

DOI: 10.11779/CJGE201702006

岩石平行偏置裂纹相互作用规律分析

朱帝杰¹, 陈忠辉¹, 席婧仪², 杨登峰¹

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013)

摘 要: 岩石中各种类型裂隙的相互影响是致使其变形破碎的重要原因, 基于经典 Kachanov 法, 通过分析所得应力强度因子比变化趋势, 分别研究了拉剪和压剪两种状态下平行偏置双裂纹间水平距离、垂直距离、裂纹长度以及裂纹倾角对其相互作用的影响规律, 对含不等长平行偏置裂纹的类岩试件进行单轴压缩试验, 通过预制裂纹的起裂扩展和起裂荷载变化规律对理论分析进行了对比验证。结果表明: 裂纹间的相互影响包括强化、屏蔽和零效应三方面, 且随水平距离、垂直距离、裂纹长度和倾角的不同而相互转化; 距离裂纹尖端越近, 屏蔽和强化作用变化越剧烈, K_I , K_{II} 分别在裂纹倾角为 60° 和 30° 时变化较剧烈。

关键词: 平行偏置裂纹; Kachanov 法; 应力强度因子; 相互作用; 类岩材料试验

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)02 - 0235 - 09

作者简介: 朱帝杰(1990 -), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与断裂力学等方面的研究。E-mail: zhudijie1101@163.com。

Interaction between offset parallel cracks in rock

ZHU Di-jie¹, CHEN Zhong-hui¹, XI Jing-yi², YANG Deng-feng¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. China Building Technique Group Company, Beijing 100013, China)

Abstract: The interaction of cracks with different locations and sizes is a key factor leading to the damage of rock. Based on the Kachanov method, the interaction rules between two offset parallel cracks with different level intervals, vertical intervals, crack lengths and crack angles are investigated by analyzing the stress intensity factor ratios under tension-shear stress and compression-shear stress. The compression tests on rock-like specimens with two unequal offset parallel cracks are performed, and the theoretical analysis is proved through the researches on the crack initiation and initial stress variation rules. The results shows that the offset parallel cracks exist reinforcing effect, shielding effect and null effect, and the three effects transform mutually along with the variations of level intervals, vertical intervals, crack lengths and angles. The reinforcing effect and shielding effect become more and more severe with the decrease of distance to the crack tip, and K_I changes greatly when the crack angle is 60° and K_{II} changes greatly when the crack angle is 30° .

Key words: offset parallel crack; Kachanov method; stress intensity factor; interaction; rock-like experiment

0 引 言

岩石作为一种典型的脆性材料, 其中含有大量的裂纹、节理和软弱夹层, 此类缺陷在裂纹相互作用下的起裂扩展是岩石破坏的重要原因。因此对多裂纹相互作用的研究具有重要意义。许多国内外学者在这方面都做了大量研究, Horri 等^[1-2]依据“伪张力法”讨论了无限大平板中多裂纹的相互作用, 但该法在分析近置裂纹时效果不理想。陈宜周^[3]利用 Fredholm 积分方程法对无限平板中多裂纹的解作了详细的推导和论证。Kachanov^[4-6]将“伪张力法”进行简化, 来估算裂纹尖端应力强度因子并分析弹性体中多裂纹的相互作用。李银平等^[7-9]对“Kachanov 法”进行了改进, 使

之在分析近置裂纹相互作用时的准确性得以提高, 并将其推广应用到压剪闭合裂纹。朱维申等^[10]、陈卫忠等^[11]采用 Schwarz 交替法求解任意两平面裂纹间的相互作用。汪微微等^[12]利用 FRANC^{2D} 软件对单向拉伸荷载作用下的 2 条平行偏置裂纹平板进行了有限元分析, 再现了裂纹相互作用的应力场叠加规律。席婧仪等^[13-14]对远场拉应力条件下的一对共线裂纹的应力强度因子表达式进行了推算, 并分析了其相互作用和扩展规律。李廷春等^[15]通过 CT 扫描试验探讨了单向

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174208, U1361209); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2013CB227903)

收稿日期: 2015 - 12 - 03

压缩作用下裂纹的扩展模式。蒲成志等^[16]通过单轴压缩试验，讨论了裂纹角度和分布密度对类岩材料断裂破坏的影响规律，并与数值模拟结果进行了对比分析。

以上研究或提出分析多裂纹相互作用的一种普适方法，或利用数值模拟软件与物理试验对裂纹的相互作用进行模拟分析，但对平行偏置裂纹间水平距离、垂直距离以及长度、倾角对裂纹相互作用的研究鲜有涉及。因此，本文基于经典 Kachanov 方法，通过应力强度因子比的变化，讨论分析了受远场拉、压应力的一对平行偏置裂纹内尖端水平距离、垂直距离等对其相互作用的影响规律，并通过相似材料试验进行分析验证。

1 拉剪平行偏置裂纹相互作用分析

“经典 Kachanov 法”将受远场应力并含有 N 条裂纹的无限平板问题等效为 N 个子问题：每个子问题只含一条裂纹且受伪面力而远场作用力消失，伪面力等于该裂纹初始面力与其他 $N-1$ 个裂纹在该裂纹上引起的面力之和。该法认为伪面力由两部分组成：均匀分布部分及合力为零的非均匀部分，而裂纹间的相互影响仅有均匀分布部分引起，忽略合力为零的非均匀分布部分的影响。

本文基于此法，研究了如图 1 所示受远场单向均匀拉伸的无限大平板中平行偏置双裂纹间的相互影响。图中 xoy 与 $x'o'y'$ 为两个局部坐标系，裂纹 1 和裂纹 2 的长度分别为 $2c$ 和 $2a$ ，内尖端水平间距为 s （两裂纹重叠时 s 取负值），垂直间距为 h ，裂纹倾角为 α ， p^∞ 为远场作用力。

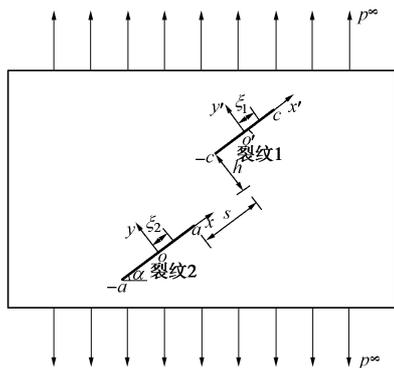


图 1 平行偏置双裂纹

Fig. 1 A pair of offset parallel cracks

以仅含裂纹 1 为例，其上伪面力分解如图 2 所示，其中初始面力 p_1^∞ 为远场应力 p^∞ 在裂纹 1 上的分量。

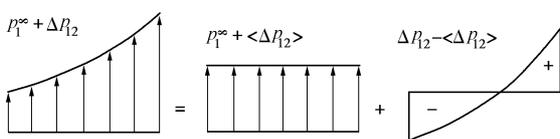


图 2 仅含裂纹 1 时其上伪力分解

Fig. 2 Decomposition of crack force in rock with crack 1

裂纹 i 伪面力：

$$p_i(\xi_i) = \begin{Bmatrix} \sigma_i(\xi_i) \\ \tau_i(\xi_i) \end{Bmatrix} = p_i^\infty + \Delta p_{ij}(\xi_i), \quad (1)$$

其中裂纹 i 初始面力 p_i^∞ 和裂纹 j 均布面力对裂纹 i 产生的附加面力 $\Delta p_{ij}(\xi_i)$ 计算如下：

$$p_i^\infty = \begin{Bmatrix} \sigma_i^\infty \\ \tau_i^\infty \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2} p^\infty - \frac{1}{2} p^\infty \cos 2\alpha \\ -\frac{1}{2} p^\infty \sin 2\alpha \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta p_{ij}(\xi_i) = \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_{ij}(\xi_i) \\ \Delta \tau_{ij}(\xi_i) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij}^{mm} & f_{ij}^{mn} \\ f_{ij}^{mt} & f_{ij}^{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \langle \sigma_j(\xi_j) \rangle \\ \langle \tau_j(\xi_j) \rangle \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

对式 (1) 取平均：

$$\langle p_i(\xi_i) \rangle = p_i^\infty + \begin{bmatrix} A_{ij}^{mm} & A_{ij}^{mn} \\ A_{ij}^{mt} & A_{ij}^{tt} \end{bmatrix} \langle p_j(\xi_j) \rangle. \quad (4)$$

上述式子中 $i, j = 1, 2$ 且 $i \neq j$ ， f_{ij}^{uv} 为相互作用系数 ($u, v = n, t$)，表示裂纹 j 上单位均布力在裂纹 i 上产生的附加应力，例如 f_{12}^{mn} 表示裂纹 2 上单位均布法向力在裂纹 1 上产生的切向附加应力； A_{ij}^{uv} 为相互作用因子，表示裂纹 j 上单位均布力在裂纹 i 上产生的附加应力平均值，例如 A_{12}^{mn} 表示裂纹 2 上单位均布法向力在裂纹 1 上产生的切向附加应力的平均值。

f_{ij}^{uv} 和 A_{ij}^{uv} 可通过文献[8]附录求出，结合式(1)~(4)可求出伪面力，然后结合式(5)求出裂纹 i 内外尖端的应力强度因子 (a_i 为裂纹 i 半长)：

$$\begin{Bmatrix} K_{I}(\pm a_i) \\ K_{II}(\pm a_i) \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\sqrt{\pi a_i}} \int_{-a_i}^{a_i} \sqrt{\frac{a_i \pm \xi_i}{a_i \mp \xi_i}} \begin{Bmatrix} \sigma_i(\xi_i) \\ \tau_i(\xi_i) \end{Bmatrix} d\xi_i. \quad (5)$$

多裂纹间的相互作用对其尖端的应力强度因子大小的影响有增大、无影响和减小 3 种形式，分别对应裂纹的强化区、零效应区和屏蔽区。以 K_I, K_{II} 表示两裂纹共存时的应力强度因子，以 K_{I0}, K_{II0} 表示一条裂纹单独存在时的尖端的应力强度因子^[17]， $K_{I0} = p^\infty \sqrt{\pi c} \cos^2 \alpha$ ， $K_{II0} = p^\infty \sqrt{\pi c} \cos \alpha \sin \alpha$ 。通过两种情况的应力强度因子的比值分析两平行偏置裂纹的相互作用，比值大于 1，表示强化区，比值等于 1，表示零效应区，比值小于 1，表示屏蔽区。

表 1 为 $\alpha = 0, c = a$ (两裂纹等长)，垂直间距比 $h/c = 1$ ，水平间距比 s/c 取不同值时，本文算得的应力强度因子比和应力强度因子手册^[16]误差对比结果。可以看出：内外尖端误差均在 0.07 以内，说明本方法具有合理性；当 $s/c < 0$ (两裂纹重叠) 时，误差相对较大，随着 s/c 的增大 (两裂纹逐渐远离)，误差越来越小，且外尖端误差始终小于内尖端，这是因为外尖端所受干扰比内尖端小。基于此和对称性两方面考量，本文仅算至两裂纹重叠至裂纹半长 ($s/c = -1$)。

表 1 应力强度因子比误差分析

Table 1 Error analysis of SIF ratio

s/c	本文		手册		误差	
	$K_{I(-c)}/K_{I0(-c)}$	$K_{I(c)}/K_{I0(c)}$	$K_{I(-c)}/K_{I0(-c)}$	$K_{I(c)}/K_{I0(c)}$	$K_{I(-c)}/K_{I0(-c)}$	$K_{I(c)}/K_{I0(c)}$
-0.50	0.8577	1.1237	0.9200	1.1380	0.0623	0.0143
-0.25	0.9966	1.1287	1.0500	1.1400	0.0534	0.0113
0	1.1098	1.1214	1.1280	1.1320	0.0182	0.0106
0.25	1.1662	1.1063	1.1800	1.1120	0.0138	0.0057
0.50	1.1715	1.0891	1.1700	1.0900	0.0015	0.0009

1.1 水平间距的影响

图 3 为 $\alpha=0, c=a$ (两裂纹等长) 时裂纹 1 尖端的应力强度因子比随水平间距比 s/c 的变化曲线图, 因 $\alpha=0, K_{II}$ 较小, K_I 占主导地位, 故仅分析 I 型应力强度因子比的变化规律。可知: 当水平间距小于 0 时, 两裂纹重叠, 内尖端受屏蔽作用, 外尖端受强化作用 (垂直间距适当变大且深度重叠时, 可能受到较弱的屏蔽作用); 随着水平间距增大, 内尖端所受屏蔽作用减弱且逐渐转化为强化作用, 外尖端所受强化作用逐渐增强; 随着水平间距进一步增大, 内外尖端所受强化作用均逐渐减弱并最终转化为零效应, 彼此无影响; 应力强度因子比变化曲线随水平间距增大而变缓, 说明水平间距越小, 距裂纹尖端越近, 屏蔽和强化作用变化越剧烈。

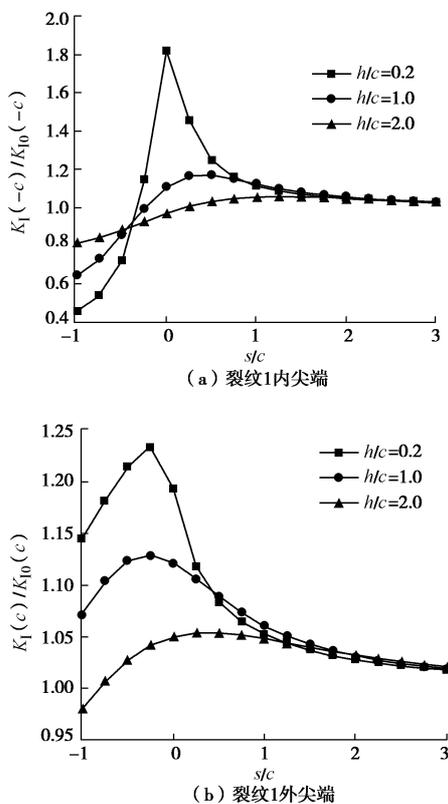


图 3 应力强度因子比与水平间距比的关系

Fig. 3 Relationship between SIF ratio and level interval ratio

1.2 垂直间距的影响

图 4 为 $\alpha=0, c=a$ (两裂纹等长) 时裂纹 1 尖端的应力强度因子比随垂直间距比 h/c 的变化曲线图, 同水平间距比, 仅分析 I 型应力强度因子比的变化规律。可知: 当水平间距小于 0 时, 随垂直间距增大, 内尖端受屏蔽作用和外尖端受强化作用均越来越小并最终都进入零效应区; 当水平间距大于 0 时, 随垂直间距增大, 内外尖端均受强化作用且该作用逐渐增至最强后开始减弱, 垂直间距继续增大, 内外尖端均进入零效应区, 裂纹彼此无影响; 应力强度因子比变化曲线随垂直间距增大而变缓, 说明垂直间距越小, 距裂纹尖端越近, 屏蔽和强化作用变化越剧烈。

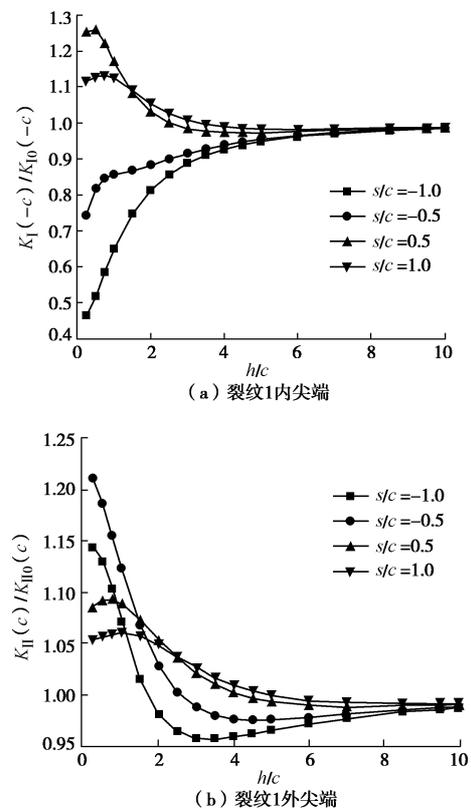


图 4 应力强度因子比与垂直间距比的关系

Fig. 4 Relationship between SIF ratio and vertical interval ratio

1.3 裂纹长度的影响

图 5 为 $\alpha=0, h/a=1$ 时裂纹 2 两尖端的应力强度

因子比随裂纹长度比 c/a 的变化曲线图。可知：随着裂纹 1 长度的增加，裂纹 2 外尖端所受强化作用越来越大；当水平间距较小 ($s/a=0$) 时，裂纹 2 内尖端受到屏蔽作用，且随着裂纹 1 长度增加该屏蔽作用先增强后减弱，并最终转化为随裂纹 1 长度增大而增强的强化作用；当水平间距较大 ($s/a=0.5$) 时，裂纹 2 内尖端受强化作用，且强化作用随裂纹 1 长度增加而增强，内尖端强化程度始终大于外尖端。以上现象表明距离裂纹尖端距离适当且恒定处，随裂纹长度增大，该处会在屏蔽效应和强化效应之间相互转化，亦即强化区和屏蔽区范围均会随裂纹长度增加而扩大，且裂纹长度越大，其屏蔽和强化效应越强。

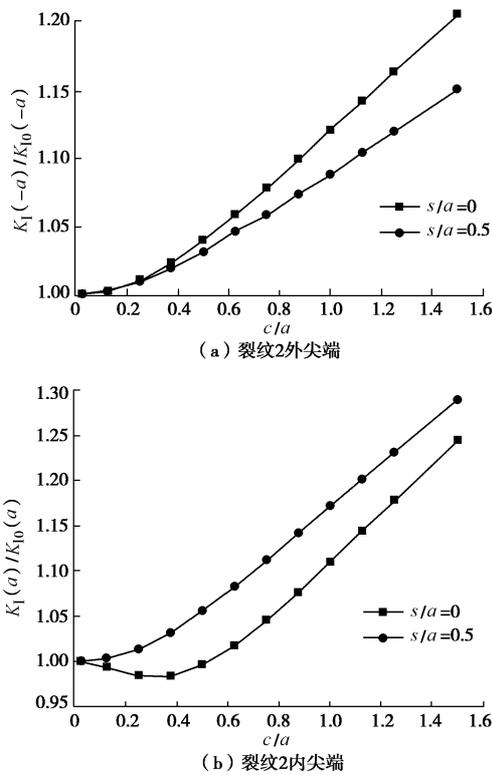


图 5 应力强度因子比与裂纹长度比的关系

Fig. 5 Relationship between SIF ratio and crack length ratio

1.4 裂纹倾角的影响

图 6 为 $c=a$ (两裂纹等长), $h/c=1$ 时裂纹 1 内尖端的应力强度因子比随裂纹倾角 α 的变化曲线图。可知：当两裂纹水平间距较小 ($s/c \leq 0.5$) 时，随倾角 α 增大，裂纹 1 内尖端受 I 型屏蔽作用逐渐增强或强化作用减弱而后转化为逐渐增强的屏蔽作用，受 II 型屏蔽作用逐渐减弱，表明裂纹 2 的 I 型屏蔽区随倾角增大而增大，II 型屏蔽区随倾角增大而减小，表明剪切破坏趋势愈发明显；当两裂纹水平间距较大 ($s/c > 0.5$) 时，随倾角 α 增大，裂纹 1 内尖端受 I 型强化作用逐渐增强，受 II 型强化作用逐渐减小，表明裂纹 2 的 I 型强化区随倾角增大而增大，II 型强化区随倾角增大

而减小，表明张拉破坏趋势愈发明显；I 型应力强度因子比曲线斜率在 60° 左右变化最剧烈，II 型应力强度因子比曲线斜率在 30° 左右变化最剧烈，表明这两种倾角情况下相互作用较强。

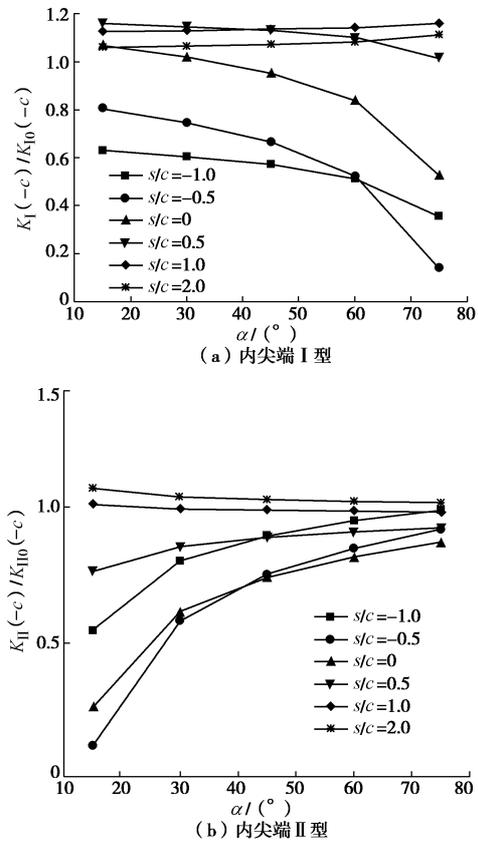


图 6 应力强度因子比与裂纹倾角的关系

Fig. 6 Relationship between SIF ratio and crack angle

2 压剪平行偏置裂纹相互作用分析

与拉剪不同，压剪状态下平行偏置裂纹受法向压力，甚至被压闭合，仅存在 II 型破坏，故只讨论 K_{II} 的变化规律。

考虑如图 7 (a) 所示压剪平行偏置裂纹模型。裂纹 1、2 的实际面力分别为 $\tau_{xy}^1, \sigma_y^1, \tau_{xy}^2, \sigma_y^2$ ，取 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ，假设裂纹在压剪应力作用下闭合并滑动，且面力满足莫尔库仑定律：

$$\tau_{xy}^i = -\tau_c + \mu\sigma_y^i \quad (i=1, 2), \quad (6)$$

式中， τ_c 为黏阻力， μ 为裂纹面摩擦系数。

该问题等效于图 7 (b) 所示的裂纹面上受均匀压缩而远场应力消失的情况，裂纹 i 的裂纹面上分别受到切向面力 $\tau_{xy}^i - \tau_{xy}^{\infty i}$ 和法向面力 $\sigma_y^i - \sigma_y^{\infty i}$ 作用， $\tau_{xy}^{\infty i}, \sigma_y^{\infty i}$ 为远场作用力在裂纹面处的分量：

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy}^{\infty i} &= p^\infty \sin 2\alpha / 2, \\ \sigma_y^{\infty i} &= p^\infty (1 + \cos 2\alpha) / 2 \quad (i=1, 2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

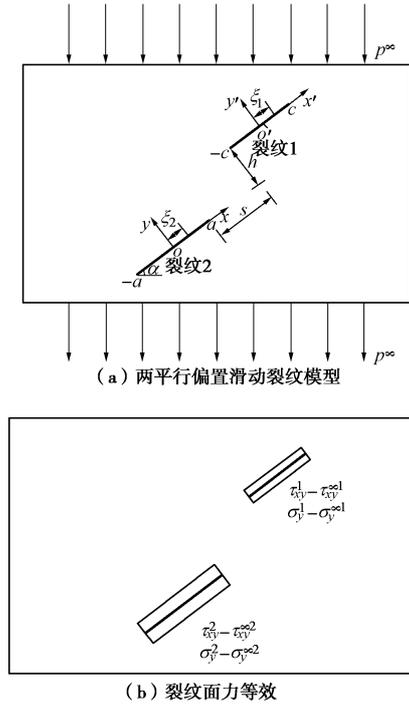


图 7 无限板中两压剪平行偏置裂纹

Fig. 7 A pair of frictional offset parallel cracks in an infinite plate

该问题进一步可分解为两个子问题, 每个子问题仅含一个受到伪切向应力 τ_{xy}^{*i} 和伪法向应力 σ_y^{*i} 的裂纹, 伪面力可表示为

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy}^{*i} &= (\tau_{xy}^i - \tau_{xy}^{\infty i}) - \Delta\tau_{xy}^i, \\ \sigma_y^{*i} &= (\sigma_y^i - \sigma_y^{\infty i}) - \Delta\sigma_y^i \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\Delta\tau_{xy}^i$, $\Delta\sigma_y^i$ 为相互影响项, 如 $\Delta\tau_{xy}^1$ 为受伪面力 τ_{xy}^{*2} 和 σ_y^{*2} 作用的裂纹 2 在裂纹 1 上引起的附加应力。对于滑动闭合裂纹, 有 $\sigma_y^{*i} \equiv 0$, 则由式 (6)、(8) 得

$$\tau_{xy}^{*i} = -\tau_c + \mu\sigma_y^{\infty i} - \tau_{xy}^{\infty i} + \mu\Delta\sigma_y^i - \Delta\tau_{xy}^i \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

相互影响项 $\Delta\tau_{xy}^i$, $\Delta\sigma_y^i$ 可通过 Kachanov 法求得如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_{xy}^i &= \langle -\sigma_y^{*j} \rangle f_{ij}^{tn} + \langle -\tau_{xy}^{*j} \rangle f_{ij}^{tt}, \\ \Delta\sigma_y^i &= \langle -\sigma_y^{*j} \rangle f_{ij}^{mn} + \langle -\tau_{xy}^{*j} \rangle f_{ij}^{mt} \quad (i=1, 2, j=1, 2 \text{ 且 } i \neq j), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, $\langle -\sigma_y^{*j} \rangle$ 和 $\langle -\tau_{xy}^{*j} \rangle$ 分别为 j 裂纹伪法向应力和伪切向应力平均值, 把式 (10) 代入式 (9) 得

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy}^{*1} &= -\tau_c + \mu\sigma_y^{\infty 1} - \tau_{xy}^{\infty 1} - \mu \langle \tau_{xy}^{*2} \rangle f_{12}^{mt} + \langle \tau_{xy}^{*2} \rangle f_{12}^{tt}, \\ \tau_{xy}^{*2} &= -\tau_c + \mu\sigma_y^{\infty 2} - \tau_{xy}^{\infty 2} - \mu \langle \tau_{xy}^{*1} \rangle f_{21}^{mt} + \langle \tau_{xy}^{*1} \rangle f_{21}^{tt} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对式 (11) 左右两边取平均得:

$$\left. \begin{aligned} \langle \tau_{xy}^{*1} \rangle &= -\tau_c + \mu\sigma_y^{\infty 1} - \tau_{xy}^{\infty 1} - \mu \langle \tau_{xy}^{*2} \rangle A_{12}^{mt} + \langle \tau_{xy}^{*2} \rangle A_{12}^{tt}, \\ \langle \tau_{xy}^{*2} \rangle &= -\tau_c + \mu\sigma_y^{\infty 2} - \tau_{xy}^{\infty 2} - \mu \langle \tau_{xy}^{*1} \rangle A_{21}^{mt} + \langle \tau_{xy}^{*1} \rangle A_{21}^{tt}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由该式求出 $\langle \tau_{xy}^{*1} \rangle$, $\langle \tau_{xy}^{*2} \rangle$ 并代入式 (11), 求出伪面力 τ_{xy}^{*1} , τ_{xy}^{*2} , 最后根据下式求出 II 型应力强度因子 (l_i 为裂纹 i 半长):

$$K_{II}(\pm l_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi l_i}} \int_{-l_i}^{l_i} \sqrt{\frac{l_i \pm \xi_i}{l_i \mp \xi_i}} (-\tau_{xy}^{*i}) d\xi_i \quad (13)$$

取 $c=a$, $h/c=0.4$, $\alpha=45^\circ$, $\tau_c=0$, $\mu=0.3$, 此时裂纹 1 尖端 II 型应力强度因子与仅含一条裂纹时的应力强度因子比值随裂纹水平间距比 s/c 变化如图 8 所示; 取 $c=a$, $s/c=-1$, $\alpha=45^\circ$, $\tau_c=0$, $\mu=0.3$, 此时裂尖 II 型应力强度因子与仅含一条裂纹时的应力强度因子比值随裂纹垂直间距比 h/c 变化如图 9 所示。

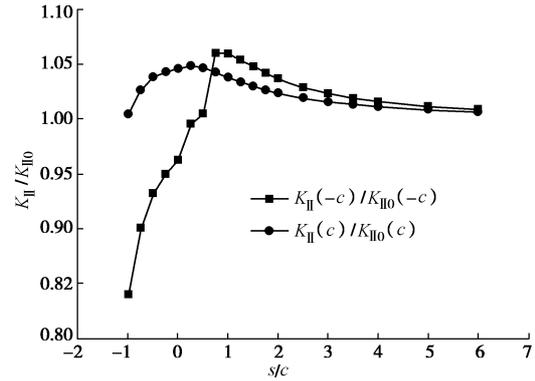


图 8 应力强度因子比与水平间距比的关系

Fig. 8 Relationship between SIF ratio and level interval ratio

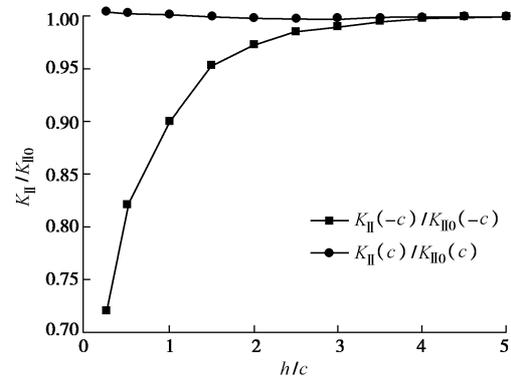


图 9 应力强度因子比与垂直间距比的关系

Fig. 9 Relationship between SIF ratio and vertical interval ratio

由图 8 可知: 垂直间距固定为 0.4, 当水平间距小于 0 时, 两裂纹重叠, 裂纹 1 内尖端 ($-c$ 端) 受 II 型屏蔽作用, 外尖端 (c 端) 受 II 型强化作用; 随着水平间距增大, 内尖端所受屏蔽作用减弱且逐渐转化为强化作用, 外尖端所受强化作用逐渐增强; 随着水平间距进一步增大, 内外尖端所受强化作用均逐渐减弱并最终转化为零效应, 彼此无影响。由图 9 可知: 水平间距固定为 -1 时, 随着垂直间距增大, 裂纹 1 内尖端所受 II 型屏蔽作用和外尖端所受 II 型强化作用均逐渐减弱并最终进入零效应区。且应力强度因子比变化曲线均随水平间距和垂直间距增大而变缓, 表明水平间距和垂直间距越小, 距离裂纹尖端距离越近,

裂纹Ⅱ型相互作用越剧烈。

3 含平行偏置裂纹类岩试件单轴压缩试验

为验证理论分析的正确性,进行了如下相似材料模拟试验和现象分析。

3.1 试验介绍

本试验采用水泥、砂和水制作水泥砂浆试件,其配合比为水泥:砂:水=1:2.35:0.5(质量比)。试件尺寸为110 mm×110 mm×30 mm,试验采用0.5 mm厚薄不锈钢片预制裂纹,试件制毕并经28 d养护后,开始进行断裂破坏试验。

本次试验测定的不含裂纹完整标准试件的力学性能见表2。

表2 试件力学参数

Table 2 Mechanical parameters of specimens

密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	单轴抗压强 度/MPa	单轴抗压强 度/MPa	泊松 比
2350	15.2	55	2.5	0.15

为了充分验证水平间距、垂直间距和裂纹长度的影响,本次试验共制作了10块试件,其几何参数见表3。

表3 水泥砂浆试件中裂纹几何参数

Table 3 Geometric parameters of cement mortar specimens containing cracks

试件	$\alpha /(^{\circ})$	$2a/\text{mm}$	$2c/\text{mm}$	h/mm	s/mm
1	45	24	12	6	-12
2	45	24	12	6	-6
3	45	24	12	6	0
4	45	24	12	6	6
5	45	24	12	6	12
6	45	24	12	9	-12
7	45	24	12	12	-12
8	45	24	12	18	-12
9	45	24	12	24	-12

本次试验在中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的3000 kN超高刚性伺服试验

机上进行,整个加载过程采用位移控制,加载速率为0.2 mm/min;采用FASRCAM SA1.1高速摄影机对水泥砂浆试件的裂纹扩展进行图像信息采集,其分辨率为 896×896 ,拍摄速度设置为50 fps。

3.2 试验结果分析讨论

(1) 水平间距影响

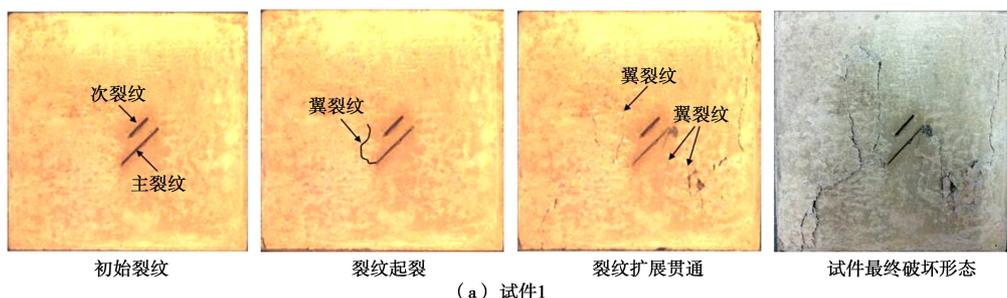
试件1~5的主次裂纹垂直间距相同而水平间距依次增大,通过对比主、次裂纹起裂扩展规律来分析水平间距对相互作用的影响,限于篇幅,仅将试件1,5的试验结果展现如图10。

试件1在持续加载过程中,主裂纹外内尖端先后萌生出翼裂纹且均先沿最大主应力方向扩展,然后扩展趋于加载方向并最终导致试件破坏,在整个加载过程中,次裂纹内外尖端均未起裂;而试件5在加载过程中,次主裂纹内尖端先后萌生裂纹,随着加载持续,次主裂纹外尖端也先后萌生裂纹并扩展,最终主裂纹内尖端的次生剪切裂纹与次裂纹内尖端萌生的翼裂纹搭接,造成岩桥贯通,主次裂纹外尖端翼裂纹在应力作用下持续扩展并最终导致试件破坏。

对比试件1~5试验现象可知:垂直间距适当,水平间距较小(≤ 0)时,两裂纹重叠,此时主裂纹对次裂纹尤其是其内尖端的屏蔽效应较为显著,导致次裂纹在整个加载过程中不起裂或起裂延后,而次裂纹对主裂纹外尖端有较强的强化作用,对其内尖端有较弱的屏蔽作用,导致在加载过程中主裂纹外尖端先于内尖端起裂;随着水平间距的增大,主裂纹对次裂纹的屏蔽作用减弱,并逐渐转化为强化作用,导致次裂纹逐渐起裂。次裂纹对主裂纹外尖端强化作用逐渐减弱,对其内尖端的屏蔽作用先增强后减弱,然后转化为强化作用,导致主裂纹外尖端起裂相对延后,内尖端起裂先延后后提前;随着水平间距持续增大,两种作用均转化为零效应,裂纹彼此无影响,这与2.1节和3节分析结果一致。

(2) 垂直间距影响

试件1、6~9的水平间距相同而垂直间距依次增大,通过对比主、次裂纹起裂扩展规律来分析垂直间距对相互作用的影响,限于篇幅,结合上述试件1,仅将试件7,9的试验结果展现见图11。



(a) 试件1

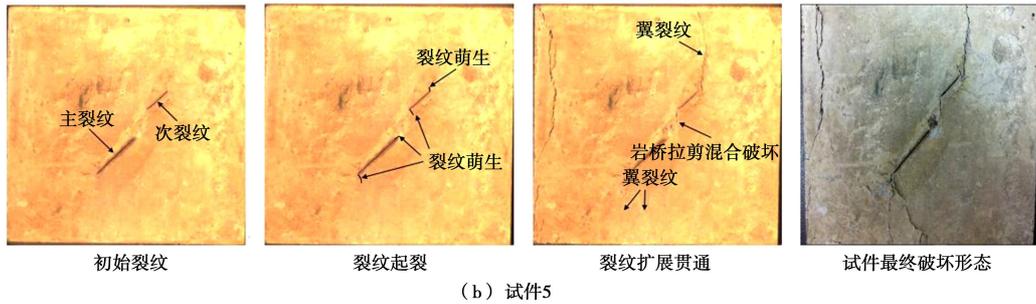


图 10 试件 1, 5 裂纹扩展过程

Fig. 10 Crack propagation process of specimen 1 and 5

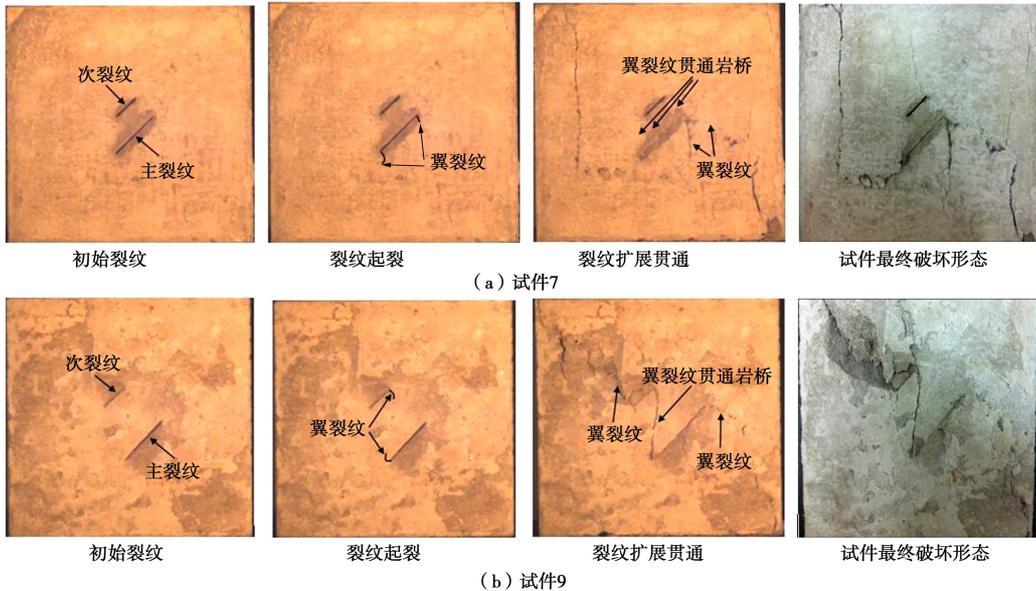


图 11 试件 7, 9 裂纹扩展过程

Fig. 11 Crack propagation process of specimen 7 and 9

试件 7 在加载过程中, 主裂纹两尖端首先萌生裂纹, 随着加载的持续进行, 次裂纹两尖端也开始萌生出翼裂纹, 并与主裂纹萌生的翼裂纹搭接导致岩桥贯通, 但最终因主裂纹两尖端萌生的翼裂纹持续扩展而导致试件破坏; 试件 9 在加载过程中, 主次裂纹外尖端首先萌生翼裂纹, 并随荷载增加导致岩桥贯通破坏, 随着加载持续进行, 主裂纹内尖端和次裂纹内尖端也萌生翼裂纹并持续扩展, 最终导致试件破坏。

对比试件 1、6~9 试验现象可知: 当裂纹间垂直间距较小时, 主裂纹对次裂纹的屏蔽作用和次裂纹对主裂纹的强化作用均较明显, 彼此相互作用强烈, 导致次裂纹不起裂或起裂延后, 主裂纹起裂致使试件破坏; 随着垂直间距逐渐增大, 主裂纹对次裂纹的屏蔽作用减弱, 次裂纹开始起裂, 次裂纹对主裂纹的强化作用也减弱, 主裂纹起裂相对延后, 表明彼此相互作用减弱; 垂直间距进一步增大, 主次裂纹进入各自零效应区, 彼此无影响, 这与第 2.2 节和第 3 节分析结果一致。

(3) 裂纹长度影响

以试件 1 和 5 为例, 试件 1 中次裂纹外尖端处于

主裂纹屏蔽区, 主裂纹内尖端处于次裂纹屏蔽区, 在整个加载过程中, 次裂纹外尖端始终未起裂, 但主裂纹内尖端随着荷载的加大而开始起裂并扩展; 试件 5 中主次裂纹内尖端均处于彼此的强化区, 但在加载过程中, 次裂纹内尖端要先于主裂纹内尖端起裂。这两种现象表明裂纹越长, 距其尖端距离相对恒定处所受的屏蔽或强化作用越强, 这与第 2.3 节分析结果一致。

(4) 起裂荷载分析

为了进一步验证理论分析的正确性, 论文进行了裂纹起裂荷载分析, 试验测得主裂纹单独存在时其尖端起裂荷载为 30 MPa, 起裂荷载小于 30 MPa 表示强化作用, 大于 30 MPa 表示屏蔽作用。

试件 1~5 主裂纹内外尖端起裂荷载随水平间距变化趋势如图 12 所示。可以看出: 随着水平间距的增大, 主裂纹外尖端起裂荷载逐渐增加至 30 MPa, 这说明主裂纹外尖端所受次裂纹强化作用愈来愈弱并最终趋于零效应; 主裂纹内尖端的起裂荷载先逐渐增加, 说明所受屏蔽作用愈来愈强, 当重叠至次裂纹长度一半时 ($s=6\text{ mm}$), 内尖端起裂荷载达到最大, 屏蔽作用最强, 随着水平间距继续增大, 重叠部分愈来愈短,

起裂荷载也愈来愈小,说明主裂纹内尖端受屏蔽作用愈来愈小,当水平间距变为 0 mm 时,主、次裂纹开始分开,主裂纹内尖端起裂荷载迅速下降,说明内尖端开始受强化作用,随着水平间距持续增大,内尖端起裂荷载变大,说明强化作用逐渐减弱并最终趋于零效应;起裂荷载变化曲线随水平间距的增大而趋于平缓,说明水平间距越小,距裂纹尖端越近,屏蔽和强化作用变化越剧烈,上述现象与第 2.1 节和第 3 节分析结果一致。

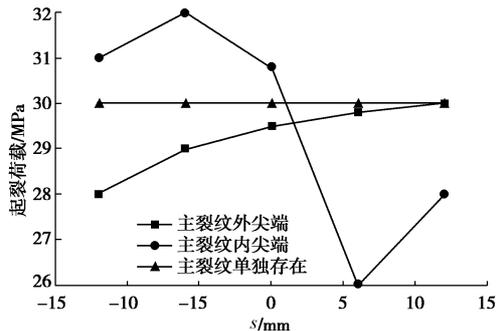


图 12 起裂荷载与水平间距关系

Fig. 12 Relationship between initial stress and level interval

试件 1、6~9 主裂纹内外尖端起裂荷载随垂直间距变化趋势如图 13 所示。可以看出:随着垂直间距的增大,主裂纹外尖端的起裂荷载逐渐增大至 30 MPa,说明外尖端所受次裂纹强化作用愈来愈弱,最终趋于零效应,内尖端起裂荷载逐渐变小,说明内尖端所受次裂纹屏蔽作用愈来愈弱,并最终趋于零效应;起裂荷载变化曲线随垂直间距的增大而趋于平缓,说明垂直间距越小,距离裂纹尖端越近,屏蔽和强化作用变化越剧烈。上述现象与第 2.2 节和第 3 节分析结果一致。

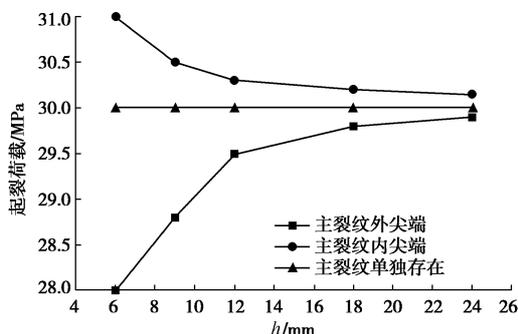


图 13 起裂荷载与垂直间距关系

Fig. 13 Relationship between initial stress and vertical interval

4 结 论

本文基于经典 Kachanov 法,对受远场均匀拉伸和压缩的平行偏置双裂纹间的相互作用进行了分析,

并通过单轴压缩试验进行验证,主要得到以下结论:

(1) 平行偏置裂纹间的相互作用包括屏蔽效应、强化效应和零效应 3 种作用形式。当水平间距较大时,两裂纹相距较远,相互之间基本无影响;随着水平间距的减小,裂纹进入强化区,随着水平间距进一步减小为负值,内尖端首先进入屏蔽区,外尖端仍处于强化区,随着水平间距继续减小,两裂纹重叠加深,外尖端也进入屏蔽区;水平间距越小,屏蔽和强化作用变化越剧烈。

(2) 垂直间距对裂纹间的相互作用规律因水平间距的不同而不同。当水平间距较小 (≤ 0) 时,随垂直间距增大,内尖端受屏蔽作用和外尖端受强化(或屏蔽)作用均越来越小并最终都进入零效应区;当水平间距较大 (> 0) 时,随着垂直间距增大,内外尖端均处于强化区,且强化作用先少许增强而后逐渐减弱,最终进入零效应区;垂直间距越小,屏蔽和强化作用变化越剧烈。

(3) 裂纹的屏蔽区和强化区均随裂纹长度的增加而增大,在距裂纹尖端位置固定处,随裂纹长度的不同,该处可在屏蔽区、强化区和零效应区之间相互转化,且距离裂纹尖端越近,屏蔽和强化作用变化越剧烈。

(4) 单轴拉伸状态下,当水平间距较小 (≤ 0) 时,随着裂纹倾角 α 的增大,裂纹内尖端所受 I 型屏蔽作用且增强,所受 II 型屏蔽作用减弱,即 I 型屏蔽区增大,II 型屏蔽区减小且趋势明显;当水平间距较大 (> 0) 时,裂纹内尖端所受 I 型强化作用增强,所受 II 型强化作用减弱,即 I 型强化区增大,II 型强化区减小且趋势不明显;在随倾角变化的过程中,裂纹在 60° 和 30° 两种倾角情况下相互作用最剧烈。

参考文献:

- [1] HORRIL H, NEMAT-NASSER S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, **90**(B4): 3105 - 3125.
- [2] HORRIL H. Elastic fields of interacting inhomogeneities[J]. International Journal of Solids and Structures, 1985, **21**(7): 731 - 745.
- [3] 陈宜周. 无限平板中的多裂纹问题[J]. 西北工业大学学报, 1984, **2**(4): 367 - 379. (CHEN Yi-zhou. Multiple crack problem in an infinite plate[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1984, **2**(4): 367 - 379. (in Chinese))
- [4] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts[J]. Applied Mechanics

- Reviews, 1992, **45**(8): 304 - 335.
- [5] KACHANOV M. Elastic solids with many cracks: a simple method of analysis[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1987, **23**(1): 23 - 43.
- [6] KACHANOV M. A simple technique of stress analysis in elastic solids with many cracks[J]. *International Journal of Fracture*, 1985, **28**(1): 11 - 19.
- [7] LI Y P, THAM L G, WANG Y H. A modified Kachanov method for analysis of solids with multiple cracks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, **70**(9): 1115 - 1129.
- [8] 李银平, 杨春和. 近置多裂纹相互作用的渐近分析方法[J]. *力学学报*, 2005, **37**(5): 600 - 605. (LI Yin-ping, YANG Chun-he. Asymptotic analysis of closely spaced multiple crack interaction[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, **37**(5): 600 - 605. (in Chinese))
- [9] 李银平, 王元汉, 肖四喜. 岩石类材料中压剪裂纹的相互作用分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(4): 552 - 555. (LI Yin-ping, WANG Yuan-han, XIAO Si-xi. Interaction of frictional cracks in rock-like materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(4): 552 - 555. (in Chinese))
- [10] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 5 - 47. (ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Mechanism and anchoring effect and engineering application of failure of jointed rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2002: 5 - 47. (in Chinese))
- [11] 陈卫忠, 伍国强, 杨建平, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 204 - 217. (CHEN Wei-zhong, WU Guo-qiang, YANG Jian-ping, et al. Theory and engineering application of jointed rock mass stability analysis of underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 2012: 204 - 217. (in Chinese))
- [12] 汪微微, 赵建平. 平行偏置裂纹相互作用及其合并条件[J]. *南京工业大学学报 (自然科学版)*, 2009, **31**(4): 27 - 31. (WANG Wei-wei, ZHAO Jian-ping. Interaction between offset parallel cracks and combination conditions[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Nature Science Edition)*, 2009, **31**(4): 27 - 31. (in Chinese))
- [13] 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. (XI Jing-yi, CHEN Zhong-hui, ZHANG Wei. Fracture mechanics analysis of unequal cracks interaction under uniaxial tension[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(S2): 3625 - 3630. (in Chinese))
- [14] 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. (XI Jing-yi, CHEN Zhong-hui, ZHU Di-jie, et al. Stress intensity factors and initiation of unequal collinear cracks in rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(4): 727 - 733. (in Chinese))
- [15] 李廷春, 吕海波, 王辉. 单轴压缩载荷作用下双裂隙扩展的 CT 扫描试验[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(1): 9 - 14. (LI Tin-chun, LÜ Hai-bo, WANG Hui. CT real-time scanning tests on double cracks propagation under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(1): 9 - 14. (in Chinese))
- [16] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (in Chinese))
- [17] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 38 - 39. (Chinese Aeronautical Establishment. Handbook of stress intensity factors[M]. Beijing: Science Press, 1981: 38 - 39. (in Chinese))