

岩石断裂韧度与抗压强度的相关规律

李江腾, 古德生, 曹平, 吴超

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 利用 Instron1342 型电液伺服材料试验机, 采用单轴压缩试验和双扭常位移松弛试验对大理岩、上盘二辉橄榄岩、下盘二辉橄榄岩、矿石、混合岩 5 组岩石的试件进行力学参数测试, 获得相应的抗压强度、Ⅱ型断裂韧度等试验数据。以试验数据为依据, 分析这 5 组岩石的Ⅱ型断裂韧度与抗压强度的关系。研究表明: 随着抗压强度 σ_c 的增加, Ⅱ型断裂韧度 K_{Ic} 相应增大, 且呈很好的线性关系, 其关系式为: $K_{Ic} = 0.0265\sigma_c + 0.0014$, 其相关系数 R^2 为 0.94。基于该关系式, 可由易于测试的抗压强度估算Ⅱ型断裂韧度。

关键词: 岩石; 抗压强度; 断裂韧度

中图分类号: O342.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2009)06-1695-05

Interrelated law between mode-II fracture toughness and compression strength of rock

LI Jiang-teng, GU De-sheng, CAO Ping, WU Chao

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The mechanics parameters of marble, upper lherzolite, down lherzolite, granite and ore were tested by uniaxial compression testing and relaxation method of double torsion constant displacement load using Instron1342 type electro hydraulic servo test machine. Compression strength and the mode-II fracture toughness K_{Ic} were obtained. Their relationships were studied based on the testing data. The results show that mode-II fracture toughness K_{Ic} increases with the increase of compression strength σ_c , and the curve of mode-II fracture toughness K_{Ic} and compression strength σ_c is in accordance with linear rule, the expression is: $K_{Ic} = 0.0265\sigma_c + 0.0014$, and the coefficient of determination R^2 is 0.94. The expression may provide a helpful method for estimating the fracture toughness through the compression strength which can be measured easily.

Key words: rock; compression strength; fracture toughness

由于岩石的抗压强度远远高于抗拉强度, 两者相差高达数十倍, 工程中的岩石结构大多设计成处于受压状态。即使是自然状态中的岩体, 由于构造应力和自重应力的作用, 通常也处于这种受载状态, 从而使岩石的压剪破坏成为最常见的破坏模式。处于压剪应力状态的裂纹, 其裂纹尖端仍处于拉剪应力状态, 使裂纹发生转折、断裂面发生分离都是由于张应力超过了原子间的结合力, 并导致Ⅱ型破坏, 因而, 压剪断裂与Ⅱ型断裂密切相关^[1], 即: 裂纹的扩展必然包括

Ⅱ型断裂的机理。Lajtai^[2]研究了压缩下裂纹的张性扩展现象。Bazant 等^[3-4]的实验结果表明: 当混凝土等脆性材料内的裂纹受压扩展时, 裂纹前端的Ⅰ型模式占支配地位。事实上, 早在人们研究Ⅱ型和Ⅲ型断裂问题时就注意到了岩石张性起裂现象。Ebrahimi 等^[5]指出: 在相应加载下, 滑移型(Ⅱ型)和撕开型(Ⅲ型)裂纹扩展并不会发生, 断裂模式总是张开的, 其实质是裂纹Ⅱ型起裂后在扩展过程中产生的次生现象。Nemat-Nasser 等^[6-8]的研究也表明: 在压剪应力状态, 裂纹总

收稿日期: 2008-10-25; 修回日期: 2009-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774093); 中国博士后科学基金资助项目(20060400264); 中南大学博士后科学基金资助项目(20060400264)

通信作者: 李江腾(1964-), 女, 湖南株洲人, 博士, 教授, 从事岩土工程的研究; 电话: 13973113109; E-mail: ljtsu@163.com

是以转折(Kink)的方式发生型断裂。因此,探讨岩石的抗压强度与型断裂韧度之间的关系具有重要的理论意义和工程意义。目前,人们研究了岩石断裂韧度与材料参数^[9-10],对岩石断裂韧度与抗压强度之间的关系研究较少。为此,本文作者利用 Instron1342 型电液伺服材料试验机,采用单轴压缩试验和双扭常位移松弛试验对大理岩、上盘二辉橄榄岩、下盘二辉橄榄岩、矿石、混合岩 5 组岩石的试件进行力学参数测试,以试验数据为依据,分析 5 组岩石的型断裂韧度与抗压强度的关系。

1 岩石抗压强度试验

抗压强度试验在中南大学测试中心 INSTRON 1342 伺服机上进行,采用位移控制,所有试验数据通过计算机采集。

抗压强度 σ_c 的计算式为:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: P 为试件的破坏荷载; A 为试件横截面积。

1.1 试样加工

试样为经过高精度加工制成的圆柱体,直径 D 为 50 mm,高度 L 为 100 mm,两端不平度为 0.5 mm,尺寸误差为 ± 0.3 mm,两端面垂直于轴线误差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

1.2 测试结果

表 1 所示为 5 组岩石各试样抗压强度、弹性模量等力学参数测试结果。

2 型断裂韧度 K_{IC} 试验

采用双扭试验测试岩石的断裂韧度,其试样示意图见图 1,试验装置示意图见图 2。试件为 1 块矩形薄

表 1 抗压强度和弹性模量测试结果

Table 1 Testing values of compression strength and Young modulus

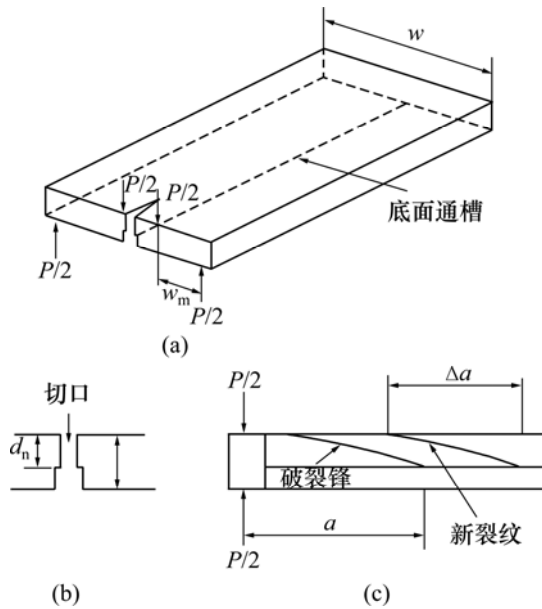
岩石类型	编号	抗压强度/MPa	抗压强度 平均值/MPa	弹性模量/GPa	弹性模量 平均值/GPa	泊松比	平均值
大理岩	1-1	62.13		34.10		0.27	
	1-2	64.90	62.7	23.40	33.70	0.23	0.26
	1-3	61.07		43.60		0.28	
下盘 二辉 橄榄岩	2-1	20.01		12.80		0.23	
	2-2	25.74		19.50		0.39	
	2-3	32.41		21.40		0.23	
	2-4	24.61	25.61	23.60	17.70	0.27	0.29
	2-5	17.80		17.40		0.33	
	2-6	8.72		20.80		0.31	
	2-7	33.01		9.54		0.3	
上盘 二辉 橄榄岩	3-1	40.20		23.40		0.21	
	3-2	50.80	42.96	30.50	26.70	0.28	0.24
	3-3	30.90		36.50		0.21	
	3-4	49.95		16.40		0.26	
矿石	4-1	56.16		20.84		0.21	
	4-2	72.93		35.87		0.29	
	4-3	44.55	53.1	40.32	32.95	0.23	0.24
	4-4	38.76		34.79		0.23	
混合岩	5-1	21.00		14.00		0.29	
	5-2	48.43		25.20		0.2	
	5-3	35.97	37.92	30.10	23.60	0.21	0.23
	5-4	36.25		11.00		0.21	
	5-5	47.95		37.7		0.23	

板, 在板的下表面沿长度方向的对称线开一中槽, 以使裂纹沿中槽扩展。双扭试件可以看作由 2 个弹性扭转杆组成。对于小变形, 当扭转杆的宽度远大于试件的厚度时, 参照文献[11-16], 可以推得裂纹尖端的应力强度因子 K 为:

$$K = Pw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3d_n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: P 为作用于扭杆上的荷载; w_m 为扭臂长度; ν 为泊松比; d 为试件厚度; d_n 为裂纹面上试件厚度, $w/2$ 为扭杆的宽度; E 为弹性模量; t 为时间。

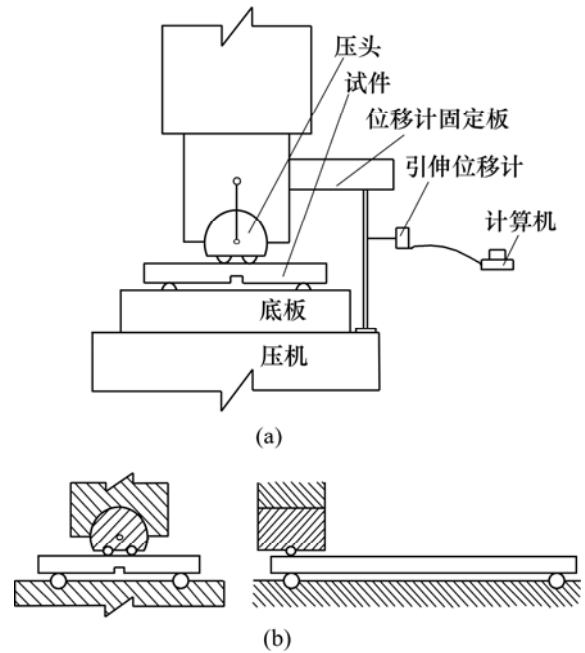
当荷载 P 达到临界值 P_c 时, 裂纹快速扩展, 此时, K 也达到临界值, 即为断裂韧度 K_c 。



(a) 试件形状; (b) 横向截面; (c) 纵向截面

图 1 双扭试件示意图

Fig.1 Schematic diagram of double torsion specimen



(a) 试验装置; (b) 加载方式

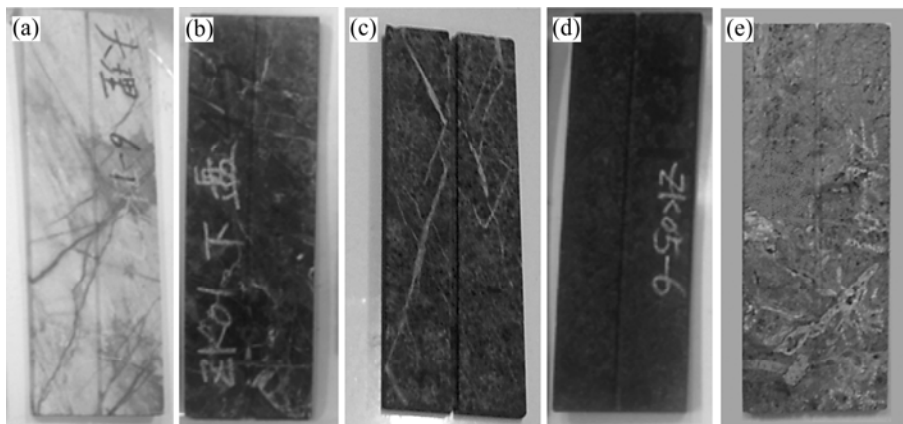
图 2 试验装置和加载方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of testing device and loading mode

$$K_c = P_c w_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3t_n} \right]^{1/2} \quad (3)$$

2.1 试样制备

从金川矿区工地取回 5 种岩石的岩芯, 用岩石切割机将岩石锯成矩形薄片双扭试件, 沿中央轴线锯制 1 条通槽, 槽宽为 1 mm, 槽深约为 $t/3$ 。在试样一端沿中央轴线开 1 个长为 10 mm 的“V”型切口。在加载过程中, 裂纹从切口开始, 并沿导向槽延伸。加工时, 试样上、下表面平整, 不平行度误差低于 $25 \mu\text{m}$ ^[11-14, 17]。图 3 所示为 5 种岩石的双扭试样。



(a) 第 1 组; (b) 第 2 组; (c) 第 3 组; (d) 第 4 组; (e) 第 5 组

图 3 双扭试件

Fig.3 Double torsion specimens

2.2 测试方法

双扭试验在中南大学测试中心 Instron1342 型电液伺服材料试验机上进行。为获得合理的 K_{IC} ，需对试件以恒定位移速率进行预裂^[11-13, 17]，预裂速度为 0.05 mm/min。图 4 所示为典型试件预裂时的载荷—时间曲线。

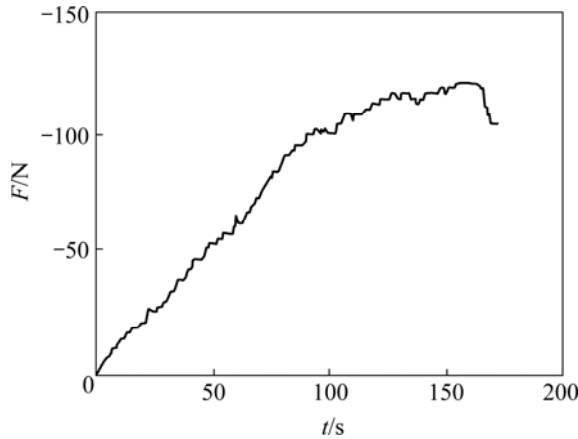


图 4 典型试件预裂载荷—时间曲线

Fig.4 Load—time curve of typical specimen in pre-crack

在测试断裂韧性 K_{IC} 时，以 20 mm/min 的恒定位移速率^[9, 14]对预裂过的试件加载，测得其破坏载荷 P_c ，利用式(3)可求得断裂韧性 K_{IC} 。图 5 所示为典型试件测试断裂韧性 K_{IC} 时所采集的载荷—时间曲线。

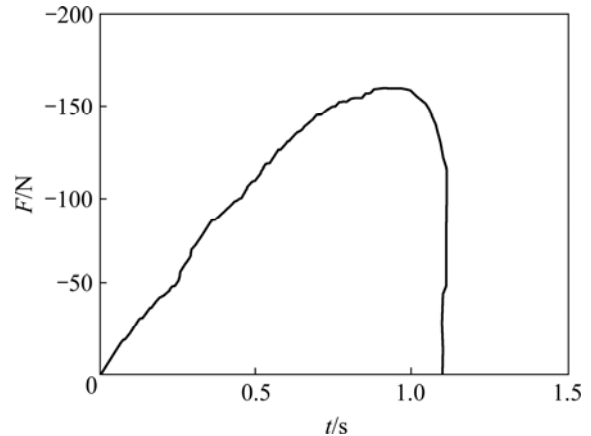


图 5 典型试件 K_{IC} 实测载荷—时间曲线

Fig.5 Load—time curve of typical specimen in testing K_{IC}

2.3 测试结果

表 2 所示为 5 组岩石 K_{IC} 型断裂韧性 K_{IC} 测试值。

3 断裂韧性与抗压强度相关规律

理论上，抗压强度越高，其抵抗裂纹扩展的能力增强，即断裂韧性越大。表 3 所示为 5 组岩石的抗压强度和断裂韧性，图 6 所示为岩石抗压强度与 K_{IC} 型断裂韧性的变化关系。从图 6 可以看出， K_{IC} 型断裂韧性随抗压强度的增加而增加，理论结果与实际结果一致。

表 2 断裂韧性 K_{IC} 测试值

Table 2 Fracture toughness K_{IC} testing value

岩石类型	实验序号										均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
矿石	1.53	1.54	1.57	1.51	1.56	1.55	1.67	1.62	—	—	1.56
下盘二辉橄榄岩	0.62	0.49	0.49	0.72	0.86	0.83	0.85	0.94	0.64	0.65	0.71
上盘二辉橄榄岩	1.74	0.84	1.12	0.99	0.97	1.31	0.91	0.90	—	—	1.10
混合岩	0.89	0.91	0.93	0.98	—	—	—	—	—	—	0.93
大理岩	1.71	1.42	1.66	1.56	1.60	—	—	—	—	—	1.59

表 3 岩石断裂韧性 K_{IC} 和抗压强度 σ_c

Table 3 Fracture toughness and compression strength of rock

参数	矿石	下盘二辉橄榄岩	上盘二辉橄榄岩	混合岩	大理岩
σ_c /MPa	53.10	25.61	42.96	37.92	62.70
K_{IC} /($MN \cdot m^{-3/2}$)	1.56	0.71	1.10	0.93	1.59

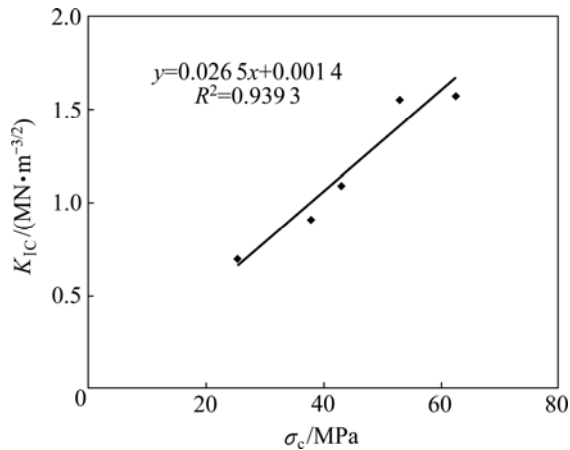


图6 型断裂韧度随抗压强度变化关系

Fig.6 Relationship between Mode I fracture toughness and compression strength

4 结 论

a. 利用 Instron1342 型电液伺服材料试验机, 采用单轴压缩试验和双扭常位移松弛试验对矿石、上盘二辉橄榄岩、下盘二辉橄榄岩、大理岩、花岗岩 5 组岩石的力学参数进行了试验研究, 获得了相应的 I 型断裂韧度、抗压强度等试验数据, 分析了岩石断裂韧度与抗压强度之间的关系。

b. 随着抗压强度的增加, 岩石的 I 型断裂韧度也增大, 与实际结果一致, 且呈很好的线性关系, 其关系为: $K_{Ic} = 0.0265\sigma_c + 0.0014$ (相关系数 $R^2 = 0.94$)。

c. 由于抗压强度测试方法简单, 而断裂韧度测试方法较复杂, 基于该关系式, 可由易于测试的抗压强度估算 I 型断裂韧度。

参考文献:

[1] 陈 枫. 岩石压剪断裂的理论及实验研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2002.
CHEN Feng. Study on theory and experiment of compressive-shear fracture[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2002.

[2] Lajtai E Z. A theoretical and experimental evaluation of Griffith theory of brittle fracture[J]. Tectonophysics, 1971, 11(2): 129-156.

[3] Bazant Z P. Crack band theory for fracture of concrete[J]. Materials and Structures, 1983, 16(2): 155-177.

[4] Santiago S D, Hilsdorf H K. Fracture mechanism of concrete under compressive loads[J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(4): 363-388.

[5] Ebrahimi M E, Chevalier J, Fantozzi G. Slow crack growth behavior of alumina ceramics[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15(1): 142-147.

[6] Nemat-Nasser S, Horii H. Compression-induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockbursts[J]. Journal of Geophysics Research, 1982, 87(B8): 6805-6821.

[7] Melin S. When does a crack grow under mode I conditions[J]. International Journal of Fracture, 1986, 30(1): 103-104.

[8] LI Jiang-teng, CAO Ping, YUAN Hai-ping. Testing study of subcritical crack growth velocity and fracture toughness of marble[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2005, 11(1): 23-25.

[9] Zhang Z X. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(3): 401-406

[10] Brown G J, Reddish D J. Experimental relationship between rock fracture toughness and density [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997, 34(1): 153-155.

[11] 李江腾. 硬岩矿柱失稳及时间相依性研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2005.
LI Jiang-teng. Study on instability and time dependence of pillar in hard rock mass[D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2005.

[12] 袁海平, 曹 平, 周正义. 金川矿岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 381-384.
YUAN Hai-ping, CAO Ping, ZHOU Zheng-yi. Testing study of subcritical crack growth of ore in Jinchuan mine[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 381-384.

[13] CAO Ping, LI Jiang-teng, YUAN Hai-ping. Testing study of subcritical crack growth and fracture toughness in different rocks[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(3): 709-713.

[14] Andreas K, Eckhard P, Jorg W, et al. Subcritical crack growth in Al_2O_3 with submicron grain size[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(1): 81-89.

[15] Ciccotti M, Gonzato G, Mulargia F. The double torsion loading configuration for fracture propagation: an improved methodology for the load-relaxation at constant displacement[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(7): 1103-1113.

[16] Ciccotti M, Negri N, Gonzato G, et al. Practical application of an improved methodology for the double torsion load relaxation method[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(4): 569-576.

[17] 于晓中. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
YU Xiao-zhong. Fracture mechanics of rock and concrete[M]. Changsha: Press of Central South University of Technology, 1991.