

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3585-07

砂岩 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究

邓华锋, 朱 敏, 李建林, 王 宇, 罗 骞, 原先凡

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 岩石的破坏和断裂是密切相关的, 岩石强度准则的材料参数和断裂理论的断裂韧度是存在特定关系的, 基于此, 设计了紧凑的试验方案, 对干燥和饱水状态下的砂岩试样进行了 3 点弯曲断裂韧度试验和抗压、抗拉强度试验, 试验结果表明, 饱水后, 砂岩的 I 型断裂韧度软化效应明显, 饱水试样和干燥试样的 K_{IC} 比值与砂岩抗压强度的软化系数相近, 具有相似的软化效应。同时, 从理论上分析了岩石 I 型断裂韧度与抗拉强度之间的关系, 并结合大量的试验数据进行了验证, 相关结论为以往的岩石 I 型断裂韧度与抗拉强度之间的数据统计拟合公式提供了理论基础。最后, 统计分析了砂岩 I 型断裂韧度与抗压强度、黏聚力、内摩擦角等强度参数之间的关系。研究成果对于把握砂岩 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性具有较大的参考价值, 相关的分析结论、试验方法和试验结果也可以为其他类型岩石的研究提供有益的参考。

关 键 词: 断裂韧度; 饱水砂岩; 抗拉强度; 软化系数; 相关性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study of mode- I fracture toughness and its correlation with strength parameters of sandstone

DENG Hua-feng, ZHU Min, LI Jian-lin, WANG Yu, LUO Qian, YUAN Xian-fan

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education,
China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Rock damage and fracture is closely related to each other, and there is a specific relationship between strength criterion parameters and fracture toughness of fracture theory. Based on these, a compact test scheme was designed for three-point bending fracture toughness test, compressive strength test and tensile strength test of sandstone under the states of dry and saturated. The test results show that after saturated in water, the softening effect of mode I fracture toughness of sandstone was obviously, and the fracture toughness K_{IC} ratio of water-saturated sample and dry sample is close to the sandstone softening coefficient of the compressive strength, showing a similar softening effect. Meanwhile, the relationship of the mode I fracture toughness and the tensile strength was discussed through theoretical analysis; and a large number of experimental data was used to verify the analysis results. As a result the analysis results can provide a theoretical basis for the previous statistical fitting formulas between mode I fracture toughness and the tensile strength. Finally, statistics and analysis of the relationship between mode I fracture toughness and compressive strength, cohesion, friction angle and some other strength parameters was made. Research results have an important reference value for the study of the correlation between mode I fracture toughness and strength parameters of sandstone, and the related test methods, test results and conclusions can provide favorable evidences for the experimental research of other types of rocks.

Key words: fracture toughness; water-saturated sandstone; tensile strength; softening coefficient; correlation

1 引 言

岩石断裂的力学参数, 如断裂韧度在岩石的切削、钻探、水压致裂、爆破、隧道开挖所涉及的岩石破裂过程中的重要性已显而易见, 岩土工程和采

矿工程越来越关注岩石断裂韧度 K_{IC} 的测试^[1-4]。近年来, 对地热能源和其他能源(油和气)的需求越来越大, 在这些能源开发项目中, 经常采用水压致裂和现场爆破技术, 因而, 关于岩石断裂韧度的评价显得愈加重要。自然状态中的岩体, 由于构造应

收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 973 计划前期研究专项课题 (No. 2012CB426502); 宜昌市科学技术研究与开发项目 (No. A2011-302-6); 三峡大学科学基金 (No. KJ2011B008)。
第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

力和自重应力的作用, 压剪破坏是常见的破坏模式, 但即使处于压剪应力状态, 其裂纹尖端仍处于拉剪应力状态^[1], 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 I 型破坏; Lajtai^[2]、Bazant^[3]、Santiago 等^[4]、Ebrahimi 等^[5]、Nemat-Nasser 等^[6]、Melin^[7]、Li 等^[8]也对压剪应力状态裂纹的张性扩展进行了大量的研究, 认为裂纹总是以转折的方式发生 I 型断裂, 而滑移型 (II 型) 和撕开型 (III 型) 裂纹扩展实质是裂纹 I 型起裂后在扩展过程中产生的次生现象。因此, 探讨岩石的 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性具有十分重要的理论和工程意义。

目前, 关于各种岩石的断裂韧度参数研究取得了较多研究成果, 主要集中在各类岩石的静态、动态断裂韧度测试和分析^[9-15], 同时, 对岩石断裂韧度与强度参数之间的相关性方面也进行了较多的研究, 刘杰等^[16]、陈星^[17]从理论上分析了岩石强度准则的材料参数和压剪断裂理论的断裂韧度之间的关系, 但二者关系确定的基础是先根据经验假定裂纹扩展方向 θ 和扩展半径 r , 因此, 其结果往往存在较大的人为因素; 李江腾等^[18]统计发现岩石的 I 型断裂韧度和抗压强度呈现较好的线性相关性, 同时, 较多学者^[19-26]基于数据统计对岩石 I 型断裂韧性与抗拉强度之间的相互关系也进行了研究, 提出了一些数据拟合公式, 但很少从理论上去分析二者的相关性。另一方面, 岩石饱水时, 其抗压强度、黏聚力和内摩擦角降低早为较多试验验证, 其断裂韧度将如何变化等等, 还有较多问题值得我们进一步的研究探讨。基于此, 本文特对干燥和饱水状态下砂岩的 I 型断裂韧度 K_{Ic} 及其与强度参数之间的相关性进行试验和理论研究。

2 试验方案设计

岩石断裂韧度测试比一般的力学参数测试更为复杂和困难, 岩石断裂韧度的测试方法很多, 本文采用文献[27]推荐的直切口圆柱形试件, 进行三点弯曲断裂试验。试件直径 $D = 50$ mm, 长度 $L = 210 \sim 240$ mm, 切口先用超薄金刚石锯片加工, 深度为 $22 \sim 23$ mm, 宽度为 1.0 mm, 然后再用单面刀片手工刻画切槽的根部使其尖锐。试样制备时按照规范要求严格控制精度, 同时在试样切口之前, 测试纵波波速, 严格选择^[28], 共选取干燥试样 10 个, 饱水试样 12 个。

本文设计这种试验方案, 并且采用较大尺寸的试件, 一方面以减小尺寸效应的影响, 另外一个主

要目的是增加试验的紧凑性, 尽量控制试验结果的离散性, 断裂韧度试样长度为 $210 \sim 240$ mm, 试验后, 对断裂的 2 段试样再进行加工处理, 制备成尺寸为 $\phi 50$ mm $\times$ 100 mm 和 $\phi 50$ mm $\times$ 30 mm 的试样, 进行三轴抗压强度试验 (围压: 0、5、10、15、20 MPa) 和圆盘劈裂抗拉试验, 典型试样如图 1 所示。



(a) 断裂前



(b) 断裂后

图 1 典型砂岩试样图

Fig.1 Typical sandstone samples



图 2 试验设备图

Fig.2 Test equipment figure

三点弯曲试验选用 WAW-1000D 型微机控制电液伺服万能试验机, 如图 2 所示, 伺服液压荷载框架由 4 根立柱构成, 刚度为 $1\ 100$ kN/mm, 目的是为了采用较大刚度的试验机, 减小试验机压头的变形, 进而减小对试样上裂纹扩展的不利影响。试验时, 用夹式引伸计测量裂纹张开位移 (CMOD), 引伸计的精度为 0.001 mm, 试验时采用切口张开位

移速率控制, 取 0.01 mm/min (规范规定小于 6×10^{-4} mm/s, 合 0.036 mm/min), 采用 CMOD 控制的优点是它只与试样切口处的张开变形有关, 从而排除了试验机以及加载滚轴和试样接触部位变形的影响, 如果采用荷载点位移 (LPD) 控制, 这些影响就难以排除。

3 试验结果及分析

3.1 砂岩 I 型断裂韧度 K_{Ic} 试验结果及分析

断裂韧度及其他参数试验结果如表 1 所示, 其中断裂韧度 K_{Ic} 采用文献[27]中的公式进行计算。

$$K_{Ic} = 0.25 \left(\frac{S_d}{D} \right) \frac{P_{max}}{D^{1.5}} y \left(\frac{a}{D} \right) \quad (1)$$

$$y \left(\frac{a}{D} \right) = \frac{12.75 \left(\frac{a}{D} \right)^{0.5} \left[1 + 19.65 \left(\frac{a}{D} \right)^{4.5} \right]^{0.5}}{\left(1 - \frac{a}{D} \right)^{0.25}} \quad (2)$$

式中: K_{Ic} 为断裂韧度 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$); D 为试件直径 (m); S_d 为两支承点间的距离 (m); P_{max} 为断裂破坏荷载 (N); a 为直切口深度 (m)。

表 1 断裂韧度 K_{Ic} 测试值

Table 1 Testing values of fracture toughness K_{Ic}

状态	长度 / cm	纵波 波速 / (m/s)	峰值 荷载 / kN	切口 深度 / cm	峰值荷载对应 切口张开位移 / mm	K_{Ic} / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
干燥	21.6	3 044	0.413	2.20	0.076	0.366
	22.1	3 036	0.398	2.20	0.057	0.352
	22.2	2 942	0.413	2.25	0.069	0.378
	22.1	3 017	0.398	2.25	0.062	0.364
	23.4	2 895	0.428	2.20	0.051	0.379
	22.6	2 968	0.381	2.30	0.060	0.361
	23.1	2 891	0.377	2.20	0.056	0.334
	22.8	3 103	0.435	2.25	0.063	0.398
	23.4	3 024	0.383	2.30	0.068	0.362
	22.8	2 978	0.412	2.30	0.053	0.390
	22.2	3 344	0.363	2.20	0.069	0.321
	23.0	3 312	0.302	2.30	0.088	0.310
饱和	21.8	3 373	0.343	2.30	0.093	0.325
	21.0	3 353	0.318	2.20	0.096	0.282
	24.0	3 310	0.285	2.20	0.076	0.273
	23.0	3 317	0.324	2.20	0.081	0.287
	21.5	3 268	0.328	2.20	0.072	0.290
	21.3	3 334	0.323	2.20	0.089	0.286
	23.3	3 382	0.378	2.20	0.098	0.335
	22.2	3 374	0.291	2.30	0.076	0.275
	23.5	3 271	0.328	2.30	0.088	0.310
	21.7	3 324	0.301	2.30	0.101	0.285

从表 1 可以看出:

(1) 选取的砂岩试样中, 干燥试样的纵波波速为 2 891~3 103 m/s, 饱水试样的纵波波速为 3 268~3 382 m/s, 饱水后纵波波速增大了 10%左右, 两种状态下各试样的波速总体分布相对集中, 说明选取的试样均匀性是较好的。

(2) 断裂试验中, 干燥试样的峰值荷载对应切口张开位移为 0.051~0.076 mm, 均值为 0.062 mm; 饱水试样的峰值荷载对应切口张开位移为 0.069~0.101 mm, 均值为 0.086 mm, 饱水后, 峰值荷载对应切口张开位移明显增大, 岩石塑性增强。

(3) 干燥砂岩试样的 I 型断裂韧度 K_{Ic} 为 0.334~0.398 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 均值为 0.368 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 标准差为 0.019, 变异系数为 0.050; 饱水砂岩试样的断裂韧度 K_{Ic} 为 0.273~0.335 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 均值为 0.298 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 标准差为 0.021, 变异系数为 0.070, 说明试验结果的离散性较小, 其均值可以比较准确地表示其断裂韧度; 二者比值为 0.809, 软化效应明显。

(4) 如图 1(b)所示, 从试件断口形态来看, 断裂试件的断口断面均比较平直, 裂纹均沿着切槽平面扩展, 说明切口产生了较好的引导作用。

3.2 砂岩抗压、抗拉强度试验结果及分析

对加工好的砂岩试样进行了三轴抗压强度试验 (围压: 0、5、10、15、20 MPa), 每个围压进行 4 次重复试验, 干燥和饱水状态各选择了 8 个试样进行了巴西圆盘劈裂抗拉强度试验。三轴抗压强度试验和劈裂试验均在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行, 劈裂试验采用专用的劈裂试验盒, 如图 3 所示, 选用直径为 1 mm 的钢丝作垫条。试验结果如表 2、3 所示。

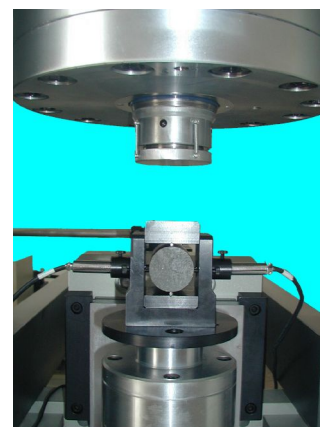


图 3 巴西圆盘劈裂试验盒

Fig.3 Brazil disk split test box

表 2 干燥和饱水试样抗压强度值
Table 2 Compression strength of dry
and saturated samples

围压 / MPa	干燥试样		饱和试样		软化 系数
	抗压强度 / MPa	均值 / MPa	抗压强度 / MPa	均值 / MPa	
0	57.34	56.31	45.89	46.17	0.820
	60.38		49.67		
	55.38		46.12		
	52.13		42.99		
5	102.34	101.72	89.28	83.74	0.823
	110.46		81.32		
	95.62		85.68		
	98.47		78.69		
10	143.29	145.08	125.19	120.98	0.834
	135.87		115.61		
	151.48		123.87		
	149.68		119.27		
15			155.73	152.40	
			145.65		
			155.81		
			152.40		
20	212.67	209.15	182.30	180.14	0.861
	219.54		169.21		
	198.42		173.88		
	205.98		195.16		

表 3 抗拉强度试验结果
Table 3 Testing values of tensile strength

试样 状态	试样抗拉强度/ MPa								均值 / MPa	软化 系数
干燥	3.08	3.33	3.27	2.98	2.82	3.54	3.43	2.88	3.17	0.824
饱和	2.98	2.22	2.96	3.02	2.41	2.03	2.27	2.98	2.61	

从表 2 可以看出, 不同围压情况下, 砂岩抗压强度相对比较集中, 而且, 围压越大, 抗压强度离散性相对较小。饱水后岩石软化明显, 单轴抗压强度的软化系数为 0.820, 随着围压的增大, 饱和抗压强度与干燥抗压强度的比值(这里统称为软化系数)略有增大趋势。结合表 2、3 可以看出, 抗拉强度和抗压强度具有相近的软化系数。

3.3 砂岩 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与强度参数相关性分析

以往的研究表明, 岩石类材料的各个强度与各个韧性之间存在着一定的联系。较多学者^[18-25]基于数据统计方法对岩石 I 型断裂韧性与抗拉强度、抗压强度之间的关系进行了研究, 结果表明, I 型断裂韧度和抗压强度、抗拉强度呈现较好的线性相关性, 并提出了一些数据拟合公式, 但很少从理论上分析二者的相关性。下面主要从岩石的 I 型断裂

韧度与抗拉强度之间的关系进行讨论分析。

对于拉剪状态, 如图 4 所示, 根据裂纹端部范围纯拉、纯剪的应力叠加, 有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= D - A + B \\ \sigma_y &= D + A - 2C - B \\ \tau_{xy} &= A + E - F \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{式中: } A = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}; \quad B = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot$$

$$\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}; \quad C = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}; \quad D = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2};$$

$$E = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}; \quad F = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}。$$

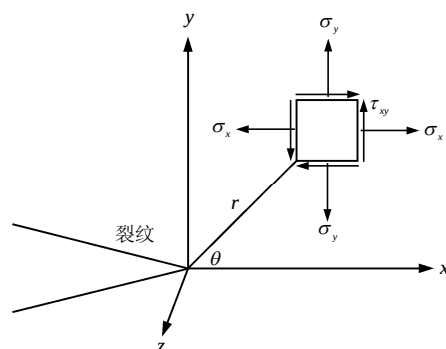


图 4 裂纹端部示意图

Fig.4 Schematic diagram of crack tip

对岩石而言, 与金属材料有很大的区别, 除非在高温、高压情况下, 其裂纹端部均未发现塑性变形现象, 通常用发生微裂隙来解释裂纹端部出现的非弹性应力区。文献[19-25]研究表明: 岩石类材料的破坏, 根本原因之一在于微裂纹的扩展, 而引起微裂纹扩展的根本因素, 在于微裂纹受到了拉应力, 而不是压应力或者剪应力。因此, 在建立微裂纹模型时采用了最大正应力判据, 其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_t \quad (4)$$

式中: σ_t 为岩石的抗拉强度。当处于纯拉应力状态下时, $K_{II} = 0$, 结合式 (3)、(4) 可得

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \quad (5)$$

对于纯 I 型裂纹, 扩展角为 $\theta = 0^\circ$, 则有

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出, K_{Ic} 和 σ_t 是岩石的材料参数, π 是一个常数, 因此, 从理论上讲, 对应某种岩石的纯 I 型断裂破坏, 其裂纹扩展半径 r 值应该是常数。为此, 下面对以往学者研究的大量试验数据^[19, 23-26]进行了统计分析, 具体如表 4 所示。

表 4 岩石断裂韧度 K_{Ic} 测与抗拉强度统计表
Table 4 Fracture toughness and tensile strength of rocks

岩石类型	K_{Ic} (实验值) / (MPa · m ^{1/2})	σ_t / MPa	r / mm	K_{Ic} (计算值) / (MPa · m ^{1/2})
白云岩	1.66	13.3	2.5	1.76
	1.66	16.4	1.6	2.17
	1.80	12.1	3.5	1.60
	1.78	13.0	3.0	1.72
	2.47	17.0	3.4	2.25
石灰岩	0.99	5.4	5.4	0.77
	1.36	11.9	2.1	1.71
	2.06	15.0	3.0	2.16
	0.85	8.5	1.6	1.22
	1.38	8.5	4.2	1.22
油页岩	0.37	3.3	2.0	0.37
	1.55	13.2	2.2	1.72
	1.61	13.2	2.4	1.72
	1.76	13.2	2.8	1.72
	1.89	13.2	3.3	1.72
正长岩	1.93	13.2	3.4	1.72
	1.75	13.2	2.8	1.72
	1.51	11.1	2.9	1.45
	1.21	11.1	1.9	1.45
	1.36	11.1	2.4	1.45
花岗岩	2.15	15.4	3.1	2.04
	2.19	16.8	2.7	2.23
	2.17	16.3	2.8	2.16
	2.08	16.2	2.6	2.15
	0.85	6.2	3.0	0.87
大理岩	0.63	4.6	3.0	0.64
	2.68	17.3	3.8	2.41
	2.26	15.4	3.4	2.15
	2.02	13.9	3.4	1.94
	1.7	12.1	3.1	1.69
砂岩	1.44	10.0	3.3	1.40
	1.28	9.9	2.7	1.38
	0.98	9.3	1.8	1.30
	1.13	7.3	3.8	1.02
	0.67	5.1	2.8	0.61
本文试验砂岩	0.28	2.7	1.8	0.32
	0.38	3.3	2.1	0.40
	0.56	4.0	3.1	0.48
	1.47	10.1	3.4	1.21
	1.40	17.0	1.1	2.04
本文试验砂岩	0.37	3.3	2.0	0.40
	0.45	3.7	2.4	0.44
本文试验砂岩	0.37	3.2	2.1	0.38
	0.30	2.6	2.1	0.31

从表 4 可以看出, 根据式 (6) 计算的裂纹扩展半径 r 值分布在 0.2~5.4 mm 之间, 但其中约 80% 的 r 值分布在 1.5~3.5 mm 之间, 均值为 2.4 mm, 而且, 每种岩石的裂纹扩展半径 r 值分布相对集中。各类岩石的裂纹扩展半径 r 值略有差别, 白云岩、石灰岩、油页岩、正长岩、花岗岩、大理岩、砂岩的 r 均值分别为: 2.8、3.3、2.0、2.7、2.8、3.1、2.3 mm, 其中石灰岩、大理岩的 r 均值相对较大, 白云岩、正长岩、花岗岩次之, 砂岩、油页岩的 r 均值相对较小。

这些数据分析结果也印证了上面关于某种岩石的纯 I 型断裂破坏, 其裂纹扩展半径 r 值为一个常数的观点。以往的研究也表明, 岩石断裂韧度和抗拉强度各种测试方法的结果存在一定的离散性, 这也导致了裂纹扩展半径 r 的计算值可能会在一个较小的范围内变化。

据此, 可以根据各类岩石的抗拉强度和试验统计得到的 r 均值, 计算出对应的 I 型断裂韧度 K_{Ic} , 对式 (6) 变形可得

$$K_{Ic} = \sigma_t \sqrt{2\pi r} \quad (7)$$

根据式 (7), K_{Ic} 计算值详见表 4 中所示, 各类岩石的 K_{Ic} 实测值和计算值吻合较好, 其中, 本文试验中干燥和饱和砂岩试样的断裂韧度 K_{Ic} 实测值分别为 0.37、0.30 MPa · m^{1/2}, 计算值分别为 0.38、0.31 MPa · m^{1/2}, 二者相差仅 3.53% 和 5.26%。说明上述理论分析是合理的。

以往的研究也表明, 岩石 I 型断裂韧度与抗拉强度具有较好的线性关系, 并用数据统计方法给出了一些统计公式, 如表 5 所示。

表 5 岩石断裂韧度 K_{Ic} 测与抗拉强度经验公式统计表
Table 5 Empirical formulas of fracture toughness and tensile strength of rocks

资料来源	公式
Whittaker 等 ^[24]	$\sigma_t = 9.35K_{Ic} - 2.53$
Zhang ^[25]	$\sigma_t = 6.88K_{Ic}$
本文砂岩试样	$\sigma_t = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2\pi r}} = 8.32K_{Ic}$

从表 5 可以看出, 从理论分析得出的岩石断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度关系公式和以往采用统计方法得出的拟合公式具有同样的形式, 而且系数相近, 说明 2 种分析方法得到的结论和规律是一致的, 这也给以往数据统计公式建立理论基础。

而且, 有的学者也从破坏机制和破坏形态等方

面对岩石的断裂和抗拉破坏进行了分析,认为岩石的强度与韧性之间,之所以存在着一定的联系,就是因为它们本质是一致的,引起破坏的力学机制是相同的^[29],因此,可以通过测试试件的抗拉强度,来推测该试件的断裂韧性,这将大大简化断裂韧性的测试。

同时,结合以往的统计分析,这里对砂岩 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗压强度、 c 、 ϕ 值也进行了统计分析,如表 6 所示。

表 6 砂岩断裂韧度 K_{Ic} 与抗压强度、 c 、 ϕ 值
Table 6 Fracture toughness and compression strength, cohesion, friction angle of sandstone

试样 状态	K_{Ic} / (MPa·m ^{1/2})	单轴抗压强度 / MPa	ϕ / (°)	c / MPa	抗拉强度 / MPa
干燥	0.368	56.31	50.12	11.19	3.17
饱和	0.298	46.17	47.87	9.51	2.61

从表 6 可以看出,饱和和干燥砂岩试样的断裂韧度 K_{Ic} 的比值 0.809 与砂岩单轴抗压强度的软化系数 0.820 相近,具有类似的软化效应;砂岩断裂韧度 K_{Ic} 约为单轴抗压强度的 1/150,约为内摩擦角的 1/145,约为黏聚力的 1/30,约为抗拉强度的 1/9。

4 结 论

(1)对饱和和干燥砂岩试样进行了3点弯曲断裂韧度和抗压强度、抗拉强度试验,得到了砂岩 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗压强度、抗拉强度、 c 、 ϕ 值等力学参数,研究表明,饱水情况下,砂岩的 I 型断裂韧度与抗压强度、抗拉强度具有类似的软化效应。

(2)从理论上分析了岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度之间的关系,并结合大量试验数据进行了验证,分析成果为以往的岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度之间的数据统计拟合公式提供了理论基础。

(3)由于断裂韧度试验比较复杂,而抗拉强度测试方法相对简单,因此,可以根据各类岩石的抗拉强度和试验统计得到的 r 值,方便地估算出对应的 I 型断裂韧度 K_{Ic} 。至于断裂韧度与抗压强度、黏聚力、内摩擦角等力学参数之间除了满足统计上的规律,是否存在理论上的关系也值得进一步的深入研究。

参 考 文 献

[1] 陈枫. 岩石压剪断裂的理论实验研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 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 rock bursts[J]. **Journal of Geophysics Research**, 1982, 87(B8): 6805—6821.
[7] MELIN S. When does a crack grow under mode II 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] 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.
[10] 张盛, 王启智. 用 5 种圆盘试件的劈裂试验确定岩石断裂韧度[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 12—18.
ZHANG Sheng, WANG Qi-zhi. Determination of rock fracture toughness by split test using five types of disc specimens[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 12—18.
[11] 陈勉, 金衍, 袁长友. 围压条件下岩石断裂韧性的实验研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(4): 32—35.
CHEN Mian, JIN Yan, YUAN Chang-you. Study on the experiment for fracture toughness under confining pressure[J]. **Mechanics in Engineering**, 2001, 23(4): 32—35.
[12] 张盛, 王启智. 采用中心圆孔裂缝平台圆盘确定岩石的动态断裂韧度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 723—728.
ZHANG Sheng, WANG Qi-zhi. Method for determination of dynamic fracture toughness of rock using holed-cracked flattened disc specimen[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(6): 723—728.

- [13] DONG S M, WANG Y, XIA Y M. A finite element analysis for using Brazilian disk in split Hopkinson pressure bar to investigate dynamic fracture behavior of brittle polymer materials[J]. **Polymer Testing**, 2006, 25(7): 943—952.
- [14] 邓华锋, 李建林, 刘杰. 考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 297—302.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie. Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 297—302.
- [15] 邓华锋. 库水变幅带水-岩作用机理和作用效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [16] 刘杰, 李建林, 周济芳. D-P 准则与岩石断裂韧度 K_{Ic} , K_{IIc} 关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 23(增刊 1): 4300—4302.
- LIU Jie, LI Jian-lin, ZHOU Ji-fang. Research on relation of d-p failure criterion and rock fracture toughness K_{Ic} , K_{IIc} [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 23(Supp.1): 4300—4302.
- [17] 陈星. 浅析断裂力学法确定岩体强度参数[J]. 现代矿业, 2010, 490(2): 34—36.
- CHEN Xing. Analysis of fracture mechanics method to confirm strength parameter of rock mass[J]. **Modern Mining**, 2010, 490(2): 34—36.
- [18] 李江腾, 古德生, 曹平. 岩石断裂韧度与抗压强度的相关规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1695—1699.
- LI Jiang-teng, GU De-sheng, CAO Ping. Interrelated law between mode- I fracture toughness and compression strength of rock[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(6): 1695—1699.
- [19] 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.
- [20] GOLSHANI, ALIAKBAR, OKUI Y, et al. A micromechanical model for brittle failure of rock and its relation to crack growth observed in triaxial compression tests of granite[J]. **Mechanics of Materials**, 2006, 38(4): 287—303.
- [21] LI H B, ZHAO J, LI T J. Micromechanical modeling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(6): 923—935.
- [22] GOLSHANI, ALIAKBAR, ODA M, et al. Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(6): 835—845.
- [23] LI H B, ZHAO J, LI T J. Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(8): 1057—1063.
- [24] WHITTAKER B N, SINGH R N, SUN G. Rock fracture mechanics: Principles, design and applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [25] ZHANG Z X, KOU S Q, LINDQVIST P A, et al. The relationship between the fracture toughness and tensile strength of rock[C]//Strength theories: applications, development & prospects for 21st century. Beijing/NewYork: Science Press, 1998: 215—223.
- [26] 于晓中. 岩石和混凝土段力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988.
- [27] 中华人民共和国水利部. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [28] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399—3403.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3399—3403.
- [29] 满轲, 周宏伟. 不同赋存深度岩石的动态断裂韧性与拉伸强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1657—1663.
- MAN Ke, ZHOU Hong-wei. Research on dynamic fracture toughness and tensile strength of rock at different depths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1657—1663.