

渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹 启裂特性研究

李夕兵, 贺显群, 陈红江

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在探讨渗透水压和远场应力共同作用下张开型裂纹的启裂规律及裂纹尖端应力强度因子的演化规律的基础上, 建立压剪应力场和渗流场共同作用下含预置裂纹类岩石材料的损伤断裂力学模型和裂纹尖端应力强度因子演化方程, 提出运用裂纹尖端应力强度因子作为判断压剪岩石裂纹的启裂准则。研究表明: 张开型裂纹尖端应力强度因子受围压、渗透水压力、裂纹尖端曲率半径以及裂纹倾角等因素的影响; 裂纹启裂角随预制裂纹角度的变化不大, 其值约为 70.5° ; 裂纹启裂强度与渗透水压力、裂纹长度、裂纹尖端曲率半径成反比, 与围压的大小成正比, 此外还与裂纹倾角有关。算例验证表明, 运用不同的断裂判断准则均可得出岩石裂纹初裂强度随渗透水压力的增大而呈减小的趋势。且进一步的试验也验证了启裂强度与渗透水压成反比而与围压成正比; 当裂隙角度为 30° 时裂纹启裂强度最大, 60° 次之, 45° 最小。提高渗透水压可显著降低张开型裂纹的启裂强度, 这一结果可为深部高应力岩体诱导破裂提供新的思路。

关键词: 岩石力学; 渗透水压力; 张开型裂纹; 应力强度因子; 裂纹启裂; 断裂破坏准则

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2012)07-1317-08

CRACK INITIATION CHARACTERISTICS OF OPENING-MODE CRACK EMBEDDED IN ROCK-LIKE MATERIAL UNDER SEEPAGE PRESSURE

LI Xibing, HE Xianqun, CHEN Hongjiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The law of opening-mode crack initiation and the evolution of crack tip stress intensity factor were detected considering the combined action of seepage pressure and far-field stress. Accordingly, the damage fracture mechanical model of rock-like material and the evolution equation of the crack tip stress intensity factor were proposed for pre-cracking rocks under the combined actions of compression-shear field and seepage field. The crack tip stress intensity factor was advised to be used as a criterion for judging the degree of rock crack initiation. The results show that: (1) Open crack tip stress intensity factor is influenced by confining pressure, seepage pressure, crack tip radius of curvature, as well as crack inclination angle. (2) Little change is observed in the cracking angle, which maintains about 70.5° with the pre-crack angle varying. (3) The cracking strength is inverse proportion to the seepage pressure, crack length and the crack tip radius of curvature, while in direct proportion to the confining pressure. Also the crack angle is responsible for the crack strength. The case studies indicate that the uses of different crack initiation criteria all lead to an identical tendency that the crack initiation

收稿日期: 2012-03-25; **修回日期:** 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50934006); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732004)

作者简介: 李夕兵(1962-), 男, 1986年毕业于中南矿冶学院采矿专业, 现任“长江学者”特聘教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: xbli@csu.edu.cn.

strength decreases with the increase of the seepage pressure. The laws that the crack initiation strength is inverse proportion to the seepage pressure and proportion to confining pressure are further verified by conducting experiments under various experiments. When the crack angle is 30°, the crack initiation strength is maximal, the crack angle of 60° next and 45° last. It is worthwhile to pay attention to the fact that increasing the seepage pressure would result in the decrease of the crack initiation strength, enlightening the prospect of easier ore extraction under high stress by hydraulically induced cracking.

Key words: rock mechanics; seepage pressure; opening-mode crack; stress intensity factor; crack initiation; fracture failure criteria

1 引言

岩体内微裂隙的成核、延伸、聚结及裂隙间相互作用等都可显著影响岩体自身力学性质，微裂隙的扩展、演化可逐渐降低岩体强度并最终导致断裂破坏的发生^[1-2]。裂隙岩体在应力和渗流耦合作用下，裂纹的启裂、扩展、贯通以及分支裂纹的产生等一系列劣化趋势有所加剧，这一现象已经引起很多学者的注意。黄明利等^[3-5]在压剪条件下对岩石裂纹的贯通机制进行了大量试验和理论研究，指出：如裂纹分布状况确定，裂纹的萌生、延伸以及贯通机制取决于侧压、裂纹接触面上的摩擦因数以及裂纹尖端的应力 - 应变场等因素。张敦福等^[6]对椭圆形裂纹在不同围压和裂隙水压力下的启裂特性进行了研究；M. Oda^[7]研究了渗流场与应力场耦合作用下的等效连续介质模型；赵延林等^[8]对渗透压作用下压剪岩石裂纹损伤断裂机制进行了详细的研究，并建立压剪应力场和渗流场共同作用下岩石裂纹体的损伤断裂力学模型以及考虑岩桥损伤所引起的附加应力强度因子演化方程。

目前，有关岩石断裂的试验，绝大部分岩石试件带有张开型裂纹，事实上，无论自然条件下还是人工预制情况下，要使岩石裂纹完全闭合很难做到^[9]。对于带有张开型裂纹的岩石，其裂纹上、下表面间有一定宽度，从而使两表面无法接触^[10]。因自然环境中含水裂纹工程岩体往往存在密布的张开型裂纹，故针对水 - 岩相互作用下岩石裂隙萌生、演化问题的研究具有重要的工程实际意义。为此，本文以岩石断裂力学为基础，同时考虑裂隙中渗透水的压力对张开型裂纹的尖端应力场从启裂到扩展、联接演化全过程中所产生的影响，探讨渗透水压力作用下裂纹尖端的 I, II 型应力强度因子，综合分析渗透水压力 - 应力共同作用下裂纹的启裂情况。并通过试验验证了启裂强度与渗透水压成反比关系，这

一试验结果可为深部高应力岩体的经济、高效开挖提供参考：在开挖面附近破碎岩体区域，注水施压以弱化岩体，降低岩体裂纹启裂强度，加快掘进机掘进速度，从而实现深部高应力条件下矿体的连续开采。

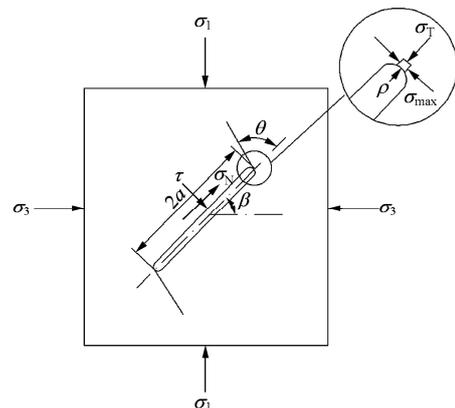
2 渗透水压作用下张开型裂纹启裂特性分析

2.1 张开型裂纹尖端应力强度因子计算

压剪条件下含水张开型裂纹示意图如图 1 所示，图中， a 为裂纹半长， θ 为翼型裂纹萌生、扩展方向与预制裂纹倾角之间的夹角。由弹性力学理论可知，用远场压应力 σ_1 和 σ_3 (以压为正) 表示的主裂纹表面应力 τ ， σ_N 和 σ_T 的表达式分别如下：

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2\beta) \\ \sigma_N &= \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\beta)] - p \\ \sigma_T &= \frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\beta)] - p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： β 为裂纹面与 σ_3 方向的夹角； p 为裂纹表面作用的渗透水压力； τ 为主裂纹面上的剪应力； σ_N 和 σ_T 分别为主裂纹面上的法向压应力和横向压应力^[11]，其中横向压应力平行于裂纹的走向，在裂纹厚度



(a) 压剪条件下含水张开型裂纹受力图

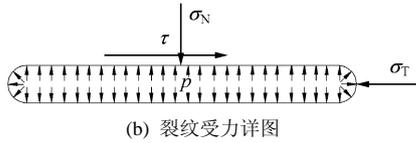


图 1 压剪条件下含水张开型裂纹示意图

Fig.1 Sketch of opening-mode crack under combined actions of compression-shear and seepage pressure

等于 0，也就是裂纹尖端的曲率半径 $\rho=0$ 时，该横向压应力不会对裂纹启裂产生影响。为了方便，本文定义 $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$ 为载荷比例系数，且有 $\sigma_3 = \lambda \sigma_1$ 。

对于张开型裂纹，当其厚度非 0，即尖端的曲率半径 $\rho \neq 0$ 时，平行于裂纹的横向压应力 $\sigma_T \neq 0$ 。此时， σ_T 会对裂缝尖端起到拉伸作用，N. I. Muskhelishvili^[12]认为：对任意半长分别等于 a 和 b 的椭圆来说，横向压应力 σ_T 会对裂纹顶点周围区域施加一垂直于 σ_T 的拉伸作用，此拉伸应力的最大值在顶点处出现，该最大值的大小等于横向压应力 σ_T (见图 1(a))。此时，该拉应力产生的 I 型应力强度因子为

$$K_{I(T)} = \sigma_T \sqrt{\rho/a} \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

当 $\rho/a \rightarrow 0$ 时，式(2)成立。类似地，另一因法向压应力而产生的法向强度因子可表示为

$$K_{I(N)} = -\sigma_N \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

因此，张开型裂纹的 I 型应力强度因子为

$$K_I = K_{I(T)} + K_{I(N)} = \sigma_T \sqrt{\rho/a} \sqrt{\pi a} - \sigma_N \sqrt{\pi a} = \sqrt{\pi a} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta)] - p \right\} \sqrt{\rho/a} - \sqrt{\pi a} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta)] - p \right\} \quad (4)$$

张开型裂纹的 I 型应力强度因子随裂纹倾角变化曲线如图 2 所示，由图可知，随着裂纹倾角的增大，张开型裂纹的 I 型应力强度因子将逐步减小。

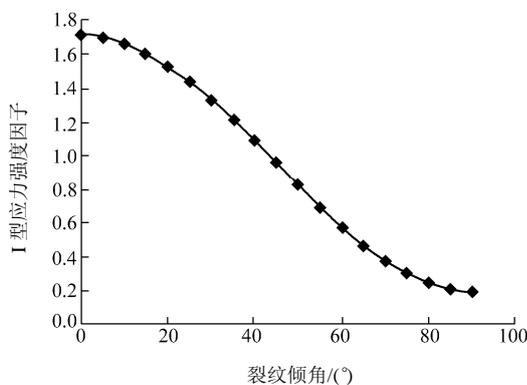


图 2 张开型裂纹的 I 型应力强度因子随裂纹倾角变化曲线
Fig.2 Stress intensity factor of type I vs. crack inclination for opening-mode crack

根据断裂力学知识，此时裂纹的 II 型应力强度因子可表示为

$$K_{II} = \tau_{eff} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

式中： τ_{eff} 为等效剪应力(位于主裂纹面)， $\tau_{eff} = \tau + \mu |\sigma_N|$ ，其中， μ 为两裂纹面间的摩擦因数。由于张开裂纹的两裂纹面并不接触，因此裂纹之间不存在摩擦力，即 $\tau_{eff} = \tau$ 。结合式(1)和(5)得

$$K_{II} = -\tau \sqrt{\pi a} = -\frac{1}{2} \sqrt{\pi a} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2\beta) \quad (6)$$

下文根据张开型裂纹的启裂判据对裂纹面上的临界渗透水压进行推导。

(1) 对于 I 型裂纹，当 $K_I = K_{IC}$ (K_{IC} 为 I 型裂纹断裂韧度) 时，裂纹扩展开始，此时的裂纹内临界渗透压 $p_{I,max}$ 满足以下关系式：

$$p_{I,max} = \frac{K_{IC} + \sigma'_N \sqrt{\pi a} - \sigma'_T \sqrt{\pi \rho}}{\sqrt{\pi a} - \sqrt{\pi \rho}} \quad (7a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_N &= \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta)] \\ \sigma'_T &= \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta)] \end{aligned} \right\} \quad (7b)$$

式中： σ'_N ， σ'_T 分别为无水压作用下主裂纹的远场法向应力和横向压应力。

(2) 对于 II 型裂纹，当 $K_{II} = K_{IIC}$ (K_{IIC} 为压剪状态下岩石断裂韧度) 时，裂纹在剪切作用下扩展，此时由式(6)可知， K_{II} 与内临界渗透压无关，即如果裂纹发生 II 型剪切断裂，与内临界渗透压无关。

2.2 渗透水压作用下裂纹启裂角求解

对于复合型断裂，目前主要采取 3 种理论分析裂纹问题：一是运用最大周向应力原理^[13]；二是利用应变能释放率理论^[14]；最后是借助应变能密度理论^[15]。

(1) 最大周向应力原理相对直观，用于分析岩石类准脆性材料的断裂比较合适。一旦周向应力处于临界值，沿着裂纹尖端迹线处(此迹线处有最大周向应力)将萌生翼形裂纹并由此向四周延伸。此时，位于裂纹尖端处的周向拉应力为

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) + \sigma_T \sin^2 \theta \quad (8)$$

式(8)中因为第二项是非奇异项，可忽略。这时 θ 方向上应力强度因子变为

$$K_I(\theta) = K_I \cos^3 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

此时，翼裂纹初始启裂角 θ_0 可由下式来求得

$$\left. \begin{aligned} \partial K_I(\theta) / \partial \theta &= 0 \\ \partial^2 K_I(\theta) / \partial \theta^2 &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)，整理后得

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (11)$$

当裂纹尖端开始有翼裂纹出现时， $K_I(\theta_0) = K_{IC}$ 。针对有限厚度的张开型裂纹，在分析翼裂纹萌生时，因考虑应力奇异的影响，所以同样考虑了裂纹尖端的曲率半径、主裂纹方位角以及荷载等因素的作用。

(2) 在应变能释放率理论中，翼形裂纹将萌生并扩展于应变能释放率达到最大值的方向。应变能释放率 $G(\theta)$ 可表示为

$$G(\theta) = \frac{4}{E} \left(\frac{1 + \frac{\theta}{\pi}}{1 - \frac{\theta}{\pi}} \right)^{-\frac{\theta}{\pi}} [(1 + 3 \cos^2 \theta) K_I^2 - 4 K_I K_{II} \sin(2\theta) + (9 - 5 \cos^2 \theta) K_{II}^2] \quad (12)$$

将式(4)，(8)代入到式(12)中，翼形裂纹启裂角及启裂荷载可通过下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \partial G(\theta) / \partial \theta &= 0 \\ \partial^2 G(\theta) / \partial \theta^2 &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

图 3 为启裂角度与预制裂纹角度的关系，由图可知，启裂角随预制裂纹角度的变化不大，主要集中在 70° 左右，这与上述理论相一致。

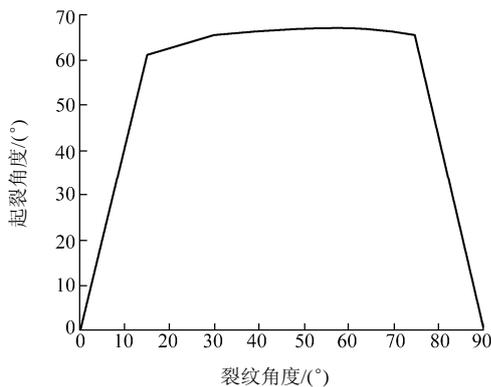


图 3 启裂角度与裂纹角度的关系
Fig.3 Crack initiation angle vs. crack angle

2.3 渗透水压作用下的裂纹初裂强度求解

利用周群力^[16]压剪断裂准则，考虑渗透水压作用下压剪岩石裂纹初始启裂强度。周群力^[16]认为， K_I ($K_I < 0$)对压剪断裂起遏制作用，其建立的周群

力压剪断裂准则为

$$\lambda_{12} \sum K_I + \sum K_{II} = K_{IIc} \quad (14)$$

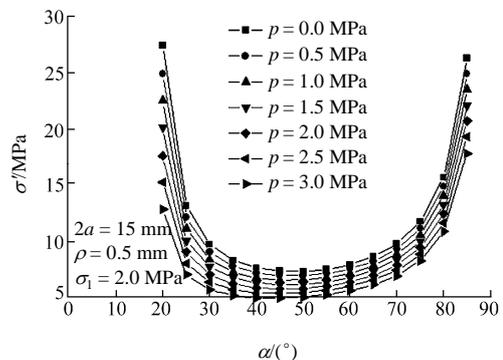
式中： λ_{12} 为压剪系数。结合式(4)和(6)，能够求解出渗透水压作用下岩石压剪裂纹初始启裂强度为

$$\sigma' = \frac{2K_{IIc} / \sqrt{\pi a} + A \sigma_3 - 2p \lambda_{12} (1 - \sqrt{\rho/a})}{B} \quad (15)$$

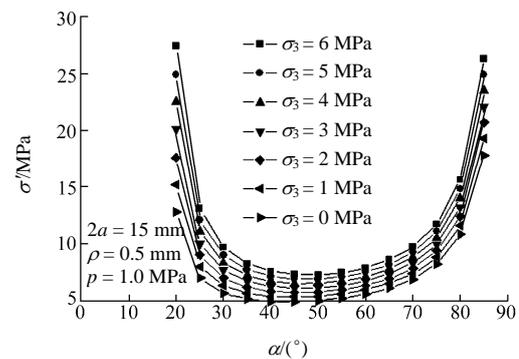
其中，

$$\left. \begin{aligned} A &= \sin(2\beta) + \lambda_{12} [1 - \cos(2\beta)] - \sqrt{\rho/a} [1 + \cos(2\beta)] \\ B &= \sin(2\beta) + \lambda_{12} [\sqrt{\rho/a} [1 - \cos(2\beta)] - [1 + \cos(2\beta)]] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

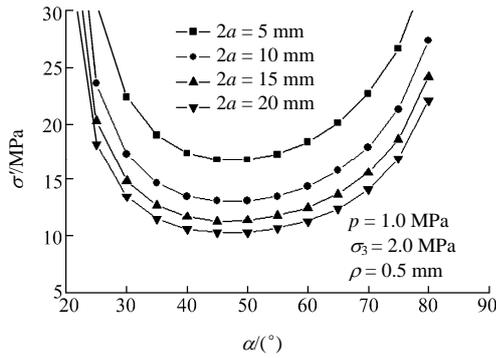
图 4 为渗透水压 p 、围压 σ_3 、裂纹长度 $2a$ 和裂纹尖端曲率半径 ρ 对裂纹启裂强度的影响。由图 4(a)可知，渗透水压力的大小与裂纹启裂强度成反比，即渗透水压力越大，裂纹启裂强度越小，并且裂纹启裂强度还与裂纹的倾角有关。由图 4(b)可知，围压的大小与裂纹启裂强度成正比，即围压越大，裂纹启裂强度也越大。由图 4(c)可知，裂纹长度与裂纹启裂强度成反比，即裂纹长度越大，裂纹启裂强度也越小。由图 4(d)可知，裂纹尖端曲率半径与裂纹启裂强度成反比，即裂纹尖端曲率半径越大，裂纹启裂强度也越小。



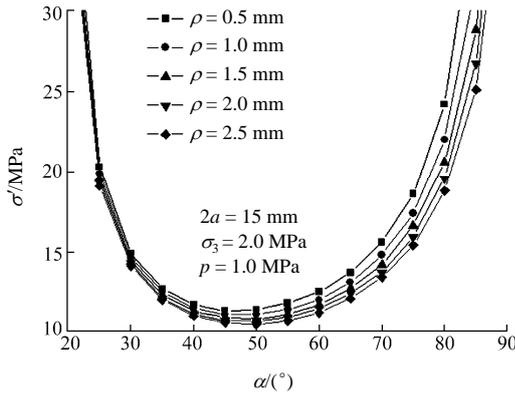
(a) 渗透水压力对岩石裂纹启裂强度的影响



(b) 围压对岩石裂纹启裂强度的影响



(c) 裂纹长度对岩石裂纹启裂强度的影响



(d) 裂纹尖端曲率半径对岩石裂纹启裂强度的影响

图 4 各因素对岩石裂纹启裂强度的影响

Fig.4 Effects of different factors on crack initiation strength

3 张开型裂纹闭合后启裂特性分析

3.1 张开型裂纹闭合后尖端应力强度因子计算

张开型裂纹可能由于压缩作用的影响而发生闭合，还可能进一步引起张开型裂纹面上的边界受力状况发生改变。实际上，应力强度因子的大小很大程度上取决于裂纹面的边界条件，故而很有必要对张开型裂纹启裂扩展前的闭合情况进行分析^[10]。下文主要讨论含水张开型裂纹闭合后的受力情况。

裂纹闭合后，其上、下两表面能够相互接触，可视为一条裂纹。沿裂纹面的法向不能产生相对位移，但可沿其上、下表面的切向产生相对滑动。设 $\bar{\sigma}_N$ 和 $\bar{\tau}$ 分别为作用在裂纹面上的法向应力和切向应力， σ'_N 和 f 为裂纹面之间的相互作用。由断裂力学可知，不同载荷作用产生的相应应力强度因子为同类时可叠加。据此原理经等价转化，则图 5(a) 所示的受力状况可与图 5(b) 和 5(c) 二者叠加等效。

张开型裂纹闭合后受力分析图如图 6 所示，由于裂纹在闭合过程中受力的非均衡性，从而导致上、下裂纹面之间不能完全闭合，此处引入一系数 ξ (裂纹张开面积与总面积的比值) 来表征裂纹的闭合程度。因此，渗透水压力 p 的贡献变为了 ξp 。

由于裂纹面之间部分闭合，使得应力传递发生变化，引入传压、传剪系数 C_n ， C_v ，因此可知，裂纹边上实际传递的法向应力 $\bar{\sigma}_N$ 和切向应力 $\bar{\tau}$ 的表达式分别为(这里同样取压为正)：

$$\bar{\sigma}_N = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_n) [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] - \xi p \tag{17}$$

$$\bar{\tau} = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_v) (1 - \lambda) \sin(2\beta) \tag{18}$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} C_n &= \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E}{(1-\nu^2)K_n}} \\ C_v &= \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E}{(1-\nu^2)K_s}} \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

式中： σ_1^e 为裂纹面闭合荷载^[10]； ν 为岩石材料的泊松比； E 为岩石材料的弹性模量； K_n ， K_s 分别为裂纹的法向、切向刚度。

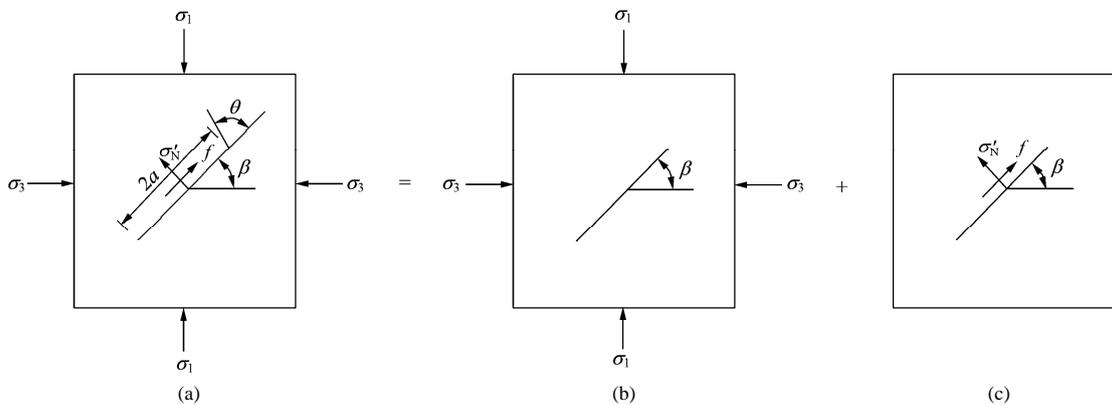
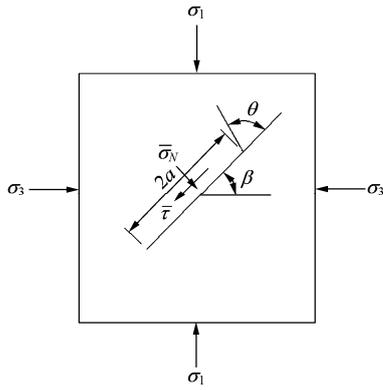
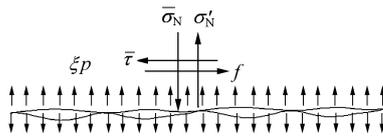


图 5 受力状态分解转换图

Fig.5 Force decomposition diagrams



(a) 压剪条件下张开型裂纹闭合后受力图



(b) 张开型裂纹闭合后受力详图

图 6 张开型裂纹闭合后受力分析图

Fig.6 Force analysis of opening-mode crack after closure

由于剪应力的存在导致裂纹面滑移，裂纹面为部分闭合，因此会产生一个摩擦阻力 f ，其计算公式为

$$f = \mu \bar{\sigma}_N = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_n) \mu [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] - \mu \xi p \quad (20)$$

剪切力 $\bar{\tau}$ 必须克服这一摩擦阻力，因此裂纹滑移的有效剪切应力 τ_{eff} 为

$$\tau_{\text{eff}} = \bar{\tau} - f = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_v) (1 - \lambda) \sin(2\beta) - \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_n) \mu [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] + \mu \xi p \quad (21)$$

裂纹面上有效正应力和有效剪应力分别为

$$\sigma_N^* = \bar{\sigma}_N - \sigma_N' \quad (22a)$$

$$\tau^* = \bar{\tau} - f \quad (22b)$$

由裂纹表面间的相互滑动或者有相互滑动的趋势产生的摩擦力决定了裂纹上、下 2 个表面之间的剪切力，此力满足莫尔 - 库仑准则：

(1) 当 $\bar{\tau} \leq C_j + C_n \mu \bar{\sigma}_N$ 时，有

$$f = \bar{\tau} \quad (23a)$$

(2) 当 $\bar{\tau} > C_j + C_n \mu \bar{\sigma}_N$ 时，有

$$f = C_j + C_n \mu \bar{\sigma}_N \quad (23b)$$

式中： C_j 为裂纹间黏聚力。

当 C_j 略去不计时，裂纹面上有效应力为

$$\tau^* = \begin{cases} 0 & (f \leq C_n \mu \bar{\sigma}_N) \\ f - C_n \mu \bar{\sigma}_N & (f > C_n \mu \bar{\sigma}_N) \end{cases} \quad (24)$$

根据以上推导，可以得到张开裂纹在闭合后在渗透压作用下压剪岩石裂纹应力强度因子为

$$K_I = \sqrt{\pi a} \cdot \left\{ -\frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_n) [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] + \xi p \right\} \quad (25)$$

$$K_{II} = -\sqrt{\pi a} \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - \lambda) \sin(2\beta) + \mu \xi p - C_n \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} \mu [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] \right\} \quad (26)$$

对于 I 型裂纹，当 $K_I = K_{IC}$ 时，裂纹扩展开始，此时的裂纹内临界渗透压 $p_{I\text{max}}$ 满足以下关系式：

$$p_{I\text{max}} = \left\{ K_{IC} / \sqrt{\pi a} + \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - C_n) [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)] \right\} / \xi \quad (27)$$

对于 II 型裂纹，当 $K_{II} = K_{IIC}$ 时，裂纹扩展开始，此时的裂纹内临界渗透压 $p_{II\text{max}}$ 满足：

$$p_{II\text{max}} = \frac{K_{IIC} / \sqrt{\pi a} + \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} (1 - \lambda) \sin(2\beta)}{\mu \xi} - \frac{C_n \frac{\sigma_1 - \sigma_1^e}{2} \mu [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos(2\beta)]}{\mu \xi} \quad (28)$$

3.2 渗透水压作用下张开型裂纹闭合后初裂强度求解

(1) 如节 2.3 所述，采用周群力压剪断裂准则 (式(14))，考虑渗透压力作用求解张开型裂纹闭合后压剪裂纹初始起裂强度：

$$\sigma' = -\frac{2K_{IIC} / \sqrt{\pi a} - 2(\lambda_{12} + \mu) \xi p + B_1 \sigma_3}{A_1} \quad (29)$$

其中，

$$\begin{cases} A_1 = -(\lambda_{12} + \mu)(1 - C_n)[1 + \cos(2\beta)] + (1 - C_v) \sin(2\beta) \\ B_1 = -(\lambda_{12} - \mu)(1 - C_n)[1 - \cos(2\beta)] + (1 - C_v) \sin(2\beta) \end{cases} \quad (30)$$

(2) 基于最大周向应力准则考虑渗透水压力作用下初裂强度为

$$\sigma' = -\frac{\sqrt{3}K_{IC} / \sqrt{\pi a} - \mu \xi p + B_2 \sigma_3}{A_2} \quad (31)$$

其中，

$$\begin{cases} A_2 = -\mu(1 - C_n)[1 + \cos(2\beta)] + (1 - C_v) \sin(2\beta) \\ B_2 = \mu(1 - C_n)[1 - \cos(2\beta)] + (1 - C_v) \sin(2\beta) \end{cases} \quad (32)$$

4 算 例

假设一岩石产生压剪断裂：裂纹半长 $a = 2 \text{ cm}$ ， $\beta = 50^\circ$ ， $K_{IIC} = 1.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ， $\lambda_{12} = 1.5$ ， $\mu = 0.6$ 。假定裂纹表面开始是张开的，裂纹尖端曲率半径 $\rho = 0.2 \text{ mm}$ ，闭合后裂纹面内连通率 $\xi = 0.6$ ，裂纹内渗透水压为 p ，将以上参数代入式(15)，(29)和(31)，则可以得到分别基于周群力^[16]压剪断裂准则和最大周向应力准则，渗透水压力作用下岩石裂纹初裂强度曲线如图 7 所示。

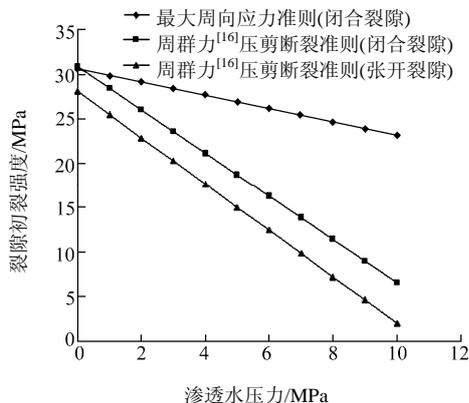


图 7 渗透水压力与裂纹初裂强度关系曲线
Fig.7 Crack initiation strength vs. seepage pressure

由图 7 可知：无论是周群力^[16]压剪断裂准则还是最大周向应力准则，得到岩石裂纹初裂强度都有随渗透水压力增大而减小的趋势，只是基于最大周向应力准则计算而得的减小趋势略缓一些，此结论与 G. C. Sih^[15]是一致的。此外，张开型裂纹的启裂强度较闭合型裂纹启裂强度小，这主要是因为张开型裂纹表面不存在抵抗裂纹启裂的摩擦力。

5 试验验证

使用预制的含裂隙类岩石试件进行三轴试验。裂隙角为 45° ，围压为 4 MPa 时不同渗透水压试验条件下应力 - 应变曲线如图 8 所示。相同渗透水压不同围压情况下的应力 - 应变曲线如图 9 所示。不同裂隙角度下的应力 - 应变曲线如图 10 所示。

根据图 8 可知，在相同裂隙角度、相同围压情况下，随着水压力的不断增加，裂隙启裂强度逐渐减小。这是因为裂隙间渗透水压力的作用使得作用在裂隙表面的正应力弱化减小，从而使裂隙面上的有效剪切应力得到加强。可见，水压在裂隙启裂过

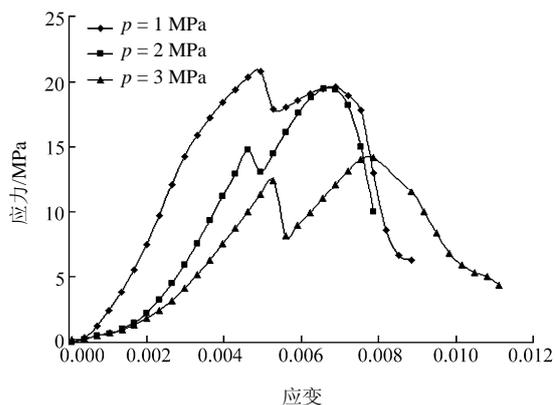


图 8 相同围压不同渗透水压时应力 - 应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves under conditions of same confining pressure and different seepage pressures

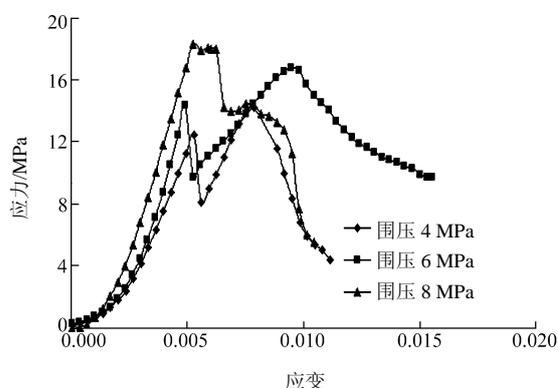


图 9 相同渗透水压不同围压时应力 - 应变曲线
Fig.9 Stress-strain curves under conditions of same seepage pressure and different confining pressures

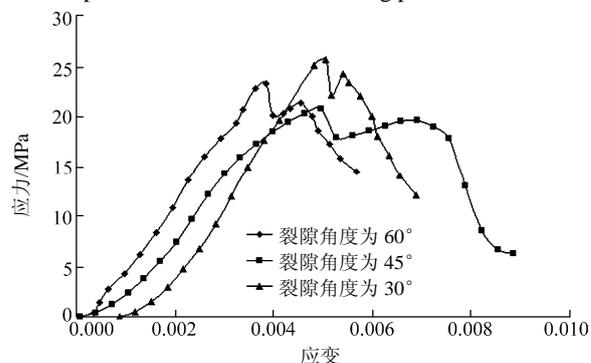


图 10 不同裂隙角度时应力 - 应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves under different crack angles

程中起了积极作用，这与本文的理论研究是一致的，由式(15)及(29)可知，裂隙初始起裂强度与水压大小成反比。

由图 9 可看出，在相同裂隙角度、相同渗透水压力情况下，随着围压的不断增大，裂隙启裂强度逐渐增大。这主要是由于围压在裂隙启裂过程中起了抑制作用，这也与前述理论研究一致。

由图 10 可知，在相同水压力、相同围压情况

下,随着裂隙角度的变化,裂隙启裂强度也随之变化,裂隙角度为 30° 时裂隙启裂强度最大, 60° 次之, 45° 最小,这与图4所示理论研究结果是一致的。

6 结 论

本文着重研究了张开型裂纹尖端应力强度因子与围压、渗透水压力、裂纹尖端曲率半径以及裂纹倾角等影响因素之间的关系,得到如下主要结论:

(1) 裂纹启裂强度与围压大小成正比,而与渗透水压力 p 、裂纹长度 $2a$ 、裂纹尖端曲率半径 ρ 成反比,此外还与裂纹倾角呈现出先减后增的趋势;而裂纹启裂角随预制裂纹角度的变化不大,其值稳定在 70.5° 左右。

(2) 经算例验证,无论是运用周群力压剪断裂准则还是最大周向应力准则进行验算,得到岩石裂纹初裂强度都有随渗透水压力增大而减小的趋势。此外,张开型裂纹的启裂强度较闭合型裂纹启裂强度小。

(3) 试验结果验证了裂纹启裂强度与渗透水压力大小成反比,而与围压大小成正比。当裂隙角度为 30° 时裂纹启裂强度最大, 60° 次之, 45° 最小,这与理论研究中裂纹启裂强度与裂隙角度呈现出的先减后增趋势一致。

(4) 类岩石材料的裂纹初裂强度有随渗透水压力的增大而减小的趋势。这为深部高应力条件下经济、高效地实现岩体的连续开采提供了一新的思路。

参考文献(References):

- [1] 陈卫忠,朱维申,李术才.节理岩体断裂损伤耦合的流变模型及其应用[J].水利学报,1999,(12):33-37.(CHEN Weizhong, ZHU Weishen, LI Shucai. Rheology and fracture damage-coupled model for rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (12): 33 - 37.(in Chinese))
- [2] 杨延毅.裂隙岩体非线性流变性与裂隙损伤扩展过程关系研究[J].工程力学,1994,11(2):81-90.(YANG Yanyi. The underlying relationship between nonlinear rheological property of fissured and damage development[J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(2): 81 - 90.(in Chinese))
- [3] 黄明利.岩石多裂纹相互作用破坏机制的研究[博士学位论文][D].沈阳:东北大学,1999.(HUANG Mingli. Research on fracture mechanism by of interaction of multi-crack in brittle rock[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 1999.(in Chinese))
- [4] WONG R H C, CHAU K T. The coalescence of frictional cracks and the shear zone formation in brittle solids under compressive stresses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 335.e1 - 335.e12.
- [5] WONG R H C, CHAU K T, LIN P, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws(part I): experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 909 - 924.
- [6] 张敦福,朱维申,李术才,等.围压和裂隙水压力对岩石中椭圆裂纹初始开裂的影响[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增2):4721-4725.(ZHANG Dunfu, ZHU Weishen, LI Shucai, et al. Influence of confining pressure and fissure water pressure on initial opening for ellipse fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4721 - 4725.(in Chinese))
- [7] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1845 - 1856.
- [8] 赵延林,曹平,林杭,等.渗透压作用下压剪岩石裂纹流变断裂贯通机制及破坏准则探讨[J].岩土工程学报,2008,30(4):511-517.(ZHAO Yanlin, CAO Ping, LIN Hang, et al. Study on fracture mechanism and rheologic fracture failure criterion of compressive-shear rock crack under saturated pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 511 - 517.(in Chinese))
- [9] 朱珍德,郭海庆.裂隙岩体水力学基础[M].北京:科学出版社,2007:37.(ZHU Zhende, GUO Haiqing. Hydraulics basis of fractured rock[M]. Beijing: Science Press, 2007: 37.(in Chinese))
- [10] 李强.压缩作用下岩体裂纹启裂扩展规律及失稳特性的研究[博士学位论文][D].大连:大连理工大学,2008.(LI Qiang. Study on laws of crack initiation, extension and failure in rock masses under compression[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.(in Chinese))
- [11] 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 Yinping, YANG Chunhe. 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.(in Chinese))
- [12] MUSKHELISHVILI N I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity[M]. Leyden: Noordhoff, 1953: 176 - 194.
- [13] ERDOGAN F, SIH G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 519 - 527.
- [14] HUSSAIN M A, PU S L, UNDERWOOD J H. Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II[C]// IRWIN G. R. ed. Fracture Analysis: Proceedings of the 1973 National Symposium on Fracture Mechanics, Part II. Maryland: ASTM STP, 1974: 2 - 28.
- [15] SIH G C. Strain energy density factor applied to mixed-mode crack problems[J]. International Journal of Fracture, 1974, 10(3): 305 - 321.
- [16] 周群力.岩石压剪断裂判据及其应用[J].岩土工程学报,1987,9(3):33-37.(ZHOU Qunli. Compress shear fracture criterion of rock and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 33 - 37.(in Chinese))