

DOI: 10.11779/CJGE202204020

基于岩石峰前起裂及峰后特征的脆性评价方法

高美奔^{1, 2}, 李天斌^{*2}, 陈国庆², 孟陆波², 马春驰², 张岩², 阴红宇², 钟雨奕²

(1. 西华大学应急学院, 四川 成都 610039; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 现有研究表明岩石脆性与其内部微裂纹起裂、扩展有密切联系, 但考虑岩石起裂特征的脆性评价指数并不多见, 在对脆性理论以及起裂特征分析的基础上, 提出了一种基于岩石峰前起裂及峰后特征的脆性评价方法。首先, 结合 George 和 Tarasov & Potvin 等对脆性的描述和定义, 从理论上分析了基于岩石峰前起裂及峰后特征脆性评价方法的可行性。其次, 构建了表征岩石峰前脆性特征的分量 B_I 和表征岩石峰后脆性特征的分量 B_{II} , 并将两者之积作为表征峰前起裂和峰后应力跌落特征的脆性指数 B_I 。最后, 结合不同加载方式、围压以及岩性条件下花岗岩、砂岩和大理岩试验数据对其进行了验证。结果显示: 围压 5~35 MPa 时, 大理岩脆性与围压呈负相关关系; 围压 5 MPa 时, 三轴卸荷试验条件下花岗岩脆性比三轴压缩试验条件下大。花岗岩、砂岩、大理岩相应的脆性指数 B_I 值分别为 0.684, 0.336, 0.186, 计算结果与试验结果吻合。提供了一种从起裂和应力跌落角度评价岩石脆性的新思路, 对丰富室内岩石脆性分析与评价具有一定指导意义。

关键词: 岩石力学; 硬岩; 起裂; 脆性指数; 峰后特征

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0762-07

作者简介: 高美奔(1988—), 男, 讲师, 主要从事岩石力学与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: 578209337@qq.com。

Brittleness evaluation method based on pre-peak crack initiation and post-peak characteristics of rock

GAO Mei-ben^{1, 2}, LI Tian-bin², CHEN Guo-qing², MENG Lu-bo², MA Chun-chi², ZHANG Yan²,
YIN Hong-yu², ZHONG Yu-yi²

(1. School of Emergency Science, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The existing researches show that the brittleness of rock is closely related to the initiation and propagation of internal microcracks, but there are few brittleness evaluation indexes considering the characteristics of rock initiation. Based on the theoretical analysis of brittleness and the characteristics of rock initiation, a brittleness evaluation method is proposed based on the pre-peak initiation and post-peak characteristics of rocks. Firstly, based on the descriptions and definitions of brittleness by George, Tarasov & Potvin et al., the feasibility of evaluation method based on the pre-peak crack initiation and post-peak characteristic brittleness is theoretically analyzed. Secondly, component B_I representing pre-peak brittleness of rocks and component B_{II} representing the post-peak brittleness of rocks are constructed, and the product of the two is the brittleness index B_I representing the pre-peak fracture initiation and post-peak stress drop. Finally, it is verified based on the test data of granite, sandstone and marble under different loading methods, confining pressures and lithology conditions. The results show that the brittleness of marble decreases with the increase of confining pressure from 5 to 35 MPa. At confining pressure of 5 MPa, the brittleness of granite under the triaxial unloading tests is greater than that under the triaxial compression tests. The values of the corresponding brittleness index B_I of granite, sandstone and marble are 0.684, 0.336 and 0.186 respectively, and the calculated results are consistent with the experimental ones. This study provides a new way to evaluate the rock brittleness from the perspective of crack initiation and stress drop, which has guiding significance to enrich the analysis and evaluation of indoor rock brittleness.

Key words: rock mechanics; hard rock; crack initiation;

brittleness index; post-peak characteristic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130719, U19A20111)

收稿日期: 2021-03-11

*通信作者 (E-mail: ltb@cdut.edu.cn)

0 引言

岩石脆性作为其材料的基本属性之一, 是评价岩石性能的关键指标, 准确评价岩石脆性对矿藏油气资源有效开发利用、地下工程建设以及地质灾害防灾减灾具有重要的指导意义^[1-2]。脆性是岩石在不同应力状态、不同物理环境下综合力学特征的表现^[3-4]。虽然目前对于岩石脆性没有得到大家一致认可的定义, 但大量学者基于不同的研究领域, 对脆性表征行为给出了各自的描述。代表性学术观点有: 从应变角度, Morley^[5]和 Hetenyi 等^[6]将脆性定义为材料塑性的缺失; 从强度角度, Ramsey^[7]认为岩石黏聚力丧失时, 材料即发生脆性破坏。另外, 岩石脆性也与破裂特征有关, 如, 李庆辉等^[1]从岩石非均质性、应力、破裂特征的角度认为脆性是其综合特性。同时, 岩石脆性与其微观结构的非均质性相关^[8]。

多年来, 根据上述特征学者们提出了许多定量评价岩石脆性的方法, 并对其影响因素进行了分析。如, 史贵才等^[9]获得了大理岩的应力脆性跌落系数, 并讨论了其与围压的关系。周辉等^[10]通过考虑峰后应力降的相对大小和绝对速率, 建立了可评价简单及复杂应力条件下岩石脆性评价指数。夏英杰等^[11]从岩石峰后应力跌落速率及能量比的角度建立了新的脆性指数。侯鹏等^[12]结合红砂岩和花岗岩试验提出了基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法。侯振坤等^[13]基于室内页岩提出了包含多参数的综合脆性指标, 并从扩容拐点、残余强度、全过程曲线等多角度对脆性指标进行了诠释。

随着岩石起裂的深入研究发现, 脆性岩石破坏征兆和断裂能及起裂密切相关^[14]。如 George^[15]指出岩石脆性是指岩石内部微裂纹产生并引起非永久形变而连续变形的能力。据此可知, 岩石的脆性与微裂纹产生有关, 这就包括起裂时的特征应力和应变。另外, 岩石脆性也是指其在特定条件下经能量积累和峰后过程自我维持宏观破坏的能力^[16]。从这个定义看出, 岩石的脆性和材料弹性能量积累有关。纵观岩石破坏全过程, 岩石破坏可以认为是微裂纹压密、起裂、发展、汇合并贯通的过程, 同时又是能量积累、消耗的过程。在微裂纹起裂前, 或在应力水平低于起裂应力水平前, 岩石内部微裂纹不扩展, 是弹性能量积累的过程; 当应力水平高于起裂应力时, 岩石内部微裂纹开始起裂和发展, 在裂纹起裂初始阶段, 外界荷载做功将转化为压缩的弹性能和维持裂纹扩展的消耗能, 弹性能持续增加但增长速率降低; 当应力水平达到屈服时, 岩石内部裂纹快速扩展, 外界荷载做功主要转化为消耗能;

当岩石破坏时, 外界做功总能量均转化为消耗能, 亦不存在弹性势能。这就可以认为在微裂纹起裂前, 微裂纹闭合, 外界做功转化为弹性能; 之后微裂纹起裂并扩展, 外界做功部分转化为消耗能, 直至最后破坏全部转化为消耗能。结合 George^[15]和 Tarasov 等^[16]对脆性的定义, 以及岩石破坏微裂纹发展和能量转化过程, 认为可以从岩石起裂以及峰后特征的角度对岩石脆性进行评价。如王宇等^[17]从起裂应力的角度建立了新的岩石脆性指数。但从起裂应变的角度建立岩石峰前脆性特征评价指数的研究鲜有报道。本文拟从起裂应变的角度建立岩石峰前脆性评价分量, 然后结合峰后应力跌落特征建立峰后脆性评价分量, 并综合峰前和峰后脆性评价分量建立基于岩石峰前起裂及峰后应力跌落特征的脆性评价指数。

1 现有脆性评价方法简述

大量学者从强度、应变、能量、硬度等角度对脆性指数进行了分类评述, 详见文献[1, 10]。本文简述如下: 基于强度的脆性指标因参数获取方便, 被广泛地运用于岩石工程脆性评价, 但该类指数忽略了应变-强度间的内在联系, 存在一定的内在矛盾。大部分基于应变的脆性指标没有综合考虑岩石应力-应变全过程曲线, 存在一定局限性。基于应变能的脆性指标是目前的一个发展趋势。基于硬度的脆性指标对非匀质性、各向异性的岩石测定结果差异大。基于莫尔包络线的脆性指标但受试验情况影响。基于特殊试验的脆性指标鉴于各种原因并未被广泛采用。

2 岩石峰前起裂特征分析方法

目前, 关于岩石起裂特征的分析方法主要有观察法, 裂纹体积应变法、和声发射方法。其中以裂纹体积应变法运用最为广泛。本文将结合裂纹体积应变法判定岩石起裂特征。

裂纹体积应变法最早由 Martin^[18]中提出。该方法确定起裂应力的思想为, 裂纹体积应变 (ε_v) 由体积应变 (ε_v) 减去弹性体积应变 ($\varepsilon_{v \text{ elastic}}$)。其中, 体积应变 (ε_v) 通过试验中测量的轴向 ($\varepsilon_{\text{axial}}$) 和横向 ($\varepsilon_{\text{lateral}}$) 应变计算得出, 弹性体积应变由试验相应阶段应力状态 (σ_1 , σ_3) 和弹性参数 (E , μ) 计算求得, 各应变计算公式如下:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{\text{axial}} + 2\varepsilon_{\text{lateral}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{v \text{ elastic}} = (1 - 2\mu)(\sigma_1 - \sigma_3)/E, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{v \text{ crack}} = \varepsilon_v - \varepsilon_{v \text{ elastic}}. \quad (3)$$

图1为裂纹体积应变特征。岩石压密过程中, 岩

石内部微裂纹、空洞和空隙体积被不断压缩。到线弹性变形阶段, 裂纹体积被压缩至极限状态, 岩石类似于各向同性材料, 仅有弹性体积应变, 没有裂纹体积应变。之后, 随着应力增加, 荷载应力达到岩石起裂应力时, 岩石内部裂纹开始扩展, 裂纹体积逐渐增大。

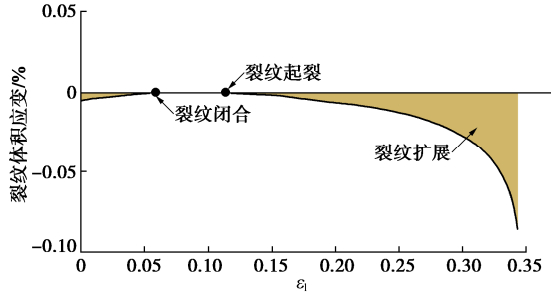


图1 裂纹体积曲线特征^[18]

Fig. 1 Characteristics of crack volumetric strain^[18]

3 基于岩石峰前起裂及峰后跌落特征的脆性评价方法构建

岩石压缩过程中, 起裂应力是裂纹压密和扩展的分界点, 若脆性表征的是岩石维持裂纹压密状态弹性能聚集的能力, 则此时弹性能增长速率达到峰值, 之后增长速率降低, 微裂纹扩展。若将起裂应变 ε_{ci} 表征岩石前期可压密状态的能力, 而将峰值应变与起裂应变的差值 ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_{ci}$) 表征裂纹扩展的能力, 其应变比 ($\varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$) 就可以表征岩石维持内部裂纹压密状态的能力。起裂应变 ε_{ci} 越大, 表明岩石压缩做功过程越长, 弹性能积累越久, 裂纹可压密状态能力越强; $\Delta\varepsilon$ 越小, 表明岩石裂纹扩展迅速; $\varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$ 越大, 表明岩石维持裂纹压密状态的能力越大。可以用 $\varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$ 来表征岩石峰前的脆性特征 (图2)。

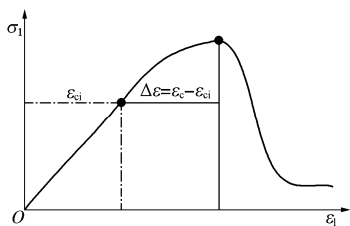


图2 岩石峰前脆性表征示意图

Fig. 2 Schematic diagram of brittleness for pre-peak

一般而言, 岩石在经历压缩试验后, 破坏形式有 I、II 两种情况, (图3(a))。通常认为 II 型破坏是非稳定的, 脆性较强, 脆而坚硬的岩石往往属于此种变形破坏型式。为此, 结合岩石破坏后其应力-应变曲线特征, 若岩石脆性特征越明显, 则其峰后应力跌落越明显。如图3(b)所示, 峰后曲线跌落越陡, 则峰后曲线与斜边 MN 所组成的区域面积 S 越大, 可以用 S/S_{Δ} (S_{Δ} 为图3(b)中红色和蓝色区域面积) 来表征

岩石峰后的脆性特征。其中, 关于图3(b)中斜边 M、N 的确定, M 为应力应变曲线峰值点, N 为应力应变曲线的终点。同时三角形 MCN 为直角三角形。

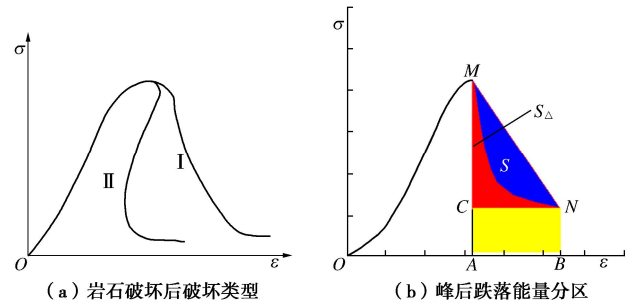


图3 岩石峰后特征及峰后脆性表征示意图

Fig. 3 Post-peak characteristics and schematic diagram of brittleness for post-peak

基于岩石起裂及峰后特征的脆性评价方法如下:

(1) 根据岩石应力-应变曲线所反映的特征, 初步判别其脆性特征。

(2) 结合试验结果和式(1)~(3), 求解起裂应变 ε_{ci} 。具体如下:

根据试验过程中量测的轴向、横向应变和式(1), 计算体积应变 ε_v ;

根据试验结果, 计算弹性模量 E 和泊松比 ν , 并结合式(2), 计算弹性应变;

最后结合式(3), 裂纹体积应变为体积应变减去弹性应变。初始阶段体积被压缩, 体积应变逐渐减小。当处于线弹性阶段时, 该阶段岩石可视为弹性体, 裂纹不再被压缩, 体积应变为 0, 并持续到线弹性阶段结束。在线弹性结束时, 开始起裂, 裂纹体积应变偏离 0, 该点也就是起裂点, 据该特征确定起裂应变 ε_{ci} 。

(3) 结合峰值应变 ε_c , 求取峰前脆性特征评价值 $B_i = \varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$ 。





(4) 结合峰后特征, 求取面积 S 和面积 S_{Δ} , 并计算峰后脆性特征评价值 $B_{ii} = S/S_{\Delta}$ 。具体过程见下式:

$$S_{ACMNB} = \int \sigma_i d\varepsilon_i \quad (4)$$

$$S_{ACNB} = \sigma_N (\varepsilon_N - \varepsilon_M) \quad (5)$$

$$S_{\Delta} = (\varepsilon_N - \varepsilon_M) (\sigma_M - \sigma_N) / 2 \quad (6)$$

$$S = S_{\Delta} - (S_{ACMNB} - S_{ACNB}) \quad (7)$$

式中, S_{ACMNB} 为  的面积, S_{ACNB} 为  的面积, S_{Δ} 为三角形  的面积, S 为  的面积。

(5) 基于岩石起裂及峰后特征的脆性评价方法其计算表达式如下:

$$B_i = B_i \cdot B_{ii} \quad (8)$$

式中, B_i 和 B_{ii} 分别为岩石峰前和峰后脆性特征值。用岩石峰前和峰后特征表征岩石全过程脆性特征有多种

组合方式, 如 B_i+B_{ii} 、 $B_i \cdot B_{ii}$ 或者指数等其他表达形式。将峰前峰后特征评价之和作为脆性评价指数的有李庆辉等^[1]、夏英杰等^[11]; 采用积的形式作为脆性评价指数的有周辉等^[10]。本文采用积的形式表征其脆性评价指数主要是基于以下因素考虑的, $B_i=\varepsilon_{ci}/\Delta\varepsilon$ 作为峰前脆性评价是基于其维持裂纹处于压密状态的能力, 一般而言, 脆性岩石在经历屈服后, 在较小应变内, 应力快速跌落, $\Delta\varepsilon$ 较前期起裂应变 ε_{ci} 小, 其比值 B_i 通常要大于 1; 而 B_{ii} 作为峰后脆性评价, 其通常要小于 1。若将两者之和 (B_i+B_{ii}) 作为脆性评价指数, 则主要体现的是峰前脆性特征, 因为峰前脆性特征值 B_i 将明显大于峰后脆性特征值 B_{ii} , 这显得有失合理。若将两者之积 ($B_i \cdot B_{ii}$) 作为脆性评价指数, 据前面分析, 岩石脆性越大, B_i 和 B_{ii} 值都将越大, 两者乘积也越大, 这样可以消除两者量值大小明显差异带来的不利影响。

4 脆性指数验证

结合岩石变形及起裂特征资料, 求取 B_i 和 B_{ii} 值及其乘积。然后从不同围压、加载方式及岩性的角度对基于岩石起裂及峰后特征脆性评价方法进行验证。

4.1 不同围压下岩石脆性评价方法验证

图 4 给出了 5~35 MPa (90℃) 条件下大理岩三轴压缩试验曲线。据图 4, 在 90℃ 条件下大理岩随着围压的增加塑性增强, 在 5 MPa 时, 峰后有一小段应力的特征, 之后呈现出软化性质。15~35 MPa 时, 随着围压的增大, 塑性变形区间增大, 塑性增强。从定性角度认为, 大理岩 90℃ 时, 塑性随着围压的增大而增大, 这与人研究成果一致。表 1 给出了对应条件下脆性指数 B_i 的计算参数及结果, 脆性指数 B_i 的值在 5~35 MPa 下分别为 0.152, 0.110, 0.082, 0.078, 脆性指数 B_i 值随着围压的增大而逐步降低, 计算结果与试验结果吻合, 有效地体现了脆性指数随围压的变化。

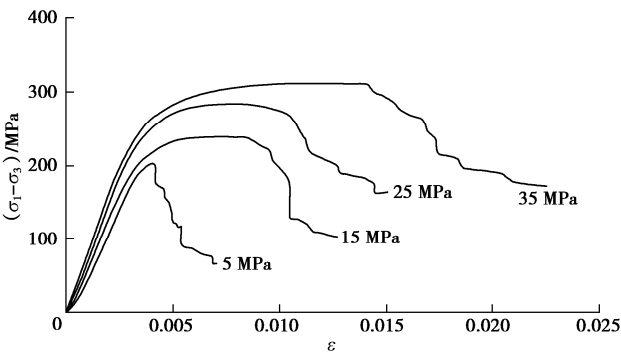


图 4 90℃ 各围压条件下大理岩三轴压缩试验曲线图

Fig. 4 Curves of conventional triaxial compression tests on marble under various confining pressures at 90℃

表 1 大理岩常规三轴压缩试验 B_i 计算结果表(90℃)

Table 1 Calculated results of B_i of marble under conventional triaxial compression test (90℃)

围压 MPa	应变比 $B_i=\varepsilon_{ci}/\Delta\varepsilon$	面积比 B_{ii}	脆性指数 $B_i=B_i \cdot B_{ii}$	试验曲线 定性分析
5	0.46	0.33	0.152	弹-脆-塑性
15	0.43	0.25	0.110	弹-塑性
25	0.48	0.17	0.082	弹-塑性
35	0.30	0.26	0.078	弹-塑性

4.2 不同加载方式下岩石脆性评价方法验证

图 5 和表 2 给出了 5 MPa 围压 90℃、130℃ 条件下三轴压缩和卸荷试验曲线和 B_i 的计算结果。据图 5, 在 90℃ 加载条件下, 黑色曲线峰值后首先表现出应变软化的特征, 然后有一段应力跌落的阶段, 最后进入残余阶段, 总体表现为应变软化的特征; 在 90℃ 卸荷条件下, 红色曲线峰后应力垂直跌落, 之后进入残余阶段, 表现出明显的脆性特征。在 130℃ 加载条件下, 绿色曲线总体表现出典型应变软化的特征, 表现为应变软化; 在 130℃ 卸荷条件下, 蓝色曲线峰后应力跌落明显, 且曲线“左凸”, 脆性特征最为明显。结合曲线变形特征认为这 4 个试样脆性由大到小分别为卸荷 130℃ > 卸荷 90℃ > 加载 90℃ > 加载 130℃, 其 B_i 值分别对应为 0.94, 0.65, 0.44, 0.40, 计算结果和试验曲线结果一致, 有效反映了卸荷条件下岩石脆性比加载条件下岩石脆性强的事实。

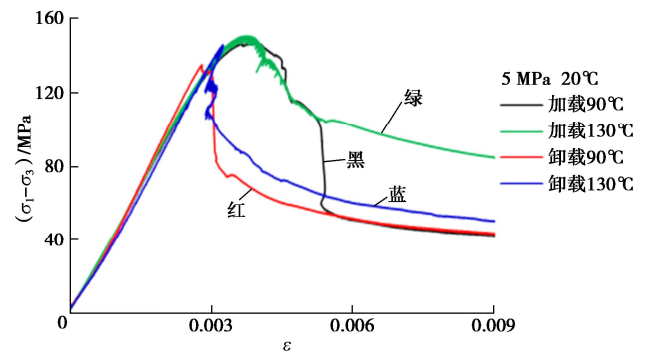


图 5 不同加载方式件下花岗岩试验曲线图

Fig. 5 Granite test curves under different loading modes

表 2 不同加载方式下花岗岩脆性指数 B_i 计算结果表(5 MPa)

Table 2 Calculated results of B_i of granite under different loading modes (5 MPa)

围压	温度 /℃	应变比 $B_i=\varepsilon_{ci}/\Delta\varepsilon$	面积比 B_{ii}	脆性指数 $B_i=B_i \cdot B_{ii}$	试验曲线 定性分析
加载	90	0.74	0.6	0.44	弹-软-塑性
5 MPa	130	0.93	0.43	0.40	应变软化
卸荷	90	0.88	0.74	0.65	弹-脆-塑性
5 MPa	130	1.29	0.73	0.94	脆性

4.3 不同岩性条件下脆性评价方法验证

图 6 和表 3 给出了 60℃、5 MPa 条件下各岩性三

轴压缩试验曲线和 B_1 的计算结果。据曲线图,蓝色花岗岩曲线峰后应力跌落较砂岩、大理岩明显,同时具有一定“左凸”现象,是脆性特征的表现;黑色砂岩曲线峰后表现出分级跌落的特征,但每次跌落范围较小,整体上显示的是应变软化的特征;红色大理岩曲线为明显的应变软化特征。总体可以认为 3 种岩性 60℃、5 MPa 条件下脆性由大到小为花岗岩>砂岩>大理岩。表 3 给出了脆性指数 B_1 计算参数及结果, B_1 值由大到小分别为 0.684, 0.336, 0.186, 分别对应花岗岩、砂岩、大理岩,计算结果和试验曲线结果一致。

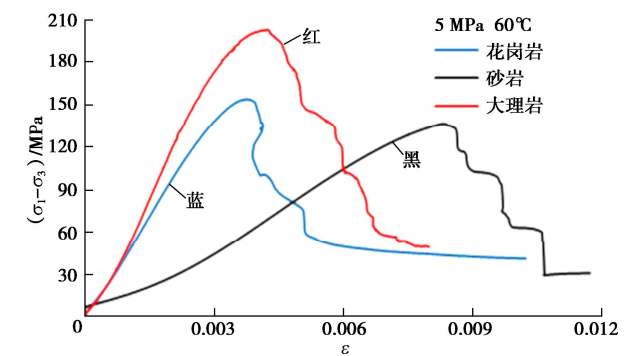


图 6 不同岩性条件下三轴压缩试验曲线图

Fig. 6 Curves of conventional triaxial compression tests under different lithologic conditions

表 3 不同岩性三轴压缩试验脆性指数 B_1 计算结果表(5 MPa)
Table 3 Calculated results of B_1 for different lithologies under conventional triaxial compression test conditions (5 MPa)

岩性	温度 /℃	应变比 $B_i = \varepsilon_{ci} / \Delta \varepsilon$	面积比 B_{ii}	脆性指数 $B_1 = B_i \cdot B_{ii}$	试验曲线 定性分析
花岗岩	60	0.94	0.73	0.684	弹-脆-塑性
砂岩	60	1.40	0.24	0.336	应变软化
大理岩	60	0.84	0.22	0.186	应变软化

5 讨 论

目前,岩石脆性评价指数较多,本文将选取现有常用 5 种脆性评价指数与新建立的脆性评价指数(B_1)进行对比分析。鉴于岩石材料本身的非均质性和各项异性,为此选取基于同一试样或基于应力应变的脆性评价指数作为对比讨论分析的对象。选取的 5 种脆性指数表达式见下表 4。图 7 给为脆性指数 B_{31} , B_{35} 和 B_{38} 的计算模型示意图。

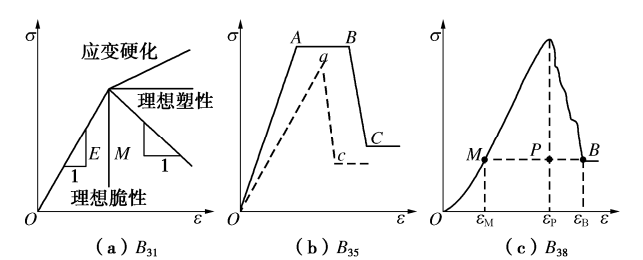


图 7 部分脆性评价指数计算模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of some brittleness evaluation indices

表 4 用于对比分析的脆性指数列表 Table 4 Brittleness indices for comparative analysis			
脆性指数	来源	公式	变量含义
B_{31}	刘恩龙等 ^[19]	$B_{31} = 1 - \exp(M/E)$	M 为软化模量, E 为弹性模量
B_{35}	周辉等 ^[10]	$B_{35} = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \lg \frac{k_{ac(AC)}}{10}$	τ_p, τ_r 分别为峰值强度和残余强度, $k_{ac(AC)}$ 为屈服起始点至残余起始点连线的斜率
B_{36}	Altindag 等 ^[20]	$B_{36} = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p$	τ_p, τ_r 分别为峰值强度和残余强度
B_{37}	Altindag 等 ^[20]	$B_{37} = (\varepsilon_p - \varepsilon_r) / \varepsilon_p$	$\varepsilon_p, \varepsilon_r$ 分别为峰值应变和残余应变
B_{38}	史贵才等 ^[9]	$B_{38} = \frac{(\varepsilon_B - \varepsilon_p)}{(\varepsilon_p - \varepsilon_M)}$	$\varepsilon_p, \varepsilon_B$ 分别为峰值应变和残余应变, ε_M 为残余强度对应的峰前应变

同时,刘恩龙等^[19]基于脆性指数 B_{31} 的研究结果,建立了相应的脆性评价等级分类建议值,结果分为 6 个等级,见表 5。

表 5 脆性指数 B_{31} 分类等级及描述^[19]
Table 5 Classification and descriptions of brittleness index B_{31} ^[19]

等级	脆性指数 B_{31}	脆性描述
1	1	$M \rightarrow -\infty$, 理想脆性
2	0.6321~1	$-\infty < M < -E$, 脆性很大
3	0.6321	$M = -E$
4	0~0.6321	$-E < M < 0$, 脆性很小
5	0	$M = 0$, 理想塑性
6	<0	$M > 0$, 应变硬化

下面将从不同围压、加载方式、岩性角度对比分析 $B_m, B_{31}, B_{35} \sim B_{38}$ 的脆性评价结果。

图 8 给出了 90℃ 各围压条件下大理岩三轴压缩试验不同脆性评价方法的结果。 B_{31}, B_{35} 和 B_{36} 等 3 个脆性评价指数随围压增加,总体呈降低特征,能表达出大理岩随围压升高而降低的性质,结合表 5,可知 B_{31} 的评价和试验结果吻合较好。 B_{37} 随围压增大呈现增大趋势,据 B_{37} 表达式可知其值越小脆性越明显,也能在一定程度上体现大理岩随围压升高脆性降低的特点。但 B_{38} 计算值对大理岩在 90℃ 各围压条件下的脆性评价不是十分敏感。对比分析认为 $B_1, B_{31}, B_{35} \sim B_{37}$ 能用于评价岩石脆性随围压的变化, B_{38} 有待进一步分析。

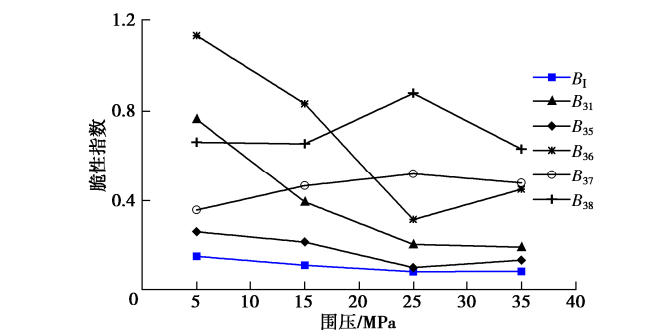


图 8 大理岩常规三轴压缩试验各脆性指数计算结果图(90℃)
Fig. 8 Calculated results of each brittleness index for marble under conventional triaxial compression test (90℃)

图9给出了围压5 MPa不同加载方式下花岗岩各脆性评价方法的结果。 B_{31} 在卸荷条件下其值明显大于压缩条件下计算值,最大最为90℃时的0.73,据表5可判定其脆性很大。但针对卸荷5 MPa 130℃时的评价与试验实际不符(计算值0.57,据表5应为脆性很小,实际试验脆性特征明显)。总体上 B_{31} 能在一定程度上体现不同加载方式对岩石脆性的影响。 $B_{35} \sim B_{38}$ 在评价不同加载方式对岩石脆性影响时,计算结果规律性不强,对加卸载条件下岩石脆性评价有一定价值,但规律性不敏感。据图9可认为, B_1 和 B_{31} 可体现不同岩性其脆性的差别。

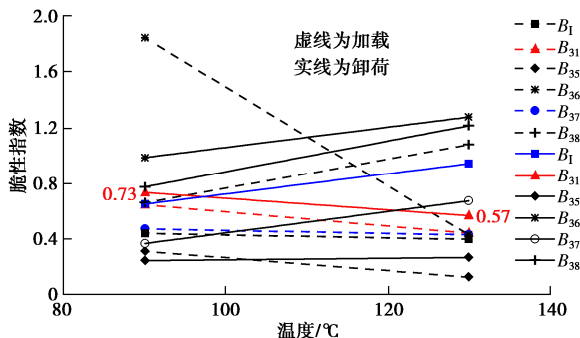


图9 不同加载方式下花岗岩各脆性指数计算结果图

Fig. 9 Calculated results of each brittleness index for granite under different loading modes

图10给出了5 MPa、60℃三轴压缩条件下不同岩性各脆性评价方法的结果。据试验结果可知,在5 MPa三轴压缩条件下各岩性脆性关系为花岗岩>砂岩>大理岩。 B_{31} 中砂岩计算值最大(0.88),若据表5可以判断其为理想脆性,与实际试验不符,对花岗岩和大理岩评价准确。 $B_{35} \sim B_{38}$ 计算结果规律性不强,计算结果与试验有一定差异,对不同岩性评价不敏感。据图10可知, B_1 可体现不同岩性脆性的差别。

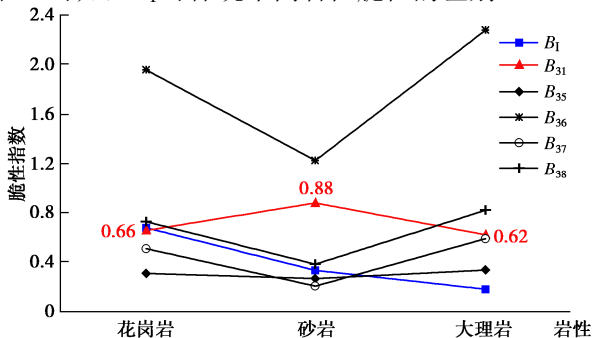


图10 不同岩性常规三轴压缩试验各脆性计算图(5 MPa)

Fig. 10 Calculated results of each brittleness index for different lithologies (5 MPa)

6 结 论

(1) 将起裂应变 ε_{ci} 表征岩石前期可压密状态的能力,将峰值应变与起裂应变的差值($\Delta\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_{ci}$)

表征裂纹扩展的能力,提出了表征岩石峰前脆性特征的分量 B_i ($B_i = \varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$)。若 $\varepsilon_{ci} / \Delta\varepsilon$ 越大,表明岩石维持裂纹压密状态的能力越大,峰前脆性越大。

(2) 基于岩石应力-应变曲线峰后应力跌落越明显其脆性越大的特征,提出了表征岩石峰后脆性特征的分量 B_{ii} ($B_{ii} = S/S_\Delta$)。若 S/S_Δ 越大,表明岩石峰后应力跌落越迅速,峰后脆性越大。

(3) 建立了可表征峰前起裂及峰后应力跌落特征的脆性指数 B_1 ($B_1 = B_i \cdot B_{ii}$)。

(4) 脆性指数 B_1 能有效体现不同加载方式、围压以及岩性对岩石脆性的影响。其他条件相同的情况下,三轴卸荷条件下岩石脆性比三轴压缩条件下大,低围压下岩石脆性比高围压下大。

参考文献:

- [1] 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. (LI Qing-hui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680 - 1685. (in Chinese))
- [2] 陈国庆, 陈 毅, 孙 祥, 等. 开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 908 - 915. (CHEN Guo-qing, CHEN Yi, SUN Xiang, et al. Crack coalescence and brittle failure characteristics of open rock bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 908 - 915. (in Chinese))
- [3] 刘新荣, 刘 俊, 冯 昊, 等. 不同初始卸荷水平和水压下砂岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1143 - 1151. (LIU Xin-rong, LIU Jun, FENG Hao, et al. Experimental research on unloading mechanical properties of sandstone under different initial unloading levels and pore pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1143 - 1151. (in Chinese))
- [4] 赵毅鑫, 王小良, 郭延定, 等. 基于能量释放率的不同赋存深度砂岩脆性指数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 248 - 262. (ZHAO Yi-xin, WANG Xiao-liang, GUO Yan-ding, et al. Brittleness index of sandstones from different buried depths based on energy release rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 248 - 262. (in Chinese))
- [5] MORLEY A. Strength of Materials[M]. London: Longman Green, 1944: 71 - 72.
- [6] HETÉNYI M. Handbook of Experimental Stress Analysis[M]. New York: John Wiley, 2017.

- [7] Ramsey J G. Folding and Fracturing of Rocks[M]. London: McGraw-Hill, 1967: 44 - 47.
- [8] 胡训健, 卞康, 谢正勇, 等. 细观结构的非均质性对花岗岩强度及变形影响的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1540 - 1548. (HU Xun-jian, BIAN Kang, XIE Zheng-yong, et al. Influence of meso-structure heterogeneity on granite strength and deformation with particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1540 - 1548. (in Chinese))
- [9] 史贵才, 葛修润, 卢允德. 大理岩应力脆性跌落系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1625 - 1631. (SHI Gui-cai, GE Xiu-run, LU Yun-de. Experimental study on coefficients of brittle stress drop of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1625 - 1631. (in Chinese))
- [10] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1114 - 1122. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1114 - 1122. (in Chinese))
- [11] 夏英杰, 李连崇, 唐春安, 等. 基于峰后应力跌落速率及能量比的岩体脆性特征评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(6): 1141 - 1154. (XIA Ying-jie, LI Lian-chong, TANG Chun-an, et al. Rock brittleness evaluation based on stress dropping rate after peak stress and energy ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(6): 1141 - 1154. (in Chinese))
- [12] 侯鹏, 高峰, 张志镇, 等. 基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法[J]. 中国矿业大学学报, 2016, **45**(4): 702 - 708. (HOU Peng, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen, et al. Evaluation method of rock brittleness based on acoustic emission and energy evolution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, **45**(4): 702 - 708. (in Chinese))
- [13] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 基于室内试验的页岩脆性特征评价方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, **37**(10): 1496 - 1500, 1506. (HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, WANG Lei, et al. Evaluation method of shale brittleness based on indoor experiments[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, **37**(10): 1496 - 1500, 1506. (in Chinese))
- [14] 刘泉声, 魏莱, 雷广峰, 等. 砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1782 - 1789. (LIU Quan-sheng, WEI Lai, LEI Guang-feng, et al. Experimental study on damage strength of crack initiation and evaluation of brittle parameters of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1782 - 1789. (in Chinese))
- [15] GEORGE E A. Brittle Failure of Rock Material-Test Results and Constitutive Models[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1995: 123 - 128.
- [16] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **59**: 57 - 69.
- [17] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 264 - 275. (WANG Yu, LI Xiao, WU Yan-fang, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 264 - 275. (in Chinese))
- [18] MARTIN C D. The Strength of Massive Lac Du Bonnet Granite around Underground Opening[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 1993.
- [19] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 3449 - 3453. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 3449 - 3453. (in Chinese))
- [20] ALTINDAG R, GUNEY A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks[J]. Scientific Research and Essays, 2010, **5**(16): 2107 - 2118.