

# 纵-扭复合振动辅助岩石钻削机理及效率

高大湧, 林建勇, 田雅婷, 姚红良  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对单一纵向或扭转振动辅助岩石钻削的局限性, 提出纵-扭复合振动辅助岩石钻削方案. 首先对该方案的理论模型进行分析; 然后基于EDEM(event driven execution manager)软件的离散元法(discrete element method, DEM)对不同情况下岩石的钻进机理和效果进行模拟, 结果表明添加纵-扭复合振动辅助相对于无振动、纵向振动和扭转振动方案, 钻头受到的最大合力分别减小了36.45%、9.34%和32.84%, 钻进速度分别提高了26.02%、4.27%和16.13%; 最后对所提方案的钻进效果进行试验验证, 得到添加纵-扭复合振动辅助后的钻头支架应变相对于只添加扭转振动辅助时减小了35.48%, 钻进速度提高了31.25%. 研究表明纵-扭复合振动辅助方法可以提高岩石钻削效率.

**关键词:** 岩石钻削; 振动辅助; 复合振动; 离散元法; 钻削效率

中图分类号: TD 823 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0555-09

## Mechanism and Efficiency of Combined Longitudinal-Torsional Vibration-Assisted Rock Drilling

GAO Da-yong, LIN Jian-yong, TIAN Ya-ting, YAO Hong-liang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YAO Hong-liang, E-mail: hlyao@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In response to the limitations posed by singular longitudinal or torsional vibration-assisted rock drilling, a combined longitudinal-torsional vibration-assisted rock drilling scheme was proposed. Firstly, the theoretical model of the scheme is analyzed. Then, DEM (discrete element method) simulations using EDEM (event driven execution manager) software are conducted to simulate the drilling mechanism and effects on rocks under various conditions. Results indicate that the addition of combined longitudinal-torsional vibration assistance decreases the maximum resultant force on the drill bit by 36.45%, 9.34% and 32.84%, respectively, compared to zero vibration, longitudinal vibration, and torsional vibration schemes. Moreover, drilling speeds increase by 26.02%, 4.27% and 16.13%, respectively. Finally, experimental validation of the proposed scheme's drilling performance reveals a 35.48% reduction in the drill head's support strain and a 31.25% increase in the drilling speed when compared to solely adding torsional vibration assistance. It is demonstrated that the combined longitudinal-torsional vibration-assisted method can significantly enhance the efficiency of rock drilling.

**Key words:** rock drilling; vibration assistance; combined vibration; DEM (discrete element method); drilling efficiency

随着浅层地下资源的枯竭, 开采的深度不断增加, 开采条件也随之变得复杂<sup>[1-2]</sup>. 由于我国在深层领域的勘探技术较发达国家落后, 这严重影响了深部地层的勘探<sup>[3]</sup>, 因此有必要开发深层破

岩的新技术和新工具<sup>[4-5]</sup>. 为了加快地层勘探的进度, 快速破岩成为了一个热门且重要的研究方向<sup>[6]</sup>.

传统的岩石钻进方式通常伴随着较大的切

削力,难以实现循环与井控系统的兼容性,增加了钻井作业成本<sup>[7-9]</sup>.Yang 等<sup>[10]</sup>提出一种钻柱驱动的旋转冲击钻具,通过对所设计的 3 种简化模型进行比较选择了最合适的简化模型,并对其效果进行了验证.Li 等<sup>[11]</sup>分析了不同谐波振动冲击对岩石能量响应的的影响,结果表明岩石能量响应与岩石固有频率、质量与冲击频率成正比关系.Mikhailova 等<sup>[12]</sup>对比了超声辅助钻进与常规钻进在大理石岩上的效果,实验结果表明超声辅助钻进使推力和扭矩得到了大幅下降.Zhang 等<sup>[13]</sup>分析了红砂岩在超声振动下力学参数的变化规律,结果表明其抗压强度和弹性模量随超声振动时间的延长而下降.上述研究均通过单一振动来提高效率.目前,复合振动主要有纵-扭复合<sup>[14-15]</sup>、纵-弯复合<sup>[16]</sup>、扭-弯复合<sup>[17]</sup>、双弯曲复合<sup>[18]</sup>和径-扭复合<sup>[19]</sup>.其加工效果已经在实验中得到验证<sup>[20-22]</sup>.

本文利用纵向和扭转两个方向的复合振动,提出纵-扭复合振动辅助岩石钻削方案.首先建立了复合振动辅助钻削的理论模型,对理论模型进行了分析;然后通过离散元法对不同的钻进情况进行对比;最后搭建复合振动辅助岩石钻削试验平台,对所提方案的性能进行测试,将试验结果进行对比,得到不同加工参数的影响规律.

### 1 复合振动辅助岩石钻削的理论模型

复合振动辅助钻削中,为了能够控制振动的频率和输出功率,振动一般都由特定的振动系统产生.本文所提出的复合振动辅助主要包括纵向振动辅助和扭转振动辅助,纵-扭复合振动辅助下岩石的钻削示意图如图 1 所示.

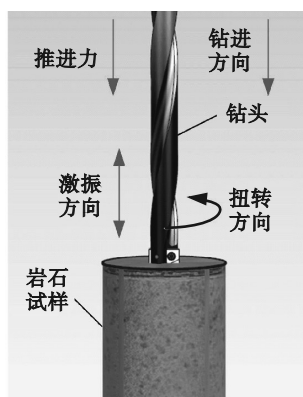


图 1 复合振动辅助岩石钻削示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of combined vibration-assisted rock drilling

建立了复合振动辅助岩石钻削系统理论模型,并对其进行分析.本文只考虑岩石受到的扭转和纵向两种情况下的振动辅助,忽略了其他因素的影响,得到的二自由度理论模型如图 2 所示<sup>[23-24]</sup>.

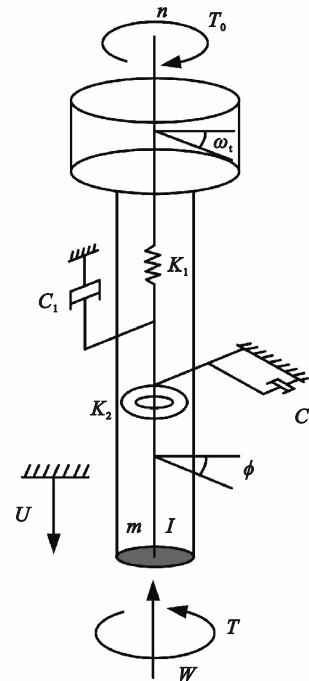


图 2 复合振动辅助岩石钻削系统理论模型  
Fig. 2 Theoretical model of the combined vibration-assisted rock drilling system

图中: $U$ 代表钻头的纵向位移; $\phi$ 代表钻头的转动角位移; $m$ 为钻头质量; $I$ 为钻头的转动惯量; $K_1$ 和 $K_2$ 分别为扭转电机的纵向刚度和扭转刚度; $n$ 为电机的转速; $C_1$ 和 $C_2$ 分别为纵向阻尼系数和扭转阻尼系数; $W$ 和 $M$ 分别为钻头受到的纵向力和转矩; $\omega_1$ 为 $t$ 时刻电机的转运角度.

因此该系统的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{U} + C_1\dot{U} + K_1U &= W_0 - W(\phi, U), \\ I\ddot{\phi} + C_2\dot{\phi} + K_2(\phi - nt) &= M_0 - M(\phi, U). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: $M_0$ 为输入扭矩; $W_0$ 为钻头纵向压力.

钻头受到的纵向力和转矩的表达式分别为<sup>[25]</sup>

$$W = k_c(U - s), \quad (2)$$

$$M = \mu WRf(\phi). \quad (3)$$

其中: $R$ 为钻头半径; $k_c$ 为接触刚度; $\mu$ 为摩擦系数; $s$ 为切削深度.

切削深度 $s$ 和 $f(\phi)$ 的表达式分别为

$$s = s_0 \sin(\phi), \quad (4)$$

$$f(\phi') = \tanh(\phi') + \frac{2\phi'}{1 + \phi'^2} \quad (5)$$

其中,  $s_0$  为钻头的振幅。

由式(4)可知,切削深度与钻头的振幅有一定关系,当钻头的转动角位移不变时,切削深度与钻头的振幅呈线性关系.在对钻头添加振动激励时,钻头的振幅  $s_0$  随之增大,切削深度  $s$  也随之增大,将其代入式(2)可得钻头受到的纵向力减小,由式(3)可得钻头受到的转矩也会随之减小。

## 2 复合振动辅助岩石钻削离散元法仿真

### 2.1 岩石试样的离散元模型

采用 EDEM 软件对钻削过程进行离散元分析,建立的岩石试样模型半径为 40 mm,长度为 80 mm.由于岩石的组成较为复杂,包含不同种类和粒径的颗粒,因此本文对其进行简化,采用单一材料和尺寸的颗粒进行填充,填充的粒径为 1 mm,填充数量为 56 000 个,其模型如图 3 所示。

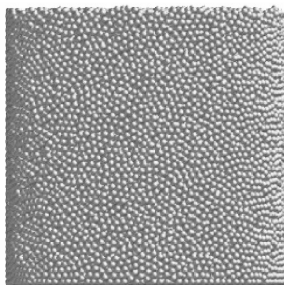


图 3 岩石试样离散元模型

Fig. 3 Discrete element model of rock specimens

试验中,钻头的材质为硬质合金,岩石试样为软岩,相关物理参数如表 1 所示。

表 1 物理参数设置

Table 1 Physical parameter settings

试验材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量/GPa
软岩	2 483	0.204	17.7
硬质合金	14 800	0.24	510

对生成的颗粒设置接触,离散元模型中的接触参数如表 2 所示,接触键的分布如图 4 所示,接触键的总数量为 133 045。

根据岩石试样的材料对颗粒设置黏结,在此选用线性平行黏结模型对颗粒进行黏结.该黏结可以等效为一组具有恒定法向刚度和剪切刚度的弹簧,均布在 2 个接触颗粒范围的矩形平面内,

接触表面黏结模型如图 5 所示,根据模型可知平行黏结会产生力和力矩,导致产生黏结材料内的法向应力与剪切应力<sup>[26-27]</sup>。

表 2 接触参数设置

Table 2 Contact parameter settings

材料	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
软岩和软岩	0.20	0.70	0.10
软岩和硬质合金	0.50	0.60	0.07

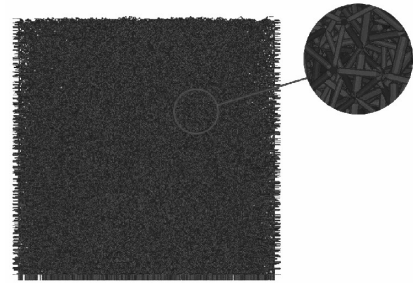


图 4 接触键的分布

Fig. 4 Contact bond distribution

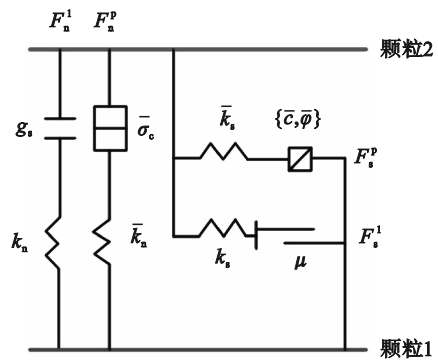


图 5 接触表面黏结模型

Fig. 5 Contact surface adhesion model

黏结键参数设置如表 3 所示,黏结键的分布如图 6 所示,黏结键的总数量为 128 018。

表 3 黏结键参数设置

Table 3 Adhesive bond parameter settings

法向刚度	切向刚度	法向强度	切向强度	黏结半径
$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$	Pa	Pa	mm
$1.15 \times 10^9$	$4.6 \times 10^8$	$5 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	1.5

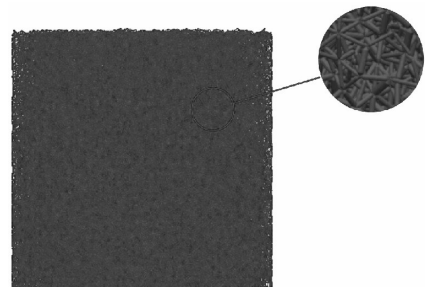


图 6 黏结键的分布

Fig. 6 Adhesive bond distribution

## 2.2 仿真方案设定及结果对比

对钻进参数进行设定,设置钻头直径为 16 mm,转速为 3 300 r/min,转矩为 140 N·m,压力为 50 N,纵向激振频率为 100 Hz,振动幅度为 1 mm.本文在此进行 4 种钻削情况的对比,具体参数如表 4 所示.其中 1 种钻削情况下岩石试样所受到的应力如图 7 所示.

表 4 4 种钻削情况的参数  
Table 4 Parameters for the four drilling cases

钻削情况	钻头直径	转速	压力	频率	转矩
	mm	r·min <sup>-1</sup>	N	Hz	N·m
常规	16	3 300	50	0	0
纵	16	3 300	50	100	0
扭	16	3 300	50	0	140
纵-扭	16	3 300	50	100	140

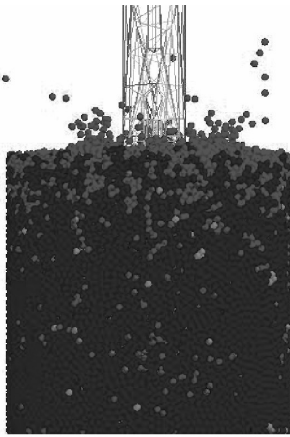


图 7 钻进时岩石试样所受的应力

Fig. 7 Stress on rock specimens during drilling

图 8a~8f 为 1 个加载周期( $T$ )内不同时刻岩石内部接触链应力强弱分布特征,图中颜色的深浅代表应力的强弱.从图 8 中可以看出,随着钻头的扭转与振动激励的冲击,岩石内部的接触应力逐渐加大,并在其与切削刃接触的部分向外扩散,有利于促进岩石裂纹的生成与扩展.

当岩石试样受到来自钻头的应力时,黏结键会因为受力而发生断裂,进而实现钻头的钻进.钻削过程中黏结键的断裂如图 9 所示,可以看出岩石试样受到的应力从钻头的位置逐渐扩散,降低了整体的强度.

为了证明所提出的钻进方案的钻进效果,对比了 4 种情况下钻头的最大受力情况以及钻进 80 mm 所用的时间,并对所得数据进行分析.仿真得到 4 种情况下钻头的受力对比,如图 10 所示,在此选用的力为钻头在 3 个方向所受合力的最大值.从图 10 可以看出,常规钻进时钻头受到的合

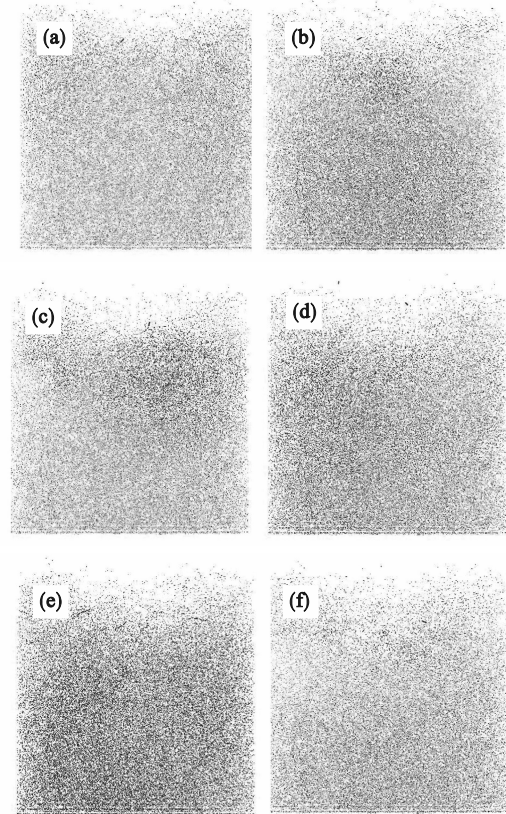


图 8 岩石内部应力强弱分布

Fig. 8 Stress intensity distribution inside the rock  
(a)—0; (b)— $T/5$ ; (c)— $2T/5$ ; (d)— $3T/5$ ;  
(e)— $4T/5$ ; (f)— $T$ .

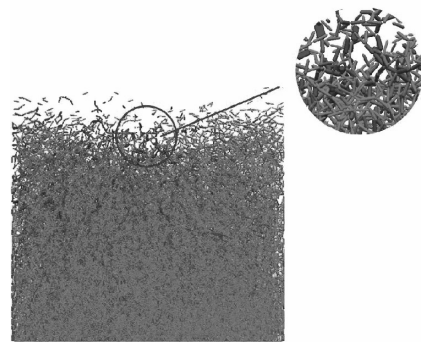


图 9 黏结键的断裂

Fig. 9 Breakage of adhesive bonds

力最大为 42.8 N,只添加纵向振动辅助时钻头受到的合力最大为 30.02 N,只添加扭转振动辅助时钻头所受到的合力最大为 40.5 N,添加纵-扭复合振动辅助时钻头受到的合力最大为 27.2 N.

通过上述的结果可以得到,在添加振动辅助后,相对于常规钻进而言钻头受到的最大合力均有减小的趋势.添加纵-扭复合振动辅助相对于无振动辅助、纵向振动辅助、扭转振动辅助方案钻头受到的最大合力分别减小了 36.45%,9.34%和 32.84%.钻削力的降低可以使钻头在更小的钻进压力作用下破坏岩石,在一定程度上降低了钻

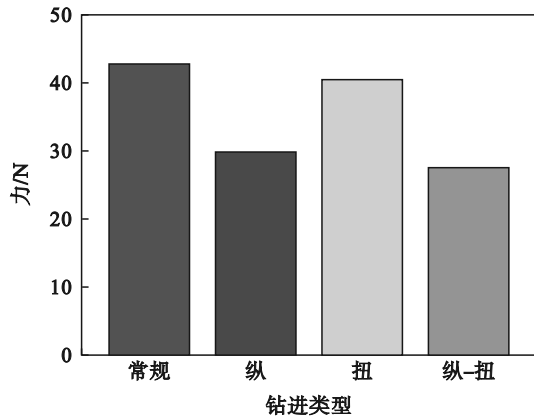


图 10 4 种情况下钻头受力对比

Fig. 10 Comparison of force on the drill bit in four cases

头的磨损。

仿真得到 4 种情况下钻进 80 mm 岩石试样所用时间如图 11 所示。从图 11 中可以看出,无振动辅助的钻进时间为 6.25 s,只添加纵向振动辅助的钻进时间为 5.17 s,只添加扭转振动辅助的钻进时间为 5.76 s,添加纵-扭复合振动辅助的钻进时间为 4.96 s。

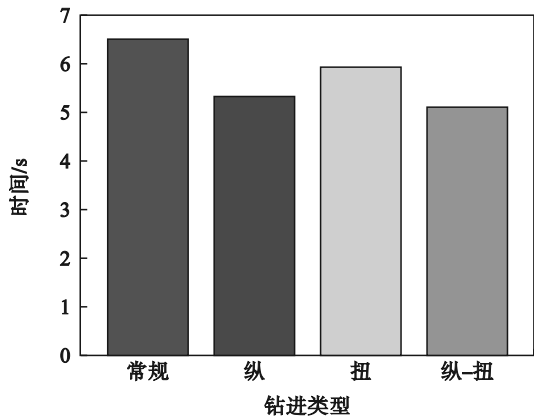


图 11 4 种情况下的钻进时间对比

Fig. 11 Comparison of drilling time in four cases

因此,可以得到无振动辅助、纵向振动辅助、扭转振动辅助、纵-扭复合振动辅助下的钻进速度分别为 12.8, 15.47, 13.89, 16.13 mm/s。添加纵-扭复合振动辅助相对于无振动辅助、纵向振动辅助和扭转振动辅助方案钻进速度分别提高了 26.02%, 4.27%, 16.13%, 表明添加振动后在一定程度上能够提高钻头的钻进速度。

### 3 复合振动辅助岩石钻削试验平台搭建及性能测试

为验证仿真所得结果的准确性,进行了复合振动辅助岩石钻削试验。首先搭建了复合振动辅

助岩石钻削试验平台;然后根据现有试验条件,结合仿真得到的规律,仅进行添加扭转振动辅助与添加纵-扭复合振动辅助 2 种情况的试验对比来验证所提出方案的效果;最后拟定不同参数对钻削的影响因素进行分析,为钻削参数的选择提供了参考。

#### 3.1 复合振动辅助岩石钻削试验平台搭建

##### 3.1.1 试验平台搭建

本文建立的复合振动辅助岩石钻削试验平台的模型如图 12 所示。根据现有试验条件,为了实现将扭转和冲击的复合振动添加到岩石试样中,将二者分别对岩石试样进行施加。通过扭转电机的工作带动钻头扭转为岩石提供扭转振动,激振器在岩石的下方作用对岩石施加纵向振动。

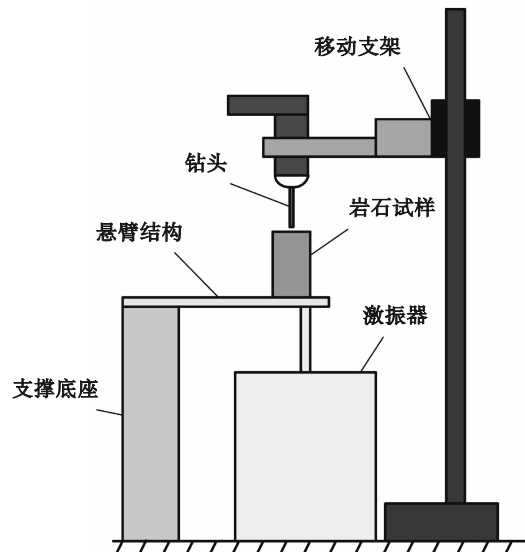


图 12 复合振动辅助岩石钻削试验平台模型

Fig. 12 Platform model of combined vibration-assisted rock drilling test

为了便于岩石试样达到共振频率,选用弹簧钢制作的悬臂梁将岩石试样加紧固定并悬伸在钻头的正下方,激振器的激励位置为悬臂梁的前端;扭转电机通过螺栓连接与移动支架固定,随着支架的移动对岩石试样进行钻进。

##### 3.1.2 悬臂结构固有频率测量

共振能够加速岩石试样的裂纹扩展,提高破岩效率,因此为了保证该测试平台具有更好的破岩效果,要使激振器提供的振动达到悬臂结构的固有频率。悬臂结构的安装如图 13 所示,前端通过螺栓将岩石固定,悬臂的长度可以根据需要进行调节;为了便于钻削,岩石部分采用软岩;将加速度传感器安装在悬臂梁的中间位置,对不同悬

伸情况下悬臂结构的固有频率进行测试.

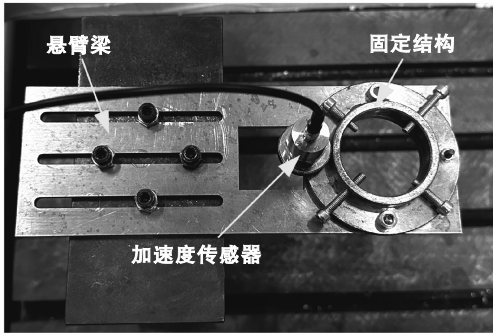


图 13 悬臂结构的安装

Fig. 13 Installation of the cantilever structure

测试设备包括:力锤、加速度传感器和数据采集系统,选择悬臂的悬伸长度分别为 100, 120, 150 mm,将采集到的数据经过傅里叶变换得到这 3 种情况下的一阶固有频率,分别为 111.22, 82.44, 47.71 Hz. 由于振动的剧烈程度对岩石的裂纹拓展影响较大,因此本文选用悬伸长度为 100 mm 时的情况进行后续试验.

### 3.2 复合振动辅助岩石钻削试验平台性能测试

采用对比试验对所设计的 2 种方案的钻进效果进行测试,激振器的激励位置如图 14 所示,激励位置在悬臂结构的最前端,加速度传感器的安装位置与图 13 中的安装位置相同;冲击起子的固定结构及应变片的粘贴位置如图 15 所示.将应变片粘贴到该位置可以更好地得到钻削时的应变情况,进而反映到钻削力的变化;钻进距离可以通过测量移动平台在轨道上的移动距离得到.



图 14 激振器的激励位置

Fig. 14 Excitation position of the shaker

1) 不同激励下钻进时的加速度规律. 在进行性能测试时,选用的钻头直径为 5 mm,冲击起子的转速为 3 300 r/min,钻进时间为 5 s,不加激励时采集到的振动加速度情况如图 16 所示.

对照组分别施加 47.71, 82.44, 111.22 Hz 的激励来进行性能对比,得到的加速度曲线分别如图



图 15 冲击起子的固定结构

Fig. 15 Fixed structure of the impact driver

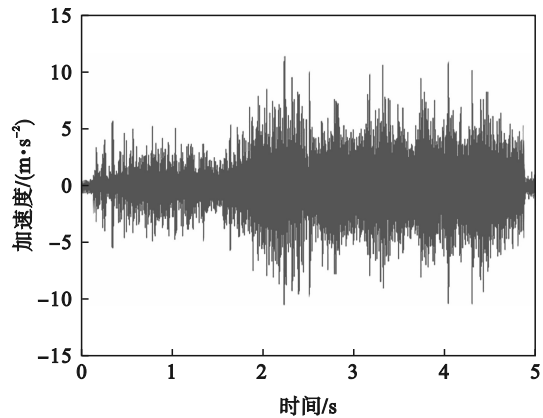


图 16 未加激励时的加速度曲线

Fig. 16 Acceleration curve without excitation

17~19 所示.从采集到的数据可以看出,随着激振频率的增加,悬臂结构的振动加速度呈现上升的趋势,当激振频率达到该结构的一阶固有频率时,钻进过程中的振动加速度曲线更加稳定.

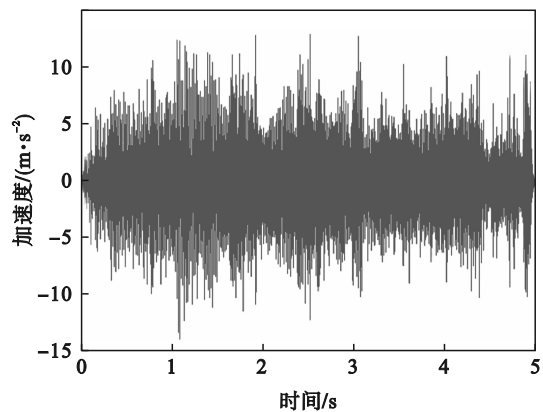


图 17 47.71 Hz 激励时加速度曲线

Fig. 17 Acceleration curve at 47.71 Hz excitation

2) 不同激励下钻进时的应变情况对比.对未添加激励与添加不同激励时冲击起子固定结构的应变情况进行对比,应变的采集选用东华动态信号采集分析系统,通过钻进过程中结构应变差的绝对值来反映钻头的受力情况,未添加激励时

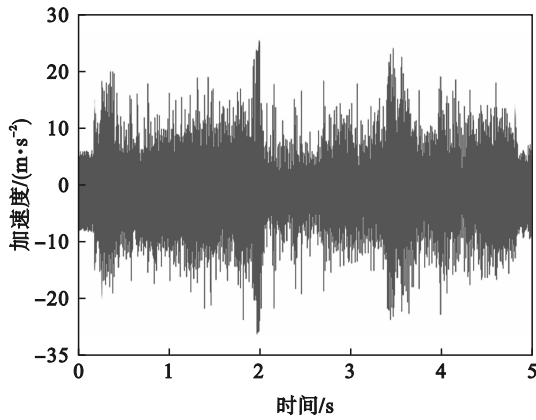


图 18 82.44 Hz 激励时加速度曲线  
Fig. 18 Acceleration curve at 82.44 Hz excitation

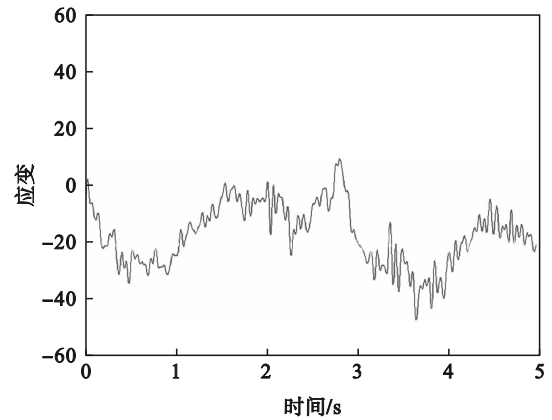


图 21 47.71 Hz 激励时应变曲线  
Fig. 21 Strain curve at 47.71 Hz excitation

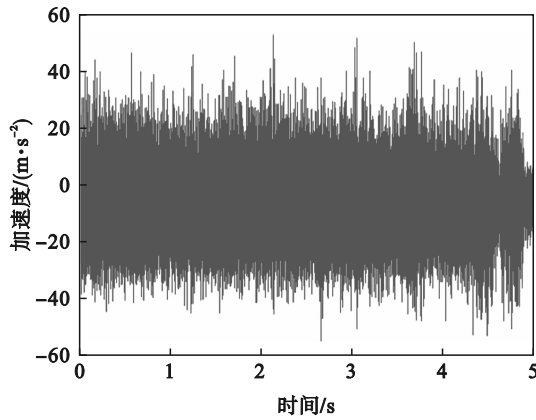


图 19 111.22 Hz 激励时加速度曲线  
Fig. 19 Acceleration curve at 111.22 Hz excitation

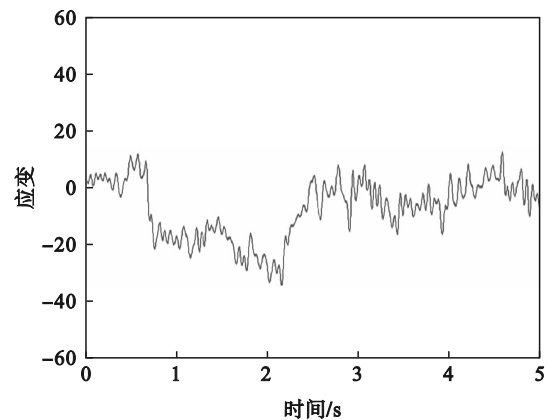


图 22 82.44 Hz 激励时应变曲线  
Fig. 22 Strain curve at 82.44 Hz excitation

结构的应变曲线如图 20 所示.

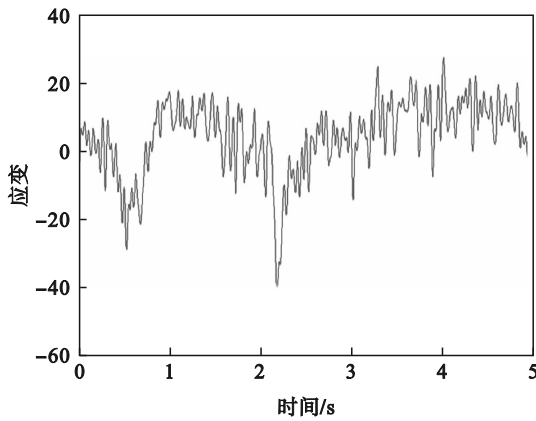


图 20 未加激励时的应变曲线  
Fig. 20 Strain curve without excitation

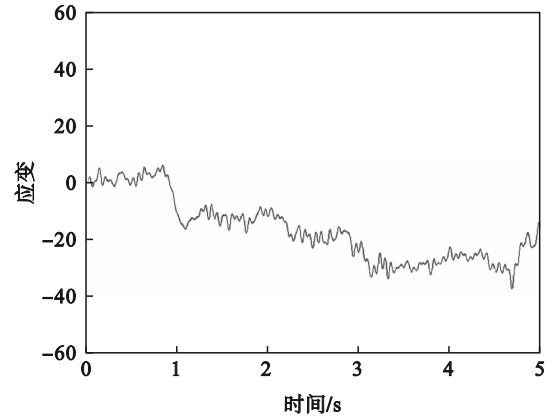


图 23 111.22 Hz 激励时应变曲线  
Fig. 23 Strain curve at 111.22 Hz excitation

对照组施加的激励分别为 47.71, 82.44, 111.22 Hz 的激励来进行性能对比,得到的应变曲线分别如图 21~23 所示.

通过图 20~23 可得这 4 种情况下钻头所受应力的应变差绝对值分别为 62, 57, 54, 40, 相对于未加激励的情况而言,应变差分别减小了 8.06%, 12.90% 和 35.48%, 表明在钻进过程中当激振频

率达到试验平台的一阶固有频率时钻头受到的力更小.

3) 不同激励下钻进速度的对比.为了证明所提方案的有效性,对不同激励情况下的钻进速度进行对比.为了便于实际测量,将移动支架的位移拟定为钻头的钻进距离,测量这 4 种情况 5 s 内钻头的位移情况,进而得到钻进速度.测量得到 4 种情况下钻进距离对比如图 24 所示,钻进的距

离分别为 48, 51, 56, 63 mm, 可以看出随着激振频率的增加钻进距离有所提升, 且当激振频率达到共振频率时钻进距离最大. 因此, 钻进速度在激励频率为 47.71, 82.44, 111.22 Hz 时相比于未激励时的提升分别为 6.25%, 16.67% 和 31.25%.

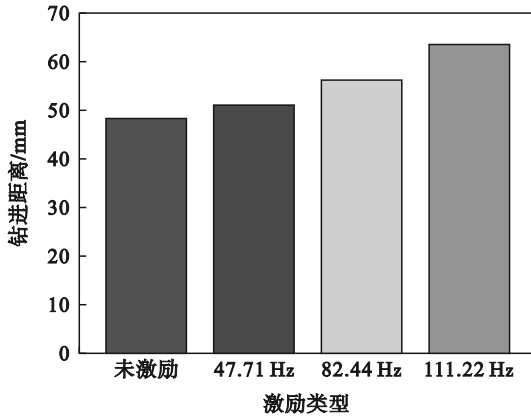


图 24 不同激励下钻头的钻进距离

Fig. 24 Drilling distance of the drill bit under different excitations

通过对比可以发现在添加激励后振动加速度有所提升, 且随着激励的增加振动加速度也随之增加; 应变差在添加激励后其绝对值减小, 且随着激励的增加呈现减小的趋势; 在添加激励后钻头的钻进速度也会有所提高, 当激振频率达到结构的一阶固有频率时, 钻进速度提升最大. 上述规律可以证明添加激励可以提升岩石自身的振动加速度, 减小钻头所受到的钻削力, 提高破岩效率, 与仿真得到的规律相吻合, 证明了添加纵-扭复合振动的钻进情况相对于只添加扭转振动的情况而言具有更高的钻进效率.

### 3.3 影响因素分析

由于在实际钻进过程中需要选择的参数较多, 为了得到该试验平台影响因素顺序, 根据现有的条件拟定不同参数的岩石钻削试验. 本文选择的变量分别为转速、激振频率和钻头直径, 转速依照冲击起子的三档转速进行设定, 空载转速分别为 1 200, 2 500, 3 300 r/min; 激振频率选择上文中所测得的频率, 分别为 47.71, 82.44, 111.22 Hz; 钻头直径分别为 3, 5, 8 mm. 本次试验选用正交试验的方式进行, 试验参数如表 5 所示.

由于试验中不可避免的因素导致结果会有一些的误差, 因此每组的加速度振幅选用均值的部分来进行分析, 应变选用应变差的绝对值来分析, 极差分析见表 6, 从表中可以得到这 3 个因素的主次顺序分别为激振频率、转速和钻头直径, 因此在钻进参数的选择上要优先考虑激振频率

对钻进过程的影响.

表 5 振动破岩试验参数  
Table 5 Vibratory rock-breaking test parameters

序号	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	激振频率/Hz	钻头直径/mm
1	1 200	47.71	3
2	1 200	82.44	5
3	1 200	111.22	8
4	2 500	47.71	5
5	2 500	82.44	8
6	2 500	111.22	3
7	3 300	47.71	8
8	3 300	82.44	3
9	3 300	111.22	5

表 6 极差分析  
Table 6 Analysis of extreme differences

序号	转速	激振频率	钻头直径	加速度振幅	应变差
	r·min <sup>-1</sup>	Hz	mm	m·s <sup>-2</sup>	
1	1 200	47.71	3	7	58
2	1 200	82.44	5	10	54
3	1 200	111.22	8	22	49
4	2 500	47.71	5	8	65
5	2 500	82.44	8	18	55
6	2 500	111.22	3	25	45
7	3 300	47.71	8	8	57
8	3 300	82.44	3	20	54
9	3 300	111.22	5	35	40
极差 1	8	19.66	2		
极差 2	4.67	15.33	1.34		
主次顺序	激振频率>转速>钻头直径				
最优水平	3 300	111.22	5		
最优组合	转速 3 300 r·min <sup>-1</sup> , 激振频率 111.22 Hz, 钻头直径 5 mm				

## 4 结 论

1) 通过离散元法对不同情况下的钻头受力情况以及钻进速度进行对比, 结果表明添加纵-扭复合振动辅助相对于无振动辅助、纵向振动辅助和扭转振动辅助方案钻头受到的最大合力分别减小了 36.45%, 9.34% 和 32.84%, 钻进速度分别提高了 26.02%, 4.27% 和 16.13%.

2) 通过对比试验得到的规律与仿真得到的规律相同. 纵-扭复合振动辅助破岩在激振频率为 47.71, 82.44, 111.22 Hz 时比仅添加扭转振动时钻头支架的应变差分别减小了 8.06%, 12.90% 和

35.48%, 钻进速度分别提升了6.25%, 16.67%和31.25%。

3) 通过正交试验对3种参数相对于钻进效率的影响因素进行了分析,得到的主次顺序依次为激振频率、转速和钻头直径,因此在实际钻进过程中要优先考虑激振频率对钻进效率的影响。

通过以上结论验证了所提出方案的可行性,为提高破岩效率提供了一定的参考。

#### 参考文献:

- [1] Meng T, Xie J, Li X, et al. Experimental study on the evolutional trend of pore structures and fractal dimension of low-rank coal rich clay subjected to a coupled thermo-hydronechanical-chemical environment [J]. *Energy*, 2020, 203:117838.
- [2] Tian J L, Wu Y H, Deng Z. Rock-breaking performance and experimental study of split bit [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(11):580-591.
- [3] Zhao Y, Zhang C S, Zhang Z Z, et al. The rock breaking mechanism analysis of axial ultra-high frequency vibration assisted drilling by single PDC cutter [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205:108859.
- [4] Xue Y D, Zhou J, Liu C, et al. Rock fragmentation induced by a TBM disc-cutter considering the effects of joints: a numerical simulation by DEM [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 136:104230.
- [5] 陈杰, 牟小军, 李汉兴, 等. 旋冲振荡钻井提速工具的研制与应用 [J]. 断块油气田, 2020, 27(3):386-389. (Chen Jie, Mou Xiao-jun, Li Han-xing, et al. Development and application of rotary-percussive and oscillatory drilling tool [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3):386-389.)
- [6] Zha C Q, Liu G H, Li J, et al. Combined percussive-rotary drilling to increase rate of penetration and life of drill bit in drilling hard rock formation [J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2017, 53:254-262.
- [7] Aguiar R R, D'Almeida E F V, Ritto T G. Vibro-impact model and validation of the axial dynamics of a vibration assisted drilling tool [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(11):598-614.
- [8] Fernando P K S C, Pei Z J, Zhang M. Mechanistic cutting force model for rotary ultrasonic machining of rocks [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(1/2):109-128.
- [9] 田英健, 邹平, 陈硕, 等. 轴向超声振动辅助钻削机理与试验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5):705-709. (Tian Ying-jian, Zou Ping, Chen Shuo, et al. Cutting mechanism research and experimental study on axial ultrasonic vibration assisted drilling [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(5):705-709.)
- [10] Yang S, Zhang N, Feng X W, et al. Experimental investigation of sandstone under cyclic loading: damage assessment using ultrasonic wave velocities and changes in elastic modulus [J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018:7845143.
- [11] Li S Q, Yan T, Li W, et al. Modeling of vibration response of rock by harmonic impact [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23:90-96.
- [12] Mikhailova N, Onawumi P Y, Volkov G, et al. Ultrasonically assisted drilling in marble [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 460:114880.
- [13] Zhang L, Wang X F, Wang J Y, et al. Mechanical characteristics and pore evolution of red sandstone under ultrasonic high-frequency vibration excitation [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(5):55202.
- [14] Niu Y, Jiao F, Zhao B, et al. Multi-objective optimization of processing parameters in longitudinal-torsion ultrasonic assisted milling of Ti-6Al-4V [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(9/10/11/12):4345-4356.
- [15] Xiang D H, Wu B F, Yao Y L, et al. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex honeycomb-core composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5/6/7/8):1521-1530.
- [16] Lin S Y. Study on the Langevin piezoelectric ceramic ultra-sonic transducer of longitudinal-flexural composite vibrational mode [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(1):109-114.
- [17] Zhou G P, Zhang Y, Zhang B. The complex mode vibration of ultrasonic vibration systems [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1):907-911.
- [18] Qian X H, Shen M H. A new standing wave linear moving ultrasonic motor based on two bending modes [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 101/102:140-143.
- [19] Wang J, Guo J F. Development of a radial-torsional vibration hybrid type ultrasonic motor with a hollow and short cylindrical structure [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2009, 56(5):54-58.
- [20] Ma C X, Shamoto E, Moriwaki T, et al. Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(12/13):1305-1310.
- [21] Paktinat H, Amiri S. Numerical and experimental studies of longitudinal and longitudinal-torsional vibrations in drilling of AISI 1045 [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 94(5/6/7/8):2577-2592.
- [22] Asami T, Miura H. Study of ultrasonic machining by longitudinal-torsional vibration for processing brittle materials-observation of machining marks [J]. *Physics Procedia*, 2015, 70:118-121.
- [23] Nandakumar K, Wiercigroch M. Stability analysis of a state dependent delayed, coupled two DOF model of drillstring vibration [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(10):2575-2592.
- [24] 李子丰, 张永贵, 侯绪田, 等. 钻柱纵向和扭转振动分析 [J]. 工程力学, 2006, 23(4):203-209. (Li Zi-feng, Zhang Yong-gui, Hou Xu-tian, et al. Analysis of longitudinal and torsion vibration of drillstring [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(4):203-209.)
- [25] Christoforou A P, Yigit A S. Fully coupled vibrations of actively controlled drill strings [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(5):1029-1045.
- [26] 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削岩振动破岩仿真分析 [J]. 钻探工程, 2021, 48(4):11-20. (Zhao Yan, Zhang Cong-shan, Gao Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4):11-20.)
- [27] 韩君鹏, 赵大军, 张书磊, 等. 基于离散元的超声波振动辅助TBM滚刀碎岩分析 [J]. 钻探工程, 2021, 48(3):46-55. (Han Jun-peng, Zhao Da-jun, Zhang Shu-lei, et al. Discrete element-based rock breaking analysis of the ultrasonic vibration-assisted TBM disc cutter [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3):46-55.)