

# 基于ABAQUS的气动潜孔锤球齿碎岩及布齿优化

杨秋明<sup>1,2</sup>, 周兢<sup>\*1,4</sup>, 王瑜<sup>1,2</sup>, 夏柏如<sup>1,2</sup>, 吴浩<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083;  
3. 中煤地第二勘探局集团有限责任公司, 河北涿州 072750; 4. 中国煤炭地质总局, 北京 100038)

**摘要:**为提高坚硬地层大直径潜孔锤的破岩效率与使用寿命,运用ABAQUS软件建立了球齿碎岩仿真模型,对比分析 $\phi 18$  mm球齿在不同钻进参数下冲击切削碎岩过程中的破碎比功、侵入深度、破碎范围与应力影响范围等曲线,优选钻进参数和布齿。分析结果表明:当钻压为1.2 kN、冲击功为30 J时,对岩石的破碎效率较高,球齿入岩的位移可达0.67 mm,并对岩石进行应力界限划分,得出应力影响范围为43.4 mm;通过双齿冲击切削模拟确定了较为优秀的圈距与间距:圈距取47.4 mm,间距取43.4~51.4 mm;考虑到球齿的磨损,利用圈距与间距对 $\phi 711$  mm大直径潜孔锤进行了优化布齿。

**关键词:**气动潜孔锤;球齿;钻进参数;布齿;应力影响范围;坚硬地层;岩石破碎;ABAQUS

中图分类号:P634.4 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2024)01-0040-11

## Pneumatic DTH hammer tooth crushing and optimization of teeth arrangement based on ABAQUS

YANG Qiuming<sup>1,2</sup>, ZHOU Jing<sup>\*1,4</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, XIA Bairu<sup>1,2</sup>, WU Hao<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Key Laboratory of Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China;  
3. The Second Exploration Bureau of CNACG, Zhuozhou Hebei 072750, China;  
4. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to improve the rock breaking efficiency and service life of the large diameter drill hammer in hard formation, ABAQUS software was used to establish the simulation model of rock breaking with spherical teeth. The curves of crushing specific work, invasion depth, crushing range and stress influence range of  $\phi 18$  mm spherical teeth in the process of impact cutting rock breaking under different drilling parameters were compared and analyzed, and the drilling parameters and tooth layout were optimized. The analysis results show that when the weight on bit is 1.2 kN and the impact energy is 30 J, the crushing efficiency of the rock is higher, the displacement of the spherical teeth into the rock can reach 0.67 mm, and the stress limit of the rock is divided, and the influence range of the stress is 43.4 mm. Through the simulation of double-tooth impact cutting, the better ring distance and spacing were determined: the ring distance was 47.4 mm, and the spacing was 43.4~51.4 mm. Considering the wear of the spherical teeth, using the ring distance and spacing, the teeth of the 711 mm large-diameter drill hammer were optimized.

**Key words:** pneumatic DTH hammer; spherical teeth; drilling parameters; teeth arrangement; stress influence range;

收稿日期:2023-07-09; 修回日期:2023-10-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.01.006

基金项目:贵州省科技计划项目“矿山灾害事故生命救援孔高效气动钻具及快速成孔工艺与装备研究”(编号:[2023]一般422);中国煤炭地质总局科技创新项目(编号:ZMKJ-2021-ZX05)

第一作者:杨秋明,男,汉族,1999年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事钻探钻具方面的研究,北京市海淀区学院路29号,824580958@qq.com。

通信作者:周兢,男,汉族,1982年生,正高级工程师,主要从事钻探技术、钻孔救援技术、钻探机具研发等研究及技术管理工作,北京市海淀区羊坊店东路21号,zhoukeke2003@163.com。

引用格式:杨秋明,周兢,王瑜,等.基于ABAQUS的气动潜孔锤球齿碎岩及布齿优化[J].钻探工程,2024,51(1):40-50.

YANG Qiuming, ZHOU Jing, WANG Yu, et al. Pneumatic DTH hammer tooth crushing and optimization of teeth arrangement based on ABAQUS[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):40-50.

extra-hard formation; rock fragmentation; ABAQUS

## 0 引言

从20世纪以来,对资源开采和工程建设越来越趋向深部发展,大直径气动潜孔锤因能进行大孔径、高安全性的深孔高效钻进施工,受到了国内外机械钻探领域学者的广泛关注。潜孔锤钻头合理钻进参数与布齿是提高碎岩效率与延长钻头使用寿命的关键因素,以球齿碎岩机理为依据来研究钻进参数与布齿是一种十分重要的方法<sup>[1-3]</sup>。

以球齿碎岩机理来研究钻进参数与布齿<sup>[4-7]</sup>主要有试验、仿真、数学建模型3种方法。朱丽红等<sup>[8]</sup>分析球齿压入岩石的过程,首先球齿与岩石接触岩石产生弹性变形,随着冲击应力增大,应力波会以球齿与岩石的接触点为球心成同心球的形状在岩石内部扩散,随着球齿进一步侵入岩石,会对球齿周围的岩石产生侧应力直至崩离,最后形成破碎坑;马晓青<sup>[9]</sup>进行自由落体冲击岩石试验,得出岩石在多次冲击下明显破碎增大的冲击功临界值,并记录每次压头侵入岩石的深度,发现随冲击功增大侵入深度也在增大;常玉军等<sup>[10]</sup>对岩石的冲击回转碎岩机理进行了试验研究,为 $\varnothing 1200$  mm潜孔锤钻头的合理布齿及钻进参数的选择提供依据;李华等<sup>[11]</sup>从球齿碎岩机理出发,探讨了相邻球齿对碎岩效果的影响,确定最优齿间距为 $(D1+D2)/2$ ;彭伟等<sup>[12]</sup>以单齿碎岩机理为依据,得出布齿间距与圈距,并根据钻进软、硬地层不同工程施工需求,设计出2种不同布齿的钻头。

王圣林等<sup>[13]</sup>基于非线性接触动力学理论,运用ABAQUS软件建立了活塞-气动潜孔锤钎头-岩石仿真模型,分析了冲击速度和回转速度对钎头冲击反力、侵入深度和破岩比功的影响,进而对工艺参数进行优选;徐瑞晗<sup>[14]</sup>通过动力学仿真软件ABAQUS建立钻头-岩石的冲击模型,赋予钻头不同的冲击速度及转速,分析不同工况下作用在岩石不同方向上的力、岩石的应力以及钻进深度;陈亮<sup>[15]</sup>对比分析潜孔锤破岩转矩的理论计算方法,采用ANSYS对潜孔锤球齿的破岩过程进行模拟,并通过工程实例的实测数据验证两种转矩计算模型与仿真分析的准确性,潜孔锤转矩理论计算模型与实际转矩结果和仿真结果较为接近,估算出潜孔锤的破岩转矩,得出钻进转矩与其他钻进参数的相关性;

高阳<sup>[16]</sup>采用理论方法对该钻头破岩动力学问题进行了分析,采用ABAQUS确定该潜孔锤的单次冲击功和钻速;方金<sup>[17]</sup>采用ANSYS研究球齿对岩样的冲击随时间的变化过程,应力随时间的变化情况以及岩石裂纹扩展情况,定性地描述岩石的破碎情况;Zhao等<sup>[18]</sup>、李从保<sup>[19]</sup>、Jiang等<sup>[20]</sup>通过球齿碎岩的数值模拟,分析应力波在岩石的传播规律,得出应力以半球形应力波的方式向岩石的各个方向传播,球齿周围冲击时易呈拉裂破坏,并发现持续冲击岩石会导致岩石内部出现细小裂纹,当裂纹发育到一定程度,会导致岩石破碎;Song等<sup>[21]</sup>基于钻井试验台和数值计算,对冲击应力波的传播过程进行分析,通过电镜观测破碎坑的裂纹,得出随着岩石温度的升高,冲击能量传递效率大致呈下降趋势,破岩比能先增大后减小的规律;杨达<sup>[22]</sup>采用 $\varnothing 19$  mm球齿对硬岩进行研究,通过试验台进行了不同冲击功的冲击实验并使用ABAQUS模拟分析出应力波对岩石的破坏,并完成对 $\varnothing 600$  mm大直径潜孔锤布齿。

Saadati<sup>[23]</sup>对冲击钻井的裂缝系统进行数值模拟,并进行冲击试验验证模拟,在考虑钻头与地层相互作用下对冲击钻削问题进行了建模;Richard等<sup>[24]</sup>建立了考虑钻头的轴向和扭转振动,及其耦合下PDC钻头切削岩石的模型,但其钻进参数不完整;Depouhon等<sup>[25]</sup>对Richard的数学模型进行改进,提出了一个完整的PDC钻头钻进响应模型,并对模型钻进参数进行了完善。

目前对大直径气动潜孔锤球齿布齿研究只关注到球齿冲击岩石的破碎范围,没有考虑到应力波对破碎坑岩附近的强度下降,也没有将冲击与切削作用结合起来进行研究。本文采用ABAQUS中显性动态分析对不同钻压与冲击功下的球齿冲击切削岩石进行模拟仿真,并构造应力波数学模型对其进行验证,来研究球齿破碎岩石的影响,同时根据破碎比功、侵入深度、破碎范围与应力影响范围等指标参数,进行岩石破碎规律的研究,从而优选钻进参数和布齿方案。

## 1 碎岩机理研究

### 1.1 弹塑性接触分析

接触应力和接触面积是描述冲击破碎过程中的

基本参数。冲击过程中另外一个重要的参数是平均接触应力  $u$ ，与接触应力  $L$  以及接触半径  $a$  有关，其中接触半径  $a$  指的是粒子和岩石实际接触的边缘距离粒子中心轴线的距离，关系式为：

$$u = \frac{L}{\pi a^2}$$

基于弹塑性压入分析和牛顿定律，得到了力与位移之间的微分关系式，即：

$$mvdv = -Ldr$$

式中： $m$ ——球齿的质量（分摊钻头质量）； $v$ ——球齿的冲击速度； $r$ ——冲击坑的深度； $L$ ——接触应力。

依据 Hill 等<sup>[26]</sup>的布氏硬度实验得到冲击非线性弹塑性分析模型，对模型接触应力进行了详细描述，并得出其解析：

$$H = P = \frac{L}{\pi a^2} = K \left( \frac{a}{2R_0} \right)^m$$

式中： $H$ ——梅尔硬度； $P$ ——接触应力； $K$ ——梅尔定律常数； $m$ ——材料的应变硬化指数，为与岩石相关的材料常数； $R_0$ ——球齿半径。

## 1.2 应力波数学模型建立

在球齿的冲击作用下，岩石内部产生的应力应变将以应力波球面波的形式传播。如图 1 所示，球齿冲击岩石界面  $O$  点，从而使应力波从球齿表面向岩石中传播。由于球面波的对称性，在球坐标系  $(r, \theta, \varphi)$  中，波动与  $\theta$  和  $\varphi$  无关，所以  $\partial/\partial\varphi = \partial/\partial\theta = 0$ ， $v = w = 0$ ，径向位移  $u$  不为零。

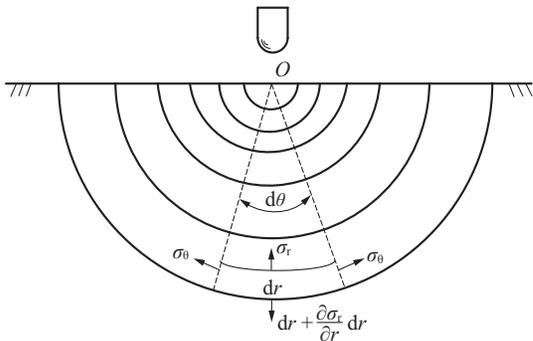


图 1 应力波球坐标示意

Fig.1 Diagram of spherical coordinates of stress waves

根据球坐标，得应力-应变关系式为：

$$\epsilon_r = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr = \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\epsilon_\theta = \epsilon_\varphi = \frac{u}{r}$$

式中： $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ ——球坐标系下岩石的径向与周向应变。

根据广义虎克定律，假设岩石在受到损伤前为弹性体，得应力波的径向与周向应力的数学表达式：

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ (1-\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + 2\mu \frac{u}{r} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right)$$

式中： $E$ ——岩石的杨氏模量，Pa； $\mu$ ——岩石的泊松比。

## 1.3 应用 Matlab 解应力波数学模型

对岩石应力场的计算，可视为球腔受压的运动方程的求解问题<sup>[27]</sup>，由于应力波呈球极对称性，波动的场变量只有波半径  $r$  和时间  $t$ ，唯一的变量沿径向，设为  $u(r, t)$ 。其边界条件与初始条件为：

$$r \geq R_0/12, t \geq 0, u(r, t) = u'(r, t) = 0$$

$$r = R_0/12, t = 0, \sigma_r = -P$$

负号代表受压，对球坐标微元体  $d\theta dr$  的动量守恒，得到用位移表示的球面波的运动方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

式中： $c_1$ ——弹性纵波在岩石中的传播速度，m/s。

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}$$

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2}$$

从上述公式中已知边界条件与应力波的控制方程，利用 Matlab 中的 PDE 偏微分工具对  $u(r, t)$  进行求解，再将其代入应力表达式中，得出应力波在岩石中的应力值，由于在仿真中得到的应力曲线为 Mises 等效应力，所以对数学模型数据进行处理，得到  $\sigma_m$  曲线图如图 2 所示，随着距离冲击源越来越远，应力波峰值在逐渐降低，曲线先减后增再趋向平缓。最开始球齿冲击对周围岩石产生压应力；在随着应力波的作用，压应力逐渐转为拉应力，导致总应力逐渐减小；当转化完成时，总应力达到另一峰值；最后由于应力波作用消散，其应力趋于平稳。

## 2 单球齿冲击碎岩数值模拟

### 2.1 有限元模型的建立

对于  $\varnothing 711$  mm 大直径潜孔锤，所用球齿直径

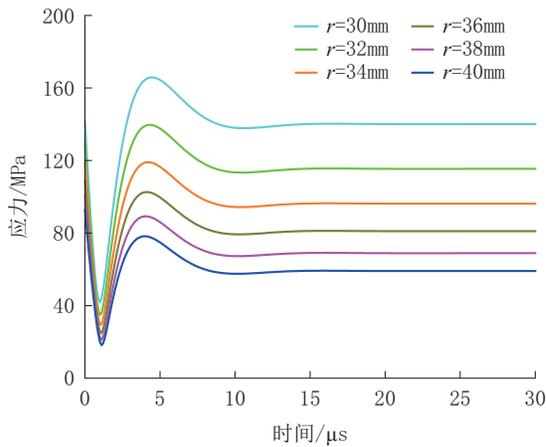


图 2 数学模型  $\sigma_m$  应力曲线

Fig.2 Mathematical model  $\sigma_m$  stress curve

18 mm、高 24 mm。采用 ABAQUS 模拟软件,为确  
保模拟的准确性,本文采用三维模型进行模拟分析,  
确保岩石受冲击时应力波对岩石边界不会造成剧烈  
反弹,将岩石的长宽设计为球齿直径的 16 倍,高为 7  
倍,为 300 mm  $\times$  130 mm。模拟采用了在岩石模型  
的网格单元之间插入了 0 厚度

的 Cohesive 粘结单元<sup>[28]</sup>,该设置会使岩石受冲  
击时进行随机的裂纹扩展。相互作用采用通用接  
触,再对球齿与岩石的接触进行独立的属性指派损  
伤与粘性行为。为提高运算效率,对球齿与岩石接  
触的中心进行了局部网格加密划分。岩石的网格类  
型为三维应力 C3D6; Cohesive 网格为粘性  
COH3D8。花岗岩模型共划分了 202240 个网格。  
单球齿冲击模型网格划分见图 3。

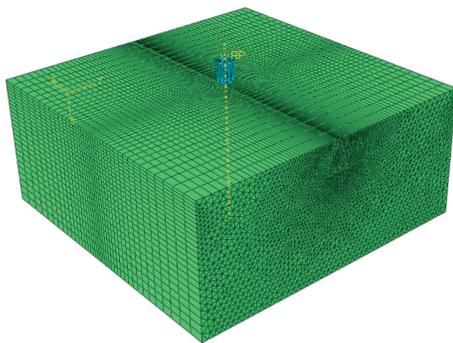


图 3 单球齿冲击模型网格划分

Fig.3 Single spherical tooth impact model meshing

大直径潜孔锤主要运用在破碎硬岩地层中,此  
次仿真的岩石为花岗岩,花岗岩与球齿主要物理属  
性见表 1<sup>[29]</sup>。其抗压强度 120 MPa,抗拉强度 10.5

MPa,抗剪强度 21.2 MPa。

表 1 花岗岩与球齿参数

Table 1 Granite and spherical tooth parameters

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量/GPa
花岗岩	2700	0.24	60
球齿	15000	0.22	588

## 2.2 模型验证

如图 4 所示,仿真模拟取的是距冲击源为 36  
mm 处半球面上几点的平均应力曲线,得出两曲线  
的趋势是相同的,仿真应力曲线整体处于下方且应  
力趋于稳定时是动态稳定。原因为仿真模型考虑了  
应力波对破碎岩石的作用,会对应力波的能量造成  
削弱,也因岩石不是无限边界导致应力波会遇到边  
界发生反射,但岩石模型取设计得足够大,该反射影  
响不大。

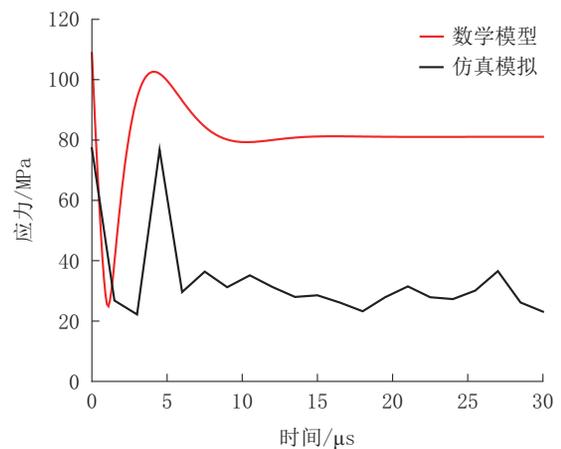


图 4 数学模型与仿真模拟应力曲线

Fig.4 Mathematical models and simulations simulate stress curves

## 2.3 单球齿数值分析

### 2.3.1 破碎比功研究

进行了 20 组不同钻压与冲击功的数值模拟,通  
过软件记录到每一次破碎体积(见图 5)。从钻压的  
角度来看,岩石的破碎体积随钻压的升高不断的增  
大,可以得出钻压增大对破碎岩石有一定的增强,但  
是当达到 1.4 kN 之后钻压对岩石的影响很小。从  
冲击功的角度来看,随着冲击功不断增大其破碎体  
积也是不断在增大的,但是在 30~40 J 之间,特别  
是 30~35 J 的破碎体积是相差最大的,可以见得,冲击

功破碎岩石体积增幅最大的参数为30~40 J之间。

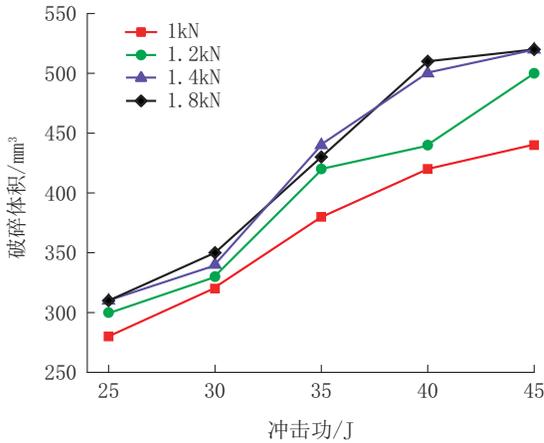


图5 单球齿冲击破碎体积

Fig.5 Single spherical tooth impact crushing volume

为更加了解岩石破碎效率,进行了破碎比功的研究(见图6)。其趋势与破碎体积不同,可以把其看为岩石破碎体积曲线的斜率,其为对冲击功的利用效率;当钻压为1.4 kN时,其曲线处于较下方,冲击功的利用率较高,在冲击功35 J时破岩效率最高;钻压为1.8 kN时,冲击功40 J时为整图效率最高一点。因此采取钻压为1.4 kN、冲击功在35 J,和钻压为1.8 kN、冲击功为40 J的冲击参数较为优秀。

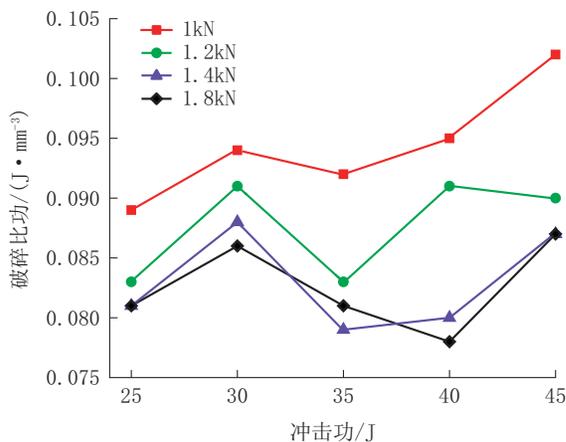


图6 单球齿冲击破碎比功

Fig.6 Single spherical tooth impact crushing energy

### 2.3.2 球齿入岩位移研究

球齿入岩位移的研究,可得球齿的入岩深度与钻压和冲击功的关系,进而优选钻进参数,是对破碎坑的纵向破坏研究的重要指标参数。对球齿的入岩分析分别从钻压与冲击功两个角度去研究。图7所

示为在1.4 kN钻压下,不同冲击功下的球齿入岩位移。

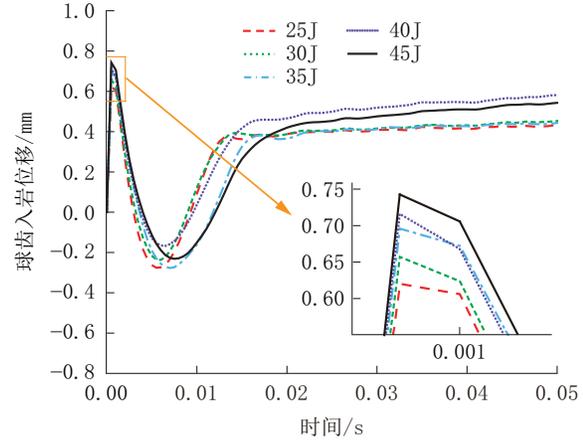


图7 1.4 kN钻压不同冲击功下球齿位移曲线

Fig.7 Spherical tooth displacement curve under different impact work of 1.4kN bit weight

冲击前让球齿紧贴着岩石表面,再给球齿一个冲击速度,再结合球齿的质量,就得出施加给球齿的冲击功。从图7可以看出球齿的运动状态,首先球齿因为冲击功的施加会冲击岩石,向岩石内部侵入,当到0.001 s左右球齿侵入到最大位移处,其最大位移为0.6~0.75 mm;然后球齿受到岩石对其的反作用力大于钻压会使球齿产生向上的位移,0.01 s左右球齿达到最大的向上位移,为1 mm左右;随后当钻压给的力把岩石的反作用力抵消完全后,球齿开始向下位移,由于其没有冲击功的加成,球齿不能再冲击到破碎坑的最低点;最后钻压被破碎坑与球齿的反作用力相抵,球齿运动状态达到一个动态平衡。

结合图7与图8进行分析,球齿在不同的钻压和相同的冲击功下的位移几乎没有改变,并且随着冲击功的每增大5 J,最大侵入位移也会增加0.03 mm左右,呈线性关系。可以得出能影响球齿破碎岩石的深度主要影响因素是冲击功。

随着钻压的逐渐增大,球齿受到岩石反作用力导致的上返位移在逐渐减小(见图8),两因素的主要关系呈线性相关。因此,可以得出影响球齿上返位移的主要因素是钻压的大小,冲击功对其影响很小。

### 2.3.3 岩石破碎范围

对于球齿破碎岩石后,岩石的主要区域按应力的影响作用从中心朝外可以分为岩石破碎影响区、

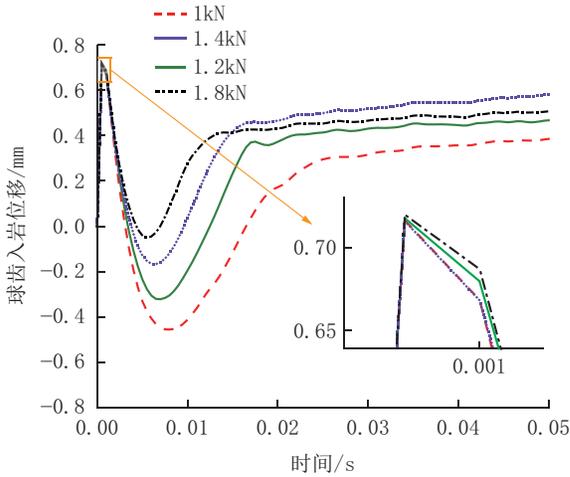


图 8 40 J 冲击功不同钻压下球齿位移曲线

Fig.8 Spherical tooth displacement curve under different bit pressure of 40J impact work

应力影响区,应力消散区<sup>[30]</sup>。要研究单球齿的影响范围,就是研究应力影响区的范围,需要两个边界值来确定其影响范围的大小。首先确定应力影响范围较小的一个边界,该值确定方法如下:由岩石受到球齿冲击,会导致岩石发生破碎,原因为球齿对岩石的压裂和应力波对岩石的剪切作用所导致的较大的位移,通过对岩石产生较大位移的进行数据采集,从而确定岩石产生岩屑的范围,就是应力影响范围的最小值。见图 9,其为岩石破坏产生岩屑和裂纹,从而产生较大位移。

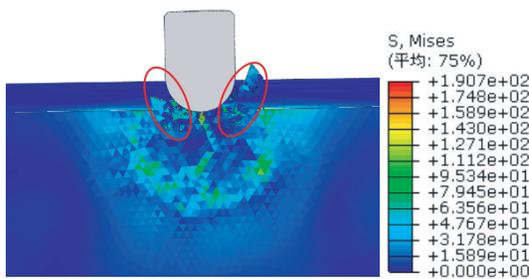


图 9 岩石破坏图

Fig.9 Rock failure map

图 9 红圈中可以看出岩屑从岩石中分离,从而产生了较大的岩屑位移为裂纹扩展区,而处于两红圈之间的区域是受压裂作用发生了较大的岩石破碎,可作为球齿冲击的岩石破碎范围。对岩石破碎范围的选取,产生较大位移的两点的始末的 X 坐标值分别相减,得到岩石产生岩屑的范围,这个值就是作为此次钻进参数下岩石破碎影响范围的值。图

10 对每个钻进参数下岩石破碎范围进行了数据记录分析。

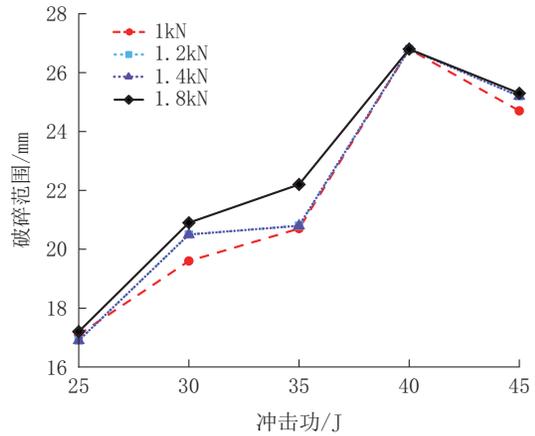


图 10 岩石破碎范围曲线

Fig.10 Rock breaking range curve

当冲击功为 25 J 时,不同钻压下的破碎范围都为 17 mm 左右,随着冲击功的增加破碎范围也在变大,但是当冲击功为 40 J 时出现了破碎范围转折点,并且破碎直径都在 27 mm 左右,破碎范围也开始发生下降,可以从中得出结论,当冲击功达到一定值时继续增大冲击功,会对球齿破碎岩石的范围造成负面影响,不利于球齿破碎岩石表面。可以得出结论:对于单球齿的岩石破碎范围,钻压对其影响不大,冲击功选取 40 J 时,可以使其达到最大破坏直径,为 26.8 mm,利于球齿破碎岩石。

### 2.3.4 岩石应力影响范围

对影响范围较小边界值的研究是从岩石产生岩屑的范围来分析的,现在将对岩石受冲击应力波而产生的应力值来分析影响范围较大边界值。见图 11,当球齿冲击岩石时,接触的瞬间球齿会把球齿的动能转化为其它的能量形式释放出去,冲击应力波是一个主要释放途径,其会对球齿下部的岩石进行压裂作用,对球齿周围的岩石进行应力剪切来破碎岩石。半球形的应力波随着球齿的冲击在岩石中传播,并且随着离球齿距离越远岩石中的应力波也会发生衰落,最后随着时间而消散。冲击过程中岩石中的应力值会随着应力波的变化而变化,因此要准确地研究出岩石应力影响范围较大边界值,就要确定岩石应力值处于峰值应力的时刻。

图 12 分别对球齿冲击岩石整个阶段的 4 个时间点进行岩石应力的数据分析。黑色曲线对应为冲

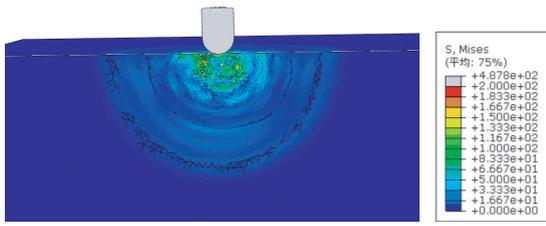


图 11 应力波的扩散

Fig.11 Diffusion of stress waves

击岩石前期的应力曲线,根据 X 坐标显示,其应力整体处于 100 MPa 以上的范围是最大的,正是因为冲击应力波还未开始消散,正处于峰值应力;再观蓝色、绿色和紫色曲线,其对应的分别是冲击前中期、中期和末期的 3 个阶段,其应力整体大部分处于 100 MPa 以下,主要原因是应力波在岩石中传递时被消耗了大部分能量,所以对于要选取应力峰值的时间点应该是冲击的较前期的阶段,此时应力波还没有被消耗,可以较为准确地得到应力影响范围较大边界值。

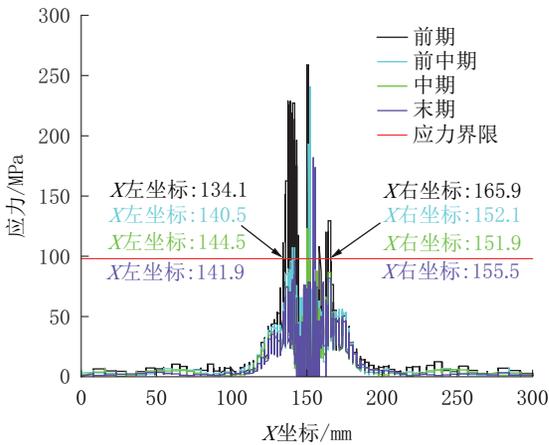


图 12 不同时间岩石应力曲线

Fig.12 Stress curves of rocks at different times

当岩石的应力值达到抗压强度,岩石会发生破坏,但是不达到抗压强度岩石也会受到应力波的影响,而发生强度下降,图 12 的红色横线为应力界限,岩石应力在界限之上视为发生强度下降,得出岩石应力值与应力界限相交的 X 坐标的值,对应的 X 坐标的范围为应力影响范围。但对于岩石开始产生强度下降的这个应力界限值,现今没有一个确切的理论来表明,为求应力界限值,本文以岩石的抗压强度 120 MPa 为基准,取岩石抗压强度的 0.8、0.7、0.6 倍

作为应力界限,最后再通过数据分析找出最符合布齿经验结论的应力界限作为标准。

图 13 是以 96 MPa 为应力界限所得到的应力影响范围曲线,在钻压为 1.2 kN,冲击功为 30 J 时对应最大的影响范围为 43.4 mm,不同钻压下的曲线的趋势都是先增后减,最后趋于平缓。分析可知,对于球齿的钻进,并不是钻压与冲击功越大越好,无论岩石破碎影响范围还是应力影响范围都呈金字塔形状,原因主要是当超过一定的冲击功后,冲击产生的能量大部分不是释放在应力波对球齿两侧的剪切破坏,而是释放于正下方岩石的压裂破坏。

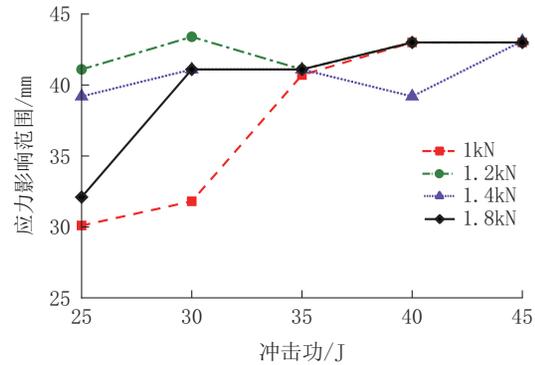


图 13 应力界限为 96 MPa 下应力影响范围

Fig.13 Stress influence range under the stress limit is 96MPa

对应力影响范围的分析,首先对于钻进参数的选取,钻压取 1.2 kN 左右,冲击功取 30 J 左右,应力影响范围最大,有利于破碎表面岩石。再对应力影响范围进行分析,当 0.8 倍抗压强度时,应力影响范围为 43.4 mm;当 0.7 倍抗压强度时,应力影响范围为 53.9 mm;当 0.6 倍抗压强度时,应力影响范围为 58.6 mm。根据他人经验所得,球齿间的间距尽量为 1.5~2 倍的球齿的直径<sup>[31]</sup>,因此进行球齿间距的估算为间距应为 27~36 mm 之间,应力界限为 96 MPa 所得的应力影响范围 43.4 mm 对应的球齿间距接近,后续将以 96 MPa 作为应力界限。

在单齿冲击碎岩模拟中,随着钻压与冲击功的增大,岩石的破碎体积在不断增大,但破碎比功不会随冲击功的增大而减小,在 35 J 左右取得最小值;破碎范围会先增加,当冲击功达到 40 J 时,破碎范围开始减小;应力影响范围会先增加,当冲击功达到 30 J 时,影响范围发生转折,最后趋于稳定。球齿侵入岩石的深度随冲击功的增加成线性增加,但受钻压影

响较小。据此,确定较优秀的参数组合,钻压为 1.2 kN、冲击功为 30 J,能造成岩石较大破碎和较大范围岩石的强度下降。

### 3 双球齿冲击碎岩数值模拟

#### 3.1 双球齿破碎范围研究

对于双球齿的研究首先要从两种不同的运动方式出发(见图 14),一种是圈距即径向距离,另一种是间距即周向位移。采取单齿仿真所得钻进参数,以最优单球齿应力影响范围 43.4 mm 作为起始距离,4 mm 为增量,考虑到球齿处于不同圈数的位置,其转速是不一样的,因此设置常见的回转速度 8 r/min,由于在单次冲击,时间很短,球齿走过的弧线位移可近似于直线位移,因此对球齿添加线速度来模拟球齿切削,径向方向球齿以最外围两圈进行研究,周向方向球齿以最外围圈进行研究,最外围球齿距中心轴线为 300 mm,线速度为 0.3 m/s;较内一圈距中心轴线为 256.7 mm,线速度为 0.28 m/s。

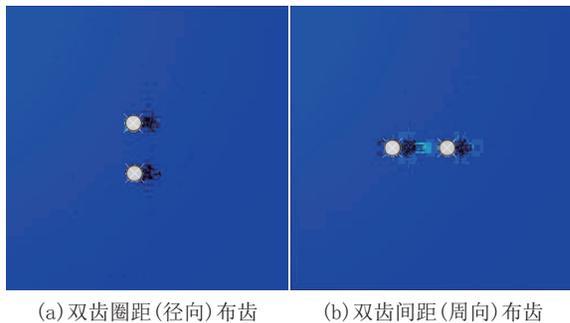


图 14 双齿布齿示意

Fig.14 Double tooth layout diagram

##### 3.1.1 不同圈距下破碎范围研究

对于不同圈距下的球齿,在同一回转速度下,线速度不相同,如图 15 所示,两球齿破碎范围的趋势为随圈距的增加破碎范围先增后减再有小幅度增幅;最高点对应的圈距为 47.4 mm 处,线速度较大的球齿破碎范围为 25.8 mm,线速度较小球齿破碎范围为 22.5 mm。

##### 3.1.2 不同间距下破碎范围研究

对于不同间距下的球齿,在同一回转速度下,线速度相同,如图 16 所示,当在两球齿间距为 43.4 mm 时,两球齿对岩石破坏直径最大,前球齿破碎范围为 24.8 mm,后球齿破碎范围为 22.9 mm,原因为切削时后齿产生了向前的冲击应力波与前齿的应力

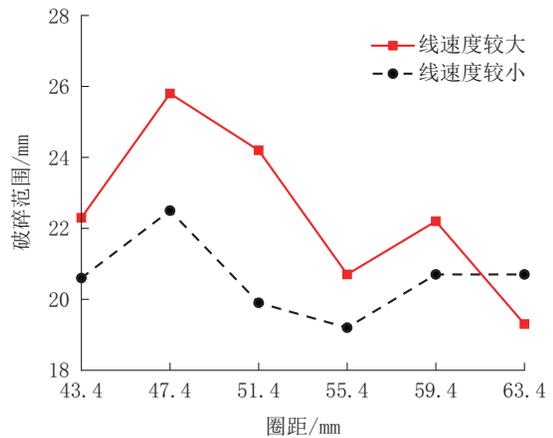


图 15 不同圈距下破碎范围

Fig.15 Breaking range under different ring distance

波相叠加,加大了前齿的破碎范围;随着间距的增加呈递减的趋势,原因为间距的增加会使两球齿造成的应力波对岩石的强度下降的作用降低,碎岩效果也随之降低。

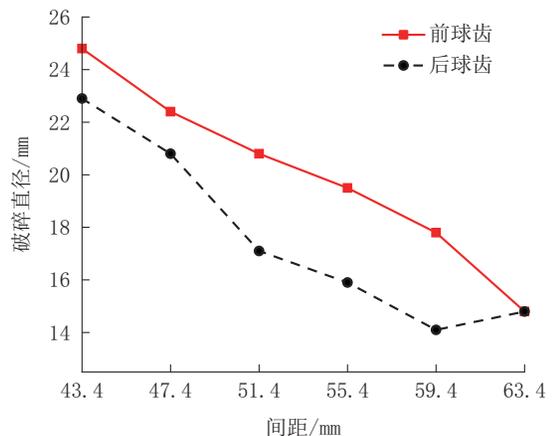


图 16 不同间距下破碎范围

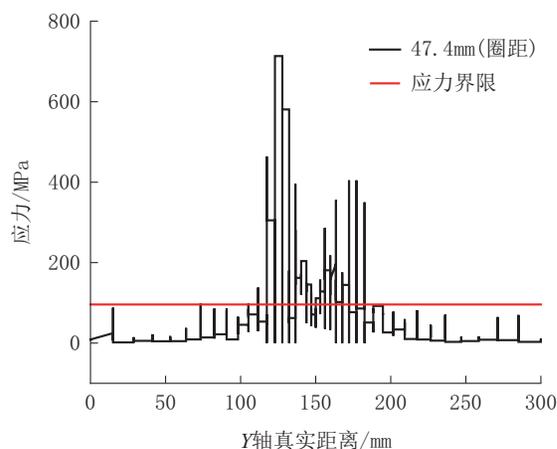
Fig.16 Range of breakage under different spacing

### 3.2 双球齿应力影响范围研究

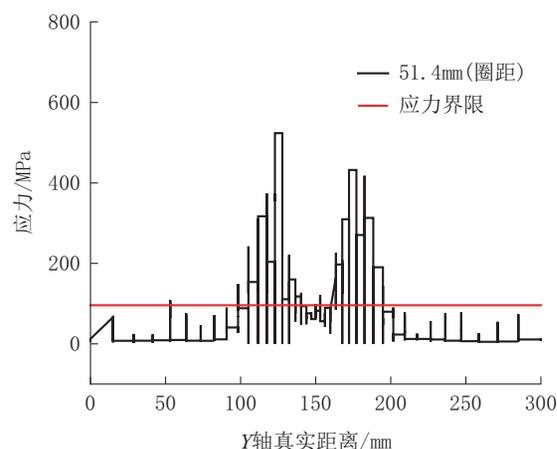
#### 3.2.1 不同圈距下应力影响范围

对于双齿冲击钻进,要研究双球齿造成的影响范围,就要对球齿中间的距离进行研究。岩石受两球齿的应力的分布为:两球齿处应力值大,分别向球齿周围发生下降。根据岩石受应力影响会发生强度下降的原理,从图 17(a)可知,当圈距为 47.4 mm 时,两球齿的中间部分的应力大部分都处于应力界限之上,表示岩石发生了较大面积的强度下降;从图 17(b)可知,当距离为 51.4 mm 时,其中间部分有一部分处于应力界限之下,表示中间部分受应力影响较

小。其它圈距下的应力曲线,大部分都处于应力界限之下,不做考虑,因此圈距的大小取47.4 mm左右能让球齿中间大部分的岩石发生强度下降,从而让球齿更容易冲击切削岩石。



(a) 圈距为47.4mm岩石应力图



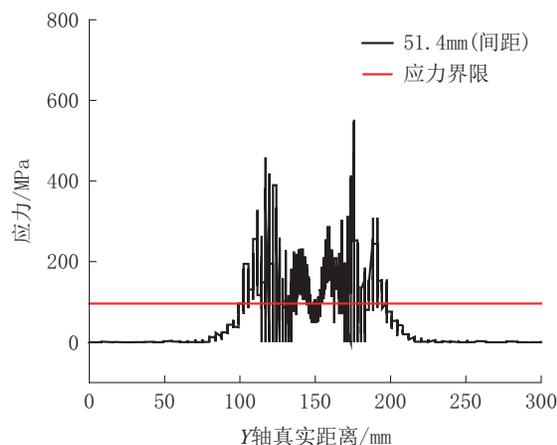
(b) 圈距为51.4mm岩石应力图

图17 不同圈距下应力影响范围

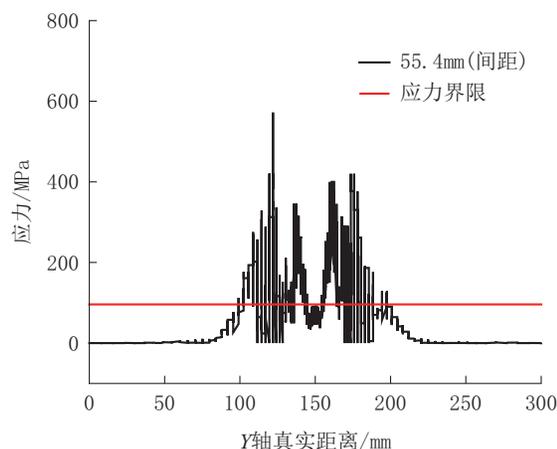
Fig.17 Influence range of stress at different turn spacing

### 3.2.2 不同间距下应力影响范围

见图18,岩石受两球齿冲击切削应力的分布为:两球齿冲击位置处应力有峰值,分别向周围发生下降。见图18(a),当间距为51.4 mm时,两球齿的中间部分的应力大部分都处于应力界限之上,表示岩石产生大面积的强度下降;见图18(b),当间距为55.4 mm时,其中间部分有一部分处于应力界限之下,表示中间部分受到两球齿的应力影响较小;其它间距下的应力曲线,大部分都处于应力界限之下,不做考虑,因此间距取51.4 mm能使大部分的岩石发生强度下降,使球齿更容易冲击切削岩石。



(a) 间距为51.4mm岩石应力图



(b) 间距为55.4mm岩石应力图

图18 不同间距下应力影响范围

Fig.18 Range of breakage under different spacing

通过对上述双齿碎岩仿真研究分析,确定双球齿在钻压为1.2 kN与冲击功为30 J的钻进参数下,根据破碎范围与应力影响范围得出的较优的圈距与间距。圈距选取47.4 mm,其破碎范围与应力影响范围都较为优秀。间距选取43.4 mm时,可对球齿中间岩石造成较大范围的破碎;间距选取51.4 mm时,可对岩石造成大范围的强度下降。

### 3.3 布齿方案设计

得出球齿圈距与间距,进行钻头球齿布齿,见图19,考虑到钻头形状与球齿不同位置磨损,对圈距与间距进行调整,具体布齿方案如表2所示。

## 4 结论

本文通过ABAQUS仿真软件,对单球齿与双球齿在不同钻进参数下冲击切削岩石进行了模型建

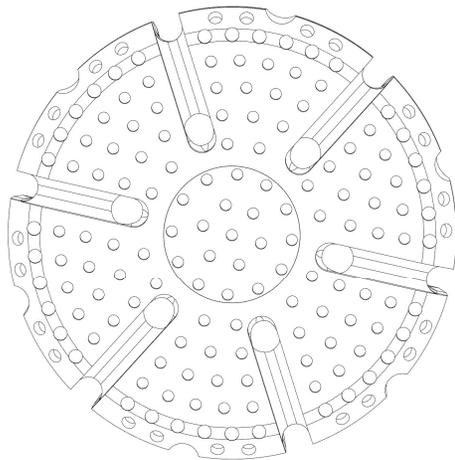


图19 钻头布齿图

Fig.19 Drill tooth layout diagram

表2 布齿方案表

Table 2 Tooth layout scheme table

布齿位置	圈距/mm	间距/mm	球齿直径/mm
0~3圈	47.4	第1圈48.4,第2圈49,第3圈51.4	18
3~4圈	45.4	第四圈49	18
4~5圈	43.4	第五圈47.4	18
5~6圈	42	第六圈45.4	18
6~7圈	40	第七圈43.4	22
7~8圈	36	第八圈41.4	22

立与数值模拟,从不同方面研究分析球齿对岩石的破坏,得到了破碎比功、破碎范围和应力影响范围等在不同钻进参数下的变化规律,并生成对应的曲线图进行分析比较,结论如下:

(1)单齿碎岩仿真从整体到纵向再到横向展开研究,对破碎比功、应力影响范围等曲线进行对比分析,确定较优秀的参数组合。当钻压为1.2 kN,冲击功为30 J时,对岩石的破碎的效率较高,球齿入岩的位移可达0.67 mm,并根据应力界限得出应力影响范围为43.4 mm。

(2)通过在较优钻进参数下双球齿冲击切削模拟,确定了较为优秀的圈距与间距,圈距取47.4 mm,间距取43.4~51.4 mm。

(3)在平面钻头上进行布齿方案设计:钻头中间部分圈距取47.4 mm、间距取51.4 mm左右;再向外圈布齿,球齿圈距适当缩小,间距逐步缩小到43.4 mm,保证较外圈球齿磨损与应力不会过大,既保证钻进效率,也保证钻头使用寿命。

### 参考文献(References):

- [1] 罗宏保,李俊萍,吴金生.高温硬岩空气潜孔锤钻头设计[J].钻探工程,2021,48(4):60-65.  
LUO Hongbao, LI Junping, WU Jinsheng. Development of the air DTH hammer drilling bit for high temperature hard rock [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):60-65.
- [2] 戚波.大直径潜孔锤偏心式反循环跟管钻头的研制[D].长春:吉林大学,2022.  
QI Bo. Development of large diameter eccentric pneumatic hammer drill bit with reverse circulation used for casing-while-drilling [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [3] 王立峰,张晓昂,徐影.单体大直径空气潜孔锤钻井工艺研究及应用[J].中国煤炭地质,2021,33(8):65-67.  
WANG Lifeng, ZHANG Xiaolang, XU Ying. Study on and application of unicum large diameter pneumatic DTH hammer drilling technology [J]. Coal Geology of China, 2021,33(8):65-67.
- [4] 田嵩山.空气潜孔锤反循环钻头球齿碎岩机理及布齿探讨[J].江西建材,2019(2):90-91.  
TIAN Songshan. Discussion on the mechanism of the ball-crushing of the air-drilling hammer counter-circulation drill bit and tooth placement explore [J]. Jiangxi Building Materials, 2019(2):90-91.
- [5] 赵学社,唐胜利.地质PDC无心钻头合理布齿的研究[J].西部探矿工程,1998,10(2):56-59.  
ZHAO Xueshe, TANG Shengli. Study of the reasonable cutter distribution of geological PDC bit [J]. West-China Exploration Engineering, 1998,10(2):56-59.
- [6] 辛喜胜.潜孔锤钻进的岩石破碎机理研究[J].价值工程,2011,30(7):30.  
XIN Xisheng. Rock crushing mechanism study of DTH hammer drilling [J]. Value Engineering, 2011,30(7):30.
- [7] 张青春,卿启湘,刘杰.基于气固两相流的反循环潜孔钻头柱齿拓扑优化设计[J].工程设计学报,2014,21(4):340-347.  
ZHANG Qingchun, QING Qixiang, LIU Jie. The cylindrical teeth's topology optimization design of reverse circulation DTH bit based on gas-solid two-phase flow [J]. Journal of Engineering Design, 2014,21(4):340-347.
- [8] 朱丽红,殷琨,黄勇.气动潜孔锤球齿碎岩机理研究[J].凿岩机械气动工具,2009(3):24-27.  
ZHU Lihong, YIN Kun, HUANG Yong. Research and application on rock broken mechanism of pneumatic DTH hammer spherical tooth [J]. Drilling Machinery Pneumatic Tools, 2009(3):24-27.
- [9] 马晓青.冲击动力学[M].北京:北京理工大学出版社,1992.  
MA Xiaqing. Impact Dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992.
- [10] 常玉军,殷琨.冲击回转碎岩机理试验研究[J].探矿工程,2001(4):62-64.  
CHANG Yujun, YIN Kun. Research on the percussive rotary

- rock fragmentation mechanism [J]. *Exploration Engineering*, 2001(4):62-64.
- [11] 李华, 孙友宏. 球齿钻头布齿的优化方法探讨[J]. *探矿工程*, 2001(2):39-40,43.  
LI Hua, SUN Youhong. Optimization of the insert arrangement for button bits[J]. *Exploration Engineering*, 2001(2):39-40,43.
- [12] 彭伟, 何龙飞.  $\varnothing 800$  mm 潜孔锤钻头布齿设计及理论探讨[J]. *岩土工程技术*, 2019, 33(6):314-317, 340.  
PENG Wei, HE Longfei. Tooth arrangement design of  $\varnothing 800$  mm DTH hammer bit and theoretical discussion[J]. *Geotechnical Engineering Technology*, 2019, 33(6):314-317, 340.
- [13] 王圣林, 魏秦文, 刘成俊, 等. 气动潜孔锤钎头破岩分析及工艺参数优选[J]. *石油机械*, 2022, 50(1):19-26.  
WANG Shenglin, WEI Qinwen, LIU Chengjun, et al. Rock breaking analysis and process parameter optimization of pneumatic DTH hammer bit [J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(1):19-26.
- [14] 徐瑞晗. 旋挖钻机潜孔锤钻进特性仿真研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
XU Ruihan. Simulation study on drilling characteristics of downhole hammer of rotary drilling rig [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [15] 陈亮. 潜孔锤破岩转矩计算及仿真分析[J]. *工程机械*, 2021, 52(4):62-68, 9.  
CHEN Liang. Calculation and simulation analysis of rock breaking torque of DTH hammer [J]. *Construction Machinery*, 2021, 52(4):62-68, 9.
- [16] 高阳. 单体大口径潜孔锤的基础研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
GAO Yang. The basic research on single large diameter DTH hammer[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [17] 方金. 钻进冲击载荷作用下软岩破碎规律的试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
FANG Jin. Experimental research on the fragmentation law of soft rock under drilling impact load[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [18] Zhao Z, Meng Y, Li Y. Effects of working angle on pneumatic down-the-hole hammer drilling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5):2141-2155.
- [19] 李从保. 气动潜孔锤冲击碎岩影响因素及数值模拟分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.  
LI Congbao. Influencing factors and numerical analysis on the impact crushed rocks by pneumatic DTH hammer[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [20] Jiang H, Cai Z, Zhao H. Numerical study of hard rock breakage under indenter impact by the hybrid FDEM[J/OL]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 233:107068.
- [21] Song H, Shi H, Yuan G. Experimental study of the energy transfer efficiency and rock fragmentation characteristics in percussive drilling[J]. *Geothermics*, 2022, 105:102497.
- [22] 杨达. 大直径潜孔锤反循环钻头布齿参数研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
YANG Da. Research on tooth arrangement parameters of reverse circulation bit with large diameter DTH hammer [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [23] Saadati-2014-Granite rock fragmentation at percussive drilling. pdf[M/OL].
- [24] Richard T, Germay C, Detournay E. A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 305(3):432-456.
- [25] Depouhon A, Detournay E. Instability regimes and self-excited vibrations in deep drilling systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(7):2019-2039.
- [26] Hill R, Storakers F R S, Zdunek A B. A theoretical study of the brinell hardness test[J]. *Proc R Soc London, Ser A*, 1989, 342(4):301-330.
- [27] 王方祥. 粒子射流调制及冲击破岩机理研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.  
WANG Fangxiang. Research on particle water jet modulation and rock breaking mechanism[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [28] 杨达, 陈宝义, 曹宏宇, 等. 基于冲击载荷的硬质合金球齿碎岩机理研究[J]. *钻探工程*, 2022, 49(1):142-152.  
YANG Da, CHEN Baoyi, CAO Hongyu, et al. Study on rock fragmentation mechanism of carbide spherical teeth based on impact load[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(1):142-152.
- [29] 支跃. 大孔径气举反循环潜孔锤动力学研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.  
ZHI Yue. The dynamics research of large size gas lift reverse circulation DTH hammer [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [30] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.  
WANG Lili. *Stress Wave Foundation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [31] Shi C, Zhu X, Luo H. Study of DTH bit-rock interaction numerical simulation method and DTH bit properties evaluation [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42(5):2179-2190.

(编辑 荐华)