

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0704

基于内摩擦角的砂岩脆性评价指标分析

陈俊龙, 余乔娟, 吕原君*

(宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 脆性是岩石力学的一个重要指标, 对地下工程与边坡稳定性分析有重要作用. 当前岩石脆性的评估方法虽然很多, 但业内尚未形成统一的认识. 为了探究以内摩擦角作为岩石脆性评估方法的可行性, 以青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩为研究对象, 通过常规三轴压缩试验, 获取围压为 0、15、30、45 MPa 时 3 种不同类型砂岩的基本力学参数, 用内摩擦角表征砂岩脆性特征, 并将基于内摩擦角的砂岩脆性评价方法与其他方法进行对比. 结果表明: (1)随着围压的增大, 砂岩的峰值强度表现出显著的线性增长, 但是不同类型砂岩的抗压强度差异较大; (2)砂岩内摩擦角越大, 峰值强度越大, 两者呈现正比关系; (3)青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的脆性程度表现为依次减小, 破坏时的峰值应变则为依次增大, 出现应变越低脆性程度越大的现象; (4)评估结果与目前常用的以脆性破坏时的破裂角度作为评估脆性指标的结果相一致.

关键词: 砂岩; 内摩擦角; 三轴压缩试验; 脆性评价指标

中图分类号: TU458+.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 01-0019-08

脆性作为岩石力学的重要指标, 在岩体工程稳定性评价、储层油气开采等领域具有重要作用, 如在硬脆性围岩的地下洞室或隧道中, 岩石的脆性破坏是岩爆发生必不可少的先决条件之一^[1]. 脆性程度与岩石可钻性密切相关, 主要涉及旋转钻机的取芯和隧道掘进机的穿透速率^[2-3]. 但是岩石脆性受到某些边界条件的影响, 如围压^[4-5]、孔隙压力^[6-10]、渗透率^[11-12]等. 为了更好地掌握岩石的脆性破坏特征, 研究岩石脆性程度的评估方法具有重要意义.

大多数学者根据物理力学性质来定义和表述岩石脆性^[13-15]. 常见的定义为在低应力下没有明显变形的断裂趋势. Hucka 等^[16]在早期总结了岩石脆性的评估指标. 之后, 随着岩石力学和科学技术的不断发展, 一些学者提出了不同的岩石脆性指标的评估方法, 并开展了相关的试验分析, 如 Altindag^[17-18]和 Kahraman 等^[19]将岩石抗压强度与

劈裂抗拉强度积的一半定义为脆性系数, 并研究其与岩石的可钻性指数、断裂韧性和比能的关系, 但这一指标反映的是岩石的强度特征, 而不完全是岩石的脆性. Hajiabdolmajid 等^[20]根据岩石脆性破坏机制, 提出了一种考虑黏聚力弱化摩擦强化, 且基于塑性应变的脆性指标, 由于整个工程区域内围岩的脆性程度随深度不同其应力状态不同, 仅用该指标不能完全反映岩石的脆性程度. Gunes 等^[21]以 3 种不同粒度分布的花岗岩为研究对象, 通过点载荷试验研究其相对脆性指数, 发现粒度较大的花岗岩裂纹扩展所需的能量较少, 并显示脆性程度更高. Khadivi 等^[22]通过点载荷试验发现, 在不同载荷条件下的破坏行为, 煤损失的程度明显大于其他岩石, 但是点载荷试验的数值较为分散, 影响了测试结果的准确性和可靠性. Yagiz^[23]提出了以贯入试验为依据评估岩石脆性的方法, 并通过岩石的单轴抗压强度、巴西抗拉强度和密度验

收稿日期: 2024-07-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42277147); 宁波市自然科学基金(2023J085).

第一作者: 陈俊龙, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩石力学. E-mail: 1365568853@qq.com

*通信作者: 吕原君, 博士/副研究员, 主要研究方向: 岩石力学与试验装备. E-mail: lvyuanjun222@163.com

证其可行性,结果表明贯入试验方法可行,但是贯入试验操作较为复杂,需要考虑水平摆动、连续钻进等因素的影响.周辉等^[24]以岩石的应力—应变曲线为基础,建立了考虑岩石塑性屈服特性和应力状态影响的脆性指标.Meng等^[25]基于应力—应变曲线,考虑峰后应力降和应力降速度,提出了脆性度和脆性破坏程度2种新的脆性指标,用以反映围压对岩石脆性的影响.Tarasov等^[26]通过一系列试验发现:岩石的脆性程度与其破坏时的破裂角密切相关.纵观上述评估方法存在使用繁琐,且需要其他试验辅助等不足,而早期Hucka等^[16]提出过利用莫尔包络线获得的内摩擦角评估岩石的脆性,该方法简单且易操作,但缺乏充分的理论基础和实验数据支撑.

本文为探究内摩擦角与岩石脆性之间的关系,选取了3种不同类型砂岩作为研究对象,通过室内常规三轴压缩试验,获取3种不同类型砂岩的基本力学参数.结合现有文献中砂岩的测试数据,提出基于内摩擦角的砂岩脆性评价方法,并分析了该评估方法的可行性.

1 试样的常规三轴试验

1.1 试样的制备

试验所用试样为青砂岩、米白砂岩和灰黑砂岩.为保证岩石的完整性和一致性,所有试样均取自四川省自贡市同一座矿山.严格按照文献^[27]的要求,将岩样加工成高径比(高度与直径之比)为2的试件,即高为100 mm,直径为50 mm的圆柱形试件,加工完成的砂岩试样如图1所示.

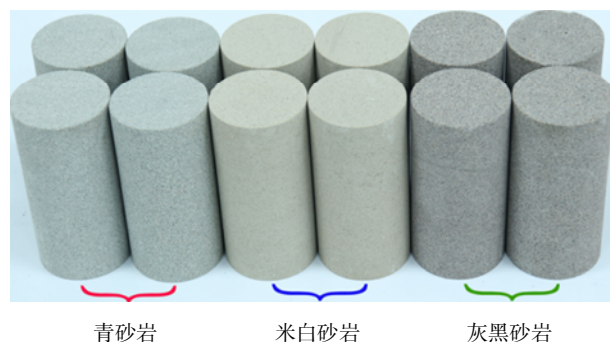


图1 砂岩试样

采用游标卡尺测量砂岩试样的直径和高度,结果见表1.

表1 砂岩试样的尺寸

mm

编号	直径	高度
MB-0	50.00	100.00
MB-15	50.08	100.00
MB-30	50.00	100.02
MB-45	50.00	100.00
Q-0	50.00	100.10
Q-15	50.00	100.07
Q-30	49.91	100.03
Q-45	49.97	100.00
HH-0	49.80	100.09
HH-15	50.00	99.90
HH-30	50.02	99.92
HH-45	50.02	99.98

注: MB表示米白砂岩; Q表示青砂岩; HH表示灰黑砂岩.

1.2 试验加载装置与方案

室内试验设备采用TAW-2000微机控制岩石三轴试验系统(图2(a)),由PC机工作站、围压系统、液压系统、门式加载框架和渗流系统等组成.岩石三轴试验机能够测量单轴、三轴条件下地层岩石的弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度和断裂韧性等参数.围压加载方式采用液压油泵加载,加载过程中由计算机控制系统控制加载并采集数据.测试前试样及检测仪器的安装如图2(b)所示.将试件放到上下压垫中间,取两节热缩管套在试样与压垫结合处,并用热风枪加热(起固定作用),然后安装轴向引伸计和径向引伸计.

在实际岩体工程中,岩石通常处于复杂的应力环境.选取埋深120~150 m的3种不同类型砂岩,考虑到周围岩体对其施加的压力较大以及工程应用的实际要求,分别对其施加0、15、30、45 MPa围压.试验步骤为:

(1)装样完成后密封压力室,用低压泵向压力室内充油,完成后关闭输油通道.

(2)用围压泵将围压加至试验设定目标值,并维持恒定,围压加载速率为 $0.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$,待围压稳定且压力室温度降至约 25°C 时,以轴向应变控制方式进行偏压加载,直至试样发生破坏,位移变形控制速率为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试验数据的存储时间间隔设定为1 s.

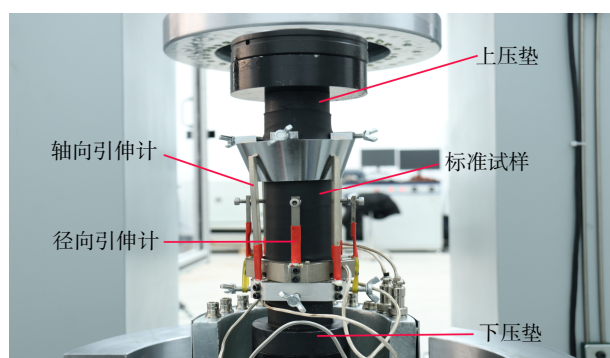
(3)试样破坏后立刻停止轴压泵,先进行偏压

卸载, 再进行围压卸载, 在排油及升压头操作后, 将试样从仪器内取出, 拍照并保存。

(4) 获取 3 种不同类型砂岩的偏应力—应变曲线。



(a) TAW-2000 微机控制岩石三轴试验系统



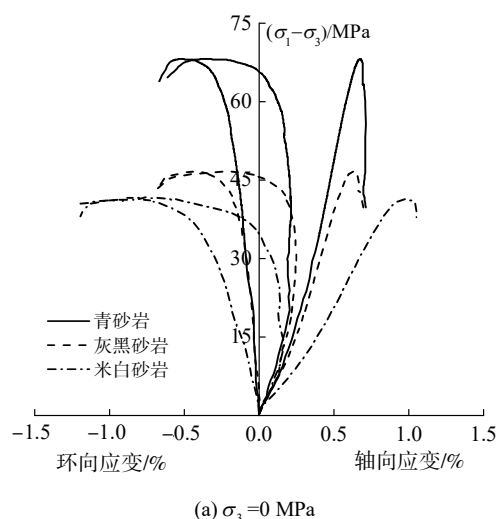
(b) 试件组装

图 2 三轴试验加载装置

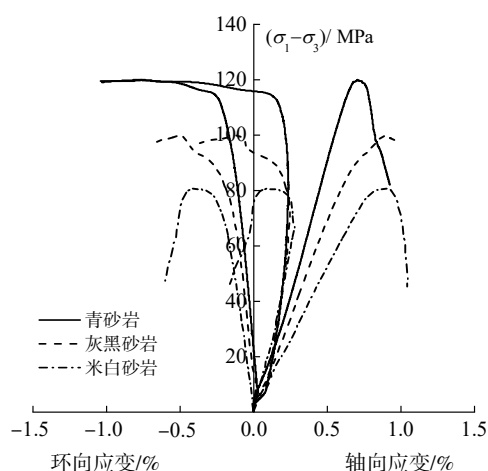
2 试验结果及分析

2.1 应力—应变曲线分析

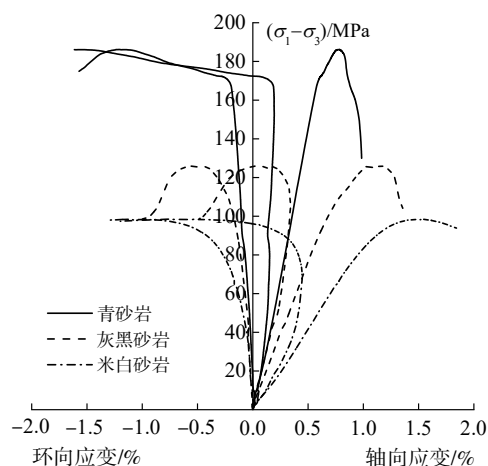
根据常规三轴压缩试验获得在相同围压作用下 3 种不同类型砂岩的应力—应变曲线(图 3)。



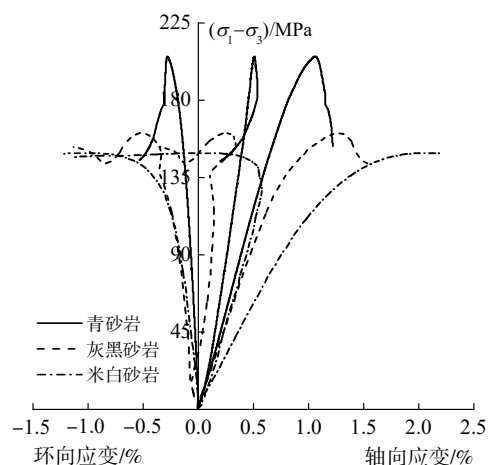
(a) $\sigma_3 = 0$ MPa



(b) $\sigma_3 = 15$ MPa



(c) $\sigma_3 = 30$ MPa



(d) $\sigma_3 = 45$ MPa

图 3 不同类型砂岩应力—应变曲线

从图 3 可知, 在围压一定的情况下, 砂岩的常规三轴压缩应力—应变曲线变化规律大致可分为压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。由轴向应变与

轴向应力的关系曲线可知,随着轴向应力的增加,轴向应变在初始阶段呈现上凹的特点,随后变为线性增长,轴向应力在达到峰值后下降较快.由环向应变与环向应力的关系曲线可知,环向应力在达到峰值前会急剧上升,在峰值后呈现缓慢的下降趋势,这时试样发生了宏观破坏.体积应变的变化趋势类似,即先急剧上升达到峰值,随后为缓慢下降过程.不同类型的砂岩峰值强度存在一定的差异,青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的峰值强度依次降低.

2.2 砂岩的破坏特征

图4为不同砂岩试样的破坏形态.理论上试样在压缩过程中内部的裂隙会沿着最大剪应力方向发展,最终裂纹连接贯通形成剪切带,即试样的破坏形式应为剪切破坏.

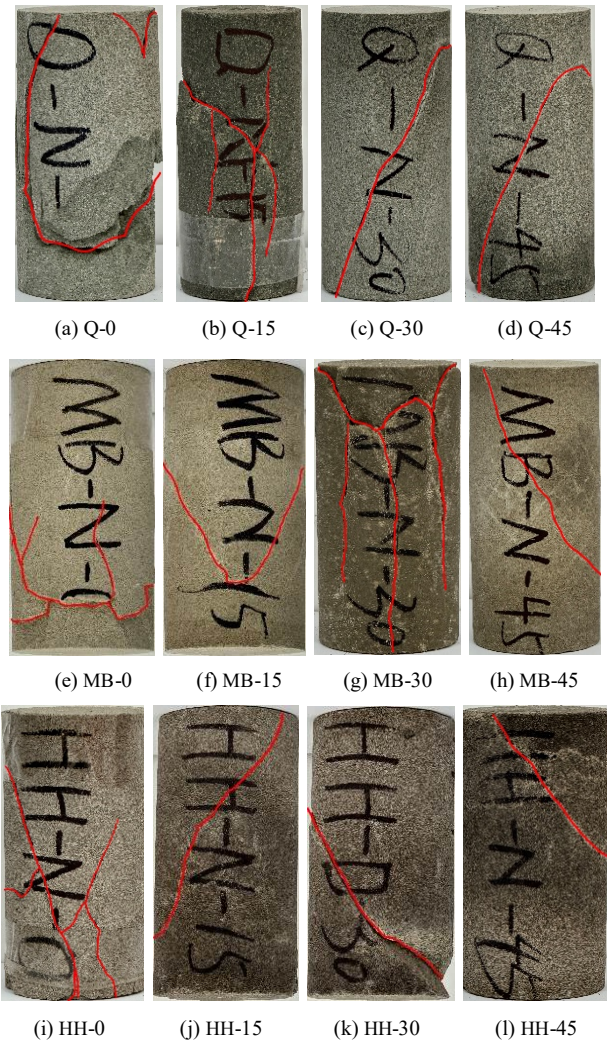


图4 砂岩试样的破坏形式

然而从图4可知,在低围压条件下试样破坏形式多为劈裂破坏,随着围压的增大,破坏形式逐渐以剪切破坏为主.

2.3 不同砂岩的常规三轴试验结果对比

从应力—应变曲线中提取砂岩基本力学参数,并对其进行计算整理,结果见表2.表2中 σ_3 为试验围压; σ_c 为试验峰值偏压; ε_f 为试样峰值偏压对应轴向应变,简称峰值应变; E 为试样的弹性模量; ν 为试样的泊松比.

表2 砂岩基本物理力学参数

编号	σ_3/MPa	σ_c/MPa	$\varepsilon_f/\%$	E/GPa	ν
Q-0	0	68.16	0.68	11.80	0.233
Q-15	15	119.80	0.71	22.85	0.211
Q-30	30	186.18	0.78	20.56	0.131
Q-45	45	205.47	1.06	23.08	0.133
MB-0	0	41.60	0.98	6.80	0.377
MB-15	15	80.47	0.89	11.10	0.290
MB-30	30	98.47	1.54	10.10	0.142
MB-45	45	149.34	2.09	11.05	0.265
HH-0	0	46.55	0.63	12.00	0.186
HH-15	15	99.66	0.85	11.23	0.192
HH-30	30	125.89	1.17	18.73	0.195
HH-45	45	160.87	1.30	21.17	0.177

作为常用的试验对象,砂岩的种类众多,不同类型砂岩的力学特征存在差异.总结前人开展的砂岩常规三轴试验结果^[28-31],统计了不同类型砂岩的峰值应力和峰值应变,结果见表3.从表3可知,不同类型砂岩的抗压强度差异较大.在相同围压下(除围压5 MPa外),浅灰砂岩抗压强度最大.

表3 不同砂岩基本物理力学参数汇总

来源	砂岩类型	σ_3/MPa	$\varepsilon_f/\%$	σ_c/MPa
文献[28]	粉砂岩	0	0.72	75.96
文献[28]	粉砂岩	2	0.76	86.94
文献[28]	粉砂岩	5	0.94	104.14
文献[28]	粉砂岩	10	1.10	128.03
文献[28]	粉砂岩	20	1.33	169.59
文献[28]	粉砂岩	40	1.86	224.52
文献[28]	粉砂岩	60	2.16	257.48
文献[29]	灰白砂岩	10	1.84	116.07

续表

来源	砂岩类型	σ_3/MPa	$\varepsilon_f/\%$	σ_c/MPa
文献[29]	灰白砂岩	15	1.94	146.94
文献[29]	灰白砂岩	20	1.97	163.46
文献[29]	灰白砂岩	25	2.17	181.80
文献[29]	灰白砂岩	30	2.44	204.09
文献[30]	红砂岩	0	0.60	68.00
文献[30]	红砂岩	2.5	0.74	83.10
文献[30]	红砂岩	5	0.89	100.90
文献[30]	红砂岩	10	0.92	130.30
文献[30]	红砂岩	15	1.02	153.40
文献[30]	红砂岩	20	1.17	172.30
文献[30]	红砂岩	25	1.34	200.30
文献[30]	红砂岩	30	1.42	212.10
文献[30]	红砂岩	35	1.52	238.30
文献[30]	红砂岩	45	1.54	263.70
文献[31]	浅灰砂岩	5	1.01	100.25
文献[31]	浅灰砂岩	10	1.06	139.59
文献[31]	浅灰砂岩	15	1.12	171.32
文献[31]	浅灰砂岩	20	1.21	191.62
文献[31]	浅灰砂岩	25	1.14	214.47

2.4 基于内摩擦角方法评估砂岩的脆性特征

为获取内摩擦角, 以围压为横坐标, 峰值应力为纵坐标, 绘制散点图并拟合; 基于 Coulomb-Navle 准则, 利用 Hucka 等^[16]提出的基于岩石内摩擦角脆性指数, 计算不同类型砂岩各自的内摩擦角和脆性程度, 计算公式为:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{m-1}{m+1}, \quad (1)$$

$$B_1 = \sin \varphi, \quad (2)$$

$$B_2 = 45^\circ + (\varphi / 2), \quad (3)$$

式中: φ 为内摩擦角; m 为拟合曲线的斜率; B_i 为脆性指数。

根据本文测试结果以及已有的试验数据^[28-31], 对不同砂岩峰值应力进行拟合, 结果如图 5 所示。获得的内摩擦角和脆性指数见表 4。在不同围压下 3 种不同类型砂岩的峰值应变如图 6 所示。

从图 5 可知, 砂岩峰值强度与围压呈现出显著的线性关系, 在相同围压作用下, 选取的青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的抗压强度依次减小。在低围压条件下, 砂岩的峰值应力类似, 在高围压时则

出现较大变化。原因是: 当无围压时, 砂岩处于单轴压缩状态, 岩石内部的裂纹和孔隙不受环向应力的影响, 裂纹扩展和孔隙闭合只跟轴向应力有关, 不同类型砂岩的峰值应力差别较小; 当处于高围压时, 不同类型砂岩的微观结构(如颗粒大小、裂纹分布、矿物组成等)受到轴向和环向应力共同作用时的峰值应力呈现出较为显著的差异。

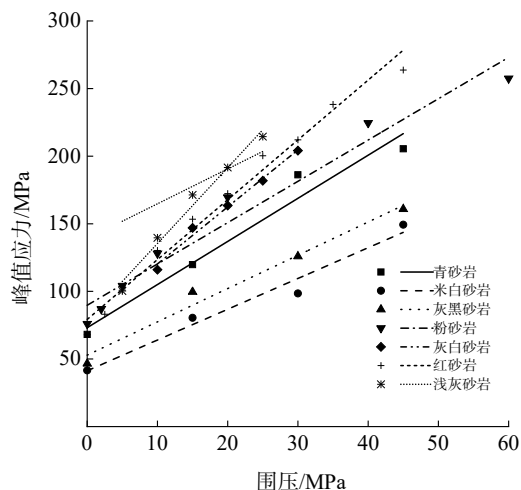


图5 峰值强度与围压的关系

表4 砂岩的内摩擦角和脆性指标

砂岩类型	$\varphi / (^\circ)$	B_1	$B_2 / (^\circ)$
浅灰砂岩	44.22	0.70	67.11
红砂岩	39.17	0.63	64.59
灰白砂岩	38.09	0.62	64.05
青砂岩	31.51	0.52	60.76
粉砂岩	30.49	0.51	60.25
灰黑砂岩	24.86	0.42	57.43
米白砂岩	22.90	0.40	56.45

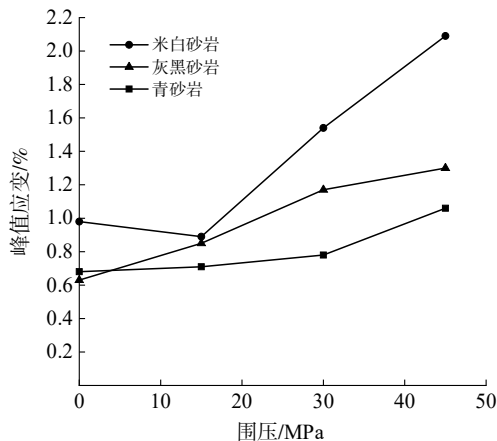


图6 不同围压下的峰值应变

从表 4 可知,不同砂岩的脆性程度差异较大,其中浅灰砂岩的脆性指数最大,米白砂岩的脆性指数最小.本文选取的青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的脆性程度依次减小.内摩擦角与岩石的抗压强度呈正比,即内摩擦角越大,岩石的抗压强度越大.

从图 6 可知,3 种不同类型砂岩破坏时对应的峰值应变表现为青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩依次增大,呈应变越低脆性程度越大的特征,与 Hucka 等^[16]提出的“脆性与应变成反比”结论一致.

2.5 基于内摩擦角脆性评估方法的验证

由于目前缺乏标准的方法来评估岩石的脆性程度,因此选用基于岩石脆性破坏时的破裂角度评估脆性指标^[26](业界常用的一种脆性评估方法),以此验证基于内摩擦角评估岩石脆性指标的可行性.基于岩石脆性破坏时的破裂角度评估砂岩的脆性程度方法是直接通过观察岩石的破裂角度进行评估,该方法对岩石的微观结构及破坏模式敏感,分析结果直观易懂,能够明显区分不同类型岩石的脆性行为,在工程地质和岩石力学研究中应用广泛,计算公式为:

$$B_3 = \sin \beta, \quad (4)$$

式中: β 为岩体脆性破坏的破裂角.

砂岩脆性破坏的破裂角和脆性程度大小见表 5,不同围压下不同类型砂岩的破裂角如图 7 所示.

表 5 砂岩的破裂角和脆性指数

编号	σ_3/MPa	$\beta/(\circ)$	B_3
Q-0	0	61.1	0.88
Q-15	15	51.5	0.78
Q-30	30	61.7	0.88
Q-45	45	59.7	0.86
MB-0	0	51.2	0.78
MB-15	15	30.0	0.50
MB-30	30	58.7	0.85
MB-45	45	57.5	0.84
HH-0	0	55.3	0.82
HH-15	15	47.3	0.73
HH-30	30	59.3	0.86
HH-45	45	53.4	0.80

从表 5 可知,青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的脆性程度依次减小.针对同一组岩石试样,基于内

摩擦角与破裂角得到的脆性程度一致.需要注意的是,青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩平均破裂角分别为 58.5° 、 53.8° 和 49.4° , 小于 Coulomb-Navle 准则预测理论破裂角 $(45^\circ + \varphi/2)$. 原因可能是试样端部在加载时受到上压垫和下压垫的摩擦影响,即垫块刚度远大于试样刚度,在试样压缩过程中制约其侧向膨胀,并产生摩擦,影响了试样端部裂纹扩展,使得实际的破裂角变小.

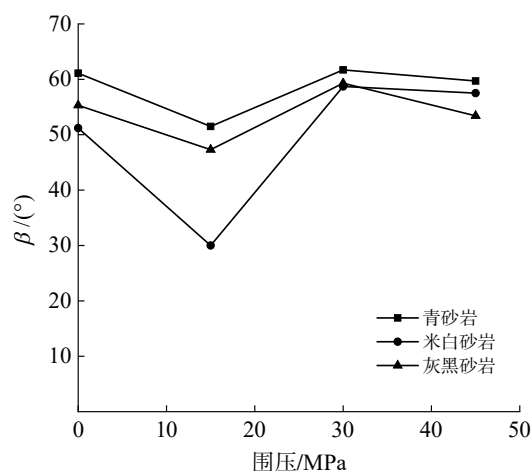


图 7 不同围压下的破裂角

从图 7 可知,围压在 15 MPa 时的破裂角最小,在 30 MPa 时的破裂角最大.围压对试样破裂角有影响,但是破裂角的变化可能受到岩石本身结构的影响,表明试验结果存在一定的偶然性和局部性.而内摩擦角数值较为稳定,不易受到试验环境和外部条件变化的影响.因此,基于内摩擦角评估岩石脆性指标更为全面、可靠.

3 结论

为了探究用内摩擦角参数获取岩石脆性指标的适用性,以不同类型的砂岩作为研究对象,通过常规三轴压缩试验,得到内摩擦角值,并以此评估岩石的脆性程度.通过与目前常用的基于岩石脆性破坏时的破裂角评估砂岩脆性程度方法的对比表明其可行性.得到的主要结论如下:

(1)随着围压的增大,砂岩峰值强度表现出显著的线性增长.但是不同类型砂岩的抗压强度差异较大.在围压为 0 时,砂岩的单轴压缩峰值应力较为接近;在围压较高时,不同类型砂岩受微观结构差异性影响,峰值应力差别较大.

(2)砂岩的内摩擦角与其强度呈正比, 内摩擦角越大, 砂岩的抗压强度越大. 本文选取的青砂岩、灰黑砂岩和米白砂岩的脆性程度表现为依次减小, 破坏时的峰值应变表现为依次增大, 呈现应变越低脆性程度越高的特点.

(3)以砂岩脆性破坏时的破裂角为依据获取 3 种不同类型砂岩的脆性程度, 与基于内摩擦角评估砂岩的脆性程度相比较, 结果一致.

参考文献:

- [1] 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):2034-2042.
- [2] GONG Q M, ZHAO J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(3):317-324.
- [3] YARALI O, KAHRAMAN S. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(2):406-414.
- [4] WU Z J, ZHANG P L, FAN L F, et al. Numerical study of the effect of confining pressure on the rock breakage efficiency and fragment size distribution of a TBM cutter using a coupled FEM-DEM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88:260-275.
- [5] XUE Y, LIU J, RANJITH P G, et al. Changes in microstructure and mechanical properties of low-permeability coal induced by pulsating nitrogen fatigue fracturing tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(12):7469-7488.
- [6] XUE Y, RANJITH P G, CHEN Y, et al. Nonlinear mechanical characteristics and damage constitutive model of coal under CO₂ adsorption during geological sequestration[J]. Fuel, 2023, 331:125690.
- [7] ZHANG Z T, ZHANG R, CAO Z G, et al. Mechanical behavior and permeability evolution of coal under different mining-induced stress conditions and gas pressures[J]. Energies, 2020, 13(11):2677.
- [8] LI X S, LI Q H, HU Y J, et al. Evolution characteristics of mining fissures in overlying strata of stope after converting from open-pit to underground[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(24):2795.
- [9] BAI X, ZHANG D M, ZENG S, et al. An enhanced coalbed methane recovery technique based on CO₂ phase transition jet coal-breaking behavior[J]. Fuel, 2020, 265: 116912.
- [10] DUAN M K, JIANG C B, YIN W M, et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under true triaxial cyclic disturbance[J]. Engineering Geology, 2021, 295:106445.
- [11] LIU H, YU B, LIU J R, et al. Investigation of impact rock burst induced by energy released from hard rock fractures[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(12):381.
- [12] XU D, LIU J F, WU Z D, et al. Experimental investigation on permeability evolution of dolomite caprock under triaxial compression[J]. Energies, 2020, 13(24):6535.
- [13] KAHRAMAN S. Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness[J]. Engineering Geology, 2002, 65(4):269-283.
- [14] AFTE S. Guidelines for characterization of rock masses useful for the design and the construction of underground structures[J]. Tunnels et Ouvrages Souterrains, 2003, 177: 49.
- [15] WALKER P M B. Chambers dictionary of science and technology[M]. Edinburgh: Chambers, 1999.
- [16] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11(10):389-392.
- [17] ALTINDAG R. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 102(1):61-66.
- [18] ALTINDAG R. Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103:163-171.
- [19] KAHRAMAN S, ALTINDAG R. A brittleness index to estimate fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2):343-348.
- [20] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1):35-48.
- [21] GUNES Y N, KARACA Z, GOKTAN R M, et al. Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: influence of mineral grain size[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1):370-375.
- [22] KHADIVI B, MASOUMI H, HEIDARPOUR A, et al. Assessing the fracturing process of rocks based on

- burst-brittleness ratio (BBR) governed by point load testing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(11):8167-8189.
- [23] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1):66-74.
- [24] 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.
- [25] MENG F Z, ZHOU H, ZHANG C Q, et al. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5):1787-1805.
- [26] 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.
- [27] GB/T 23561—2009. 煤与岩石物理力学性质测定方法[S].
- [28] 朱其志, 闵中泽, 王岩岩, 等. 粉砂岩三轴压缩试验中的试样尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊 2):3296-3303.
- [29] WANG J, DU J H, LI W P, et al. Brittleness index evaluation of gas-bearing sandstone under triaxial compression conditions[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1):160.
- [30] 苏承东, 付义胜. 红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊 1):3164-3169.
- [31] 苏承东, 韦四江, 杨玉顺, 等. 高温后粗砂岩常规三轴压缩变形与强度特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊 1):2792-2800.

Analysis of sandstone brittleness evaluation index based on internal friction angle

CHEN Junlong, YU Qiaojuan, LÜ Yuanjun

(Rock Mechanics Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Rock brittleness is a crucial indicator in rock mechanics, playing a significant role in the stability analysis of underground engineering and slopes. Currently, research on rock brittleness is still incomplete, and there is no unified method for its evaluation. To explore the feasibility of using the internal friction angle as an assessment method for obtaining rock brittleness indices, this study takes green sandstone, gray-black sandstone, and beige sandstone as research objects. Through conventional triaxial compression tests, the basic physical and mechanical parameters were obtained at confining pressures of 0, 15, 30, and 45 MPa. The internal friction angle was used as an evaluation method to derive the brittleness characteristics of sandstone, and the results were compared with those from the other methods. The experimental results indicate that: (1) As the confining pressure increases, the peak strength of sandstone exhibits a significant linear growth relationship, but the compressive strength varies greatly among different types of sandstone; (2) The greater the internal friction angle of the sandstone, the higher the peak strength, showing a positive proportional relationship; (3) The brittleness degree of green sandstone, gray-black sandstone, and beige sandstone decreases sequentially, while their peak strain at failure increases sequentially, indicating that lower strain corresponds to higher brittleness; (4) The evaluation results are consistent with those when the commonly used brittle fracture angle is used as an indicator for assessing brittleness.

Key words: sandstone; internal friction angle; triaxial compression test; brittleness evaluation index

(责任编辑 史小丽)