

三轴循环加载下玄武岩纤维混凝土能量跌落系数及演化特征

韦天下¹, 林加剑^{1,2}, 施国栋^{2,3}, 吴海波²

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 合肥 230601; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 合肥 230601;
3. 安徽建筑大学土木工程学院, 合肥 230601)

摘 要: 为探究玄武岩纤维混凝土(BFRC)在不同围压下脆性指数变化和循环加载下输入能、弹性能、耗散能的演化规律, 采用 MTS816 岩石测试系统开展了不同围压下(5、10、15、20、30 MPa)三轴压缩试验和循环加载试验, 并引入能量跌落系数定量表示了 BFRC 脆性指数。三轴压缩试验结果表明, 较 5 MPa 相比, 其它围压下 BFRC 的跌落系数分别提高了约 1.26、2.03、2.77 和 4.24 倍; 循环加载试验结果表明: 通过位移控制循环时, 峰后阶段的卸载点应根据设定的位移值得到而非单次循环的峰值应力点; BFRC 的能量演化曲线具有明显的阶段特征, 单次循环的能量值大小与加卸载点密切相关; 可通过弹性能与耗散能之比间接判断 BFRC 的稳定状态。

关键词: 玄武岩纤维混凝土; 三轴压缩; 循环加载; 能量跌落系数; 能量演化

中图分类号: TU518.79 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2173-09

网络出版时间: 2022-07-04



Energy Drop Coefficient and Evolution Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Concrete Under Triaxial Cyclic Compression

WEI Tianxia¹, LIN Jiajian^{1,2}, SHI Guodong^{2,3}, WU Haibo²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, HeFei 230031, China; 2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230601, China; 3. Civil Engineering College, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: To study the brittleness index change of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) and input energy, elastic energy and dissipative energy evolution law under cyclic loading at different confining pressures, triaxial compression tests and cyclic loading tests at different confining pressures (*i.e.* 5, 10, 15, 20 and 30 MPa) were carried out in a model MTS816 Rock Test System, and the energy drop coefficient was introduced to express the BFRC brittleness index. The results of triaxial compression test show that except 5 MPa, the drop coefficient of BFRC at other confining pressures is increased by 1.26, 2.03, 2.77 and 4.24 times, respectively. Based on the results of cyclic loading test results, when the cycle is controlled by displacement, the unloading point at the post-peak stage can be obtained according to the set displacement value instead of the peak stress point of a single cycle. The energy evolution curve of BFRC has obvious stage characteristics, and the energy value of a single cycle is closely related to the loading and unloading points. The stable state of BFRC can be indirectly judged by a ratio of elastic energy to dissipative energy.

Keywords: basalt fiber reinforced concrete; triaxial compression; cyclic loading; energy drop coefficient; energy evolution

混凝土材料是建筑领域应用最广泛的材料, 2020 年 1~11 月全国规模以上混凝土企业商累计产量 252 070.24 万 m³, 同比增长 2.49%。由于普通混凝土韧性差、易开裂等缺点, 在实际工程中具有一

定的使用局限性。在混凝土中加入纤维、聚合物改善其力学性能是可行方法之一, 增强材料由最初的石棉发展至各种纤维, 聚合物的掺入提高了纤维与混凝土间的粘结强度, 使纤维增强作用得到了充分

收稿日期: 2021-11-19。 修订日期: 2021-11-26。

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(21KZZ701); 建筑健康监测与灾害预防国家地方联合工程实验室开放基金(GG19KF001); 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室开放基金(JD20KF003)。

第一作者: 韦天下(1995—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 林加剑(1979—), 男, 博士, 讲师。

Received date: 2021-11-19. Revised date: 2021-11-26.

First author: WEI Tianxia (1995—), male, Master candidate.

E-mail: MTS2020@163.com

Correspondent author: LIN Jiajian (1979—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: jilin@ahu.edu.cn

发挥,提高了纤维复合材料的力学性能^[1-3]。玄武岩纤维(BF)由于具有良好的力学性能、价格低廉、无污染等优势,逐渐成为纤维复合材料的研究热点之一^[4-9]。准静态力学性能方面:Wang等^[10]研究了BF体积分数(0.05%~0.40%)和纤维长度(13~36 mm)对不同强度混凝土力学性能的影响,结果表明掺入一定体积分数的BF可以显著提高BFRC的断裂模量,随着BF长度的增加,其抗裂能力呈非线性增加,最佳纤维长度为18 mm。董进秋等^[11]研究了5种纤维掺量的BFRC,结果表明掺入适量的BF能够提高混凝土的强度,但当其掺量超过1.5 kg/m³时混凝土的抗压强度呈下降趋势。动态力学性能方面:李为民等^[12]利用分离式Hopkinson杆研究了相同纤维含量的BFRC和CFRC在冲击载荷作用下的动态力学性能,结果表明纤维在混凝土内部形成致密的网状结构限制了其内部微裂纹的产生和发展,改善了混凝土的冲击力学性能,BF的增强、增韧效果优于碳纤维。赵庆新等^[13]研究了BFRC的冲击性能,表明BF的加入可以提高混凝土对冲击能量的吸收,增加其韧性。

当混凝土受到外部载荷作用时,其内部微观缺陷不断演化逐渐形成宏观裂纹,最终引起整体失稳破坏,其本质为能量的相互转换。常规加载路径下:杨永明等^[14]基于能量理论研究岩石在6组围压下裂纹的扩展规律,结果表明随围压增加,岩样吸收的能量和弹性能逐渐增加,耗散能呈递减趋势导致破坏裂纹减少。循环加载路径下:张志镇等^[15]对红砂岩开展单轴循环加载试验,结果表明峰前试样吸收的总能量最大,耗散能最小;准静态加载下,耗散能与加载速率呈负相关,而对弹性能无明显影响。孟庆彬等^[16-17]采用MTS815试验机对岩样进行6种

围压下的三轴循环加载试验,探究围压对岩样能量演化特征的影响规律,结果表明,岩样的能量特征密度与围压呈正相关,围压可抑制试样破坏时能量的耗散和释放,导致弹性能释放不彻底。

已有研究表明,采用能量法表征脆性材料非线性力学特征,可以克服由于材料脆性特点难以获取应力-应变曲线全过程的不足,该方法在岩石类材料非线性力学行为表征中得到了充分的证明。已有文献对BFRC的研究主要集中在单轴压缩下纤维含量及长度对混凝土力学性能的改善和微观增强机制探索,其研究重点侧重于玄武岩纤维对强度的提高。

本工作通过对BFRC开展不同围压下三轴压缩试验,采用能量跌落系数表示BFRC的脆性指数;通过循环加载试验,探究了BFRC破坏前后不同能量的演化规律。本工作采用能量法表征BFRC的非线性力学特征,对研究BFRC的非线性力学行为具有一定的理论参考价值。

1 实验

在已有工作基础上^[18],重点对BF长度为18 mm、体积分数为0.2%的BFRC试样开展试验研究。BFRC试件尺寸为 $\phi 50$ mm $\times$ 100 mm,上下端面直径偏差小于0.3 mm,轴向偏差小于0.25°。表1和表2为制作试件所用主要材料的基本力学性能指标,表3为BFRC试件的配合比。

采用美国MTS公司生产的MTS816岩石测试系统开展了5种围压下(5、10、15、20 MPa)BFRC的三轴压缩试验。试验机所施加轴向最大载荷为2 000 kN,环向最大围压为137 MPa。其工作原理是通过压头对试件施加载荷,围压由注入到三轴腔中的液压油施加,试样变形通过轴向引伸计和环向

表1 玄武岩纤维(BF)性能指标

Table 1 Basalt fiber (BF) performance index

Length/mm	Diameter/ μ m	Density/(g $\cdot$ cm ⁻³)	Applicable temperature/°C	Modulus of elasticity/GPa	Strength of extension/MPa	Extensibility/%
18	15	2.62–2.65	–269–650	91–110	3 000–4 800	3.14

表2 P.C42.5水泥的基本力学性能指标

Table 2 Basic mechanical performance parameters of P.C42.5 cement

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Compressive strength/MPa			Tensile strength/MPa		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
357.9	23.0	34.8	46.7	5.5	6.8	9.0

表3 含0.2% BF的玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)配合比

Table 3 Mixing proportion of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) with 0.2% BF

BF	Cement	Sand	Crushed stone	Water	Fly ash	Water reducing agent	kg/m ³
5.3	450	682	1113	150	50	10.5	

引伸计测量。经尝试性试验后确定采用载荷–位移控制的加载方式，按静水压条件加围压至预定值后保持恒定不变，围压加载速率为 5 MPa/min。待围压在设定值稳定后，轴向载荷以 0.005 mm/s 的速率加载。

为进一步研究循环加载下 BFRC 能量演化规律，对相应的围压状态下 BFRC 试件开展了循环加载试验。循环加载路径根据三轴试验设定每次加载位移控制循环次数，设定卸载速率为 1 kN/s。为避免压头与试样脱离影响实验结果，当轴力卸载至 1 kN 时即可开始下一个循环，直至试样残余阶段出现后继续做 2~3 个循环确认应力无明显下降趋势便可终止程序。为防止验过程中试样与液压油接触导致其力学性能改变，需要将试样用乳胶膜包裹后再用热缩管密封。

2 结果与讨论

不同围压下 BFRC 应力–应变曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出：随着围压的提高，BFRC 试样的承载力和抗变形能力逐渐增强，具体表现为峰值强度、残余强度和峰值应变的增加。循环加载条件下 BFRC 应力–应变曲线的外包络线与常规加载曲线

类似，均包含压密、线弹性、塑性、峰后不稳定破坏和残余阶段，由于在静水压加载阶段试样内部的微裂纹逐渐闭合，故压密阶段不明显。不同加载路径下 BFRC 试样的应力–应变曲线均出现明显的滞回效应，第 i 次卸载曲线与第 $i+1$ 次加载曲线形成了闭合的环形区域，原因是混凝土制作过程中砂浆收缩不均与粗骨料之间形成微裂纹，当载荷达到某一水平后又引起新裂纹产生，裂纹被压密过程伴随着能量的耗散导致卸载曲线与加载曲线不重合。

每次循环加载的过程均有压密、弹性、塑性阶段，且滞回环均产生于前一次循环的塑性区域内，原生裂纹和新裂纹被压密，产生不可逆的塑性变形^[19]。

三轴压缩下 BFRC 的力学特征参数见表 4，表中峰值强度、残余强度及其所对应的应变，可用于计算 BFRC 能量跌落系数。

图 2 为不同围压下 BFRC 试样的破坏模式。从图 2 可以看出，在低围压下试样峰后应力下降较快，表现出明显的脆性破坏。在较高围压下，试样应力应变曲线在峰后下降趋势减缓，塑性变形逐渐增强，呈剪切破坏。

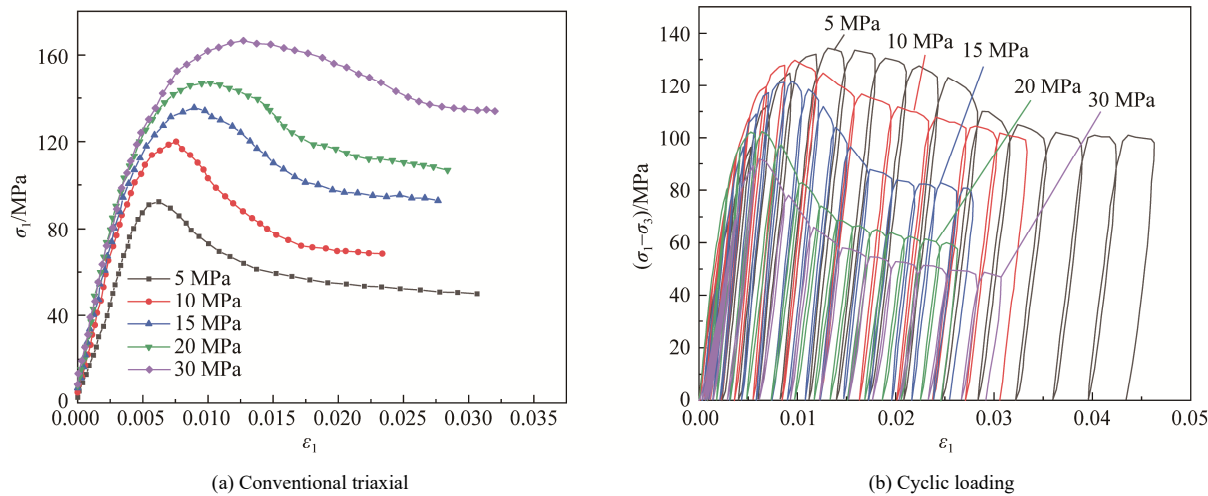


图 1 三轴和循环加载下 BFRC 的应力–应变曲线
Fig. 1 Stress–strain curves of BFRC under conventional and cyclic loading

表 4 三轴压缩下 BFRC 的力学特征参数
Table 4 Characteristic parameters of BFRC under conventional triaxial compression

Confining pressure/MPa	Peak stress/MPa	Peak strain mm/mm	Residual stress/MPa	Residual strain mm/mm	Modulus of elasticity/GPa
5	99.0	0.006 22	61.4	0.015 22	19.712
10	120.0	0.007 56	74.7	0.016 16	22.503
15	135.6	0.008 94	97.7	0.019 56	23.172
20	147.0	0.010 19	111.8	0.022 35	24.326
30	166.6	0.012 73	135.3	0.028 87	25.299

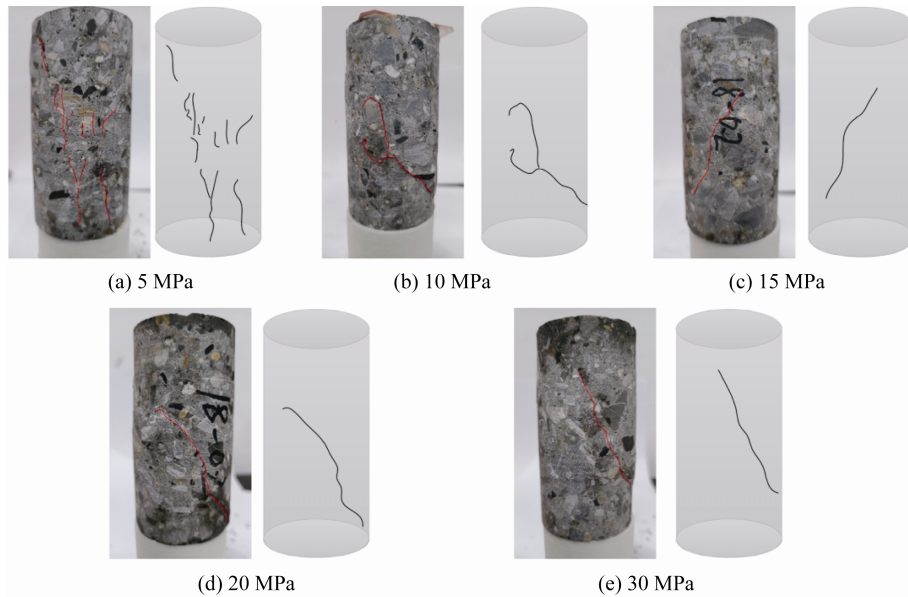


图2 不同围压下 BFRC 试样典型破坏模式

Fig. 2 Typical failure modes of BFRC specimens under different confining pressures

3 BFRC 能量跌落系数

3.1 能量跌落系数

基于工程水泥复合材料设计原理制备的高延性纤维增强混凝土^[20], 可有效提高混凝土的耗能能力。玄武岩纤维在混凝土内部呈三维乱向分布形成网状结构, 由于其模量较高可延缓微裂纹的产生, 导致消耗更多的能量, 有助于提升混凝土的韧性。为量化表示 BFRC 在不同围压下的非线性力学特征, 在已有研究的基础上^[21–22], 引入了能量跌落系数 H 表征 BFRC 的非线性力学行为。混凝土试样破坏后应力从峰值跌落至残余强度的过程中, 试验机输入的机械能增量与试样可释放弹性能增量之比定义为能量跌落系数 H 。即当弹性能增量一定时, 机械能增量越小 H 越小, 表明试样破坏后吸收的能量越少, 脆性破坏越明显, 由此可见 H 对表征混凝土的脆性破坏具有一定的参考价值。由实验结果知, 随着围压增加 BFRC 的破坏方式由脆性逐渐向延性转化, 采用能量跌落系数可量化比较不同纤维混凝土的延性大小。

图3为脆性材料破坏的应力–应变曲线示意图, 图3中 A 为应力峰值点; B 为残余强度点。通过对比两组有效应力–应变曲线的残余应力值来确定 B 点, 若两次实验的残余应力差值不超过 5%, 则取二者平均值作为残余应力, 对应的应变均值作为残余应变值。混凝土作为非均质材料即使残余强度出现后, 应力仍可能会有小幅度下降, 若持续加载一段时间后若残余应力下降幅度不超过 5%则可确定残

余强度值。不考虑实验过程中的热交换, 根据能量守恒在试样破坏全过程均有:

$$\Delta W^0 = \Delta U^e + \Delta U^d \quad (1)$$

式中^[21]: ΔW^0 为试验机所输入能量的增量; ΔU^e 为应力卸载后可恢复弹性能的增量; ΔU^d 为耗散能增量。

在应力跌落过程(AB 段)有:

$$\Delta U^e = U_B^e - U_A^e \quad (2)$$

$$\Delta W^0 = W_B^0 - W_A^0 \quad (3)$$

式中: U_A^e 、 U_B^e 分别为从 A 、 B 点卸载时可恢复的弹性能; W_A^0 、 W_B^0 分别为 A 、 B 点的输入能总量。令:

$$H = \frac{\Delta W^0}{|\Delta U^e|} = \frac{W_B^0 - W_A^0}{|U_B^e - U_A^e|} \quad (4)$$

式中^[22]: H 为能量跌落系数。由式(4)知: 当 $|\Delta U^e|$ 一定时, 试样所吸收的能量 ΔW^0 越小, 说明脆性破坏越明显, H 越小。

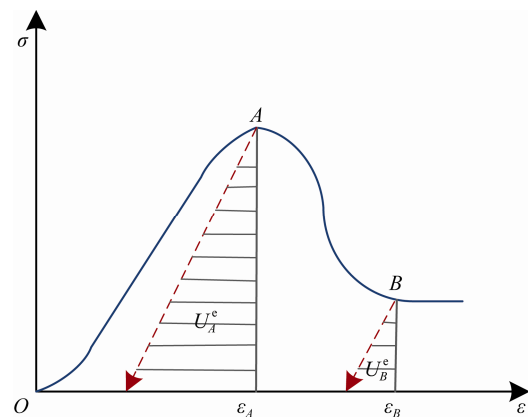


图3 脆性材料破坏的应力–应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of brittle materials

常规三轴压缩下(本试验中 $\sigma_2 = \sigma_3$), 设试样处于各向同性损伤状态, 试验机对试样所输入的能量 W^0 为:

$$W^0(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_0^{\varepsilon'} \sigma_3 d\varepsilon_3 + W_0 \quad (5)$$

$$U^e(\varepsilon) = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon^e - \nu \sigma_3 \varepsilon^e \quad (6)$$

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E} \quad (7)$$

式中^[23]: σ_1 、 σ_3 分别为轴向应力和围压; W_0 为静水压阶段围压所做的功, 为简化计算可忽略; $U^e(\varepsilon)$ 为在轴向应变为 ε 时卸载可恢复得弹性能; ν 为 Poisson 比; ε^e 为可恢复的弹性应变; E 为弹性模量。

根据式(2)、式(3)可得在应力跌落过程($A \rightarrow B$)输入能的增量 ΔW^0 和弹性能的增量 ΔU^e 分别为:

$$\Delta W^0 = \int_{\varepsilon_A}^{\varepsilon_B} \sigma_1 d\varepsilon_1 - 2\nu(\varepsilon_B - \varepsilon_A)\sigma_3 \quad (8)$$

$$\Delta U^e = \frac{\sigma_A^2}{2E_A} - \frac{\sigma_B^2}{2E_B} \quad (9)$$

根据式(4)、式(8)、式(9)可得跌落系数 H :

$$H = \frac{\int_{\varepsilon_A}^{\varepsilon_B} \sigma_1 d\varepsilon_1 - 2\nu(\varepsilon_B - \varepsilon_A)\sigma_3}{\frac{\sigma_A^2}{2E_A} - \frac{\sigma_B^2}{2E_B}} \quad (10)$$

式中: ε_A 、 ε_B 分别为峰值强度(σ_A)和残余强度(σ_B)所对应的轴向应变, BFRC 所对应的力学特征参数见表 4; E_A 、 E_B 分别为从峰值点和残余强度点卸载所对应的弹性模量。

3.2 BFRC 跌落系数的计算

由于循环加载试验难以准确将卸载点控制在试样峰值和残余强度之间, 用引入应力跌落过程的损伤变量 D 进行理论分析。

$$D = 1 - \frac{E'}{E_A} \quad (11)$$

式中^[24]: E' 为峰后某一点的弹性模量, 令 $E_B = (1-D)E_A$, E_A 取平均弹性模量。不同围压下试验测得的 Poisson 比为 0.18~0.21。为明确 Poisson 比对跌落系数的影响, 简化处理后取 $D=0$, 根据表 4 计算出不同 Poisson 比下 BFRC 跌落系数如图 4 所示。由图 4 知, 当围压相同时, 泊松比对 BFRC 的 H 无明显影响, 故在分析损伤变量 D 对跌落系数的影响时忽略围压对 Poisson 比的影响, 计算时取 $\nu=0.2$ 。

由试验结果, 随着围压的升高 BFRC 由脆性逐渐转化为延性, 且围压越高延性越明显。图 5 为 5 种围压下不同损伤变量所对应的能量跌落系数。从图 5 可以看出, 能量跌落系数可宏观比较 BFRC

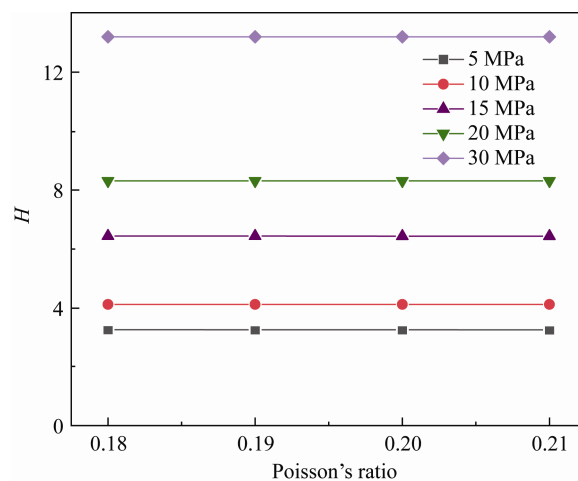


图 4 不同泊松比下 BFRC 的跌落系数 H

Fig. 4 Drop coefficient of BFRC under different poisson's ratio H

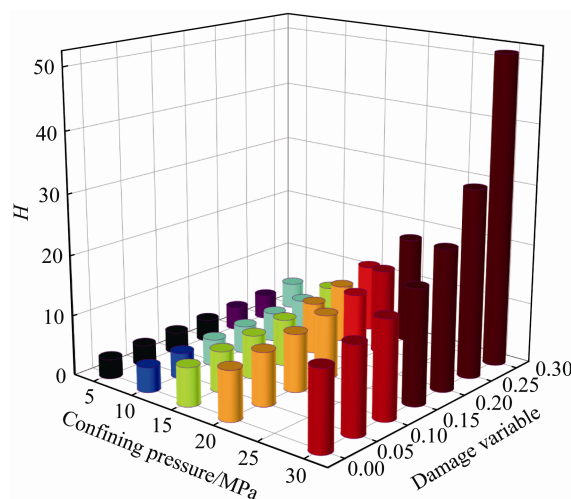


图 5 BFRC 的能量跌落系数

Fig. 5 Energy drop coefficient of BFRC

的脆性指数。当围压一定时, 损伤变量越大, BFRC 的跌落系数越大, 且围压越高 H 越大。

文献[22]根据应力跌落程度对花岗岩和大理石的损伤变量取 0.3 和 0.5, 结合本实验应力跌落情况对(5~30 MPa)围压下 BFRC 的损伤变量分别取 0.2、0.2、0.15、0.15、0.1, 其对应的跌落系数分别为 3.852、4.843、7.821、10.653、16.339。较 5 MPa 相比, 其他围压下 BFRC 的脆性指数分别下降了 1.26、2.03、2.77 和 4.24 倍。

4 循环加载下 BFRC 能量演化规律

4.1 能量计算方法

试样加载过程中始终与外界环境进行机械能和热能的转换, 机械能将转换成弹性能、塑性能及其

他形式的能, 热能将转化呈内能、势能等^[25]。三轴压缩下轴向应力 σ_1 始终做正功, 而围压 σ_3 始终保持不变, 且并未直接导致试样破坏, 故本文忽略了环向能量仅对轴向能量演化行为开展研究。假设轴向加载过程中与外界无热交换, 根据能量守恒定理可知:

$$W^0 = W^e + W^d \quad (12)$$

式中: W^0 为试验机对试样做功输入的机械能; W^e 为试样内部吸收储存的弹性应变能(弹性能), 若移除外载荷该部分能量可完全释放; W^d 为耗散能, 表示试样发生不可逆塑性变形和损伤而消耗的能量。

针对能量的计算进行了一些简化^[26]: 1) 忽略了静水压阶段试样储存的应变能; 2) 试样在某次加卸载的输入能、弹性能和耗散能根据应力-应变曲线每次循环的加卸载曲线求得, 为单位体积内的能量。

由于混凝土试样存在非均质性, 在试验中难以

准确判断其峰值强度, 故通过位移加载控制循环进程。在峰前阶段的循环中试样并未破坏, 达到预定加载位移后该次循环的应变也达到最大值, 如图 6a 所示; 在峰后试样已破坏, 但由于未达到预定位移值实质上仍处于加载阶段, 因此在峰后阶段的循环中以应变最大值点作为卸载起点, 如图 6b 所示。假设在第 i 次循环中, 加载曲线 $\overline{\varepsilon_1\sigma_1}$ 引起的总变形量 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$, 卸载曲线 $\overline{\sigma_1\varepsilon_2}$ 释放处可恢复变形 $\varepsilon_3 - \varepsilon_2$, 残余变形 $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ 。从能量角度看, 加载曲线与应变轴围成的面积为试验机输入的机械能 W_i^0 ; 卸载曲线与应变轴围成的面积为卸载可恢复的弹性应变能 W_i^e ; 二者之差即为一次加卸载中所耗散的能量, 用于试样内部损伤积累^[27]。

$$W_i^0 = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_3} \overline{\varepsilon_1\sigma_1} d\varepsilon_i \quad (13)$$

$$W_i^e = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} \overline{\sigma_1\varepsilon_2} d\varepsilon_i \quad (14)$$

$$W_i^d = W_i^0 - W_i^e \quad (15)$$

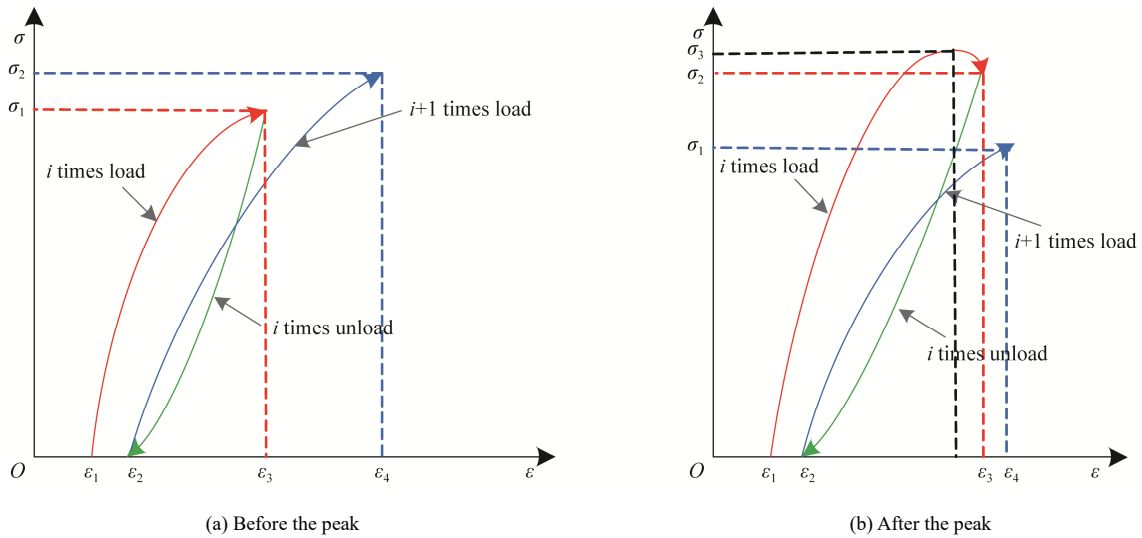


图 6 循环加载下试样能量计算示意图
Fig. 6 Schematic diagram of sample energy calculation under cyclic loading

4.2 能量演化特征

根据式(13)~式(15)可求得不同围压下 BFRC 在各循环过程的输入能、弹性能和耗散能, 其随轴向应变的演化曲线如图 7 所示^[16]。由图 7 可知, BFRC 试样的能量演化曲线具有明显的阶段性(线弹性阶段 I、塑性阶段 II、峰后破坏阶段 III、残余阶段 IV), 且均表现出随应力先增大后减小的趋势。1) 线弹性阶段: 试验机持续对试样做功, 输入能 W^0 呈非线性增加, 部分能被试样吸收转化为弹性能储存在内部。由于大多数孔隙已在静水压加载阶段被压实,

较大的载荷使更多颗粒变形后反弹, 加速了弹性能的增加, 故此时弹性能近似线性增加。同时大量积累的弹性能导致试样产生更多的塑性变形, 加剧了能量的耗散。该阶段试样所积聚的弹性能始终大于耗散能, 弹性能 W^e 为主导地位。2) 塑性阶段: 进入塑性阶段后应力的增加有所减缓, 试样由稳定逐渐转向破坏状态。该阶段将产生大量不可逆塑性变形产生新的裂纹, 在应力的作用下新裂纹被压密逐渐融合, 导致耗散能 W^d 快速增加且在峰值前超过弹性能。BFRC 的弹性能随应力缓慢增加且应在峰

值应力附近达到最大值。3) 峰后破坏阶段: 在塑性阶段所累积的微裂纹连通形成宏观破裂面导致试样失稳破坏, 但由于围压的束缚试样仍具有承载力并且逐渐下降, 轴向应力随之而减小, 输入能 W^0 在峰后达到最大值后逐渐减小。试样破坏后其内部所储存的弹性能瞬间释放, 造成耗散能急剧增加, 随着能量的释放弹性能 W^e 逐渐减小, 耗散能 W^d 在达到最大值后也随输入能的减小而减小, 该阶段耗散

能占主导地位。随围压的增加, BFRC 在峰后破坏由脆性逐渐转化为延性, 应力下降缓慢的同时, 能量下降趋势也有所减缓。4) 残余阶段: 此时试样已经破坏, 但由于围压的束缚仍具有一定的承载力, 且围压越高承载力越强。该阶段各循环的应力峰值趋于平稳, 试样内部几乎无新裂纹产生, 若此时等应变加卸载则 BFRC 的输入能、弹性能、耗散能均应在相对稳定的水平波动。

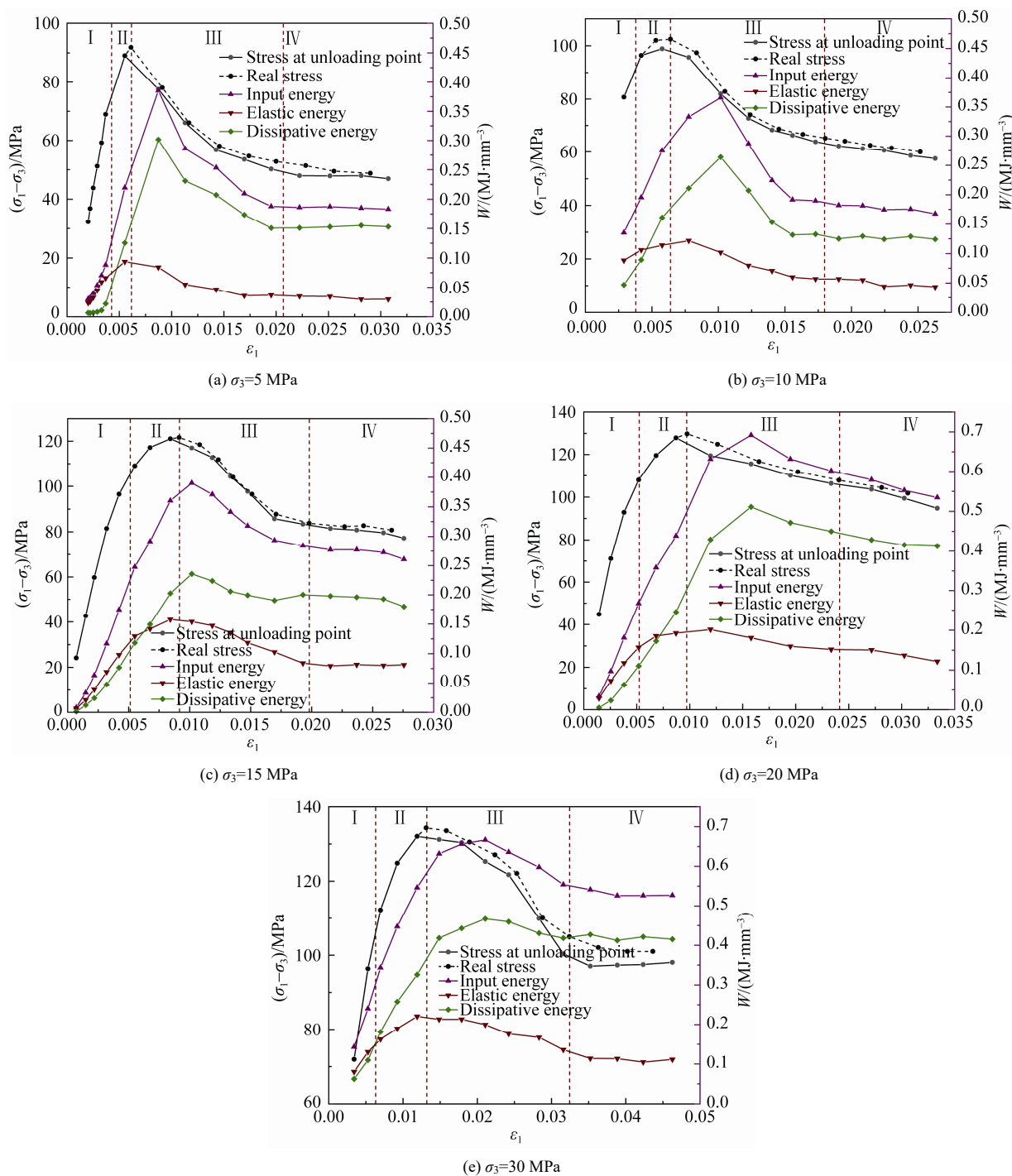


图 7 循环加载下 BFRC 的应力-应变-能量曲线

Fig. 7 Stress-strain-energy curves of BFRC under cyclic loading

4.3 能耗比 η 演化特征

混凝土在外载荷作用下产生不可逆变形的过程, 实际为能量耗散的结果。在加载初期试样内部孔隙闭合、弹塑性阶段裂纹的扩展、峰后宏观破裂面的形成和破裂颗粒飞出产生的动能等均伴随着能量的消耗。如式(16)所示, 定义弹性能与耗散能之比作为 BFRC 的能耗比 η 。试样破坏前弹性能占主导地位, 而破坏后随着弹性能的释放导致耗散能迅速增加, 受载试样在失稳破坏前后耗散能变化幅度较大, 可通过能耗比 η 间接判断试样的稳定状态。当 $\eta > 1$ 时, 试样所储存的弹性能大于耗散能, 若此时移出外载荷试样依旧能够保持完整, 可认为试样处于稳定状态; 当 $\eta = 1$ 时, 已达到破坏的边缘, 可认为试样处于临界稳定状态; 当 $\eta < 1$ 时, 试样处于峰值附近或峰后阶段, 为不稳定状态。通过式(16)计算出不同围压下 BFRC 的能耗比随应力、应变的

变化曲线如图 8 所示。

$$\eta = \frac{W^e}{W^d} \quad (16)$$

由图 8 可以看出, 围压在 5 MPa 时, η 随循环次数的增加呈现出先增加后减小最终趋于稳定, 这是由于在加载初期 BFRC 试样内部空隙被压密消耗的能量占比较多; 进入线弹性阶段后 W^e 的增加远大于 W^d , 导致 η 呈现增加的趋势; 在塑性阶段产生大量非均质变形 W^d 的增速大于 W^e , η 迅速减小; 试样破坏后 W^e 释放, 造成 η 进一步减小; 在残余阶段不再有新的裂纹产生, 弹性能和耗散能趋于稳定, η 在小范围内波动。事实上循环加载下能量的大小与加卸载点密切相关, 本试验在其他围压下 η 却并未出现增加阶段, 是由于在弹性阶段之前的循环次数过少造成能量累积, 在第 1 次循环时 η 已达到最大值。

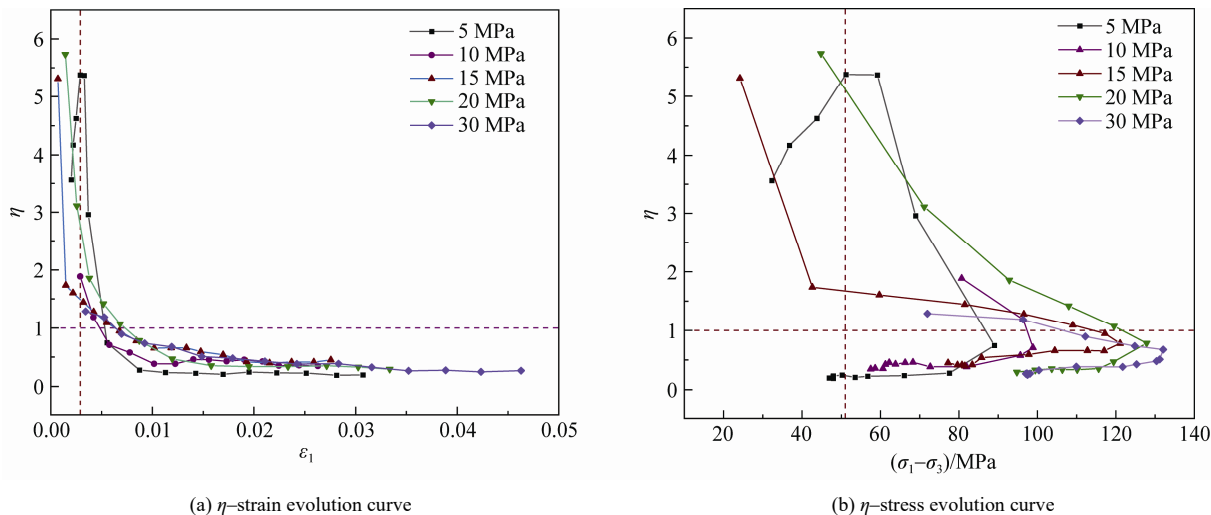


图 8 循环加载下 BFRC 的能耗比 η 随应变/应力演化曲线

Fig. 8 Evolution curves of energy consumption ratio of BFRC with strain/stress η under cyclic loading

5 结论

通过对纤维长度为 18 mm、体积分数为 0.2% 的 BFRC 试样开展实验研究得到以下结论:

1) 随着围压的增加 BFRC 的脆性逐渐减弱, 根据实验结果对损伤变量进行大致取值得到 5~30 MPa 下 BFRC 的跌落系数 H 分别为 3.852、4.843、7.821、10.653、16.339, H 越大脆性越弱, 延性越明显。

2) 通过位移控制循环加载时, 峰后阶段的卸载点应根据设定的位移值得到而非单次循环的峰值应力点; BFRC 的能量演化曲线具有明显的阶段特征, 单次循环的能量值大小与加卸载点密切相关。

3) 可通过弹性能与耗散能之比 η 间接判断 BFRC 的稳定状态, 当 $\eta > 1$ 时试样处于稳定状, $\eta < 1$ 时试样处于不稳定状态。

参考文献:

- [1] 吴中伟. 纤维增强——水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品, 1999(1): 3–4.
WU Zhongwei. China Concr Cem Prod (in Chinese), 1999(1): 3–4.
- [2] 王文伟, 李果. 纤维增强塑料(FRP)在混凝土结构中的研究与应用[J]. 混凝土, 2001(10): 37–39.
WANG Wenwei, LI Guo. Concrete (in Chinese), 2001(10): 37–39.
- [3] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1756–1764.
GOU Hongxiang, ZHU Hongbo, ZHOU Haiyun, et al. J Chin Ceram

- Soc, 2020, 48(11): 1756–1764.
- [4] 薛维培, 刘晓媛, 姚直书, 等. 不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(9): 2285–2293.
- XUE Weipei, LIU Xiaoyuan, YAO Zhishu, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2020, 37(9): 2285–2293.
- [5] LOPRESTO V, LEONE C, DE IORIO I. Mechanical characterisation of basalt fiber reinforced plastic[J]. Compos Part B, 2011, 42(4): 717–723.
- [6] FAN Feilin, XU Jinyu, BAI Erlei, et al. Experimental study on impact mechanics properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Adv Mater Res, 2011: 1910–1914.
- [7] 马芳武, 陈实现, 韩露, 等. 玄武岩纤维含量对玄武岩纤维/聚乳酸-铝合金复合材料连接强度的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 276–283.
- MA Fangwu, CHEN Shixian, HAN Lu, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2020, 37(2): 276–283.
- [8] DYLMAR Penteadó Dias, CLELIO Thaumaturgo. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers[J]. Cem Concr Compos, 2004, 27(1): 49–54.
- [9] 丁一宁, 丁宁, 李冬. 玄武岩纤维和玻璃纤维的耐碱性及其网格布对混凝土双向板弯曲性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 214–222.
- DING Yining, DING Ning, LI Dong. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2020, 37(1): 214–222.
- [10] WANG Xinzong, HE Jun, MOSALLAM AYMAN S, et al. The Effects of Fiber Length and Volume on Material Properties and Crack Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC)[J]. Adv MaterSci Eng, 2019(4): 1–17.
- [11] 董进秋, 杜艳廷, 闻宝联, 等. 玄武岩纤维混凝土力学性能与增韧机理研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 638–641.
- DONG Jinqiu, DU Yanting, WEN Baolian, et al. Ind Constr (in Chinese), 2011, 41(S1): 638–641.
- [12] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报, 2008(4): 476–481, 486.
- LI Weimin, XU Jinyu. J Chin Ceram Soc, 2008(4): 476–481, 486.
- [13] 赵庆新, 董进秋, 潘慧敏, 等. 玄武岩纤维增韧混凝土冲击性能[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 120–125.
- ZHAO Qingxin, DONG Jinqiu, PAN Huimin, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2010, 27(6): 120–125.
- [14] 杨永明, 鞠杨, 陈佳亮, 等. 三轴应力下致密砂岩的裂纹发育特征与能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 691–698.
- YANG Yongming, JU Yang, CHEN Jialiang, et al. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2014, 33(4): 691–698.
- [15] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953–962.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2012, 31(5): 953–962.
- [16] 孟庆彬, 王从凯, 黄炳香, 等. 三轴循环加卸载条件下岩石能量演化及分配规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2047–2059.
- MENG Qingbin, WANG Congkai, HUANG Bingxiang, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2020, 39(10): 2047–2059.
- [17] MENG Qingbin, ZHANG Mingwei, ZHANG Zhizheng, et al. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Environ Earth Sci, 2019, 78(23): 650.1–650.20.
- [18] 林加剑, 韦天下, 施国栋, 等. 准静态玄武岩纤维混凝土力学性能及其BP神经网络预测模型研究[J]. 防护工程, 2020, 42(6): 8–17.
- LIN Jiajian, WEI Tianxia, SHI Guodong, et al. Protect Eng (in Chinese), 2020, 42(6): 8–17.
- [19] 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1791–1797.
- XIAO Fukun, SHEN Zhiliang, LIU Gang, et al. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2014, 33(9): 1791–1797.
- [20] 邓明科, 郭莉英, 李睿喆, 等. 高延性混凝土加固钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 47–57.
- DENG Mingke, GUO Liying, LI Ruize, et al. Eng Mech (in Chinese), 2020, 37(11): 47–57.
- [21] 宋洪强, 左建平, 陈岩, 等. 基于岩石破坏全过程能量特征改进的能量跌落系数[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 91–98.
- SONG Hongqiang, ZUO Jianping, CHEN Yan, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2019, 40(1): 91–98.
- [22] 左建平, 黄亚明, 熊国军, 等. 脆性岩石破坏的能量跌落系数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 321–327.
- ZUO Jianping, HUANG Yaming, XIONG Guojun, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2014, 35(2): 321–327.
- [23] 李毅, 程桦, 张亮亮. 不同围压下C60混凝土三轴压缩过程能量分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2086–2093, 2326.
- LI Yi, CHENG Hua, ZHANG Liangliang. J Appl Mech (in Chinese), 2020, 37(5): 2086–2093, 2326.
- [24] 谢和平, 鞠杨, 董毓利. 经典损伤定义中的“弹性模量法”探讨[J]. 力学与实践, 1997(2): 2–6.
- XIE Heping, JU Yang, DONG Yuli. Mech Eng (in Chinese), 1997(2): 2–6.
- [25] 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(17): 3003–3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2005(17): 3003–3010.
- [26] 杨小彬, 程虹铭, 吕嘉琦, 等. 三轴循环荷载下砂岩损伤耗能比演化特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3751–3757, 3766.
- YANG Xiaobin, CHENG Hongming, LYU Jiaqi, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2019, 40(10): 3751–3757, 3766.
- [27] 王向宇, 周宏伟, 钟江城, 等. 三轴循环加卸载下深部煤体损伤的能量演化和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2676–2684.
- WANG Xiangyu, ZHOU Hongwei, ZHONG Jiangcheng, et al. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2018, 37(12): 2676–2684.