

纯剪应力作用下岩石的Ⅱ型断裂韧度

何江达 范景伟

(成都科技大学)

摘 要: 本文根据含Ⅱ型裂纹介质在纯剪应力场作用下, 裂纹尖端的不同周向上, 存在着某个方向拉应力最大, 某个方向的剪应力最大, 讨论了裂纹初始扩展(断裂)可能呈拉裂或剪坏两种特征, 由此定义了两类相应的断裂韧度, 并导出了两者的关系式。

文中还介绍了笔者室内测定岩石断裂韧度的试验成果及利用剪切面含50%裂隙现场大剪试验资料分析岩石断裂韧度的方法, 并讨论了实际含裂隙岩体断裂分析如何选取这两类断裂韧度值。

关键词: Ⅱ型裂纹、断裂特征、直剪试验

中国图书类号: TV313

岩石材料赋存着繁多的节理和裂隙, 在地应力或外荷载作用下, 裂隙尖端附近产生不同程度应力集中, 致使岩体发生低应力脆性断裂。岩石的断裂韧度是表征岩石材料抵抗断裂破坏能力的指标, 是分析岩体断裂强度的重要参数, 因此, 如何获取真实反映岩石材料物理力学性状的断裂韧度, 一直为岩土工程界所关注。

目前, 工程上普遍沿用金属材料断裂韧性指标的测试方法, 对于表征岩石材料在剪应力作用下的Ⅱ型断裂韧度多采用“四点剪切”方法测定, 然而, 大量试验表明, 由该方法测定岩石的Ⅱ型断裂韧度, 试样断裂时, 裂纹的上下表面不是在同一平面内按照相反的方向相互滑移, 而是沿裂角 $\theta_0 = -70^\circ$ 左右方向上拉开^[1], 显然不符合欧文(Irwin)关于Ⅱ型裂纹的定义。近年来有学者采用直剪试验, 通过推求垂直应力为零的临界剪应力来分析岩石的Ⅱ型断裂韧度, 该试验结果符合Ⅱ型裂纹的面内剪切破坏特征, 但其断裂韧度量值较“四点剪切”方法测定值大, 这就带来在纯剪应力作用下, 同一种岩石材料由于试验方法不同而存在二种Ⅱ型断裂韧度, 如何认识岩石这两种断裂特征量及相互关系, 尤其是实际岩体断裂分析中应怎样取值, 在工程上还存在一定混乱。本文从分析纯剪应力场作用下裂纹尖端附近应力场入手, 讨论Ⅱ型纹可能的扩展(断裂)方式, 由此揭示“四点剪切”方法和直剪试验所测定二种断裂韧度的不同力学含义, 并推导二种断裂韧度的关系式, 为验证分析结论, 文中还介绍了笔者利用室内试验和现场大剪资料分析岩石材料二种Ⅱ型断裂韧度的成果。

1 裂纹扩展方式及断裂韧度

如图1所示, 含单裂纹介质体在纯剪应力作用下, 由 Westergaard 方法可导出裂纹尖

端附近处的应力表达式^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta\Pi} &= -\frac{3K_{\Pi}}{2\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \sin\theta \\ \sigma_{r\Pi} &= \frac{K_{\Pi}}{2\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} (3\cos\theta - 1) \\ \tau_{r\theta\Pi} &= \frac{K_{\Pi}}{2\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} (3\cos\theta - 1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\theta\Pi}$ 、 $\sigma_{r\Pi}$ 、 $\tau_{r\theta\Pi}$ 分别为裂纹尖端附近某点元切向应力、法向应力、剪应力。 K_{Π} 为Ⅱ型断裂强度因子。

从应力观点来看, 裂纹的扩展条件及方式将取决于在外荷载作用下, 裂纹周边上各点应力状态与材料强度的对比关系。由于岩石材料一般抗剪强度大于单轴抗拉强度, 抗压强度大于抗剪强度, 因此决定裂纹开裂的应力分量是 $\sigma_{\theta\Pi}$ 和 $\tau_{r\theta\Pi}$, 下面分别求极值。

由条件:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{\theta\Pi}}{\partial \theta} &= -\frac{3K_{\Pi}}{4\sqrt{2\pi r}} (3\cos\theta - 1) \cos\frac{\theta}{2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\Pi}}{\partial \theta^2} &= -\frac{3K_{\Pi}}{4\sqrt{2\pi r}} \left[-\frac{1}{2} \sin\frac{\theta}{2} (3\cos\theta - 1) - 3\sin\theta \cos\frac{\theta}{2} \right] < 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可判断只有 $3\cos\theta_0 - 1 = 0 (\theta_0 = 70.5^\circ)$, 才使 $\sigma_{\theta\Pi}$ 为极大, 并由式(1)可看出该方向上 $\sigma_{r\Pi} = \tau_{r\theta\Pi} = 0$ 即裂纹沿该方向呈单向拉应力状态。

同样由:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{r\theta\Pi}}{\partial \theta} &= -\frac{K_{\Pi}}{4\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} (9\cos\theta - 5) = 0 \\ \frac{\partial^2 \tau_{r\theta\Pi}}{\partial \theta^2} &= -\frac{K_{\Pi}}{4\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{2} \cos\frac{\theta}{2} (9\cos\theta - 5) - 9\sin\frac{\theta}{2} \sin\theta \right] < 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可求得只有 $\theta_0 = 0^\circ$, 才使 $\tau_{r\theta\Pi}$ 为极大, 同时在该方向上 $\sigma_{\theta\Pi} = \sigma_{r\Pi} = 0$, 即呈纯剪应力状态。

分别将 $\sigma_{\theta\Pi}$ 、 $\tau_{r\theta\Pi}$ 取得极值的 θ_0 代入式(1), 其极大值为:

$$\sigma_{\theta\Pi \max} = \frac{2K_{\Pi}}{\sqrt{6\pi r}} \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta\Pi \max} = \frac{K_{\Pi}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (5)$$

上述分析表明, 在纯剪应力作用下, 裂纹沿 $\theta_0 = 0^\circ$ 方向和 $\theta_0 = -70.5^\circ$ 方向 $\tau_{r\theta\Pi}$ 与 $\sigma_{\theta\Pi}$ 分别达到极大值, 由此裂纹的扩展方式及条件可表述为:

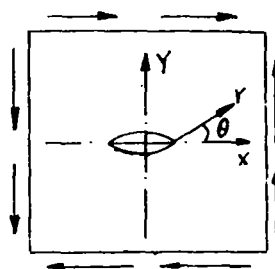


图1 剪应力作用下的Ⅱ型裂纹

1.1 沿 $\theta_0 = 0^\circ$ 方向, 裂纹呈剪切破坏特征, 其临界扩展条件为该方向最大剪应力等于岩石材料微观晶体间胶结面的抗剪强度 R_f (因胶结面强度一般较晶体强度低), 即

$$\tau_{\theta 0 \Pi \max} = R_f \quad (6)$$

将式(5)代入, 得

$$K_{\Pi} / \sqrt{2\pi r} = R_f \quad (6')$$

由此定义以剪切破坏为特征的 II 型断裂韧度为 $K_{\Pi C}$ 。因在直剪试验条件下, 裂纹初始沿 $\theta = 0^\circ$ 方向扩展, 反映了 II 型裂纹面内剪切破坏特征, 故可用该方法推求垂直应力为零相应临界 II 型应力强度因子来确定 $K_{\Pi C}$ 值。

1.2 沿 $\theta_0 = -70.5^\circ$ 方向, 裂纹呈拉裂性态, 其临界扩展条件为该方向最大切向拉应力等于岩石材料微观晶体间胶结面的抗拉强度 R_t , 即:

$$\sigma_{\theta \Pi \max} = R_t \quad (7)$$

代入式(4), 得:

$$\frac{2K_{\Pi}}{\sqrt{6\pi r}} = R_t \quad (7')$$

由此定义以拉裂为破坏特征的 II 型断裂韧度为 $K_{\Pi C}'$ 。因“四点剪切”方法所导出结果满足裂纹沿 $\theta_0 = -70^\circ$ 左右方向拉裂条件, 故采用该方法测定材料 $K_{\Pi C}'$ 是合理的。

应用式(6')及式(7')可导出反映二种破坏特征的 II 型断裂韧度关系:

$$K_{\Pi C} = \frac{2R_f}{\sqrt{3}R_t} K_{\Pi C}' \quad (8)$$

若近似用岩石宏观的抗剪强度 τ_f 和抗拉强度 σ_t 分别代换上式中的 R_f 与 R_t , 同时注意沿 $\sigma = 0^\circ$ 方向 $\sigma_{\theta \Pi} = 0$, 由摩尔库仑准则 $\tau_f = C$ (C 为岩石的凝聚力), 则:

$$K_{\Pi C} = \frac{2C}{\sqrt{3}\sigma_t} K_{\Pi C}' \quad (8')$$

由于岩石材料无论微观还是宏观上抗剪强度一般总大于单轴抗拉强度, 从上式可看出 $K_{\Pi C} > K_{\Pi C}'$, 这表明同一种岩石材料, 在纯剪应力作用下, 由直剪试验推求的 II 型断裂韧度往往比“四点剪切”方法所测定值高。

2 断裂韧度试验及成果分析

结合对某工程原位岩体断裂分析, 笔者采用三种方法分别测定正长岩和玄武岩的二类 II 型断裂韧度。

2.1 “四点剪切”试验

试样尺寸 $4.0 \times 4.0 \times 18.0 \text{ cm}$, 在跨中开一狭缝, 在压力机上加载, 采用美国进口的 AET-5000B 型声发射仪进行断裂监测, 每块试样狭缝两侧各放一个探头, 整个加载装置及监测系统如图 2 所示。

$K_{\Pi C}'$ 采用钢研院建议公式:

$$K_{IIc'} = \frac{Q}{BW^{1/2}} [1.442 - 5.08(\frac{a}{W} - 0.507)^2] \sec(\frac{\pi a}{2W}) \sqrt{\sin(\frac{\pi a}{2w})} \quad (9)$$

式中 $Q = P/3$, P 为施加荷载, a 为狭长度, w 为试样高度值。

整理资料得正长岩和玄武岩相应的 $K_{IIc'}$ 分别为 $87.4 \text{ kg/cm}^{3/2}$ 、 $121.6 \text{ kg/cm}^{3/2}$, 其初始破裂角均为 $-60^\circ \sim -70^\circ$ 。

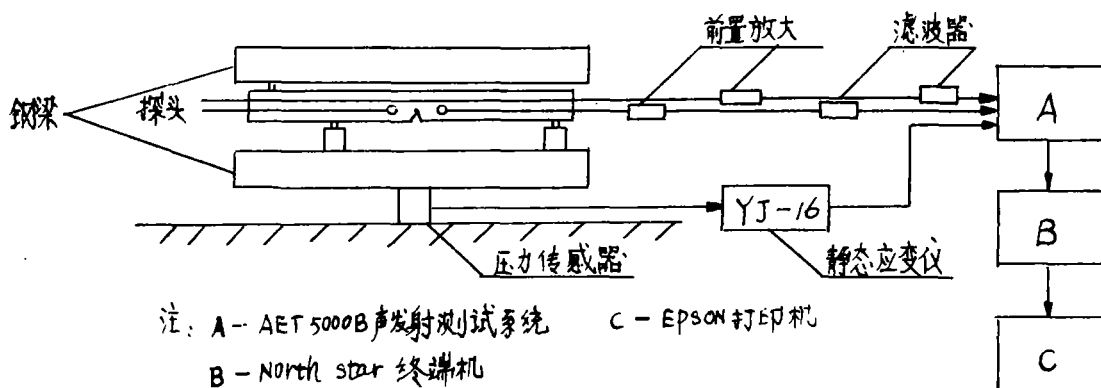


图2 四点剪切试验加载及测试系统示意

2.2 变切角压剪断裂试验

采用楔形剪切仪对玄武岩进行变切角断裂试验, 试样尺寸 $5.0 \times 5.0 \times 5.0 \text{ cm}$, 在中间锯一长 2.5 cm 裂纹。试验中观测沿剪切面的水平位移 S , 绘出 $\tau \sim S$ 曲线。初裂点不仅有明显响声, 而且在 $\tau \sim S$ 曲线上出现拐点, 本试验拟定切角 $\alpha = 45^\circ$ 、 50° 、 60° 、 70° , 每个角度做两块试样, 最后成果绘于图3中, 并用线性回归方法拟合出 T-II 型复合压剪断裂准则:

$$0.62K_I + K_{II} = 200.0 \text{ kg/cm}^{3/2} \quad (10)$$

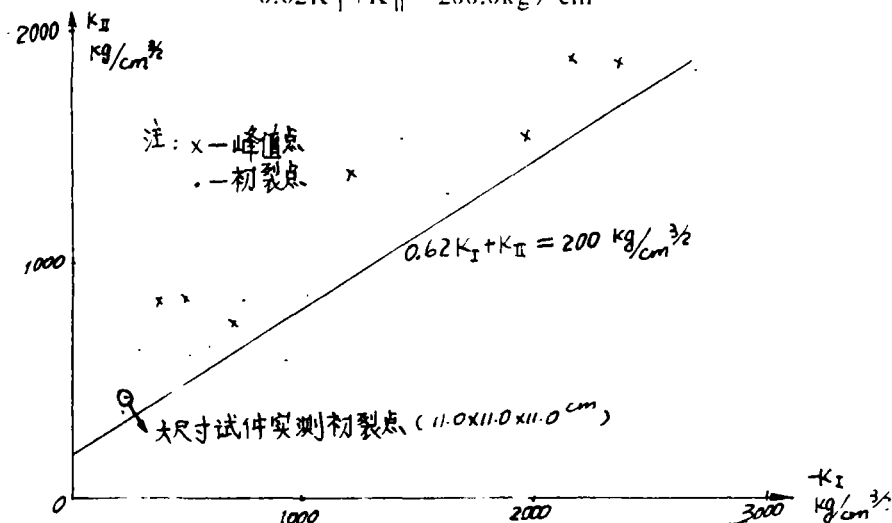


图3 变切压角剪断裂试验成果

由上式推出正应力为零(即 $K_I = 0$)条件相应的 II 型临界应力强度因子即为 K_{IIc}

$$K_{IIc} = 200.0 \text{ kg} / \text{cm}^{3/2}$$

2.3 剪切面含 50% 裂隙现场大剪试验

某工程在现场进行了大量直剪试验, 据资料介绍这些试件在剪切面包含有 50% 左右的原生裂隙^[1]。这种含裂试件的剪切破坏也反映了岩石断裂破坏的全过程。

含裂隙岩石变形特征一般包括压密、线弹性、裂隙稳定扩展及失稳断裂几种性态, 笔者选取现场大剪试验的比例根据作为裂纹开始扩展点, 即选取比例极限强度作为裂纹初始扩展的临界值。(比例极限强度约为峰值强度的 44~68%)

按文献^[3]推荐断裂准则分析 K_{IIc} 。当 $a/w = 0.5$ 时:

$$\text{断裂准则为: } \lambda_{12} K_I + K_{II} = K_{IIc} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{12} &= 1.2565f_g - 0.808f_{fg} \\ K_{IIc} &= (2.47C_g - 1.58C_{fg})\sqrt{W} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 f_g 、 C_g 为裂纹扩展时岩石的摩擦系数、凝结对、本文取比例极限强度相应值;
 f_{fg} 、 C_{fg} 为裂纹面间充填物之摩擦系数、凝结对; a 、 w 为裂纹长度与含裂纹面沿裂纹向长度。

由现场实测资料整理得^[3]:

正长岩比例极限强度:

$$\tau = \sigma \tan 40.0^\circ + 9.0 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \quad (13)$$

玄武岩比例极限强度:

$$\tau = \sigma \tan 45.0^\circ + 11.0 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \quad (14)$$

现场大剪试件尺寸 $50.0 \times 50.0 \text{ cm}$, 连通率 50%, $a = 25.0 \text{ cm}$, $w = 50.0 \text{ cm}$, 原生裂纹面一般为方解石膜或绿帘角闪钙膜, 其摩擦系数 $f_{fg} = 0.8 (38.7^\circ)$, $C_{fg} = 0$, 于是可导出 I-II 型复合压剪断裂准则:

$$\text{正长岩: } 0.41K_I + K_{II} = 157.2 \text{ Kg} / \text{cm}^{3/2} \quad (15)$$

$$\text{玄武岩: } 0.62K_I + K_{II} = 192.1 \text{ Kg} / \text{cm}^{3/2} \quad (16)$$

由此可推得正长岩 $K_{IIc} = 157.2 \text{ Kg} / \text{cm}^{3/2}$, 玄武岩 $K_{IIc} = 192.1 \text{ Kg} / \text{cm}^{3/2}$

3 结论

3.1 本文分析表明, 在纯剪应力场作用下, II 型裂纹存在沿 $\theta_0 = 0^\circ$ 方向剪坏和沿 $\theta_0 = -70.5^\circ$ 方向拉裂两种初始断裂模式, 由此可导出相应两种 II 型断裂韧度表征量。“四点剪切”方法所测定的断裂 K_{IIc}' 可以表征岩石材料抵抗拉坏断裂能力; 由直剪试验所推求的断裂韧度 K_{IIc} 反映了 II 型裂纹的面内剪切断裂特征, 可作为岩石材料抗剪切断裂参量。

3.2 文中导出了反映不同断裂特征的两种 II 型断裂韧度关系式, 由于岩石材料抗剪强度(凝结对)一般大于抗拉强度, 从而论证了由直剪试验所推求岩石 II 型断裂韧度大于

“四点剪切”方法所得结果, 本文所述断裂试验分析成果也反映了这一客观实际。

3.3 由含裂隙现场大剪试验资料推求岩石的断裂韧性指标是一种很有价值的实用方法, 本文在这方面作了初步尝试, 从对同一种岩石分别采用室内“变切角”方法和现场大剪试验分析结果来看, 二者所导出的压剪断裂准则及临界Ⅱ型断裂韧度 K_{IIc} 均非常接近, 说明选择含裂隙试件的比例极限作为裂纹的初始扩展点较合理, 其断裂韧度分析也是适宜的。

3.4 含裂隙原位岩体在压剪应力场作用下, 裂隙面一般呈剪切破坏, 而位于裂隙尖端附近的岩桥则可能呈拉裂或剪坏两种断裂形态, 因此, 在对原位裂隙岩体进行断裂分析时, 选择岩石Ⅱ型断裂韧性指标应以岩桥可能呈现的破坏形态为依据, 即若岩桥拉坏, 应选用由“四点剪切”方法测定Ⅱ型断裂韧度 K_{IIc}' ; 若岩桥剪坏, 则选用由直剪试验推求之Ⅱ型断裂韧性指标 K_{IIc} 。

参 考 文 献

- [1] 成都科技大学岩土力学教研室. 国家七·五科技攻关总报告. 1988年12月。
- [2] 李贺等编著. 岩石断裂力学. 重庆大学出版社, 1988年8月。
- [3] 周群力等. 混凝土重力坝与基岩胶结面用断裂力学方法计算的探讨. 水文地质工程地质, 1979年第6期。

Mode II Fracture Toughness of Rocks Subjected To Simple Shearing Stress

He Jiangda

Fan Jingwei

(Chengdu University Of Science and Technolgy)

Abstract: According to medium with mode II crack subjected to simple shearing stress, there exists separately a maximum of tensile stress and shearing stress along different direction on periphery of the crack tip. this paperd discusses two kind of initial propagation character of the crack caused by tensile or shearing stress, from this, defines correspondingly two sort of fracture toughness, further more, derives the relation between them.

In this paper, the experiment result of fracture toughness of rocks in laboratory and the method for analysing fracture toughness by means of the information in site shear test with 50% fissure on sheared plane are introduced, in addition, it is also discussed how to choose the two kind of fracture toughness in crack analysis for rock mass with intermittant joints.

Key words: Mode II fracture, Crack character, Direct shear test.