

基于室内试验的页岩脆性特征评价方法

侯振坤¹,杨春和^{1,2},王磊²,徐峰²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044 ;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071)

摘 要 : 基于全应力应变曲线 ,提出了包含多参数的综合脆性指标 B_{dl} 和 B_{dz} .从扩容拐点(峰前曲线)、残余强度(峰后曲线)、能量分析(全过程曲线)等多角度对脆性指标进行了诠释 ,通过页岩单三轴实验并结合破坏模式对其适用性进行了验证 .结果表明 ,该指标较好地反应了页岩的脆性 , B_{dl} 可根据不同的目的需求选择不同的参数 ,对脆性评价具有侧重性 ,且 B_{dl} 与围压具有较好的拟合关系 ,拟合曲线为指数函数 ; B_{dz} 综合性强 ,可作为脆性的综合评价指标 ,但围压较高时对围压不够敏感 ,90°取芯角度下 ,随着围压的增加 ,脆性指数降低 ,岩石有脆性向延性转化的趋势 ,低围压下脆性指数对围压比较敏感 ,降低速度较快 ,高围压下则相反 .

关 键 词 : 页岩 ;脆性指标 ;扩容拐点 ;残余强度 ;能量分析 ;破坏模式

中图分类号 : O 39 文献标志码 : A 文章编号 : 1005 - 3026(2016)10 - 1496 - 06

Evaluation Method of Shale Brittleness Based on Indoor Experiments

HOU Zhen-kun¹ , YANG Chun-he^{1,2} , WANG Lei² , XU Feng²

(1. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control ,Chongqing University ,Chongqing 400044 ,China ;2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of Sciences ,Wuhan 430071 ,China. Corresponding author : HOU Zhen-kun , E-mail 979357924@qq. com)

Abstract : Comprehensive brittleness indexes B_{dl} and B_{dz} including multi-parameters were proposed on the basis of the stress-strain curve. The brittleness characteristics were interpreted through the inflection point of dilatancy (the pre peak curve) ,the residual strength (the post peak curve) ,and energy analysis (the complete stress-strain curve). Axial and triaxial compression tests were conducted to examine the new indexes corresponding to failure mode. The results showed that the two evaluation indexes can preferably reflect the brittle characteristics of shale. For B_{dl} ,related parameters can be selected freely according to different purpose ,which can pay particular attention to any parameters in the process of brittleness evaluation. B_{dl} can be better fitted by confining pressure with an exponential function. B_{dz} can be used as a comprehensive evaluation index of brittleness evaluation , but B_{dz} is not sensitive to high confining pressure. Under the coring angle of 90° , the evaluation indexes of brittleness decrease with the increase of confining pressure , and shale exhibits a tendency from brittle at low confining pressure to ductile at high confining pressure. The evaluation indexes are sensitive to confining pressure under low confining pressure and reduce quickly , and vice versa under high confining pressure.

Key words : shale ; brittleness index ; inflection point of dilatancy ; residual strength ; energy analysis ; failure mode

页岩气作为一种清洁能源 ,是实现低碳能源最现实的选择^[1] .有研究发现^[2] :页岩的脆性能

够显著影响井壁的稳定性及压裂效果 ,它是评价储层力学特性的关键指标 ,是遴选射孔改造层段

和设计压裂规模的重要基础。

国内外学者对脆性进行了大量研究,在脆性指标方面:李庆辉等^[2]总结了国内外评价岩石脆性的常用方法;刘恩龙等^[3]基于脆性指标将其分成了 5 类,并进行了脆性二元介质模拟;杨根兰等^[4]对蚀变岩的脆-延性转换围压进行了研究;Yagiz^[5]基于贯入试验提出了脆性指标的新方法,并提出一个统计模型来预测岩石脆性;Hucka 等^[6]研究了岩石脆性与抗压强度的关系;Altindag^[7]分析了脆性指标和断裂韧性的函数关系。在脆性定义方面,表征物质力学特性的脆性的定义和度量还没有统一的说法^[3],Morley^[8]和 Hetenyi^[9]将材料塑性的缺失定义为脆性;Ramsey^[10]将岩石黏聚力的丧失定义为脆性破坏;Obert 等^[11]将脆性定义为类似铸铁和多数的岩石材料达到或稍超过屈服强度而破坏的性质。

脆性是岩石的综合特性,不能单纯靠某个变量或者岩石某一物理力学特征表示,为此,本文基于全应力应变曲线,从扩容拐点(应力应变峰前曲线)、残余强度(应力应变峰后曲线)、能量分析(全应力应变曲线)等多角度对脆性特征进行了诠释。提出了综合脆性指标 B_{d1} 和 B_{d2} ,该指标不仅包含脆性破坏的两个状态量,还包含脆性破坏的全过程,并通过页岩单三轴实验验证了该指标的适用性。

1 岩石的建议性综合脆性指标

1.1 基于峰前曲线脆性指数的建立

扩容拐点又称扩容临界点^[12],它是体积由压缩转为膨胀的分界点,是稳定破裂阶段与非稳定破裂阶段的分界点,数学上表现为体积应变曲线的极值点。已有实验^[13]表明:波速、声发射数、电阻率、渗透率等物理力学参数在岩石达到该点时均表现为明显的突变性,只要到达扩容拐点,岩石各部分个性退居次要地位,共性变得突出。此时岩石系统非常敏感,一个微小的扰动,就会导致整个岩石系统状态发生改变,因此利用该点的性质来研究岩石的脆性具有积极意义。

基于 Yuan 等^[14]的“多线型-双线型扩容转化模型”,轴向应变对体积应变的影响如图 1 所示。定义脆性指标:

$$B_1 = I_d. \tag{1}$$

其中 I_d 为扩容指数,

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{1p})_p}{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{1p})_0}. \tag{2}$$

其中 $\Delta\varepsilon_{vp}$ 为体积塑性应变增量(以扩容为正);
 $\Delta\varepsilon_{1p}$ 为轴向塑性应变增量(以压缩为正); θ_0 、 θ_p 为扩容角。

把式(2)代入式(1):

$$B_1 = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{1p})_p}{\arctan(\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta\varepsilon_{1p})_0}. \tag{3}$$

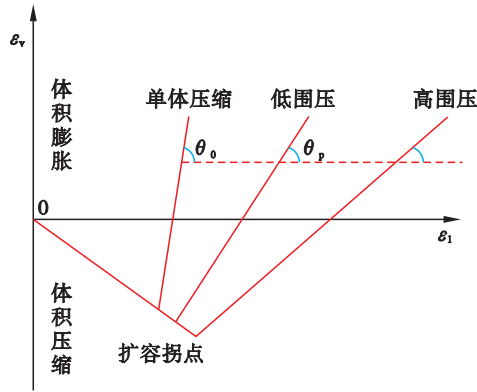


图 1 轴向应变对体积应变的影响
Fig. 1 Effect of axial strain on volumetric strain

已有实验^[14]证明扩容指数和围压符合负指数函数关系,可得 B_1 随着围压的增加而减小,脆性变弱。借鉴灰色系统的关联度分析方法原理^[15]可知用扩容指数表示脆性是可行的。经计算可知, B_1 的变化区间为 0~1,该值越大,脆性越强。

1.2 基于峰后曲线脆性指数的建立

图 2 是典型脆性岩石的全应力应变曲线,包括峰前、峰后和残余曲线三段:线弹性-脆性跌落-理想塑性,如图 2 中的虚线,即为典型脆性岩石的非理想脆塑性模型。

如图 3 所示, M 为软化模量(一般为负值),可以把岩石分成如下 4 类:①理想脆性, $M \rightarrow -\infty$;②普通脆塑性,当 $-\infty < M \leq -E$ 时,脆性很强,塑性很弱,当 $-E < M < 0$ 时,塑性很强,脆性很弱;③理想塑性, $M = 0$;④应变硬化, $M > 0$ 。

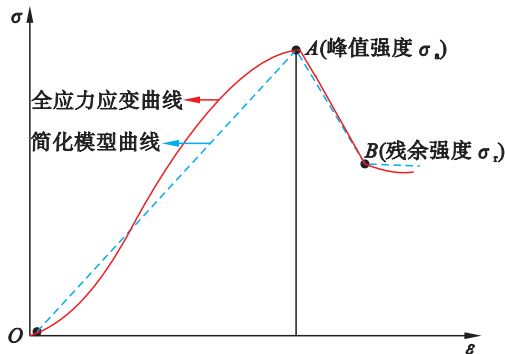


图 2 脆性岩石全应力应变曲线及其简化模型
Fig. 2 Complete stress-strain curve of brittle rock and its simplified model

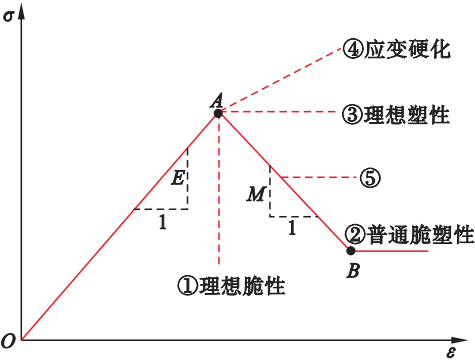


图 3 岩石脆塑性分类

Fig. 3 Classification diagram of brittleness and plasticity

图 3 说明 M 在一定程度上反映了脆性的强弱, 曲线②和⑤虽然具有相同的软化模量, 但由于曲线②的应力降较大, 所以脆性较强. 定义应力降水平:

$$K_1 = (\sigma_a - \sigma_r) / \sigma_a. \tag{4}$$

应力降水平 K_1 越大, 应力降落相对越厉害, 脆性相对较强, K_1 取值范围为 $0 \sim 1$.

定义峰后脆性跌落指标:

$$B_2 = -K_1 M. \tag{5}$$

将式(5)进行归一化处理得

$$B_3 = K_1 [1 - \exp(-M/E)]. \tag{6}$$

经计算可知, 峰后脆性跌落指标 B_3 的取值范围为 $0 \sim 1$, 该值越大, 岩石的脆性越强.

1.3 基于全应力应变曲线脆性指数的建立

指标 B_1 , B_3 都是状态量, 脆性破坏是一个过程, 因此单单这两个指标还不足以完全表达脆性. 岩石到达峰值点时处于高能量状态, 峰前曲线段页岩不断积聚能量, 峰后曲线从峰值点到残余强度, 能量大规模释放. 如图 2 所示, 对从 O 到 A 到 B 这一过程进行能量分析. O 到 A : 能量积累过程, 这部分能量一部分以压密岩石、产生微裂纹、产生热能等多种方式耗散, 其余大部分能量不断在岩石体内积累, 以可释放弹性应变能 (W_e) 的形式储存. A 到 B : 能量耗散过程, 达到峰值强度后, 岩石产生大量裂隙, 能量来源为试验机做功和弹性应变能的释放, 该过程岩石破坏所消耗的能量为 W_R .

如果 W_e 足够大时 A 到 B 过程中, 试验机无需做功, 岩石试件就会急剧破裂和崩解, 对应岩石的脆性越大, W_e 在一定程度上体现了脆性的强弱, 其值越大脆性越强, 故定义脆性指数:

$$B_4 = \frac{W_{eAB}}{W_{eAB} + W_{AB}}. \tag{7}$$

其中: W_{eAB} 为 A 到 B 过程中弹性能的释放量, 简

称为可释放弹性应变能做功; W_{AB} 为 A 到 B 过程中试验机做功, 它们的求法如下.

如图 4 所示, 在应力应变加卸载曲线图中, 加载弹性模量为 E , 卸载弹性模量为 \bar{E} , 任意一点 A_2 可释放的弹性应变能为 $W_e^{[3]}$, 有

$$W_e = V \left(\frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_3 \varepsilon_3 \right). \tag{8}$$

其中: V 为试样的体积; σ_1 为 A_2 点对应的轴向应力; ε_1 为 A_2 点对应的轴向应变; σ_3 为围压; ε_3 为 A_2 点对应的侧向应变.

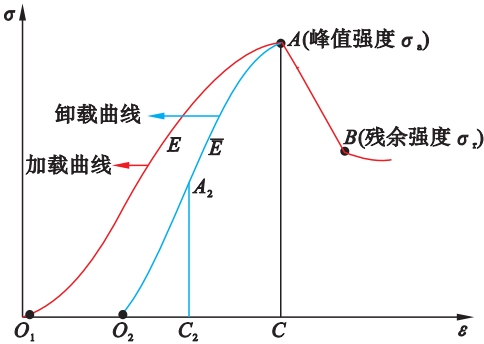


图 4 应力应变加卸载曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under loading and unloading

由泊松比的定义可知

$$\varepsilon_3 = \mu \varepsilon_1. \tag{9}$$

把式(9)代入式(8)可得

$$W_e = V \left(\frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 + \mu \varepsilon_1 \sigma_3 \right). \tag{10}$$

由广义的胡克定律知

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - 2\mu \sigma_3}{E}. \tag{11}$$

把式(11)代入式(10)得

$$W_e = \frac{V}{E} \left(\frac{1}{2} \sigma_1^2 - 2\mu^2 \sigma_3^2 \right). \tag{12}$$

由式(12)知 A 到 B 过程中弹性能的释放量为

$$W_{eAB} = \frac{V}{2} \left(\frac{\sigma_A^2}{E_A} - \frac{\sigma_B^2}{E_B} \right) + 2V\mu^2 \sigma_3^2 \left(\frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_A} \right). \tag{13}$$

其中: σ_A , σ_B 分别为 A , B 两点对应的轴向应力, 其值分别为 σ_a (峰值强度), σ_r (残余强度); \bar{E}_A , \bar{E}_B 分别为在 A , B 两点卸载时对应的卸载弹性模量.

A 到 B 过程中试验机做功为 W_{AB} , 则

$$W_{AB} = V \left(\int_{\varepsilon_A}^{\varepsilon_B} \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_{\varepsilon'_A}^{\varepsilon'_B} \sigma_3 d\varepsilon_3 \right). \tag{14}$$

其中: ε_A , ε_B 为 A , B 两点对应的轴向应变; ε'_A , ε'_B 为 A , B 两点对应的侧向应变.

在实际计算中,

$$W_{AB} = V \sum_{i=0}^n \left[\frac{\sigma_{1i} + \sigma_{1(i+1)}}{2} (\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i}) \right] + 2V\sigma_3 \sum_{i=0}^n (\varepsilon'_{1(i+1)} - \varepsilon'_{1i}). \quad (15)$$

具体参数如下：在 A 到 B 压缩过程中，轴向应力由 σ_{1i} 增加到 $\sigma_{1(i+1)}$ ， n 为试验机的采样次数，其中 $\sigma_{10} = \sigma_a$ ， $\sigma_{1n} = \sigma_r$ ， ε_{1i} 、 $\varepsilon_{1(i+1)}$ 分别为应力 σ_{1i} 、 $\sigma_{1(i+1)}$ 所对应的轴向应变， ε'_{1i} 、 $\varepsilon'_{1(i+1)}$ 则为相应的侧向应变。

式(7)在一定程度上能综合反映岩石的脆性强弱，但对大多数高脆性岩石的单轴实验来说，到达峰值强度后岩石瞬间破坏，甚至岩石碎块四处飞射，岩石破坏的维持无需试验机做功或者只需要少量试验机做功，即 W_{AB} 很小，几乎为 0。由此计算出来的脆性指数 B_4 约等于 1，则高脆性岩石的单轴压缩的脆性将无法比较，为了避免这类情况，本文定义破裂能系数 K_2 。

如图 3 所示，峰值曲线左半部分的面积为达到峰值强度时积累在试件内部的应变能，峰值曲线右半部分的面积代表试件从破坏到破裂整个过程所消耗的能量^[12]，该部分破坏所消耗的能量为 W_R ，则定义破裂能系数 K_2 并归一化如下：

$$K_2 = \exp\left(-\frac{W_R}{W_{eAB}}\right). \quad (16)$$

仿照式(13)破裂能 W_R 的简化求法为

$$W_R = V \frac{\sigma_B^2 - \sigma_A^2}{2M}. \quad (17)$$

结合图 3，由式(17)可知， W_R 的取值为(0，+∞)，则 K_2 的取值为从 1 到 0，该值越大，表示岩石越破碎，脆性越强。因此定义能量综合脆性指数为

$$B_5 = K_2 \frac{W_{eAB}}{W_{eAB} + W_{AB}}. \quad (18)$$

1.4 岩石建议性综合脆性指数的建立

由 1.1~1.3 节可知，上述 3 个指标中 B_1 、 B_3 是基于特殊点定义出来的，它们都是状态量。 B_5 是基于全过程的能量建立的，是过程量。对应图 3，从曲线①理想脆性到③理想塑性，岩石的脆性逐渐减弱，逐渐向延性方向转化， B_1 、 B_3 、 B_5 的值也均从 1(理想脆性)逐渐变为 0(理想塑性)。由此可知，这 3 个脆性指标越大，岩石的脆性一定越强，否则相反，故定义脆性总指标：

$$B_{d1} = \alpha B_1 + \beta B_3 + \gamma B_5, \quad (19)$$

$$\text{且 } \alpha + \beta + \gamma = 1. \quad (20)$$

其中 α 、 β 、 γ 分别表示 B_1 、 B_3 、 B_5 在总脆性指数中所占的权重， α 、 β 、 γ 的取值可按同一标准取值后

归一化，也可以参考研究的侧重点。根据不同目的进行侧重取值，比如当重点研究峰前特征对脆性的影响时 B_1 所占权重较大， α 可取较大值，再如当重点研究全过程综合脆性评价时 B_5 所占权重较大， γ 可取较大值。无特殊要求的情况下可取特例 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。如果目的性不强或主要是研究岩石脆性的相对情况，则可定义脆性总指标：

$$B_{d2} = B_1 \times B_3 \times B_5. \quad (21)$$

2 建议性脆性指标的验证

2.1 脆性参数及综合脆性指标求取

为了验证上述脆性指标的适用性，本文开展了页岩的单三轴力学性质实验，为减小各向异性^[15]产生的影响，本文页岩取芯时一律垂直于层理面方向进行，试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。实验在 MTS815 上进行，围压设为 0、10、20、30 MPa。

根据应力应变曲线，求取相应基础力学参数；在此基础上求出脆性指数 B_1 、 B_3 、 B_5 ，随后求取综合脆性指标 B_{d1} 和 B_{d2} ，结果见表 1。

说明：表头中(1,0,0)、(1/4,3/8,3/8)等表示式(19)中 α 、 β 、 γ 的不同取值； $B_{d11} \sim B_{d17}$ 等表示不同 α 、 β 、 γ 的取值下式(19)中脆性指数 B_{d1} 的值，比如围压编号为 10-2 时， B_{d16} 表示当 α 、 β 、 γ 分别取 1/6、1/2、1/3 时，经式(19)计算， $B_{d1} = 0.38626$ 。实际上 $B_{d11} = B_1$ ， $B_{d12} = B_3$ ， $B_{d13} = B_5$ 。

2.2 建议性脆性指数适用性验证

图 5 为脆性指数均值与围压的关系图，可知：

1) 脆性指标均随围压的增加而减小，脆性逐渐减弱，减弱的速率逐渐降低，即低围压下脆性指标对围压比较敏感，高围压下不灵敏。

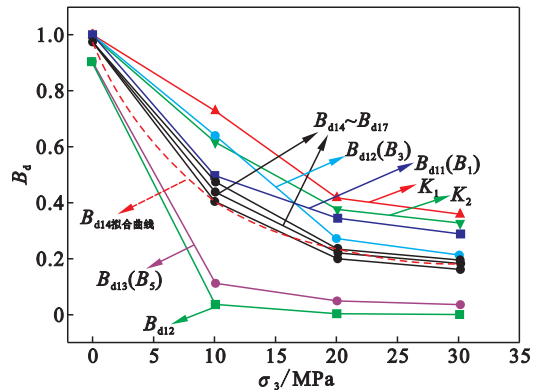


图 5 脆性指数均值与围压的关系

Fig. 5 Relationship between average brittleness index and confining pressure

2) 脆性指标 B_{d1} ($B_{d14} \sim B_{d17}$) 能较好地反应脆性，和围压具有较好的指数函数拟合关系：

$B_{dl4}=0.82\exp(-x/8.84)+0.145,$
 $R^2=0.998;$
 $B_{dl5}=0.86\exp(-x/10.71)+0.123,$
 $R^2=0.993;$
 $B_{dl6}=0.86\exp(-x/10.04)+0.111,$
 $R^2=0.998;$
 $B_{dl7}=0.83\exp(-x/8.86)+0.113,$
 $R^2=0.998.$
 B_{dl} 可以综合反映页岩的脆性情况,可以根据

不同的目的选取不同参数,它随围压的变化范围大,对围压比较敏感,综合性强,可以减小实验误差、读数误差,具有较好的实用性,可以在高围压下使用.脆性指数 B_{l1} 、 B_{l3} 、 B_{l5} 是 B_{dl} 的一种特例,均可以单独反映页岩的脆性情况,但表现形式单一,容易造成较大误差.

3) 综合脆性指标 B_{d2} 所求脆性指标相对偏低,且在中高围压下变化不敏感,使用起来有一定难度,建议在低围压下使用该公式.

表 1 不同围压下页岩综合脆性指数

Table 1 Comprehensive evaluation indexes of brittleness shale under different confining pressures

围压 - 编号	B_{dl1} (1 0 0 0)	B_{dl2} (0 1 0)	B_{dl3} (0 0 1)	B_{dl4} (1/3 1/3 1/3)	B_{dl5} (1/4 1/2 1/4)	B_{dl6} (1/6 1/2 1/3)	B_{dl7} (1/4 3/8 3/8)	B_{d2}
0-1	1.000 00	1.000 00	0.971 91	0.990 64	0.992 98	0.990 64	0.989 47	0.971 91
0-2	1.000 00	1.000 00	0.835 01	0.945 00	0.958 75	0.945 00	0.938 13	0.835 01
10-1	0.507 29	0.726 08	0.131 56	0.454 98	0.522 75	0.491 44	0.448 44	0.048 46
10-2	0.488 84	0.549 05	0.090 80	0.376 23	0.419 43	0.386 26	0.362 15	0.024 37
20-1	0.351 74	0.298 16	0.054 99	0.234 96	0.250 76	0.226 03	0.220 37	0.005 77
20-2	0.333 17	0.235 51	0.045 28	0.204 65	0.212 37	0.188 38	0.188 59	0.003 55
30-1	0.319 66	0.198 99	0.034 52	0.184 39	0.188 04	0.164 28	0.167 48	0.002 20
30-2	0.257 33	0.227 75	0.036 66	0.173 91	0.187 37	0.168 98	0.163 48	0.002 15

4) 应力降水平 K_1 和破裂能系数 K_2 在一定程度上也可以代表脆性,但是单独使用时所求脆性指标相对偏高,误差较大.

5) 对应页岩的宏观破坏形态,如图 6 所示.在低围压下页岩破碎较为充分,破碎块体较多,脆性较强;高围压下,破碎不完全,形成的裂缝比较单一,脆性较弱,这与 B_{dl} 和 B_{d2} 脆性指标均有较好的对应关系,证明了该指标的可靠性.

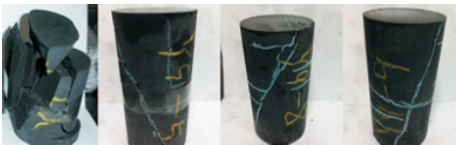


图 6 不同围压下页岩宏观破裂模式(从左向右围压依次为 0、10、20、30 MPa)

Fig. 6 Macroscopic failure patterns of shale specimens under different confining pressures

3 结 论

1) 岩石的物理力学参数在岩石达到扩容拐点均表现为明显的突变性,岩石各部分个性退居次要地位,共性变得突出,采用扩容指数表示岩石的脆性具有积极意义,岩石的脆性和峰后残余强度及应力降情况有很大关系,为此采用应力降水平和软化模量来表达脆性,以上两个均为状态量,而脆性和破坏全过程有密切联系,为此基于峰前

积累能量、峰后消耗能量并引入破裂能系数来表达脆性.

2) 脆性指标 B_{dl} 和 B_{d2} 可较好地反应页岩的脆性. B_{dl} 可根据不同的目的需求选择不同的参数,对脆性评价具有侧重性,且 B_{dl} 与围压有较好的拟合关系,拟合曲线为指数函数关系. B_{d2} 综合性强,可作为脆性的综合评价指标,但围压较高时对围压不够敏感,90°取芯角度下,随着围压的增加,脆性指数均降低,脆性减弱;低围压下脆性指数对围压比较敏感,降低较快,高围压降低较慢.

参考文献:

[1] 肖钢,唐颖.页岩气及其勘探开发.[M]北京:高等教育出版社,2012:217-218.
(Xiao Gang ,Tang Ying. Shale gas and its exploration and development[M]. Beijing :Higher Education Press ,2012 : 217-218.)

[2] 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):1680-1686.
(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): 1680-1686.)

[3] 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):3449-3454.
(Liu En-long ,Shen Zhu-jiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24(19):3449-3454.)