

纯剪载荷作用下的岩石断裂^①

王桂尧 孙宗硕 徐纪成

(中南工业大学资源开发工程系, 长沙 410083)

摘要 利用四点弯剪切法研究了岩石纯剪载荷作用下的断裂规律, 并提出了岩石发生真Ⅱ型断裂的条件, 探讨了测定岩石真Ⅱ型断裂韧性的方法。

关键词 剪切 断裂形式 断裂韧性

岩石剪切断裂研究的重要性由于其在水利、地震、采矿等岩体工程中的普遍性而备受关注, 但迄今为止的岩石断裂力学仍然极少涉足这一领域。在岩石混凝土类材料中, 人们普遍使用四点弯剪切法研究其剪切断裂特性, 但其结果却均为偏转原裂纹面 $50^\circ \sim 70^\circ$ 的张拉型裂纹扩展, 而不是沿原裂纹面扩展的剪切断裂, 由此测得的 K_{Ic} 值也大多低于或略大于 $K_{Ic}^{[1-3]}$, 结果可由线弹性断裂力学的经典理论如最大拉应力理论、最大拉应变理论、最小应变能密度因子理论或其它修正的理论得到合理解释, 在文献[4]中利用载荷尽可能靠近切口的高窄剪力区四点弯剪切法得到了与以前完全不同的结果, 认为其断裂为沿裂纹面扩展的剪切断裂, 并测得其剪切断裂能为Ⅰ型断裂能的25倍, 文献[5]也用同样方法得出了利用高窄剪力区方案能够实现剪切断裂的结论, 为进一步研究岩石的Ⅱ型断裂规律本文利用大理岩进行了四点弯剪切试验。

1 实验方法

根据材料力学的观点, 图1所示的四点弯剪切试件中, 弯矩为零的部位不受正应力的作用, 在此部位预先切口可认为仅受纯剪载荷的作用。实验试件为 $10\text{ cm} \times 22\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 和 10

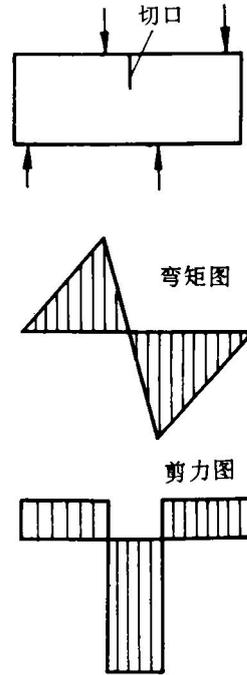


图1 四点剪切试件弯矩和剪力图

$\text{cm} \times 22\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的大理岩矩形块, 试件上下部分预切双边切口或单边切口, 其切口宽度为 0.6 mm , 切口深度与试件高度比值分别为 0.15 和 0.35 , 同时部分试件两边切有不同深度的导向槽(图2所示)。加载系统为 Instron1342型电液伺服刚性试验机, 用自制的拐式装置配合张压式位移传感器测定切口两边的相对滑动位移和两切口间韧带区的滑动位

① 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1994-12-30; 修回日期: 1995-07-11

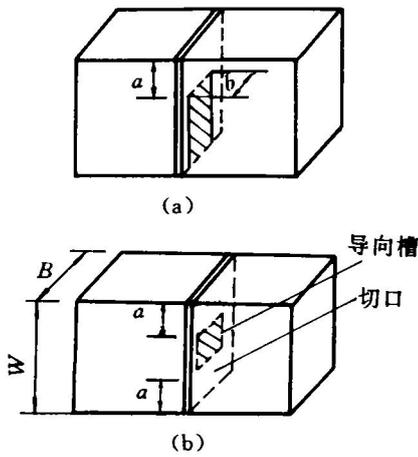


图2 导向槽试件示意图

移。整个加载过程为位移控制的连续加载，加载速率为 $1.25 \mu\text{m/s}$ 。

2 试验结果

2.1 无导向槽试件的实验结果

当系统加载至岩样峰值载荷的 45% (试件深切比 $a/W = 0.15$) 或 75% ($a/W = 0.35$) 左右时，在双边切口尖端首先出现初裂角 $\theta = 40^\circ \sim 70^\circ$ 的张拉型裂纹，这条裂纹随着载荷的增加而稳定扩展，扩展轨迹由初裂角方向迅速转为平行于载荷方向 (图 3(a) 所示)，在不断扩展过程中，裂纹有向切口中心偏转的趋势，当这两条裂纹扩展至一定长度时突然转向并与切口尖端贯通，并且这一贯通的过程是瞬时完成的，同时也有部分试件 (主要为 $a/W = 0.15$ 的试件) 的张拉裂纹扩展至一定长度后失稳扩展至自由边界而断裂 (图 3(b))。

研究切口两边的相互滑动位移和载荷之间的关系曲线发现 (图 4 所示)，当载荷达一定值 P_1 时，切口尖端开始出现张拉裂纹并随载荷的增加而稳定扩展，但当载荷达峰值后，载荷却随裂纹的扩展而减小，当它的最大滑动位移达 0.12 mm 时，裂纹失稳扩展，同时研究韧带区的剪切位移和载荷之间的关系曲线 (图 5 所示)

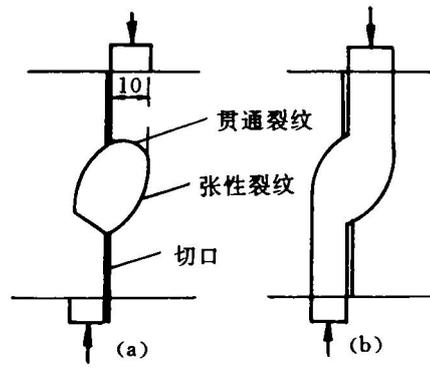


图3 裂纹扩展示意图

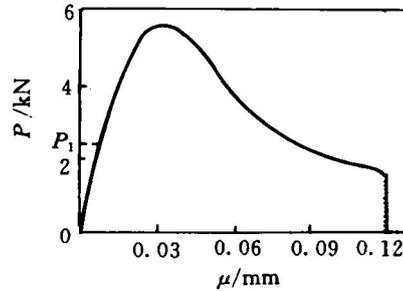


图4 切口面滑动位移与剪切力关系图

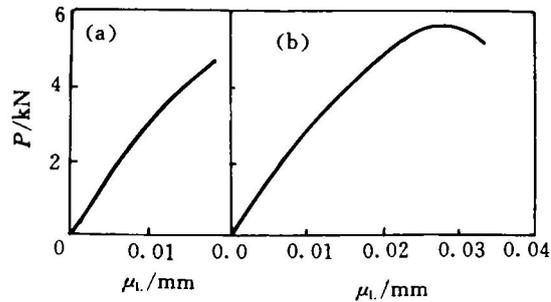


图5 韧带区滑动位移与剪切力关系曲线

知，对 $a/W = 0.15$ 的试件图 5(a)，当试件破坏时，韧带区的岩石尚未达到其强度极限，而 $a/W = 0.35$ 的试件 (图 5(b))，当载荷达峰值后，韧带区的岩石有一定程度的弱化而使载荷下降。由此可见，这一载荷已使韧带区岩石达到了其剪切断裂的强度极限，但由于张拉型扩展裂纹比剪切扩展裂纹的能量释放更快，故其断裂仍为张拉型破坏。

表2 导向槽试件Ⅰ型断裂实验结果

试件号	试件高 W/mm	试件宽 B/mm	试件净宽 b/mm	切口 类型	切口深 a/mm	a/W	剪切力 Q/kN	断裂韧性 K _{IC} /MPa·m ^{1/2}
FS ₁	103.0	31.3	19.5	单边	47.0	0.46	11.25	4.52
FS ₂	104.0	31.4	19.1	单边	47.6	0.46	11.70	4.80
FS ₃	102.0	29.0	16.6	单边	48.3	0.47	7.2	3.42
FS ₄	102.0	29.0	17.7	单边	48.0	0.47	8.1	3.62
平均值								4.09
FS ₅	100.6	19.0	11.5	单边	47.5	0.47	8.6	5.87
FS ₆	100.6	19.5	11.5	单边	50.0	0.50	6.45	4.41
FS ₇	100.5	19.2	11.0	单边	52.0	0.52	7.56	5.41
FS ₈	100.5	19.2	11.2	单边	47.8	0.48	7.56	5.54
平均值								5.31
FP ₁	101.5	19.8	7.4	双边	30.5	0.30×2	4.00	6.68
FD ₂	102.0	19.6	7.7	双边	30.5	0.30×2	4.80	6.89
FD ₃	101.0	19.2	8.0	双边	25.5	0.25×2	5.92	7.09
FD ₄	101.5	19.6	8.0	双边	36.0	0.35×2	3.20	5.26
平均值								6.48
FD ₁₆	100.0	19.6	13.6	双边	29.0	0.29×2	5.00	3.99
FD ₁₇	103.0	19.8	14.0	双边	30.0	0.29×2	6.00	4.60
FD ₁₈	100.0	19.1	14.0	双边	28.8	0.29×2	5.00	3.83
FD ₁₉	102.7	19.0	14.5	双边	29.5	0.29×2	5.76	4.22
平均值								4.16

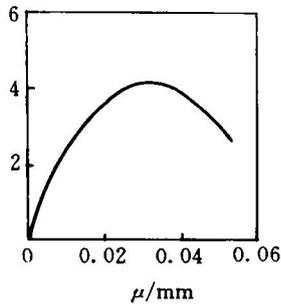


图6 导向槽试件滑动位移-载荷关系曲线

Ⅰ型断裂韧性 $K_{IC} = 4.11$ 导向槽试件的 $K_{IC} = 4.09$ 或 $K = 4.16$ 均具有极为一致的结果，表明导向槽的存在对 K_{IC} 的测定结果并无影响，利用导向槽试件进行Ⅰ型断裂韧性的测试是一种极为简便有效的方法。

在Ⅰ型断裂中，岩石试件的厚度对其断裂韧性的测试结果并无什么影响，因此 IRSM 推荐的岩石断裂韧性测试方法中对试件厚度不作要求，但就岩石Ⅰ型断裂而言，由表2可知，只有当其厚度达一定值时， K_{IC} 的测试结果才

趋于一常数，在本实验条件下，这一最小厚度约为 13mm。

3.3 剪切断裂机理的探讨

当在试件中施加剪切载荷时，剪切面的载荷可分解为图7(b)所示正应力的作用，岩石中的微观缺陷在此拉应力的作用下发生张拉扩展，当这一张性微裂纹扩展至一定长度时，相邻微裂纹间的岩石发生断裂而使微裂纹互相贯通并导致试件的最终Ⅰ型断裂，由此导致的断口显然应该是锯齿形的。

由上分析可知，岩石Ⅰ型断裂是张拉型微裂纹互相贯通的结果，根据这一观点，传统意义上的Ⅰ型断裂在微观上可能并不存在，但岩石断裂力学主要研究岩石的宏观断裂行为而不考虑其微观断裂过程，在此意义上，宏观的岩石Ⅰ型断裂仍然存在。

4 结论

- (1) 利用导向槽试件测定岩石的真Ⅰ型断

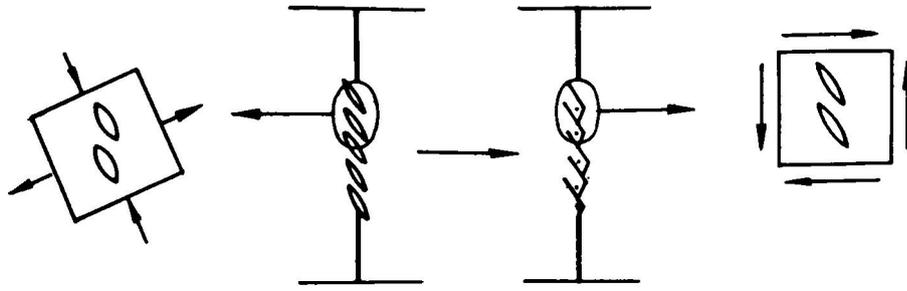


图7 剪切断裂过程图

裂韧性 K_{Ic} 值是一种简便有效的方法, K_{Ic} 的测试结果在其厚度小于某一值时存在有明显的厚度效应, 这一最小厚度在本实验条件下为 13 mm。

(2) 切口间岩石的剪切力达峰值且该部分岩石已发生应变软化时, 尽管其最终断裂为张拉型, 但利用峰值剪切力仍能计算岩石的真 II 型断裂韧性。

(3) 能否用纯剪断裂方法实现岩石的真 II 型断裂取决于试件材料的真 II 型断裂韧性 K_{Ic} 与 I 型断裂韧性 K_{Ic} 的比值大小, 若 K_{Ic} 值小于某一临界值, 则试件会发生真 II 型断裂, 反之, 试件首先发生张拉型裂纹的扩展, 但其最终断裂形式则为拉断或剪断, 这取决于两者应变软化段的斜率比值。

(4) 不同的断裂方向应有不同大小的断裂韧性, 从而其断裂判据也应有所不同。

(5) 岩石材料的剪切断裂是张性微裂纹互

相贯通的结果, 其断口为锯齿状。

参考文献

- 1 Ingraffea A R. In: Proc 22nd US Symp on Rock Mech. Cambridge Mass: MIT Press, 1981: 199-204.
- 2 黎立云, 黎振兹, 孙宗顺. 岩石力学和工程学报, 1994, 13(2): 134-140.
- 3 Zipf R K, Bieniawski Z T. J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1990, 27(6): 479-493.
- 4 Bazant Z P, Pfeiffer P A. Mater Constr, 1987, 19(110): 257-263.
- 5 徐道远, 冯伯林, 郭建中. 河海大学学报, 1990, 18(3): 8-14.
- 6 Davies J. J Fract, 1986, 31: R19-R21.
- 7 中国航空研究院主编. 应力强度因子手册. 北京: 科学出版社, 1981: 122.
- 8 Bar B, Derrad M. Engng Fract Mech, 1990, 35: 171-180.
- 9 刘大安. 博士学位论文, 中南工业大学. 1991: 86.

ROCK FRACTURE UNDER PURE SHEAR LOADING CONDITIONS

Wang Guiyao, Sun Zongqi, Xu Jicheng

Department of Resources Exploitation,

Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT With the four point bend shear specimens, the fracture behavior under pure shear loading conditions was studied and the condition for pure mode I fracture to happen was investigated. Furthermore, the measurement of determining pure mode I fracture toughness was investigated too.

Key words shear fracture form fracture toughness

(编辑 何学锋)