

# 基于截齿切削试验的旋挖钻具布齿规律研究

马宁<sup>1</sup>, 谢志勇<sup>2</sup>, 肖丹桂<sup>2</sup>

(1. 北京三一智造科技有限公司研究院, 江苏 昆山 215300; 2. 昆山长鹰硬质材料科技股份有限公司, 江苏 昆山 215300)

**摘要:** 旋挖钻机施工过程中, 岩石钻进效率与筒钻布齿方式密切相关。采用截齿切削试验系统, 对筒钻关键布齿参数进行研究。采集试验过程的三向荷载、破碎体积、变形位移、破碎形态等数据。从破碎比功、切削阻力、荷载波动及截齿自旋等多个维度, 应用控制变量法进行截齿切削试验, 定量评价切削角、齿偏角、切削顺序、齿尖高度差和齿尖轨迹间距等参数对岩石切削的影响。研究表明: 存在与地层性质匹配的最优布齿参数组合, 以钻进花岗岩地层为例确定了最优布齿参数范围, 分别为: 切削角 $68^{\circ}\sim 72^{\circ}$ , 齿偏角 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ , 跳跃式切削, 齿尖高度差3 mm左右, 齿尖轨迹间距30 mm左右。根据试验结果进行了筒钻设计和工程验证, 钻进效率比普通筒钻提升13.64%, 单位进尺成本降低39.13%。研究成果对指导截齿筒钻布置、降低钻齿损耗、提高岩层钻进效率具有重要的意义。

**关键词:** 旋挖钻机; 岩石切削; 截齿筒钻; 钻具布齿

中图分类号: TH122; P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2025)02-0087-11

## Research on the pick arrangement pattern of rotary drilling barrel based on pick cutting test

MA Ning<sup>1</sup>, XIE Zhiyong<sup>2</sup>, XIAO Dangui<sup>2</sup>

(1. Institute of Beijing Sany Intelligent Technology Co., Ltd., Kunshan Jiangsu 215300, China; 2. Kunshan Changying Hard Material Technology Co., Ltd., Kunshan Jiangsu 215300, China)

**Abstract:** During the construction of rotary drilling rig, the efficiency of rock drilling is closely related to the pick arrangement of core barrel. The key pick arrangement parameters of core barrels are studied by using pick cutting test system. Three-dimensional load, crushing volume, deformation displacement, broken morphology and other data were collected during the test process. From multiple dimensions such as crushing specific power, cutting resistance, load fluctuation, and pick spin, the controlled variable method is applied to conduct pick cutting experiments, quantitatively evaluating the effects of cutting angle, drilling tooth deviation angle, cutting sequence, drilling tooth tip height difference, and drilling tooth tip trajectory spacing on rock cutting. Research has shown that there is an optimal combination of drilling tooth arrangement parameters that match the geological properties. Taking drilling into granite formations as an example, the optimal range of drilling tooth arrangement parameters was determined, which are: cutting angle  $68^{\circ}\sim 72^{\circ}$ , drilling tooth deviation angle  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ , skip cutting, drilling tooth tip height difference of about 3mm, and drilling tooth tip trajectory spacing of about 30mm. According to the test results, the drilling efficiency is increased by 13.64% and the cost of unit footage is reduced by 39.13%. The research results are of great significance for guiding the arrangement of the core barrels, reducing the drilling tooth loss and improving the drilling efficiency.

**Key words:** rotary drilling rig; rock cutting; pick tooth barrel drilling; pick arrangement of core barrel

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-08-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.012

基金项目: 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室2021年度开放课题基金项目“旋转切削入岩加压力和扭矩匹配研究”(编号: KF202102)

第一作者: 马宁, 男, 汉族, 1982年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为岩石破碎理论和桩基础施工工法, 江苏省昆山市三一全球研发中心B栋5层, 22235450@qq.com。

引用格式: 马宁, 谢志勇, 肖丹桂. 基于截齿切削试验的旋挖钻具布齿规律研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 87-97.

MA Ning, XIE Zhiyong, XIAO Dangui. Research on the pick arrangement pattern of rotary drilling barrel based on pick cutting test [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 87-97.

## 0 引言

旋挖钻机施工钻孔灌注桩过程中,硬岩层钻进已成为工程工期的最大制约因素之一,目前普遍使用截齿筒钻或牙轮筒钻取心、嵌岩捞砂斗取渣的施工工法<sup>[1]</sup>。其中,截齿筒钻以其成本较低、使用方便、适用范围广等优势,逐渐成为占比最大的取心钻具。截齿作为筒钻上直接与岩石接触的结构,其布置是否合理不仅决定钻进效率的高低,还影响着自身的磨损速度;严重时,还会增加整机振动程度,损坏钻杆和动力头等关键结构,造成不可逆转的损伤和带来不可估量的损失。因此,基于实际施工条件,对截齿筒钻的布齿规律进行研究具有重要的意义。

针对钻具与岩石相互作用机理及截齿筒钻布齿准则,国内外学者紧紧围绕“哪些截齿排布参数影响岩石破碎,如何定量评价影响效果”两大关键问题,采用现场观测与理论研究、试验研究和仿真模拟等手段,取得了大量的研究成果。

现场观测与理论研究方面,Evans<sup>[2]</sup>基于煤的物理力学性能与刀具截割过程,推导得出镐形截齿切向与法向受力表达式,相关拓展理论广泛应用于掘进机、采煤机等采掘设备刀具设计;Nishimatsu<sup>[3]</sup>根据摩尔-库伦准则,提出新的截割力表达式,认为截齿破岩过程主要是剪切断裂破坏模式,而非拉伸断裂;Yilmaz等<sup>[4]</sup>基于大量数据,采用多重线性回归分析方法建立了刀齿峰值截割力经验公式,该模型认为岩石类型及其物理力学性质对刀具-岩石相互作用影响明显,并对花岗岩、砂岩等4种岩石类型的切割过程进行了分析验证;贾学强等<sup>[5]</sup>以单个截齿为研究对象,参考内摩擦理论,得出轴向压力和切削力计算公式,并拓展得到了旋挖钻机压力和扭矩参数的计算公式;Gao等<sup>[6]</sup>在Love和Sneddon研究的基础上,基于弹性断裂力学理论,建立了截齿截割岩石的峰值切向力表达式,模型考虑了岩石力学性质与截齿几何参数。

截齿切削试验方面,Roxborough等<sup>[7]</sup>和Goktan等<sup>[8-10]</sup>考虑了岩石与刀具间摩擦角、岩石单轴抗压强度对破碎过程和截割力的影响,对Evans理论进行了修正,并通过分析试验数据进行了效果验证;张旭辉等<sup>[11-12]</sup>开展了临空面与常规工况下滚刀切割红砂岩破岩实验和仿真研究,分析了岩石破碎状态、滚刀受载及破岩比能耗等规律,认为临空面状

态下岩石破坏过程以张拉破坏模式为主,存在有效促进裂纹向临空面扩展的临界距离,并证明临空面工况下的滚刀破岩载荷和破岩比能耗显著低于常规工况;王立平<sup>[13]</sup>进行了不同截割厚度、截距、截割角和截齿规格下的截齿侵入试样崩边试验及截齿截割试验,研究了截割参数变化对煤岩破裂模式及截齿载荷造成的影响;冯上鑫<sup>[14]</sup>基于室内岩石旋切破碎装置研究了不同加载压力和钻头角度下的岩石破碎特性,建立了钻进过程中钻头三维螺旋运动轨迹方程,解释了该过程的机-岩相互作用机制;张倩倩<sup>[15]</sup>根据实际工况进行了不同截齿间距和切削深度条件下的岩石切削试验,分析截齿间距和切削深度之比对比能耗、截割载荷及粗糙度指数的影响规律,提出一种寻找最佳截割条件的方法。

数值模拟方面,宋杨<sup>[16]</sup>定量分析了截齿与煤岩相互作用的力学关系,以及相关因素对截齿破碎煤岩能力的影响,基于ABAQUS建立了评价不同截齿参数破岩效率的方法;马瑞<sup>[17]</sup>选取了泥岩、煤、砂岩3种类型的5种强度作业工况,针对掘进刀具中使用较多的镐形截齿和盘形滚刀,分析得到了不同岩土条件下镐形截齿的合理安装角度范围和盘形滚刀的结构布局;Zhou等<sup>[18]</sup>利用有限元方法对不同切削深度下的断裂能进行了分析;曹治<sup>[19]</sup>应用LS-DYNA对不同齿尖夹角和齿身锥角的截齿破岩瞬间进行有限元仿真,分析其不同结构参数对截齿三向力变化规律的影响,得到了适合截齿截割的结构角度;孔双腾<sup>[20]</sup>利用ABAQUS软件建立了单齿切削和相邻截齿切削的仿真模型,分析截齿夹角、切削角度、切削速度、切削深度、岩石性质等参数对岩石破碎的影响,结合仿真结果进行了截齿筒钻结构优化。

综上所述,截齿在筒钻上的布置参数对施工效率、截齿损耗、钻机结构稳定等有显著影响。存在一定的参数布置范围,使得机-具-岩协同作用处于合理、稳定的波动范围。然而,上述截齿破岩理论大都进行了不同程度的模型简化,且未经过充分现场验证,难以真实反映实际施工过程。同时,相关研究对象普遍安装于采煤机、掘进机、铣刨机等设备,其施工工况与旋挖钻机存在较大差别,研究成果难以应用于旋挖施工。此外,多数针对截齿破碎岩石的试验研究,其刀具运动形式与旋挖刀具大相径庭,加之岩石破碎体积测量方式存在不同程度的

误差,所得规律的准确性与适用性尚需商榷。因此,仍需基于实际的旋挖钻进过程,深入研究和定量评价截齿布置参数对岩石破碎的影响,建立包含旋挖钻具布齿规律的理论体系,这对于缩短工程工期、推动工程机械低碳化具有重要意义。

鉴于此,本文首先在调研总结影响岩石破碎过程的截齿布置参数基础上,充分考虑旋挖钻机的岩石切削能力,设计并搭建了重载高速截齿直线切削试验台。然后,通过控制变量法进行试验设计,对各个影响因素进行了定量评价,确定适用于旋挖施工的最优布齿范围。最后,依据试验结果设计了重载筒钻,在花岗岩地层施工过程中进行了现场验证,并探讨了截齿筒钻的扩展施工工况。

## 1 试验准备

### 1.1 岩石宏观参数

本文试验中涉及的岩石种类包括红砂岩、灰砂岩、大理岩和花岗岩,均为旋挖钻机使用截齿筒钻的常见施工地层。为保证岩样的代表性和试验结果的说服力,试验所用岩样取自不同区域的旋挖工地。

按照《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.7—2009)第7部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法、《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.10—2010)第10部分:煤和岩石抗拉强度测定方法及《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.13—2010)第13部分:煤和岩石点载荷强度指数测定方法等国家标准,将以上岩样加工成标准尺寸( $\text{O}50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $\text{O}50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 和 $\text{O}25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 三种),委托中国地质大学(北京)进行岩石的宏观力学参数测定。使用电子万能材料试验机进行单轴压缩试验,使用DDL-100型微机控制电子材料万能试验机进行巴西劈裂拉伸试验,使用洛氏硬度计进行点载荷强度试验(如图1所示)。考虑到岩石材料的非均质性,每种试验开展5次,获得的关键物理力学参数如表1所示。

### 1.2 试验设备和测试系统

室内试验通过重载高速截齿直线切削试验台进行,通过试验台可完成截齿线性切割试验,开展岩石可钻性、破碎方式与机理研究,验证岩石切削理论和仿真数据,为钻具设计提供依据,为实现旋



(a) 单轴压缩试验 (b) 巴西劈裂试验 (c) 点载荷强度试验

图1 岩石试样宏观力学参数测定试验

Fig.1 Experimental determination of macroscopic mechanical parameters of rock samples

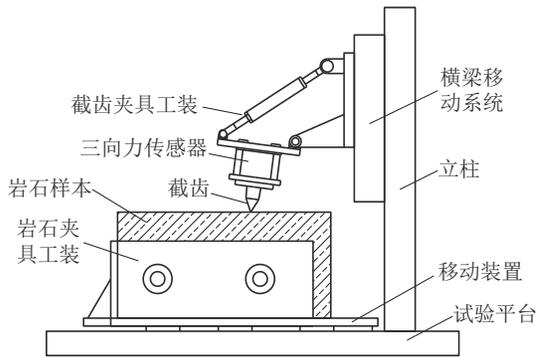
表1 岩石试样宏观力学参数

Table 1 Macro mechanical parameters of rock samples

岩石类型	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	极限 载荷/ kN	单轴抗 压强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa	硬度 HRB
红砂岩	2.20	17.58	35.62	1.36	2.35	/
灰砂岩	2.69	62.89	8.98	2.92	6.08	336.53
大理岩	2.61	49.33	25.54	2.73	2.60	39.17
花岗岩	2.68	165.78	84.40	11.66	5.18	50.8

挖智能钻进奠定基础。试验台机械机构采用横梁悬挂刀架,下端岩石沿水平方向移动,实现岩石直线切削。包含岩样移动和夹持固定系统、横梁移动系统、围压加载系统、截齿调节锁定系统及一系列测试系统,截齿直线切削试验系统如图2所示。

为采集试验过程中的应力应变、破碎体积等数据进行针对性分析,搭建了包括高速摄像、三向力采集、三维扫描和数据处理分析系统等在内的测试系统。其中应力数据用于计算岩石切削力,高速摄像机所拍摄照片用于记录岩石破碎全过程,捕捉岩屑飞溅轨迹与规律。此外,本试验采用复合式三维扫描仪进行破碎体积测量,利用双目视觉原理获得空间三维点云,工作时借助于扫描当前帧的标记点与标记点库进行匹配从而获得扫描仪和被测物体的空间位置。通过激光发射器发射激光,照射在被扫描工件表面,再由两个经过厂家校准的工业相机来捕捉反射光,经计算得到工件的外形数据。扫描前需在被测物体上粘贴编码标记点和反光标记点,每两颗反光标记点之间间距一般为30~250 mm,同时注意标记点避免规律排布。三维扫描仪及贴点示意如图3所示。



(a) 试验台原理示意

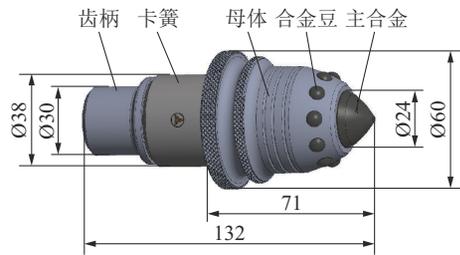


(b) 试验系统实物

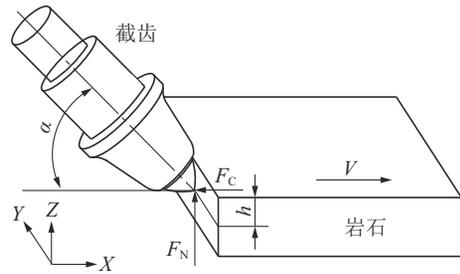
图2 截齿直线切削试验系统

Fig.2 Cutting test system for linear cutting of pick

则截齿处线速度为0.10~0.26 m/s,本试验中的切削速度设定为0.1 m/s。为保证除试验变量外的其余参数一致,每次试验开始前均需更换同款新齿并进行“对刀”操作,即调整截齿夹具与岩石试样的相对位置,使得截齿刚好处于受力零点状态。



(a) 截齿结构尺寸



(b) 切削角示意

图4 截齿结构尺寸及切削角示意

Fig.4 Schematic diagram of the dimensions and cutting angles of the pick structure



(a) 复合式三维扫描仪

(b) 贴点示意

图3 三维扫描仪及贴点示意

Fig.3 3D scanner and patch diagram

考虑到试验台具体尺寸,试样全部加工为长方体,规格为1.0 m×0.45 m×0.45 m。所用刀具为旋挖施工常用的SY6030-24D10截齿,具体结构及外形尺寸如图4(a)所示。旋挖钻机使用截齿筒钻钻进时,常见转速为2~5 r/min,若使用1 m截齿筒钻,

## 2 试验方案及结果分析

通过前期现场及理论调研,确定本试验研究的截齿筒钻布齿参数包括切削角、齿偏角、齿尖高度差、齿尖轨迹间距及切削顺序等。试验采取控制变量的方法依次定量研究各参数对岩石破碎的影响程度。

目前学术界普遍认可比功<sup>[21]</sup>概念,其表示破碎单位体积岩石所需要的能量,见式(1),该值可用于衡量刀具破碎岩石的难易程度,由切削力做功与破碎体积计算得到。同时,切削力曲线的相关参数能够表征截齿破碎岩石过程的阻力大小及振动情况,截齿自旋情况亦能直观反映各参数取值是否合理。鉴于此,本试验中的评价指标综合考虑上述因素,主要包括切削力大小、波动范围、比功值及截齿自旋角度等。

$$E_s = W/V \quad (1)$$

式中: $E_s$ ——破碎比功, $J/mm^3$ ;  $W$ ——破碎岩石所做的功, $J$ ;  $V$ ——破碎岩石体积, $mm^3$ 。

### 2.1 切削角试验

截齿切割岩石过程中,会受到来自水平方向的切削阻力 $F_C$ 和垂直方向的进给阻力 $F_N$ ,截齿轴线与水平面的夹角即为切削角 $\alpha$ ,如图4(b)所示。研究表明<sup>[12]</sup>,该值大小与峰值截割力的大小和截齿侵入岩石的难易程度显著相关。同时,截齿齿尖以一定角度切入岩体内,破碎岩石形成的截面形状与截齿切入角有关,近似某种二次曲线形状<sup>[2]</sup>。根据截齿筒钻常见的设计参数,本次试验设定切削角范围为 $60^\circ\sim 72^\circ$ ,初始侵入深度设定为2和4 mm。

试验前,将岩样置于试验平台,调整水平并固定。然后进行对刀和试验参数设定,将应力和位移数据清零。其次进行测量系统搭建。接着进行岩石切削试验,同步进行数据采集和高速摄像。再次清理岩面,扫描破碎体积,整理切削力并计算破碎比功,分析宏观破碎特征和微观响应规律。

进行了灰砂岩、红砂岩和花岗岩3种岩石的切削角试验,做出试验过程中切削阻力、破碎比功随切削角的变化曲线,如图5(a)、(b)和(c)所示。由图可知,随着切削角度的增大,破碎比功呈现先减小后增大的整体趋势。不同岩石均存在最优的切削角区间,可使破碎相同体积岩石消耗的能量更低,效率和损耗更优。此外,最优切削角区间与岩石物理力学性质密切相关,岩石单轴抗压强度值越大,对应的最优切削角也越大。同时,亦存在使切削阻力达到最小值的切削角,使截齿切削岩石过程中所受水平阻力最小,但该值与使破碎比功最小时的切削角不一致。图5(d)为截齿所受进给力 $F_N$ 与切削阻力 $F_C$ 比值随切削角变化的曲线,与破碎比功变化规律不同,该值处于极小的波动范围,几乎不受切削角影响。

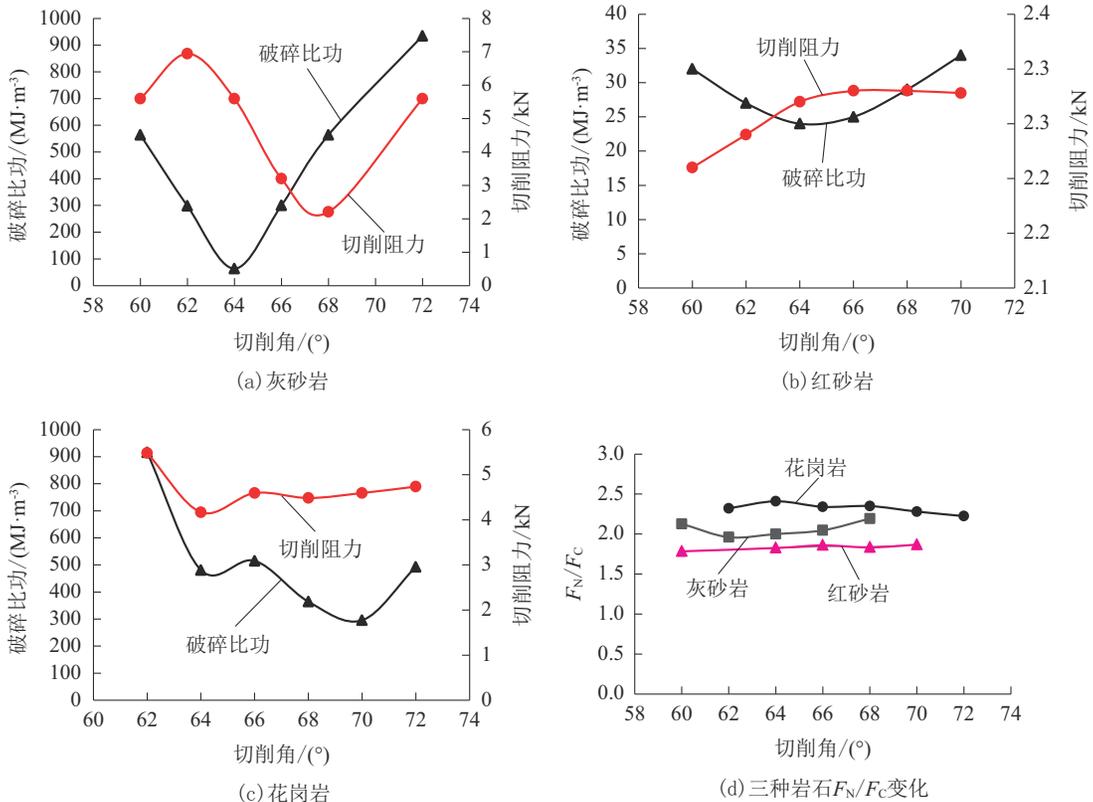


图5 切削角试验结果

Fig.5 Cutting angle test results

将试验后的岩石试样表面清理后,可得到3种岩石的破碎形态,如图6(a)所示。不同岩样的表面切痕形态明显不同,其中灰砂岩试样破碎坑最大,

红砂岩次之,花岗岩最小。说明随着单轴抗压强度数值的增大,岩体内部主裂纹数量减少、致密程度增大,切割过程伴随的岩渣体积变小,从而导致更

小的破碎坑体积。从试验过程中高速摄像机拍摄的照片可以看出,灰砂岩切割过程中迸射的岩屑体积更大,如图6(b)所示,与岩石试样的表面破碎形态吻合。

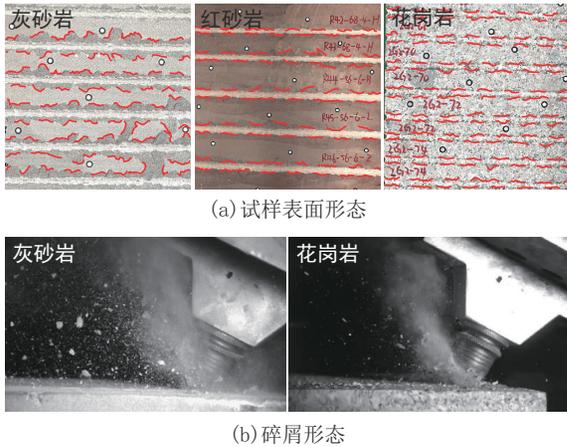


图6 岩石试样破碎

Fig.6 Rock sample crushing

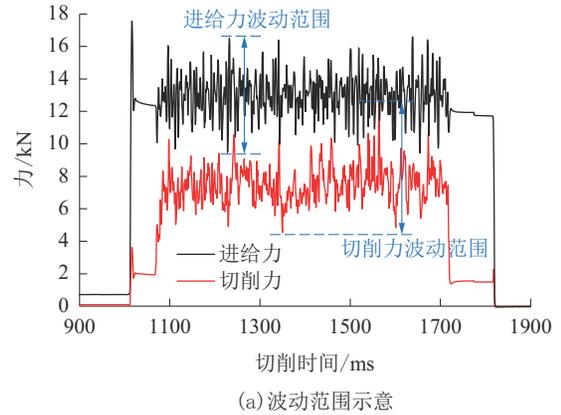
相关研究证实<sup>[22]</sup>,加压力和切削力的波动范围与振动呈现正相关关系。为了更为有效地衡量切削角大小对岩石切割过程的影响,引入刀具振动程度这一评价维度。图7(a)为切削过程的力波动范围示意图,将花岗岩试样试验过程的进给力 and 切削力波动范围统计后,可作出图7(b)。试验使用主硬质合金直径为28和30mm的两种截齿,考虑到钢丝绳加压型旋挖钻机常见加压力处于1~5 Pa,本次试验的加压力设置为1.5 Pa,切削速度设置为0.1 m/s。整体来看,无论是进给力还是切削力,其波动范围均随切削角的增大而增大,且变化幅度明显。试验结果表明,采用更小的切削角,可显著降低力波动范围的幅值,使切削过程更加稳定,减小振动对刀具和机器带来的危害,如异常磨损、疲劳失效、结构断裂等。

综合以上对切削阻力、破碎比功、碎屑形态、力波动范围等评价指标的分析,对于单轴抗压强度约80 MPa的花岗岩地层,其使用截齿筒钻钻进的最优切削角范围为68°~72°。

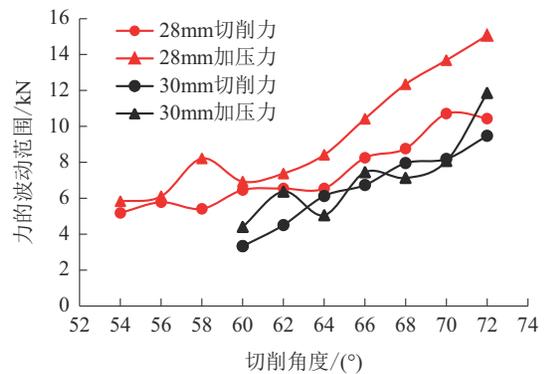
### 2.2 齿偏角试验

齿偏角 $\beta$ 是决定切削性能最重要的参数之一,是指径向上截齿轴线偏离垂直方向的角度,其示意如图8所示。

为了探究齿偏角对截齿自旋性和岩石切削过



(a) 波动范围示意



(b) 花岗岩进给力和切削力波动范围

图7 进给力 and 切削力波动范围示意

Fig.7 Schematic diagram of fluctuation range of feed force and cutting force

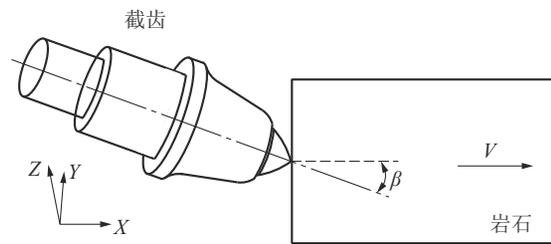


图8 齿偏角示意

Fig.8 Schematic diagram of drilling tooth deviation angle

程的影响,对灰砂岩、大理岩和花岗岩3种岩石进行了分别研究。图9为3种岩石的破碎比功和切削阻力曲线。考虑到施工中的常见齿偏角范围为0°~30°,试验中齿偏角设置为5°~30°,加压力设置为1.5 MPa,切削速度设置为0.1 m/s。对于切削阻力而言,在加压力一定的情况下,其随齿偏角的增大而减小。在宏观切割过程中体现为岩石表面越来越难切入,切痕渐窄,失效模式由脆性破坏转变为塑性破坏。而破碎比功随齿偏角的增大而增大,破碎效率逐渐降低。表2为进给力 $F_N$ 与切削力 $F_C$ 比

值随齿偏角变化的数据,与切削角试验规律类似,该值变化范围较小,表明其受齿偏角影响程度较低。

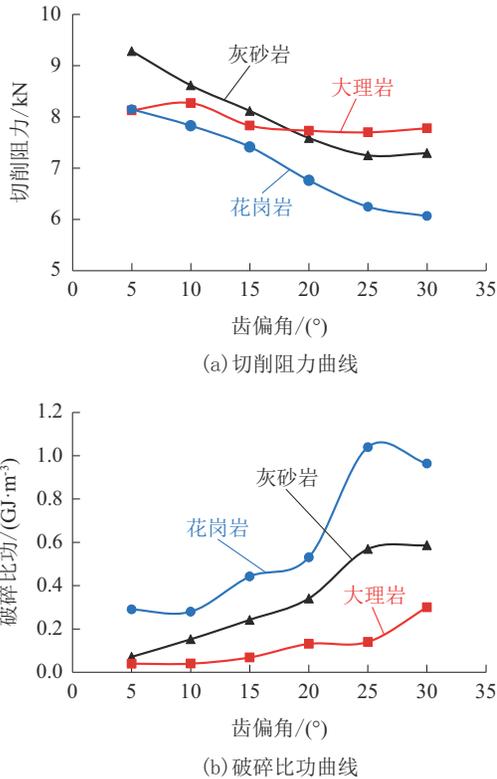


图9 齿偏角试验受力分析

Fig.9 Force analysis of drilling tooth deviation angle test

表2 进给力  $F_N$  与切削力  $F_c$  比值

Table 2 Ratio of feed force  $F_N$  to cutting force  $F_c$

岩石类型	齿偏角/(°)					
	5	10	15	20	25	30
灰砂岩	1.29	1.40	1.49	1.59	1.67	1.65
大理岩	1.55	1.56	1.62	1.64	1.64	1.64
花岗岩	1.47	1.54	1.59	1.74	1.86	1.91

截齿切割岩石试样切点处的线速度可分为切向分量和法向分量,切向分量可使截齿连续回转,该线速度与齿偏角、切削速度等参数密切相关。试验前对截齿进行点位标记,记录截齿切割过程中的偏转角度,并转化为偏转位移,同时三向力传感器可采集截齿侧向受力数据。据此可绘制出3种岩石侧向受力和偏转位移随齿偏角变化曲线(如图10所示)。首先无论是在平面还是切痕上切削,齿偏角为0°时截齿均不旋转,其他角度都有不同程度的偏

转。3种岩石的侧向受力与偏转位移量均随齿偏角的增大呈现先增大后减小的趋势,峰值处于5°~15°范围内。结果表明,截齿切削岩石过程中旋转幅度与侧向受力呈正相关关系,侧向受力较大时,更易产生偏转。

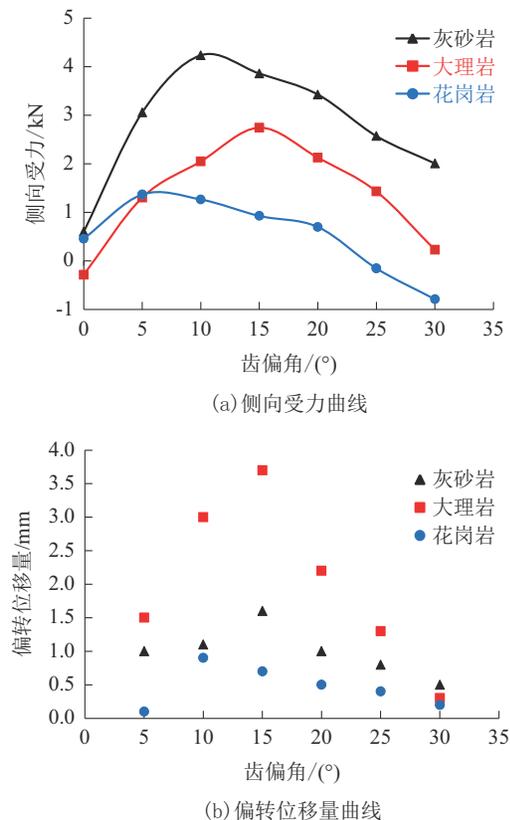


图10 齿偏角试验偏转分析

Fig.10 Deviation analysis of drilling tooth deviation angle test

综合以上对切削阻力、破碎比功、侧向受力、偏转位移等评价指标的分析,对于单轴抗压强度约80 MPa的花岗岩地层,其使用截齿筒钻钻进的最优齿偏角范围为5°~15°。

岩石切削过程中,若截齿齿柄不能在齿座内有效旋转,则极易产生偏磨和异常磨损。而截齿自旋可使其产生较为均匀地磨损,不仅能显著提升刀具耐用度和使用寿命,还能降低切削温度,提高切削效率,带来可观的经济效益。因此,刀具有效自旋转一直是包括车刀、截齿在内各个行业的研究课题。

2.3 切削顺序、齿尖高度差和轨迹间距试验

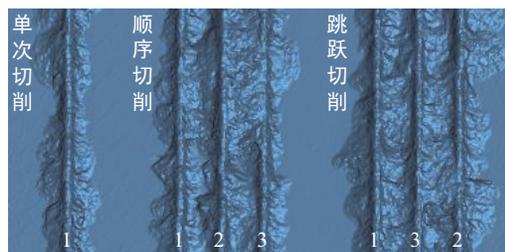
自由面理论<sup>[23]</sup>阐述了自由面对岩石破碎过程

产生积极作用的原理和机制。其中,创造的自由面个数对切削效率提升尤为重要,在旋挖破岩方面反映为顺序式切削和跳跃式切削。此外,旋挖钻机所用截齿筒钻多采用三分齿布置形式,其截齿齿尖在钻斗轴向上高度不一,该设计正是巧妙应用了自由面破岩理论,前一截齿破碎岩石形成破碎坑和自由面,为后一截齿破碎岩石提供便利。同时,齿尖轨迹间距决定了自由面利用是否充分,过小则破碎作用重叠,降低切削效率;过大则降低了自由面对切削过程的积极作用,岩石破碎不充分。鉴于此,分别设计了对照试验研究切削顺序、齿尖高度差和齿尖轨迹间距对岩石切削过程的影响。

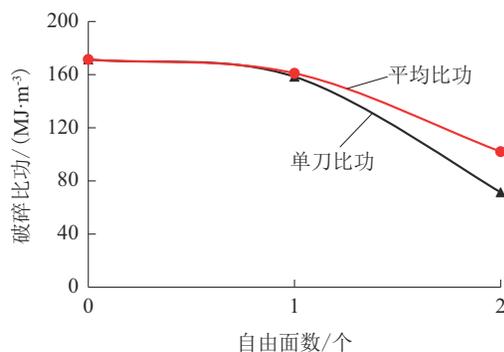
针对花岗岩试样进行切削顺序试验研究,切削角采用前面试验所得的较优值 $70^\circ$ 。由于截齿筒钻常见的主硬质合金直径为24和28 mm,本组试验使用后者。切削速度设置为0.1 m/s,加压力为1.5 MPa,切痕统一为80 cm,保证去除首尾切痕后的破碎体积数据稳定可用,其余条件与上述试验相同。对照试验包括零自由面(即单次切削)、单自由面(1-2-3顺序式切削)和双自由面(1-3-2跳跃式切削),并统计了最后一刀的单刀比功和所有切削对应的平均比功进行对比(如图11所示)。试验结果表明,随自由面数量的增加,单刀比功和平均比功均呈下降趋势,双自由面破碎效率明显优于其余两者。因此,切削过程应尽可能创造双自由面环境,跳跃式五分齿布置(即切削顺序为:中齿-外齿-内齿-中外齿-中内齿)为较优布齿方式。

基于花岗岩试样进行齿尖高度差试验,高度差设置为筒钻常见的齿尖高度差0~6 mm,其余条件同上,共进行7组对照试验,试验条件见表3。值得注意的是,试验前已设置好对应深度的切槽,采集后续切痕的切削力及破碎体积计算比功进行分析。图12展示了齿尖高度差示意和切削比功试验结果,比功随高度差的增大而增大,说明高度差较大时,需要较大的能量作用于岩石时才能产生破碎,相应的效率较为低下。高度差 $<3$  mm时,破碎比功介于 $(1\sim 2)\times 10^8$  J/m<sup>3</sup>,且变化幅度较小。高度差 $>3$  mm时,破碎比功相较前者大幅增加,且普遍大于 $4\times 10^8$  J/m<sup>3</sup>。试验结果表明,齿尖高度差的较优值在3 mm左右。

针对花岗岩试样进行齿尖轨迹间距试验研究,由于直径为1 m的截齿筒钻的常见布齿数量为10~



(a) 切削痕迹



(b) 破碎比功对比

图11 切削顺序试验结果

Fig.11 Cutting sequence test results

表3 齿尖高度差和齿尖轨迹间距试验条件

Table 3 Test conditions for drilling tooth tip height difference and drilling tooth tip trajectory spacing

试验名称	齿尖高度差试验							齿尖轨迹间距试验				
	序号	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	
主硬质合金直径/mm							28					
加压力/MPa							1.5					
切削速度/(m·min <sup>-1</sup> )							0.1					
齿尖高度差/mm	0	1	2	3	4	5	6					
齿尖轨迹间距/mm								20	30	40	50	

15个,即相邻两齿所距弧长为21~31 mm,本组试验的间距设置为20~50 mm,其余条件同上,共进行4组对照试验,试验条件参见表3。每组试验均综合计算两次切削比功,得出单位长度破碎体积及破碎比功随齿尖轨迹间距的变化曲线(如图13所示)。试验结果表明,破碎比功随间距增大呈现先减小后增大的趋势,存在一个较优间距30 mm,使得破碎比功最低,破碎效率最高。单位切削长度对应的破碎体积变化规律与比功相反,在间距为30 mm时达到最大值,此时实测切削深度为7.75 mm,则齿尖轨

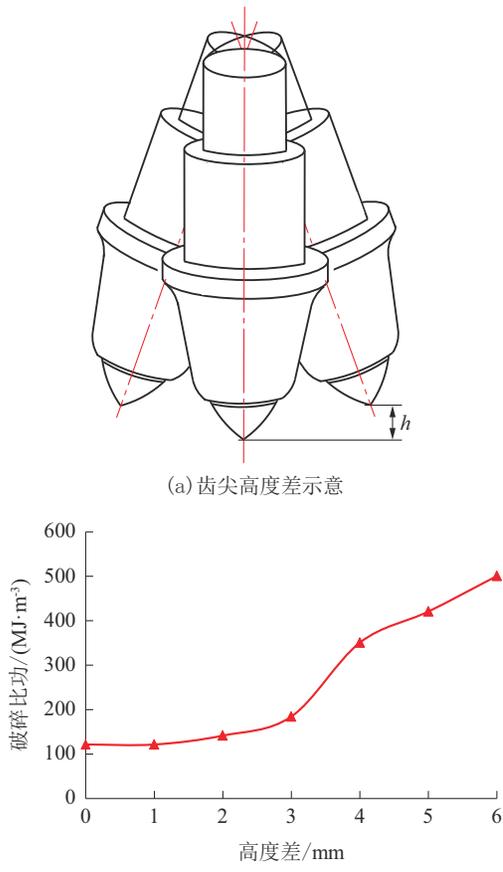


图 12 高度差试验结果

Fig.12 Height difference test results

迹间距与切深的最优比值为 3.87。此外,试验过程的切削力变化幅度较小,表明齿尖轨迹间距主要通过改变破碎体积影响破碎比功。

综合以上对切削痕迹、破碎比功、破碎体积等评价指标的分析,对于单轴抗压强度约 80 MPa 的花岗岩地层,其使用截齿筒钻钻进的最优切削顺序为跳跃式切削,齿尖高度差的较优值在 3 mm 左右,齿尖轨迹间距的较优值在 30 mm 左右。

### 3 工程验证

#### 3.1 验证设计

为了充分验证以上截齿切削试验规律,为旋挖截齿筒钻设计提供依据,针对花岗岩地层设计了重载截齿筒钻。其按照试验所得的较优参数设计,能够承受更大加压力及扭矩,其直径为 1.2 m。筒钻布齿方式为五分齿,即中、中内、中外、内、外(见图 14),详细参数见表 4。

本次工程验证基于 SR485 型旋挖钻机进行,验

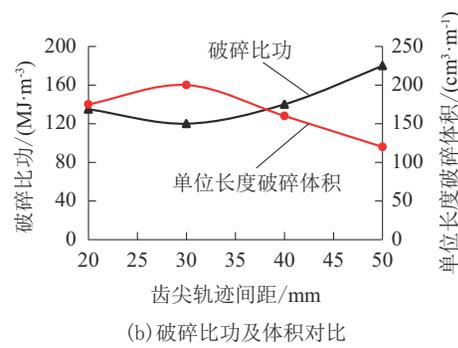
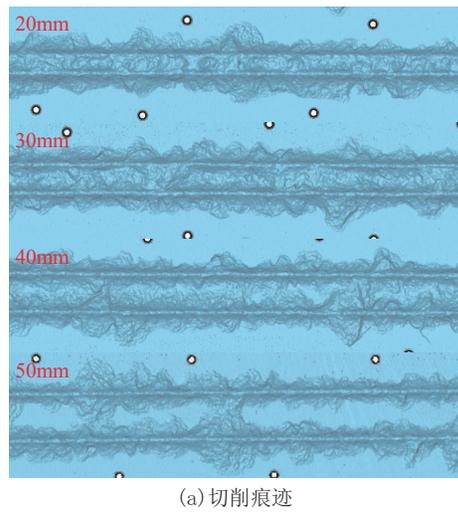


图 13 齿尖轨迹间距试验结果

Fig.13 Test results of drilling tooth tip trajectory spacing

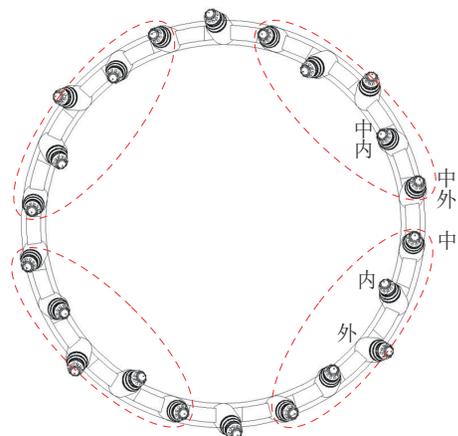


图 14 钻齿布置示意

Fig.14 Drilling tooth arrangement

证工地位于广东省深圳市,施工项目为深圳市城市轨道交通 8 号线三期工程。地质勘察结果:0~2 m 为素填土,灰褐色,局部夹少量碎石及砂;2~9 m 为强风化花岗岩,褐黄色,灰白色,岩心多呈坚硬土柱状,遇水易崩解;9~11 m 为强风化花岗岩,岩心呈碎块状;11~14.5 m 为中风化花岗岩,褐黄色,青灰

色,岩心呈短柱状,节理裂隙发育;14.5~20 m为微风化花岗岩,青灰色,中、细粒结构,岩心呈长柱状,单轴抗压强度约100 MPa。

### 3.2 验证结果分析

为了更为直观地展示本次验证结果,特将重载筒钻与现场普通筒钻、牙轮筒钻进行对比,参数对比见表4,实物如图15所示。钻进地层统一为单轴抗压强度为100 MPa的花岗岩地层,钻进相近深度,计算钻进效率进行量化对比。同时辅以单位进尺损耗成本和整机振动情况对比,结果如图16所示。使用重载筒钻时,钻进效率为0.50 m/h,比普通截齿和牙轮筒钻分别高13.64%和11.11%;钻进单位深度的钻齿损耗成本为504元/m,比普通截齿和牙轮筒钻分别低39.13%和8.36%;该项目整体收益分别高28.22%和9.18%。此外,使用普通筒钻施工过程中,整机振动情况较为严重,对钻机造成连续疲劳损伤。工程验证结果表明,在确定的工况条件下,存在最优布齿参数组合,使得截齿筒钻施工高效、低耗、低振动,试验所得规律能够有效指导钻具布置及现场施工。



图15 三种筒钻实物

Fig.15 Physical pictures of three types of barrel drills

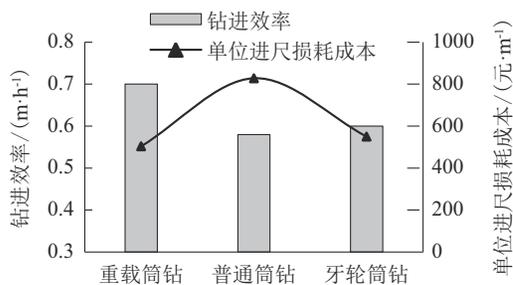


图16 工程验证结果

Fig.16 Engineering verification results

## 4 结论

基于全尺寸截齿切削试验台和多维度测试分

表4 筒钻布齿参数

Table 4 Drilling tooth arrangement parameters of barrel drills

筒钻类型	切削角/(°)	齿偏角/(°)	齿数/个	齿长/mm	齿尖轨迹间距/mm	齿尖高度差/mm
重载筒钻	70	2、11.5、13.5、25	22(截齿)	76	30	3、12
普通筒钻	62	5、8	21(截齿)	76	25	2、8
牙轮筒钻	0	5	10(牙轮)	240	120	0

析系统,针对旋挖施工中的截齿筒钻布齿这一技术难题,设计对照试验分别研究了不同关键参数对岩石切削的影响。确定了花岗岩地层的最优布齿参数范围,对于指导截齿筒钻布置、降低钻齿损耗、提高岩层钻进效率具有重要意义。结果表明:

(1)旋挖施工过程中,岩石切削效果与截齿切削角、齿偏角、切削顺序、齿尖高度差和齿尖轨迹间距等参数密切相关,其显著影响岩石破碎比功、力波动范围、截齿自旋与系统振动。

(2)在确定工况下,存在最优的布齿参数组合,使得切削比功最小、力波动范围较小、自旋角度较大。对于花岗岩地层,较优布齿参数为:切削角 $68^{\circ}\sim 72^{\circ}$ ,齿偏角 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、跳跃式切削、齿尖高度差3 mm左右、齿尖轨迹间距30 mm左右。

(3)基于截齿切削试验结果进行了重载筒钻设计,在花岗岩地层进行了工程验证。验证结果表明,无论钻进效率、钻齿损耗还是整机振动,使用重载筒钻均优于普通筒钻和牙轮筒钻,试验结果可为筒钻布齿提供依据。值得注意的是,由于旋挖实际钻进工况较为复杂,试验难以完全复制,因此做了一定程度的简化,如将截齿圆周运动简化为直线切削进行研究,后续将延伸该方向的研究。

### 参考文献(References):

- [1] 胡铭,董鑫业.旋挖钻机钻具产品类型[J].凿岩机械气动工具,2015(3):1-6.  
HU Ming, DONG Xinye. Category of rotary drilling rigs and drilling tools[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2015(3):1-6.
- [2] Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1984,2(1):63-71.
- [3] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. International

- Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1972,9(2):261-270.
- [4] Yilmaz N G, Yurdakul M, Goktan R M. Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007,44(6):962-970.
- [5] 贾学强,张继光,罗延严,等.旋挖钻机碎岩计算方式的分析探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):23-27,32.
- JIA Xueqiang, ZHANG Jiguang, LUO Yanyan, et al. Discussion about Calculation Methods of Rock Fracturing by Rotary Drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(6):23-27,32.
- [6] Gao K D, Du C L, Jiang H X, et al. A theoretical model for predicting the Peak Cutting Force of conical picks [J]. Fracture and Structural Integrity, 2014,8(27):43-52.
- [7] Roxborough F F, Liu Z C. Thoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting [C]//Proceedings of the Sixth Underground Operator's Conference. Australia, 1995:189-193.
- [8] Goktan R M. A suggested improvement on Evans'cutting theory for conical bits [M]//Mine mechanization and automation, Colorado School of Mines, 1997: A4-57.
- [9] Goktan R M, Gunes N. A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks [J]. Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, 2005, 105 (4) : 257-263.
- [10] Goktan R. Prediction of drag bit cutting force in hard rocks [J]. Proceedings of the Third International Symposium on Mine Mechanization and Automation, 1995:10-38.
- [11] 张旭辉,胡定邦,廖雅诗,等.临空面与常规工况下TBM滚刀切割红砂岩对比研究[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(6):1575-1584.
- ZHANG Xuhui, HU Dingbang, LIAO Yashi, et al. Comparative study on cutting red sandstone by TBM hob under free face and normal working conditions [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022,30(6):1575-1584.
- [12] Zhang X H, Xia Y M, Zeng G Y, et al. Numerical and experimental investigation of rock breaking method under free surface by TBM disc cutter [J]. Journal of Central South University, 2018,25(9):2107-2118.
- [13] 王立平.采掘机械镐型截齿截割破岩机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- WANG Liping. Study on failure mechanism of rock cutting by conical picks of mining machinery [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [14] 冯上鑫.基于钻孔过程机-岩相互作用机制的岩体力学参数识别研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- FENG Shangxin. Experimental studies of bit rock interaction for rock mechanical parameters identification in rotary drilling [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [15] 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 on rock cutting by roadheader picks [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [16] 宋杨.镐型截齿截割煤岩力学特性的数值模拟[D].哈尔滨:黑龙江科技大学,2013.
- SONG Yang. Simulation of the mechanical behavior on conical pick cutting coal [D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2013.
- [17] 马瑞.基于ABAQUS破岩仿真的掘进刀具研究[D].太原:太原科技大学,2019.
- MA Rui. The Research and simulation of coal rock cutting by excavation tool based on ABAQUS [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2019.
- [18] Zhou Y N, Lin J S. On the critical failure mode transition depth for rock cutting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,62:131-137.
- [19] 曹治.截齿冲击破岩力学性能分析及其数值仿真[D].阜新:辽宁工程技术大学,2014.
- CAO Zhi. Impact mechanical properties analysis and numerical simulation of rock breaking by pick [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.
- [20] 孔双腾.旋挖钻机筒钻截齿破岩仿真研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- KONG Shuangteng. Simulatin research on rock breaking of rotary drilling rig [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [21] 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.
- [22] 张在兴,周琴,张凯,等.岩石切削深度对切削齿温度分布的影响分析[J].煤炭学报,2019,44(S2):492-501.
- ZHANG Zaixing, ZHOU Qin, ZHANG Kai, et al. Analysis of the influence of rock cutting depth on the temperature distribution of cutter [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44 (S2):492-501.
- [23] 雷冬,沈泓舟,冯富凯,等.双轴压缩破坏过程中岩石自由面法向变形测量[J].力学季刊,2014,35(1):157-163.
- LEI Dong, SHEN Hongzhou, FENG Fukai, et al. Measurement for full-field normal deformation of free surface on rock under biaxial compression [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2014,35(1):157-163.

(编辑 王跃伟)