

# 冲击诱导损伤岩石的侵入特性

娄磊, 吴万荣, 王送来, 梁向京

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 在硬岩矿山开采中,为了提高大孔径深孔凿岩效率,降低钻具磨损,提出了冲击诱导切削复合凿岩新工艺. 在 Walsh 模型的基础上,建立了冲击诱导孔周围损伤岩石的裂纹模型,推导了岩石损伤区的牙轮钻齿侵入系数方程及侵入阻力方程. 分析了裂纹密度、扰动频率分别对岩石弹性模量、岩石破碎体积和钻齿侵入阻力的影响. 结果表明:随裂纹密度的增大,岩石的有效弹性模量减小;相同侵入载荷下,随着扰动频率的增加,钻齿的侵深和岩石破碎体积不断增加;随着冲击扰动频率的增大,牙轮钻齿侵入阻力逐渐减小.

**关 键 词:** 裂纹密度;侵入系数;侵入阻力;扰动频率

**中图分类号:** O 347      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1501-06

## Intrusive Characters of Damage Rock by Shock Disturbance

LOU Lei, WU Wan-rong, WANG Song-lai, LIANG Xiang-jing  
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.  
Corresponding author: LOU Lei, E-mail: zgloulei@163.com)

**Abstract:** In order to improve the drilling efficiency and reduce tools wear, a new rock fragmentation method of shock disturbance was put forward. Based on the theory of Walsh, a crack model of the damage rock around the induced hole was established, the intrusive coefficient equations and intrusive resistance equations of the cone bit were deduced. The influences of crack density, the disturbance frequency on the elastic modulus, the rock crushing volume and the intrusive resistance were analyzed. Experimental results showed that the effective elastic modulus of rock decreases with the increase of crack density. Under the certain intrusion load, the depth of the penetration and the rock crushing volume increase continually with the increase of the disturbance frequency. The intrusive resistance of the cone bit decrease gradually with the increase of the disturbance frequency.

**Key words:** crack density; intrusion coefficient; intrusive resistance; disturbance frequency

大型露天矿山开采中,使用的钻孔工艺方法主要有顶锤式冲击钻孔、潜孔冲击钻孔和牙轮切削钻孔. 然而在进行大直径深孔作业时,以上3种钻孔方法普遍存在着钻齿磨损严重,效率低下等问题. 为了能进行大孔径深孔高效凿岩作业,Ryu等<sup>[1]</sup>提出了组合式潜孔锤联合钻孔作业的新工艺. 但组合式潜孔锤结构复杂、维修不便,当有一个冲击器损坏时,将严重影响组合式潜孔锤的作业效率. 为此本文提出了冲击诱导切削复合凿岩的新工艺. 冲击诱导围岩在原岩应力、卸载及冲击扰动载荷作用下,其内部应力会重新分布,这将造成诱导围岩内部裂纹的迅速扩展,最终导致其强度弱化<sup>[2]</sup>,从而更有利于钻齿的侵入.

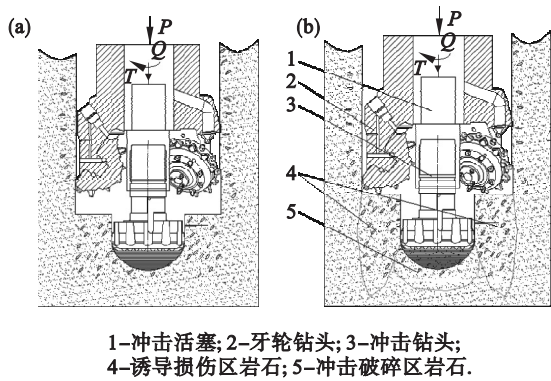
冲击扰动载荷作用下,诱导损伤围岩内部的裂纹会不断扩展变化,为了研究冲击扰动载荷作用下诱导损伤岩石的侵入特性,必须建立冲击诱导损伤区域岩石裂纹模型及钻齿侵入模型. David等<sup>[3]</sup>建立了岩石的裂纹模型,但其并未对冲击扰动条件下裂纹的力学特性进行分析. 李玮等<sup>[4]</sup>分析了钻井底部空隙压力及钻井液循环产生的附加压力对牙轮钻头钻速的影响,但其并未考虑扰动载荷作用下,牙轮钻齿的侵入特性. 目前对扰动破

岩的研究主要是从动静组合加载的角度对岩石的宏观强度<sup>[5]</sup>及能耗机制<sup>[6-7]</sup>展开相关分析,而对冲击扰动下产生诱导裂纹岩石的钻齿侵入特性研究较少,对冲击扰动频率及冲击扰动力对钻齿侵入效率的影响还不清楚.

为此,本文通过构建冲击诱导损伤岩石内部的裂纹模型,分析裂纹在“侵入载荷+冲击扰动载荷”下的力学特性;建立了钻齿在冲击扰动载荷下的侵入阻力方程,研究花岗岩在冲击扰动载荷作用后的钻齿侵入阻力变化规律.

## 1 冲击诱导复合凿岩原理

冲击诱导复合凿岩原理如图 1 所示,其工作过程分为两步:①首先冲击钻头在冲击活塞的作用下冲击钻凿中心孔,诱导中心孔周围的岩石在原岩应力及冲击扰动载荷的作用下产生裂纹,使岩石强度弱化. ②当诱导冲击器工作一定深度后牙轮钻齿开始接触岩石,同时牙轮钻头对冲击诱导孔周边岩石施加旋转切削力,使岩石破碎.  $P$  为施加的轴向压力,  $Q$  为冲击载荷,  $T$  为回转切削力矩.



1-冲击活塞;2-牙轮钻头;3-冲击钻头;

4-诱导损伤区岩石;5-冲击破碎区岩石.

图 1 冲击诱导凿岩原理图

Fig. 1 Principle of drilling by shock induced

(a)—诱导冲击器钻诱导孔;(b)—牙轮钻齿接触岩石.

图 2 为单牙齿侵入诱导冲击孔周围岩石强度

弱化区的受力分析图.  $r_0$  为诱导冲击孔半径,  $r$  为

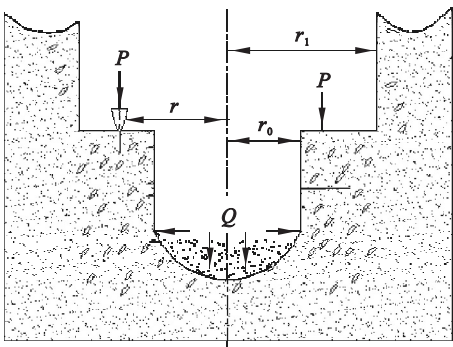


图 2 冲击诱导破岩时载荷分布

Fig. 2 Loads distribution of drilling by shock induced

钻齿侵入半径,  $r_t$  为冲击诱导孔周围岩石强度弱化区半径. 图 3 为单钻齿侵入损伤岩石的受力分析图. 在图 3 中当牙轮钻齿未接触岩石时,  $P$  为零, 当牙轮钻齿接触诱导围岩时, 假设裂纹已经充分发育, 扰动载荷对裂纹扩展无影响, 此时令  $Q$  为零.

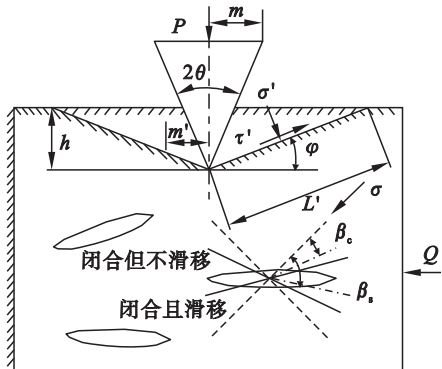


图 3 单钻齿侵入诱导损伤岩石的受力分析

Fig. 3 Force analysis of rock around induced hole during tooth intrusion

## 2 冲击诱导损伤岩石的弹性模量及侵入阻力分析

### 2.1 冲击诱导损伤岩石的弹性模量分析

在图 3 中,  $\sigma'$  为剪切面上的法向应力,  $\tau'$  为剪切面上的切向应力,  $\theta$  为牙齿刃尖角,  $h$  为侵入深度,  $L'$  为剪切破坏面长度,  $\beta_c$  为裂纹闭合临界角,  $\beta_s$  为裂纹滑移临界角,  $\varphi$  为剪切破坏面与孔底平面的夹角. 假设含  $N$  个大小、方向相同且相互独立的裂纹, 裂纹的长轴半径为  $c$ , 由图 3 可知单个裂纹受的压缩合力  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (M \sin \theta)^2} \quad (1)$$

离散元模型中岩石的宏观参数和微观参数关系为<sup>[8]</sup>

$$\frac{El}{k_n} = \Phi \left( \frac{k_t}{k_n}, \gamma \right), \quad (2)$$

$$\frac{\sigma A}{R_n} = \Phi \left( \frac{R_t}{R_n}, E \right). \quad (3)$$

式中:  $E$  为无裂纹岩石的弹性模量;  $\Phi$  为岩石的宏、微观参数关联函数;  $l$  是离散元中的特征长度;  $A$  为特征面积;  $k_n, k_t$  分别为法向刚度和切向刚度;  $R_n, R_t$  分别为颗粒界面的法向强度和切向强度.

设岩石中初始裂纹密度为  $\gamma_0$ , 则裂纹密度  $\gamma$  在侵入载荷  $P$ 、冲击扰动载荷  $Q$  及扰动频率  $f$  作用下的方程为

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta \gamma(P, Q, f). \quad (4)$$

假设  $\sigma_c$  为使裂纹闭合接触的应力, 则可定义裂纹的归一化应力为

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{2\sigma}{E}. \quad (5)$$

当  $\hat{\sigma} < 1$  时所有裂纹在牙齿压力和冲击载荷的作用下处于张开状态, 则此时含裂纹岩石的有效弹性模量为

$$\frac{E}{E_{\text{eff}}} = 1 + \gamma\pi. \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  是裂纹密度;  $E_{\text{eff}}$  是含裂纹岩石的有效弹性模量. 定义含裂纹岩石的归一化弹性模量为  $\hat{E} = E_{\text{eff}}/E$ , 则式(6)可表达为

$$\hat{E} = 1/(1 + \gamma\pi). \quad (7)$$

当  $\hat{\sigma} > 1$  时岩石内部裂纹在牙齿压力和冲击载荷的作用下可分为三种情况:  $\beta < \beta_c$  时, 裂纹张开;  $\beta_c < \beta < \beta_s$  时, 裂纹闭合并发生滑动;  $\beta > \beta_s$  时, 裂纹闭合但不发生滑动. 故冲击加载时, 含裂纹岩石的归一化弹性模量的计算式为

$$1/\hat{E} = 1 + C_o + C_c. \quad (8)$$

式中:  $C_o$  和  $C_c$  分别为张开、闭合裂纹的柔度, 当  $\hat{\sigma} > 1$  时其值分别为

$$C_o = \frac{2}{\pi} \int_0^{\beta_s} 2\gamma\pi \sin^2\beta d\beta = 4\gamma \left[ \frac{\beta}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\beta \right]_0^{\arcsin \sqrt{1/\hat{\sigma}}} = 2\gamma \left( \arcsin \sqrt{1/\hat{\sigma}} - \frac{1}{\hat{\sigma}} \sqrt{\sigma-1} \right), \quad (9)$$

$$C_c = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_c}^{\beta_s} 2\gamma\pi (\sin\beta \cos\beta - \mu \sin^2\beta + \mu \frac{1}{\hat{\sigma}} \sin\beta \cos\beta d\beta = \gamma \left[ \frac{1}{2} \left( \beta - \frac{\sin 4\beta}{4} \right) - \mu \sin^4\beta - \frac{\mu}{\hat{\sigma}} \cos 2\beta \right]_{\beta_c}^{\beta_s}. \quad (10)$$

在冲击加载阶段,  $\sigma$  逐渐达到最大值  $\sigma^{\max}$ . 之后在冲击卸载阶段,  $\sigma$  逐渐由  $\sigma^{\max}$  卸荷至某一载荷  $\sigma'$ ,  $\sigma' = \sigma^{\max} - \Delta\sigma$ ,  $\Delta\sigma$  将使裂纹的剪切力减小  $\Delta\tau$ , 并将使裂纹上下表面间的摩擦阻力减小  $\Delta\tau_f$ . 当满足式(11)时裂纹将发生反向滑移:

$$\Delta\tau + \Delta\tau_f - 2\tau_f^{\max} > 0. \quad (11)$$

故裂纹发生反向滑移的条件为

$$\hat{\sigma} > 1, \beta_c < \beta < \beta_{rs}. \quad (12)$$

式中,  $\beta_{rs}$  为裂纹的反向滑移临界角,

$$\beta_{rs} = \frac{1}{2} \left\{ \arccos \left[ \frac{\mu(\hat{\sigma}^{\max} + \hat{\sigma}) - 4\mu}{\sqrt{(\hat{\sigma}^{\max} - \hat{\sigma})^2 + \mu^2(\hat{\sigma}^{\max} + \hat{\sigma})^2}} \right] + \arctan \left( \frac{\hat{\sigma}^{\max} - \hat{\sigma}}{\mu(\hat{\sigma}^{\max} + \hat{\sigma})} \right) \right\}. \quad (13)$$

故在冲击卸载阶段, 发生反向滑移裂纹的柔度为

$$C_r = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_c}^{\beta_{rs}} 2\gamma\pi (\Delta\tau + \Delta\tau_f - 2\tau_f^{\max}) \sin\beta \cos\beta d\beta = \gamma \left[ \frac{1}{2} \left( \beta - \frac{\sin 4\beta}{4} \right) \left( \frac{\hat{\sigma}^{\max}}{\hat{\sigma}} - 1 \right) - \mu(\hat{\sigma}^{\max} + 1) \sin^4\beta - \frac{2\mu}{\hat{\sigma}} \cos 2\beta \right]_{\beta_c}^{\beta_{rs}}. \quad (14)$$

在冲击卸载阶段含裂纹岩石的归一化弹性模量为

$$1/\hat{E} = 1 + C_o + C_r. \quad (15)$$

## 2.2 冲击扰动载荷作用下钻齿侵入阻力分析

载荷  $P$  和冲击载荷  $Q$  在岩石剪切破坏面上产生的法向应力  $\sigma'$  和剪切应力  $\tau'$  分别为

$$\sigma' = \frac{P \sin \varphi}{2h \sin \theta} \sin(\varphi + \theta) + \frac{Q}{2} (1 - \cos 2\varphi), \quad (16)$$

$$\tau' = \frac{P \sin \varphi}{2h \sin \theta} \cos(\varphi + \theta) + \frac{Q}{2} \sin 2\varphi. \quad (17)$$

根据摩尔-库伦准则可知, 诱导损伤区岩石发生剪切破坏的条件为

$$\tau' - \sigma' \tan \varphi = C' = (1 - \gamma)C. \quad (18)$$

式中:  $C$  为不含裂纹岩石的内聚力;  $C'$  为含裂纹岩石的内聚力;  $\varphi$  为岩石内摩擦角. 将式(16)和(17)代入式(18), 得

$$\tau' - \mu\sigma' = \frac{P}{2h} \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + \theta + \varphi)}{\sin \theta \cos \varphi} + \frac{Q}{2} (\sin 2\varphi + \cos 2\varphi \tan \varphi - \tan \varphi). \quad (19)$$

式中,  $\mu$  为内摩擦系数. 对式(19)求导, 并整理得

$$h = \frac{P}{K}. \quad (20)$$

式中,  $K$  为侵入系数,

$$K = [4C' \sin \theta \cos \varphi - Q \sin 2\theta + 2Q \sin \theta \sin \varphi] / [1 - \sin(\theta + \varphi)]. \quad (21)$$

钻齿参数如图3所示, 设钻齿垂直侵入岩石, 侵入速度为  $v$ , 则作用在钻齿头部微面积上的法向阻力和切向阻力分别为

$$\left. \begin{aligned} dF_n &= 2\pi \frac{m'}{\sin \theta} \sigma_n dm', \\ dF_t &= \mu dF_n. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

钻齿轴向阻力为

$$F = 2\pi \int_0^m m' \sigma_n (1 + \frac{\mu}{\tan \theta}) dm'. \quad (23)$$

孔壁周围裂纹膨胀速度与钻齿侵入速度之间的关系为

$$v_l = v \sin \theta. \quad (24)$$

式中:  $v_l$  为裂纹膨胀速度;  $v$  为侵入速度.

则钻齿侵入阻力为

$$F = \alpha_s + \beta_s v + \eta_s v^2. \quad (25)$$



式中: $\alpha_s, \beta_s, \eta_s$  为钻齿的形状系数; $\alpha_s = \pi r_0^2 K_0 \lambda_s$ ,  $K_0 = 1 + \mu \cot \theta$ ,  $\mu$  为滑动摩擦因数; $\beta_s = \pi r_0^2 K_0 K \sin \theta \lambda_d$ ;  $\eta_s = \pi r_0^2 K_0 \rho_0 \sin^2 \theta \lambda_c$ .

### 3 仿真及试验分析

#### 3.1 仿真分析

采用仿真软件 PFC 对冲击扰动载荷作用下牙轮钻齿侵入岩样的过程进行二维模拟,岩样的尺寸为长×高(16 cm×16 cm),岩样包含颗粒数为 54 582 个,牙轮钻齿按照实际尺寸简化为刚性齿. 仿真模型如图 4 所示,岩样的左侧和下侧固定,岩样右侧施加一定的扰动载荷,作用时间为 1 min,之后使扰动载荷值为零,最后使牙轮钻齿从岩样上方侵入,测量钻齿侵入及岩样破碎情况. 微观仿真参数:颗粒接触模量、摩擦系数、垂直应力、剪切应力、颗粒最小直径及颗粒最大直径分别为 11.2 GPa, 0.6, 5.5 MPa, 7.8 MPa, 0.3 mm, 0.5 mm. 宏观仿真参数:单轴抗压强度、弹性模量、泊松比分别为 140 MPa, 56.7 GPa, 0.2. 仿真过程如下:①钻齿以 0.5 mm/s 的恒定的速度侵

入岩样,测量不同扰动频率(0, 10, 20 Hz)及扰动载荷(10, 20, 30 kN)作用岩样后,钻齿的侵入及岩样的破碎情况. ②钻齿以 0.5 mm/s 的恒定速度侵入岩样,当钻齿接触岩样后,使钻齿侵入岩样 4 cm 深,测量不同扰动频率及扰动载荷作用后,钻齿侵入岩样的阻力变化情况. 以上模拟试验中,当扰动频率变化时,扰动载荷为 10 kN 不变;当扰动载荷变化时,扰动频率为 10 Hz 不变. 仿真及试验结果见图 5 及图 6.

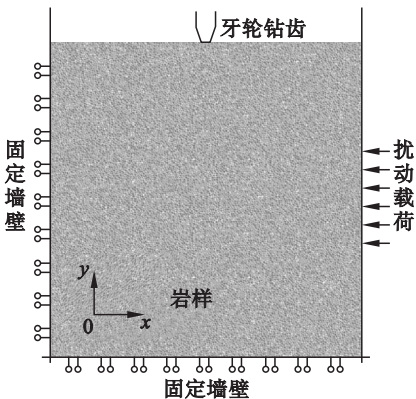


图 4 仿真模型  
Fig. 4 Simulation model

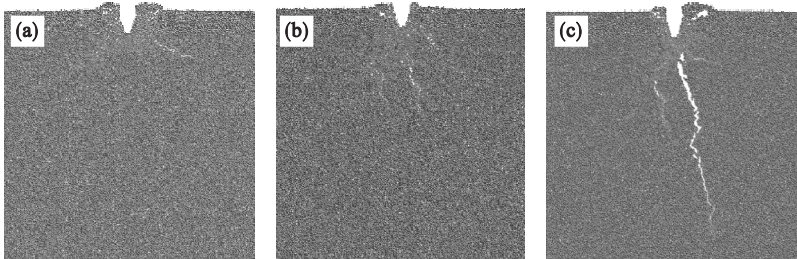


图 5 不同扰动频率时钻齿侵入岩石仿真图  
Fig. 5 Simulation of intrusive rock of cone bit under different disturbance frequency  
(a)— $f=0$  Hz; (b)— $f=10$  Hz; (c)— $f=20$  Hz.

图 5 为扰动载荷为 10 kN 时,不同冲击扰动频率作用后,牙轮钻齿侵入岩石的仿真图. 可知,随着冲击扰动频率的增加,岩样中裂纹在不断扩展,裂纹密度增大,当扰动频率为 20 Hz 时,齿坑破碎体积及主裂纹扩展长度都达到最大. 这说明当复合凿岩中扰动载荷一定时,适当增加复合凿岩中的冲击扰动频率,可以提高牙轮钻齿的侵深.

图 6 为归一化应力对归一化弹性模量与归一化应变的影响,仿真过程中摩擦系数  $\mu$  为 0.6. 由图 6a 可知,随着裂纹密度的增加,岩石的有效弹性模量逐渐减小,即使由于加载而使裂纹完全闭合时,其弹性模量也只有无裂纹岩石弹性模量的 70%~90%. 在相同裂纹密度条件下,卸载状态下的弹性模量要略高于加载状态下的弹性模量. 由

图 6b 可知,在相同应力条件下,随裂纹密度的增加,含裂纹岩石的应变增加,卸载状态下的应变略高于加载状态下的应变.

#### 3.2 试验分析

试验原理及试验设备分别如图 7、图 8 所示. 冲击扰动载荷  $Q$  由冲击扰动油缸产生,钻齿上的轴向载荷  $P$  由刀具加载油缸产生,加压支撑油缸对岩样的另外电两侧加压起支撑作用,通过压力传感器测各油缸的油压数据可以计算得出相应的载荷值.

试验岩石为花岗岩,其物理力学参数:体积质量为  $2\,640\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,抗压强度为 135.8 MPa,弹性模量为  $6.2 \times 10^4$  MPa,试样尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 54\text{ mm}$ . 试验前,用砂轮机将岩石表面打平磨光,然后用加压支撑油缸及扰动油缸将岩样

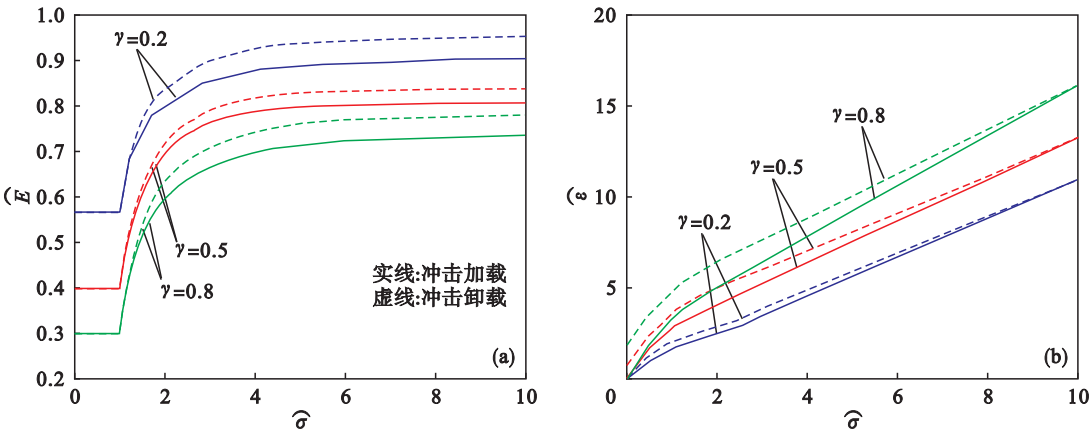


图 6 归一化应力对归一化弹性模量与归一化应变的影响  
Fig. 6 Effect of normalized stress on normalized effective Young's modulus and normalized stress

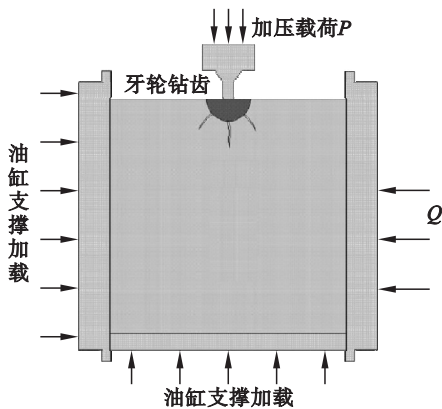


图 7 试验原理图  
Fig. 7 Experimental principle

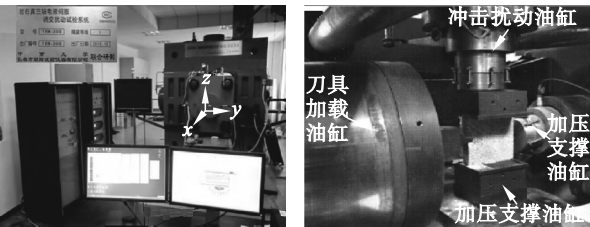


图 8 试验系统图  
Fig. 8 Experimental system

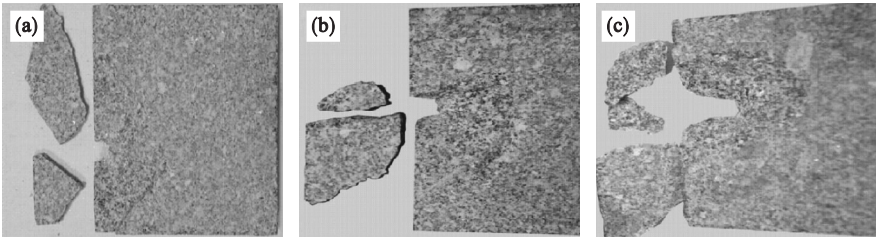


图 9 不同扰动频率下钻齿侵入试验结果  
Fig. 9 Experimental results of intrusive rock of cone bit under different disturbance frequency  
(a)  $f=0$  Hz; (b)  $f=10$  Hz; (c)  $f=20$  Hz.

由图 9 可知,随着冲击扰动频率的增加,牙轮钻齿的侵深在增加,岩石的破碎体积及破碎范围也在增加.这说明随冲击扰动频率的增加,岩样中裂纹在不断扩展,裂纹密度增大,造成岩样弹性模

量不断减小,从而更容易使钻齿侵入或在同样的侵入力下使岩样的破碎体积更大.这也在一定程

度上验证了本文所建立的含裂纹岩石在冲击扰动载荷作用下的弹性模量方程.

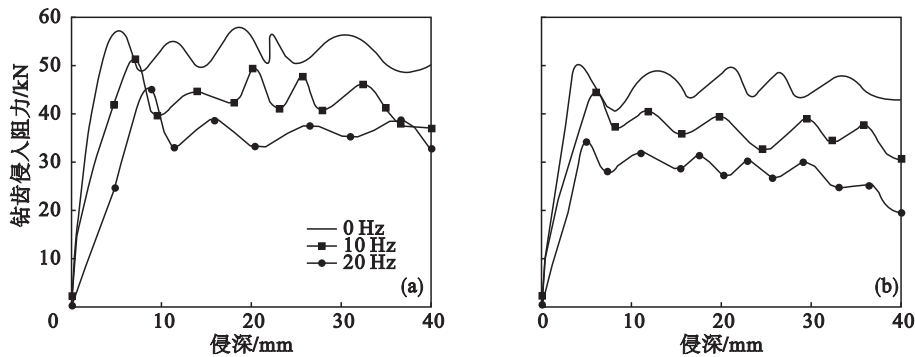


图 10 不同扰动频率下牙轮钻齿侵入阻力仿真和试验曲线

Fig. 10 Comparison of simulation and experimental results of intrusive resistance under different disturbance frequency  
(a)—仿真曲线; (b)—试验曲线.

由图 10a 可知,当扰动频率分别为 0, 10, 20 Hz 时,钻齿侵入平均阻力分别为 55, 42, 35 kN. 由图 10b 可知,当扰动频率分别为 0, 10, 20 Hz 时,钻齿侵入平均阻力分别为 45, 38, 30 kN. 对比可知,随着冲击扰动频率的增加,牙轮钻齿的侵入阻力明显减少,这说明随冲击扰动频率的增加,岩样中裂纹在不断扩展,裂纹密度增大,从而更容易使钻齿侵入.另外在相同扰动频率下,仿真数值较试验数值大,其误差在 16% 左右,这是由于仿真时采用的是均匀颗粒模型,而实际岩样中有天然的缺陷跟裂缝,从而导致试验值比仿真数值小.

## 4 结 论

- 1) 提出了冲击诱导切削复合凿岩的新工艺,建立了冲击诱导损伤围岩的裂纹模型,分析了冲击载荷加卸载条件下,诱导损伤岩石的有效弹性模量,结果表明随着岩石裂纹密度的增加,岩石的有效弹性模量逐渐减小.
- 2) 建立了冲击诱导损伤岩石的钻齿侵入阻力方程,结果表明侵入载荷一定时,随冲击扰动频率的增加,岩样的破碎体积增加,钻齿的侵入阻力显著减小.
- 3) 从理论和试验两方面验证了冲击诱导切削复合凿岩这一新工艺的可行性,结果表明,冲击诱导频率的增加将显著提高牙轮钻齿的凿岩效率.

## 参考文献:

[1] Ryu S H, Cho J W, Park J Y, et al. Optimum operating conditions of a multi-hammer drilling machine assessed using a linear percussion test[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(7): 1415 – 1422.  
[2] 李夕兵,姚金蕊,杜坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连

续开采初探——以开阳磷矿为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1101 – 1111.  
(Li Xi-bing, Yao Jin-rui, Du Kun. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine—a case study of Kaiyang phosphate mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1101 – 1111. )  
[3] David E C, Brantut N, Schubnel A, et al. Sliding crack model for nonlinearity and hysteresis in the uniaxial stress-strain curve of rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 9 – 17.  
[4] 李玮,许兴华,闫铁,等. 欠平衡下牙轮钻头牙齿侵入系数及钻速研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(3): 168 – 173.  
(Li Wei, Xu Xing-hua, Yan Tie, et al. Study on the tooth invasion coefficient of cone bit and penetration rate in under-balance drilling [J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science and Technology Edition)*, 2013, 35(3): 168 – 173. )  
[5] Yin Z Q, Li X B, Jin J F, et al. Failure characteristics of high stress rock induced by impact disturbance under confining pressure unloading [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22: 175 – 184.  
[6] 曹文卓,李夕兵,周子龙,等. 高应力硬岩开挖扰动的能量耗散规律[J]. *中南大学学报*, 2014, 45(8): 2759 – 2767.  
(Cao Wen-zhuo, Li Xi-bing, Zhou Zi-long, et al. Energy dissipation of high-stress hard rock with excavation disturbance[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 45(8): 2759 – 2767. )  
[7] 邹洋,李夕兵,周子龙,等. 开挖扰动下高应力岩体的能量演化与应力重分布规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1677 – 1684.  
(Zou Yang, Li Xi-bing, Zhou Zi-long, et al. Energy evolution and stress redistribution of high-stress rock mass under excavation distribution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1677 – 1684. )  
[8] Rojek J. Discrete element simulation of rock cutting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48: 996 – 1010.