DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0876-07

花岗岩破坏过程能量演化机制与能量屈服准则*

王云飞[1],郑晓娟[2],焦华喆[1],陈峰宾[1],赵洪波[1]
(1.河南理工大学土木工程学院,河南 焦作 454000;
2.焦作师范高等专科学校管理学院,河南 焦作 454000)

摘要:为了明确岩石破坏的能量演化特性,结合单轴实验和颗粒流程序获得花岗岩的细观力学参数,进行不同应力状态的花岗岩实验,研究不同围压下花岗岩破坏过程的能量演化机理并推导能量屈服准则。获得以下主要结论:花岗岩破坏过程中低围压下内部损伤出现较早而高围压较晚,表明低围压花岗岩内部损伤是渐进发展过程,而高围压下内部损伤一旦出现便快速发展破坏;高围压花岗岩峰值前一定应变范围弹性应变能基本保持不变,吸收的能量全部转化为耗散能,表明高围压破坏时花岗岩内部损伤程度严重;弹性应变能经历不断积累并达到弹性储能极限而后减小的变化过程,而弹性储能极限与围压之间存在线性变化规律,因此高围压下岩体开挖卸荷时极易诱发大量弹性应变能的急剧释放,引起围岩失稳甚至发生岩爆;花岗岩峰值破坏时的能量比与围压无关,为一定值;基于能量原理导出了能量屈服准则,该准则包含岩性参数和所有主应力,能够综合反映岩石破坏影响因素。

关键词:固体力学;能量屈服准则;颗粒流程序;花岗岩;能量演化机理
中图分类号:O346.4;TU452 **国标学科代码**:1303540 **文献标志码**:A

外力对岩石做功使它发生变形甚至破坏,是个能量转化过程,岩石受载破坏是能量驱动的结果,因而研究岩石破坏过程的能量转化机制具有重要意义。在这个方面,已开展了大量的研究:岩石整体破坏与能量耗散和释放的内在联系[1-2],内部损伤与宏观破坏的能量解释[3],卸荷引起岩爆的能量分析[4-5],加卸载速率[6]、围压[7]对岩石破坏中能量变化的影响,采用颗粒流软件对岩土类材料的研究[8-9]。在屈服准则方面,有深部岩体强度准则[10],Mohr-Coulomb 强度理论及其发展[11],从能量转化角度建立的能量屈服准则[12-13]。

由上可见,对岩石破坏的能量转化研究较多,但对花岗岩全应力应变曲线的不同变形阶段能量转化机理研究很少,而花岗岩又是大型地下工程、矿山巷道施工面临的普遍岩体。因此,在本文中,对花岗岩在不同围压下各变形阶段的能量转化进行详细研究,并从弹性储能极限的新角度建立能量屈服准则,拟为分析地下岩体工程的稳定性提供参考。

1 颗粒流理论与模型

P. A. Cundall 等[14]引入分子动力学思想创建的颗粒流理论,着重从细观力学角度分析材料的破坏特性,能够研究线弹性直至破坏的大变形过程。它主要用于岩石材料的研究,无需定义材料的本构模型,只需设定细观力学参数和颗粒间的黏结模型,便可表达复杂的非线性应力应变关系。

颗粒流程序(particle flow code, PFC)采用平行黏结模型表征岩石类材料,平行黏结发生在半径为 R 的圆形范围内,如图 1 所示。A 和 B 表示两个接触颗粒,O_A、O_B 和 O_C 分别表示 A、B 颗粒和平行黏

* **收稿日期**:2015-03-04; **修回日期**:2015-05-20
基金项目:国家自然科学基金项目 (51104057);煤炭工业协会科学技术研究计划项目(MTKJ2013-338);
河南省教育厅重点项目(13A440323);河南省高校科技创新团队支持计划项目(15IRTSTHN029)
第一作者:王云飞(1978—),男,博士,wyf_ustb@126.com。

结的中心，R 和 L 分别为平行黏结半径和厚度，F 和 M 为平行黏结所承受的力和弯矩，F 分解为法向和切向分量 F_n、F_s，M 分解为法向和切向分量 M_n、M_s，A 为平行黏结截面面积，I 和 J 分别为平行黏结截面惯性矩和极惯性矩。

作用在平行黏结上的法向应力 σ 和切向应力 τ 分别为[15]：

$$\sigma_{max}=-\frac{F_n}{A}+\frac{|M_s|}{I}R \tag{1}$$

$$\tau_{max}=\frac{|F_s|}{A}+\frac{|M_n|}{J}R \tag{2}$$

试样受载后微小颗粒间受力增加，当达到其黏结强度便发生断裂形成内部损伤，损伤积累便形成宏观裂纹导致岩石破坏，这与实际岩石的破坏机制相符。

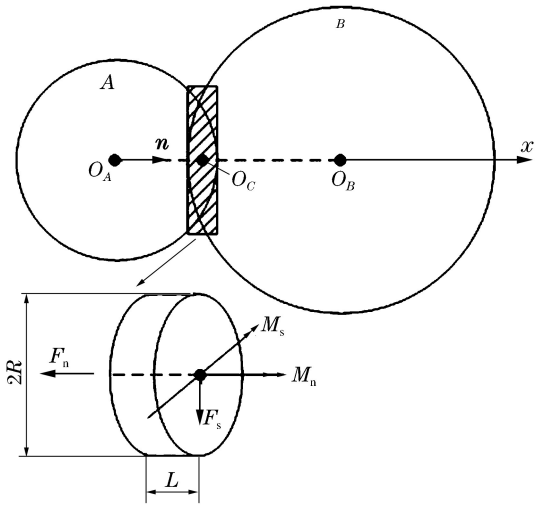


图 1 平行黏结模型

Fig. 1 Parallel bond model

2 花岗岩特性与细观力学参数

花岗岩密度为 2.656 g/cm^3，将它加工为∅50 mm×100 mm 的试样进行单轴实验，测得花岗岩的单轴抗压强度为 149.67 MPa，弹性模量为 67.43 GPa。花岗岩 PFC 试样由服从正态分布的大小颗粒及其之间的黏结组成，最大和最小粒径之比为 1.66，这与岩石由微小矿物颗粒黏结组成的结构相似。PFC 通过设置细观力学参数来表征岩石的宏观力学行为，由室内单轴实验曲线反演获得花岗岩的细观力学参数，颗粒间的摩擦因素为 0.5，颗粒弹性模量 E_c=67.96 GPa，颗粒法向与切向刚度比 k_n/k_s=1.8，平行黏结半径系数 λ=1.0，平行黏结弹性模量 E_c=67.96 GPa，平行黏结法向与切向刚度比 k_n/k_s=1.8，平行黏结法向强度的平均值 $\sigma_{n,mean}$=98 MPa，标准差 $\sigma_{n,dev}$=24.5 MPa，平行黏结切向强度的平均值 $\tau_{n,mean}$=294 MPa，标准差 $\tau_{n,dev}$=73.5 MPa。

3 能量演化机制

3.1 能量原理

工程修建中引起的加卸载活动，改变了岩体的受力条件。在岩体所受应力改变过程中外力作功，其中一部分以弹性应变能的形式存储于岩体中，另一部分为岩体内部损伤所消耗。

取单位岩体进行破坏过程中的能量转化分析，假设这个过程中无热交换和声发射等能量损失，则外力对单位岩体的总输入能量 U 可表示为[1]：

$$U=U_d+U_e \tag{3}$$

式中：U_d 为单位岩石耗散能，U_e 为岩石弹性变形储存的能量，即弹性应变能。

图 2 为耗散能 U_d 与弹性应变能 U_e 的关系示意图，其中阴影部分面积为由于变形而存储于岩石中的弹性应变能 U_e，卸载模量 E_u 与应力应变曲线及水平轴围成的面积为岩石内部损伤形成所需的耗散能 U_d。

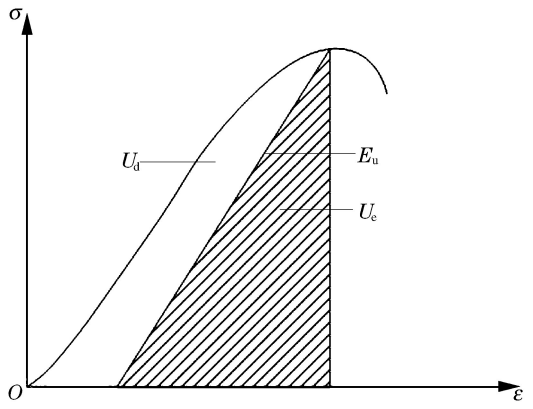


图 2 耗散能与可释放应变能的关系

Fig. 2 Relationship between dissipation strain energy and releasable strain energy

在三向应力状态下，岩石单元的能量计算公式[16]可表示为：

$$U=\int_0^{\varepsilon_1}\sigma_1\,\mathrm{d}\varepsilon_1+\int_0^{\varepsilon_2}\sigma_2\,\mathrm{d}\varepsilon_2+\int_0^{\varepsilon_3}\sigma_3\,\mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{4}$$

$$U_\mathrm{e}=\frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_{\mathrm{e}1}+\frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_{\mathrm{e}2}+\frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_{\mathrm{e}3} \tag{5}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{e}i}=\frac{1}{E_\mathrm{u}}[\sigma_i-\nu_\mathrm{u}(\sigma_j+\sigma_k)] \tag{6}$$

$$U_\mathrm{e}=\frac{1}{2E_0}[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\nu(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)] \tag{7}$$

式中：$\sigma_i(i=1,2,3)$为主应力，$\varepsilon_i(i=1,2,3)$为主应变，规定压应变为正，则岩石受压侧向膨胀 ε_2、ε_3 为负值。$\varepsilon_{\mathrm{e}i}(i=1,2,3)$为相应的弹性应变，$E_0$ 为初始弹模，E_u 和 ν_u 分别为卸载弹模和泊松比。尤明庆等[17]、余贤斌等[18]指出，可用 E_0 近似代替 E_u，为了简化计算本文中采用了：$E_\mathrm{u}=E_0$，$\nu_\mathrm{u}=\nu$。

3.2 能量转化分析

外力对岩石作功使它变形，在岩石内部存储弹性应变能，同时外力作用下岩石内部损伤发展也消耗能量。当岩石积蓄的弹性能达到极限时，便释放转变为耗散能破坏岩石，岩石破坏是能量驱动的结果。

图 3 为花岗岩破坏的弹性能和耗散能转化机制。可见：

(1)花岗岩在压缩的弹性阶段，吸收的总能量基本都以可释放弹性应变能的形式存储，原因在于，弹性变形阶段花岗岩内部损伤极其微少，耗散能基本为零。

(2)随着外力作用进入屈服阶段，虽然花岗岩吸收的总能量仍以可释放弹性应变能的形式存储，但耗散能也在不断增加，内部损伤不断增多，特别在峰值点附近耗散能增速显著，峰值附近内部损伤急剧增多。在这个阶段，弹性应变能的增速不断减小，而耗散能的增速不断增大。

(3)峰后阶段，外力作功岩石继续吸收能量，但弹性应变能在峰后快速释放，相应的耗散能急剧增加。释放的弹性应变能转化为岩石内部损伤和裂隙扩展所需的表面能。在这个阶段，外力作功加弹性能的释放，促使岩石内部裂隙的快速扩展贯通，导致岩石失稳破坏。

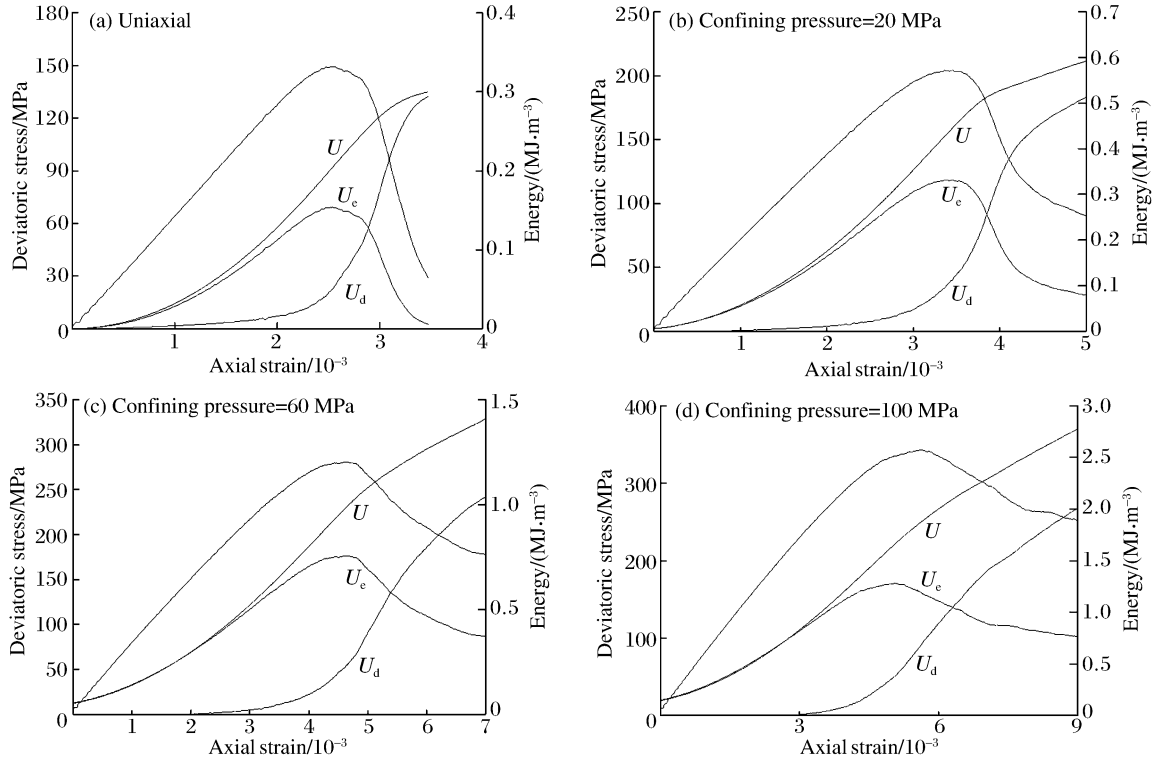


图 3 花岗岩破坏过程能量转化机制

Fig. 3 Energy conversion mechanism of granite in failure process

由岩石吸收总能量、弹性应变能和耗散能的转化可见，岩石吸收的总能量在弹性阶段增速不断增大，在屈服阶段增速逐渐减小，在峰后增速基本恒定。弹性应变能经历先增加后减小的变化趋势，在应力峰值处达到最大储能极限。耗散能从屈服点附近开始出现，增速逐渐增大，在峰值处增速达到最大，在残余强度阶段增速基本与总吸收能增速相同。

对比不同围压下花岗岩能量转化可见，随着围压的增大，花岗岩耗散能出现对应的轴向应变不断增加，即外力作用下在单轴和低围压时花岗岩内部损伤出现较早（见图 3(a)），高围压时内部损伤出现较晚（见图 3(d)），这也表明单轴和低围压下花岗岩内部损伤是渐进发展过程，而高围压下内部损伤一旦出现便快速发展。随着围压的增加，屈服阶段弹性应变能的增速逐渐减小，高围压下峰值前一定应变范围内弹性应变能基本不再增加，表明高围压下峰值附近区间花岗岩吸收的总能量都转化为耗散能用于内部损伤和裂隙发展所需的表面能，进一步说明花岗岩在高围压下峰值破坏时内部损伤程度较高。弹性应变能达到极值不能继续增大，便进入峰后释放阶段，单轴和低围压下弹性应变能急剧释放对应岩石的突然失稳破坏（见图 3(a)）；高围压下由于围压的约束作用能量释放困难，更没有突然释放的条件，因而弹性应变能减小到某个值后，在残余强度阶段仍保持较大值，对应于花岗岩的延性破坏（见图 3(d)）。

图 3 还显示，在花岗岩变形破坏过程中，弹性应变能经历从最初的不断积蓄增加到峰后释放减小期间存在储能最大值，称为弹性储能极限。图 4 为不同围压下的花岗岩弹性储能极限。可以看出，弹性储能极限与围压存在良好的线性关系，单轴时极限弹性应变能为 0.154 MJ/m^3，50 MPa 围压时为 0.647 MJ/m^3，100 MPa 围压时为 1.281 MJ/m^3。

由图 4 可见，高围压下花岗岩破坏时积蓄的弹性应变能较大，又结合图 3 可知，高围压下花岗岩破坏时的内部损伤严重，因此，处于较高三向压力状态的花岗岩体在地下工程修建开挖卸荷时，围压突然降低（巷道周边接近单轴应力状态）极易诱发积蓄在岩体中大量弹性能的急剧释放，导致围岩失稳破坏甚至发生岩爆。

由图 5 可见，花岗岩在峰值破坏时，弹性应变能与吸收总能量的比 U_e/U 和耗散能与吸收总能量的比 U_d/U，与围压基本没有关系。在花岗岩破坏时，弹性应变能与吸收总能量的比为 0.75，相应的耗散能与吸收总能量的比为 0.25。

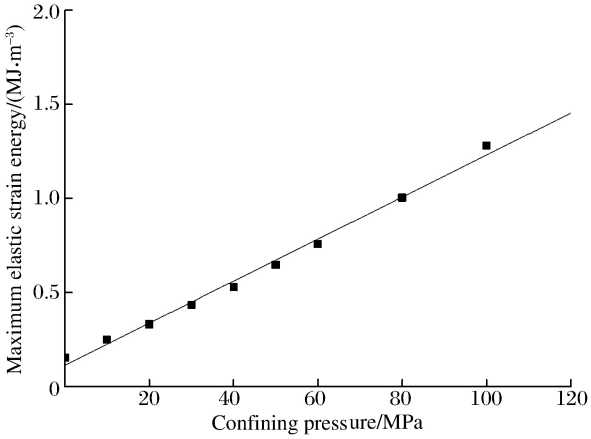


图 4　花岗岩弹性储能极限与围压的关系

Fig. 4　Relationship between granite's maximum elastic strain energy and confining pressures

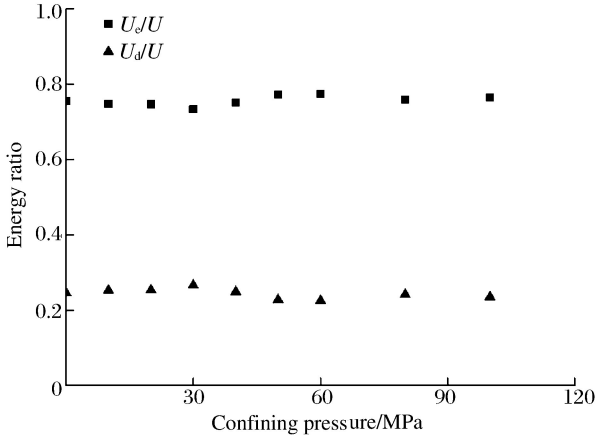


图 5　花岗岩峰值能量比与围压关系

Fig. 5　Relationship between granite's peak energy ratio and confining pressures

4　能量屈服准则

以上表明，花岗岩单位岩体弹性储能极限 $U_{e,max}$ 与围压存在线性变化规律，即：

$$U_{e,max}=U_0+k\sigma_3 \tag{8}$$

式中：U_0 为花岗岩单轴破坏的储能极限，k 为与岩性相关的常数。

由图 3 可见，不同围压下花岗岩单位岩体弹性应变能随应变增加不断增大，当达到储能极限时，可释放弹性应变能导致岩体破坏。因而，岩体单元破坏时有：

$$\frac{1}{2E_{\mathrm{u}}}[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\nu(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)]=U_{\mathrm{e,max}} \tag{9}$$

将式(8)代入式(9)，并用初始弹性模量 E_0 替代卸荷弹性模量 E_{u}，得：

$$\frac{1}{2E_0}[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\nu(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)]=U_0+k\sigma_3 \tag{10}$$

由式(7)，花岗岩的单轴压缩储能极限 U_0 为：

$$U_0=\frac{\sigma_{\mathrm{c}}^2}{2E_0} \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)，并经化简可得：

$$\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\nu(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)=\sigma_{\mathrm{c}}^2+2E_0k\sigma_3 \tag{12}$$

令 $2E_0k=K$，则有能量屈服准则：

$$\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\nu(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)=\sigma_{\mathrm{c}}^2+K\sigma_3 \tag{13}$$

式中：K 为与岩性相关的参数。通过实验获得岩性参数 K，便可利用式(13)，判定不同应力状态下岩体工程的稳定性。

为了验证能量屈服准则的计算精度，采用不同围压强度的线性拟合，给出能量屈服准则的计算强度：$\sigma_{\mathrm{c}}=161.06$ MPa，$K=1.6185$ GPa。

图 6 为能量屈服准则计算结果，计算值与实验结果很接近，最大相对误差为 9.89%。由式(13)可见，基于能量原理建立的能量屈服准则物理意义明确，即花岗岩达到最大储能极限岩石发生破坏，且能量准则包括弹性模量、泊松比和所有主应力，能够从本质上反映岩石破坏的综合影响因素。

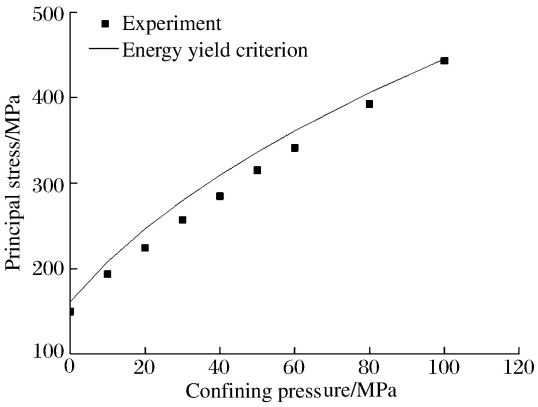


图 6 花岗岩能量屈服准则

Fig. 6 Energy yield criterion of granite

5 结 论

(1)花岗岩低围压时内部损伤出现较早，高围压下内部损伤出现较晚，表明花岗岩在低围压下损伤是渐进发展过程，而高围压下内部损伤一旦出现便快速发展。

(2)花岗岩在高围压下峰值之前一定应变范围内弹性应变能基本不再增加，吸收的能量全部转化为耗散能，说明花岗岩高围压下峰值破坏时内部损伤程度较高。

(3)破坏过程中，弹性应变能经历不断积累增大到储能极限而后减小的过程，其弹性储能极限与围压之间存在良好的线性关系。

(4)高围压下花岗岩积蓄的弹性应变能较大，因而工程开采卸围压时，极易诱发大量弹性应变能的急剧释放，导致围岩失稳破坏甚至发生岩爆。

(5)花岗岩在峰值破坏时，弹性应变能与吸收总能量的比为 0.75，耗散能与吸收总能量的比为 0.25，与围压没有关系。

(6)基于岩石破坏的能量演化机制导出能量屈服准则，该准则物理意义明确，包含岩性参数和所有主应力，能够从本质上反映岩石破坏的综合影响因素。

参考文献：

[1] 谢和平，鞠杨，黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(17)：3003-3010.

Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(17):3003-3010.

[2] 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):3565-3570.
Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(21):3565-3570.

[3] 黄达,黄润秋,张永兴.粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):245-255.
Huang Da, Huang Runqiu, Zhang Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(2):245-255.

[4] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等.基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1530-1540.
Chen Weizhong, Lu Senpeng, Guo Xiaohong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(8):1530-1540.

[5] Sanchidrian J A, Segarra P, López L M. Energy components in rock blasting[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007,44(1):130-147.

[6] 黎立云,谢和平,鞠杨,等.岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J].工程力学,2011,28(3):35-40.
Li Liyun, Xie Heping, Ju Yang, et al. Experimental investigations of releasable energy and dissipative energy within rock[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(3):35-40.

[7] 尤明庆,华安增.岩石试样破坏过程的能量分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):778-781.
You Mingqing, Hua Anzeng. Energy analysis on failure process of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(6):778-781.

[8] Zhou Yu, Wu Shunchuan, Gao Yongtao, et al. Macro and meso analysis of jointed rock mass triaxial compression test by using equivalent rock mass (ERM) technique[J]. Journal of Central South University, 2014,21(3):1125-1135.

[9] 罗勇,龚晓南,连峰.三维离散颗粒单元模拟无黏性土的工程力学性质[J].岩土工程学报,2008,30(2):292-297.
Luo Yong, Gong Xiaonan, Lian Feng. Simulation of mechanical behaviors of granular materials by three-dimensional discrete element method based on particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(2):292-297.

[10] 周小平,钱七虎,杨海清.深部岩体强度准则[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):117-123.
Zhou Xiaoping, Qian Qihu, Yang Haiqing. Strength criteria of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(1):117-123.

[11] 俞茂宏,昝月稳,范文,等.20 世纪岩石强度理论的发展:纪念 Mohr-Coulomb 强度理论 100 周年[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):545-550.
Yu Maohong, Zan Yuewen, Fan Wen, et al. Advances in strength theory of rock in 20 century: 100 years inmemory of the Mohr-Coulomb strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(5):545-550.

[12] 高红,郑颖人,冯夏庭.岩土材料能量屈服准则研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2437-2443.
Gao Hong, Zheng Yingren, Feng Xiating. Study on energy yield criterion of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(12):2437-2443.

[13] 周辉,李震,杨艳霜,等.岩石统一能量屈服准则[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2170-2185.
Zhou Hui, Li Zhen, Yang Yanshuang, et al. Unified energy yield criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(11):2170-2185.

[14] Cundall P A, Strack O D. A discrete numerical model for granula assemblies[J]. Géotechnique, 1979,29(1):47-65.

[15] Itasca Consulting Group. PFC3D: Particle flow code in 3 dimensions[R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2008.

[16] Solecki R, Conant R J. Advanced mechanics of materials[M]. London: Oxford University Press, 2003.

[17] 尤明庆,苏承东.大理岩试样循环加载强化作用的试验研究[J].固体力学学报,2009,29(1):66-72.
You Mingqing, Su Chengdong. Experimental study on strengthening of marble specimen in cyclic loading of uniaxial or pseudo-triaxial compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009,29(1):66-72.

[18] 余贤斌,谢强,李心一,等.岩石直接拉伸与压缩变形的循环加载实验与双模量本构模型[J].岩土工程学报,2005,27(9):988-993.
Yu Xianbin, Xie Qiang, Li Xinyi, et al. Cycle loading tests of rock samples under direct tension and compression and bi-modular constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(9):988-993.

Energy evolution mechanism and energy yield criterion in granite's failure process

Wang Yunfei[1], Zheng Xiaojuan[2], Jiao Huazhe[1],
Cheng Fengbin[1], Zhao Hongbo[1]
(1. *School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*;
2. *Management School, Jiaozuo Teachers College, Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*)

Abstract: To understand the energy evolution mechanism in the rock failure process, this paper firstly obtained the meso-mechanical parameters of granite using uniaxial compression experiments and particle flow codes, then tested the granite under different confining pressures and finally analyzed its energy evolution mechanism in the failure process and deduced its energy yield criterion. The main results are as follows: The internal damage of granite in the failure process occurs earlier under lower confining pressures while later under higher confining pressures, which shows that the internal damage under lower confining pressures is a progressive development process but under higher confining pressures the internal damage rapidly develops into failure once it occurs. The granite's elastic strain energy remains constant in a certain strain range before the peak under higher confining pressures, and the overall energy absorbed transforms into dissipation energy, which shows that the granite internal damage under higher confining pressures is more severe. The elastic strain energy increases and reaches the elastic strain energy limit and then decreases. There exists a linear relationship between the elastic strain energy limit and the confining pressure, therefore rock excavation under high confining pressures is likely to induce a rapid release of a large amount of elastic strain energy which causes the surrounding rock to become unstable and even to burst. The energy ratio at the granite's peak failure is a definite value and independent of the confining pressure. The energy yield criterion is derived based on the principle of energy. It includes lithology parameters and all principal stresses and can reflect the comprehensive factors influencing the rock failure.

Key words: solid mechanics; energy yield criterion; particle flow code; granite; energy evolution mechanism

(责任编辑 丁 峰)