

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1555-06

爆破开挖对岩体含水裂纹扩展的扰动机制

陈 明^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 严 鹏^{1,2}, 胡英国^{1,2}, 周创兵^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 岩体裂纹的水力劈裂是岩体开裂渗漏甚至施工涌水的重要影响因素之一, 也是岩土工程界的研究热点。从断裂力学角度分析了爆破开挖对岩体含水裂纹扩展的扰动作用, 结果表明, 爆破开挖扰动下, 岩体含水裂纹的扩展, 与爆炸应力波强度及其入射角、地应力的方向与大小、孔隙水压大小、裂纹的倾角及断裂韧度等因素相关; 爆炸应力波的作用, 相当于增大了岩体裂纹中的孔隙水压力, 每 1 cm/s 的峰值振动速度相当于增大 100 kPa 的孔隙水压力, 爆破振动速度越大, 所产生的爆破扰动荷载越大; 岩体开挖引起的岩体裂纹近区地应力及其孔隙水压力的变化, 对裂纹的失稳与扩展具有较复杂的影响, 可改变裂纹的失稳扩展模式。

关 键 词: 爆破开挖; 岩体; 裂纹扩展; 扰动

中图分类号: O 383.1; TV 554

文献标识码: A

Disturbance mechanism of blasting excavation to aquiferous rock crack propagation

CHEN Ming^{1,2}, LU Wen-bo^{1,2}, YAN Peng^{1,2}, HU Ying-guo^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The hydraulic fracturing of rock mass cracking is one of the important influencing factors that causes rock mass cracking and leakage and even construction water gushing, which is also the research hotspot in geotechnical engineering field. The disturbance effect on crack propagation of aquiferous rock cracking by blasting excavation is analyzed based on fracture mechanics; and the results show that, under disturbance of blasting excavation, the cracking propagation of aquiferous rock relates to the strength and incident angle of blasting stress wave, the value and direction of ground stress, the value of pore water pressure, the crack dip, and the fracture toughness, etc. The effect of blasting stress wave equals to increasing the pore water pressure inside rock mass cracks, which means per 1 cm/s peak particle vibration velocity equals to increasing 0.1 MPa pore water pressure; and the larger the blasting vibration velocity is, the greater the blasting disturbance load will be. The change of ground stress and pore water pressure caused by rock mass excavation around rock mass cracks have complex influence on instability and propagation of cracks, which may change the instability and propagation model of cracks.

Key words: blasting excavation; rock mass; crack propagation; disturbance

1 引 言

含水裂纹的扩展及贯通是地下水改造岩体结构的一种重要方式, 在裂隙水作用下岩体中的含水裂隙扩展, 连通率增大, 使岩体原有的结构发生改变, 岩体渗透性增大。深埋洞室施工时的洞室围岩涌水现象就是含水裂纹水力劈裂的典型例子。在我国的水利水电、交通、矿山等工程建设中, 爆破仍是最主要的岩体开挖手段, 爆破开挖过程中所产生

的爆炸应力波、因开挖而引起的岩体应力变化, 都将不可避免地影响岩体含水裂纹的扩展。

国内外关于岩体含水裂纹的扩展成因及破坏机制已有较为广泛的研究^[1-11]。黄润秋等^[5]探讨了高压水作用下裂隙开度的变化, 提出了裂隙张开度变化的计算公式。李宗利等^[6]、汪魁等^[7]推导了拉剪和压剪两种复合破坏模式的临界水压计算公式, 分析了裂纹围岩侧压力系数对裂纹临界水压的影响。赵延林等^[8]通过压剪裂纹的损伤断裂力学模型分析

收稿日期: 2013-03-06

基金项目: 973 计划基础研究项目 (No.2011CB013501); 国家自然科学基金面上项目 (No.51279146, No.51079111); 新世纪优秀人才支持计划资助 (No.NCET-2012-0425)。

第一作者简介: 陈明, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石动力学与工程爆破方向的研究工作。E-mail: whuchm@yahoo.com.cn

了分支裂纹的扩展贯通原理。盛金昌等^[9]分析了高水头作用下的压剪断裂力学机制。卞康等^[10]针对不同类型裂纹的开展机制,推导了水工隧洞围岩拉剪型和压剪型裂纹扩展时的临界内水压力表达式。魏来等^[11]分析了岩质边坡结构面的水力劈裂效应,推导出结构面水力劈裂的临界水头公式。包太等^[12]针对裂隙岩体在卸荷后的渗透系数与应力强度因子关系进行了理论研究。Bohlooli 等^[13]研究了各种围岩应力条件下岩体裂纹开裂与扩展的机制。Galybin 等^[14]对裂纹开裂机制和开裂过程研究认为,应力波动可能引起局部形成局部应力平衡场,裂纹偏离原来开裂路径以适应局部产生的较大张力。

可见,对于岩体含水裂纹的扩展及失稳研究,目前主要集中在岩体裂纹处于静荷载作用下的研究,而爆破作为岩体的开挖手段,其所产生的爆破应力波、围岩应力变化等对岩体裂纹扩展的扰动机制鲜有研究,因此,本文基于断裂力学理论,研究爆破开挖对岩体含水裂纹扩展的扰动机制,分析爆炸应力波、因爆破开挖而引起的岩体应力变化对含水裂纹扩展的影响。

2 开挖扰动下岩体含水裂纹扩展的力学模型及影响因素

2.1 含水裂纹扩展的断裂力学模型

通常,岩体内部裂纹的构造和分布极为复杂,且呈空间分布,因此,在三维空间下难以全面研究爆破开挖扰动下岩体含水裂纹扩展。在考虑岩体的裂纹构造及分布特征条件下,研究中把爆破开挖扰动下的三维裂纹简化成如图 1 所示的平面问题来对待。以图 1 所示的平面穿透闭合单裂纹为研究对象,探求爆破开挖对岩体含水裂纹扩展的扰动机制。

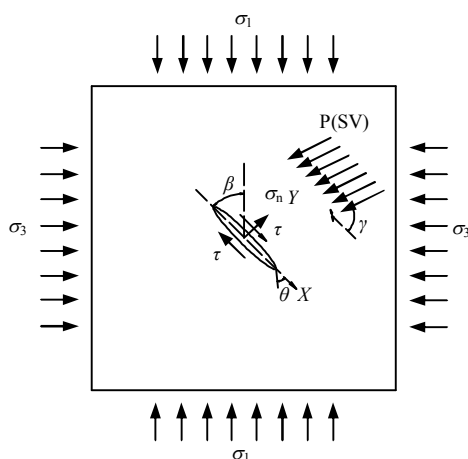


图 1 含单裂纹岩体计算模型

Fig.1 Calculating model containing a fracture

在图 1 所示平面中,假定岩体中存在一条近似椭圆形的含水裂纹,其长为 $2a$,图 1 所示的闭合裂纹受近区地应力 σ_1 和 σ_3 作用,裂纹与地应力 σ_1 方向夹角为 β ,裂纹中有孔隙水压力 p 的作用,裂纹同时受到爆炸应力波 P 波(或 SV 波)的作用。当不考虑爆破开挖过程中爆炸应力波的作用时,裂纹面上的静态应力状态可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= -\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta - P \right) \\ \tau &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

断裂力学中规定拉为正压为负,与岩石力学中的规定相反,所以对式(1)取反值。由岩体断裂力学特征可知,岩体的断裂破坏形式主要为 I-II 复合型,裂纹法向应力 σ_n 可能为拉应力也可能为压应力。裂纹面上的应力 σ_n 为拉应力时,裂纹断裂破坏形式为 I-II 拉剪复合型,反之为 I-II 压剪复合型。

在线弹性范围内,多个载荷作用下,当每个荷载所导致的裂纹扩展模式相同时,裂纹尖端处的总应力强度因子等于各个单个载荷作用下的应力强度因子的代数和^[15]。爆破开挖扰动下岩体裂纹的失稳扩展,实际上是静力与动力荷载共同作用的结果,因此,在研究爆破扰动下岩体裂纹的扩展时,I-II 复合型的裂纹应力强度因子为动态和静态应力强度因子之和,可表示为

$$K_e = K_{e\text{静}} + K_{e\text{动}} \quad (2)$$

式中: K_e 为应力强度因子; $K_{e\text{静}}$ 为静态应力强度因子; $K_{e\text{动}}$ 为动态应力强度因子。

对于 I-II 拉剪复合型裂纹,工程上常用的近似断裂准则可较好的解决问题^[15],因此,采用工程断裂准则分析 I-II 拉剪复合型裂纹的扩展,其失稳扩展准则可表示为

$$K_{Ic} = K_I + K_{II} + K'_I + K'_{II} \quad (3)$$

式中: K_{Ic} 为 I 型断裂韧性; K_I 、 K_{II} 分别为地应力、孔隙水压力等静荷载导致的 I 型和 II 型静态应力强度因子; K'_I 、 K'_{II} 分别为爆炸应力波导致的 I 型和 II 型动态应力强度因子。

当裂纹法向应力 σ_n 为压应力时,裂纹在压应力作用下将闭合,裂纹扩展破坏形式为 I-II 压剪复合型,此时可基于最大周向应力理论求解^[7, 15]。如图 1 所示,在以裂纹尖端为坐标原点的极坐标系中 (r, θ) 处的周向应力 σ_θ 可表示为

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [3(K_{II} + K'_{II}) \sin \theta - (K_I + K'_I)(1 + \cos \theta)] \quad (4)$$

裂纹扩展是沿着最大周向应力 $\sigma_{\theta_{\max}}$ 的截面进行的, 所以该截面与原裂纹线的夹角 θ_0 即为起裂角。从而可得裂纹起裂的相当应力强度因子为

$$K_e = \sigma_{\theta}(r, \theta_0) \sqrt{2\pi r} \quad (5)$$

当不考虑裂纹厚度与裂纹尖端曲率半径的影响时^[16], 压剪复合型裂纹的起裂角为一定值, 即 $\theta = \arctan 2\sqrt{2}$, 联立式 (4)、(5), 并且令 $K_I = K_{II}' = 0$, 可得压剪复合应力状态下支裂纹起裂时的相当应力强度因子为

$$K_{IIc} = \frac{2}{\sqrt{3}}(K_{II} + K_{II}') \quad (6)$$

2.2 影响因素分析

由图 1 可知, 爆破开挖扰动下, 岩体内含水裂纹的扩展, 与爆炸应力波强度及其入射角、地应力的值、孔隙水压大小、裂纹的倾角及断裂韧度等因素相关, 这些因素共同决定岩体裂纹的扩展模式。

2.1.1 爆炸应力波的影响

爆破开挖过程中, 岩体中传播的爆炸应力波主要有 P 波和 SV 波, 如图 1 所示。根据文献[17]的结果, 无论 P 波还是 SV 波入射到裂纹面, 都将在裂纹尖端产生 I 型和 II 型动态应力强度因子, 由于岩体含水裂纹的扩展主要为压剪或拉剪复合型, 同等强度下, SV 波产生的 II 型动态应力强度因子较大, 因此, 本文主要研究 SV 波入射时的影响。研究过程中, 因水中只能传播纵波, 由岩体透射到水中的总能量比相对较小, 忽略裂纹中水对应力波传播的影响。令

$$\alpha = \omega / c_s \quad (7)$$

式中: ω 为波的圆频率; c_s 为 SV 波波速; α 为波数, 具有 (1/长度) 的量纲。若 $\varphi^{(i)}(x, y, t)$ 和 $\psi^{(i)}(x, y, t)$ 分别代表入射波场, 入射波 SV 波用式可表示为

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{(i)}(x, y, t) &= 0 \\ \psi^{(i)}(x, y, t) &= \psi_0 \exp\{-i[\alpha(x \cos \gamma + y \sin \gamma) + \omega t]\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ψ_0 为一常数, 具有 (1/长度²) 的量纲, γ 为 SV 波入射方向与 x 轴的夹角。

由式 (8) 可得到入射波的峰值振动速度 v 为

$$v = \alpha \omega \psi_0 / c_s \quad (9)$$

SV 波在裂纹尖端产生的动态应力强度因子 K_I' 和 K_{II}' 可按式计算^[17]:

$$\left. \begin{aligned} K_I'(t) &= \tau_1 \sqrt{\pi a} |K_I^{(2)}| \exp[-i\omega(t - \delta_2^{(1)})] \\ K_{II}'(t) &= \tau_1 \sqrt{\pi a} |K_{II}^{(2)}| \exp[-i\omega(t - \delta_2^{(2)})] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中,

$$\tau_1 = \mu \alpha^2 \psi_0 \quad (11)$$

式中: μ 为拉梅常数; $|K_I^{(2)}|$ 、 $|K_{II}^{(2)}|$ 为量纲为 1 的动态应力强度因子 (动态应力强度因子除以它们在 $\omega = 0$ 时相应的静态值)^[17]; $\delta_2^{(1)}$ 、 $\delta_2^{(2)}$ 为相角。

由式 (10) 可知, 爆炸应力波在裂纹尖端所产生的动力应力强度因子实际上是个随时间变化的应力强度因子。

2.2.2 围岩应力重分布及水压变化的影响

由于爆破开挖作用, 邻近裂纹区的边界条件将被改变, 此时, 岩体裂纹近区的应力场重分布, 即 σ_1 和 σ_3 的值将变化, 此时, 由式 (1) 可知, 裂纹面上的应力状态可能变化, 从而导致裂纹的静态应力强度因子变化, 甚至导致裂纹的扩展模式变化。

由于岩体开挖的影响, 部分裂隙可能扩展贯通, 形成过水通道, 此时, 一般情况下, 水压力 P 将在一定程度上减小, 但当含低压孔隙水的裂纹与含高压孔隙水的裂纹贯通时, 则可能出现低压孔隙水裂纹中的水压力增大的现象, 从而因孔隙水压的变化, 影响裂纹面的应力状态及裂纹的扩展模式。

3 爆破开挖对拉剪裂纹扩展的扰动

当裂纹面上的法向应力 σ_n 为拉应力时, 裂纹失稳扩展属于拉剪复合问题, 此时静态应力强度因子 K_I 、 K_{II} 分别按下式计算:

$$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (12)$$

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

动态应力强度因子 K_I' 和 K_{II}' 也可按式 (10) 计算, 为分析动态应力强度因子对裂纹扩展的最大影响, 取 K_I' 和 K_{II}' 的最大值项, 忽略其随时间的变化及相位角的影响, 然后将式 (1)、(10)、(12)、(13) 中相应项代入式 (3), 可得拉剪复合应力状态下裂纹起裂时的相当应力强度因子 K_e , 此时 $K_e = K_{IIc}$, 故裂纹的应力强度因子可表示为

$$K_{IIc} = -((\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta - P) + \frac{|(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta|}{2} + \tau_1(|K_I^{(2)}| + |K_{II}^{(2)}|)) \sqrt{\pi a} \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 爆破开挖扰动下含水裂纹的扩展实际上是爆炸应力波、孔隙水压力及地应力共同作用的结果, 并与裂纹的方向及断裂韧度相关, 其中爆炸应力波、孔隙水压力是主要的外部扰动荷载。根据 $|K_I^{(2)}|$ 、 $|K_{II}^{(2)}|$ 动态应力强度因子的变化规律^[17], 当入射波的强度保持不变、入射波与裂纹长

轴线夹角约为 60° 时, 爆炸应力波对裂纹扩展的扰动作用最大, 即 $|K_I^{(2)}|$ 与 $|K_{II}^{(2)}|$ 的和值可取得最大值。

令 $m = \sigma_3 / \sigma_1$, m 反映了裂纹近区围岩侧压力的大小, 同时定义拉剪复合断裂时广义临界扰动荷载为 p' , 可由下式确定:

$$p' = \frac{p + \left(|K_I^{(2)}| + |K_{II}^{(2)}| \right) \tau_1 - \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}}}{\sigma_1} \quad (15)$$

由式 (15) 也可知, 对于含水裂纹, 爆炸应力波的作用实际上相当于增大了裂纹中的孔隙水压力, 进一步导致裂纹的失稳与扩展。

则由式 (14) 和 (15) 可得

$$p' = \frac{1+m}{2} - \frac{1-m}{2} \cos 2\beta - \frac{|(1-m) \sin 2\beta|}{2} \quad (16)$$

从式 (15)、(16) 可知, 侧压力系数及裂纹倾角直接影响到岩体的广义临界扰动荷载, 并可得到广义临界扰动荷载与裂纹倾角及侧压力系数的关系如图 2 所示。

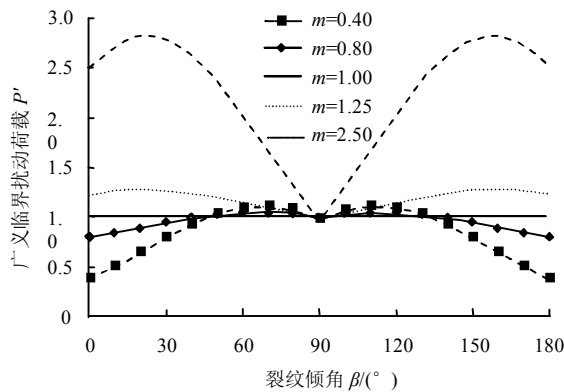


图2 拉剪复合型裂纹的广义临界扰动荷载变化规律

Fig.2 Generalized critical disturbance load's variation of tension-shear mixed cracking

爆破开挖所导致的围岩应力的变化, 可体现为侧压力系数 m 的变化以及围岩应力 σ_1 峰值的变化。从图 2 可知, 广义临界扰动荷载随裂纹倾角以 90° 为界, 呈对称变化。在 $\beta \in [0^\circ, 45^\circ]$, 角度一定时, 广义临界扰动荷载随着侧压力系数的增加而增大, 且 $\beta = 0^\circ$ 有最小广义临界扰动荷载, 即在裂纹倾角为 0° 时, 裂纹最易失稳扩展。 $\beta \in [45^\circ, 90^\circ]$, $m < 1$ 时, 侧压力系数越小, 广义临界扰动荷载越大; $m > 1$ 时, 侧压力系数越大, 广义临界水压越大。可见, 围岩应力的变化, 对裂纹的失稳与扩展具有较复杂的影响。

引用文献[5]中大理岩的相关参数, 弹性模量 E 为 30 GPa, 泊松比 ν 为 0.25。岩体密度取 2.65 g/cm^3 , 裂纹面的内摩擦系数为 0.58, 凝聚力为 0。设入射

的爆炸应力波的圆频率 ω 分别为 300、600、900、1 200 Hz, 由式 (9)、(11), 在 60° 入射角下, 查文献[17]中图表确定 $|K_I^{(2)}|$ 与 $|K_{II}^{(2)}|$ 的取值, 可以得到不同爆炸应力波产生的扰动荷载 $\left(|K_I^{(2)}| + |K_{II}^{(2)}| \right) \tau_1$ 随爆破振动速度的变化规律如图 3 所示。

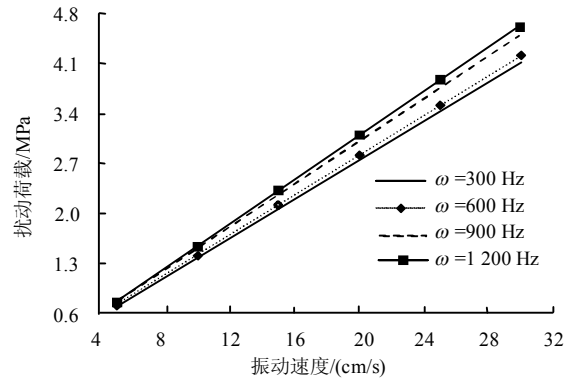


图3 不同爆破振动速度时的扰动荷载

Fig.3 Disturbance load under different blasting vibration velocities in tension-shear mixed cracking

由图 3 可知, 振动速度大, 所产生的扰动荷载越大, 并有线形关系, 对于通常的 $5 \sim 30 \text{ cm/s}$ 的振动速度, 相当于可以增大孔隙水压力约 $0.7 \sim 4.5 \text{ MPa}$, 每 1 cm/s 的振动速度相当于增大 100 kPa 的孔隙水压力, 爆破振动的附加扰动荷载可进一步促使裂纹发生水力劈裂; 扰动荷载受圆频率的影响相对较小。

4 爆破开挖对压剪裂纹扩展的扰动

当裂纹面上的法向应力 σ_n 为压应力时, 裂纹扩展失稳属于压剪复合问题。在 σ_n 的作用下, 裂纹面闭合, 在剪切力的作用下迫使裂纹面扩展, 同时 σ_n 会对裂纹的摩擦面有一个摩擦力的作用, 抵抗摩擦面的滑动, 有效剪应力可表示为

$$\tau' = \begin{cases} 0 & \text{当 } |\tau| < f\sigma_n + c \text{ 时} \\ |\tau| - (f\sigma_n + c) & \text{当 } |\tau| \geq f\sigma_n + c \text{ 时} \end{cases} \quad (17)$$

式中: τ' 为有效剪应力; f 为摩擦力系数; c 为裂纹面的凝聚力。

此时静态应力强度因子可按式计算:

$$K_{II} = \tau' \sqrt{\pi a} \quad (18)$$

取动态应力强度因子 K_{II}' 最大值项, 忽略其随时间及相位的变化, 然后将式 (10)、(17)、(18) 中相应项代入式 (6), 可得压剪复合应力状态下裂纹起裂时的相当应力强度因子 K_e , 此时 $K_e = K_{IIC}$, 故裂纹的应力强度因子可表示为

$$K_{IIc} = \frac{2\sqrt{\pi a}}{\sqrt{3}} \left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2} \sin 2\beta - \left(f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta - P \right) + c \right) + \tau_1 \left| K_{II}^{(2)} \right| \right) \quad (19)$$

根据 $|K_{II}^{(2)}|$ 动态应力强度因子的变化规律^[17], 当入射波的强度保持不变、入射波与裂纹长轴线夹角约为 90° 时, 爆炸应力波对裂纹扩展的扰动作用最大, 即 $|K_{II}^{(2)}|$ 可达到最大值。

定义广义压剪复合断裂时临界扰动荷载为 p'' , p'' 由下式确定:

$$p'' = \frac{p + \frac{\tau_1 |K_{II}^{(2)}|}{f} - \left(\frac{\sqrt{3} k_{IIc}}{2f\sqrt{\pi a}} + \frac{c}{f} \right)}{\sigma_1} \quad (20)$$

由式 (19) 中的 $\tau_1 |K_{II}^{(2)}|/f$ 也可知, 对于含水裂纹, 爆炸应力波的作用实际上也是相当于增大了孔隙中的孔隙水压力, 进一步导致裂纹的失稳与扩展。

根据式 (19)、(20) 可得广义扰动荷载与侧压力系数、裂纹倾角间的关系为

$$p'' = \frac{1+m}{2} - \frac{1-m}{2} \cos 2\beta - \frac{|(1-m) \sin 2\beta|}{2f} \quad (21)$$

分析侧压力系数 m 和裂纹倾角对广义扰动荷载的影响, 可得图 4 所示变化规律。

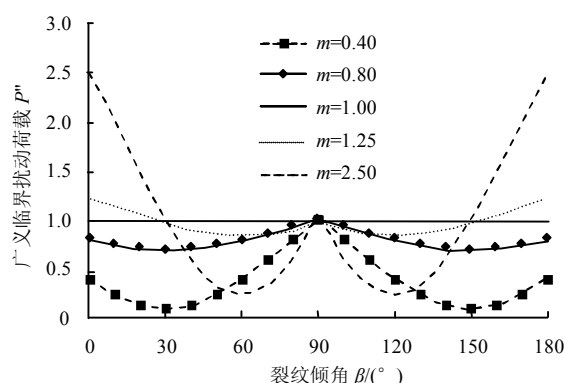


图 4 压剪复合型裂纹的广义临界扰动荷载变化规律

Fig.4 Generalized critical disturbance load's variation of compression-shear mixed cracking

从图可知, 广义临界扰动荷载随裂纹倾角以 90° 为界, 呈对称变化。在 $\beta \in [0^\circ, 90^\circ]$, 侧压力系数相同时, 广义扰动荷载均随着裂纹倾角的增大先减小后增大。在相同的裂纹倾角条件下, 侧压力系数与广义扰动荷载的关系相对较为复杂, 需要根据具体条件进行分析。可见, 围岩应力的变化, 对裂纹的失稳与扩展具有较复杂的影响。

在爆炸应力波与裂纹成 90° 入射角条件下, 按

照上一节的参数及计算方法, 可以得到不同爆破振动产生的扰动荷载大小 $\tau_1 |K_{II}^{(2)}|/f$ 随振动速度的变化规律如图 5 所示。

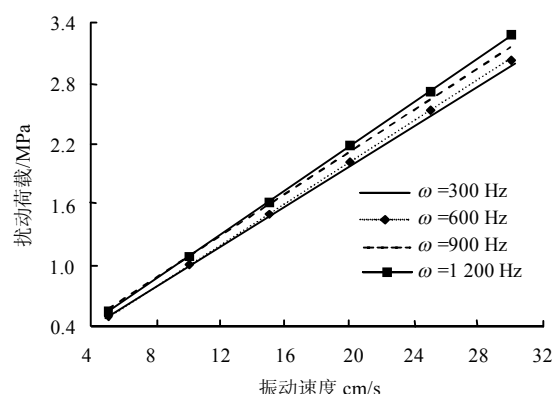


图 5 不同爆破振动速度时的扰动荷载

Fig.5 Disturbance load under different blasting vibration velocities in compression-shear mixed cracking

由图可知, 振动速度越大, 爆炸应力波所产生的爆破扰动荷载越大, 并有线性关系, 对于通常的 $5 \sim 30$ cm/s 的振动速度, 相当于可以增大孔隙水压力约 $0.5 \sim 3.0$ MPa, 可进一步促使裂纹发生水力劈裂; 爆破扰动荷载受圆频率的影响相对较小。

5 结 论

(1) 爆破开挖扰动下, 岩体含水裂纹的扩展与爆炸应力波强度及其入射角、地应力的地大小、孔隙水压大小、裂纹的倾角及断裂韧度等因素相关, 这些因素共同决定岩体裂纹的失稳与扩展。

(2) 爆炸应力波的作用, 相当于增大了裂纹中的孔隙水压力, 爆破振动速度越大, 所产生的爆破扰动荷载越大, 并有线性关系, 扰动荷载受应力波圆频率的影响相对较小。

(3) 由于爆破开挖作用, 邻近裂纹区的边界条件将被改变, 岩体裂纹近区的应力场重分布, 导致裂纹的侧压力系数变化, 裂隙中的孔隙水压力也将变化, 可能改变裂纹的失稳扩展模式。围岩裂纹近区地应力的变化, 对裂纹的失稳与扩展具有较复杂的影响。

参 考 文 献

- [1] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64—67.
ZHU Zhen-de, HU Ding. The effect of interstitial water pressure on rock mass strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 64—67.
- [2] ITO T, EVANS K, KAWAI K, et al. Hydraulic fracture

- reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1999, 36: 811—826.
- [3] PAPANASTASIOU P. An efficient algorithm for propagating fluid-driven fracture[J]. **Computational Mechanics**, 1999, 24(4): 258—267.
- [4] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060—1066.
- LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun'an, et al. Coupling analysis hydraulic fracturing process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1060—1066.
- [5] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573—576.
- HUANG Run-qiu, WANG Xian-neng, CHEN Long-seng. Hydro-splitting off analysis on underground water in deep-lying tunnel and its effect on water gushing out[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 573—576.
- [6] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1216—1220.
- LI Zong-Li, ZHANG Hong-chao, REN Qing-wen, et al. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1216—1220.
- [7] 汪魁, 赵明阶. 岩石压剪裂纹水力劈裂分析及裂纹面方向计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 441—444.
- WANG Kui, ZHAO Ming-jie. Analysis on tension-shear complex fracture under rock stress and the calculation of fracture direction[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)**, 2010, 29(3): 441—444.
- [8] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹损伤断裂机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(4): 838—844.
- ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WEN You-dao, et al. Damage fracture failure mechanism of compressive-shear rock cracks under seepage pressure[J]. **J. Cent. South Univ. (Science and Technology)**, 2008, 39(4): 838—844.
- [9] 盛金昌, 赵坚, 速宝玉. 高水头作用下水压隧洞的水力劈裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1226—1229.
- SHENG Jin-chang, ZHAO Jian, SU Bao-yu. Analysis of hydraulic fracturing in hydraulic tunnels under high water pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1226—1229.
- [10] 卞康, 肖明, 胡田清. 水工隧洞围岩裂纹扩展的临界水压解析解[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2429—2436.
- BIAN Kang, XIAO Ming, HU Tian-qing. Analytical solutions of critical water pressure when cracks propagating in surrounding rock of hydraulic tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2429—2436.
- [11] 魏来, 唐红梅. 岩质边坡结构面的水力劈裂效应分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学), 2012, 31(5): 986—989.
- WEI Lai, TANG Hong-mei. Analysis of hydraulic fracturing effect of structure plane on rock slope[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)**, 2012, 31(5): 986—989.
- [12] 包太, 张涛, 巨伟军. 饱和裂隙岩体的卸荷损伤研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 105—107.
- BAO Tai, ZHANG Tao, JU Wei-jun. Study on the failure of saturated fracture rocks during unloading[J]. **Journal of Guizhou University(Natural Sciences)**, 2009, 26(1): 105—107.
- [13] BOHLOLI B, DE PATER C J. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2006, 53(1—2): 1—12.
- [14] GALYBIN A N, DYSKIN A V. Random trajectories of crack growth caused by spatial stress fluctuations[J]. **International Journal of Fracture**, 2004, 128(1): 95—103.
- [15] 高庆. 工程断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1985.
- [16] 李银平, 杨春和. 裂纹几何特征对压剪复合断裂的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 462—466.
- LI Yin-ping, YANG Chun-he. Influence of geometric characteristics of pre-existing cracks on mixed mode fractures under compression-shear loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 462—466.
- [17] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.