

三轴压缩时岩石破裂面方位角理论值与实验值研究

康亚明¹, 贾 延², 罗玉财¹, 陈静波³

(1. 北方民族大学 化学与化学工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北方民族大学 数学与信息科学学院, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏旭日众粒环保科技有限公司, 宁夏 银川 750200)

摘要: 考虑边界条件对试样破裂路径的影响, 分析了粗砂岩理论破裂面与实际破裂面不一致的机理, 并在莫尔-库仑准则下对比了不同破裂面上强度差异的机制, 结果表明: 莫尔-库仑准则下粗砂岩的破裂面方位角理论值在 67.45° 附近, 但实际破裂面被边界约束限制在了对角线所在的 63° 附近, 而不同剪切破裂面上对应着不同的强度, 破裂面理论值与真实值的不一致最终影响了强度, 导致实验值比理论值偏大, 且这种偏离随围压的增大而增大. 消除这种差异可以通过增大试件高径比来实现, 而国内普遍采用国标(GB/T 50266-2013)推荐值的下限, 也即二倍高径比的圆柱试件, 建议国内岩石强度试验采用国标推荐值的上限(2.5 : 1), 既可以消除端部约束对真实强度的影响, 也与国际岩石力学学会推荐值更加接近.

关键词: 岩石力学; 三轴压缩; 莫尔-库仑准则; 破裂形态; 边界条件; 应力集中; 剪切带

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0665-07

Research on the theoretical and experimental value of azimuth angle of the fracture surface for the rock subjected to triaxial compression

KANG Yaming¹, JIA Yan², LUO Yucan¹, CHEN JINGbo³

(1. School of Chemistry and Chemical Eng., North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
2. School of Mathematics and Information Science, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
3. Ningxia XU RI ZHONG LI environmental protection technology co., LTD, Yinchuan 750200, China)

Abstract: With the influence of boundary condition on the rupture path of the drill core considered the mechanism of inconformity of the theoretical and experimental fracture surface was analyzed, The mechanism of the strength difference of different fracture surfaces was compared under the Mohr-Coulomb criterion. The results showed that the theoretical value of the fracture surface azimuth of the coarse sandstone under the Mohr-Coulomb criterion is near 67.45° , but the actual fracture surface was restricted by the boundary constraint at the 63° (namely near the diagonal). However, the different shear fracture surfaces corresponded to the different strength, so the inconsistency between the theoretical and experimental fracture surface will affect the strength ultimately. This inconformity made the experimental value larger than the theoretical value, and this deviation tendency enlarged with the increase of confining pressure. The elimination of this difference can be realized by increasing the ratio of height to diameter, but the lower limit of the recommended value of the national standard (GB/T 50266-2013) is widely used in China at present, with the cylinder specimen's height-to-width ratio being 2 : 1. It is suggested that the rock strength test is based on the upper limit (2.5 : 1) of the national standard of China. It can eliminate the influence of end constraints on real strength, and also it is closer to the recommended values of the International Institute of Rock Mechanics.

Key words: rock mechanics; triaxial compression; Mohr-Coulomb criterion; fracture morphology; boundary condition ; stress concentration; shear zone

目前岩石力学强度测试中, 常用高径比为 2 的圆柱体试件, 室内试验是一个典型的模型试验, 边界条件、尺寸效应、形状效应等因素对测试结果都可能产生影响, 模型试验结果与真实值之间

的关系值得商榷. 学术界与工程界对这一问题的研究一直没有停止过, 多集中在数值模拟与室内试验, 或在此基础上结合理论分析进行修正. 如文献[1]基于 PFC 软件, 对不同高径比试件进行了不同

围压下的三轴试验, 基于能量法指标, 给出岩石试样最优高径比为3; 文献[2]从强度准则角度研究了岩石强度的尺寸效应; 文献[3]结合损伤理论与分形几何研究了岩石强度的尺寸效应; 文献[4]研究了岩体力学参数的尺寸效应; 文献[5]从统计角度研究了强度的几何效应; 文献[6]在前人基础上, 通过理论分析与试验研究后认为: 高径比对峰值强度有明显影响, 但高径比对峰值前的变形特性无明显影响, 而峰后段高径比越大脆性特征越明显. 抗压强度随高径比变化的现状效应, 认为是由端部摩阻力所致, 而非岩石的非均质性, 强度的形状效应文献[7-12]也有类似结论. 综合以上文献, 对于强度形状效应来源的认识基本一致, 也即是由端部摩阻力这种边界条件诱发的, 但是端部摩阻力是如何影响强度和变形, 这一过程和细节没有阐述清楚, 结论多基于圣维南原理, 或者是基于大量不同高径比的强度试验得出的定性结论, 欠缺从岩石材料强度参数本身出发, 从理论上分析能消除端部约束的临界值. 针对这一问题, 以400℃后粗砂岩的三轴压缩试验为例, 考虑端部摩阻力对真实强度的影响, 并给出了改进办法.

1 莫尔-库仑准则的单位化与图解法

1.1 三轴应力状态下的莫尔-库仑准则

如图1所示, 根据一点的应力状态, $m-m$ 截面上法向正应力 σ_n 和切向剪应力 τ_n 可表示为

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_3 \sin^2 \beta \quad (1)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (2)$$

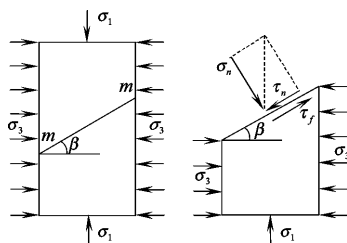


图1 空间应力状态下的剪切破坏模型

Fig. 1 Shear failure model of spatial stress state

与单轴应力状态相比, 空间应力状态下围压对 β 斜截面上抗剪强度的贡献分为两部分: 首先增大了斜截面内法线方向的正应力, 从而增大了滑动时的摩擦阻力; 其次, σ_3 沿斜截面切线方向的分力与轴向力 σ_1 沿斜截面切线方向的分力相反, 抵消了 σ_1 引起的一部分剪力, 最终使得斜截面上

的抗剪强度有所提高.

根据莫尔-库仑准则, 任一斜截面上的抗剪强度可表示为

$$\tau_f = c + \mu \sigma_n \quad (3)$$

式中: c 为粘聚力, MPa; σ_n 为该斜截面上内法线方向上的压应力, 由式(1)确定, MPa; μ 为内摩擦系数, $\mu = \tan \varphi$, φ 为内摩擦角, 单位为 $^\circ$, 是材料强度参数, 由试验测定.

当轴向压力达到一定值后, 斜截面上的剪力和抗剪强度将经历稳定、平衡到失稳的转换, 此时剪应力 τ_n 与抗剪强度 τ_f 之间应当满足一下条件:

$$\tau_n \geq \tau_f \quad (4)$$

将式(1)、(2)代入式(3)中, 得:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \geq \mu \sigma_1 \cos^2 \beta + \mu \sigma_3 \sin^2 \beta + c \quad (5)$$

1.2 莫尔-库仑准则的单位化

对(5)进行变换, 变换后如下式所示:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \cdots (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \beta + \mu \sigma_3 + c \quad (6)$$

由于 σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力, 故有 $\sigma_1 \geq \sigma_3$, 故 $\sigma_1 - \sigma_3 \geq 0$, 两边同除以 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 得:

$$\sin 2\beta \geq 2\mu \cos^2 \beta + 2(\mu \sigma_3 + c)/(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (7)$$

式(7)中包含有轴压、围压等强度参数, 为了便于分析, 这里将其单位化, 引入一个无量纲的系数 η , 其含义如下:

$$\eta = (\mu \sigma_3 + c)/(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

将式(8)右边分子分母同除以 σ_1 , 得:

$$\eta = (\mu \sigma_3 / \sigma_1 + c / \sigma_1) / (1 - \sigma_3 / \sigma_1) \quad (9)$$

这样, (7)式可以表示为

$$\sin 2\beta \geq 2\mu \cos^2 \beta + \eta \quad (10)$$

令 $g_1(\beta)$ 、 $g_2(\beta)$ 分别为

$$\begin{cases} g_1(\beta) = \sin 2\beta \\ g_2(\beta) = 2\mu \cos^2 \beta + 2\eta \end{cases} \quad (11)$$

定义了 $g_1(\beta)$ 和 $g_2(\beta)$ 后, 式(7)变换为

$$g_1(\beta) \geq g_2(\beta) \quad (12)$$

2 粗砂岩三轴压缩破裂形态与强度特征试验研究

2.1 实验过程与实验数据

为了对比破裂面方位角理论值与实验值的差异, 本文以苏承东^[13]等人的试验为例进行说明. 该试验以粗砂岩为对象, 根据岩石力学强度测试

标准, 对经历 400 °C 高温后的粗砂岩进行了三轴压缩试验, 得到了不同围压下的抗压强度和破裂面方位角, 整理后的实验数据如表 1 所示.

表 1 粗砂岩三轴压缩实验数据^[13]
Tab. 1 The experimental data subjected to triaxial compression for grit stone

强度参数	围压 σ_3 /MPa				
	5	10	15	20	25
c /MPa			16.15		
φ /°			44.9		
$\mu=\tan\varphi$			0.996 5		
σ_1 /MPa	99.10	140.14	172.78	194.23	216.71
β' /°	64	64	62	63	62

注: c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; μ 为摩擦系数; σ_1 为抗压强度; σ_3 为围压; β' 为三轴压缩时的破裂面方位角实测值.

2.2 破裂面方位角理论值与实验值

在莫尔—库仑准则中, 根据应力圆中的几何关系, 破裂面法线与大主应力 σ_1 之间的夹角^[14], 也即破裂面方位角 β^* 的理论值为

$$\beta^* = 45^\circ + \varphi/2 \tag{10}$$

将表 1 中的内摩擦角 φ 代入式(10)中, 得到莫尔—库仑准则下破裂面方位角的理论值 β^* , 汇总起来如表 2 所示. 为了对比, 将实测的破裂面方位角实验值 β' 也汇总到表 2 中. 可以看出, 方位角的理论值与实验室不一致, 实验值比理论值偏小, 整体在 63°附近窄幅波动.

表 2 破裂面方位角的理论值与实验值比较
Tab. 2 Comparison between theoretical value and experimental value of fracture surface azimuth

破裂面方位角/°	围压 σ_3 /MPa				
	5	10	15	20	25
实验值 β'	64	64	62	63	62
理论值 β^*	67.45	67.45	67.45	67.45	67.45

3 破裂面方位角理论值的进一步分析

3.1 剪应力与抗剪强度在斜截面上的变化特征

根据前文的理论分析, 不等式(12)左右两边分别代表剪应力和抗剪强度, 将函数 $g_1(\beta)$ 和 $g_2(\beta)$ 的图形绘制在同一坐标系中, 可以直观地显示两者随破裂面方位角大小的变化关系. 为此, 将表 1 中的实验数据进行组合, 得到 $g_1(\beta)$ 和 $g_2(\beta)$ 中相关参数, 如表 3 所示.

表 3 不同围压下与强度有关的组合系数
Tab. 3 Composite coefficient of strength subjected to different confining pressures

组合系数	围压/MPa				
	5	10	15	20	25
$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$	47.05	65.07	78.89	87.12	95.86
σ_3/σ_1	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12
ξ	0.16	0.12	0.09	0.08	0.07
η	0.22	0.20	0.20	0.21	0.21

注: 本表中系数由表 1 中基础数据计算得出, 其中 ξ 为剪压强度比, $\xi=c/\sigma_1$, 无量纲; η 为定义的一个系数, $\eta=(\mu\sigma_3/\sigma_1+c/\sigma_1)/(1-\sigma_3/\sigma_1)$, 无量纲.

如前所述, 将表 1 中的强度参数和表 3 中的相关系数代入式(12)和中, 将函数 $g_1(\beta)$ 和 $g_2(\beta)$ 的图形绘制在同一坐标系中, 如图 2 所示. 图中的曲线直观的显示了剪应力和抗剪强度在不同斜截面上的变化规律, 45°斜截面上剪应力最大, 而抗剪强度随斜截面倾角的增大而一直减小. 不等式(12)成立时斜截面上的剪应力大于抗剪强度, 这是发生剪切破坏的必要条件, 其充分条件是剪力和抗剪强度差值最大, 与之对应的斜截面为最危险破裂面, 也被称作优势面.

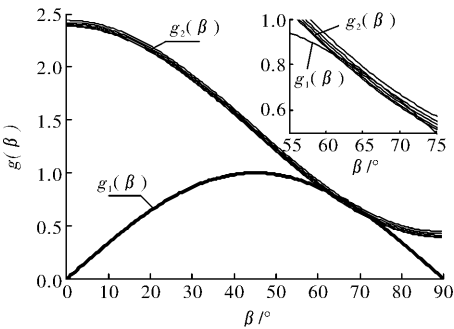


图 2 剪力和抗剪强度与斜截面角度的变化关系
Fig. 2 The relationship between shear strength and shear strength with the different angle of inclined section

3.2 莫尔—库仑准则下的破裂面方位角及其范围

在图 2 中, 当剪应力大于抗剪强度时, 剪切破坏才有可能发生, 此范围即为破裂面方位角范围而剪应力与抗剪强度差值最大的斜截面为理论上的最危险破裂面. 据此, 在莫尔—库仑准则下, 破裂面方位角范围及其最危险破裂面理论值如下:

- (1)方位角理论值范围大致在 60~68°之间, 在此范围内, 剪应力大于抗剪强度, 是发生剪切破坏的必要条件;
- (2)最危险破裂面理论值在 68°附近时, 该破裂面上剪应力与抗剪强度的差值最大, 是发生剪切破坏的充分条件, 为最危险破裂面.

4 破裂面方位角实验值的进一步分析

4.1 强约束条件下试件中的剪切带

如前所述, 引用文献中粗砂岩破裂面方位角范围理论值在 $60^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 之间, 而在实际实验中, 试验机压头与试块接触面之间存在摩擦力, 该阻力限制了试件端面水平方向的位移. 当该水平位移被约束后, 影响了真实破裂路径, 最终导致岩芯中剪切区范围发生改变. 在两倍高径比的圆柱形试件中, 破裂面方位角被端头约束限制在了对角线以下, 这样实际的破裂面方位角范围为 $60^{\circ} \sim 63.4^{\circ}$, 对于理想均值材料, 可能的剪切面就在此区域内, 四种对称模式如图3所示.

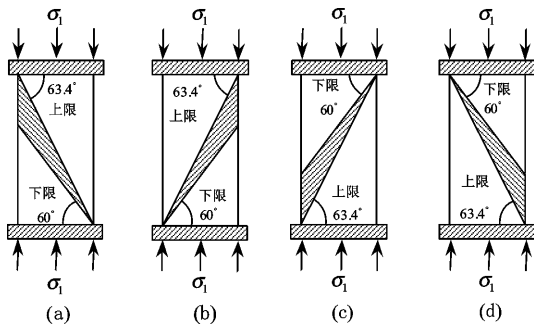


图3 强约束时二倍高径比试件中的破裂面方位角范围

Fig. 3 Azimuth range of fracture surface of test specimen of two times the height to diameter ratio subjected to strong constraint

图3中的四种情况是对称的, 最终的剪切带是以上四种模式的叠加. 可以先将(a)和(b)叠加, 再将(c)和(d)叠加, 叠加结果如图4所示.

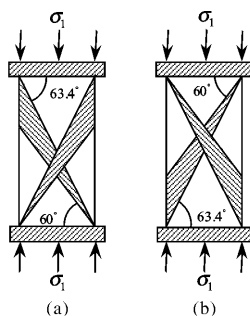


图4 强约束时二倍高径比试件中的剪切带叠加

Fig. 4 Shear band stack of test specimen of two times the height to diameter ratio subjected to strong constraint

在图4中, 将(a)和(b)两种情况再次叠加, 得到考虑端头应力集合影响后的剪切带, 最终的剪切带范围如图5所示, 其中破裂面方位角的下限为 60° , 是由粗砂岩发生剪切破坏的必要条件 $g_1(\beta) \geq g_2(\beta)$ 决定的, 它确定了剪切带的下限. 上限是 63.4° , 是由边界条件决定的.

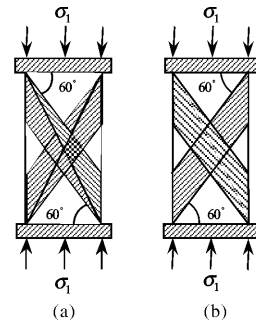


图5 强约束时二倍高径比试件中的剪切带分布

Fig. 5 Shear zone of test specimen of two times the height to diameter ratio subjected to strong constraint

4.2 方位角理论值与实验值不重合的机理

如图6所示, 考虑端头约束影响时, 破裂面方位角的上限被限制在了对角线所在的 63.4° 附近, 故在最终的X型剪切带中, 63.4° 附近为最危险破裂面, 这就导致破裂面方位角的理论值与实验值不重合, 而在莫尔-库仑准则中, 抗剪强度与破裂面方位角是一一对应的, 不同的斜截面上有不同的剪应力和抗剪强度, 方位角理论值与实验值不重合导致抗压强度理论值与实验值不重合.

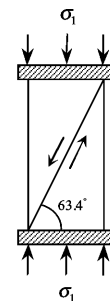


图6 二倍高宽比试件中的实际破裂面方位角

Fig. 6 Actual fracture surface azimuth angle of test specimen of two times the height to diameter ratio

5 分析与讨论

5.1 莫尔-库仑准则下不同破裂面上强度的解析式

破裂面方位角的改变最终会体现在强度上, 为了定量确定破裂面对强度的影响, 这里基于莫尔-库仑准则, 建立不同破裂面下的抗压强度, 具体为将式(5)进行移项整合, 得到 σ_1 的解析式如下:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3 \sin 2\beta + 2\mu\sigma_3 \sin^2 \beta + 2c}{\sin 2\beta - 2\mu \cos^2 \beta} \quad (13)$$

可见, 与材料属性有关的粘聚力和摩擦系数给定后, 当围压不变时, 抗压强度与最终的破裂面方位角是一一对应的, 当破裂面方位角改变后, 对应的强度也随之改变, 而端头约束正是通过改

变破裂路径, 最终改变了强度, 才产生了强度形状效应. 这也是文献[6-7]中, 抗压强度整体随高径比递减的机理所在, 文献中将原因归结于端头摩阻力, 但并未详细阐述影响过程.

5.2 莫尔-库仑准则下抗压强度的理论值与实验值

将表2中破裂面方位角理论值和实验值, 以及表3中的组合系数分别代入到(13)式中, 得到莫尔-库仑准则下抗压强度 σ_1 的理论值与实验值, 并将 σ_1 的理论值与实验值进行比较, 比值系数如表4所示.

表4 莫尔-库仑准则下强度的理论值与实验值对比
Tab. 4 Comparison of theoretical strength and experimental strength with the Mohr-Coulomb criterion

强度比较	围压/MPa				
	5	10	15	20	25
理论值/实验值	0.976	0.977	0.943	0.963	0.945
高估幅度/%	2.394	2.328	5.671	3.739	5.546

在表4中, 在莫尔-库仑准则下 σ_1 的理论值与实验值的比值系数都小于1, 说明实验值高估了真实强度, 机理是边界约束通过改变破裂路径, 使得破裂并没有发生在最危险处, 这样导致实测的结果偏大, 这一发现与文献[6]的研究结果一致, 文献[6]中高径比大的试件峰后脆性特征增强, 且破裂形态以剪切破坏为主, 结合本文对破裂面方位角的研究, 这一现象的机理是随着高径比的增大, 最危险破裂面不再受端头边界的约束, 最终的剪切破坏发生在了倾角更大的最危险破裂面附近. 结合图1, 相对于原先的破裂面, 最危险破裂面上剪切破坏的突然性必然增强, 反映在应力应变曲线上, 峰后段应力应变曲线陡降更加明显, 表明脆性在增强. 另外, 表4也给出了高估百分比, 高估幅度随围压的增大而增大.

5.3 国标《工程岩体试验方法标准》的再认识

岩石或混凝土等材料的室内强度测试是一个典型的模型试验, 从相似试验本身来看, 边界条件、形状效应、尺寸效应这三个因素对真实强度影响最大. 我国国标《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013)中, 对能制成圆柱形试件的各类岩石, 对试件尺寸是这样的规定的^[15]: 圆柱形试件直径宜为48~54 mm, 高径比宜为2.0~2.5; 我国电力行业标准《水利水电工程岩石试验规程》(DL/T 5368-2007)中, 对于能制成规则试件的各类岩石, 对试件直径和高径比与国标一致^[16], 而国际岩石力学学会推荐采用高径比为2.5~3.0的试件做抗压试验, 主要是为了消除端部效应. 总

之, 我国目前岩石力学抗压强度测试中, 包括单轴和三轴抗压强度, 都普遍采用二倍高径比的圆柱形试件, 实际上高径比是取了国标建议值(2.0~2.5)的下限, 而国际岩石力学学会推荐值(2.5~3.0)比我国国标大, 但2.5倍高径比是两个建议值的一个重合点.

对于国际岩石力学学会的建议值, 取高径比为2.5和3.0进行分析, 当端部约束为强约束时, 最危险破裂面方位角如图7所示, 其破裂面方位角上限分别增加到68.2°和71.6°. 对于三倍高径比试件, 破裂面方位角被端头约束限制在了72°以下, 本文中的粗砂岩实际破裂面方位角在60~68°之间, 表明针对此粗砂岩, 三倍高径比时最危险破裂面已经在端头约束之外, 而2.5倍高径比时, 破裂面方位角被端头约束限制在了68°以下, 该砂岩最危险破裂面方位角在60~68°之间, 表明对于此粗砂岩, 2.5倍高径比是消除端部影响的临界值.

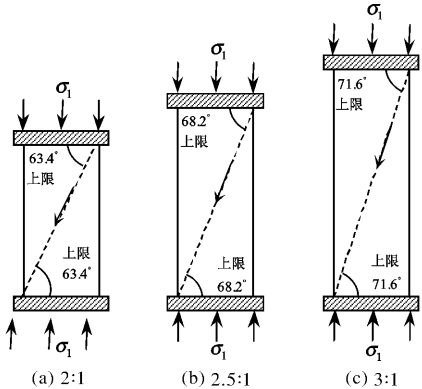


图7 不同高径比时的最危险破裂面对比

Fig. 7 Comparison of the most dangerous rupture surface at different height to diameter ratio

可见, 目前工程界与学术界普遍采用了规范推荐值的下限, 对于种类繁多的各种岩石, 就可能存在高估岩石强度的问题, 而提高高径比是试验值接近真实值最简单的办法, 若能加普遍采用的二倍高径比提高至2.5倍, 则既符合国标要求, 也与国际岩石力学学会推荐值更为接近, 能消除端部应力集中诱发的强度失真.

6 结论

实际强度测试中, 压头与试样接触面之间存在摩阻力, 摩阻力约束了试验端面水平方向的位移, 进而影响了试样中剪切区范围, 最终影响了破裂面方位角, 针对这一现象, 本文基于理论分析与室内试验, 定量分析了这种差异性, 结论如下:

(1)莫尔-库仑准则下粗砂岩的理论破裂面方位角在67.45°附近, 但实际破裂面被端头约束限

制在了对角线所在的 63° 附近,而不同破裂面上对应着不同强度,破裂面方位角的改变最终影响了强度,导致粗砂岩的实际强度被高估;

(2) 5 MPa 围压时强度高估 2.4%, 25 MPa 围压时强度高估 5.5%, 随着围压的增大,抗压强度理论值与实验值的偏离幅度在扩大,也即高围压下强度的高估更加明显;

(3) 2.5 倍高径比时不受边界影响的破裂面方位角增大至 68.2° , 3 倍高径比时增大至 71.6° , 本文中的粗砂岩,高径比扩大至 2.5 附近即可消除边界约束对破裂面方位角的影响;

(4) 目前岩石力学强度测试中普遍采用二倍高径比的圆柱形试件,实际上高径比取了国标建议值的下限,而国际岩石力学学会高径比建议值比我国标准要大,但 2.5 倍高径比是重合点,所以,我国岩石力学强度试验中,将试件高径比提高到 2.5 倍,既符合我国标准,也兼顾了国家岩石力学学会的建议。

参考文献 References

- [1] 尹小涛,葛修润,李春光. 基于数值实验的岩石试样最佳长径比研究[M]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(Z2): 3608-3615.
YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Study of optimal length-diameter ratio of rock specimen based on numerical tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Z2): 3608-3615.
- [2] 周国林,谭国柱,李启光. 剪切破坏模式下岩石的强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 753-762.
Zhou Guolin, Tan Guohuan, Li Qiguang. New strength criterion for rock with shear failure mode [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 753-762.
- [3] 杨友卿. 岩石强度的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 23-27.
Yang Youqing. Continuum damage mechanics analysis of rock strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 23-27.
- [4] 何满潮,薛廷河,彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 225-229.
He Manchao, Xue Tinghe, Peng Yanfei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 225-229.
- [5] 李宏,朱浮声,王泳嘉. 岩石统计细观损伤与局部弱化失稳的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 28-32.
Li Hong, Zhu Fusheng, Wang Yongjia. Size effect of statistical mesoscopic damage and local weakening failure of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 28-32.
- [6] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112-118.
YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112-118.
- [7] 尤明庆,苏承东. 大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3754-3760.
YOU Mingqing, SU Chengdong. Effect of length of fine and coarse crystal marble specimens on uniaxial compression tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3754-3760.
- [8] 薛晓辉,梁小勇,徐芙蓉. 徐州高铁站石灰岩尺度效应单轴压缩试验研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(1): 10-13.
XUE Xiaohui, LIANG Xiaoyong, XU Furong. Uniaxial compression experimental study on size effects of limestone at Xuzhou high-speed rail station [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(1): 10-13.
- [9] 王剑波,朱珍德,刘金辉. 单轴压缩下煤岩尺寸效应的试验及理论研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 50-52.
WANG Jianbo, ZHU Zhende, LIU Jinhui. Experimental and theoretical study on size effect of coal under uniaxial compression [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 50-52.
- [10] 张后全,徐建峰,贺永年,等. 灰岩单轴压缩实验室尺度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 42-43.
ZHANG Houquan, XU Jianfeng, HE Yongnian, et al. Study of laboratory scale effect of limestone under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 42-43.
- [11] 尤明庆,苏承东. 大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3754-3760.
YOU Mingqing, SU Chengdong. Effect of length of fine and coarse crystal marble specimens on uniaxial compression tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3754-3760.
- [12] 梁昌玉,李晓,张辉. 中低应变率范围内花岗岩单轴压缩特性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 528-536.
LIANG Changyu, LI Xiao, ZHANG Hui. Research on size effect of uniaxial compression properties of granite under medium and low strain rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 528-536.
- [13] 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(Z1): 2793-2800.
SU Chengdong, WEI Sijiang, YANG Yushun, et al. Analysis of strength and conventional triaxial compression deformation characters of coarse sandstone after high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Z1): 2793-2800.
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
The National Standards Compilation Groups of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程: DL/T 5368-2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering: DL/T 5368-2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

(编辑 沈波)