破岩进行仿真模拟分析, 侵入角度为滚筒滚动过程中截齿与岩石接触角度, 因此对侵入角度为 30°、45°、60°、75° 和 90° 条件下进行数值仿真研究。

(1) 不同截齿侵入角度下岩石破坏状况

不同滚动截齿侵入角度条件下岩石最终破坏状况和裂纹演变如图 4 所示, 随着滚动截齿侵入角度的增加, 岩体内部裂纹数量逐渐增加, 随着微裂纹的产生与扩展, 与滚动接触的区域破碎范围逐渐增大但内部裂纹未完全贯通, 所以破碎体积逐渐变小。其中滚动截齿在一定时间内侵入角度为 30°、45°、60°、75° 和 90° 时分别对应截齿滚动破岩距离为 32.62, 35.63, 39.72, 45.17, 56.25 mm, 说明随着截齿侵入角度的增加, 裂纹发育得越远越深, 截齿滚动破岩距离越大。同时, 岩石破碎范围呈现出非对称状态, 这是由于随着滚动截齿侵入角度的增加, 截齿与岩石接触面积不断减小, 旋转产生的旋转力部分转变为摩擦力, 截齿对岩石的挤压与摩擦力随侵入角度的增大而不断减小, 岩石凹陷深度和破坏面积增加, 破坏效果显著。

为了进一步探究不同侵入角度下单截齿滚动破岩的效果, 对岩体内部微裂缝数量进行统计分析, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 脆性材料的岩石随着截齿侵入角度的增大, 裂纹数逐渐增加, 但是增加幅度先增大后减小, 拉伸裂纹数量增加幅度较小, 主要是剪切裂纹数量增加。

(2) 不同侵入角度下截齿破碎比能变化

不同截齿侵入角度下截齿作用力变化趋势如图 6 所示, 随着截齿侵入角度的增加, 截齿作用力呈现出上升趋势, 截齿破碎岩石之后产生大量岩石

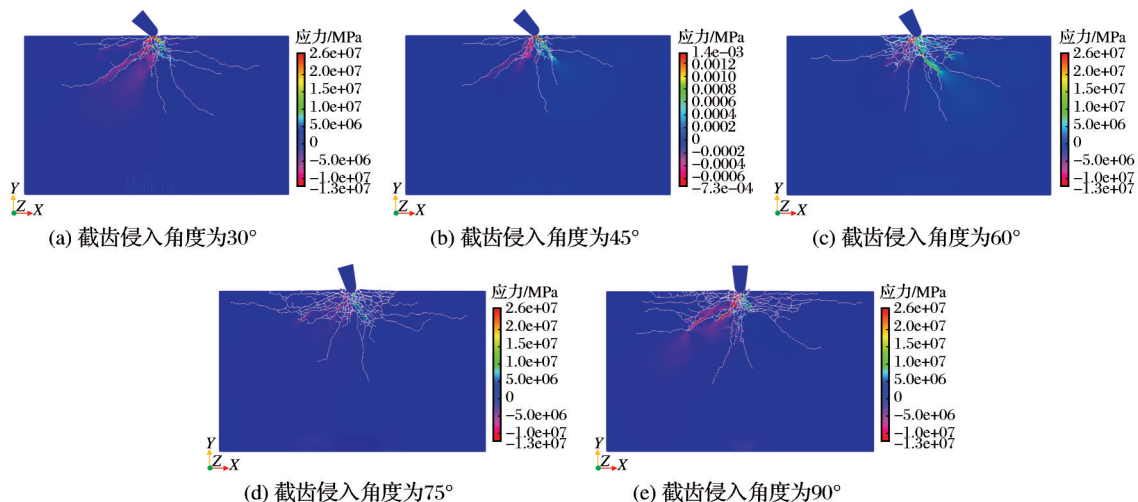


图 4 不同侵入角度下岩体破坏状况

Fig. 4 Failure state of rock mass under different intrusion angles

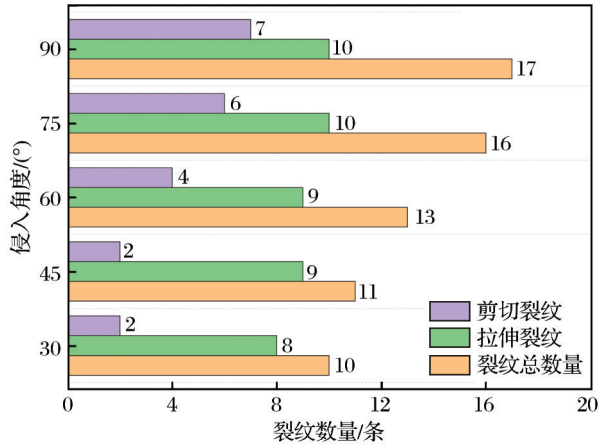


图5 不同侵入角度下岩体产生裂纹数量

Fig. 5 Number of cracks in rock mass under different intrusion angles

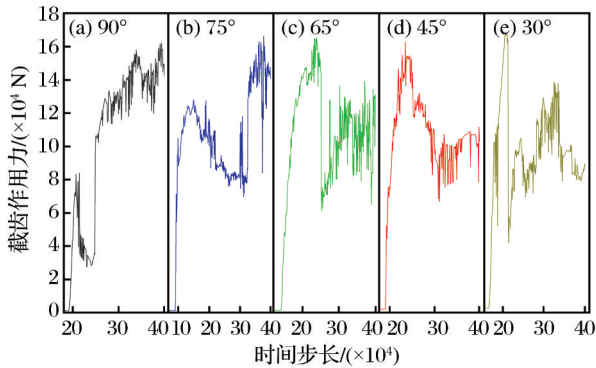


图6 不同截齿侵入角度下单截齿滚动破岩作用力

Fig. 6 Rolling rock breaking force of single pick under different intrusion angles of picks

碎块,由于岩体已发生干扰破坏,作用力逐渐下降,随着截齿侵入深度的不断增加,密实核产生时间无法确定,因此截齿破岩作用力呈现出波浪式浮动变化趋势。

对不同截齿侵入角度下单截齿破岩作用力和岩体破碎体积进行统计,结果如图7所示。由图7可知,随着截齿侵入角度的不断增加,截齿作用力逐渐减小,岩体破碎体积呈现出小幅上升趋势,由此可见,在不考虑其他因素的情况下,重力式竖井掘进机滚动截齿与岩体的接触面积随着侵入角度的减小而不断提高,截齿对岩体的挤压与摩擦力随侵入角度的减小而不断增大。

破碎比能是评判截齿破岩效率的重要参数之一,其定义为截齿破碎单位体积岩石所消耗的能量,

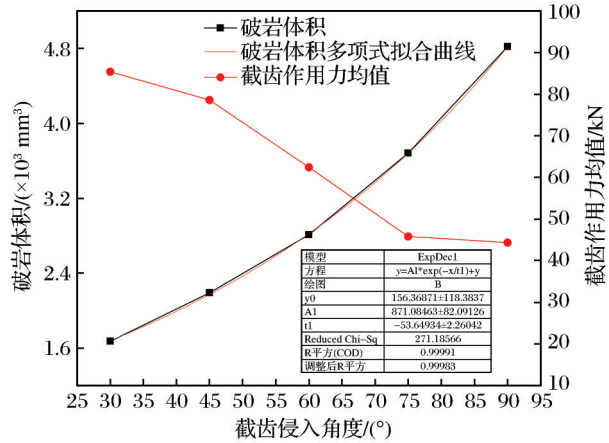


图7 不同截齿侵入角度下单截齿破岩数据

Fig. 7 Single pick rock breaking data under different pick intrusion angles of picks

量,破碎比能越低,效率越高(陈新明等,2022;张将令等,2022;Chen et al,2025)。其计算公式为

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

式中:SE为破碎比能(J/mm³);F为截齿作用(kN);h为截齿侵入深度(mm);V为岩石体积(mm³)。

根据式(1)计算数值模拟下的破碎比能,对不同截齿侵入角度下破岩数据进行统计,结果如表3所示。由表3可知,随着截齿侵入角度的增加,单截齿破碎比能呈现下降趋势,较小的破碎比能对应较高的破岩效率,因此截齿侵入角度为90°时截齿破岩效率最高。

表3 不同侵入深度下破岩数据统计

Table 3 Statistics of rock breaking data under different intrusion depths

侵入角度/(°)	截齿作用力 /kN	破碎体积 /mm³	破碎比能 / (J·mm⁻³)
30	85.43	1 672	0.25
45	78.62	2 190	0.18
60	62.48	2 810	0.11
75	45.82	3 682	0.06
90	44.35	4 820	0.05

综上所述,在其他条件不变的前提下,随着截齿侵入角度的增加,拉伸裂纹起主要作用,剪切裂纹的数量随之增加,岩石破碎体积随之增大的幅度较小,截齿破岩作用力随之减小,破碎比能逐渐降低,截齿破岩效率越高。在重力式竖井掘进机施工

中,截齿侵入角度对掘进机破岩性能的影响机制对于揭示前置掘进系统的几何排布规律与设计方法具有重要意义,因此尽量选取最优角度,提高竖井掘进效率。

2 试验验证

为了进一步探究重力式竖井掘进机不同滚动截齿侵入角度作用下岩石破坏机理,对滚动截齿破岩展开一系列研究。由于重力式竖井掘进机目前仍处于研发阶段,因此采用简单可控的室内试验进行研究,有效避免了其他无关因素的干扰,更加直观地再现出滚动截齿作用下岩石破坏特性。根据相似性原理,试验模型的尺寸缩放并不影响最终得到的结果,其研究对象的行为与真实情况存在一定相似性(Chen et al, 2023; 刘大兵等, 2024)。因此,通过相似试验,对滚动截齿侵入岩石过程进行分析,有助于全面系统地研究不同滚动截齿侵入角度作用下岩石破坏机理问题。

2.1 试验试样及力学性能

在试验前应选取与试样相似的材料,相似材料的选择对模型试验的成功起着至关重要的作用(邓嵘等 2023; 孙超等, 2024)。选取的材料应具有与原材料相似的物理力学性质,综合考虑下选取符合相似试验理论的混凝土材料作为试验对象;混凝土制作工序简单,在凝固过程中变形较小,且与岩石材料构造相似,在一定程度上能够真实模拟岩石动态破坏特性(欧阳涛, 2014; 潘文龙等, 2023; 史勇等, 2024)。水泥选用普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,由水泥、水、砂按照 1.0:0.5:3.8 进行配比,养护 28 d 得到,采用标准试块模制作完成混凝土制样,并经 WAW-600 型材料试验机如图 8 所示获得试件的力学参数,其中测试试样所得力学参数如表 4 所示。

2.2 截齿滚动破岩试验

(1) 试验目的及内容

截齿滚动破岩过程是截齿与岩石之间角度不断变化的过程,为满足试验要求,本试验采用 WAW-600 型材料试验机对不同角度岩石试样下单截齿破岩规律进行研究。在试验过程中,观察岩石裂纹演变过程,分析截齿破岩力和岩石破碎块度,进而得出单截齿滚动破岩的一般性结论。



图 8 混凝土力学性能试验

Fig. 8 Mechanical properties test of concrete

表 4 混凝土力学性能参数

Table 4 Mechanical performance parameters of concrete

参数	数值	参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 437	抗拉强度/MPa	4.83
弹性模量/GPa	21.40	内聚力/MPa	4.76
抗压强度/MPa	40.20	内摩擦角/($^{\circ}$)	40

(2) 试验方案

为了有效地模拟出截齿滚动破岩过程,采用截齿对不同角度岩石试样进行侵入试验,为提高试验效率,选出具有代表性的截齿和岩石角度进行研究,选取角度为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° ,采用钢板对岩石四周施加相同约束条件。试验时将装有不同角度试块的岩石盒放置在试验台上,通过压力装置将固定于加载装置上部钢板之上的截齿逐步加载至给定侵入深度后卸载,如图 9 所示。在该过程中利用高速摄像机观察与截齿接触区域处岩石瞬时破坏过程,捕捉岩石破碎块碎裂过程,并记录载荷变化曲线。

(3) 试验结果与分析

对不同截齿侵入角度下岩石破坏状况进行统计,结果如图 10 所示。可以看出,随着截齿侵入角度的增加,岩石凹陷深度和破坏面积增加,裂纹发育得越远越深,同时发现岩石破碎范围呈现出非对称状态。这是由于随着滚动截齿侵入角度的增加,截齿与岩石的接触面积不断减小,掘进滚筒旋转产生的旋转力与惯性力部分转变为摩擦力,截齿对岩石的挤压与摩擦力随侵入角度的增大而不断减小,

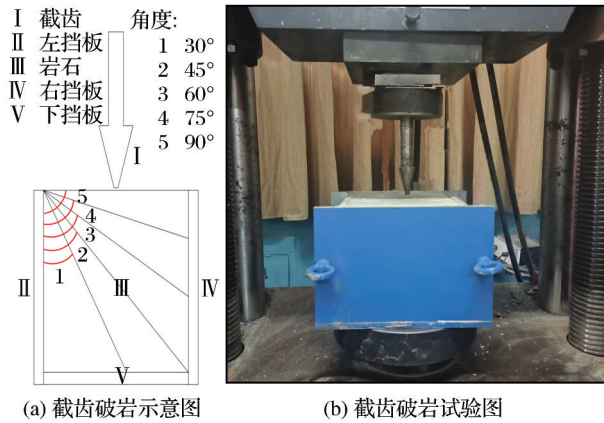


图9 截齿滚动破岩试验方案
Fig. 9 Test scheme of pick rolling rock breaking

破坏效果显著。

通过计算机采集仪对不同角度下截齿破岩所

需作用力进行统计并绘制变化曲线,如图 11 所示。由图 11 可以看出,当截齿侵入角度为 30°时,截齿作用力为 23.02 kN;当截齿侵入角度为 45°时,截齿作用力为 19.73 kN;当截齿侵入角度为 60°时,截齿作用力为 17.77 kN;当截齿侵入角度增大到 75°时,截齿作用力为 16.10 kN;当截齿侵入角度增大 90°时,截齿作用力为 15.06 kN。可以看出,随着滚动截齿侵入角度的增加,截齿作用力降低幅度逐渐减小。

随着截齿侵入角度的增加,截齿作用力逐渐减小。由此可见,在不考虑其他因素的情况下,重力式竖井掘进机滚动截齿与岩石接触面积随着侵入角度的减小而不断提高,滚动截齿对岩石的挤压与摩擦力随侵入角度的减小而不断增大。上述结果与数值模拟中所得结论一致,验证了数值模拟结果的准确性。

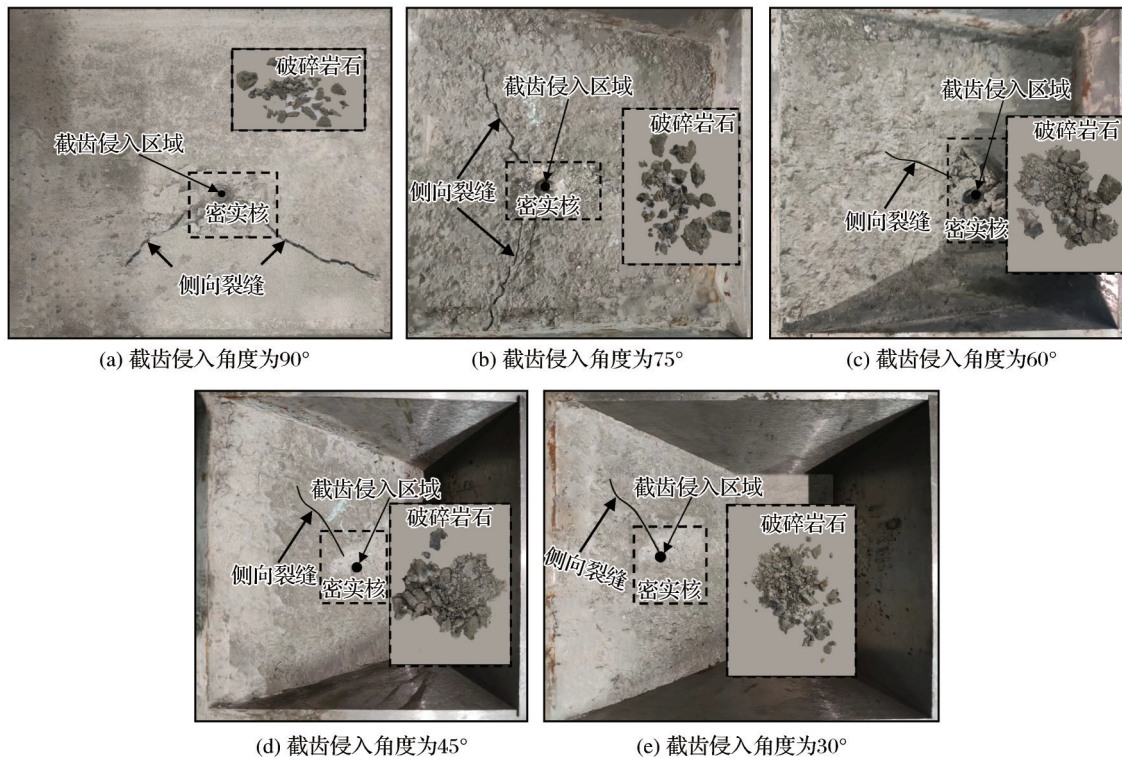


图 10 不同截齿侵入角度下岩石破碎状况

Fig. 10 Rock fragmentation conditions under different intrusion angles of picks

3 结论

(1)由 FDEM 方法标定的单轴压缩和巴西劈裂试验模拟结果与室内试验数据一致性较高,验证了

FDEM 方法的正确性。同时,也验证了滚动截齿破岩数值模拟结果的可靠性。

(2)岩石在滚动截齿作用下产生大量由拉伸和剪切破坏引起的裂纹,随着截齿侵入角度的增加,

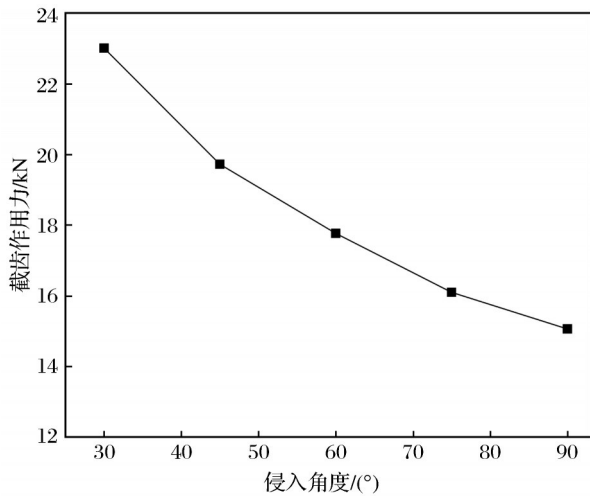


图 11 不同侵入角度下截齿作用力变化

Fig. 11 Variation of pick force under different intrusion angles

拉伸裂纹起主导作用,剪切裂纹数量随之增加;岩石破碎体积随之增大的幅度较小,截齿破岩作用力则随之减小;由破碎比能计算公式得出,当截齿侵入角度为 90° 时,破碎比能最低(0.05 J/mm^3),截齿破岩效率最高。

(3)相似试验与模拟试验均具有较好的模拟精度,表明基于MultiFracS有限—离散元数值模拟软件开展截齿滚动破岩相关模拟试验具有可行性。基于相似理论的滚动截齿破岩试验探究了岩石在滚动截齿作用下的破坏演化过程,研究了截齿侵入角度对截齿破岩的影响。研究表明截齿破岩所需作用力随截齿侵入角度的增大而减小,且岩石破碎范围呈现出非对称状态。

参考文献 (References):

Chen X M, Wang J, Jiao H Z, et al, 2023. Study on early hydration mechanism of double-liquid grouting material modified by composite early strength agent [J]. *Materials*, 16 (19): 6475.

Chen X M, Yang Z, Jiao H Z, et al, 2024. Research on dynamic characteristics of cutter breaking frozen soil and optimal drum rotation speed of the new shaft tunneling machine [J]. *Scientific Reports*, 14: 5807.

Guo Z W, Ye X T, Gou J H, et al, 2023. Research on rock breaking mechanism of composite cone single cone bit [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 231: 212302.

Jin X F, Chen X M, Jiao H Z, et al, 2025. Research on rock damage characteristics of gravity tunneling machine based on different rotational speeds [J]. *Scientific Reports*, 15: 34920.

Rostami K, Hamidi J K, Nejati H R, 2020. Use of rock microscale properties for introducing a cuttability index in rock cutting with a chisel pick [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (18): 960.

陈新明, 张将令, 焦华喆, 等, 2022. 新型重力式竖井连续掘进机滚动截齿破岩机理 [J]. *采矿与安全工程学报*, 39 (3): 576-583, 597.

Chen Xinming, Zhang Jiangling, Jiao Huazhe, et al, 2022. Rock breaking mechanism of rolling cutter of new gravity vertical shaft continuous heading machine [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 39 (3): 576-583, 597.

邓嵘, 杨宏宇, 刘建平, 等, 2023. PDC 齿静载压入砾岩的微观损伤模拟 [J]. *地下空间与工程学报*, 19 (6): 1828-1840.

Deng Rong, Yang Hongyu, Liu Jianping, et al, 2023. Mesoscopic damage simulation of PDC cutter pressed into conglomerate under static load [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 19 (6): 1828-1840.

付鸿鑫, 徐颖, 程琳, 2023. 我国竖井掘进机研究热点综述 [J]. *建井技术*, 44 (5): 83-88.

Fu Hongxin, Xu Ying, Cheng Lin, 2023. Overview of the research hotspots of China's shaft boring machine [J]. *Mine Construction Technology*, 44 (5): 83-88.

刘大兵, 何银东, 2024. 截齿截割角度对截割性能的影响研究 [J]. *黄金科学技术*, 32 (1): 91-99.

Liu Dabing, He Yindong, 2024. Study on the effect of cutting angle of cutting teeth on cutting performance [J]. *Gold Science and Technology*, 32 (1): 91-99.

刘先珊, 牛万保, 许明, 2023. 旋挖钻机截齿的破岩机理及优化研究 [J]. *重庆大学学报*, 46 (9): 52-65.

Liu Xianshan, Niu Wanbao, Xu Ming, 2023. Fragmentation mechanism and optimization of the picks in rotary drilling gig [J]. *Journal of Chongqing University*, 46 (9): 52-65.

刘翔宇, 杨仁树, 杨立云, 等, 2024. 竖井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望 [J]. *煤炭科学技术*, 52 (增刊 1): 145-152.

Liu Xiangyu, Yang Renshu, Yang Liyun, et al, 2024. Research progress and prospect of advanced geological exploration in shaft and roadway driving [J]. *Coal Science and Technology*, 52 (Suppl. 1): 145-152.

刘志强, 李术才, 王杜娟, 等, 2022. 千米竖井硬岩全断面掘进机凿井关键技术与研究路径探析 [J]. *煤炭学报*, 47 (8): 3163-3174.

Liu Zhiqiang, Li Shucui, Wang Dujuan, et al, 2022. Analysis of key technology and research path of

- full section boring machine for 1000 m vertical shaft with hard rock strata[J].*Journal of China Coal Society*, 47(8): 3163-3174.
- 吕旦,贾连辉,2023.上排渣式全断面竖井掘进机凿井技术与应用[J].*隧道建设(中英文)*,43(1):151-160.Lü Dan, Jia Lianhui, 2023. Sinking technology and application of full-face shaft boring machines with upper muck discharge [J].*Tunnel Construction*, 43(1): 151-160.
- 欧阳涛,2014.盘形滚刀切削性能试验台研制及其应用[D].长沙:中南大学.Ouyang Tao, 2014. Development and application of a testing equipment for cutting performance of disc cutters[D]. Changsha: Central South University.
- 潘文龙,郭润寿,2023.TBM在煤矿智能化掘进工作面中的应用[J].*智能矿山*, 4(11): 78-83. Pan Wenlong, Guo Runshou, 2023. Application of TBM in intelligent driving face of coal mine [J].*Journal of Intelligent Mine*, 4(11): 78-83.
- 任义,高永涛,吴顺川,等,2022.花岗岩巴西劈裂试验的矩张量反演研究[J].*岩土力学*, 43(1): 235-245. Ren Yi, Gao Yongtao, Wu Shunchuan, et al, 2022. Moment tensor inversion of Brazilian splitting test on granite [J].*Rock and Soil Mechanics*, 43(1): 235-245.
- 史勇,陈勇,张康健,等,2024.岩体节理及岩块力学参数对TBM净掘进速率的影响[J].*铁道建筑技术*, (2): 14-18, 63. Shi Yong, Chen Yong, Zhang Kangjian, et al, 2024. Influence of rock mass joints and rock block mechanical parameters on the penetration rate of TBM [J].*Railway Construction Technology*, (2): 14-18, 63.
- 孙超,凌静秀,王乾廷,等,2024.基于离散元法的TBM边滚刀破岩载荷特性研究[J].*机电技术*, (1): 85-88, 105. Sun Chao, Ling Jingxiu, Wang Qianting, et al, 2024. Study on rock breaking load characteristics of TBM side hob based on discrete element method [J].*Mechanical and Electrical Technology*, (1): 85-88, 105.
- 唐宇,王少锋,2021.单向受限应力下镐型截齿破岩特性及其影响因素分析[J].*黄金科学技术*, 29(5): 669-679. Tang Yu, Wang Shaofeng, 2021. Analysis on rock breakage characteristic and its influence factors of conical pick under uniaxial confining stress [J].*Gold Science and Technology*, 29(5): 669-679.
- 王少锋,李夕兵,2021.深部硬岩可切割性及非爆破机械破岩实践[J].*黄金科学技术*, 29(5): 629-636. Wang Shaofeng, Li Xibing, 2021. Cutting characteristic and non-explosive mechanized rock-breakage practice of deep hard rock [J].*Gold Science and Technology*, 29(5): 629-636.
- 武茂超,万鹏,姚树标,等,2023.考虑岩体强度及截割参数的掘进机截齿破岩特性[J].*当代化工研究*, (19): 57-60. Wu Maochao, Wan Peng, Yao Shubiao, et al, 2023. Rock breaking characteristics of tunneling machine cutting teeth considering rock mass strength and cutting parameters [J].*Modern Chemical Research*, (19): 57-60.
- 肖建成,卢景景,周辉,等,2022.贯入角度对截齿破岩性能与几何排布的影响研究[J].*岩土力学*, 43(12): 3372-3384. Xiao Jiancheng, Lu Jingjing, Zhou Hui, et al, 2022. Influence of penetration angle on rock breaking performance and geometrical arrangement of picks [J].*Rock and Soil Mechanics*, 43(12): 3372-3384.
- 杨小聪,黄丹,岳小磊,等,2024.非煤矿山机械连续采矿技术研究进展与发展趋势[J].*有色金属(矿山部分)*, 76(6): 1-24. Yang Xiaocong, Huang Dan, Yue Xiaolei, et al, 2024. Research progress and development trend of continuous mechanical mining technology in non-coal mine [J].*Nonferrous Metals (Mine Section)*, 76(6): 1-24.
- 张将令,2022.新型竖井掘进机滚刀截齿作用下冻土动力破坏研究[D].焦作:河南理工大学. Zhang Jiangling, 2022. Research on dynamic failure of frozen soil under the rolling cutter of new vertical shaft tunnelling [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University.
- 张将令,李小二,陈新明,等,2022.截齿滚刀掘进冻土过程的影响因素数值模拟研究[J].*冰川冻土*, 44(1): 229-240. Zhang Jiangling, Li Xiaoer, Chen Xinming, et al, 2022. Study on numerical simulation of influencing factors for frozen soil excavation process by cutting pick rolling [J].*Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(1): 229-240.
- 张开雨,刘丰,夏开文,2022.模拟脆性材料动态裂纹扩展的非连续变形分析方法[J].*岩土工程学报*, 44(1): 125-133, I0005-I0007. Zhang Kaiyu, Liu Feng, Xia Kaiwen, 2022. Numerical study on dynamic crack propagation of brittle materials by discontinuous deformation analysis [J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(1): 125-133, I0005-I0007.
- 张鑫,2022.煤矿盘形滚刀岩石破碎试验台设计研究[J].*煤矿机械*, 43(11): 5-7. Zhang Xin, 2022. Design and research on rock breaking test-bed of disk-shape cutter in coal mine [J].*Coal Mine Machinery*, 43(11): 5-7.

Study on the Influence of the Intrusion Angle of Pick on the Rotating Rock-Breaking Mechanism of Digging Drum of Gravity Shaft Boring Machine

HUO Cheng¹, ZHENG Diantao², YANG Zhi², JIAO Huazhe², LIU Xiaohui³, SUN Jinyu², HAN Yulong², LIU Ziyang²

1. Shanxi Fenxi Mining Group Nanguan Coal Industry Co., Ltd., Jinzhong 030600, Shanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;

3. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, Hebei, China

Abstract: To elucidate the impact of the cutting tooth intrusion angle on the rock-breaking mechanism of rotating drums in gravity-type vertical shaft tunneling machines, a comprehensive investigation was undertaken. This study employed both numerical simulation and similarity testing to examine rock-breaking characteristics across varying intrusion angles. A numerical model of rolling cutting tooth rock-breaking was developed using the finite-discrete element method (FDEM). The study analyzed the effects of different cutting tooth intrusion angles on the rock-breaking mechanism and efficiency by examining factors such as rock joint evolution, failure modes, fragmentation volume, cutting tooth forces, and specific energy consumption. Additionally, rock-breaking tests with analogous materials were conducted to compare the rock-breaking processes at different intrusion angles, thereby validating the accuracy and reliability of the numerical simulation results. The findings reveal that with an increase in the cutting tooth intrusion angle, the rock failure mode transitions from primarily shear failure to predominantly tensile failure, accompanied by shear failure, resulting in more extensive fracture propagation. The volume of rock fragmentation exhibits a gradual increase with the intrusion angle, whereas the force required for rock-breaking by the cutting teeth decreases significantly. Consequently, the specific energy consumption per unit volume of fragmented rock diminishes progressively, leading to a marked improvement in the rock-breaking efficiency of the cutting teeth. The results from numerical simulations are consistent with the patterns observed in similarity tests, thereby validating the efficacy of the established model. These findings provide a theoretical foundation for optimizing the structural parameters of the drum and designing the cutting tooth layout in gravity-type vertical shaft tunneling machines. They offer substantial engineering reference value for enhancing the efficiency of mechanized vertical shaft tunneling and reducing energy consumption.

Key words: gravity shaft boring machine; finite-discrete element; fissure evolution; crushing specific energy; similar test