

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704061



# 渗透压下岩石翼形裂纹应力 强度因子及断裂判据

贺泽<sup>1</sup>, 俞缙<sup>1</sup>, 张建智<sup>2</sup>, 蔡燕燕<sup>1</sup>, 涂兵雄<sup>1</sup>, 李升才<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为研究渗透压下岩石翼形裂纹面部分闭合情况下的破坏行为, 建立多裂纹间相互作用下压剪翼形裂纹的力学模型, 推导得到岩石翼形裂纹尖端应力强度因子表达式, 分析不同起裂角条件下, 应力强度因子随岩石翼形裂纹长度的变化规律, 并对参数进行敏感性分析. 基于摩尔-库伦准则, 推导考虑裂纹间相互作用的部分闭合型裂纹的断裂判据表达式, 得到岩石在压剪应力作用下 I、II 型裂纹的复合断裂判据. 分析结果表明: 裂纹间相互作用对应力强度因子的影响效果显著; 应力强度因子在起裂角为  $65^\circ$  左右时达到最大; 应力强度因子对裂纹起裂角和翼形裂纹长度较敏感, 对裂纹闭合度的敏感性较小.

**关键词:** 渗透水压力; 岩石; 翼形裂纹; 应力强度因子; 断裂判据

中图分类号: TU 456

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)06-0799-07

## Stress Intensity Factors and Fracture Criterion of Rock Wing Cracks Under Pore Pressure

HE Ze<sup>1</sup>, YU Jin<sup>1</sup>, ZHANG Jianzhi<sup>2</sup>,  
CAI Yanyan<sup>1</sup>, TU Bingxiong<sup>1</sup>, LI Shengcai<sup>1</sup>

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to discuss the damage of rock wing cracks under seepage pressure in partial closure conditions, a mechanical compression-shear wing cracks model is established with the mutual interaction of multiple cracks and the equation of stress intensity factor at the tip of the wing cracks is deduced. The variation of stress intensity factor with wing cracks length under different initial cracks angles is analyzed by comparing the sensitivity of parameters. Based on Mohr-Coulomb strength condition, the criterion of type I and II comprehensive cracks under compression and shear stress is obtained by the equation of closure cracks considering the interaction of different cracks. The results indicate that the influence of the cracks interaction and the stress intensity factor is significant and the stress intensity factor is maximum for  $65^\circ$  the initial cracks angle. The stress intensity factor is sensitive to the initial cracks angles and the cracks length, is not sensitive to the closure level of cracks.

收稿日期: 2017-04-20

通信作者: 俞缙(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土力学与地下工程方面的研究. E-mail: bugyu0717@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374112, 51679093, 51774147); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目(2015 年度); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01094); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划(2016 年度); 福建省厦门市科技计划项目(3502Z20161082); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611404003)

**Keywords:** pore pressure; rock; wing crack; stress intensity factor; fracture criterion

深埋隧洞围岩大多处于压剪受力状态,翼形裂纹是压剪状态下岩石主要的断裂破坏形式,对围岩稳定性影响较大.因此,研究渗透压下翼形裂纹拓展问题意义重大.郭少华等<sup>[1]</sup>认为渗透压引起的裂纹尖端应力集中是导致张开型翼形裂纹萌生、拓展的重要因素. Li 等<sup>[2]</sup>提出 Kachanov 计算模型,将其运用到闭合压剪裂纹求解中.张卫东等<sup>[3]</sup>在摩尔库伦模型的基础上,充分考虑渗透压力的作用,生成考虑初始渗透压力的裂隙岩体本构模型.文献[4-5]对岩石不等长闭合裂纹应力强度因子及起裂规律进行了详尽的研究.文献[6-8]基于不同假定提出了多种闭合翼形裂纹扩展及其尖端应力强度因子的简化计算模型.上述研究均假设翼形裂纹在压剪作用下会完全闭合.但实际上,岩石裂隙在闭合过程中由于受力不均匀,使两个表面不能完全闭合.赵延林<sup>[9]</sup>研究的翼形裂纹应力强度因子简化计算模型考虑了原生裂隙的不完全闭合及渗透压的作用,但忽略翼形裂纹闭合给应力强度因子带来的影响.为得到渗透压下完整的不完全闭合裂隙应力强度因子,本文提出一个新的压剪翼形裂纹力学模型.再基于摩尔-库伦强度准则,推导渗透压下岩石压剪断裂判据,并对参数进了敏感性分析.

1 翼形裂纹尖端应力强度因子

1.1 翼形裂纹面部分闭合

在进行翼形裂纹尖端应力强度因子计算时,王元汉等<sup>[6]</sup>提出对原生裂纹和翼形裂纹进行叠加计算模型,得到了较好的计算精度,但由于其未考虑裂纹的闭合及渗透水压力等因素,不能反映裂纹部分闭合及多裂纹间相互作用下翼形裂纹尖端应力强度因子的变化情况.考虑到主裂纹及翼型裂纹的部分闭合,引入参数  $\chi$  表示裂纹的闭合状态<sup>[9]</sup>,其大小由未闭合的裂纹面积与总的裂纹面积的比值确定.由此,渗透水压力的作用大小变成  $\chi p$ ,并以面力的形式作用在主裂纹与翼形裂纹上.翼形裂纹尖端应力强度因子的叠加计算示意图,如图 1 所示.图 1 中: $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  为远场应力; $l$  为翼形裂纹长度; $\theta$  为起裂角; $2a$  为主裂纹长度; $\beta$  为主裂纹与水平向的夹角.翼形裂纹的拓展极其复杂,研究中通常需对其简化.根据断裂力学知识,假定翼形裂纹尖端应力强度因子  $K_I$ ,简化为图 1(c)和图 1(d)中应力强度因子的叠加,即

$$K_I = K_I^{(1)} + K_I^{(2)}.$$
 (1)

根据受力特性及裂纹拓展规律<sup>[9]</sup>,提出以下假设:1) 岩石中仅含闭合型裂纹,将两条翼形裂纹组合成一条长为  $2l$  的独立裂纹,该裂纹在远场应力  $\sigma_1, \sigma_3$  和渗透水压力  $\chi p$  的作用下产生应力强度因子  $K_I^{(1)}$ ;2) 将主裂纹与翼裂纹进行等效简化,组合成一条与主裂纹同向的长为  $(2a+2l)$  的直裂纹,在有效剪切应力  $\tau_{\text{eff}}$  作用下,产生等效直裂纹应力强度因子  $K_I^{(2)}$ ,且简化模型认为两端长为  $l$  的翼形裂纹无有效剪切应力和渗透水压力.

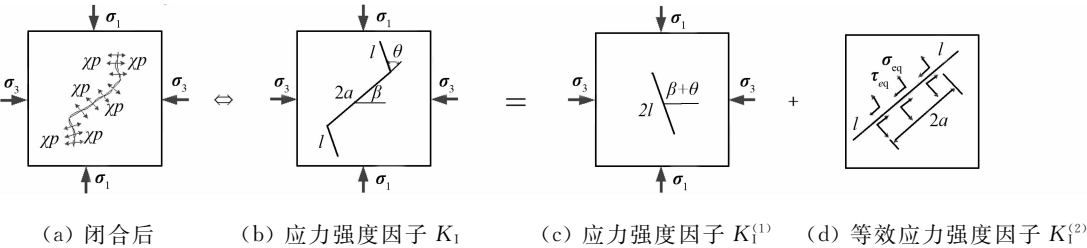


图 1 翼形裂纹尖端应力强度因子的叠加计算示意图

Fig. 1 Superposition diagram of wing cracks intensity factor at tips

主裂纹面上的法向应力  $\sigma_n$ 、切向应力  $\tau_n$  及有效剪应力  $\tau_{\text{eff}}$  分别为

$$\sigma_n = \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta],$$
 (2)

$$\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta,$$
 (3)

$$\tau_{\text{eff}} = \tau_n - f(\sigma_n - \chi p).$$
 (4)

式(4)中: $f$  为裂纹面摩擦系数.

翼形裂纹面上的法向应力  $\sigma'_n$  和切向应力  $\tau'_n$  分别为

$$\sigma'_n = \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\beta + \theta)], \quad (5)$$

$$\tau'_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2(\beta + \theta). \quad (6)$$

由法向应力  $\sigma'_n$  以压应力的形式作用于翼形裂纹, 引起的 I 型强度因子为负值; 而渗透水压力有利于裂纹拓展延伸, 以拉应力的形式作用于翼形裂纹, 引起的 I 型裂纹强度因子为正值, 其表达式  $K_I^{(1)}$  为

$$K_I^{(1)} = -(\sigma'_n - \chi p) \sqrt{\pi l}. \quad (7)$$

将作用在主裂纹面上的有效剪切应力  $\tau_{\text{eff}}$  简化为图 1(d) 所示, 由文献[10]得应力强度因子, 即

$$K_I^{(2)} = 2\sigma_{\text{eq}} \sqrt{\frac{a+l}{\pi}} \sin^{-1}\left(\frac{a}{a+l}\right). \quad (8)$$

再对  $\sigma_{\text{eq}}$  进行求解. 由文献[6, 11]可知: 当考虑翼裂纹极短(即当  $l \rightarrow 0$ )情况和考虑翼裂纹极长(即当  $l \rightarrow \infty$ )情况时, 可分别得到  $\sigma_{\text{eq}} = \frac{3}{2}\tau_{\text{eff}} \sin \theta \cos(\frac{\theta}{2})$  和  $\sigma_{\text{eq}} = \tau_{\text{eff}} \sin \theta$ . 模拟计算翼形裂纹极短到极长的变化过程, 其形式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \tau_{\text{eff}} \sin \theta \left[ \frac{3}{2}e^{-l} \cos \frac{\theta}{2} + (1 - e^{-l}) \right]. \quad (9)$$

综上, 翼形裂纹尖端应力强度因子  $K_I$  可表达为

$$K_I = K_I^{(1)} + K_I^{(2)} = -\left\{ \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\beta + \theta)] - \chi p \right\} \sqrt{\pi l} + 2\tau_{\text{eff}} \sin \theta \left[ \frac{3}{2}e^{-l} \cos \frac{\theta}{2} + (1 - e^{-l}) \right] \sqrt{\frac{a+l}{\pi}} \sin^{-1}\left(\frac{a}{a+l}\right). \quad (10)$$

压剪应力场下, 导致翼形裂纹尖端应力奇异性的唯一应力分量为有效剪切力  $\tau'_{\text{eff}}$  [12], 即

$$\tau'_{\text{eff}} = \tau'_n - f(\sigma'_n - \chi p). \quad (11)$$

则 II 型裂纹强度因子为

$$K_{II} = \tau'_{\text{eff}} \sqrt{\pi l} = [\tau'_n - f(\sigma'_n - \chi p)] \sqrt{\pi l} = \left\{ \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2(\beta + \theta) - f\left(\frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\beta + \theta)] - \chi p\right) \right\} \sqrt{\pi l}. \quad (12)$$

## 1.2 多裂纹间相互作用

前人对裂纹岩石做了不少的研究, 但多数都停留在裂纹稀疏分布的基础上, 忽略高密度裂纹间的相互作用. 以规则排列的双周期雁形裂纹为例, 取相邻的两条翼形裂纹, 翼裂纹相互作用的力学模型, 如图 2 所示. 岩桥间的拉应力 [9] 为

$$\sigma'_3 = \frac{T_e \cos \beta + 2\chi pl}{N_A^{-1/2} - 2(l + a \sin \beta)}. \quad (13)$$

式(13)中:  $N_A$  为单位面积内压剪裂纹的数量;  $T_e$  为主裂纹间的内力,  $T_e = 2a\tau_{\text{ne}}$  [13]. 当  $\sigma'_3$  作用在翼形裂纹上时, 翼形裂纹尖端部分就会产生一个附加的应力强度因子  $K'_I$ , 即

$$K'_I = \sigma'_3 \sqrt{\pi l} = \frac{a(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \cos \beta + 2\chi pl}{N_A^{-1/2} - 2(l + a \sin \beta)} \sqrt{\pi l}. \quad (14)$$

考虑到翼形裂纹的拓展使得岩桥内产生不可忽略的拉应力, 进而引起岩桥损伤, 翼形裂纹尖端的应力强度因子叠加之后, 得

$$K_I = K_I + K'_I = 2\tau_{\text{eff}} \sin \theta \left[ \frac{3}{2}e^{-l} \cos \frac{\theta}{2} + (1 - e^{-l}) \right] \sqrt{\frac{a+l}{\pi}} \sin^{-1}\left(\frac{a}{a+l}\right) - (\sigma'_n - \chi p) \sqrt{\pi l} + \frac{a(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \cos \beta + 2\chi pl}{N_A^{-1/2} - 2(l + a \sin \beta)} \sqrt{\pi l}. \quad (15)$$

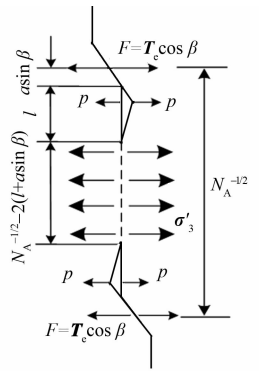


图 2 翼形多裂纹相互作用示意图

Fig. 2 Diagram of interaction of multiple wing cracks

2 渗透压下翼形裂纹的压剪断裂判据

在  $K_{\text{II}}=0$  的二维模型里,裂纹尖端的应力分量在远场压剪荷载作用下的极坐标<sup>[14]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r,r} &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{\text{I}} (3 - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} + K_{\text{II}} (3 \cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2} \right], \\ \sigma_{\theta,\theta} &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_{\text{I}} (1 + \cos \theta) - 3K_{\text{II}} \sin \theta], \\ \sigma_{r,\theta} &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_{\text{I}} \sin \theta + K_{\text{II}} (3 \cos \theta - 1)]. \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

假设:1) 裂纹在裂纹面出现最不利抗剪组合时,进行延伸扩展;2) 裂纹在剪应力达到起裂的临界值时,开始起裂扩展. 为确定开裂角  $\theta_0$ ,对式(16)第 2 个表达式  $\theta$  进行微分,并令其等于 0,可得

$$\cos \frac{\theta}{2} [K_{\text{I}} \sin \theta + K_{\text{II}} (3 \cos \theta - 1)] = 0. \tag{17}$$

设  $\theta=\theta_0$  满足式(17)的要求,由文献[15]得

$$\sigma_1 = (\sigma_{\theta,\theta})_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_{\text{I}} (1 + \cos \theta_0) - 3K_{\text{II}} \sin \theta_0], \tag{18}$$

$$\sigma_3 = (\sigma_{r,r})_{\min} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \left[ K_{\text{I}} (3 - \cos \theta_0) \cos \frac{\theta_0}{2} + K_{\text{II}} (3 \cos \theta_0 - 1) \sin \frac{\theta_0}{2} \right]. \tag{19}$$

由上述假设可知,裂纹沿裂纹面最不利抗剪组合进行扩展,简化后利用摩尔-库仑强度理论,可得

$$|\tau| - f\sigma = S_0. \tag{20}$$

式(20)中: $\sigma$  和  $\tau$  分别为翼形裂纹面上的有效法向应力和有效切向应力; $S_0$  为岩石的内聚力; $f$  为裂纹面上的内摩擦系数. 考虑到翼形拓展引起的裂纹间相互作用及渗透水压力的影响,翼形裂纹面上的有效正应力应在式(5)的基础上包含  $\sigma'_3$  和  $\chi p$ ,则将修正后的式(5),(6)带入式(18),得

$$|\tau'_n| - f\sigma'_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) [\sin 2(\beta + \theta) - f \cos 2(\beta + \theta)] - f(\sigma_1 + \sigma_3) + f\chi p + f\sigma'_3. \tag{21}$$

将式(19)对  $\theta$  求导,可得  $|\tau'_n| - f\sigma'_n$  的最大值为

$$(|\tau'_n| - f\sigma'_n)_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{1 + f^2} - \frac{1}{2}f(\sigma_1 + \sigma_3) + f\chi p + f\sigma'_3. \tag{22}$$

若  $(|\tau'_n| - f\sigma'_n) < S_0$ ,则岩石不会发生破坏;若  $(|\tau'_n| - f\sigma'_n) = S_0$ ,则岩石刚好处于临界破坏状态,岩石受到的剪切破坏力刚好克服了自身的内聚力和岩石裂纹面的内摩擦力,即

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{1 + f^2} - \frac{1}{2}f(\sigma_1 + \sigma_3) + f\chi p + f\sigma'_3 = S_0. \tag{23}$$

再将式(16),(17)带入式(21),得

$$\begin{aligned} K_{\text{I}} [2 \cos \frac{\theta_0}{2} (\cos \theta_0 - 1) \sqrt{1 + f^2} - 4f \cos \frac{\theta_0}{2}] - K_{\text{II}} [3 (\sin \frac{3\theta_0}{2} - \sin \frac{\theta_0}{2}) \times \\ \sqrt{1 + f^2} + 6f \sin \frac{\theta_0}{2}] = 4\sqrt{2\pi r} (S_0 - f\chi p - f\sigma'_3). \end{aligned} \tag{24}$$

1) 当  $K_{\text{II}}=0, \theta_0=0$  时,裂纹断裂形式为纯 I 型断裂,由式(22)计算的断裂韧度  $K_{\text{I},c}$  为

$$K_{\text{I},c} = - \frac{\sqrt{2\pi r} (S_0 - 2f\chi p - 2f\sigma'_3)}{f}. \tag{25}$$

2) 当  $K_{\text{I}}=0$  时,裂纹断裂形式为纯 II 型断裂,同样由式(22)计算的断裂韧度  $K_{\text{II},c}$  为

$$K_{\text{II},c} = - \frac{4\sqrt{2\pi r} (S_0 - 2f\chi p - 2f\sigma'_3)}{3 (\sin \frac{3\theta_0}{2} - \sin \frac{\theta_0}{2}) \sqrt{1 + f^2} + 6f \sin \frac{\theta_0}{2}}. \tag{26}$$

利用式(23)求解出  $S_0$  的表达式,再代入式(22),可求解出岩石在压剪应力作用下 I, II 型裂纹的复合断裂判据,即

$$K_{\text{I}} [2 \cos \frac{\theta_0}{2} (\cos \theta_0 - 1) \sqrt{1 + f^2} - 4f \cos \frac{\theta_0}{2}] - K_{\text{II}} \times$$

$$[3\sin \frac{3\theta_0}{2} - \sin \frac{\theta_0}{2}) \sqrt{1+f^2} + 6f\sin \frac{\theta_0}{2}] = 4fK_{I.c.}$$

(27)

### 3 渗透压下岩石翼形裂纹应力强度因子

#### 3.1 附加应力强度因子 $K'_I$

研究翼形多裂纹间的相互作用对应力强度因子的影响时,单从式(10),(13)可以看出,考虑多裂纹相互作用的裂尖应力强度因子大于单一的  $K'_I$ 。考虑到单位面积内压剪裂纹的数量  $N_A$  的取值,文中结合渗流应力作用下的压剪多裂纹损伤断裂模型数据进行分析<sup>[9,16-17]</sup>,相关参数为  $\sigma_1=25\text{ MPa}$ ,  $\sigma_2=0\text{ MPa}$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\chi=0.6$ ,  $f=0.3$ 。在对给定  $p=0,5\text{ MPa}$  的条件下,考虑与不考虑多裂纹间相互作用的翼形裂纹长度( $l$ )与裂纹应力强度因子( $K'_I$ )的变化关系,如图 3 所示。

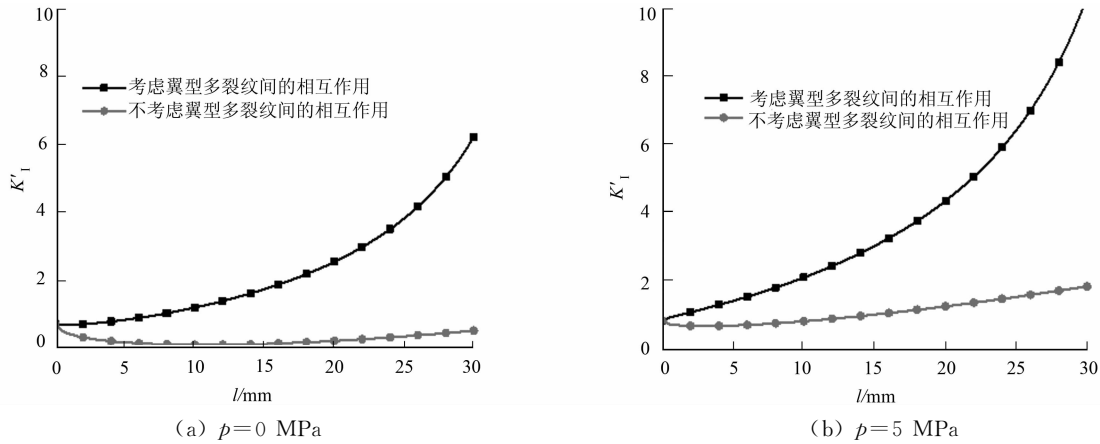


图 3 考虑与不考虑裂纹间相互作用的  $K'_I$  值对比

Fig. 3  $K'_I$  values with and without considering cracks interaction

由图 3 可知:当翼形裂纹长度为 0 时,考虑与不考虑裂纹间相互作用力的  $K'_I$  值相同;但随着翼形裂纹长度的增加,考虑裂纹间相互作用时的  $K'_I$  值明显大于不考虑时的  $K'_I$  值,且  $p=5\text{ MPa}$  时,  $K'_I$  值也大于相同情况下不考虑渗透水压力的  $K'_I$  值,即渗透水压力和考虑裂纹间相互作用都会加剧裂尖应力强度因子的增长,使翼形裂纹越容易拓展延伸贯通岩桥,超过其断裂韧度,造成破坏。

#### 3.2 叠加后的应力强度因子 $K_I$

引用节 3.1 中的数据,在给定渗透水压力条件下,翼形裂纹尖端应力强度因子随裂纹长度( $l$ )及起裂角( $\theta$ )的变化规律,如图 4 所示。

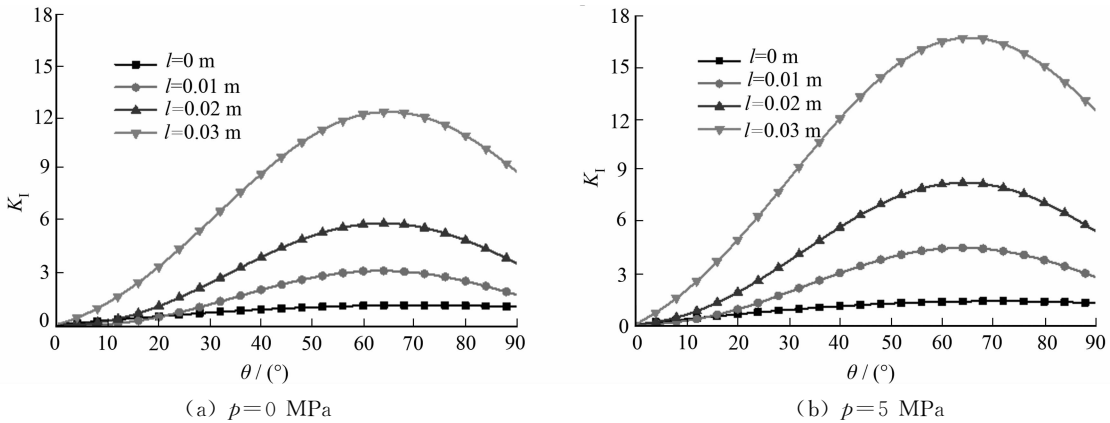


图 4 I 型裂纹应力强度因子随起裂角的变化曲线

Fig. 4 Curves of type I crack stress intensity factor for different crack angles

由图 4 可知:1) 在相同条件下,应力强度因子随着渗透水压力的增加而增加;2) 当渗透水压力一定时,在不同翼形裂纹长度下,应力强度因子随起裂角的变化规律相同;3) 当起裂角为  $65^\circ$  时,应力强度因子达到最大,与按照最大周向应力理论或能量释放率理论计算得到的应力强度因子取极大值( $70.5^\circ$ )时

的起裂角不太相符,对比文献[12]的模型可知,由于考虑了裂纹间的相互作用,导致应力强度因子提前到 65°,达到最大。

3.3 参数敏感性

由式(13)可知,翼形裂纹尖端应力强度因子的变化不仅与翼形裂纹的长度,还与渗透水压力、裂纹起裂角、裂纹闭合度的大小等参数有关. 为研究这些参数对翼形裂纹应力强度因子的影响,探究参数间的相互关系,在进行参数敏感性分析时,假设系统特性由  $K_I(\alpha_k)$  决定,其中,  $K_I(\alpha_k) = f(\alpha_l, \alpha_\theta, \alpha_\chi)$ , 取基准状态  $\alpha_k^* = \{\alpha_l^*, \alpha_\theta^*, \alpha_\chi^*\} = \{0.02\text{ m}, 30^\circ, 0.6\}$ .

将翼形裂纹长度、裂纹起裂角和裂纹闭合度分别加减 10% 和 20%, 其他参数不变, 计算应力强度因子结果, 如图 5 所示. 图 5 中:  $p$  为渗透水压力.

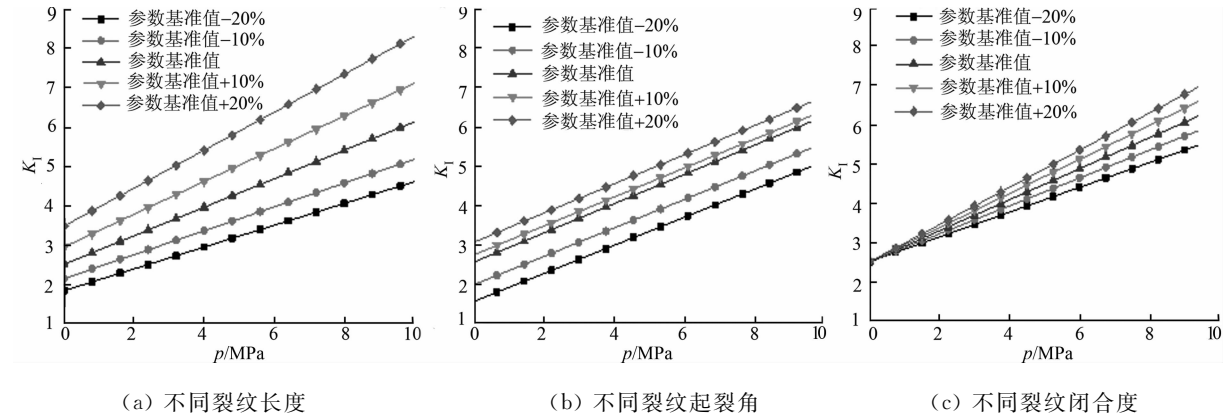


图 5 不同参数下裂纹尖端的应力强度因子

Fig. 5 Stress intensity factor at tip under different parameters

由图 5 可知:在标准值上下波动的过程中,随着渗透水压力的增加,由翼形裂纹长度引起的裂纹尖端应力强度因子的变化幅度明显大于起裂角和裂纹闭合度引起的,且裂纹闭合度引起的最小。

在渗透水压力  $p=5\text{ MPa}$  的情况下,对上述其他 3 个参数进行敏感性分析. 同时,为保证各参数之间能进行敏感性的比较,需要对此进行参数无量纲化处理. 由文献[18]得敏感性因子计算公式为

$$S_k(\alpha_k) = \left( \frac{|\Delta K_I|}{K_I} \right) / \left( \frac{|\Delta \alpha_k|}{\alpha_k} \right) = \left| \frac{\Delta K_I}{\Delta \alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{K_I}.$$

(28)

敏感性因子曲线,如图 6 所示. 图 6 中:  $A$  为翼型裂纹长度( $l$ )、起裂角( $\theta$ )和闭合度( $\chi$ )等 3 个参数的变化幅度. 在  $p=5\text{ MPa}$  的情况下,当参数进行负变化波动时,参数  $\theta$  和  $l$  对应的敏感性因子相差不大,即  $S_K(\alpha_l) \approx S_K(\alpha_\theta) > S_K(\alpha_\chi)$ ; 当参数进行正变化波动时,参数  $\theta$  和  $\chi$  对应的敏感性因子相差不大,  $S_K(\alpha_l) > S_K(\alpha_\chi) \approx S_K(\alpha_\theta)$ . 当渗透水达到相当大时,裂隙的闭合程度小范围变化并不会引起  $\chi p$  太大浮动. 因此,裂纹尖端应力强度因子对裂纹间闭合程度敏感度小,而裂纹起裂角  $\theta$  和翼形裂纹长度  $l$  直接控制着裂隙的拓展延伸方向,参数敏感性因子相对较大。

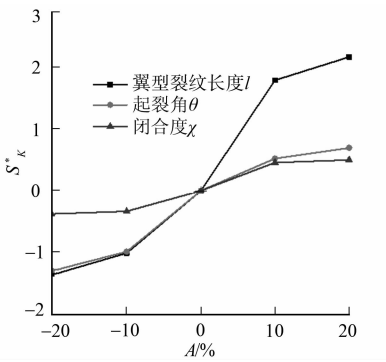


图 6 敏感性因子曲线

Fig. 6 Sensitivity factor curve

4 结论

- 1) 形裂纹尖端应力强度因子与渗透压、起裂角、翼裂纹长度等有关. 渗透压一定时,应力强度因子随起裂角的变化呈近似抛物线关系,岩石翼形裂纹长度越长,应力强度因子越大,越容易达到断裂韧度.
- 2) 纹间相互作用对裂尖应力强度因子的影响显著,考虑裂纹间相互作用的计算结果显示,应力强度因子提前到 65°时达到最大. 在岩石含高密度裂纹情况下,考虑裂纹间相互作用很有必要.
- 3) 基于摩尔-库仑准则,推导考虑裂纹间相互作用的闭合型裂纹的断裂韧度,以及岩石在压剪条件下,Ⅰ,Ⅱ型复合断裂判据. 裂纹的断裂韧度与渗透压和裂纹间的相互作用力成反比,两种力的增加都会加速裂纹的拓展.

4) 裂纹尖端应力强度因子对裂纹间闭合程度的敏感性很小,而对裂纹起裂角和岩石翼形裂纹长度的敏感性较大。

#### 参考文献:

- [1] 郭少华,孙宗硕,谢晓晴. 压缩条件下岩石断裂模式与断裂判据的研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):304-308. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2002.03.008.
- [2] LI Yingping, THAM L G, WANG Yuanhan, *et al.* A modified Kachanov method for analysis of solids with multiple cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(9): 1115-1129. DOI:10.1016/S0013-7944(02)00096-6.
- [3] 张卫东,陈士海. 考虑初始渗透压力的裂隙岩体本构模型二次开发及其验证[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 319-324. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201703007.
- [4] 席婧仪,陈忠辉,朱帝杰,等. 岩石不等长裂纹应力强度因子及起裂规律研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):727-733. DOI:10.11779/CJGE201504019.
- [5] 席婧仪,陈忠辉,张伟. 单轴拉伸作用下不等长裂纹相互影响的断裂力学分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3625-3630. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.029.
- [6] 王元汉,徐钺,谭国焕,等. 改进的翼形裂纹分析计算模型[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):612-615. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2000.05.023.
- [7] HORII H, NEMATNASSER S. Brittle failure in compression: Splitting, faulting and brittle-ductile transition[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1986, 319(1549): 337-374. DOI:10.1016/0148-9062(88)92337-6.
- [8] 李夕兵,贺显群,陈红江. 渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹启裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(7):1317-1324. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.07.002.
- [9] 赵延林. 裂隙岩石渗流-损伤-断裂耦合理论及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [10] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [11] LI Song, LAJTAI E Z. Modeling the stress-strain diagram for brittle rock loaded in compression[J]. Mechanics of Materials, 1998, 30(3): 243-251. DOI:10.1016/S0167-6636(98)00052-0.
- [12] 赵延林,王卫军,赵伏军,等. 渗透压-应力作用下岩体翼形裂纹模型与数值验证[J]. 采矿与安全工程学报,2010, 27(3):370-376. DOI:10.3969/j.issn.1673-3363.2010.03.015.
- [13] 刘涛影,曹平,章立峰,等. 高渗压条件下压剪岩石裂纹断裂损伤演化机制研究[J]. 岩土力学,2012,33(6):1801-1808. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2012.06.031.
- [14] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,2010.
- [15] 潘别桐,唐辉明. 岩石压剪性断裂特性及 I - II 型复合断裂判据[J]. 地球科学,1988(4):59-67.
- [16] 俞缙,赵晓豹,赵维炳,等. 改进的岩石节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(9): 1316-1321. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2008.09.009.
- [17] 唐胜兰,俞缙,张建智,等. 顾及沉积岩应变强化与扩容效应的围岩弹塑性力学状态理论分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(6):691-697. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201606007.
- [18] 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩石动态施工力学[M]. 北京:科学出版社,1995.

(责任编辑:黄晓楠      英文审校:方德平)