

文章编号:1673-2049(2018)04-0097-08

基于强度参数脆性指数的岩石 I 型断裂韧度评价

包 含¹, 郭文明², 张国彪¹, 晏长根¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要:在试验数据收集基础上,选取 3 种典型强度脆性指数作为考察对象,建立 I 型断裂韧度与脆性指数之间的线性关系,得到基于不同脆性指数的岩石 I 型断裂韧度参数化模型。通过引入交叉验证法获得准确的模型参数,并对模拟结果进行检验,评价各模型的适用性和相互之间的差异。结果表明:3 种评价模型在评价和预测岩石 I 型断裂韧度上均有很高的可靠性,可以借助脆性指数评价岩石的 I 型断裂韧度;3 种模型的评价和预测精度存在一定差异,总体来看,基于莫尔圆脆性指数的评价模型优于压拉强度脆性指数评价模型和抗压强度脆性指数评价模型,从而证明 I 型断裂韧度是岩石综合力学性质的体现,利用多强度指标建立评价模型将会获得更准确、合理的 I 型断裂韧度值;由于抗压强度获取便捷,利用其建立的评价模型也具有较高的评价精度,在要求快速评价时,可优先考虑选择基于抗压强度脆性指数的岩石 I 型断裂韧度评价模型。

关键词: I 型断裂韧度;脆性指数;强度参数;多强度指标;优化模型

中图分类号: TU458.3 **文献标志码:** A

Evaluation of Mode I Fracture Toughness of Rock Based on Brittleness Index of Strength Parameters

BAO Han¹, GUO Wen-ming², ZHANG Guo-biao¹, YAN Chang-gen¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Henan Transportation Research Institute Co., Ltd, Zhengzhou 450006, Henan, China)

Abstract: On the basis of experimental data collection, three typical strength brittleness indices were selected as the investigation object. The linear relationship between mode I fracture toughness and brittleness index was established, and the mode I fracture toughness parameterization models of rock based on different brittleness indices was obtained. The cross validation method was adopted to get the accurate model parameters, and the simulation results were tested to evaluate the applicability and differences between the models. The results show that the three evaluation models have strong reliability in evaluating and predicting the mode I fracture toughness of rock, and can be used to evaluate the mode I fracture toughness of rock by means of brittleness index. There are certain differences in the evaluation and prediction accuracy of the three models. On the whole, the evaluation model based on the Mohr circle brittleness index is superior to the compression-tension strength brittleness index evaluation model and the compression strength brittleness index evaluation model. It is proved that the mode I fracture toughness is the embodiment of the comprehensive mechanical properties of rock, and a more accurate and reasonable mode I fracture toughness value will be obtained by using the multi

收稿日期:2018-02-14

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(41790443);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821171007)

作者简介:包 含(1988-),男,河南商丘人,讲师,工学博士,E-mail:baohangeo@163.com。

strength index to establish the evaluation model. Because of the convenience of the compressive strength, the evaluation model built with it also has high evaluation accuracy. In the requirement of rapid evaluation, the mode I fracture toughness evaluation model of rock based on the compression brittleness index can be considered.

Key words: mode I fracture toughness; brittleness index; strength parameter; multi strength index; optimization model

0 引 言

断裂韧度是反映岩石抵抗裂纹扩展能力的重要力学参数,在科学研究和工程实践中应用广泛。I 型断裂韧度 K_{IC} 作为最常用的断裂力学参数,反映了岩石抵抗拉张破坏的能力。为获取岩石的 I 型断裂韧度,国际岩石力学学会(ISRM)推荐使用“V”形切槽圆梁三点弯曲(CB)试样^[1]、短棒(SR)试样^[1]、“V”形切槽巴西圆盘(CCNBD)试样^[2]和中心直裂纹半圆盘三点弯曲(SCB)试样^[3],美国材料与测试协会(ASTM)则推荐了单边直裂纹三点弯曲梁(SC3PB)试样^[4]。通过测试直接获取 K_{IC} 值的方法往往比较复杂,成本也较高,不利于快速、便捷地评价岩石的断裂韧度。因此,建立简单、快捷并满足一定精度要求的 K_{IC} 值评价方法一直受到学者关注。

大量研究证实,岩石 K_{IC} 与岩石本身物理力学参数之间存在联系,尤其是与抗拉强度 σ_t 、抗压强度 σ_c 、密度 ρ 、点荷载 $I_{s(50)}$ 、声波波速 V_p, V_s 等关系密切,如表 1 所示。因此,可借助岩石其他物理力学参数建立 K_{IC} 值快速评价方法,但是这些关系多建立在单一物理参数基础上,很少涉及表征岩石综合物理性质的参数。事实上,综合参数在反映岩石物理力学性质方面更具有代表性,因此建立综合参数与断裂韧度之间的关系更有意义。在岩石综合参数中,脆性指数属于典型的力学特性参数^[5]。Ramsay^[6] 认为其综合反映了岩石发生脆性破坏时克服本身内聚力的能力,这与 I 型断裂韧度具有相似的物理意义,因此可尝试建立基于脆性指数的岩石 K_{IC} 值评价方法。然而,岩石脆性指数计算方法较多,基于岩石基本强度参数计算脆性指标是一类比较常用的方法^[5],主要包括基于抗压强度 σ_c 的脆性指数 $B_1=q\sigma_c$ (q 为比例系数)、基于抗压和抗拉强度的脆性指数 $B_2=\sqrt{\sigma_c\sigma_t}/2$ 、基于内摩擦角的脆性指数 $B_3=\sin(\varphi)$ (φ 为内摩擦角)。

本文将在数据统计分析的基础上,选取 3 种典型脆性指数建立 K_{IC} 值的评价方法,并分析评价效果,从而提供快捷、合理并满足一定精度要求的 K_{IC}

表 1 岩石 K_{IC} 与其他物理力学参数经验关系
Tab.1 Empirical Relations Between K_{IC} and Other Physical-mechanics Parameters of Rock

关系式	决定系数 R 或 R^2	文献
$K_{IC}=0.004\ 4\sigma_c+1.04$	$R=0.72$	[7]
$K_{IC}=0.099\ 5I_{s(50)}+1.11$	$R=0.67$	[7]
$K_{IC}=0.073\ 6\sigma_t+0.76$	$R=0.73$	[7]
$K_{IC}=0.026\ 5\sigma_c+0.001\ 4$	$R^2=0.94$	[8]
$K_{IC}=0.199\ I_{s(50)}$	$R=0.948$	[9]
$K_{IC}=3.35\rho-6.87$	$R^2=0.70$	[10]
$K_{IC}=3.21\rho-6.95$	$R^2=0.91$	[11]
$\sigma_t=8.32K_{IC}$		[12]
$\sigma_t=9.35K_{IC}-2.35$	$R^2=0.62$	[13]
$\sigma_t=8.88K_{IC}^{0.62}$	$R^2=0.94$	[14]
$\sigma_t=6.88K_{IC}$	$R^2=0.78$	[15]
$K_{IC}=4.28\times10^{-3}\sigma_c+1.05$	$R=0.55$	[16]
$K_{IC}=3.5\times10^{-4}V_p-0.18$	$R=0.80$	[16]
$K_{IC}=7.1\times10^{-4}V_s-0.29$	$R=0.66$	[16]
$\sigma_t=5.37K_{IC}$	$R^2=0.97$	[17]
$K_{IC}=0.131\ 3\sigma_t+0.009\ 2$	$R^2=0.947$	[18]
$K_{IC}=0.354\ 6\sigma_t$	$R^2=0.88$	[19]
$\sigma_c=83.41K_{IC}$	$R^2=0.72$	[20]

估算方法,为科学研究和工程应用提供便利。

1 岩石 K_{IC} 与脆性指数相关性分析

脆性作为岩石重要的力学指标,主要体现在微小的形变就能使其破坏,是岩石在破坏过程中产生多裂缝面的能力。在 3 种岩石强度脆性指数中, B_1 为抗压强度脆性指数, B_2 为压拉强度脆性指数。对于 B_3 ,岩石内摩擦角由摩尔强度包络线在 C 点的切线斜率确定(图 1,其中 τ 为剪应力, σ 为主应力),与抗压强度、抗拉强度和黏聚力 c 有关,存在关系 $B_3=f(\sigma_c,\sigma_t,c)$,因此 B_3 被称为莫尔圆脆性指数。

由断裂力学理论可知, K_{IC} 为岩石发生张拉破坏的临界条件,反映了岩石材料抵抗拉张破坏的能力。抗拉强度、黏聚力也具有相似的表征,不仅如此,格里菲斯理论认为,不论何种应力状态下,材料都是因裂纹尖端附近达到极限拉应力而导致裂纹扩展、断裂,即材料压致破坏的机理也是拉张破坏。由此可

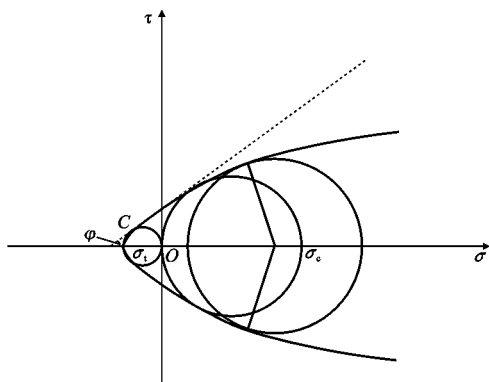


图 1 内摩擦角与莫尔圆关系

Fig. 1 Relation Between Internal Friction Angle and Mohr Circle

见,岩石 3 种脆性指数与 I 型断裂韧度之间存在一定理论相关性,均可反映岩石抵抗拉伸破坏的能力。因此,基于岩石脆性指数评价岩石断裂韧度是可行的。

以文献资料为基础,本文搜集了 86 组试验数据,涵盖了岩石断裂韧度、抗压强度、抗拉强度和黏聚力等力学参数(表 2),从而建立 K_{IC} 与几种脆性指标之间的参数化模型,并评价其差异性。

2 参数化模型建立方法与交叉验证

本文采用回归分析法获取 K_{IC} 与岩石几种脆性指标之间的参数化模型,并利用交叉验证法对模拟效果进行检验。交叉验证法作为一种常用的模型检验方法,在科学研究中应用广泛^[39-42],其具体应用为:每次随机选取全部观测数据的 2/3 拟合模型参数,利用其余 1/3 数据进行预测,同时计算模型评价指标,获得预测信息。本文研究中,为了减小交叉验证的随机误差,对验证过程进行无重复循环 500 次,最后以 500 次循环中各评价指标的平均值评价模型的预测能力。模型评价指标包括决定系数 R^2 和均方根误差 σ_{RMSE} ,具体计算方法如式(1),(2)所示

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中: x_i 为实测值; y_i 为计算值; n 为样本数量; \bar{x} , \bar{y} 分别为实测值和计算值的平均值。

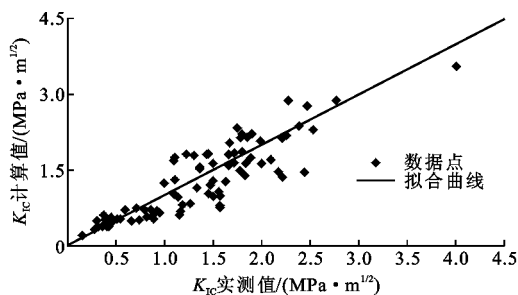
从表 1 可以发现,岩石 K_{IC} 与其他物理力学参

数之间多呈良好的线性关系,在参数化模型建立过程中, K_{IC} 与岩石脆性指标之间同样以线性为最佳拟合形式,因此选择线性关系作为岩石 K_{IC} 评价模型。应当说明的是,对于岩石材料,如果其脆性指数为 0,那么 K_{IC} 值也应为 0,因此本文中所得回归方程的常数项均为 0。

3 岩石 K_{IC} 评价模型建立

3.1 基于抗压强度脆性指数的岩石 K_{IC} 评价模型

以文献中 86 组试验数据作为研究对象(表 2),分析岩石 K_{IC} 与 B_1 之间的相关性,建立 K_{IC} 与 σ_c 之间的线性模型,即 $K_{IC} = a\sigma_c$,并通过交叉验证法获取最优比例系数 a ,结果见图 2 和表 3。

图 2 基于 B_1 的 K_{IC} 计算值与实测值对比Fig. 2 Comparison Between Computation and Test Values of K_{IC} Based on B_1

模型参数化表明, K_{IC} 与抗压强度脆性指数之间线性关系显著,线性系数为 0.010 5。基于抗压强度脆性指数的评价模型可以模拟 K_{IC} 观测值变化的 77.56%,均方根误差为 0.352 2 MPa · m^{1/2}。模型交叉验证结果显示,模型可以预测 K_{IC} 观测值变化的 76.57%,均方根误差为 0.361 9 MPa · m^{1/2}。由此可见,抗压强度脆性指数与 K_{IC} 之间关系紧密,基于抗压强度脆性指数可以比较准确地评价岩石的 I 型断裂韧度。

3.2 基于压拉强度脆性指数的岩石 K_{IC} 评价模型

参考基于抗压强度脆性指数评价模型建立方法,以 86 组试验数据为基础,获取 I 型断裂韧度与压拉强度脆性指数的相关关系,建立 K_{IC} 与 B_2 之间的一次线性回归模型,即 $K_{IC} = aB_2$,并通过交叉验证法获取最优参数 a ,进而评价模型的预测效果,结果见图 3 和表 4。

模型参数化表明, K_{IC} 与压拉强度脆性指数 B_2 之间的线性关系系数为 0.054 6,基于 B_2 的评价模型可以模拟 K_{IC} 观测值变化的 83.66%,均方根误差为 0.303 4 MPa · m^{1/2}。交叉验证结果显示,模型可

表 2 试验数据

Tab.2 Test Data

岩性	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	σ_c/MPa	σ_t/MPa	c/MPa	文献	岩性	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	σ_c/MPa	σ_t/MPa	c/MPa	文献
花岗岩	0.360	36.00	4.70		[21]	辉绿岩	4.000 0	340.00	37.500		[28]
灰岩	1.160	64.00	8.90		[21]	花岗岩	1.720 0	175.00	15.600		[13]
花岗岩	1.330	108.00	10.40		[21]	砂岩	0.280 0	30.00	3.500		[29]
花岗岩	1.130	91.00	12.30		[21]	灰岩	0.730 0	47.76	3.840		[9]
片麻岩	1.100	124.00	13.80		[21]	灰岩	0.817 0	53.06	4.580		[9]
片麻岩	1.500	92.00	15.20		[21]	砂岩	1.180 0	76.31	6.150		[9]
凝灰岩	1.100	97.00	10.50		[22]	灰岩	1.700 0	156.73	10.150		[9]
花岗岩	2.530	220.00	12.80		[23]	花岗岩	1.830 0	132.36	10.580		[9]
砂岩	0.589	66.90	4.90		[24]	石英岩	2.440 0	138.58	12.990		[9]
砂岩	0.795	66.90	4.90		[24]	砂岩	2.100 0	162.19	14.020		[9]
砂岩	0.850	66.90	4.90		[24]	安山岩	2.174 0	139.20	14.490		[9]
正长岩	1.360	148.60	11.10		[25]	砂岩硬	2.380 0	226.26	15.190		[9]
正长岩	1.750	222.60	13.20		[25]	闪长岩	2.215 0	128.81	15.770		[9]
玄武岩	2.270	274.50	21.50		[25]	闪长岩	2.770 0	274.82	18.420		[9]
闪长岩	2.250	208.00	13.90		[26]	砂岩	0.600 0	66.00	2.200	14.000	[30]
闪长岩	1.840	205.00	11.60		[26]	大理岩	0.910 0	66.00	2.600	17.000	[31]
花岗岩	1.300	170.00	11.40		[26]	大理岩	0.940 0	61.00	4.700	30.000	[31]
花岗岩	1.100	167.00	10.30		[26]	花岗岩	1.500 0	122.00	8.800	21.000	[32]
砂岩	0.660	45.30	3.23		[7]	大理岩	1.840 0	154.88	4.890		[33]
砂岩	0.710	71.00	3.71		[7]	大理岩	1.570 0	75.20	7.520		[33]
砂岩	1.150	57.20	5.94		[7]	大理岩	0.880 0	56.04	8.650		[33]
砂岩	1.570	93.10	7.93		[7]	大理岩	1.500 0	155.00	9.500		[18]
砂岩	1.470	114.00	10.10		[7]	砂岩	0.300 0	46.17	2.610	9.510	[12]
灰岩	1.360	145.00	11.90		[7]	砂岩	0.370 0	56.31	3.170	11.190	[12]
砂岩	1.800	208.00	12.10		[7]	煤	0.147 2	18.69	0.953	0.594	[34]
白云岩	1.800	177.00	12.10		[7]	砂岩	0.310 0	35.07	2.480		[35]
砂岩	1.630	121.00	12.30		[7]	砂岩	0.353 0	35.67	2.650		[35]
白云岩	1.780	142.00	13.00		[7]	砂岩	0.480 0	48.78	2.680		[35]
白云岩	1.720	157.00	13.20		[7]	砂岩	0.400 0	34.97	2.720		[35]
白云岩	1.660	172.00	13.30		[7]	砂岩	0.424 0	35.38	2.860		[35]
白云岩	1.980	198.00	15.20		[7]	砂岩	0.430 0	41.94	2.920		[35]
砂岩	1.780	203.00	15.70		[7]	砂岩	0.450 0	42.66	2.940		[35]
白云岩	1.660	152.00	16.40		[7]	砂岩	0.540 0	49.56	3.010		[35]
白云岩	2.470	264.00	17.00		[7]	砂岩	0.450 0	51.71	3.320		[35]
花岗岩	1.220	173.00	7.88		[27]	大理岩	1.260 0	79.00	3.100	25.000	[36]
花岗岩	1.440	173.00	7.88		[27]	花岗岩	1.880 0	166.00	10.700	37.000	[36]
花岗岩	1.800	212.00	12.70		[27]	砂岩	1.670 0	194.00	15.700	46.000	[36]
花岗岩	1.890	212.00	12.70		[27]	大理岩	2.210 0	202.00	17.600	51.000	[36]
砂岩	0.380	49.20	2.60		[28]	大理岩	1.560 0	101.09	7.130		[37]
砂岩	0.510	50.00	3.50		[28]	片麻岩	0.990 0	117.60	4.020		[38]
玄武岩	0.880	49.00	5.05		[28]	大理岩	1.090 0	160.72	5.120		[38]
花岗岩	1.450	174.00	10.00		[28]	灰岩	1.570 0	70.56	5.540		[38]
灰岩	1.990	155.00	13.70		[28]	玢岩	1.450 0	98.49	6.560		[38]

以预测 K_{IC} 观测值变化的 83.55%，均方根误差为 0.305 7 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。对比发现,在试验数据相同的情况下, K_{IC} 与 B_2 之间线性关系优于 B_1 , 在预测结果中,拟合优度提升了 9.12%，并且误差降低了

表 3 基于 B_1 的 K_{IC} 评价模型参数化和验证

Tab. 3 Parameterization and Validation of K_{IC} Evaluation Model Based on B_1					
模型 变量	模型参数化结果			验证结果	
	a	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
σ_c	0.010 5	0.775 6	0.352 2	0.765 7	0.361 9

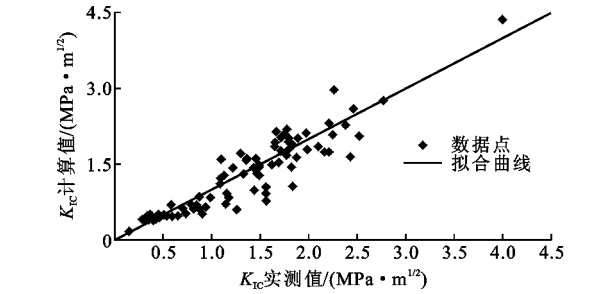


图 3 基于 B_2 的 K_{IC} 计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison Between Computation and Test Results of K_{IC} Based on B_2

表 4 基于 B_2 的 K_{IC} 评价模型参数化和验证

Tab. 4 Parameterization and Validation of K_{IC} Evaluation Model Based on B_2					
模型 变量	模型参数化结果			验证结果	
	a	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
B_2	0.054 6	0.836 6	0.303 4	0.835 5	0.305 7

表 5 基于 B_3 的 K_{IC} 评价模型参数化和验证

Tab. 5 Parameterization and Validation of K_{IC} Evaluation Model Based on B_3							
模型变量	模型参数化结果					验证结果	
	a_1	a_2	a_3	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	R^2	$\sigma_{RMSE}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
$\sigma_c \cdot \sigma_t \cdot c$	0.009 4	-0.044 3	0.019 0	0.923 4	0.176 1	0.855 6	0.293 4

0.293 4 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。由此可见,在考虑岩石黏聚力、抗压强度和抗拉强度等综合力学参数的条件下,评价岩石的 I 型断裂初度将会有较好的评价和预测效果。

4 岩石 K_{IC} 评价模型对比与分析

岩石的 3 种脆性指数均可以用来评价其 I 型断裂初度,但各评价模型之间存在一定的差异性。为了对比分析各评价模型的差异和适用性,在表 2 中,筛选相同试验组,分别建立基于 3 种脆性指数的评价模型,并通过交叉验证方法获得模型预测效果,结果见图 5 和表 6。

对比 3 种脆性指数的计算结果发现,虽然各模型均可以较好地评价岩石的 K_{IC} 值,但是 K_{IC} 与 B_3 之间模型关系明显优于 B_1 和 B_2 。由此可以说明,

15.53%。

3.3 基于莫尔圆脆性指数的岩石 K_{IC} 评价模型

内摩擦角的取值与岩石抗压强度、抗拉强度和黏聚力紧密相关,因此在表 2 中选择含黏聚力 c 的数据组,建立 K_{IC} 与 σ_c, σ_t, c 间的多元线性回归模型以反映 K_{IC} 与 B_3 之间的关系,回归方程可表示为 $K_{IC}=a_1\sigma_c+a_2\sigma_t+a_3c$ 。同时,通过交叉验证法获取最优参数 a ,评价模型的预测效果、模型参数化结果与交叉验证结果,见图 4 和表 5。

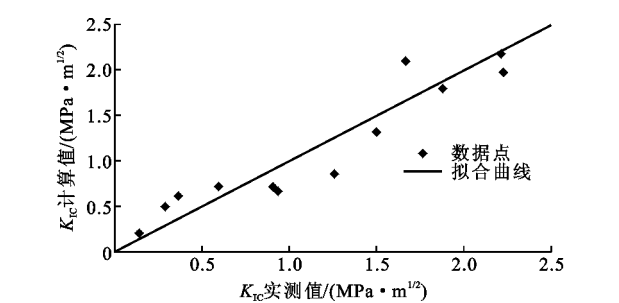


图 4 基于 B_3 的 K_{IC} 计算值与实测值对比

Fig. 4 Comparison Between Computation and Test Results of K_{IC} Based on B_3

模型参数化表明,基于 B_3 的评价模型可以模拟计算 K_{IC} 观测值变化的 92.34%,均方根误差为 0.171 6 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。模型交叉验证结果显示,模型可以预测 K_{IC} 观测值变化的 85.56%,均方根误差为

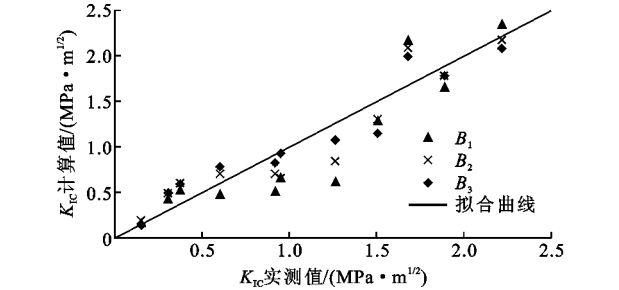


图 5 基于不同脆性指数的 K_{IC} 计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison Between Computation and Test Results of K_{IC} Based on Different Brittleness Indices

K_{IC} 虽然反映了岩石抵抗拉张破坏的能力,但仅利用单一强度指标进行评价并不是间接获取 K_{IC} 值的最优方式。事实上, K_{IC} 是岩石综合力学性质的体现,利用 B_3 评价岩石的 I 型断裂初度可以获得更真实的参数值。

表 6 基于不同脆性指数的 K_{IC} 评价模型对比

Tab. 6 Comparison of K_{IC} Evaluation Models Based on Different Brittleness Indices

模型变量	模型参数化结果						验证结果	
	a	a_1	a_2	a_3	R^2	$\sigma_{RMSE}/(MPa \cdot m^{1/2})$	R^2	$\sigma_{RMSE}/(MPa \cdot m^{1/2})$
σ_c	0.010 8				0.843 1	0.268 7	0.841 2	0.341 9
B_2	0.055 7				0.857 1	0.251 9	0.854 9	0.333 5
$\sigma_c \cdot \sigma_1 \cdot c$		0.009 4	-0.044 3	0.019 0	0.923 4	0.176 1	0.855 6	0.293 4

引入多种力学参数需要大量的试验数据作为基础,进而增加了 K_{IC} 评价过程的复杂程度,不利于方法的推广应用。考虑到岩石抗压强度是最为常用的强度指标,并且利用 B_1 的评价模型已有较高的精度,因此在快速评价 K_{IC} 值时可以选择用。

5 结 语

- (1)岩石 I 型断裂韧度与脆性指数之间具有一定的物理力学联系,可以借助脆性指数评价岩石的 I 型断裂韧度。
- (2)评价模型的建立和交叉验证方法的应用表明,利用 3 种典型强度脆性指数均可以取得较好的 I 型断裂韧度评价与预测结果,但是各模型之间存在一定差异性,总体来看,基于莫尔圆脆性指数的评价模型最优。
- (3) K_{IC} 是岩石综合力学性质的体现,为了更合理地获取 I 型断裂韧度值,可利用多强度指标建立综合评价模型。
- (4)岩石抗压强度作为最为常用的强度指标,利用其建立的 K_{IC} 评价模型也具有较高的评价精度,在快速评价 K_{IC} 值时可以选择用抗压强度脆性指数。

参考文献:

References:

[1] FRANKLIN J A,SUN Z Q,ATKINSON B K,et al. Suggested Methods for Determining the Fracture Toughness of Rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining and Geomechanics Abstracts, 1988,25(2):71-96.

[2] FOWELL R J,HUDSON J A,XU C,et al. Suggested Method for Determining Mode I Fracture Toughness Using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CC-NBD) Specimens[J] International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1995,32(1):57-64.

[3] KURUPPU M D,OBARA Y,AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-circular Bend Specimen[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2014,47(1):267-274.

[4] ASTM D5045-99,Standard Test Methods for Plane-strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials[S].

[5] 李庆辉,陈 勉,金 衍,等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8): 1680-1685.

[6] RAMSAY J G.Folding and Fracturing of Rocks[M]. New York:McGraw-Hill,1968.

[7] GUNSALLUS K L,KULHAWY F H. A Comparative Evaluation of Rock Strength Measures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1984,21(5):233-248.

[8] 李江腾,古德生,曹 平,等. 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.

[9] BEARMAN R A. The Use of the Point Load Test for the Rapid Estimation of Mode I Fracture Toughness [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(2):257-263.

[10] BEARMAN R A. The Application of Rock Mechanics Parameters to the Prediction of Crusher Performance [D]. Exeter:University of Exeter,1991.

[11] BROWN G J,REDDISH D J. Experimental Relations Between Rock Fracture Toughness and Density[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(1):153-155.

[12] 邓华锋,朱 敏,李建林,等. 砂岩 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究[J]. 岩土力学,2012,33 (12):3585-3591.

DENG Hua-feng,ZHU Min,LI Jian-lin,et al. Study

- of Mode-Ⅰ Fracture Toughness and Its Correlation with Strength Parameters of Sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3585-3591.
- [13] WHITTAKER B N, SINGH R N, SUN G. *Rock Fracture Mechanics: Principles, Design and Applications* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [14] ZHANG Z X, KOU S Q, LINDQVIST P A, et al. The Relationship Between the Fracture Toughness and Tensile Strength of Rock [C]//Science Press. *Strength Theories: Applications, Development & Prospects for 21st Century*. Beijing: Science Press, 1998: 215-219.
- [15] ZHANG Z X. An Empirical Relation Between Mode Ⅰ Fracture Toughness and the Tensile Strength of Rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 401-406.
- [16] CHANG S H, LEE C I, JEON S. Measurement of Rock Fracture Toughness Under Modes Ⅰ and Ⅱ and Mixed-mode Conditions by Using Disc-type Specimens[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(1/2): 79-97.
- [17] LEONA V, KAMIL S. Study of the Effect of Moisture Content and Bending Rate on the Fracture Toughness of Rocks[J]. *Acta Geodynamic et Geomaterialia*, 2013, 10(2): 247-253.
- [18] ZHANG Q B, ZHAO J. Determination of Mechanical Properties and Full-field Strain Measurements of Rock Material Under Dynamic Loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60(8): 423-439.
- [19] WANG J J, ZHU J G, CHIU C F, et al. Experimental Study on Fracture Toughness and Tensile Strength of a Clay[J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1/2): 65-75.
- [20] 包 含, 伍法权, 郗鹏程. 岩石Ⅰ型断裂韧度估算及其影响因素分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 604-612.
BAO Han, WU Fa-quan, XI Peng-cheng. Estimation of Mode Ⅰ Fracture Toughness of Rock and Its Impact Factors Analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 604-612.
- [21] CHO J W, JEON S, YU S H, et al. Optimum Spacing of TBM Disc Cutters: A Numerical Simulation Using the Three-dimensional Dynamic Fracturing Method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(3): 230-244.
- [22] ERARSLAN N. A Study on the Evaluation of the Fracture Process Zone in CCNBD Rock Samples[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(8): 1475-1489.
- [23] DAI F, CHEN R, IQBAL M J, et al. Dynamic Cracked Chevron Notched Brazilian Disc Method for Measuring Rock Fracture Parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4): 606-613.
- [24] FUNATSU T, SHIMIZU N, KURUPPU M, et al. Evaluation of Mode Ⅰ Fracture Toughness Assisted by the Numerical Determination of K-resistance[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(1): 143-157.
- [25] HUANG J A, WANG S. An Experimental Investigation Concerning the Comprehensive Fracture Toughness of Some Brittle Rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(2): 99-104.
- [26] KATAOKA M, OBARA Y, KURUPPU M. Estimation of Fracture Toughness of Anisotropic Rocks by Semi-circular Bend (SCB) Tests Under Water Vapor Pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1353-1367.
- [27] IQBAL M J, MOHANTY B. Experimental Calibration of ISRM Suggested Fracture Toughness Measurement Techniques in Selected Brittle Rocks [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(5): 453-475.
- [28] MOON T, OH J. A Study of Optimal Rock-cutting Conditions for Hard Rock TBM Using the Discrete Element Method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 837-849.
- [29] LIN Q, FAKHIMI A, HAGGERTY M, et al. Initiation of Tensile and Mixed-mode Fracture in Sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 489-497.
- [30] RAO Q H, WANG Z, XIE H F, et al. Experimental Study of Mechanical Properties of Sandstone at High Temperature[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(1): 478-483.
- [31] RAO Q H, SUN Z Q, WANG G Y, et al. Effect of Specimen Thickness on Mode Ⅱ Fracture Toughness of Rock[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2001, 8(2): 114-119.
- [32] KAZERANI T, ZHAO J. A Microstructure-based Model to Characterize Micromechanical Parameters Controlling Compressive and Tensile Failure in Crystallized Rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 435-452.
- [33] WONG T F, WONG R H C, CHAU K T, et al. Microcrack Statistics, Weibull Distribution and Micromechanics

- chanical Modeling of Compressive Failure in Rock [J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(7): 664-681.
- [34] 高文蛟, 单仁亮, 朱永, 等. 用短棒试件测试无烟煤准静态断裂韧度试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 2): 3919-3926.
- GAO Wen-jiao, SHAN Ren-liang, ZHU Yong, et al. Determining Quasi-static Fracture Toughness of Anthracite Using Short Rod Specimen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (S2): 3919-3926.
- [35] 郭靖. 水-岩作用下岩石断裂力学试验研究及应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012.
- GUO Jing. *Mechanics Experimental Research and Application of Rock Fracture Under Water-rock Interaction* [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012.
- [36] 孙宗颀, 饶秋华, 王桂尧. 剪切断裂韧度(K_{IIc})确定的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2): 199-203.
- SUN Zong-qi, RAO Qiu-hua, WANG Gui-yao. Study on Determination of Shear Fracture Toughness (K_{IIc}) [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 199-203.
- [37] 张宗贤, 赵清, 寇绍全, 等. 用短棒试件测定岩石的动静态断裂韧度[J]. *北京科技大学学报*, 1992, 14(2): 123-127.
- ZHANG Zong-xian, ZHAO Qing, KOU Shao-quan, et al. Measuring Static/Dynamic Fracture Toughness of Rock Using a Short Rod Specimen[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1992, 14(2): 123-127.
- [38] 郑雨天, 张兴, 石海鱼. 岩石断裂韧度测定的研究[J]. *水利学报*, 1984(9): 19-28.
- ZHENG Yu-tian, ZHANG Xing, SHI Hai-yu. Experimental Research on Fracture Toughness of Rock[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984(9): 19-28.
- [39] MIGLIAVACCA M, REICHSTEIN M, RICHARDSON A D, et al. Semiempirical Modeling of Abiotic and Biotic Factors Controlling Ecosystem Respiration Across Eddy Covariance Sites[J]. *Global Change Biology*, 2010, 17(1): 390-409.
- [40] GAO Y, YU G, YAN H, et al. A MODIS-based Photosynthetic Capacity Model to Estimate Gross Primary Production in Northern China and the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148(5): 108-118.
- [41] 尤杰, 车轶, 仲伟秋. 基于 BP 神经网络的既有建筑混凝土强度预测[J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(1): 70-75.
- YOU Jie, CHE Yi, ZHONG Wei-qiu. Prediction of Concrete Strength of Existing Buildings Based on BP Neural Networks[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(1): 70-75.
- [42] 毛敏, 李震, 李丹, 等. 系统安全性交叉验证方法研究、实现与应用[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(4): 15-18, 23.
- MAO Min, LI Zhen, LI Dan, et al. Research, Implementation and Application on Cross Verification of System Safety [J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(4): 15-18, 23.