

15. 78-82

压应力作用下预制裂纹脆性材料的断裂特性

Fracture Characteristics of Brittle Material with Pre-crack under Compression

万玲 许江 尹光志 李贺
Wan Ling Xu Jiang Yin Guangzhi Li He

TU452

(重庆大学工程力学系, 重庆, 630044)

摘要 利用矿相显微镜和与之配套使用的微型加载装置, 对预制裂纹脆性材料的断裂特性进行了研究, 得出了在单轴及双轴应力作用下 $K_I - K_{Ic}$ 的变化关系: $\frac{K_I}{K_{Ic}} = 8.67 \times 10^{-7} \left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 - 0.84 \frac{K_I}{K_{Ic}} + 1.94 \times 10^4$ 和 $\frac{K_I}{K_{Ic}} = 1.56 \times 10^{-6} \left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 - 2.95 \frac{K_I}{K_{Ic}} + 4.70 \times 10^6$, 并与理论结果进行了对比, 此外还得出了开裂角 θ 与裂纹倾角 β 的关系: $\theta = 62.7295 \times 1.0086^\circ$. 试验结果表明: 由于裂纹倾角的不同, 试件的断裂特性也不同。

关键词 岩石; 脆性断裂; 预制裂纹; 断裂准则

压应力

中国图书资料分类法分类号 TG115.57

ABSTRACT The fracture characteristics of brittle material with pre-crack are studied by using the mineralographic microscope and the micro-loading device. The relation of $K_I - K_{Ic}$ under uniaxial and biaxial stress states is derived: $\frac{K_I}{K_{Ic}} = 8.67 \times 10^{-7} \left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 - 0.84 \frac{K_I}{K_{Ic}} + 1.94 \times 10^4$ and $\frac{K_I}{K_{Ic}} = 1.56 \times 10^{-6} \left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 - 2.95 \frac{K_I}{K_{Ic}} + 4.70 \times 10^6$, and contrasted with the theoretical results. Moreover, the relation of cracked angle θ and slope angle of crack β is described: $\theta = 62.7295 \times 1.0086^\circ$. The experimental results show that the fracture characteristics of specimen are different and dependent on the angles of cracks.

KEYWORDS rock; brittle fracture; pre-crack; fracture criterion

0 引 言

岩石在其形成和长期地质构造力作用下, 从微观到宏观都存在大量的裂纹, 小到岩块内的晶面、空隙, 大到岩体中的层理、节理和断层等。这种带有缺陷的材料, 在荷载作用下往往在裂纹尖端产生应力集中, 当它达到临界值时, 裂纹就会开裂扩展, 进而造成整个试样破坏, 因此研究岩石力学问题不可避免地要研究岩石内缺陷的扩展问题。

混凝土和岩石属于同一类脆性材料, 它们的断裂特性有相似之处。70年代以来, 断裂力

* 收文日期 1994-03-16

学开始应用于岩石和混凝土,但由于岩石和混凝土的性质与金属差别太大,对前者的研究难度和复杂性远大于后者。虽然,近十余年来许多学者在岩石和混凝土的宏观断裂方面取得了可喜的成果^[1~6],但对岩石、混凝土微观断裂的研究才刚刚开始,而用微观与宏观相结合的方法能更有效地研究岩石、混凝土的断裂机制。目前对岩石、混凝土微观断裂特性研究的文献还少见^[7,8]。鉴于上述我们采用了一种比较新的试验方法——利用小试件在特制的加载装置和显微镜下观察裂纹的开裂、扩展直至破坏的全过程(文献[8]中进行了详细的阐述),同时较准确地测定所需实验数据。本文主要对平面应力状态下,预裂纹试件的断裂判据、强度和开裂角等进行了试验及理论研究,这对促进岩石、混凝土断裂力学的发展有一定的现实意义。

1 试验方法

1.1 试件

为了便于预制裂纹,本文采用与岩石力学性质相似的混凝土材料来加工试件,试件是在特制的模子上用混凝土(按质量比:水泥:砂:水=3:1:0.8配制而成)浇注的,同时根据试验需要在试件内开制不同方向、形状的裂纹,浇注好的试件在自然条件下进行养护,待完全凝固后即可折模进行加工,加工好的试件大小为15 mm×15 mm×3 mm,试件自然干燥后即可进行试验。

试件内颗粒大小比较均匀,粒径均小于0.25 mm,无明显各向异性,因此可将它视为均质各向同性材料,其物理力学性质如表1所示。

表1 试件的主要物理力学性质

σ_c/MPa	E/GPa	μ	$\varphi/(\circ)$	$K_{Ic}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$
60.8	18.5	0.25	29.7	0.31

1.2 试验仪器

试验所用的装置主要由 XPK-6型矿相显微镜和配套使用的微型加载装置组成,另外还用了一台监测轴向应变值的静动态电阻应变仪。

微型加载装置主要由压力室、滑动板、调节手柄、传压头和加力螺杆组成,该装置不仅可以通过传力杆件施加轴向应力,而且还可以在矿相显微镜下随意平移,以便对整个试件进行观测分析。

1.3 试验过程

本文对不同倾角、形状的多组裂纹试件进行了试验,考虑到试验结果的离散性,对同一种裂纹试件进行了三个以上外界条件完全相同的试验,并将所得结果经过适当处理后,取其综合平均值作为这一状态下该种试件的试验结果。

试验主要是在微型加载装置上进行,加载方式是通过传力螺杆对压头施加载荷,然后经传压头将应力传递给试件。加载速率要尽量保持恒定、缓慢。

微型加载装置是置于矿相显微镜的载物台上,在加载的同时就可在镜中观察到裂纹的开裂、扩展情况,并测定其开裂角 θ 、开裂应力 σ 及试件的最终断裂破坏应力 σ_N 值。

2 试验结果分析

2.1 断裂判据

对不同倾角的中心斜裂纹试件(图1)进行了一系列的实验,其中裂纹长度 $2a = 5 \text{ mm}$,在实验中我们可以测得在各种倾角下的裂纹初始开裂应力值,然后求得裂纹的I、II型应力强度因子 K_I 和 K_{II} ,表2给出了部分试验结果。

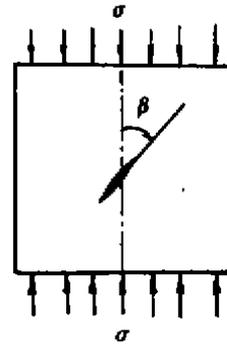


图1 含中心斜裂纹试件边界压缩荷载示意图

表2 试验结果

$\beta/(\circ)$	单轴应力状态					双轴应力状态			
	$\theta/(\circ)$	σ/MPa	K_I	K_{II}	σ_{II}/MPa	σ/MPa	K_I	K_{II}	σ_{II}/MPa
10	68	24.56	0.064	0.365	53.26	27.51	0.998	0.245	58.86
20	74	16.13	0.164	0.450	46.30	24.19	1.089	0.368	56.80
30	82	12.62	0.273	0.475	34.53	23.01	1.216	0.452	51.82
40	88	13.53	0.485	0.578	41.04	25.83	1.487	0.643	50.80
50	95	19.06	0.971	0.816	48.55	28.01	1.822	0.727	54.01
60	108	21.46	1.398	0.807	49.04	30.52	2.227	0.734	56.58

在单轴应力状态下 K_I 、 K_{II} 由下式确定:

$$\begin{cases} K_I = \sigma \sqrt{\pi a \sin^2 \beta} \\ K_{II} = \sigma \sqrt{\pi a \sin \beta \cos \beta} \end{cases}$$

在双轴应力作用下, K_I 、 K_{II} 则由下式计算:

$$\begin{cases} K_I = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \right) \cdot \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\beta \cdot \sqrt{\pi a} \end{cases}$$

在图2中作出了单轴应力作用下的 $K_I \sim K_{II}$ 关系曲线,同时为了便于比较,在同一图中又作出了最大周向拉应力理论(σ_{\max})和最小应变能密度因子(S_{\min})理论判据曲线。

从图中可以看出,实测值均大于理论值,实测曲线在两条理论曲线的上方。实测值与理论值之间存在的误差表明,对于岩石、混凝土这类脆性材料,不能一概用某一种现成的理论来解释它们的断裂强度特性。同时,也证明了岩石和混凝土这类材料断裂过程的复杂性。

通过对实测应力强度因子 K_I 、 K_{II} 的回归分析,可将 K_I 、 K_{II} 的关系曲线用以下抛物线来表示:

$$\frac{K_{II}}{K_{II0}} = 8.67 \times 10^{-7} \left(\frac{K_I}{K_{I0}} \right)^2 - 0.84 \frac{K_I}{K_{I0}} + 1.94 \times 10^1 \quad (1)$$

此即该材料在单轴应力状态下，I-I型复合裂纹的断裂判据。

在双轴应力作用下 K_I - K_{II} 关系曲线如图3所示，这条测试曲线也可以相当满意地拟合成以下二次曲线：

$$\frac{K_{II}}{K_{I\sigma}} = 1.56 \times 10^{-4} \left(\frac{K_{II}}{K_{I\sigma}} \right)^2 - 2.95 \left(\frac{K_{II}}{K_{I\sigma}} \right) + 4.70 \times 10^6 \quad (2)$$

这就是试件在双向应力作用下的复合断裂判据表达式。

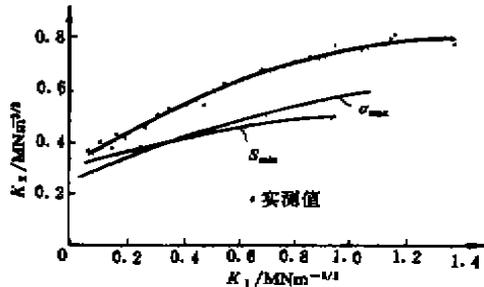


图2 单轴应力作用下裂纹试件的 K_{II} - K_I 关系曲线

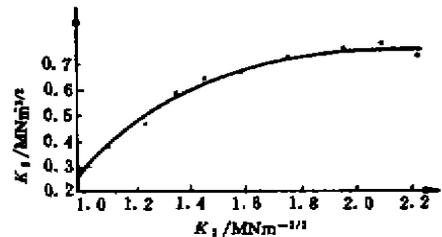


图3 双轴应力作用下裂纹试件的 K_{II} - K_I 关系曲线

2.2 断裂强度特性

从试验中我们知道，当裂纹倾角 β 不同时试验的断裂强度 σ_m 是不同的，图4给出了 β 和 σ_m 之间的关系曲线。

从单轴应力作用下，当 β 从 0° 逐渐增加时断裂强度逐渐减小，大约到 30° 左右时， σ_m 达到最小值， β 再增加，断裂强度反而逐渐增大。这是由于随着裂纹倾角 β 的增加，裂纹尖端应力集中系数增大，故试件的强度逐渐降低，当 $\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ (φ 为材料的内摩擦角) 时，强度最低其破坏面与裂纹面相重合，当 β 再增大，在压应力作用下，裂纹就有可能产生闭合，从而在裂纹面之间就要产生摩擦力，因此试件的强度有所提高，从试验中我们还可以看出，当 $\beta > 60^\circ$ 时，试件基本上是属于压坏的，此时裂纹扩展效应对试件破坏所起的作用不明显。

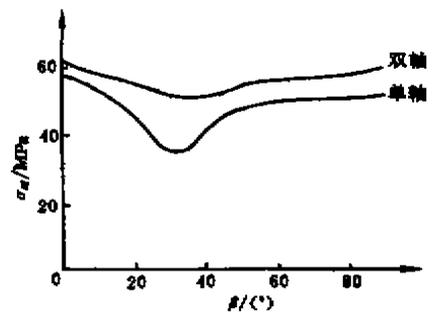


图4 裂纹试件的 σ_m - β 关系曲线

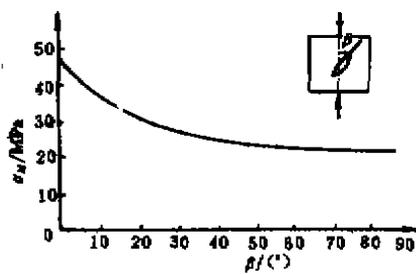


图5 椭圆裂纹试件的 σ_m - β 关系曲线

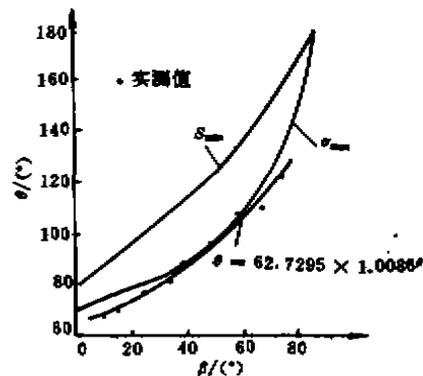


图6 单轴应力作用下裂纹试件的 α - β 关系曲线

在双轴应力状态下,断裂强度 σ_w 随裂纹倾角 β 的变化趋势基本上与单轴情况下相同,但其断裂强度比单轴压缩时高。由此可知,由于裂纹的存在,会使试件强度在某些方向上有所降低,而尤以单向受压时降低更甚。

对于椭圆(长轴 $2a = 5 \text{ mm}$,短轴 $2b = 2 \text{ mm}$)形裂纹试件,随着裂纹倾角的增加,其断裂强度是逐渐减小的(如图5所示)。这说明裂纹形状对试件的断裂强度也有影响。

2.3 开裂角 θ 与裂纹倾角 β 的关系

试验中对单轴应力作用下各种不同 β 角下的开裂角 θ 进行了测定,图6中绘出了试验结果,同时在图中给出了最大周向拉应力理论曲线和最小应变能密度因子理论曲线。

从图中可以看出:当 $0^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$ 时,实测值低于理论值,当 $25^\circ < \beta < 70^\circ$ 时,实测值与最大周向拉应力理论较符合,当 $\beta \geq 70^\circ$ 时,实测值又低于理论值。

通过对实测值的回归分析,可将 θ - β 关系曲线拟合成如下的指数曲线:

$$\theta = 62.7295 \times 1.0086^\beta \quad (3)$$

这就是在单轴下,裂纹试件的开裂角 θ 和裂纹倾角 β 之间的关系式。

3 结 论

本文通过对不同裂纹倾角 β 的预制裂纹试件进行了一系列试验,可以得出如下结论:

- 1) 在单、双轴应力作用下, I - I 型裂纹的断裂判据可以表示成(1)、(2)式的二次曲线。
- 2) 不同倾角、形状的裂纹试件,在压应力作用下,其断裂破坏强度不同。对于裂缝试件,当 β 从 0° 逐渐增大时,断裂强度逐渐减小,在 30° 左右时,强度达到最小值, β 再增加,试件的断裂强度又逐渐增大。对椭圆形裂纹试件,其断裂强度随 β 的增加而减小。
- 3) 单裂纹试件在单轴应力作用下,开裂角 θ 和裂纹倾角 β 的关系可以用(3)式的指数曲线来表示。

参 考 文 献

- 1 Costin L S. A Microcrack Model for the Deformation and Failure of Brittle. *Journal of Geophysical Research*. 1983, 88(11): 9485~9492
- 2 Walter Janack. Failure of Granite under Compression. *J Rock Meck. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1977, 14: 209~215
- 3 李贺. 岩石断裂力学. 重庆: 重庆大学出版社, 1988, 66~80
- 4 夏熙伦, 任放. 在压缩荷载作用下岩石和水泥试样的复合断裂试验及判据. *水利学报*, 1984, (9): 48~53
- 5 蒋大骅. 混凝土在双向及三向受力时的强度准则及其应用. *结构工程师*. 1991, 19(4): 40~48
- 6 过镇海等. 在多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究. *土木工程学报*, 1991, 24(8): 1~14
- 7 许江, 李贺. 对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展全过程的实验研究. *力学上实践*, 1986, (4)
- 8 万玲. 预制裂纹脆性材料断裂机理的研究. *重庆大学学报*, 1989, 12(1): 79~85
- 9 于晓中等. 岩石和混凝土断裂力学. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991