

基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数

张 军, 艾 池, 李玉伟, 曾 佳, 仇德智

(东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 目前用于评价页岩可压性的脆性指数大都孤立地考虑峰值前后的力学特性, 并不能反映岩石整个破坏过程的脆性特征。基于岩石的全应力-应变曲线, 分析岩石材料由塑性变形转化为脆性断裂过程中各种应变能的演化规律, 认为峰前耗散能和峰后断裂能水平是决定岩石是否发生脆性断裂的本质因素。结合这2种能量建立能反映岩石破坏前后力学特征的脆性评价指数, 对不同岩石材料在不同围压下的脆性特征以及页岩脆性的各向异性进行评价。研究表明: 建立的脆性评价指数能同时反映岩石脆性破坏的难易程度和脆性的强弱, 可评价不同力学条件下的脆性变化特征。不同岩石材料峰前耗散能以及峰后断裂能随着围压增大而增大, 脆性程度不断降低, 但降低趋势有所不同, 红砂岩和页岩分别在低围压时和高围压时出现了脆-塑性的转化, 而花岗岩在围压不断增大的整个过程中都保持着较强的脆性。另外页岩脆性具有明显的各向异性, 不同层理方向的页岩所表现出的脆性程度差异显著, 随着层理倾角 β 的增大, 页岩脆性表现出稳-减-增的变化趋势, $\beta=0^\circ$ 时页岩的脆性程度要强于 $\beta=90^\circ$ 时, $\beta=60^\circ$ 时页岩脆性最弱且表现出很强的塑性特征。实验结果很好地验证了提出的脆性指数的可靠性, 研究成果为岩石脆性的定量评价提供了一条新思路。

关键词: 岩石力学; 脆性评价; 应力-应变曲线; 能量演化; 峰前耗散能; 峰后断裂能

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)06-1326-15

Brittleness evaluation index based on energy variation in the whole process of rock failure

ZHANG Jun, AI Chi, LI Yuwei, ZENG Jia, QIU Dezhi

(Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The current indices used to evaluate the shale brittleness consider mostly the mechanical properties before or after the peak separately and cannot reflect the brittleness characteristics in the whole process of rock failure. In this paper, the variation of the various types of strain energy of rock materials in the process of plastic deformation to brittle fracturing was analysed based on the complete stress-strain curves. The levels of the pre-peak dissipation energy and the post-peak fracturing energy are the key factors to determine whether the brittle fracturing occurs. The brittleness estimation indices which represent comprehensively the mechanical properties of rock in pre-peak and post-peak periods were proposed by combining the pre-peak dissipation energy and the post-peak fracturing energy. The brittle characteristics of different rock materials under different confining pressures and the anisotropy of shale brittleness were evaluated with these brittleness indices. The results show

收稿日期: 2016-07-12; **修回日期:** 2016-11-25

基金项目: 国家科技重大专项项目(2016ZX05046004-004); 东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2017-009NEPU)

Supported by the Major National Science and Technology Projects(Grant No. 2016ZX05046004-004) and Northeast Petroleum University Innovation Foundation for Postgraduate(Grant No. YJSCX2017-009NEPU)

作者简介: 张 军(1989-), 男, 2016年于东北石油大学油气井工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学、油气井工程力学和非常规储层压裂方面的研究工作。E-mail: zhangjun410410@163.com。通讯作者: 艾 池(1957-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学及非常规油气开发方面的教学与研究工作。E-mail: aichi2001@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0839

that the proposed brittleness indices can simultaneously reflect the difficulty of brittle failure and the scale of brittleness and can evaluate the change of brittle characteristics under different mechanical conditions. The pre-peak dissipation energy and post-peak fracturing energy of different rock materials increase with the increase of the confining pressure. The brittleness decreases constantly with the increase of the confining pressure, but the decrease trends are different. The red sandstone and shale show the transformation of brittleness-plasticity at low and high confining pressures, while the granite has the strong brittleness in the whole process of the confining pressure increasing. The brittleness of shale is anisotropic. The brittleness of shale specimens with different inclination angles of bedding plane has significant difference. The shale brittleness shows a transition process of stable, increase to decrease as the inclination angle of bedding planes β increases. When $\beta = 0^\circ$, the degree of brittleness of shale is stronger than that of $\beta = 90^\circ$. When $\beta = 60^\circ$, shale has the weakest brittleness and shows the plastic characteristic.

Key words: rock mechanics; brittleness evaluation; stress-strain curve; energy evolution; dissipation energy before peak; rupture energy after peak

1 引言

页岩气储层通常需要通过大规模的压裂改造才能形成稳定的工业产量, 页岩的脆性特征不仅对钻井过程中井壁稳定性及储层改造效果等有重要影响, 也是评价储层特征、遴选高品质页岩储层的重要评价指标^[1-4]。并且在深埋岩体工程建设领域, 脆性同样是预测岩爆发生以及反映岩爆倾向性的重要参数^[5-6]。合理而准确地评价岩石脆性特征对页岩气的开发利用和地下工程建设具有重要意义。

目前各学科对于岩石脆性的定义并不统一, A. Morley 等^[7-8]将材料的脆性定义为其塑性丧失的能力, 而 J. G. Ramsay^[9]则认为脆性是岩石材料断裂时黏聚力转化为内摩擦力的能力。L. Obert 和 W. I. Duvall^[10]认为岩石试样达到或超过屈服强度即破坏的性质为脆性。G. E. Andreev^[11]定义岩石材料在外部应力的作用下发生连续变形而不产生永久形变的能力为岩石脆性。R. M. Goktan 和 Y. N. Gunes^[12]将脆性定义为岩石在低应力条件下, 不发生明显变形的断裂倾向。李庆辉等^[13]认为脆性是材料的综合特性, 是一种在自身非均质性和载荷作用下产生内部非均匀应力, 导致局部破坏, 形成多维破裂面的能力。目前很多领域的学者提出过表征岩石脆性的评价标准, 如 H. Honda 和 Y. Sanada^[14]建议以岩石硬度和坚固性的差异来衡量其脆性; H. Hucka 和 B. Das^[15]建立了以岩石抗压强度和抗拉强度为参数脆性评价标准; A. W. Bishop^[16]建议采用岩石全应力-应变曲线反映的应力释放特征来表征岩石脆性。但这些评价指标大多针对具体问题提出, 或缺少充足

的物理依据, 或忽略了一些重要因素对脆性的影响。脆性是岩石材料的一种综合力学特性, 不仅受岩石破坏前内部微缺陷的损伤演化的影响, 而且与峰值后破坏模式密切相关。进一步分析前人的脆性指数可以知道, 一个科学且适用的岩石脆性评价指标应该具有充足的物理依据, 能够描述岩石由理想塑性到理想脆性的整个范围, 并且其结果应该能够连续、单调地衡量岩石的脆性。因此, 仅以峰前力学参数或峰后应力跌落特征表征的岩石脆性都有一定的局限性。脆性表征的是材料破坏前抵抗非弹性变形与破坏后维持宏观破坏的能力, 与岩石的整个断裂破坏过程密切相关, 在定义和衡量岩石脆性时不能孤立地考虑峰前或峰后的力学性质, 而应考虑整个破坏过程。岩石材料的变形破坏实质上是能量耗散和能量释放的过程, 基于全应力-应变曲线所反映的能量特征来建立岩石脆性评价指标既能够较好地表现材料脆性破坏的力学特征, 又能客观描述材料弹塑性的弱化和弹脆性的强化。

本文基于岩石破坏全过程的应力-应变曲线, 分析了岩石材料由塑性变形转化为脆性断裂过程中弹性能、峰前耗散能、峰后断裂能等应变能的演化规律, 认为峰前耗散能和峰后断裂能分别反映了岩石抵抗非弹性变形和维持裂缝扩展的能力, 是决定岩石是否发生脆性断裂的本质因素。结合这2种能量建立了能够综合反映岩石破坏前后力学特征的脆性评价指数, 并对不同岩石材料在不同围压下的脆性特征以及页岩脆性的各向异性进行评价。结果表明本文建立的脆性评价指数能同时反映岩石脆性破坏的难易程度和脆性的强弱, 不仅可以描述不同岩石材料脆性随围压的变化, 而且能够描述层理页岩

脆性的各向异性特点。

2 现有脆性指数及其局限

目前国内外针对不同的研究目所提出的脆性指数共有 30 余种^[17]，而其中能够用于页岩可压性评价的脆性指数主要包括 5 类：(1) 基于测井资料的脆性指数^[18]，该指数是将动态弹性模量正归一化与泊松比反归一化的结果加权平均，以此来衡量岩石的脆性程度，但弹性参数只能反映岩石在破坏前弹性阶段了性质，无法揭示体现岩石脆性破坏的全过程。(2) 基于脆性矿物含量的脆性指数^[19]，该类指数没有考虑岩石的成岩作用对其脆性的影响，仅仅依靠 3 种矿物组分含量来表征岩石脆性缺乏物理依据，并且需要大量岩芯分析资料进行刻度。(3) 基于强度参数的脆性指数^[20-22]，该类指数没有考虑强度与应变的对应关系，从能量角度很容易推导出自相矛盾的结果，不能对岩石脆性进行单调连续的计算。(4) 基于应变的脆性指数^[15, 23]，该类指标大都是孤立地以峰前或峰后的应变特征所建立的脆性指数，不能反映岩石整个破坏过程的脆性特征。(5) 基于应变能的脆性指数^[24-25]，相比其他类型，从能量角度构建的脆性指数更能反映岩石脆性断裂的本质，近年来许多学者致力于研究应力 - 应变曲线所反映的能量演化规律，并以此提出了相应的脆性指数，如 L. I. Baron^[26]提出以可恢复弹性能 W_r 和总应变能 W_{tot} 的比值作为脆性指数 $b(b = W_r/W_{tot})$ ；A. Kidybinski^[27]提出以峰前不可恢复应变能 W_{ir} 和峰前弹性应变能 W_e 的比值作为脆性指数 $b(b = W_{ir}/W_e)$ ；B. G. Tarasov 等^[28-29]认为脆性是岩石材料在外部载荷作用下，峰后阶段自我维持宏观破坏的能力，提出以断裂能增量 dW_f 和卸载弹性能增量 dW_e 的比值作为脆性评价指数 $b(b = dW_f/dW_e)$ 。但以上脆性指数只考虑了峰值前或峰值后的能量演化特征，最终的评价结果同样不能反映岩石整个破坏过程的脆性特征。

可以看出，目前的脆性指数有些不能反映脆性程度的差异，有些没有考虑应力状态对岩石脆性的影响，并且绝大部分只是孤立地考虑岩石材料破坏前或破坏后的力学特性对岩石脆性的影响。本文的研究目的在于针对这些问题，从岩石脆性破坏的本质出发，建立一种能够表征岩石破坏全过程脆性程度的评价指数，以克服之前脆性指数在该方面的局限，为页岩可压性评价以及花岗岩岩爆预测等提供

一种更加合理的方法。

3 岩石破坏过程的能量演化

从能量角度来看，岩石全应力 - 应变曲线是其内部能量状态转变的外在表现，从弹性变形、微裂纹演化，直到破坏的整个过程，岩石材料始终伴随着和外界的能量交换，一方面存贮外界传递来的能量，另一方面又以多种形式向外界释放能量，以保持能量的平衡^[30-32]。尤明庆和华安增^[33]认为岩石破坏是应力达到峰值强度前不断吸收外界能量，而达到峰值后能量不断释放的过程，即岩石的变形破坏实质上是能量耗散和释放的结果。岩石破坏全过程的能量演化可分为能量积累、能量耗散、能量转化及释放 3 个阶段^[34-37]，如图 1 所示。本文以 dW_i 表示各种能量的变化量，具体含义如下： $dW_{e(B)}$ 表示外部应力达到峰值强度 σ_B 时，岩石内部积累的可恢复弹性应变能增量； $dW_{e(A)}$ 表示应力达到屈服强度 σ_A 时，岩石内部的可恢复弹性应变能增量； $dW_{e(C)}$ 表示应力跌落到残余强度 σ_C 时，岩石内部的剩余的弹性应变能； dW_d^* 表示整个塑性屈服阶段能量增量； dW_d 表示峰前阶段的耗散能增量； dW_f 表示峰值后岩石断裂能量增量； dW_a 表示维持断裂所需的额外能量，即外部机械能的输入增量。

3.1 峰值前的能量特征

如图 1 所示，在轴向应力作用下，岩石试样首先发生弹性变形，外部能量以弹性能的形式积累在试样内部，当达到屈服应力 σ_A 后，随着外部载荷的不断增大，岩石试样进入塑性屈服阶段(裂纹非稳定扩展阶段)，试样内部的微裂纹形成并开始扩展，这一过程需要耗散一部分能量，此时的应力 - 应变曲线呈抛物线形。随着应力逐渐接近峰值强度 σ_B ，微裂纹迅速增加，最终汇集贯通形成宏观断裂裂纹。根据热力学第一定律，假设岩石材料的破坏过程与外界不存在热交换，则外力做功所产生的能量 dW_U 在峰前阶段会转化为 2 个部分能量：可恢复弹性应变能 dW_e 和峰前阶段的耗散能 dW_d 。在图 1 中，红色点状线围成的区域代表弹性能增量 dW_e ，黄色区域代表耗散能增量 dW_d 。周辉等^[17]基于花岗岩三轴压缩试验指出，全应力 - 应变曲线峰值前有无塑性变形以及塑性变形的程度是表征岩石脆性的一个重要特征。陈昀等^[38]通过室内试验分析了岩石在断裂过程中能量的耗散，认为在外界提供有限能量的条件下，峰前耗散能量越小，可获得表面能就越大，从而使得峰后断裂裂纹在数量上和长度上也越

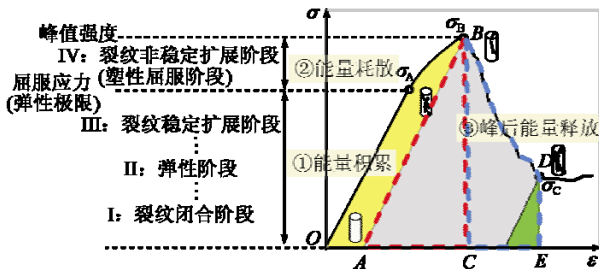


图 1 岩石破坏全过程的能量演化

Fig.1 Energy variation in the whole process of rock failure

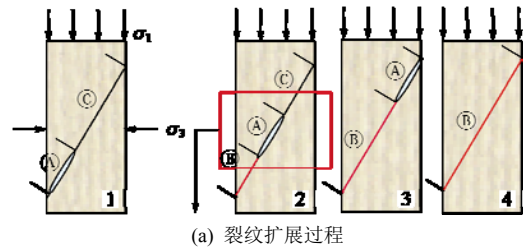
大，因此理想的脆性岩石在峰前阶段不存在能量的耗散过程。

3.2 峰值后的能量特征

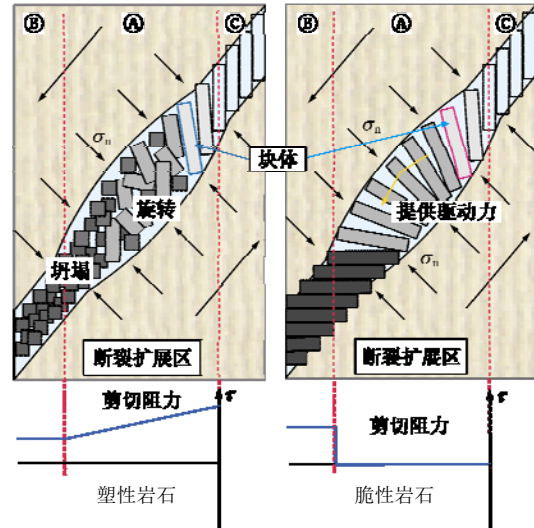
在图 1 中， σ_B 和 σ_C 分别为峰值强度与残余强度，通常将它们之间连线的斜率定义为弱化模量 M ，它反映了峰后阶段岩石试样破坏弱化的快慢程度^[39]。灰色区域代表峰值后岩石断裂能增量 dW_f ，绿色区域代表岩石试样破坏后剩余的弹性应变能 $dW_{e(C)}$ 。当岩石材料达到峰值强度后，岩石试样内部所储存的弹性能不足以维持试样的完全破坏，因此需要外部提供额外的能量 dW_a (蓝色点状线围成的区域)来维持这个过程，在室内实验中该部分能量是由实验机的继续加载来提供的。

张志镇等^[40-43]利用花岗岩进行了一系列的三轴压缩实验，认为高脆性的岩石达到峰值强度后，其应力迅速跌落并进入自持续变形状态。而 B. G. Tarasov^[44-45]通过实验同样证明理想的脆性岩石，峰后阶段的 dW_a 极小，其破坏表现出自我维持宏观断裂的特点。下面从微观角度解释 dW_a 与岩石的脆性断裂之间的关系。

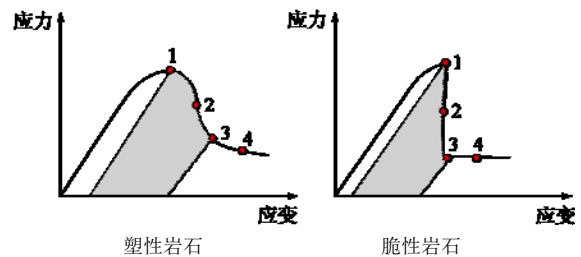
B. G. Tarasov 等^[28, 46]通过试验分析了三轴条件下脆性岩石和非脆性岩石的整个断裂过程，认为岩石材料的断裂并不是瞬间形成的，裂纹随着载荷的增加逐渐在岩石材料内部延伸扩展，整个过程可以分为 4 个阶段，如图 2(a)所示。这 4 个阶段伴随着 3 个特定区域的产生与迁移：区域 (A) 为断裂起始区 (断裂扩展区)，这个区域的出现代表了初始裂纹的产生，随后这个区域不断延伸扩展以形成整条宏观裂纹；区域 (B) 为摩擦区，该区域在断裂起始区出现后出现，在这里主要由断裂面间的摩擦力抵抗岩石的破坏；区域 (C) 为完整区，这个区域的岩石材料还保持完整，主要由黏聚力来提供抗剪力。随着裂纹的逐渐扩展，摩擦区逐渐增大而完整区逐渐减小，反映了岩石黏聚力逐渐由断裂面间的摩擦力所替代的过程，是试样承载能力降低的微观体现。如图 2(b) 所示，当区域 (A) 出现后，初始裂纹形成并且裂纹尖



(a) 裂纹扩展过程



(b) 裂纹细观扩展示意图



(c) 应力 - 应变曲线

图 2 受压条件下岩石试样断裂扩展示意图

Fig.2 Illustration of rupture propagation of rock specimen under compression

端会形成一系列较短的拉伸裂纹^[46-47]，这样便给定了裂纹预定的延伸方向，短拉伸裂纹将裂纹尖端的岩石材料分割成块，这是剪切断裂的普遍结构，S. J. D. Cox 等^[48-49]称之为“多米诺”结构，G. C. P. King 等^[50-52]称之为“Ortlepp”式剪切。对于塑性岩石，区域 (A) 前块体与完整区同时为岩石抵抗剪切提供阻力，但随着断裂的不断扩展，这些块体不断旋转并坍塌成小块，使得抵抗剪切的阻力逐渐由岩石黏聚力转变为断裂面间的摩擦力。由于要继续维持断裂在材料中的扩展，过程区中块体的坍塌过程需要吸收很大的能量。而对于理想脆性岩石的裂纹扩展，其特点就是块体在旋转过程中不发生坍塌。块体的不断旋转使其在区域 (A) 中形成了一种扇形结构^[29]。在这个扇形结构中，上半部分块体的旋转在正应力的作用下会为下半部分提供一个驱动力，这种驱动力

有利于消耗较少的能量来维持裂纹的扩展过程。这种扇形结构,使得整个断裂过程会提供一个较小的剪切阻力。当剪切阻力趋于0时,岩石的断裂过程仅靠自身积累的能量便可以维持,这代表了一种最节能的剪切断裂机制。左建平^[53]从能量角度出发,分析了脆性岩石的整个变形破坏过程,认为处于峰值强度时岩石处于高位能量的失稳状态,应力由峰值强度跌落到残余强度的过程是一个能量转化的典型突变。综合上述分析可以看出,断裂能的大小是峰后阶段反映岩石脆性的最主要特征。

4 基于能量演化的脆性指数

由节3的分析可以看出,岩石峰前阶段的耗散能以及峰后阶段用来维持裂纹扩展的断裂能越小,岩石的脆性程度越强。虽然峰前和峰后阶段的能量存在一定的转化关系,但目前峰值前后力学性质和能量演化的相关性还没有统一的认识,为此本文先分别建立能够衡量峰前脆性的峰前指数和反映峰后脆性特征的峰后指数,再利用适当的方法将2种指标合成为全过程的脆性评价指标。以这种方式构建的脆性指数考虑了峰前和峰后的能量演化具有一定联系,但并不能反映能量耗散水平对峰后断裂特征的具体影响规律,由此可见该指标适用于评价岩石破坏全过程的脆性程度,而不能对峰前与峰后脆性的关联进行分析。

如图3(a)所示,当载荷达到屈服应力 σ_A 时,岩石内部积累的弹性能增量为 $dW_{e(A)}$;随着载荷达到峰值强度 σ_B 后,区域 ABC 和区域 $BCED$ 分别代表峰前阶段积累的总弹性能增量 $dW_{e(B)}$ 和塑性屈服阶段积累的总能量 dW_d^* 。由图3(a)与(b)的能量关系可以得到

$$dW_d^* = dW_d + dW_{e(B)} - dW_{e(A)} \quad (1)$$

根据式(1)可知,图3(a)与(b)中区域 $GFBC$ 和区

域 $OFBHI$ 所表示的能量是相等的,这表示塑性屈服阶段积累在试样内部的总能量 dW_d^* 等于峰前耗散能 dW_d 和屈服阶段的弹性能增量 $(dW_{e(B)} - dW_{e(A)})$ 两部分能量之和。当2种岩石材料的应力-应变曲线上的屈服强度 σ_A 、峰值强度 σ_B 以及弹性模量 E 相等时,两者应具有相同的 $dW_{e(B)}$ 和 $dW_{e(A)}$,但是2种岩石可能表现出不同的塑性屈服特征,即具有不同的 dW_d^* 和 dW_d 。陈昀等^[38]的研究表明理想的脆性岩石,裂纹扩展所吸收的能量全部用于克服岩石的本征黏聚力,即在岩石达到峰值强度前,没有能量耗散的过程。因此,当 $dW_{e(B)}$ 和 $dW_{e(A)}$ 一定时, dW_d^* 和 dW_d 的大小能够反映岩石在峰前阶段的脆性特征,即峰前塑性屈服阶段越不显著,峰前耗散能所占能量比例越小,岩石脆性越强,由此可以得到表征岩石脆性的2个峰前指数 B_{pre1} 和 B_{pre2} 分别为

$$\left. \begin{aligned} B_{pre1} &= \frac{dW_d^*}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \\ B_{pre2} &= \frac{dW_d}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这2个指数用于表征岩石峰前阶段所体现出的脆性程度, dW_d^* 代表整个塑性屈服阶段的能量增量,因此 B_{pre1} 用来衡量峰前阶段的塑性屈服程度,而以含有峰前耗散能 dW_d 的指数 B_{pre2} 衡量的是峰前阶段的能量耗散水平。

当岩石材料到达峰值强度后,岩石试样内部所储存的弹性能 $dW_{e(B)}$ 不足以维持试样的完全破坏,因此需要外部提供额外能量 dW_a 来支持这个过程。在力学实验条件下,该部分能量是由试验机的继续加载来提供的。当应力跌落到残余强度 σ_C 后, $dW_{e(B)}$ 和 dW_a 转化为维持试样破坏所需的断裂能 dW_f ,同时试件内部仍残留一部分弹性能 $dW_{e(C)}$,如图3所示。因此,岩石的峰后阶段存在以下能量转化关系:

$$dW_f = dW_a + (dW_{e(B)} - dW_{e(C)}) \quad (3)$$

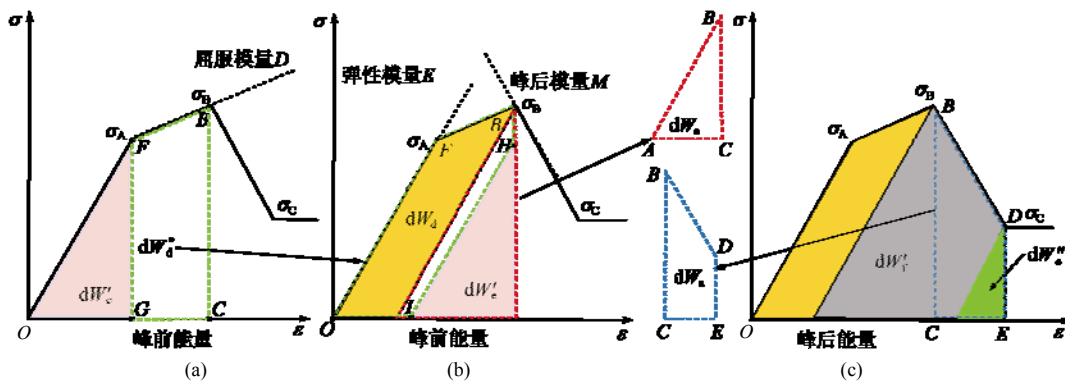


图3 岩石破坏过程中各种能量转化示意图

Fig.3 Illustration of energy transformation in the whole process of rock failure

$dW_{e(B)}-dW_{e(C)}$ 表示卸载弹性能^[28-29]，由前文分析可知，当岩石内部积累的弹性能一定时，峰后阶段裂纹扩展所需的断裂能 dW_f 和外部提供的额外能量 dW_a 越小，岩石的脆性程度越强，由此可以得到表征岩石脆性的 2 个峰后指数 B_{post1} 和 B_{post2} 分别为

$$\left. \begin{aligned} B_{post1} &= \frac{dW_f}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} \\ B_{post2} &= \frac{dW_a}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

B_{post1} 表征峰后阶段裂纹扩展的能力， B_{post2} 表征岩石材料自我维持断裂的能力。 B_{post1} 和 B_{post2} 越小，表明岩石材料在高压驱使下更容易产生扩展裂纹，自我维持断裂的能力越强，因此断裂后表现出更强的脆性特征。

下面需要建立能够反映岩石破坏全过程脆性程度的评价指数。 B_{pre1} ， B_{pre2} 和 B_{post1} ， B_{post2} 都与岩石脆性呈负相关关系，而多指标综合评价的合成方法主要加法合成(线性加权平均法)和乘积合成(几何平均法)2 种^[54-55]。加法合成法适用于各评价指标间相互独立的场合，如 R. Rickman 等^[18]采用弹性模量和泊松比的加权平均来衡量岩石脆性，就是依据弹性模量和泊松比是 2 个相互独立的参数。然而，如果评价指标间不独立，则评价结果会包括重复信息，并且该方法的一个关键问题是确定各指标的权重值。目前岩石峰前和峰后力学性质的关联性还没有统一的认识，虽然峰前和峰后指数都与岩石脆性程度负相关，但无法确定二者之间的具体关联以及对综合脆性影响的权重，因此本文采用多指标的乘法合成建立能综合评价峰前峰后脆性程度的指数。乘法合成法不涉及峰前指数和峰后指数权重的问题，可以用于各指标相关的场合，且不会带来信息的重复。该方法的另一个优点是更容易拉开评价档次，评价结果连续且单调。许多学者都利用该方法建立过综合评价指数，如孙建孟等^[56]提出采用脆性与断裂韧性的乘积作为可压性指标；Z. Q. Guo 等^[57]认为评价页岩脆性时，弹性模量和泊松比的权重不能考虑为相等，并且提出以弹性模量和泊松比倒数的乘积作为衡量岩石脆性的指标。在上述 4 个指数中， dW_d^* 包含 dW_d ，而 dW_f 包含 dW_a ，本文采用 H. W. Marsh 等^[58]建议的配对乘积指标规则，即每个指标使用一次，不重复使用，大配大，小配小的原则。结合式(1)和(2)，得到了能综合反映峰前阶段与峰后阶段能量演化特征的脆性指数 B_1 和 B_2 ：

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \frac{dW_d^*}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \frac{dW_f}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} \\ B_2 &= \frac{dW_d}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \frac{dW_a}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

脆性指数 B_1 和 B_2 通过计算岩石的全应力 - 应变曲线中各种应变能来表征岩石脆性，对于理想脆性岩石， $B_1 = 1$ ， $B_2 = 0$ ，而对于理想塑性岩石， B_1 ， $B_2 \rightarrow +\infty$ 。这 2 个指数的计算结果具有单调连续的特点。然而在实际应用中笔者发现，利用 B_1 和 B_2 评价岩石脆性时需要计算出应力 - 应变曲线所对应的弹性能、耗散能、断裂能等 6 种应变能的能量密度，计算繁琐且工作量较大。为了进一步提高该方法的应用性，本文将线性化后的应力 - 应变曲线上的屈服点 σ_A 与峰值点 σ_B 连线的斜率定义为屈服模量 D ，它可以表示峰前阶段的塑性屈服程度，如图 3(a)所示，屈服强度 σ_A 以裂纹应变模型法确定^[59]。 σ_C ， E 和 M 分别表示残余强度、弹性模量和弱化模量。则式(5)中的各种应变能可以表示为

$$dW_d = dW_{e(A)} + dW_d^* - dW_{e(B)} = \frac{\sigma_A^2}{2E} + \frac{\sigma_B^2 - \sigma_A^2}{2D} - \frac{\sigma_B^2}{2E} = \frac{(\sigma_B^2 - \sigma_A^2)(E - D)}{2DE} \quad (6)$$

$$dW_f = dW_{e(B)} + dW_a - dW_{e(C)} = \frac{\sigma_B^2}{2E} + \frac{\sigma_B^2 - \sigma_C^2}{-2M} - \frac{\sigma_C^2}{2E} = \frac{(\sigma_B^2 - \sigma_C^2)(M - E)}{2EM} \quad (7)$$

将式(6)和(7)代入到 B_1 和 B_2 的计算式中，得到了利用弹性模量 E 、屈服模量 D 及弱化模量 M 三者表示的脆性指数 B_1' 和 B_2' ：

$$B_1' = \frac{dW_d^*}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \frac{dW_f}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} = \frac{E}{D} \frac{M - E}{M} \quad (8)$$

$$B_2' = \frac{dW_d}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \frac{dW_a}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}} = -\frac{E - D}{D} \frac{E}{M} \quad (9)$$

图 4 为利用脆性指数 B_1 ， B_2 及 B_1' ， B_2' 描述的岩石由理想塑性到理想脆性的整个变化规模。图 4 中最右侧的插图表示理想脆性岩石材料的全应力 - 应变曲线，该曲线具有以下特点：(1) 曲线在峰前阶段没有塑性屈服阶段， $D = E$ ，即峰前耗散能为 0；(2) 应力 - 应变曲线在峰后阶段瞬间跌落，弱化模量 M 趋于无穷，即峰后阶段裂纹扩展所需要的断裂能完全由峰前阶段积累的弹性能提供，有自我维持断裂的特点。B. G. Tarasov^[44-45]通过花岗岩及粗粒玄武岩的三轴压缩实验同样证明“完全脆性”的岩石断裂破坏时，峰前没有耗散能，峰后断裂具有完全自我维持的特点。图 4 中最左侧插图表示理想塑性岩石

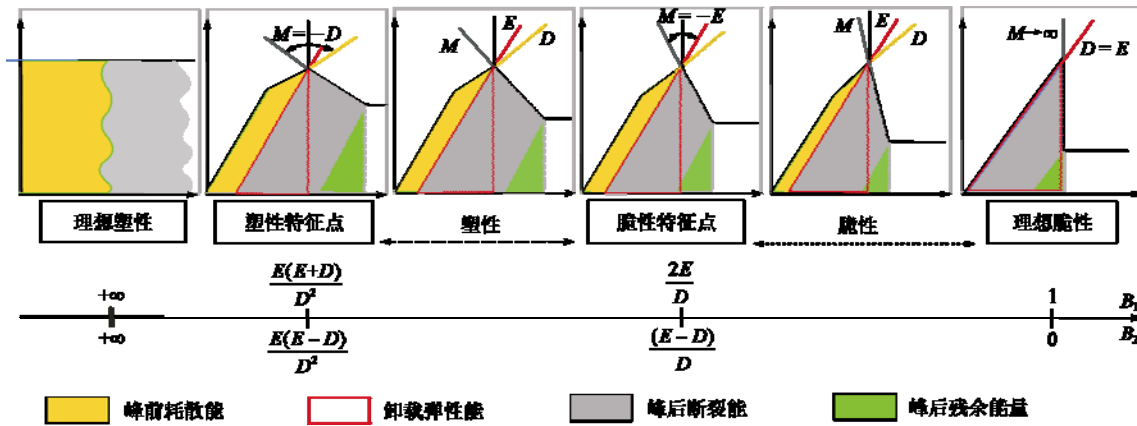


图4 B₁和B₂所表示的脆性变化规模

Fig.4 Scale of brittleness indices B₁ and B₂ with characteristic shapes of complete stress-strain curves

材料的全应力 - 应变曲线，其峰前耗散能和峰后断裂能趋于无穷($M = D = 0$)，即随着载荷的增加岩石材料始终处于变形状态。岩石材料由理想塑性转变为理想脆性的整个过程中，峰前耗散能及峰后断裂能逐渐减小，这个过程存在2个特征点：塑性特征点 $M = -D$ 和脆性特征点 $M = -E$ ，根据这2个特征点可以将整个脆化过程划分为：

$M \rightarrow \infty, D = E$ 时，岩石属于理想脆性材料； $D < E < -M$ 时，岩石属于脆性材料； $D < E = -M$ 为塑性转化脆特征点； $D < -M < E$ 时，岩石属于塑性材料； $D = -M < E$ 为塑性特征点； $M = D = 0$ 时，岩石属于理想塑性材料。

这种转变同样具有连续性和单调性，说明了本文所提出的脆性指数能够很好地描述整个脆化过程与脆化程度，并且本文提出的脆性指数同样能涵盖其他脆性指数所反映的一些特点。

5 脆性指数的实验评价分析

5.1 实验方案

实验设备选用刚性伺服控制岩石力学测试系统，刚度为 40 MN/mm，加载能力为 2 000 kN，围压上限 200 MPa。三轴实验时，先将围压以 3 MPa/min 的速率加至预定值，再轴向加载直至破坏。为了对比不同岩石材料的脆性特征，岩石试样应具有相同的尺寸和形状，已有研究表明，通常围压条件下的圆柱形试样直径范围为 20~60 mm，高径比为 2~3 时不会引起太大的尺寸效应。实验设备及测量仪器如图 5 所示。

本次实验试样采用尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试样，其误差不超过 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ，端面平



图5 实验设备及测量仪器

Fig.5 Test equipment and gages

行度小于 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。一个科学合理的脆性指数应该能够评价不同岩石材料的脆性程度，因此本文的实验方案设计为：(1) 首先对红砂岩(常规塑性岩石)及花岗岩(常规脆性岩石)进行三轴压缩实验，根据实验数据分析本文所建立的脆性指数对不同岩石材料的应用效果以及对围压条件的敏感性；(2) 随后针对页岩，开展不同围压下和不同层理倾角 β 下的 2 组三轴实验，以分析脆性指数对页岩的适用性以及页岩的各向异性对其脆性的影响。每组进行 3 块试样的测试，下文中的数据均为 3 块试样的平均值。实验所用岩石样品如图 6 所示。

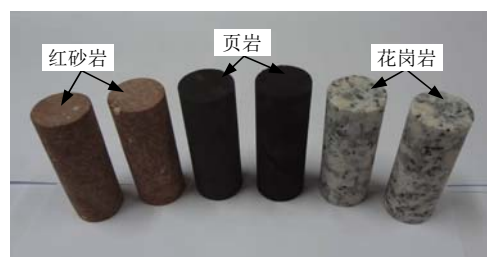


图6 实验所用岩石样品

Fig.6 Rock specimens for tests

5.2 不同围压下常规岩石脆性特征

(1) 全应力 - 应变曲线

图 7 为不同围压下红砂岩和花岗岩试样破坏过程的全应力 - 应变曲线，可以看出围压不仅对岩石破坏强度有着显著影响，而且不同围压条件下岩石的脆性特征有明显差异。低围压下，红砂岩峰前曲线的塑性屈服阶段并不明显，随着围压的增大，峰值强度前出现明显的屈服台阶，而峰后曲线斜率逐

渐减小。表明红砂岩的塑性随着围压的增大而逐渐增强。而对于花岗岩，当围压为 0 MPa 时，应力 - 应变曲线的峰前阶段几乎没有塑性屈服阶段，在达到峰值强度后，应力迅速跌落，接近理想脆性岩石材料。当围压增大到 20 MPa 时，峰前曲线才出现明显的屈服台阶，峰后曲线斜率逐渐减小。随着围压增大，花岗岩表现出由低围压下的强脆性向高围压下的弱脆性转化的趋势。

(2) 能量及脆性特征

表 1 为红砂岩和花岗岩三轴压缩实验数据及脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 的计算结果。由表 1 可以看出，围压为 0 MPa 时，红砂岩和花岗岩试样断裂所需要的额外能量分别为 0.072 和 $0.046 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ ，说明相比于红砂岩，花岗岩达到峰值强度后，其内部积累的弹性能释放得更加迅速，维持断裂所需的额外能量更小，具有更强的自我维持断裂的能力，表现出的脆性也更强。

依据表 1 中的各种应变能数据计算不同围压下红砂岩和花岗岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 及 B_{post2} 。由图 8 可以看出，随着围压的增大，2 种岩石材料的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} , B_{post2} 逐渐增大，这表明峰前耗散能和峰后断裂能所占能量比与围压水平呈正相关关系。但红砂岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} , B_{post2} 增大幅度要大于花岗岩，说明围压对于红砂岩峰前耗散能和峰后断裂能的影响更大，红砂岩的脆性对于围压更加敏感。并且当围压由 20 MPa 增大到 30 MPa 时，红砂岩 B_{post1} 和 B_{post2} 几乎没有变化，而 B_{pre1} 和 B_{pre2} 却表现出稳定增大的趋势，这说明随着围压增大，峰前耗散能和峰后断裂能的变化是有一些差别的，如果只单一的考虑峰前或峰后的能量演化特征，那么可能出现矛盾的结果。

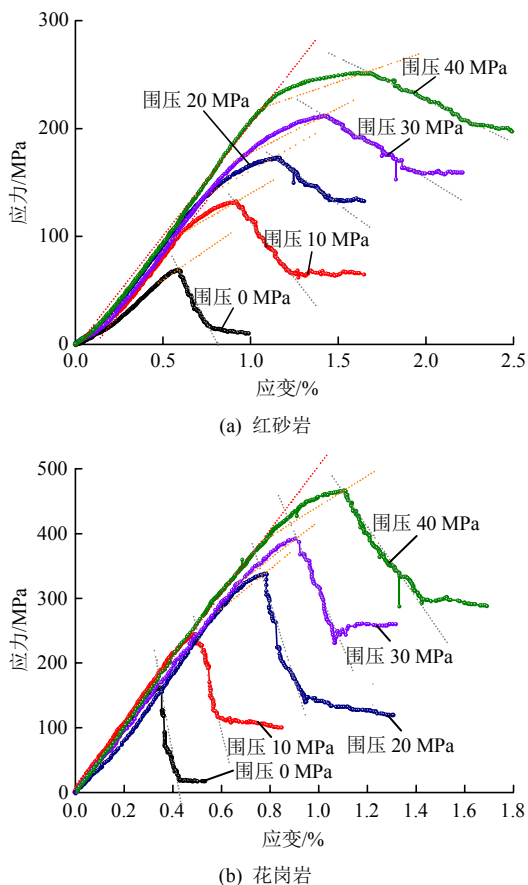


图 7 不同围压下红砂岩和花岗岩全应力 - 应变曲线
Fig.7 Complete stress-strain curves of red sandstone and granite under different confining pressures

表 1 红砂岩、花岗岩三轴压缩实验数据

Table 1 Data from triaxial compression tests of red sandstone and granite

岩石类型	围压/MPa	峰值强度/MPa	弹性能 $dW_e / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	弹性能 $dW'_e / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	剩余能 $dW_r^* / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	屈服阶段总能量 $dW_d^* / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	峰后断裂能 $dW_f / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	峰前耗散能 $dW_d / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	额外能量 $dW_a / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	弹性模量/GPa	屈服模量/GPa	峰后模量/GPa	B_1	B_2	B'_1	B'_2
红砂岩	0	68.59	0.142	0.100	0.008	0.085	0.201	0.051	0.072	19.33	9.30	-27.03	3.04	0.66	3.56	0.77
	10	131.82	0.465	0.295	0.116	0.353	0.671	0.180	0.337	22.25	8.17	-20.93	3.98	1.02	5.62	1.83
	20	172.83	0.725	0.528	0.438	0.597	0.773	0.438	0.512	22.86	6.22	-13.35	8.17	3.97	9.97	4.58
	30	211.93	1.058	0.698	0.602	1.111	1.473	0.636	1.313	23.19	6.01	-11.03	9.97	5.09	11.97	6.01
	40	251.78	1.412	1.187	0.921	1.302	2.052	1.061	1.600	24.02	4.81	-7.05	24.06	15.28	22.01	13.61
花岗岩	0	162.22	0.297	0.191	0.004	0.122	0.339	0.038	0.046	48.53	41.11	-214.28	1.33	0.06	1.45	0.04
	10	244.94	0.614	0.342	0.125	0.376	0.677	0.085	0.188	51.04	39.85	-137.24	1.92	0.12	1.76	0.10
	20	339.52	1.298	0.738	0.225	0.853	1.470	0.297	0.397	48.09	33.19	-112.11	2.09	0.20	2.07	0.19
	30	392.79	1.722	1.126	0.625	1.008	1.738	0.424	0.641	48.89	29.47	-81.68	2.68	0.42	2.65	0.39
	40	468.32	2.339	1.526	0.941	1.688	2.686	0.942	1.287	50.83	25.61	-54.57	3.99	1.07	3.83	0.92

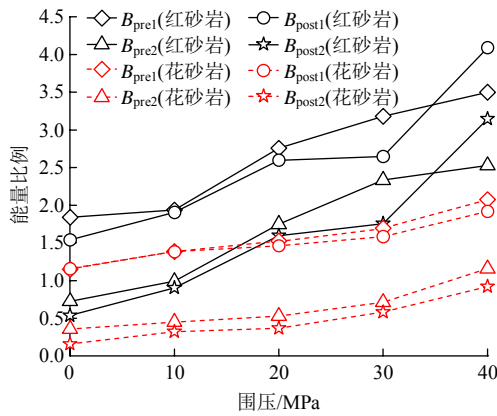


图8 红砂岩和花岗岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 和 B_{post2} 随围压变化规律

Fig.8 The variation of B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} and B_{post2} of red sandstone and granite with confining pressure

图9为红砂岩和花岗岩脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 随围压的变化规律。由应变能密度计算的脆性指数 B_1 , B_2 随围压增大而增大, 很好地反映了2种岩石材料的脆性随围压增大而降低的趋势。随着围压增大, 红砂岩的脆性显著降低, 并且当围压由30 MPa 增大到40 MPa 时, 红砂岩 B_1 , B_2 的增加幅度变大。而花岗岩的脆性虽然随着围压也出现的降低趋势, 但是降低程度较弱, 同样证明了红砂岩的脆性对于围压更加敏感。

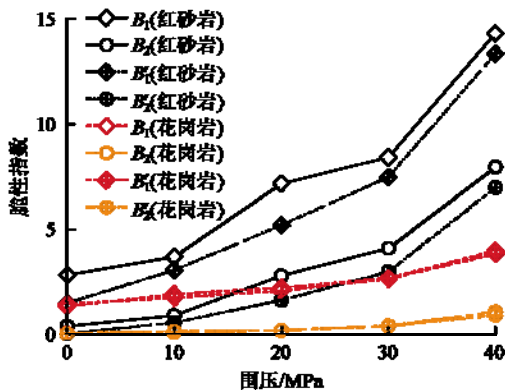


图9 红砂岩和花岗岩的脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 随围压变化规律

Fig.9 The variation of B_1 , B_2 , B'_1 and B'_2 of red sandstone and granite with confining pressure

B'_1 和 B'_2 的变化趋势与 B_1 , B_2 非常接近, 说明以弹性模量 E 、屈服模量 D 及弱化模量 M 作为参数的脆性指数同样能够较好的反映岩石材料的脆性变化。由表1中可以看出, 围压为0 MPa 时, 红砂岩的 E , D , M 分别为19.33 GPa, 9.30 GPa 和-27.03 GPa, 满足关系 $D < E < -M$, 此时红砂岩为脆性材料; 围压增大到10 MPa 后, $D < -M < E$, 红砂岩转

变为塑性。而对于花岗岩, 围压为0 MPa 时, $D < E < -M$ 并且屈服模量和弹性模量十分接近, 表明此时花岗岩属于脆性材料且脆性很强; 随着围压不断增大, 花岗岩试样的 $-M$ 逐渐减小, 而 D 逐渐增大。当围压增大到40 MPa 时, 虽然三者仍满足 $D < E < -M$, 但 $-M$ 和 E 已十分接近, 表明在围压由0 MPa 增大到40 MPa 的整个过程中, 虽然花岗岩的脆性明显减弱, 但始终属于脆性材料。综合上述分析可以看出, 本文建立的脆性指数能够很好的反映不同岩石材料的脆性随围压的变化规律。

(3) 岩石试样破坏模式

为进一步验证各脆性指标的适用性, 下面分析不同围压下红砂岩和花岗岩的宏观破裂形态与脆性的关系。由图10(a)可以看出, 红砂岩试样的整体破坏表现为劈裂和剪切破坏共同作用, 围压越低, 劈裂破坏越明显。围压为0 MPa 时, 红砂岩试样以多重纵向劈裂破坏模式为主, 并伴有局部剪切破坏, 随着围压的增大, 劈裂裂纹的数目减少; 当围压增大到20 MPa 时, 试样上只有一条劈裂裂纹; 当围压为30和40 MPa 时, 红砂岩试样的破坏模式转变为剪切破坏, 这是由于围压会对纵向裂纹的扩展和贯通具有一定限制作用, 更有利于与最大主应力方向呈一定夹角的倾斜裂纹的扩展, 同时实验机需要提供更多的能量来维持宏观裂纹的形成。由图10(b)可以看出, 低围压条件下花岗岩试样的断裂模式比



$\sigma_3 = 0$ MPa $\sigma_3 = 10$ MPa $\sigma_3 = 20$ MPa $\sigma_3 = 30$ MPa $\sigma_3 = 40$ MPa
(a) 红砂岩



$\sigma_3 = 0$ MPa $\sigma_3 = 10$ MPa $\sigma_3 = 20$ MPa $\sigma_3 = 30$ MPa $\sigma_3 = 40$ MPa
(b) 花岗岩

图10 不同围压条件下红砂岩和花岗岩试样断裂形态
Fig.10 Rupture patterns of red sandstone and granite specimens under different confining pressures

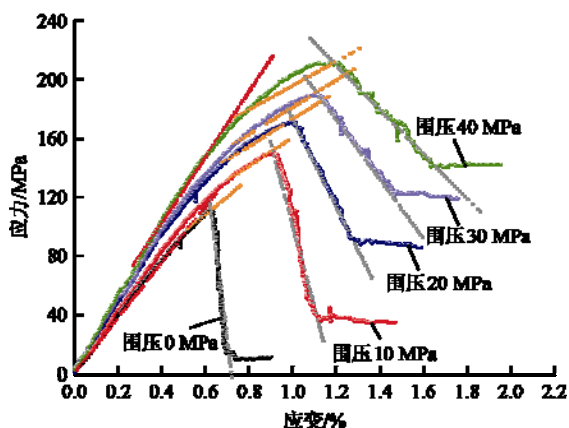
较复杂，以纵向劈裂破坏为主，一些相邻的劈裂面之间由剪切裂纹贯通，形成多重的“Y”形破裂模式。与红砂岩相比，花岗岩试样破碎程度更加充分且在断裂破坏时伴随着较大声响和岩块喷射现象，是脆性岩石材料断裂破坏的主要特征。当围压增大到 30 MPa 时，劈裂面数量明显减少，而围压增大到 40 MPa 后，花岗岩试样的破坏模式转变为劈裂 - 剪切复合破坏，试样以剪切裂纹为主，并伴有部分的张拉劈裂裂纹。

李庆辉等^[60-61]的研究表明岩石的脆性破坏是其在非均匀应力作用下，产生局部断裂，并形成多维破裂面的过程，碎裂范围大，破裂面丰富是岩石高脆性的特征。这是由于岩石试样在峰前阶段吸收的能量越高，岩样断裂破坏过程的能量释放也就越大，而裂纹的贯通程度决定了应力降的大小与能量的释放程度，每一次的裂纹贯通都会造成裂纹周边基质应变能的释放，因此高弹性应变能的释放需要产生更多破裂面来提供释放路径，从而出现更多尺度下的碎块。从破坏模式、裂纹类型及数量上看，单轴压缩条件下，红砂岩具有一定的脆性断裂特征，但随着围压的增大，红砂岩脆性随之降低并且转变为塑性；而花岗岩在围压为 0~40 MPa 时，都表现出强烈的脆性断裂特征，说明随着围压的增大，花岗岩的脆性降低程度很小，这与有脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 , B'_2 所表现出的规律一致，进一步说明了本文脆性指数对于不同岩石材料的脆性有较好的评价效果。

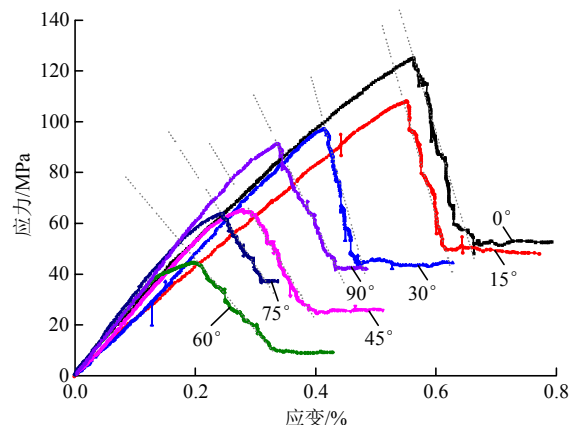
5.3 不同围压及不同层理方向的页岩脆性特征

(1) 全应力 - 应变曲线

图 11 为页岩试样在不同围压和不同层理倾角下的全应力 - 应变曲线。从图 11(a)可以看出，单轴压缩时，页岩应力 - 应变曲线峰前阶段的屈服点并



(a) 不同围压



(b) 不同层理倾角

图 11 不同围压和不同层理倾角下页岩全应力 - 应变曲线
Fig.11 Complete stress-strain curves of shale under different confining pressures and different inclination angles of bedding planes

不明显，而峰后阶段的应力跌落速度和跌落幅度都很大；当围压增大到 20 MPa，峰前阶段出现明显的屈服台阶，峰后曲线的坡度也逐渐变缓，当围压为 40 MPa 时，页岩的应力 - 应变曲线表现出明显的塑性特征。从图 11(b)可以看出，当层理倾角为 0°，15°，30°时，3 条曲线的形态比较相似，曲线没有明显的屈服点，且峰后曲线坡度很陡；当层理倾角为 45°时，峰前曲线出现了明显的塑性屈服阶段，峰后曲线坡度变缓；当层理倾角为 60°时，曲线的峰前屈服段最为明显，峰后曲线的斜率也最小；但当倾角超过 75°后，曲线峰前阶段的塑性特征减弱，峰后曲线斜率增大。页岩的全应力 - 应变曲线形态表明，随着层理倾角的不断增大，其脆性呈现出先降低后增加的趋势。

(2) 脆性特征

表 2 为不同围压及不同层理角度下的页岩三轴压缩实验数据及其脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 的计算结果。根据表 2 中各种能量数据计算得到的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 和 B_{post2} 如图 12 所示。可以看出随着围压增大，页岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 和 B_{post2} 逐渐增大，这表明随着围压的增大，页岩试样断裂过程中的峰前耗散能和峰后断裂能所占能量比例逐渐增大，脆性程度逐渐降低。图 13 为不同围压下，页岩脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 随围压的变化规律。由应变能密度计算的脆性指数 B_1 , B_2 随围压增大而增大，同样反映出页岩脆性随围压增大而降低的趋势。 B'_1 , B'_2 与 B_1 , B_2 变化趋势一致，并且当围压为 0~20 MPa 时，页岩的 E , D , M 满足关系 $D < E <$

表 2 不同围压及不同层理倾角下的页岩三轴压缩实验数据

Table 2 Parameters of sandstone under different confining pressures and different inclination angles of bedding planes

条件	围压/ MPa	峰值强 度/MPa	弹性能 $dW_e /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	弹性能 $dW_e' /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	剩余能 $dW_e'' /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	屈服阶段 总能量 $dW_d^* /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	峰后断裂 能 $dW_f /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	峰前耗散 能 $dW_d /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	额外能量 $dW_a /$ ($J \cdot mm^{-3}$)	弹性模 量/GPa	屈服模 量/GPa	峰后模 量/GPa	B_1	B_2	B_1'	B_2'
不同 围压	0	111.16	0.447	0.334	0.008	0.167	0.494	0.059	0.056	18.75	13.21	-484.40	1.68	0.07	1.47	0.02
	10	149.61	0.783	0.485	0.052	0.587	0.988	0.294	0.252	20.27	10.13	-51.21	2.66	0.34	2.79	0.40
	20	170.02	0.887	0.560	0.171	0.891	1.174	0.511	0.511	22.73	8.85	-28.26	4.47	1.12	4.63	1.26
	30	189.04	1.117	0.725	0.464	1.045	1.369	0.626	0.637	23.81	9.01	-19.51	5.59	1.56	5.87	2.00
	40	210.48	1.291	0.953	0.612	1.271	1.689	0.867	0.998	24.63	7.95	-16.17	9.36	3.77	7.82	3.20
不同 层理 倾角	0	125.17	0.422	0.291	0.081	0.221	0.447	0.091	0.112	18.64	13.03	-57.96	2.23	0.23	1.89	0.14
	15	108.12	0.365	0.266	0.077	0.155	0.353	0.058	0.066	15.74	12.61	-59.71	1.90	0.13	1.58	0.07
	30	97.18	0.254	0.187	0.053	0.093	0.251	0.027	0.051	18.56	16.55	-65.53	1.71	0.10	1.44	0.03
	45	65.29	0.106	0.072	0.016	0.074	0.152	0.040	0.066	20.27	11.79	-26.64	3.64	0.86	3.03	0.55
	60	44.55	0.048	0.033	0.003	0.044	0.089	0.029	0.046	26.01	5.61	-19.45	5.98	1.98	6.44	2.26
	75	63.76	0.092	0.070	0.031	0.055	0.103	0.032	0.041	23.49	10.04	-34.39	4.13	0.94	3.94	0.92
	90	91.27	0.186	0.127	0.039	0.102	0.229	0.041	0.082	22.88	14.36	-40.58	2.73	0.39	2.49	0.33

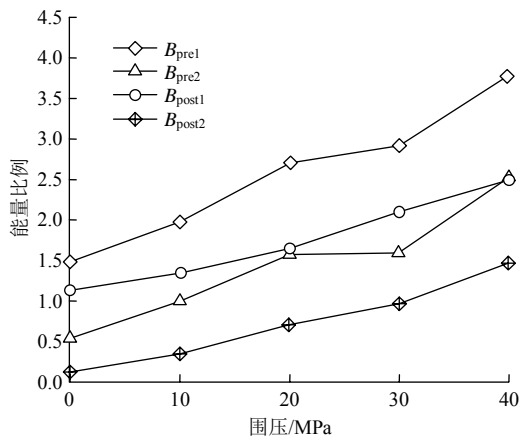


图 12 页岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 及 B_{post2} 随围压变化规律
Fig.12 The variation of B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} and B_{post2} of shale with confining pressure

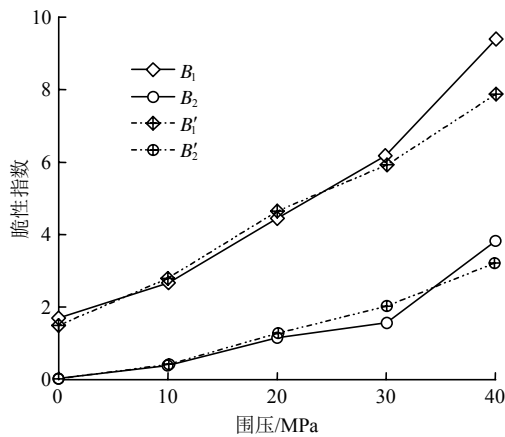


图 13 页岩的脆性指数 B_1 , B_2 , B_1' 及 B_2' 随围压变化规律
Fig.13 The variation of B_1 , B_2 , B_1' and B_2' of shale with confining pressure

-M, 说明该围压范围内页岩属于脆性材料; 当围压超过 30 MPa 后, $D < -M < E$, 此时页岩具有明显的塑性材料特征。

图 14 为页岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 和 B_{post2} 随层理倾角的变化规律。随着层理倾角的不断增加, B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 和 B_{post2} 均表现出稳 - 增 - 减的变化趋势。图 15 为不同层理倾角下, 页岩脆性指数 B_1 , B_2 , B_1' 和 B_2' 的变化规律, 可以看出随着层理倾角的增加页岩脆性发生如下变化: (1) 当层理倾角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时, 脆性指数几乎没有变化, 说明该角度范围内, 页岩脆性的变化并不明显; (2) 当层理倾角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时, B_1 , B_2 , B_1' 和 B_2' 开始大幅度地增大, 说明该角度范围内页岩脆性大幅度降低, 当层理倾角达到 60° 时, 脆性指数达到最大值, 并且此时页岩的 E , D , M 满足关系 $D < -M < E$, 说明此时页岩脆性最弱且具有明显的塑性特征; (3) 当层理倾角超过 60° 后, 脆性指数开始降低, 并且层理倾角为 90° 时的各脆性指数均高于层理倾角为 0° 时的脆性指数, 说明当层理垂直于加载方向时页岩的脆性要高于层理平行于加载方向时。图 15 中还可以看出页岩脆性的变化与峰值强度的变化呈相反趋势。

(3) 试样断裂形态

在低围压水平, 页岩试样以拉伸劈裂 - 剪切复合断裂模式为主, 主断裂面周围伴随着层理张开所形成的横向裂纹, 随着围压不断增加, 页岩试样逐渐转变为以剪切破坏为主的破坏模式。图 16 为不同

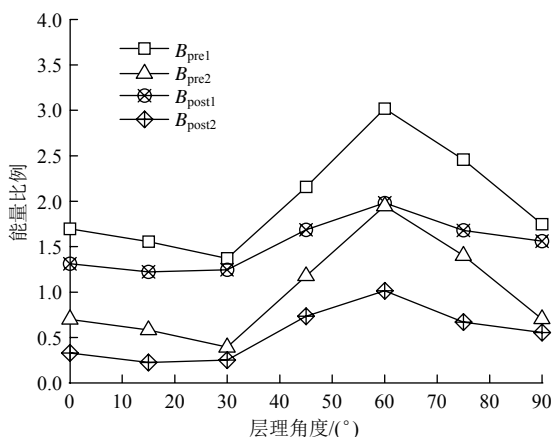


图 14 页岩的 B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} 及 B_{post2} 随层理倾角的变化
 Fig.14 The variation of B_{pre1} , B_{pre2} , B_{post1} and B_{post2} of shale with the inclination angle of bedding planes

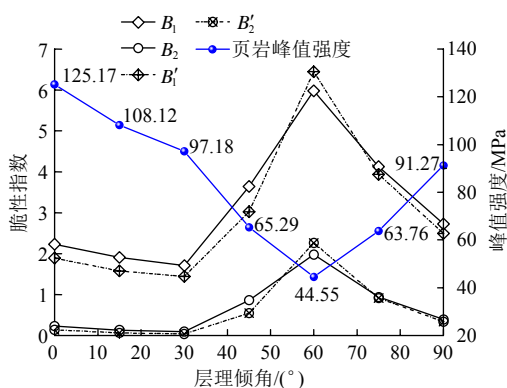


图 15 页岩的脆性指数 B_1 , B_2 , B'_1 及 B'_2 随层理倾角的变化
 Fig.15 The variation of B_1 , B_2 , B'_1 and B'_2 of shale with the inclination angle of bedding planes

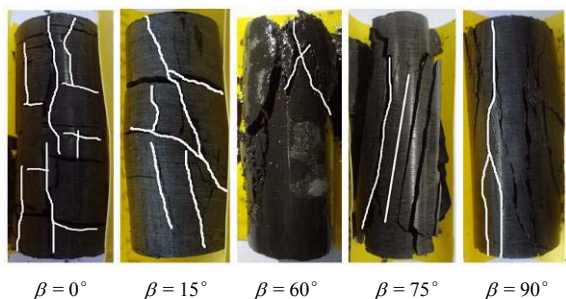


图 16 不同层理倾角下页岩试样断裂形态

Fig.16 Rupture patterns of shale specimens under different inclination angles of bedding planes

层理倾角下页岩试样的断裂形态。当层理倾角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时，压后页岩试样出现了多种宏观裂纹，包括主要的断裂裂纹、次级劈裂裂纹以及沿层理张开的裂纹，结合其应力 - 应变曲线可以看出，在该角度范围内，由于层理与加载方向之间的夹角较大，所以在峰前阶段随着载荷逐渐增加，页岩层理不易张开或剪切滑移，峰前阶段仅需要少量的耗散能来满足试样内部微裂纹的张开，随着载荷继续增加，

试样内部积累的弹性能不断变大，当应力超过峰值强度，能量积累达到极限并且迅速释放，大量的弹性能的瞬间释放需要更多的断裂裂纹提供释放路径，因此产生了数目较多的宏观裂纹。并且在能量释放过程中，由于层理面的胶结强度较低，更容易形成张开裂纹，为能量提供释放路径，因此出现了包括多种破裂面的复合断裂模式。当层理角度为 60° 时，页岩试样主要沿层理剪切破坏，裂纹数目较少。这是由于在该角度下，随着轴向载荷的增加，页岩内部的层理面更容易丧失黏结力而发生剪切滑移，导致更多的微裂纹衍生扩展，因此峰前阶段需要耗散大量的能量，在应力达到峰值强度前，试样内部的一些层理面可能已经处于临界扩展状态，所以当载荷超过峰值强度后，试样内部的弹性能能够更容易的沿着这些易扩展的层理面或微裂纹释放，从而诱发宏观裂纹的产生，由于峰前阶段耗散了大量的能量，峰后阶段所需要的额外能量 dW_a 也比较大，在应力 - 应变曲线上表现出来的特点就是有一个比较小的屈服模量 D 和弱化模量 M 。当层理倾角为 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时，在峰前阶段随着载荷的增加，试样内部层理方向的微裂纹张开或滑移，需要耗散一定能量，达到峰值强度后，弹性能的迅速释放使得峰前阶段张开的微裂纹持续扩展，最终导致相邻裂纹搭接、连通形成更长的裂纹，并不断朝最大主应力方向扩展，形成纵向多重劈裂式破坏模式。由此可以看出，随着层理倾角不断增加，页岩脆性表现出先减小后增大的趋势，与其全应力 - 应变曲线形态及 B_1 , B_2 , B'_1 和 B'_2 所反映出的脆性变化趋势一致。

6 讨 论

岩石材料在外部载荷作用下，内部的微细缺陷不断演化，从无序分布逐渐向有序发展，从而形成宏观裂纹使岩石失稳破坏。岩石的变形破坏过程实质上是能量耗散和能量释放的全过程，积累在岩石内的弹性能是岩石断裂的主要源动力，而峰前能量耗散的程度决定了峰后断裂能水平。基于能量演化的脆性指数能够更好地反映岩石断裂破坏全过程的脆性特征，由于室内实验中岩石试样受力状态与储层中岩石的受力仍有所差异，因此本文建立的脆性指数并不能作为一种通用指标，目前只是用于评价特定加载条件下的岩石的相对脆性，为页岩可压性评价及花岗岩岩爆预测提供一种更加合理可靠的室内评价方法。如何将本文建立的脆性指数与现场数

据相结合, 提出适用范围更加广泛的脆性评价标准是笔者下一步将要开展的研究内容。

7 结 论

(1) 岩石脆性破坏的本质是峰前阶段高能积聚和峰后阶段能量迅速释放所导致的动力失稳现象, 峰前耗散能和峰后断裂能是决定岩石是否发生脆性断裂的本质因素, 当岩石内部所积累的弹性能一定时, 峰前耗散能和峰后断裂能比例越小, 岩石的脆性越强。

(2) 本文建立的脆性指数考虑了岩石的整个破坏过程中各种能量的演化规律, 不仅能够评价不同力学条件下岩石的脆性变化特征, 而且能够描述岩石由理想塑性到理想脆性的整个变化规模, 计算结果单调连续。

(3) 评价了不同岩石在不同围压下的脆性, 结果表明 3 种岩石的脆性随围压的增大出现了不同的降低趋势: 红砂岩和页岩分别在低围压时和高围压时出现了脆 - 塑性的转化, 而花岗岩在围压不断增大的整个过程中都保持着较强的脆性。

(4) 页岩的脆性断裂特征有明显的各向异性, 不同层理倾角 β 下的页岩试样表现出不同的脆性断裂特征: $\beta = 90^\circ$ 的页岩试样出现了多重纵向劈裂裂纹, $\beta = 60^\circ$ 时以斜面剪切裂纹为主, $\beta = 0^\circ$ 时不仅出现的纵向劈裂裂纹, 并且包括与之交错的层理张开裂纹。

(5) 脆性评价结果表明: 随着层理倾角的增大, 页岩的脆性程度表现出稳 \rightarrow 减 \rightarrow 增的变化趋势: $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 时, 页岩的脆性变化并不显著; $\beta = 60^\circ$ 时, 页岩脆性最弱且表现出塑性特征。这与页岩试样断裂模式所反映的脆性变化特征一致, 说明本文建立的脆性指数能够较好地描述页岩脆性的各向异性特征, 同时证明了对页岩进行脆性评价时, 应该充分考虑其各向异性特点。

参考文献(References):

[1] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7 - 12.(JIANG Yuqing, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Nature Gas Industry, 2010, 30(10): 7 - 12.(in Chinese))

[2] WANG F P, REED R M. Pore networks and fluid flow in gas shale[R]. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2009.

[3] MATT B, BILL G. Special techniques tap shale gas[J]. Exploration

and Production in Hart Energy, 2007, 80(3): 89 - 93.

[4] 李庆辉, 陈勉, WANG F P, 等. 工程因素对页岩气产量的影响——以北美 Haynesville 页岩气藏为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 54 - 59.(LI Qinghui, CHEN Mian, WANG F P, et al. Influences of engineering factors on shale gas production—take the Haynesville shale gas reservoir in North America for example[J]. Journal of Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 54 - 59.(in Chinese))

[5] BECK D A, BRADY B H G. Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(5): 633 - 642.

[6] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 034 - 2 042.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rock burst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 034 - 2 042.(in Chinese))

[7] MORLEY A. Strength of materials[M]. London: Longmans Green and Company, 1944: 71 - 72.

[8] HETENYI M. Handbook of experimental stress analysis[M]. New York: John Wiley, 1966: 23 - 25.

[9] RAMSAY J G. Folding and fracturing of rocks[M]. London: McGraw-Hill, 1967: 44 - 47.

[10] OBERT L, DUVALL W I. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York: John Wiley, 1967: 78 - 82.

[11] ANDREEV G E. Brittle failure of rock material-test results and constitutive models[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 123 - 128.

[12] GOKTAN R M, GUNES Y N. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency[J]. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 727 - 734.

[13] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17 - 22.(LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17 - 22.(in Chinese))

[14] HNODA H, SANADA Y. Hardness of coal[J]. Fuel, 1956, 35: 451.

[15] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1974, 11(10): 389 - 392.

[16] BISHOP A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it[C]// Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo, Norway: [s.n.], 1967: 142 - 150.

[17] 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): 1 114 - 1 122.(ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1 114 - 1 122.

- (in Chinese))
- [18] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [19] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the mississippian barnett shale of north-central texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. The American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 2007, 91(4): 475 - 499.
- [20] ALTINDAG R, GUNNEY A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties(UCS, TS and SH) of rocks[J]. Scientific Research and Essays, 2010, 5(16): 2 107 - 2 118.
- [21] MIKAEIL R, ATAIEI M, YOUSEFI R. Correlation of production rate of ornamental stone with rock brittleness indexes[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 6(1): 115 - 121.
- [22] 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 Yanfang, 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))
- [23] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 35 - 48.
- [24] AUBERTIN M, Gill D E. Use méthodologie d'évaluation du potentiel de coups de terrain dans les mines d'Abitibi[C]// Proceedings Colloque sur le Contrôle de Terrain(AMMQ). [S. l.]: [s. n.], 1988: 47 - 77.
- [25] BATOUGINA I M, PETOUKHOV I M, VINOKUR B S, et al. Methodological instructions for rock burst prophylaxis accounting the deposit geodynamics[M]. Leningrad: VNIMI, 1983: 132 - 135.
- [26] BARON L I. Determination of properties of rocks[M]. Moscow: Gozgotekhizdat, 1962: 231 - 233.
- [27] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295 - 304.
- [28] TARASOV B G, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59(4): 57 - 69.
- [29] TARASOV B G, RANDOLPH M F. Superbrittleness of rocks and earthquake activity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 888 - 898.
- [30] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136 - 142.(YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136 - 142.(in Chinese))
- [31] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增1): 94 - 100.(ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Research on energy and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Supp.1): 94 - 100.(in Chinese))
- [32] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 565 - 3 570.(XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 565 - 3 570.(in Chinese))
- [33] 尤明庆, 华安增. 岩石岩样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 292 - 296.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 292 - 296.(in Chinese))
- [34] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953 - 961.(ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953 - 961.(in Chinese))
- [35] 张志镇. 岩石形破坏过程中的能量演化机制[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.(ZHANG Zhizhen. Energy evolution mechanism during rock deformation and failure[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.(in Chinese))
- [36] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 603 - 2 608.(XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 603 - 2 608.(in Chinese))
- [37] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 729 - 1 739.(XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 729 - 1 739.(in Chinese))
- [38] 陈昀, 金衍, 陈勉. 基于能量耗散的岩石脆性评价方法[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 984 - 992.(CHEN Yun, JIN Yan, CHEN Mian. A rock brittleness evaluation method based on energy dissipation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 984 - 992.(in Chinese))
- [39] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 943 - 950.(SU Chengdong, LI Huaizhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2013, 32(5): 943 - 950.(in Chinese))
- [40] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩应力脆性跌落系数的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5): 589 - 596.(ZHANG Zhizhen, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Experimental study of brittle stress drop coefficient of granite endured high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5): 589 - 596.(in Chinese))
- [41] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1 198 - 1 202.(ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1 198 - 1 202.(in Chinese))
- [42] 张志镇, 高峰. 3种岩石能量演化特征的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 416 - 422.(ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental investigations on energy evolution characteristics of coal, sandstone and granite during loading process[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(3): 416 - 422.(in Chinese))
- [43] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 1 - 10.(ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Confining pressure effect on rock energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 1 - 10.(in Chinese))
- [44] TARASOV B G. Super-brittleness of rocks at high confining pressure[C]// Deep Mining 2010 of Australian Centre for Geomechanics. Perth: [s.n.], 2010: 119 - 133.
- [45] TARASOV B G. Universal scale of brittleness for rocks failed at compression[C]// The 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Sydney: [s.n.], 2011: 669 - 673.
- [46] RECHES Z. Mechanisms of slip nucleation during earthquakes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 170: 475 - 486.
- [47] RECHES Z, LOCKNER D A. Nucleation and growth of faults in brittle rocks[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(B9): 18 159 - 18 173.
- [48] COX S J D, SCHOLZ C H. On the formation and growth of faults: an experimental study[J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10: 413 - 430.
- [49] PENG S, JOHNSON A M. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1972, 9(1): 37 - 86.
- [50] KING G C P, SAMMIS C G. The mechanisms of finite brittle strain[J]. Pure and Applied Geophysics, 1992, 138(4): 611 - 640.
- [51] ORTLEPP W D. Rock fracture and rock bursts: an illustrative study[M]. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997: 98 - 100.
- [52] ASWEGEN G V. Ortlepp Shears - dynamic brittle shears of S.A. goldmines[C]// Conference: First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium. Perth: [s.n.], 2008: 1 - 9.
- [53] 左建平, 黄亚明, 熊国军, 等. 脆性岩石破坏的能量跌落系数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 321 - 327.(ZUO Jianping, HUANG Yaming, XIONG Guojun, et al. Study of energy-drop coefficient of brittle rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 321 - 327.(in Chinese))
- [54] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[博士学位论文][D]. 厦门: 厦门大学, 2000.(SU Weihua. Research on the theory and method of multi index comprehensive evaluation[Ph. D. Thesis][D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.(in Chinese))
- [55] 苏为华. 我国多指标综合评价技术与应用研究的回顾与认识[J]. 统计研究, 2012, 29(8): 98 - 107.(SU Weihua. Review and recognition on the research of multi-indicators comprehensive evaluation in China[J]. Statistical Research, 2012, 29(8): 98 - 107.(in Chinese))
- [56] 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等. 致密气储层可压裂性测井评价方法[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 74 - 80.(SUN Jianmeng, HAN Zhilei, QIN Ruibao, et al. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 74 - 80.(in Chinese))
- [57] GUO Z Q, CHAPMAN M, LI X Y. A shale rock physics model and its application in the prediction of brittleness index, mineralogy, and porosity of the Barnett Shale[R]. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- [58] MARSH H W, WEN Z, HAU K T. Structural equation models of latent interactions: evaluation of alternative estimation strategies and indicator construction[J]. Psycho Logical Methods, 2004, 9(3): 275 - 300.
- [59] 周辉, 孟凡震, 卢景景, 等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2015, 35(4): 913 - 925.(ZHOU Hui, MENG Fanzhen, LU Jingjing, et al. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 35(4): 913 - 925.(in Chinese))
- [60] 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): 1 680 - 1 689.(LI Qinghui, 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): 1 680 - 1 689.(in Chinese))
- [61] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 含气页岩破坏模式及力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增2): 3 763 - 3 773.(LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.2): 3 763 - 3 773.(in Chinese))