

# 岩石 II 型断裂韧度的实验方法<sup>①</sup>

王桂尧

(长沙交通学院岩土研究所, 长沙 410076)

孙宗颀 徐纪成

(中南工业大学资源、环境与建筑工程学院, 长沙 410083)

**摘 要** 针对纯剪断裂试件存在的问题, 提出了采用压剪试件实现岩石 II 型裂纹剪切断裂并测试岩石剪切断裂韧度的实验方法, 并通过对压剪试件的应力分布和测试结果的分析讨论, 提出了岩石 II 型断裂韧度实验的最佳方案, 并进而讨论了 II 型裂纹的两种不同断裂型式和断裂判据。

**关键词** 剪切断裂 断裂韧度 实验方法

**中图法分类号** TD31

岩石剪切断裂在地震、岩爆等自然灾害中的普遍存在已引起人们的普遍重视, 然而与对岩石 I 型(张拉)断裂的研究相比, 有关岩石 II 型(剪切)断裂, 特别是岩石 II 型断裂韧度测试方法的研究却极少见到报道。这种局面严重制约着岩石断裂力学的发展及其在岩体工程中的推广应用, 因此, 开展这方面的工作具有极为重要的现实意义。

受岩石 I 型断裂研究方法的影响, 为测试岩石的 II 型断裂韧度, 人们曾试用多种纯剪方法实现纯剪断裂, 并由此测出岩石 II 型断裂韧度<sup>[1, 2]</sup>, 但许多研究发现, 岩石纯剪断裂试件的端部普遍存在较高的周向拉应力, 从而导致 II 型裂纹的张拉扩展<sup>[2, 3]</sup>。采用导向槽试件尽管在一定程度上能够控制裂纹的扩展方向, 从而得到宏观上沿剪切面断裂的结果, 但这样的剪切断裂是由张拉微裂纹扩展贯通导致宏观剪切断裂的结果<sup>[4]</sup>, 它是否能反映工程岩体剪切断裂的实质也令人怀疑。为使无导向槽试件 II 型裂纹的剪切断裂成为可能就必须首先有效地抑制 II 型裂纹的张拉扩展。显然, 抑制这一张拉裂纹扩展的有效方法是在试件的一定方向施加一定大小的压应力<sup>[5]</sup>。为达到这一目的, 必须改变传统的以纯剪方法实现纯剪断裂的思维

方式, 采取以压促剪、压剪结合, 以压剪方法实现 II 型裂纹剪切断裂的实验方法, 并由此测试岩石 II 型断裂韧度。

## 1 真 II 型断裂试件及实验方法

### 1.1 试件材料基本性能

试样为两种含方解石的白云石大理岩, 大理岩 A 的剪切强度为  $\tau = C + \mu\sigma = 17 + 1.13\sigma$ , 断裂韧度  $K_{IC} = 0.91 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; 大理岩 B 为:  $\tau = C + \mu\sigma = 25 + 0.86\sigma$ ,  $K_{IC} = 1.26 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

### 1.2 试件形状与尺寸

把尺寸  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  和  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的矩形块岩石试件加工成如图 1 所示的单边切口试件或双边切口试件, 单边切口试件的切口深度与试件高度之比  $a/W = 0.5$ , 双边切口试件切口深度与试件高度之比  $a/W = 0.3$ 。

### 1.3 实验方法

实验时, 把矩形大理岩试件置于压模剪切板中, 通过几组不同的模板倾角实现不同压剪应力比值的剪切断裂, 实验装置见文献[6]。由于模板倾角减小时, 剪应力随之减小, 而压

① 国家自然科学基金资助项目 49272151 收稿日期: 1998-02-23; 修回日期: 1998-10-13  
王桂尧, 男, 35 岁, 博士, 副教授



表 2 大理岩 A 单边切口压模剪切实验结果

**Table 2** Experimental results for single notched marble A specimen

| Inclination | Specimen        |                        |                         | Notch height<br>$a/\text{mm}$ | $a/W$ | Peak load<br>$P/\text{kN}$ | Stress intensity factor                           |                                                  | Compression stress<br>$\sigma/\text{MPa}$ |
|-------------|-----------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|             | No.             | Width<br>$B/\text{mm}$ | Height<br>$W/\text{mm}$ |                               |       |                            | $K_{IIc}/$<br>( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) | $K_{Ic}/$<br>( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) |                                           |
| 70          | CP <sub>1</sub> | 45.2                   | 67.8                    | 32.0                          | 0.47  | 63.0                       | 5.68                                              | 5.73                                             | 13.3                                      |
| 70          | CP <sub>2</sub> | 45.8                   | 69.8                    | 33.2                          | 0.48  | 35.4                       | 3.10                                              | 3.24                                             | 7.2                                       |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 4.39                                              | 4.49                                             | 10.3                                      |
| 65          | CP <sub>3</sub> | 46.1                   | 69.6                    | 34.0                          | 0.49  | 85.0                       | 7.10                                              | 10.01                                            | 21.9                                      |
| 65          | CP <sub>4</sub> | 48.2                   | 68.5                    | 32.8                          | 0.48  | 47.1                       | 4.01                                              | 5.12                                             | 11.6                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 5.55                                              | 7.56                                             | 16.7                                      |
| 60          | CP <sub>5</sub> | 48.6                   | 70.5                    | 34.4                          | 0.49  | 106.0                      | 7.97                                              | 13.94                                            | 30.4                                      |
| 60          | CP <sub>6</sub> | 48.2                   | 68.4                    | 32.4                          | 0.47  | 69.0                       | 5.31                                              | 8.56                                             | 19.7                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 6.64                                              | 11.25                                            | 25.1                                      |
| 55          | CP <sub>7</sub> | 30.0                   | 67.8                    | 32.0                          | 0.47  | 92.5                       | 10.96                                             | 21.33                                            | 49.4                                      |
| 55          | CP <sub>8</sub> | 29.4                   | 69.8                    | 34.5                          | 0.49  | 65.6                       | 7.75                                              | 16.67                                            | 36.3                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 9.36                                              | 19.00                                            | 42.8                                      |

表 3 大理岩 B 双边切口试件实验结果

**Table 3** Experimental results for double notched marble B specimen

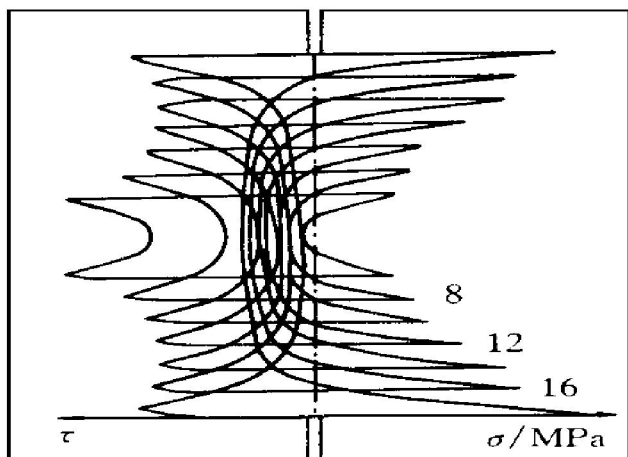
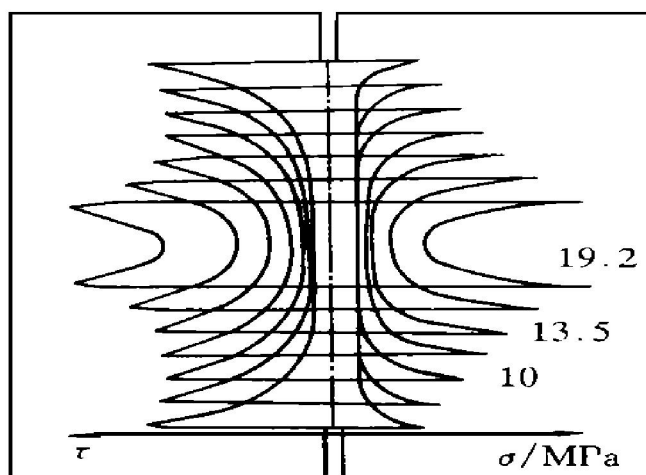
[illegible]

表 4 大理岩 B 单边切口压模剪切实验结果

**Table 4** Experimental results for single notched marble B specimen

| Inclination | Specimen        |                        |                         | Notch height<br>$a/\text{mm}$ | $a/W$ | Peak load<br>$P/\text{kN}$ | Stress intensity factor                   |                                       | Compression stress<br>$\sigma/\text{MPa}$ |
|-------------|-----------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
|             | No.             | Width<br>$B/\text{mm}$ | Height<br>$W/\text{mm}$ |                               |       |                            | $K_{IIc}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | $K_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ |                                           |
| 70°         | CQ <sub>1</sub> | 35.0                   | 70.0                    | 33.0                          | 0.47  | 42.5                       | 4.87                                      | 4.92                                  | 11.2                                      |
| 70°         | CQ <sub>2</sub> | 35.0                   | 70.0                    | 33.2                          | 0.47  | 53.5                       | 6.53                                      | 6.08                                  | 14.2                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 5.70                                      | 5.50                                  | 12.6                                      |
| 65°         | CQ <sub>3</sub> | 34.5                   | 70.0                    | 34.0                          | 0.48  | 52.5                       | 5.81                                      | 8.39                                  | 17.7                                      |
| 65°         | CQ <sub>4</sub> | 34.5                   | 70.0                    | 33.2                          | 0.47  | 59.2                       | 6.64                                      | 8.57                                  | 19.6                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 6.22                                      | 8.48                                  | 18.6                                      |
| 60°         | CQ <sub>5</sub> | 35.0                   | 70.0                    | 32.5                          | 0.46  | 66.5                       | 7.03                                      | 10.91                                 | 21.4                                      |
| 60°         | CQ <sub>6</sub> | 34.5                   | 70.0                    | 34.0                          | 0.48  | 67.3                       | 7.17                                      | 12.52                                 | 27.1                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 7.10                                      | 11.72                                 | 24.3                                      |
| 55°         | CQ <sub>7</sub> | 34.2                   | 70.0                    | 34.6                          | 0.49  | 88.8                       | 8.96                                      | 19.30                                 | 42.1                                      |
| Average     |                 |                        |                         |                               |       |                            | 8.96                                      | 19.30                                 | 42.1                                      |

$K_{II} = 4.40 + 0.24K_I$ ;  $K_{IIc} = 4.40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ;  $K_{II} = 4.42 + 0.11\sigma$ ;  $K_{IIc} = 4.42 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

图2  $\alpha = 90^\circ$  应力分布Fig. 2 Stress distribution when  $\alpha = 90^\circ$ 图3  $\alpha = 75^\circ$  应力分布Fig. 3 Stress distribution when  $\alpha = 75^\circ$ 

应力减小, 这与纯剪断裂试件的应力分布非常相似。但当模板倾角为  $70^\circ$  或更小角度的时候, 切口端部仍然承受压剪应力的作用, 而在中部的正应力分布极为均匀且全为压应力, 故本实验条件下的剪切试件基本上处于均匀的压剪应力作用之下, 而无拉应力的存在。因此, 这样的断裂是真正的不含  $K_I$  影响的剪切断裂, 由此测得的剪切断裂韧度能够真实地反映岩石剪切断裂的特性。

比较单边切口和双边切口试件的实验结果发现, 双边切口试件的试验结果 ( $K_{IIc} = 3.23 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  和  $4.63 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) 要大于单边切口的试验结果 ( $K_{IIc} = 3.10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  和  $4.42 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), 产生这一现象的原因是两者的应

力分布状态不同。对双边切口试件而言, 在应力计算时综合考虑了由裂纹导致的应力集中问题, 而单边切口试件则仅考虑了单边切口的应力集中问题, 而与模板接触边界的应力集中无法考虑。而根据文献[4]的研究, 模板与岩石接触边界通常有巨大的压应力集中。应变测试也表明这一集中压应力能导致接触边界区域很大的拉应变<sup>[6]</sup>。这表明在剪切方向包含有拉伸断裂的成分, 故其结果要小于双边切口试件。两者比较, 双边切口试件比单边切口试件的测试结果更为合理, 压剪试验建议采用双边切口试件。

对双边切口试件而言, 当模板倾角  $\alpha = 60^\circ$ ,  $65^\circ$  和  $70^\circ$  时, 大理岩 A 的剪切断裂韧度  $K_{IIc}$  测试值 ( $K_{IIc} = 3.33 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $3.32 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $3.46 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) 最大差值不超过 4%, 而当模板倾角  $\alpha = 55^\circ$  时, 则  $K_{IIc} = 2.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 比前者至少要小 20%。产生这一现象的原因是由于当模板倾角减小时, 作用于剪切面上的有效剪应力由  $\alpha = 60^\circ$  时的  $Q = 0.3P$  减小至  $\alpha = 55^\circ$  时的  $Q = (\sin 55^\circ - 1.13 \cos 55^\circ)P = 0.17P$ 。当这一剪应力不足以导致沿切口方向的剪切断裂时, 试件沿最大有效剪应力方向斜向断裂或由压应力导致开裂, 此时的断裂与沿切口方向剪切断裂的受力形式已有很大不同, 故其结果是无效的。

## 2.2 断裂形式与断裂判据的讨论

岩石 II 型裂纹的扩展存在着张拉与剪切两种完全不同的断裂形式, 若把 II 型裂纹张拉扩展的断裂韧度假定为  $K_{IIc}^{II}$ , 则理论与实验均已表明  $K_{IIc}^{II} < K_{Ic}^{[9,10]}$ 。

II 型裂纹的 II 型扩展作为岩石断裂的又一种形式, 尽管被认为在实验条件下很难实现, 但在岩体工程中却极为普遍, 若假定 II 型断裂时的断裂韧度为  $K_{IIc}^{II}$ , 则其相应的判据为:  $K_{II} = K_{IIc}^{II}$ 。

由本文的实验结果表明,  $K_{IIc}^{II}$  比  $K_{Ic}$  要大得多, 如大理岩 A 的  $K_{IIc}^{II} = 3.23 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $K_{Ic} = 0.92 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; 大理岩 B 的

$K_{IIc}^{II} = 4.63 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $K_{Ic} = 1.26 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 因此岩石的 II 型断裂韧度是一远不同于 II 型裂纹 I 型扩展时的断裂韧度值, 通常情况下, 前者为后者的数倍。

由于 II 型裂纹有可能发生 I 型扩展和 II 型扩展两种完全不同形式的断裂, 因此相应的岩石断裂韧度  $K_{IIc}^I$  及  $K_{IIc}^{II}$  分别适用于两种不同的断裂形式, 若把岩石 II 型裂纹的 II 型断裂与 I 型断裂两种完全不同的形式相提并论, 必将导致完全错误的结论。

### 3 结论

(1) 压剪断裂试件能够有效抑制 II 型裂纹端部应力场的拉应力, 并由此实现 II 型裂纹的剪切断裂。

(2) 压剪断裂试件基本上处于较为均匀的压剪应力作用之下, 由此测出的  $K_{IIc}$  能够较为真实地反映岩石剪切断裂的特性, 特别是双边切口试件是一种理想的测试岩石 II 型断裂韧度的简便方法。

(3) 岩石 II 型裂纹的扩展有张拉型和剪切型两种完全不同的形式, 并相应有二个完全不同大小的断裂韧度和断裂判据。

### REFERENCES

- 1 Solveig Melin. International Journal of Fracture, 1986, 30: 103.
- 2 Wang Guiyao (王桂尧) and Sun Zongqi (孙宗颀). Journal of Central South University of Technology (中南工业大学学报), 1995, 26(3): 314.
- 3 Barr B. Engng Fract Mech, 1990, 35: 171.
- 4 Wang Guiyao (王桂尧) and Sun Zongqi (孙宗颀). The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1996, 6(1): 17-21.
- 5 Wang Guigao and Sun Zongqi. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(1): 6.
- 6 Wang Guiyao (王桂尧) and Sun Zongqi (孙宗颀). Chinese Journal of Geotechnical Engineering (岩土工程学报), 1996, 18(4): 68.
- 7 Izumi M and Mihashi H. Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. Amsterdam: Wittman Elsevier Science Publishers, 1986: 386.
- 8 Zhou Qunli (周群力). Chinese Journal of Hydraulic Engineering (水利学报), 1982, (7): 63.
- 9 Li Liyun. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (岩石力学与工程学报), 1994, 13(2): 134.
- 10 Yin Guanzi (尹光志). Journal of Chongqing University (重庆大学学报), 1988, 11(5): 113.

## EXPERIMENTAL METHOD STUDY FOR MODE II ROCK FRACTURE TOUGHNESS

Wang Guiyao, Sun Zongqi<sup>†</sup> and Xu Jicheng<sup>†</sup>

*Institute of Geotechnics Engineering, Changsha Communications University,  
Changsha 410076, P. R. China*

*<sup>†</sup> College of Resources, Environment and Civil Engineering,  
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China*

**ABSTRACT** In view of the problem existed in pure shear fracture specimen, the experimental method has been investigated, which is used to cause mode II fracture and to measure mode II fracture toughness. Meanwhile, the two different modes of fracture behavior and fracture criteria for mode II crack were discussed.

**Key words** shear fracture fracture toughness experimental method

(编辑 何学锋)