

文章编号: 1000-7598(2013)09-2433-09

不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究

宫凤强¹, 陆道辉¹, 李夕兵¹, 饶秋华²

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 分别利用 RMT-150C 和多功能分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验系统对砂岩进行了不同应变率下的单轴压缩、三轴压缩和拉伸试验。结果表明, 在围压为 0 或围压一定的情况下, 应变率低于 10^2 s^{-1} 时, 抗压强度的增加与应变率的量级呈正比; 在应变率高于 10^2 s^{-1} 时, 岩石的抗压强度增加趋势与应变率的 $1/3$ 次方呈正比。拉伸强度也存在类似规律。针对 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内缺少岩石动态强度准则这一现状, 根据上述试验规律, 结合 Mohr-Coulomb 准则、Hoek-Brown 准则和 Griffith 准则的原理, 给出了不同应变率范围内动态 Mohr-Coulomb 准则和动态 Hoek-Brown 准则的具体表达形式。研究结果表明, 在低应变率情况下, 动态 Mohr-Coulomb 准则和动态 Hoek-Brown 准则均适用, 但 Griffith 准则判别结果误差很大。在高应变率情况下, 动态 Mohr-Coulomb 准则比较适用, Griffith 准则仅适用于评估高应变率单轴抗压强度和抗拉强度之间的关系。

关键词: 应变率; 岩石; 动态强度准则; 动态三轴压缩试验; 分离式霍普金森压杆

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates

GONG Feng-qiang¹, LU Dao-hui¹, LI Xi-bing¹, RAO Qiu-hua²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A series of dynamic uniaxial compression, dynamic triaxial compression and dynamic tensile tests with different strain rates are conducted on homogeneous sandstone samples by using the RMT-150C testing machine and the multifunction split Hopkinson pressure bar (SHPB) device. The results show that, when the confining pressure remains constant, the compressive strength of sandstone increases with the magnitude of strain rate when the strain rate is less than 10^2 s^{-1} , the increment trend of the compressive strength is proportional to $1/3$ power of the strain rate when the strain rate is larger than 10^2 s^{-1} . The similar rule above also applies to the tensile strength. Currently, no rock dynamic strength criterion is available for the strain rate in the range of $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$. Based on the analysis of data from dynamic uniaxial tests, dynamic triaxial tests and dynamic tensile tests under low-high strain rates and the principle of Mohr-Coulomb criterion, Hoek-Brown criterion and Griffith criterion, the dynamic Mohr-Coulomb criterion and the dynamic Hoek-Brown criterion under different strain rate ranges are formulated. The experimental results show that the dynamic Mohr-Coulomb criterion and the dynamic Hoek-Brown criterion can be applied to estimate the dynamic strength in the low strain rate range. In the high strain rate range, the dynamic strength can be estimated by using the dynamic Mohr-Coulomb criterion; but the dynamic Hoek-Brown criterion is not applicable. The Griffith criterion can be used to estimate the dynamic uniaxial compressive strength and dynamic tensile strength in high strain rate range only.

Key words: strain rate; rock; dynamic strength criterion; dynamic triaxial compression test; split Hopkinson pressure bar

1 引言

目前在岩石力学领域内, 最有影响同时应用也比较广泛的三大强度准则分别是摩尔-库仑 (Mohr-

Coulomb) 强度准则、霍克-布朗 (Hoek-Brown) 强度准则和格里菲斯 (Griffith) 强度准则^[1-3]。上述准则主要考虑的是静载作用下岩石的破坏情况。在对爆破震动荷载作用下岩质边坡、地下洞室的稳定性进

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41102170); 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 12JJ4048); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2010CB732004); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2012T50658, No. 2011M500973)。

第一作者简介: 宫凤强, 男, 1979 年生, 在站博士后, 讲师, 主要从事岩石动力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: fengqiangg@126.com

行分析时,构建岩石动态强度准则是最基础的一步工作。目前这方面的研究仍有待深入^[4]。为了获得不同应变率(加载率)下的岩石动态强度准则,朱瑞赓等^[5-6]根据花岗岩在加载率大约为 $10^{-2} \sim 10^4$ MPa/s 范围内的试验数据,建立了相应的动力破坏判据和强度准则;钱七虎等^[7-8]针对岩石、岩体的动力破坏特性,提出了考虑强度-应变率效应的摩尔-库仑准则;赵坚等^[9]根据加载率 $10^0 \sim 10^5$ MPa/s 范围内的动态单轴和三轴压缩试验以及加载率分别为 $10^{-1} \sim 10^3$ 、 $10^1 \sim 10^4$ MPa/s 的单轴拉伸和无法向约束剪切试验结果,建立了低加载率范围内的动态摩尔-库仑准则和动态霍克-布朗准则。Zhou 等^[10]考察了不同加载率下岩石的断裂强度变化规律。

从已有的研究可以看出,上述动态准则或判据主要集中在低中应变率 $\dot{\epsilon}$ (加载率 $\dot{\sigma}$) 范围内。针对高应变率,尤其是应变率在 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ (加载率大约为 $10^6 \sim 10^7$ MPa/s) 范围内的强度准则,由于受到试验条件的限制,利用常规的单轴 SHPB 试验系统无法获得该应变率段三轴抗压强度试验数据,因此这方面的研究仍处于空白地带。因此,在本文的研究中,期望利用改造后能实现三轴加载的 SHPB 装置^[11-12],对均质岩石进行一系列动态试验,包括单轴压缩、三轴压缩、拉伸试验等,获得建立试验准则的基本信息。同时,在静载范围和低应变率下范围内,已有的研究表明,摩尔-库仑准则、霍克-布朗准则以及格里菲斯准则都有一定的适用性。在考虑率效应的情况下,最简单也相对比较合理的研究思路应该是把上述准则拓展到高应变率范围,并检验其适用性。如果研究结果表明,在高应变率范围内上述准则仍然适用,则可以建立广泛应变率范围内相对统一的强度准则表达式。

为此,本文分别利用 RMT-150C 和多功能 SHPB 试验系统对砂岩进行了不同应变率下的单轴、三轴压缩和拉伸试验,通过对动态单轴压缩、三轴压缩和拉伸试验数据的整理分析,探讨了摩尔-库仑、霍克-布朗和格里菲斯强度准则在岩石材料动态强度评估中的应用性和适用性,给出了不同应变率范围内动态摩尔-库仑准则、动态霍克-布朗准则的具体表达形式。

2 岩石动态试验和结果

2.1 试验准备和试验系统

试验中选取完整性和均质性较好的砂岩作为研究对象。按照岩石力学试验性能测试要求加工试样,对试样两个端面进行仔细打磨,使其不平行度和不

垂直度均小于 0.02 mm。在完整性、均质性较好的岩块中,利用 2S-200 型立式取芯机取出岩芯,然后利用 DQ-4 岩石切割机将岩芯按试验要求的标准分别切断,最后利用 SHM-200 型双端面磨石机将试样两端精细打磨平整,不同应变率下动态试验的试样尺寸要求见表 1。

表 1 岩石动态力学试验中试样尺寸要求
Table 1 Sample size requirements in dynamic rock mechanic tests

试验类型	低应变率		高应变率	
	直径/mm	长度/mm	直径/mm	长度/mm
单轴压缩	50	100	50	25
三轴压缩	50	100	50	25
劈裂拉伸	50	50	50	50

低应变率下岩石的单轴、三轴压缩以及劈裂拉伸试验在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 试验机上进行。该试验系统是专为岩石以及混凝土一类的工程材料进行力学性能试验而设计,具备多种试验功能:单轴压缩试验、单轴间接拉伸试验(巴西法)、三轴压缩试验、剪切试验等,分别配有不同的试验附件。图 1 为 RMT-150C 试验机实物图。关于该试验机的介绍可以参见相关文献及其自身所带的试验操作手册说明。



图 1 RMT-150C 试验系统
Fig.1 RMT-150C testing machine

高应变率下岩石的单轴压缩和冲击劈裂试验在常规 SHPB 试验装置上进行,三轴压缩试验则采用经过改进的多功能岩石 SHPB 试验装置进行。图 2 为 SHPB 试验装置示意图。所用 SHPB 试验系统杆件采用 40Cr 合金钢,密度为 7.810 g/cm^3 ,弹性波速为 5410 m/s ,杆直径为 50 mm,入射杆和透射杆长度分别为 2.00 m 和 1.50 m,子弹采用“纺锤型”冲头,可以消除 P-C 振荡,实现稳定的半正弦波(加载波上升段稳定在 $100 \mu\text{s}$ 左右)加载^[13-14],其材质和弹体最大直径分别与对应的入射、透射杆相同。

多功能岩石 SHPB 试验装置可实现围压及轴压存在下的岩石冲击试验, 解决了应变率段 $10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 的三轴试验问题。



图2 基于 SHPB 的多功能岩石加载试验系统
Fig.2 Multi-function rock loading device based on SHPB

2.2 动态单轴压缩试验结果分析

图3 是不同量级应变率下(应变率值取对数)砂岩抗压强度 σ_{cd} 变化图。在低应变率段下, 砂岩的平均抗压强度略有增长, 在应变率由 10^{-6} s^{-1} 增加到 10^{-3} s^{-1} 时, 平均抗压强度由 110.98 MPa 增加到 131.39 MPa, 大约增长了 18%, 即低应变率段应变率每增加一个数量级, 抗压强度大约增加 6.0%。文献[15—16]利用新加坡 Bukit Timah 花岗岩(试样尺寸 $\phi 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$) 进行的动态单轴压缩试验研究结果, 在应变率由 10^{-4} s^{-1} 增加到 10^0 s^{-1} 时, 应变率每增加一个数量级, 抗压强度大约增加 3.7%。本文结果的趋势与之类似。

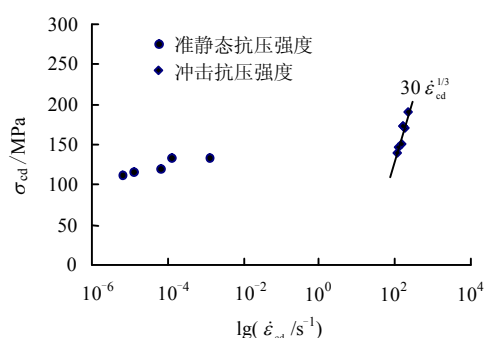


图3 砂岩抗压强度-应变率变化规律
Fig.3 Change tendency of sandstone compressive strength under different strain rates

根据上述规律, 砂岩抗压强度与应变率的关系可以根据对数关系表达如下:

$$\sigma_{cd} = A \lg(\dot{\epsilon}_{cd} / \dot{\epsilon}_c) + \sigma_c \quad (1)$$

式中: σ_{cd} 为动态单轴压缩强度 (MPa); $\dot{\epsilon}_{cd}$ 为动态应变率 (s^{-1}); $\dot{\epsilon}_c$ 为静态应变率 (大约为 10^{-5} s^{-1});

σ_c 为静态下岩石的单轴抗压强度 (MPa); A 为岩石的材料参数, 其取值可以通过试验数据的回归分析得到。

在高应变率段, 动态抗压强度的增加与应变率的 $1/3$ 次方成正比。如图3所示, 动态抗压强度与应变率的关系可以用下式近似表示^[17-18]:

$$\sigma_{cd} = B \dot{\epsilon}_{cd}^{1/3} \quad (2)$$

式中: B 为岩石单轴动态压缩下的材料参数。

2.3 动态三轴压缩试验结果分析

图4、5 分别是低应变率段和高应变率段不同围压下砂岩的动态三轴抗压强度 σ_{3d} 随应变率的变化规律图。

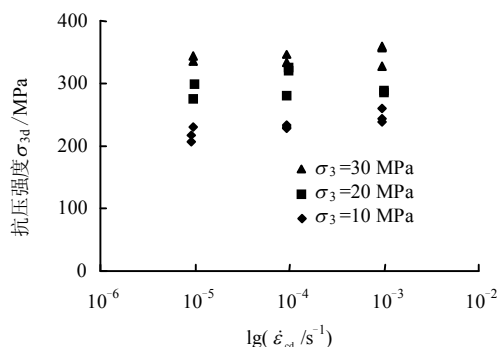


图4 低应变率段不同围压下砂岩抗压强度的变化规律
Fig.4 Change tendency of sandstone compressive strength at low strain rate with different confining pressures

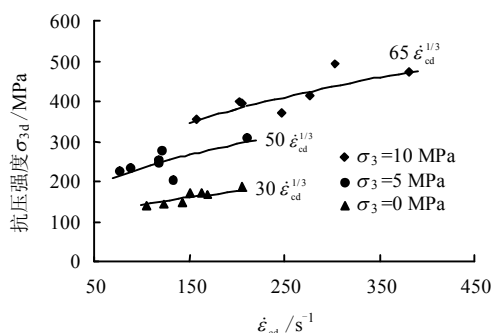


图5 高应变率段不同围压下砂岩抗压强度的变化规律
Fig.5 Change tendency of sandstone compressive strength at high strain rate with different confining pressures

试验结果表明, 低应变率段相同围压下, 抗压强度会随着应变率(取对数值)的增加而增加, 增加幅度随着围压的增加趋于平缓。这一点与文献[19]的研究结论类似。在动态冲击下, 抗压强度随应变率增加会有大幅度的提高, 而且不同围压下抗压强度的递增趋势基本都符合与应变率的 $1/3$ 次方成正比的关系(各关系曲线如图5所示)。

从图 4 中还可以看出, 在围压一定的情况下, 砂岩抗压强度与应变率的关系也可以根据对数关系式 (1) 进行表达。从图 5 可以看出, 在不同围压下, 岩石动态三轴抗压强度也呈现出跟应变率的 1/3 次方成正比的变化规律, 表现形式与式 (2) 一致。因此, 在不同围压下, 岩石的动态三轴抗压强度可以表示为

$$\sigma_{3d} = (K\sigma_3 + B)\dot{\epsilon}_{cd}^{1/3} \quad (3)$$

式中: σ_{3d} 为三轴动态压缩强度 (MPa); K 为岩石的材料参数, K 的取值可以通过试验数据的回归分析得到。

为了在相同围压情况下利用强度准则进行理论分析, 通过试验数据和上述规律, 对试验数据进行拟合进而得到不同围压 (0、5、10、20 和 30 MPa 共 5 个系列) 下岩石单轴和三轴抗压强度随应变率的变化规律, 如图 6、7 所示。

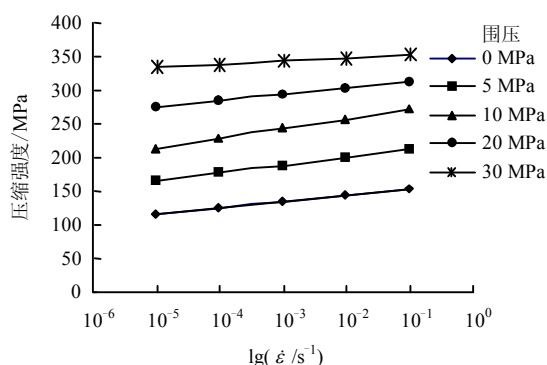


图 6 低应变率段不同围压下砂岩抗压强度理论变化规律

Fig.6 Theoretical change tendency of sandstone compressive strength at low strain rate with different confining pressures

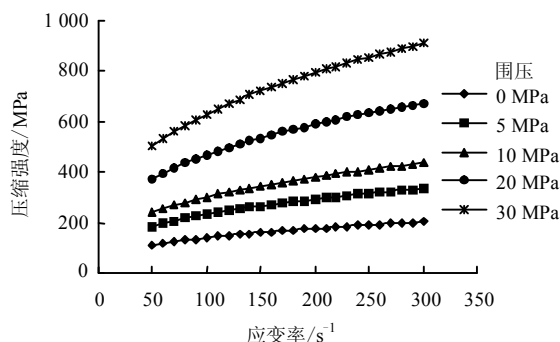


图 7 高应变率段不同围压下砂岩抗压强度理论变化规律

Fig.7 Theoretical change tendency of sandstone compressive strength at high strain rate with different confining pressures

2.4 动态劈裂拉伸试验结果分析

为了考察砂岩劈裂拉伸强度的应变率效应, 根据文献[20—21]的研究成果, 换算得到了每个劈裂试验的平均应变率。图 8 是不同量级应变率下 (应变率值取对数) 砂岩抗拉强度变化图。图中显示: 应变率在 10^{-3} s^{-1} 以下, 抗拉强度随应变率的增加而缓慢增加; 应变率高于 10^2 s^{-1} , 抗拉强度随应变率的增加呈现快速增加趋势, 与应变率的 1/3 次方成正比^[22]。

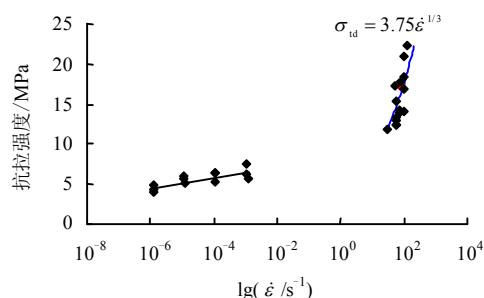


图 8 砂岩抗拉强度-应变率变化规律

Fig.8 Change tendency of sandstone tensile strength under different strain rates

与单轴抗压强度变化规律类似, 本文砂岩拉伸强度在应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 范围内, 也可以利用下式来表示:

$$\sigma_{td} = C \lg(\dot{\epsilon}_{td} / \dot{\epsilon}_t) + \sigma_t \quad (4)$$

式中: σ_{td} 为动态拉伸强度 (MPa); $\dot{\epsilon}_{td}$ 为应变率 (s^{-1}); $\dot{\epsilon}_t$ 为静态应变率 (大约为 $10^{-5}/\text{s}$); σ_t 为静态下岩石的拉伸强度 (MPa); C 为岩石的材料参数, 可以通过试验数据的回归分析得到。

在高应变率下, 岩石的动态拉伸强度与应变率的 1/3 次方成正比, 即

$$\sigma_{td} = D\dot{\epsilon}_{td}^{1/3} \quad (5)$$

式中: D 为岩石的材料参数, 可以通过试验数据的回归分析得到, 本文取为 3.75。

3 动态摩尔-库仑准则

摩尔-库仑准则虽然有一定局限性, 但是在静态范围内也应用比较广泛。在动态范围内, 需要考察是否有一定适用性。为此, 利用图 6、7 中整理得到的单轴和三轴压缩强度数据, 与理论计算结果进行比较, 如图 9 所示。图 9 分别是在应变率 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 范围内砂岩压缩强度数据和摩尔-库仑强度包络线。

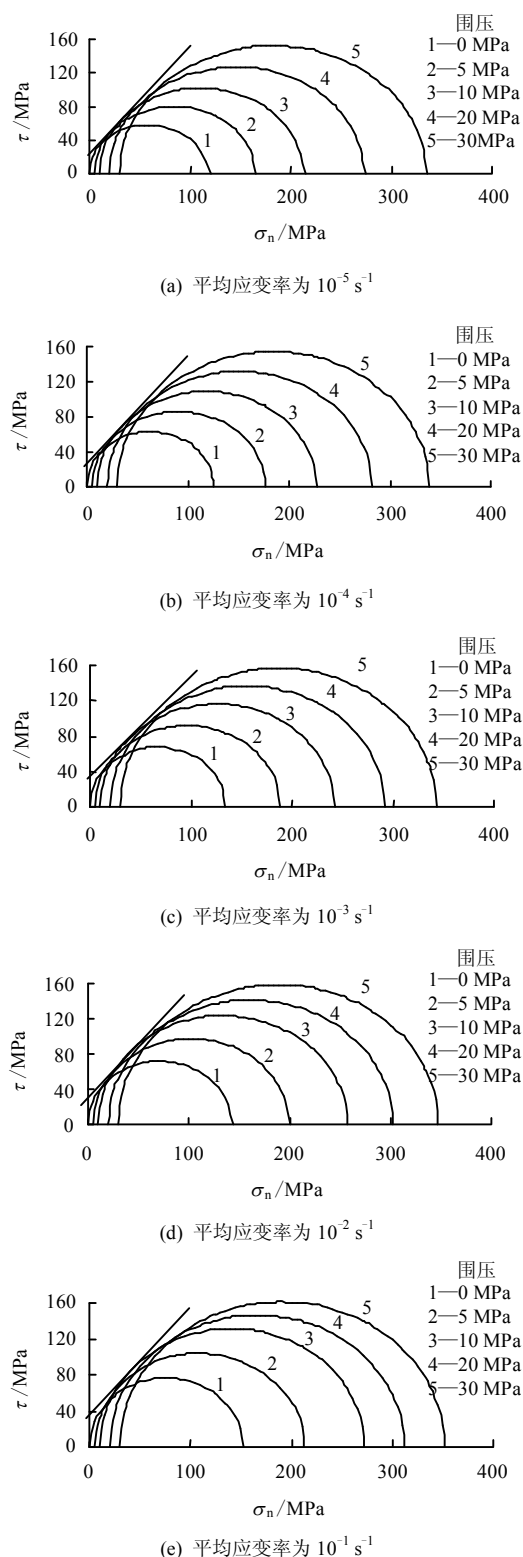


图9 低应变率下砂岩压缩强度和摩尔-库仑强度包络线
Fig.9 Compressive strength and Mohr-Coulomb envelop line of sandstone at low strain rates

从图中可以看出, 在不同应变率下, 各条强度包络线基本由莫尔圆决定。从各条包络线可以看出, 内摩擦角 φ 在不同应变率下变化不大, 强度变化主要是由黏聚力 c 的变化引起的。这一点在参考文献

[23-24]中利用细观力学模型已经得到了验证: 应变率在 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 范围内, 当应变率增加时, 黏聚力会受到影响, 但内摩擦角基本保持不变。

根据上述结论, 在应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 动态范围内, 得到低应变率动态摩尔-库仑准则, 可以表示如下:

$$c_d = \sigma_{cd} \frac{(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi} \quad (6)$$

$$\sigma_{3d} = \sigma_{cd} + \sigma_3 \frac{(1 + \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)} \quad (7)$$

式中: c_d 为动态黏聚力; σ_{cd} 可以根据岩石的单轴压缩试验和式(1)得到。

根据应力变换方程可以得到

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta) \quad (8)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2\beta) \quad (9)$$

动态剪切强度 τ_d 和法向应力 σ_{nd} 可把 σ_{3d} 代入式(8)、(9)代替 σ_1 得到, 表达式如下:

$$\sigma_{nd} = \frac{1}{2}(\sigma_{3d} + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_{3d} - \sigma_3) \cos(2\beta) \quad (10)$$

$$\tau_d = \frac{1}{2}(\sigma_{3d} - \sigma_3) \sin(2\beta) \quad (11)$$

为了验证上述动态摩尔-库仑准则的适用性, 图10给出了本文室内压缩试验的数据和利用式(7)得到的理论数据对比图, 可以看出本文给出的动态摩尔-库仑准则比较符合实际情况。结合文献[9]的研究结论, 可以认为在围压较低时, 动态摩尔-库仑准则可以用来估算岩石的动态压缩强度。

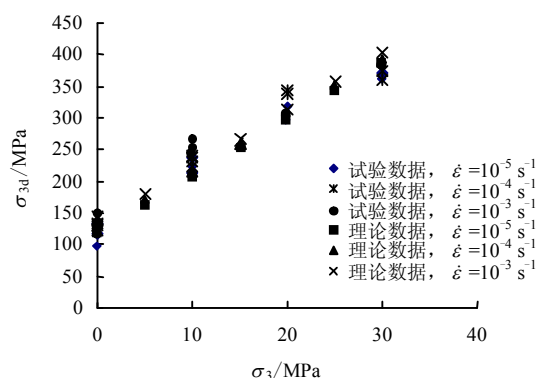


图10 动态摩尔-库仑准则与低应变率三轴试验数据的比较
Fig.10 Comparison of dynamic Mohr-Coulomb criterion and low strain rate data of triaxial experiment

图11 分别是在应变率 $10^1 \sim 10^2$ 范围内砂岩压缩强度数据和摩尔-库仑强度包络线。

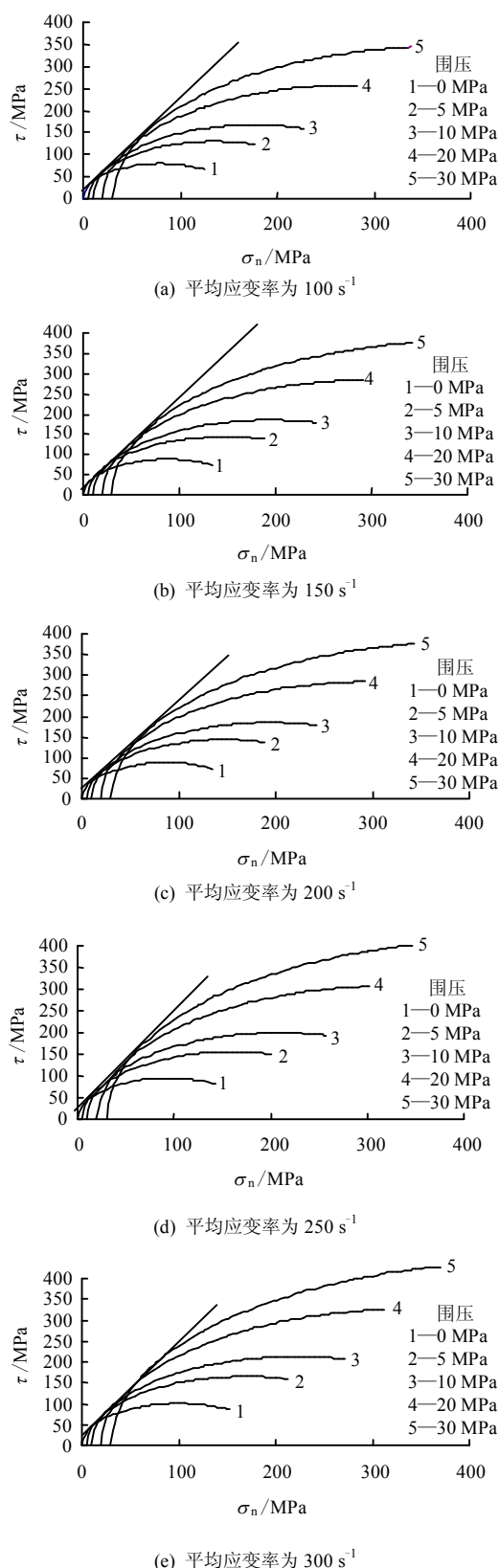


图 11 高应变率下砂岩压缩强度和摩尔-库仑强度包络线
Fig.11 Compressive strength and Mohr-Coulomb envelop line of sandstone under high strain rates

从图中可以看出, 不同应变率下各条强度包络线基本由莫尔圆决定(与图 9 类似), 而且各包络线基本和各摩尔圆相切。从各条包络线可以看出, 内

摩擦角 φ 在不同应变率下变化要比低应变率时显著, 强度变化则不明显, 说明在高应变率下岩石内部的动力响应与低应变率下的状态有所不同。

假设在高应变率 $10^1 \sim 10^2$ 范围内, 岩石强度仍然符合动态摩尔-库仑准则, 可以表示如下:

$$c_d = \sigma_{cd} \frac{(1 - \sin \varphi_d)}{2 \cos \varphi_d} \quad (12)$$

$$\sigma_{3d} = \sigma_{cd} + \sigma_3 \frac{(1 + \sin \varphi_d)}{(1 - \sin \varphi_d)} \quad (13)$$

式中: φ_d 为动态内摩擦角; σ_{cd} 可根据岩石单轴压缩试验和式 (2) 得到。与低应变率下动态摩尔-库仑准则不同的是, 在高应变率下, 不同的应变率都有所对应的 c_d 和 φ_d 值。

为了验证上述动态摩尔-库仑准则的适用性, 图 12 给出了本文室内压缩试验的数据和利用式 (13) 得到的理论数据对比图。由于每次冲击试验中所得到的应变率都不同, 因此, 在对比时尽量选取应变率接近的试验数据进行比较。从图中可以看出, 本文给出的动态摩尔-库仑准则比较符合实际情况, 说明在中应变率范围内, 当围压较小时动态摩尔-库仑准则仍然适用, 至于围压较大的情况还有待继续深入研究。

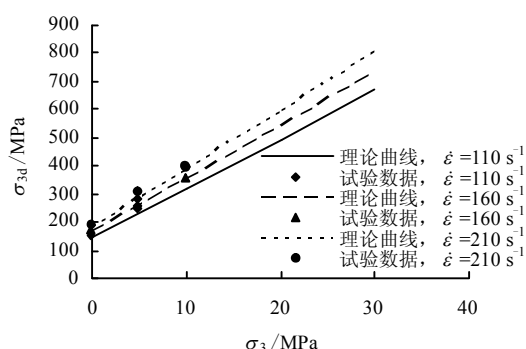


图 12 动态摩尔-库仑准则与高应变率三轴试验数据的比较
Fig.12 Comparison of dynamic Mohr-Coulomb criterion and high strain rate data of triaxial experiment

在具体建立各应变率下的动态强度准则时, 只需进行不同应变率下的常规冲击试验和 2 个围压下的冲击试验, 就可以根据试验数据获得不同应变率下 c_d 和 φ_d 值, 进而建立所对应的应变率下的中应变率摩尔-库仑准则。

4 动态霍克-布朗准则

霍克-布朗准则能反映出一定的非线性关系, 目

前得到了广泛应用。利用霍克-布朗准则的表示形式和本文低应变率下的试验数据进行拟合(如图13所示),发现试验结果可以由具有相同 m 值的一系列非线性 $\sigma_{3d}-\sigma_3$ 曲线表示,说明霍克-布朗准则可以用于低应变率下岩石动态强度的估算。动态霍克-布朗准则形式如下:

$$\sigma_{3d} = \sigma_3 + \sigma_{cd} \sqrt{m\sigma_3\sigma_{cd} + 1} \quad (14)$$

式中: σ_{cd} 由式(1)得到。 m 值可以由标准静载试验获取。

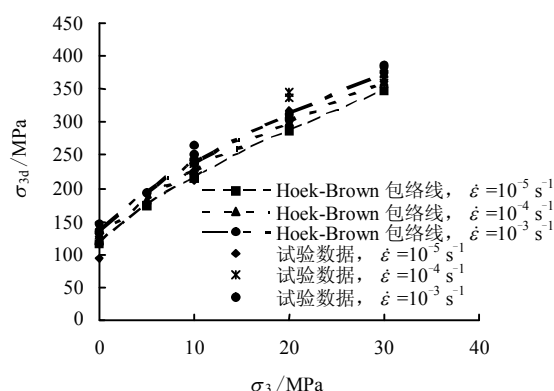


图13 动态霍克-布朗准则与低应变率三轴试验数据的比较
Fig.13 Comparison of dynamic Hoek-Brown criterion and low strain rate data of triaxial experiment

利用霍克-布朗准则的表示形式和本文高应变率下的试验数据进行拟合,结果如图14所示。可以看出,高应变率下动态霍克-布朗准则已经不适用。

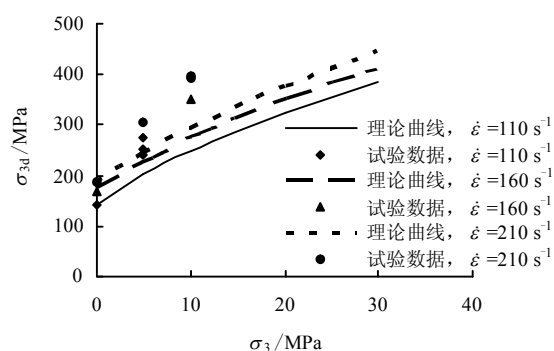


图14 动态霍克-布朗准则与高应变率三轴试验数据的比较
Fig.14 Comparison of dynamic Hoek-Brown criterion and high strain rate data of triaxial experiment

5 动态格里菲斯准则

格里菲斯在不考虑摩擦对压缩下闭合裂缝的影响,并假定椭圆形裂缝将从最大拉伸应力集中点开始扩展的情况下,获得了平面压缩时裂缝扩展的准则:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) &= 0, \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \\ \sigma_3 + \sigma_t &= 0, \sigma_1 + 3\sigma_3 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

格里菲斯准则在理论上比较完美,但是针对岩石材料适用性有很大局限性。本文在此仅利用格里菲斯准则式(15)比较不同应变率下岩石单轴抗压强度和抗拉强度之间的关系。

由式(15)可知,材料的单轴抗压强度是抗拉强度的8倍。图15为不同低应变率下砂岩抗压和抗拉强度结果比较。

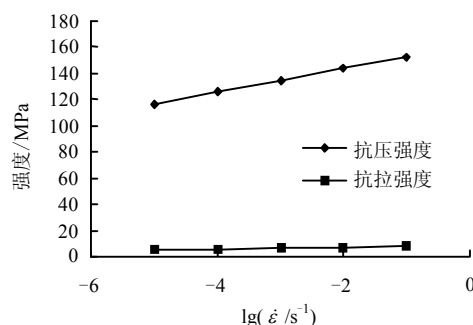


图15 低应变率下砂岩抗压和抗拉强度结果比较
Fig.15 Comparison of compressive strength and tensile strength of sandstone under low strain rates

从图中可以看出,不论在那一级应变率下,砂岩的抗压强度都远远超过抗拉强度的8倍,大约在19~23倍范围内变化。由此可以看出,低应变率下格里菲斯准则不适用于评判岩石材料的强度。

图16是不同高应变率下砂岩抗压和抗拉强度结果比较。从图中可以看出,砂岩的抗压强度恰好为抗拉强度的8倍。说明在高应变率下,格里菲斯准则有可能适用于评判岩石材料的动态强度。需要说明的是,本文仅利用砂岩得到了这一比较吻合的关系式,至于该关系式是否具有科学性,还需在后续的工作中进行理论分析和其他岩石材料的试验验证。

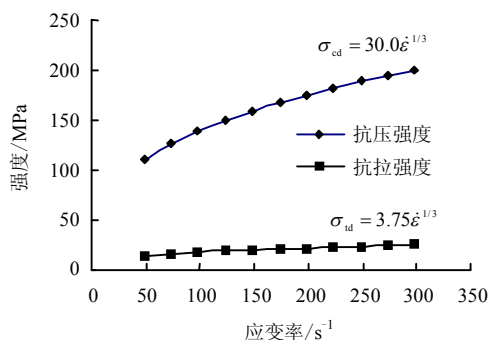


图16 高应变率下砂岩抗压和抗拉强度结果比较
Fig.16 Comparison of compressive strength and tensile strength of sandstone under high strain rates

6 结 语

利用两种试验机分别进行了不同应变率范围内砂岩的动态单轴压缩、三轴压缩和拉伸试验,通过对试验数据的整理分析,并结合摩尔-库仑准则、霍克-布朗准则和格里菲斯准则,检验了动态范围内各准则的适用性,并给出了不同应变率范围内的动态摩尔-库仑准则、动态霍克-布朗准则的具体表达形式。研究表明,在低应变率情况下,动态摩尔-库仑准则和动态霍克-布朗准则均适用,但格里菲斯准则判别结果误差很大。在高应变率情况下,动态摩尔-库仑准则比较适用,格里菲斯准则仅适用于判别动态单轴抗压强度和抗拉强度。

本文仅进行了低围压下的系列试验,对高围压的试验情况没有涉及,因此,所得到的上述强度准则结论主要考虑了低围压范围内的适用性。在今后的工作中,希望更加深入地对该问题进行研究,以便获得更加广泛意义范围内的结论。

参 考 文 献

- [1] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering Rock Mechanics[M]. Oxford: Elsevier, 1997.
- [2] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London: Chapman & Hall, 2004.
- [3] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2889—2900.
HUANG Li-xing. Development and new achievements of rock dynamics in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2889—2900.
- [5] 朱瑞赓, 吴绵拔. 在不同加载速率条件下花岗岩的破坏准则[J]. 岩土力学, 1984, 5(1): 37—46.
ZHU Rui-geng, WU Mian-ba. Failure criterion of granite at different loading rates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1984, 5(1): 37—46.
- [6] 朱瑞赓, 吴绵拔. 不同加载速率条件下花岗岩的破坏判据[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 1—9.
ZHU Rui-geng, WU Mian-ba. Failure criterion of granite at different loading rates[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1984, 4(1): 1—9.
- [7] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报, 2008, 36(12): 1600—1605.
QIAN Qi-hu, QI Cheng-zhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. **Journal of Tongji University**, 2008, 36(12): 1600—1605.
- [8] QIAN QIHU, QI CHENGZHI, WANG MINGYANG. Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2009, 1(1): 1—10.
- [9] 赵坚, 李海波. 摩尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 171—176.
ZHAO Jian, LI Hai-bo. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 171—176.
- [10] ZHOU XIAOPING, QIAN QIHU, YANG HAIQING. Effect of loading rate on fracture characteristics of rock[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2010, 17(2): 150—155.
- [11] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(5): 739—748.
- [12] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1179—1190.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1179—1190.
- [13] LI X B, LOK T S, ZHAO J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(7): 1055—1060.
- [14] ZHOU Y X, XIA K W, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 49: 105—112.
- [15] ZHAO J, LI H B, WU M B, et al. Dynamic uniaxial compression tests on granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(2): 273—277.
- [16] 李海波. 花岗岩材料在动态压应力作用下力学特性的

- 实验与模型研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土所, 1999.
- [17] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [18] 朱晶晶, 李夕兵, 宫凤强, 等. 冲击载荷作用下砂岩的动力学特性及损伤规律[J]. 中南大学学报, 2012, 43(7): 2701—2707.
- ZHU Jing-jing, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, et al. Experimental test and damage characteristics of sandstone under uniaxial impact compressive loads[J]. **Journal of Central South University**, 2012, 43(7): 2701—2707.
- [19] LI H B, ZHAO J, LI T J. Triaxial compression tests of a granite at different strain rates and confining pressures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(8): 1057—1063.
- [20] 宫凤强, 李夕兵, ZHAO J. 巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881—891.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, ZHAO J. Analytical algorithm to estimate tensile modulus in Brazilian disk splitting tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 881—891.
- [21] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军. 圆盘冲击劈裂试验中岩石拉伸弹性模量的求解算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 705—713.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Algorithm to estimate tensile modulus of rock in disk impact splitting test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 705—713.
- [22] GONG F Q, LI X B, DONG L J. Experimental determination of dynamic tensile strength of sandstone at different loading rates[C]//Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics. Beijing:[s. n.], 2011: 789—792.
- [23] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 花岗岩动三轴抗压强度的裂纹模型研究(I): 理论基础[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 75—80.
- LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Study on dynamic triaxial compressive strength of a granite using sliding crack model (I): theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 75—80.
- [24] 李海波, 赵坚, 李廷芥, 等. 花岗岩动三轴抗压强度的裂纹模型研究(II): 应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 329—333.
- LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Ting-jie, et al. Study on dynamic triaxial compressive strength of a granite using sliding crack model (II): application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 329—333.

《岩土力学》2013年第6期被EI收录论文(42篇, 收录率100%)(1)

序号	论文题名	作者	页码
1	基于广义位势理论的类型桥模型	杨光华, 温 勇, 钟志辉	1521—1528
2	TJ-1 模拟月壤承载特性的现场试验研究	蒋明镜, 戴永生, 张 焱, 等	1529—1535
3	降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析	曾 胜, 李振存, 韦 慧, 等	1536—1540
4	力幅突变扰动作用的岩石边坡动力敏感性研究	王建国, 王振伟	1541—1545
5	高效废物处置库的混合型缓冲回填材料压缩特性研究	张虎元, 贾灵艳, 周 浪	1546—1552
6	筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究	徐 超, 陈洪帅, 石志龙, 等	1553—1559
7	成层饱和土中考虑横向惯性的单桩纵向振动	杨 骁, 唐 洁	1560—1566
8	砂土液化流动变形的简化方法	陈育民, 高 星, 刘汉龙	1567—1573
9	含水砂岩在破坏过程中的频谱特性分析	张艳博, 黄晓红, 李莎莎, 等	1574—1578
10	重力式挡土墙地震旋转位移下的屈服加速度	王桂林, 赵 飞, 张永兴	1579—1585
11	顶部条形基础作用下加筋挡墙性能的试验研究	肖成志, 陈倩倩, 韩 杰, 等	1586—1592
12	泥水盾构泥膜形成二维理论分析	刘 成, 孙 钧, 赵志峰, 等	1593—1597
13	含共面结构面岩体的岩桥贯通准则研究	郭牡丹, 朱浮声, 王述红, 等	1598—1604
14	盐岩地下储气库注采气套管运行安全的物理模型试验研究	段 抗, 张强勇, 向 文, 等	1605—1612
15	大理岩弹性参数的围压效应与弹塑性耦合模型	杨凡杰, 周 辉, 肖海斌, 等	1613—1620
16	盐岩地下储库围岩界面变形与破损特性分析	刘 伟, 李银平, 霍永胜, 等	1621—1628
17	考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究	杨金保, 冯夏庭, 潘鹏志	1629—1635
18	填埋场封场覆盖系统稳定性统一分析模型构建及应用研究	万 勇, 薛 强, 陈亿军, 等	1636—1644

(未完, 见第2448页)