

# 具有孔边裂纹的岩石厚壁筒试件的破裂特征<sup>1)</sup>

颜玉定<sup>2)</sup> 尹祥础<sup>3)</sup> 廖远群<sup>2)</sup> 吴景浓<sup>2)</sup> 石 勇<sup>2)</sup>

**提要** 用五种应力途径对由五种岩石制备的孔边有予裂纹的厚壁筒试件进行实验,研究上述条件下岩石的破裂特征。结果表明:对含径向并贯穿轴向裂纹的试件,其破裂沿裂纹方向,为典型的张开型破裂;含与定直径成 $45^\circ$ 角并贯穿轴向裂纹的试件,破裂亦呈张开型,其裂面始于裂纹前缘,但却折转约 $45^\circ$ 角与定直径近于平行;中心含与轴向成 $45^\circ$ 角的椭圆裂纹试件的破裂,仍沿裂纹面方向,为张开型与滑开型的复合破裂。

**关键词:** 应力途径 予裂纹 张开型破裂

## 一、前 言

对于内部存在各种缺陷(如微裂纹)的材料强度问题,是断裂力学研究的基本问题。外场力作用下各类微裂纹的扩展规律及材料的破裂特征等,也是断裂力学研究的课题之一。我们用五种岩石制成厚壁筒试件,并在其内孔边予制几类不同裂纹,在不同应力途径下使它们破裂,研究其破裂特征。

## 二、试 件

用新丰江花岗岩(以下简称花岗岩),石龙红砂岩(简称红砂岩)、云浮大理岩(简称大理岩),黄杨山辉长岩(简称辉长岩)和阳山石灰岩(简称石灰岩)五种岩石,先制成高100mm,外径50mm,内径10mm,表面光滑,两端面不平整度小于0.05mm的厚壁筒,再在内孔壁予制裂纹。裂纹分三类。

(1)沿径向并贯穿轴向的双边裂纹,简称A类裂纹。如图1(a)所示。裂纹宽度 $<0.3\text{mm}$ ,平均深度(从内壁起算)约为12mm。作为对比,另制了一组深约5mm的红砂岩试件。

(2)与一条定直径夹 $45^\circ$ 角贯穿轴向的双边裂纹,简称B类裂纹,如图2所示。裂纹宽度 $<0.3\text{mm}$ ,深约5mm。试件由红砂岩和花岗岩制作。

---

1) 本文是地震联合基金会赞助的课题。

2) 广东省地震局

3) 国家地震局地球物理研究所

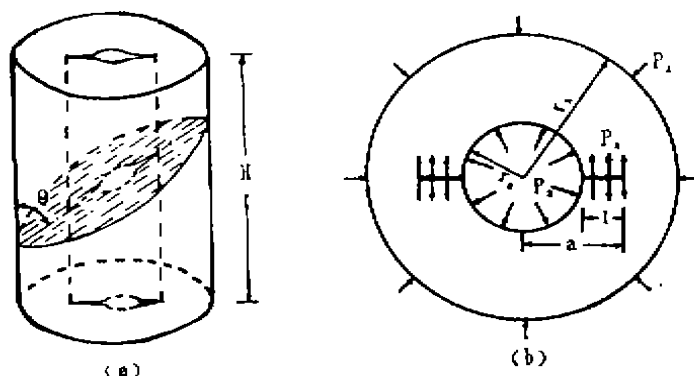


图1 含A类裂纹试件  
Fig. 1 Specimen with A-type crack

(3) 与试件轴向成  $45^\circ$  角的中心椭圆裂纹, 简称C类裂纹, 如图3所示。椭圆长轴为28.8mm, 短轴20.4mm, 厚度 $<0.01\text{mm}$ 。试件由红砂岩制作。裂纹的制作方法是: ①从中部与轴向成  $45^\circ$  角截断试件; ②处理好预定椭圆面(包括几何尺寸、裂纹厚度和不让胶结物进入裂缝等); ③加填料配好环氧树脂, 使其强度、硬度、粘结力等均接近岩石,

再将裂纹外围的截面重新胶结。

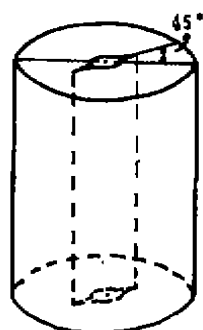


图2 含B类裂纹试件  
Fig. 2 Specimen with B-type crack

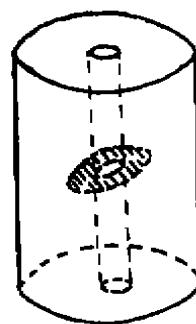


图3 含C类裂纹试件  
Fig. 3 Specimen with C-type crack

### 三、实验方法

图4为实验装置图。本实验采用四种加载方式, 即所谓应力途径。

(1) 恒定轴压 $P_z$ 、围压 $P_1$ , 加孔压 $P_2$ 使试件致裂, 称其为 $P_z-P_1-P_2$ 应力途径。加载过程是先由试验机施加 $P_z$ 至预定值并使之恒定, 再由一台手摇泵施加 $P_1$ 至预定值并使之恒定, 最后由另一台手摇泵加 $P_2$ 直至试件破裂。 $P_z$ 值由试验机表盘读出,  $P_1$ 、 $P_2$ 各通过一压力传感器输入动态应变仪, 压力讯号经放大后输入X—Y函数记录仪被控制和记录下来。下述其它应力途径所用的仪器和加载、记录方法都与此类同。在各应力途径的代号中, 最后一个字符代表的是不定荷载, 其它字符代表相应的恒定荷载, 它们的排列次序代表加载序次。

(2) 恒定 $P_z$ , 将 $P_1$ 先加至某一预定值, 加 $P_2$ 并使之恒定, 最后退 $P_1$ 至试件破裂, 称 $P_z-P_1-P_2-P_1$ 应力途径。

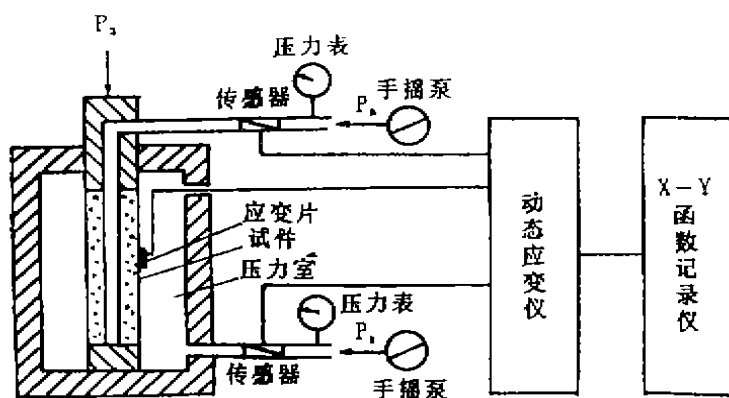


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Sketch showing the experiment apparatus

(3) 恒定  $P_1$ 、 $P_2$ ，加  $P_z$  至试件破裂，称  $P_1-P_2-P_z$  应力途径。

(4) 恒定  $P_z$ ，加  $P_1$  至试件破裂，称  $P_z-P_1$  应力途径。

(5) 加  $P_z$  使试件破裂，称  $P_z$  应力途径。

#### 四、结果及分析

为简化图表和方便叙述，特为下文将出现的一些字符和名称结合图1、图5先予说明。H—试件高度； $r_1$ 、 $r_2$ —

试件外、内半径； $L_L$ 、 $L_r$ —左、右两侧予裂纹深度（孔边起算，试件上、下、左、右预先定位），因裂纹由手工予制，两侧深度不完全相等； $a_L$ 、 $a_r$ —左、右两侧裂纹长度； $\theta$ —试件内原生弱面或予裂纹面与轴向夹角，以度表示，如  $45^\circ$ ；均匀—试件结构均匀，无宏观弱面；双侧—沿两侧予裂纹张开型（亦称 I 型）破裂；左侧、右侧—沿左侧或右侧予裂纹 I 型破裂；上  $\frac{1}{2}$ —试件上部  $\frac{1}{2}H$  段的双侧或单侧 I 型破裂（不完全破裂），余类推。

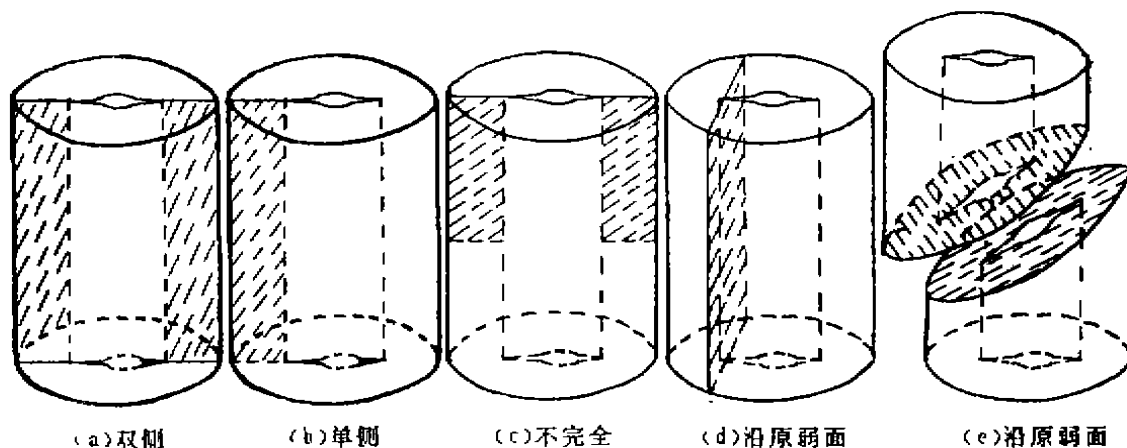


图5 含A类裂纹试件的破裂特征

Fig. 5 Fracture feature of specimen with A-type crack

按不同应力途径和予裂纹类型的实验结果分述如下：

##### 1. $P_z-P_1-P_2$ 应力途径（本实验最主要的加载方式）

表1列出了本应力途径下含A类裂纹试件的实验结果。表中反映出：

表1  $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$  途径含A类裂纹试件的参数Table 1 Parameters of  $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$  Loading path on specimen with A-type Crack

岩性	试件号	$L_L$ (mm)	$L_r$ (mm)	$P_1$ (MPa)	试件原始结构	破裂状态	岩性	试件号	$L_L$ (mm)	$L_r$ (mm)	$P_1$ (MPa)	试件原始结构	破裂状态
红砂岩 (风干)	77	12.5	12.1	0	均	左侧	花岗岩 (风干)	68	5.6	5.6	19.62	均	左侧
	83	12.7	11.7	0	一组30°纹流面	左侧		85	5.5	5.5	24.53	均	左侧
	81	11.8	11.2	4.91	同上	左侧		54	4.2	4.4	27.47	上端面左侧有一0°弱面; 高上1/4 (沿原弱面)	右侧
	72	12.5	12.0	4.91	均	左侧		42	12.0	12.0	0	均	右侧
	75	11.5	11.2	7.36	均	左侧		43	11.6	11.7	0	均	右侧
	78	12.5	11.5	10.79	均	左侧		47	10.0	9.0	0	15°弱面, 过上端面中心, 与予裂纹垂直	右侧
	76	11.3	11.4	14.72	均	右侧		41	12.3	11.6	4.91	均	右侧
	90	10.5	10.5	0	均	右侧		36	10.8	10.6	9.81	均	右侧
红砂岩 (饱水)	91	11.0	11.8	0	一组30°纹流面	右侧	花岗岩 (饱水)	58	11.6	11.9	0	均	右侧
	93	12.1	12.4	2.45	均	右侧		62	10.0	11.2	4.91	均	右侧
	94	11.4	12.6	4.91	一组30°纹流面	右侧		63	12.2	13.2	7.85	均	右侧
	99	12.5	12.4	4.91	均	右侧		55	11.6	11.5	9.81	均	右侧
	100	12.4	12.5	5.89	均	右侧		61	12.3	12.4	15.70	均	右侧
	95	11.6	12.2	7.36	均	右侧		56	11.6	12.0	19.62	均	右侧
	97	11.5	12.2	7.36	均	右侧		57	10.5	10.5	24.53	均	右侧
	96	11.5	11.5	10.79	均	右侧		60	10.8	10.8	24.53	均	右侧
红砂岩 (浅裂纹)	101	11.6	11.6	12.26	均	右侧	大理岩	59	11.5	11.5	29.43	均	右侧
	98	12.0	12.2	14.72	一组30°纹流面	右侧		50	11.0	11.2	0	①一个20°弱面; ②70°纹流面 (大理岩内此面均遍布整个试件, 下同)	右侧
	102	5.6	4.7	0	①右侧内孔边有一0°弱面, 沿原①组穿轴向并与予裂纹垂直; ②右侧中部一45°弱面, 交叉止于①。	右侧		52	12.0	12.6	4.91	同上	右侧
	103	4.8	4.8	0	60°弱面	右侧		57	11.1	11.0	4.91	①70°弱面; ②70°纹流面	右侧
	87	5.2	4.8	4.91	一组30°纹流面	左侧		48	11.3	11.4	7.36	①一组45°弱面; ②90°纹流面	右侧
	70	4.6	5.0	8.00	同上	右侧							
	51	5.7	5.7	9.08	均	右侧							
	88	5.4	5.0	9.81	均	右侧							
	52	6.0	6.0	9.81	均	右侧							
	69	4.6	4.9	9.81	均	右侧							
	105	5.2	5.6	14.72	均	右侧							
	108	5.5	4.5	19.62	70°弱面	左侧							

续上表

岩性	试件号	L <sub>L</sub> (mm)	L <sub>r</sub> (mm)	P <sub>1</sub> (MPa)	试件原始结构	破裂状态	岩性	试件号	L <sub>L</sub> (mm)	L <sub>r</sub> (mm)	P <sub>1</sub> (MPa)	试件原始结构	破裂状态	
(风干)	53	10.5	10.6	9.81	①70°弱面; ②70°纹流面	双侧	辉长岩 (风干)	50	12.0	11.2	0	匀	匀	双侧
	54	12.0	12.3	14.72	①15°弱面贯穿上、下端面; ②70°纹流面	双侧		51	12.0	11.9	0	匀	匀	双侧
	55				①上端左侧一高约4H的0°弱面, 与于裂纹垂直; ②二个60°弱面; ③60°纹流面	品原①开, 品原②止于③H		57	11.0	11.4	4.91	匀	匀	右侧
	49	11.3	11.4	0				56	12.6	12.7	9.81	匀	匀	双侧
	59	11.3	11.2	0	①70°弱面; ②70°纹流面	双侧		52	12.0	12.4	14.72	匀	匀	右侧
大理岩	61	12.0	12.2	0	①上70°弱面; ②下45°弱面; ③70°纹流面	双侧	辉长岩 (泡水)	53	12.8	11.9	19.62	匀	匀	双侧
	67	11.0	11.3	4.91	①一组45°弱面; ②右侧0°弱面, 贯穿轴间与于裂纹垂直; ③70°纹流面	双侧		59	12.0	11.6	19.62	匀	匀	左侧
	63	11.4	11.7	9.81	①两端各有一个20°弱面, 中间有一个70°弱面与二弱面斜交; ③70°纹流面	台侧		55	11.9	12.0	24.53	匀	匀	双侧
	65	11.3	11.0	9.81	①左侧有一个0°弱面, 贯穿轴间与于裂纹垂直; ②一组70°弱面; ③90°纹流面	台侧		54	11.8	12.3	29.43	匀	匀	左侧
	58	11.7	11.7	19.62	①70°弱面; ②70°纹流面	双侧		61	11.7	11.6	0	匀	匀	双侧
(泡水)	60	11.4	11.8	29.43	①上端二个15°弱面; ②下端二个45°弱面; ③70°纹流面	双侧	石灰岩 (风干)	62	12.2	12.2	0	匀	匀	右侧
								67	12.0	11.6	4.91	匀	匀	左侧
								63	11.2	11.0	9.81	匀	匀	双侧
								70	12.0	12.0	9.81	匀	匀	双侧
								64	12.1	12.2	14.72	匀	匀	双侧

(1) 试件的破裂为典型的张开型。87个试件中, 尽管31个内含一个或多个不同形态的  
原生弱面, 但仍有83个是沿予裂纹的 I 型破裂。其中48个为双侧破裂(图 5 (a)), 35 个单  
侧破裂(图 5 (b))。只有 4 个沿原弱面破裂, 但其中 3 个的破裂沿与轴向平行的原弱面,  
如图 5 (c)、(d) 所示, 仍为 I 型破裂。实际上只有石灰岩 14<sup>#</sup> 1 个试件的破裂不是纯 I 型  
的(图 5 (e))。以上数据表明, 在  $P_z-P_1-P_2$  应力途径下, 含 A 类裂纹的岩石试件的破  
裂, 99% 都是纯 I 型。

(2) 单侧破裂是因试件两侧的裂纹深度的差别较大而导致的。从表 1 的  $L$  (包括  $L_L$  和  
 $L_r$ ) 栏数据可知, 当一侧的裂纹长度 ( $a=L+r_2$ ) 比另一侧约长 0.3mm (约 1.7%) 以上时,  
往往便出现单侧破裂。虽然大多数试件的予裂纹长度等于、甚至超过内孔半径的 3.4 倍, 即  
 $\frac{a}{r_2} \geq 3.4$ , 但仍避免不了单侧破裂, 说明内孔对破裂状态仍有明显的影响。否则, 不管两  
侧裂纹的深度有无差异, 两侧的裂纹长度都可看成是相等的, 即  $a=\frac{1}{2}(2r_2+L_L+L_r)$  试  
件应呈双侧破裂。

单侧破裂的另一原因, 可能是破裂侧的“韧带” ( $r_1-a$ ) 比另一侧更窄。

(3) 有 7 个试件 (6 个含浅裂纹的红砂岩, 1 个大理岩) 沿轴向没有完全破裂, 止裂  
于某一高度, 如图 5 (C) 所示。说明某些试  
件的开裂并非在裂纹前缘同时发生, 当某一  
部位首先开裂后, 裂纹将向径向和轴向扩  
展, 如韧带较宽 (裂纹短), 裂纹的扩展有  
在试件内部停止的可能。

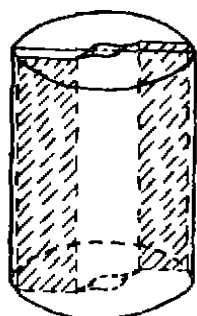


图 6 含 B 类裂纹试件的破裂特征  
Fig. 6 Fracture feature of  
specimen with B-type crack

表 2 列出了含 B 类裂纹试件的实验结  
果, 破裂状态如图 6 所示。破裂从裂纹前缘  
开始, 但扩展不沿予裂纹方向, 而是折转约  
45°, 沿与定直径近于平行的路径。在  $P_z-P_1-P_2$  应力途径下, 予裂纹前缘应属  $K_I$  和  
 $K_{II}$  两种应力强度因子联合作用, 而试件最  
终的破裂面却仍呈 I 型, 可能是  $K_I$  值远大  
于  $K_{II}$  值, 掩盖了  $K_{II}$  的作用。

表 2  $P_z-P_1-P_2$  途径含 B 类裂纹试件的参数  
Table 2 Parameters of  $P_z-P_1-P_2$  Loading Path on Specimen  
with B-type Crack

岩性	试件号	$L_L$ (mm)	$L_r$ (mm)	$P_1$ (MPa)	原始结构	试件破裂状态
红砂岩	49	6.1	6.5	10.62	一组 30° 纹流面	破裂始于予裂纹端点, 但破裂面方向不是沿予裂纹, 而是折转约 45°, 与原参照直径近于平行。两侧裂面成中心对称。
花岗岩	48	5.0	5.2	9.81	均匀	
	49	5.4	5.3	9.81	均匀	

含椭圆裂纹的 2 个试件都由红砂岩制成, 其实验结果列于表 3。图 7 为其破裂状态图。  
试件的破裂沿裂纹面方向, 即沿与轴向交角为 45° 的胶结面错开, 属  $K_I$ 、 $K_{II}$  联合作用下的

破裂。

表3  $P_z-P_1-P_2$ 途径含C类裂纹试件的参数  
Table 3 parameters of  $P_z-P_1-P_2$  Loading Path on Specimen with C-type Crack

试件号	椭圆予裂纹		$P_1$ (MPa)	试件原始结构	破裂状态
	长轴半径 (mm)	短轴半径 (mm)			
111	14.4	10.2	9.81	试件中部人为切割45°椭圆面,中心为椭圆裂纹,周围用环氧树脂加填料胶结。	沿45°胶结面破裂
112	14.4	10.2			

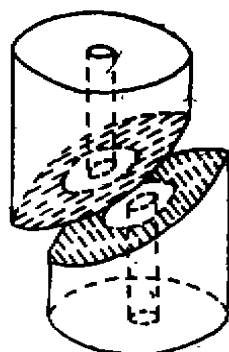


图7 含C类裂纹试件的破裂特征  
Fig. 7 Fracture feature of specimen with C-type crack

表4  $P_z-P_1-P_2-P_1$ 途径含A类裂纹试件的参数

Table 4 Parameters of  $P_z-P_1-P_2-P_1$  Loading path on Specimen with A-type Crack

试件号	$L_L$ (mm)	$L_r$ (mm)	$P_2$ (MPa)	$P_1$ (MPa)	原始结构	破裂状态
86	5.0	5.2	15.36	12.15→6.30	均匀	双侧
109	5.5	5.5	25.62	22.32→15.40	均匀	双侧

## 2. $P_z-P_1-P_2-P_1$ 应力途径

用于本应力途径实验的2个试件都含A类予裂纹,由红砂岩制成。实验结果列于表4。表中可见,试件的破裂为典型的纯I型(图5(a)),破裂状态不受 $P_z$ 、 $P_2$ 大小的影响。

## 3. $P_1-P_2-P_z$ 应力途径

用于本应力途径实验的5个试件都含A类裂纹,由红砂岩制成。实验结果列于表5。全部试件都是典型的I型破裂,如图5(a)所示。

表5  $P_1-P_2-P_z$ 途径含A类裂纹试件的参数  
Table 5 Parameters of  $P_1-P_2-P_z$  Loading Path on Specimen with A-type Crack

试件号	$L_L$ (mm)	$L_r$ (mm)	$P_1$ (MPa)	$P_2$ (MPa)	原始结构	破裂状态
104	5.4	5.5	9.24	14.57	均匀	双侧
107	3.4	4.2	11.33	5.31	均匀	双侧
110	5.0	6.4	19.58	25.62	均匀	双侧
106	3.7	3.7	19.80	15.75	均匀	双侧
89	5.5	5.4	21.34	31.02	均匀	双侧

#### 4. $P_z-P_1$ 应力途径

用于本应力途径实验的试件共 7 个,其中含 A 类裂纹的 6 个(红砂岩 5 个,花岗岩 1 个),

表 6  $P_z-P_1$  途径含 A、B 类裂纹试件的参数

Table 6 Parameters of  $P_z-P_1$  Loading path on Specimen with A-/B-type Crack

岩 性	试件号	$L_L$ (mm)	$L_R$ (mm)	原始结构	破裂状态
红 (风干 砂岩)	74	11.5	12.0	均匀	右侧
	79	11.5	11.5	均匀	双侧
	80	11.5	11.8	均匀	右侧
	82	11.8	12.1	均匀	右侧
红砂岩 (饱水)	92	11.8	12.3	均匀	右侧
花岗岩 (风干)	39	11.7	11.4	均匀	左侧
红砂岩(B 类裂纹, 风 干)	50	5.8	6.0	一组 $30^\circ$ 弱面	与表 2 中 的试件同

含 B 类裂纹的一个(红砂岩)。实验结果列于表 6。表中可见, 含 A 类裂纹的试件都为 I 型破裂, 其中 5 个试件因两侧裂纹长度不相等而发生单侧破裂, 如图 5 (a)、(b) 所示。在  $P_z-P_1$  应力途径下的 I 型破裂, 应发生在裂纹未因  $P_1$  的作用而发生闭合, 两裂纹面尚未接触的条件下。

含 B 类裂纹的红砂岩 50\* 试件, 其破裂状态与  $P_z-P_1-P_2$  应力途径下的同类试件一样(见图 6), 破裂面不沿予裂纹方向, 而是折转约  $45^\circ$  与定直径近于平行, 但此试件呈单侧破裂。

#### 5. $P_z$ 应力途径

实验用含 A 类裂纹的大理岩 54\* 试件。试件内有 2 个原生  $70^\circ$  弱面和遍布全试件的一系列  $70^\circ$  纹流面, 在无围压条件下进行单轴加载, 结果为纯 I 型破裂(双侧), 如图 5 (a) 所示。此破裂系  $P_z$  在裂纹前缘产生的应力强度因子  $K_I$  造成。

#### 6. 原生薄弱结构面对破裂状态的影响

从表 1—表 7 中可看出, 用于本实验的 107 个试件(包括大理岩 54\*) 中, 有 34 个内部含有各种各样的原生弱面, 但沿原弱面破坏的只有 4 个, 仅占有弱面试件的 12%, 其余的 88% 与结构均匀的 73 个试件一样, 它们的破裂状态只和予裂纹有关。显然, 原生弱面对试件破裂状态的影响远远不如予裂纹大。予裂纹面是人造弱面, 与原生弱面的主要区别在于前者两裂纹面是分开的, 中间无接触, 更无任何胶结, 因而比后者更为薄弱。不难想象, 假若地壳岩体内存在类似予裂纹面那种性质的结构面, 将是最薄弱、最危险的结构面。

## 五、结 论

(1) 在所有五种应力途径下, 因  $P_z$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  在 A 类裂纹前缘均产生应力强度因子  $K_I$ , 因而含 A 类裂纹的岩石破裂都是张开型(I 型)。

(2) 如 A 类裂纹的两侧长度不完全相等, 当一侧比另一侧约长 1.7% 以上时, 破裂往往只在较长侧发生。

(3) 即使裂纹长度(单侧长度)为试件内孔半径的 3.4 倍以上, 内孔对岩石的破裂状态

依然有独特的影响, 仍与普通裂纹不同。

(4) “韧带”的宽度会影响裂纹的扩展。窄韧带内裂纹容易扩展, 宽韧带内不仅不易扩展, 有时还会使扩展中的裂纹停止扩展。

(5) 在裂纹尚未闭合时, 围压亦可引发A类裂纹的张开型扩展。

(6) 轴压、围压、孔压的大小以及试件是风干或饱水状态, 对含A类裂纹试件的破裂状态没有影响。

(7) 含B类裂纹的试件, 无论 $P_z-P_1-P_2$ 还是在 $P_z-P_1$ 应力途径下, 其破裂状态完全一样, 即破裂开始于裂纹前缘, 但扩展不是沿予裂纹方向, 而是折转约 $45^\circ$ , 沿与定直径( $0^\circ$ )近于平行的方向。

(8) 含C类裂纹的试件, 在 $P_z-P_1-P_2$ 应力途径下, 沿予裂纹面方向破裂。

(9) 岩体内如具有类似予裂纹面性质的弱面, 即两侧裂纹面不接触或触点较少, 无胶结或胶结薄弱的结构面, 是最危险的结构面。

本实验用于予制裂纹的金刚石薄型锯片由麦细牛工程师研制, 李健康工程师参加了部分实验, 笔者在此深致谢意。

## FRACTURE CHARACTERISTICS OF THICK-WALLED CYLINDER ROCK SPECIMEN WITH PORE EDGE CRACK

Yan Yuding<sup>1)</sup>, Yin Xiangchu<sup>2)</sup>, Liao Yuanqun<sup>1)</sup>, Wu Jingnong<sup>1)</sup>, Shi Yong<sup>1)</sup>

{Abstract} Five loading paths are adopted to test thick-walled cylindrical specimens with pre-notched cracks on their internal pore edges which made by five kinds of rocks and to study the fracture characteristics of rock under such conditions. The results show that: to the specimen having a radial crack and going all the way through the axial direction, the fracture is a typical stretch fracture, because it cracks in the direction of its crackle; to the specimen having a crack at  $45^\circ$  along the axial direction, the fracture is also of stretching type and its face starts at the leading edge of the crack but turns  $45^\circ$  to the near parallel direction and parallel to the fixed diameter; and to the specimen having elliptical crack at its waist at  $45^\circ$  angle to axial direction, the fracture goes along the direction of the crack face and belong to the hybrid fracture of types with stretch slip.

Key words: Loading path, pre-notched crack, stretch type fracture

---

1) Seismological Bureau of Guangdong Province

2) Institute of Geophysics, State Seismological Bureau