

准静态循环加卸载下钢纤维混凝土力学特性分析

叶中豹^{1, 2}, 潘 锐¹

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为探究饱水处理、围压改变对准静态荷载作用下钢纤维混凝土材料强度以及能量演化特征的影响规律, 采用 MTS816 岩石力学试验系统开展同应变率、同围压、饱水和未饱水; 同应变率、不同围压、未饱水等条件三轴循环加卸载等相关试验。由试验结果可知: 钢纤维混凝土材料经过饱水处理, 峰值应力对应的峰值应变稍大, 且表现出明显的体积压缩现象, 但材料强度降低; 在三轴循环加卸载作用下材料应力-应变曲线出现滞回环效应; 滞回环最大面积通常出现在材料的峰值应力附近, 随着围压增加, 面积最大的滞回环对应的应力点随之推迟出现; 随着围压提高, 材料峰值应力后的应力-应变曲线变得平缓, 表现出更明显的塑性变形特征, 且材料的峰值应力提高明显。

关键词: 钢纤维混凝土; 循环加卸载; 围压; 饱水性能; 能量

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)04-014-06

Analysis of Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Quasi-static Cyclic Loading and Unloading

YE Zhongbao^{1, 2}, PAN Rui¹

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to explore the influence of saturation and confining pressure on the strength and energy evolution characteristics of steel fiber reinforced concrete (SFRC) under quasi-static loading, the MTS model 816 rock mechanics test system was used to carry out triaxial cyclic loading and unloading tests with the same strain rate, different confining pressures and saturated and unsaturated water. The test results show that the peak strain of the SFRC corresponds to a slightly larger peak strain and exhibits obvious volume compression after saturation treatment, but the material strength decreases. Under triaxial cyclic loading and unloading, the hysteresis loop effect appears in the stress-strain curve. The maximum area of the hysteresis loop usually appears near the peak stress of the material. As the confining pressure increases, the stress point corresponding to the maximum area of hysteresis loop is delayed, and the stress-strain curve after the peak stress becomes gentle, showing more obvious plastic deformation characteristics, and the peak stress of the material increases significantly.

Keywords: steel fiber concrete; triaxial cyclic loading and unloading; confining pressure; saturated water performance; energy

收稿日期: 2021-10-14

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2019A0745); 校级博士启动基金项目(2019QDZ05, 2019QDZ03); 建筑结构与地下工程重点实验室开放基金项目(KLBSUE-2021-04)

作者简介: 叶中豹(1981-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向: 材料冲击动力学。

在工程实践中,钢纤维混凝土材料可能受循环加卸载作用以及水下结构工程中受水的浸泡。如,风荷载作用下的高层建筑物、飞机起降时的钢纤维混凝土跑道、水流冲击的水库坝体等。因此,研究钢纤维混凝土饱水处理后的力学特性,循环加卸载作用下应力-应变曲线的滞回环特性以及滞回环与耗散能的关系,对提高钢纤维混凝土结构的安全性有重要意义。

目前,相关混凝土类材料已通过试验建立了相应理论体系,刘博文等^[1]总结了不同围压下混凝土应力-应变曲线中滞回环的变化规律,阐述了耗散能与滞回环的关系,建立了材料含损伤变量的估计模型;王四巍^[2]开展了塑性混凝土三轴循环加卸载和渗透试验,研究了材料的本构关系、峰值应力前后材料的变形以及材料的渗透特性;曾晟等^[3]通过开展饱水和干燥条件下砂岩混凝土的压缩试验,阐述了材料在饱水作用下的破坏机理;王孝政等^[4]开展了一维单轴循环加卸载混凝土压缩试验,并结合材料的声发射特征分析了材料强度变化规律;胡海蛟等^[5]开展不同应变率下混凝土动态循环加卸载压缩试验,得出随着应变率提高,材料的峰值应力和弹性模量随之增大,但峰值应变表现出显著的离散性;吴彬等^[6]进行了混凝土在不同应变率下循环加卸载试验,分析了声发射信号与应力水平的关系,研究了混凝土损伤演化规律;王普等^[7]从能量角度研究了混凝土循环加卸载损伤演化特性;Meng等^[8-9]利用混凝土、岩石类材料的应力-应变曲线进行能量计算,系统阐述了变形过程中材料能量积聚、耗散及其演化规律;彭刚等^[10]进行了不同应变率下混凝土损伤破坏机理研究,分析材料的应力-应变曲线,研究了应变率效应对材料损伤破坏影响;孟庆彬等^[11]提出用材料应力-应变曲线面积表征循环加卸载作用下岩石能量大小,同时揭示了围压对受载岩样能量演化及分配规律的作用;梁辉等^[12]分析了混凝土循环加卸载历程中单个加载和卸载规律;刘智等^[13]通过混凝土循环加卸载试验获得材料应力-应变曲线,并建立了含滞回效应的混凝土损伤模型;胡善超^[14]对高孔隙率混凝土进行循环加卸载试验,总结了材料破坏过程中能量耗散规律,并给出了损伤演化方程;肖杰等^[15]通过开展不同围压循环加卸载试验,分析围

压、应变率对应力-应变曲线中滞回环面积的影响规律;于江等^[16]利用声发射技术,研究循环加卸载作用下再生混凝土的受压损伤特性,分析了材料受压损伤破坏全过程。

上述研究工作极大地推动了混凝土类材料理论发展及工程应用,现有文献中大多开展混凝土类材料在准静态单轴循环加卸载作用下的试验研究:一方面集中在材料屈服点或峰值点附近区域的能量特性研究,但不易获得混凝土类脆性材料峰后应力-应变曲线,因脆性材料的瞬时破坏特性,峰后应力-应变曲线以直线形式降低,导致无法准确计算峰后能量;另一方面通过材料应力-应变曲线积分来计算能量,但常规单轴或三轴压缩试验无法分离混凝土类材料的弹性应变和塑性应变,只能假定弹性模量恒定不变来求解其弹性能,则造成混凝土类材料能量计算结果存在较大误差。而钢纤维混凝土应力-应变曲线滞回环特性及其与能量的关系,以及饱水(未饱水)处理的钢纤维混凝土在循环加卸载作用下的力学性能等相关研究相对较少。鉴于此,本文开展了循环加卸载作用下的饱水(未饱水)试验,以及不同围压下循环加卸载试验,重点探讨了饱水(未饱水)处理后材料的强度变化规律,研究了材料应力-应变曲线的滞回环特性及其与能量的关系。

1 试验设计

1.1 试件制备

本文中钢纤维混凝土原材料:普通硅酸盐水泥;瓜子片为粗骨料;细度模数 2.39 中砂为细骨料;0213 型钢纤维;自来水;适量高性能减水剂。采用以上原材料,在试件制备前,混凝土强度设计值为 45 MPa。经过多次调配,最终确定了一组合适的混凝土配合比,按照混凝土试件标准养护方法,测得钢纤维混凝土试件立方体抗压强度标准值为 46.3 MPa,故本文取材料强度为 C45。圆柱体试件直径 50 mm、高度 100 mm。

1.2 试验设备

试验由安徽大学 MTS816 测试系统完成,如图 1 所示。图中 1- 液压循环控制系统;2- 三轴操作室;3- 控制柜;4- 数据收集系统;5- 液压油;6- 三轴腔;7- 定位杆;8- 传感器接口;9- 压头;10- 试件;

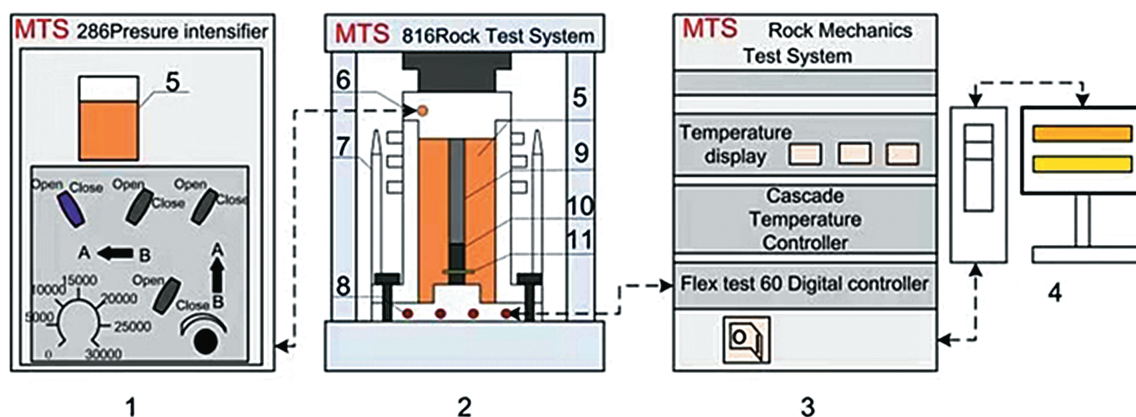


图 1 MTS816 测试系统

11- 环向引伸计。试验前将试件的轴心与压头中心对齐,连接好轴向引伸计、环向引伸计和力传感器。试验中通过 MTS 伺服控制系统试验程序实现围压改变。

1.3 试验方案及程序设计

本次试验重点讨论围压、饱水(未饱水)对钢纤维混凝土材料力学性能影响,通过控制压头的加载速率 0.01 mm/s ,即各组准静态试验应变率恒为 $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

试验程序设计:(1)满足静水压状态。轴向力和环向围压同步加载使得在相同的时间内轴向与环向应力相等;(2)保持围压不变,通过压头的位移控制,实现轴力加卸载。其中,峰值应力前 4~5 次加卸载循环,峰值应力后 10~15 次加卸载循环;(3)卸围压,卸轴力。

2 试验结果及其机理分析

2.1 无围压循环加卸载试验结果及分析

钢纤维混凝土材料在无围压准静态循环加卸载条件下轴向、环向 $\sigma-\varepsilon$ 曲线如图 2 所示。其中,轴向引伸计应力-应变曲线如图中黑色曲线所示,环向引伸计应力-应变曲线如图中红色曲线所示。钢纤维混凝土材料抗压强度为 45.16 MPa ,轴向峰值应力对应的峰值应变为 0.0036 ,弹性模量 29.65 MPa ,泊松比 0.154 。

试验完成后试件形态如图 3 所示。试件上的微裂纹从一端向另一端延伸,并未出现“正八字”或“倒八字”贯穿裂缝,主要呈现出斜剪切破坏,试件完整性较好,裂缝宽度较小,且无混凝土明显脱

落。由此可知,试件在多次循环加卸载作用下孔隙率不断降低,材料逐渐压密,这是导致试件破坏形态的根本原因。

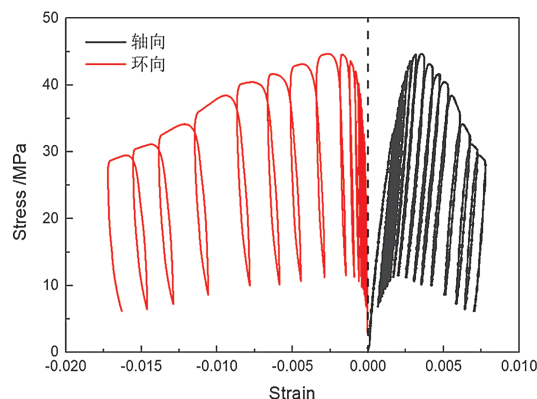


图 2 轴向、环向应力-应变曲线



图 3 循环加卸载钢纤维混凝土试件破坏形态

2.2 饱水与未饱水(干燥)试件循环加卸载试验结果及分析

在围压分别为 5 MPa 、 30 MPa 、 40 MPa 下,饱水 10 天/未饱水(干燥)钢纤维混凝土应力-应变曲线如图 4~6 所示,试验结果如表 1 所示。

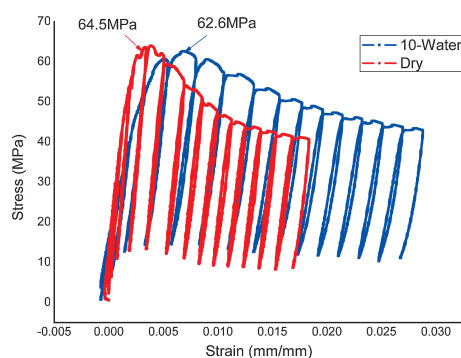


图 4 应力-应变曲线 / 围压 5 MPa

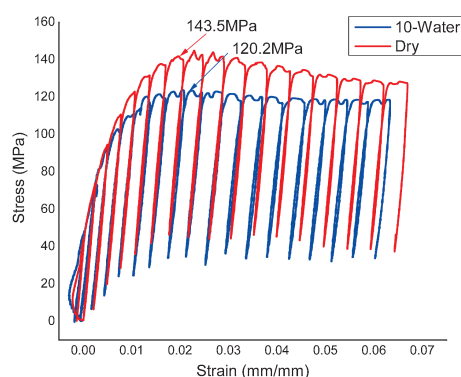


图 5 应力-应变曲线 / 围压 30 MPa

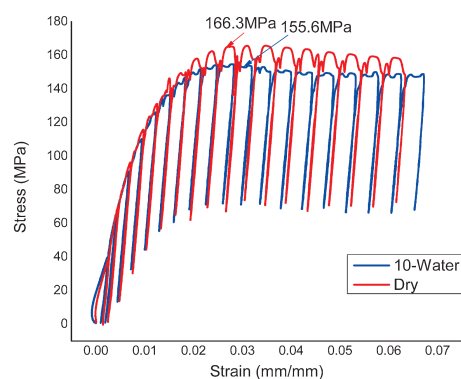


图 6 应力-应变曲线 / 围压 40 MPa

表 1 不同围压条件下饱水与干燥材料的峰值应力 (MPa)

围压	试验条件	峰值应力
5 MPa	饱水 10 天	62.6 MPa
	干燥	64.5 MPa
30 MPa	饱水 10 天	120.2 MPa
	干燥	143.5 MPa
40 MPa	饱水 10 天	155.6 MPa
	干燥	166.3 MPa

由试验曲线和表 1 中试验结果,可见在相同围压下,饱水与未饱水试件有着明显差异,主要体现

在饱水试件峰值应力对应的峰值应变稍大,且有较明显的体积压缩现象^[17],但钢纤维混凝土材料强度降低。

由于未饱水试件颗粒与颗粒、颗粒与钢纤维之间结构致密,矿物颗粒、钢纤维与胶凝填充物紧密。但是,饱水试件颗粒与颗粒、颗粒与钢纤维之间结构相对疏松且多孔,在水的溶蚀作用下使得胶凝材料形成溶蚀孔,减弱了胶凝材料的胶结作用。由于水弱化和孔隙水压力双重作用,对钢纤维混凝土试件微裂纹的开裂条件以及裂纹扩展等影响,是导致饱水钢纤维混凝土试件强度降低的根本原因。

2.3 不同围压循环加卸载试验结果及分析

为了揭示不同围压循环加卸载作用下钢纤维混凝土材料从初始变形直至破坏过程中的能量演化及分配规律,开展了恒应变率下不同围压条件的系列试验,试件应力-应变曲线如图 7~9 所示,试验结果如表 2 所示。

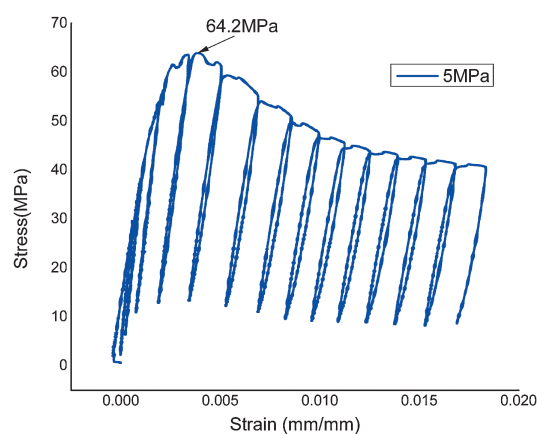


图 7 应力-应变曲线 / 围压 5 MPa

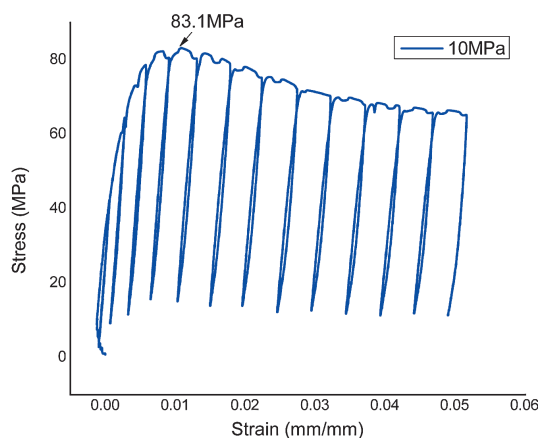


图 8 应力-应变曲线 / 围压 10 MPa

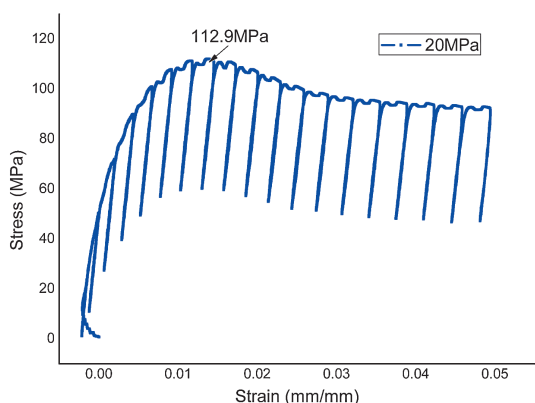


图 9 应力 - 应变曲线 / 围压 20 MPa

表 2 不同围压条件下材料峰值应力 (MPa)

围压	峰值应力
5 MPa	64.2 MPa
10 MPa	83.1 MPa
20 MPa	112.9 MPa

由图 7~9 和表 2 中试验结果分析可得以下结论:

(1) 钢纤维混凝土材料在三轴循环加卸载作用下应力 - 应变曲线出现滞回环效应, 原因在于钢纤维混凝土是非均质理想弹性材料, 考虑材料本身的微裂纹、微孔洞等因素, 当试件加载到某一应力值时再卸载, 卸载时应力路径与加载应力路径不重合, 则形成应力 - 应变曲线的封闭环滞回环。滞回环的面积表征试件从受载时的裂纹出现、扩展、闭合、贯穿直至破坏全过程所消耗的能量, 面积越大, 则说明试件破坏所需耗散能越多, 试件破损越严重。

(2) 滞回环最大面积通常出现在材料的峰值应力附近, 即说明试件此时出现较大宏观裂缝或破坏所需的耗散能较大。随着围压的增大, 面积最大的滞回环对应的应力点随之推迟出现, 原因在于围压有效地抑制了裂缝的发展, 同时增强了材料的塑性力学特性。

(3) 随着围压值提高, 材料峰值应力后的应力 - 应变曲线变得平缓, 材料的塑性变形特征明显。随着围压值不断增大, 峰值应力后应变明显变大, 但应力变化不大, 体现材料弱延性破坏特征; 且材料的峰值应力提高明显, 表明围压能有效提高材料的强度和抑制变形。

2.4 三轴循环加卸载试验能量计算

钢纤维混凝土三轴试验, 轴向应力 σ_1 做正功, 试件因轴向压缩变形而吸收和储存能量, 同时试件侧向膨胀体积变大, 侧向围压 σ_3 因抑制环向变形做负功, 故试件因环向膨胀变形而消耗能量。考虑到试件在试验过程中恒温无热交换, 则由能量守恒原理可得:

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

式中 U^0 ——试件从外部吸收的总能量;

U^e ——弹性能;

U^d ——试件因微裂纹或孔隙不断发展、贯通所耗散的能量。

根据试件储存的弹性应变能是可逆的、应力 - 应变曲线中滞回环面积表征耗散能的大小以及应力 - 应变曲线特性, 可采用试件应力 - 应变曲线对钢纤维混凝土的弹性能和耗散能进行计算, 当循环加卸载曲线达到某一应力 σ' 时, 单位体积弹性能密度 u_i^e 与耗散能 u_i^d 的关系如图 10 所示。

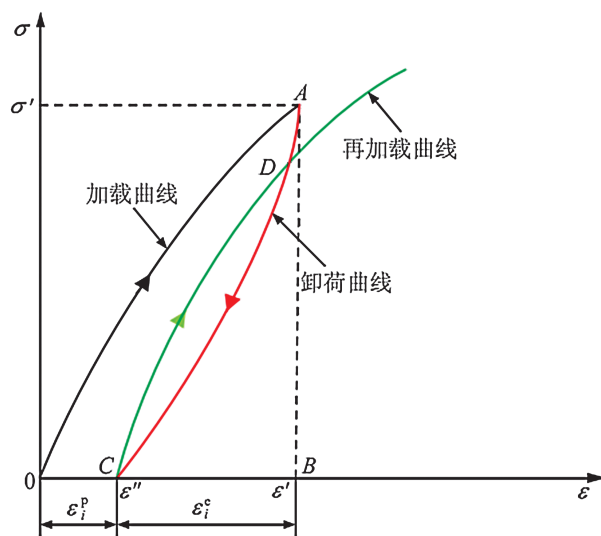


图 10 循环加卸载试件能量密度计算示意图

三轴循环加卸载过程中, 加载段试验曲线下的面积表征试件所吸收的总能量密度 u^0 , 卸载段试验曲线下的面积表征弹性能密度 u^e , 两者之差 $u^0 - u^e$ 即耗散能密度 u^d , 亦即应力 - 应变曲线中加载卸载之间的滞回环面积, 这是导致材料内部微裂纹扩展、损伤积累和塑性变形的原因。其中, u_i^e 与 u_i^d 计算表达式为

$$\begin{cases} u_i^e = \int_{\varepsilon_i^{\prime\prime}}^{\varepsilon_i^{\prime}} \sigma_i d\varepsilon_i \\ u_i^d = \int_0^{\varepsilon_i^{\prime}} \sigma_i d\varepsilon_i - \int_{\varepsilon_i^{\prime\prime}}^{\varepsilon_i^{\prime}} \sigma_i d\varepsilon_i \end{cases} \quad (2)$$

3 结论

通过开展准静态三轴循环加卸载钢纤维混凝土材料系列试验,获得了各组不同试验条件下材料应力-应变曲线,得出以下几点结论:

(1) 经过饱水处理的钢纤维混凝土材料,峰值应力对应的峰值应变稍大,且表现出明显的体积压缩现象,但材料强度降低。

(2) 钢纤维混凝土材料在三轴循环加卸载作用下应力-应变曲线出现闭合环形区域亦即滞回环效应。

(3) 滞回环最大面积通常出现在材料的峰值应力附近,随着围压增加,面积最大的滞回环对应的应力点随之推迟出现。

(4) 随着围压值不断增大,峰值应力对应的峰值应变后,应变增加明显,但应力变化不大。材料应力-应变曲线趋向平缓,体现出塑性变形的特征,且材料的峰值应力明显增大。

参考文献:

- [1] 刘博文,彭刚,马小亮,等.不同侧应力状态下混凝土循环加卸载损伤特性[J].长江科学院院报,2017,34(11):121-125,131.
- [2] 王四巍.单轴和三轴应力下塑性混凝土性能研究[D].郑州:郑州大学,2010.
- [3] 曾晟,张妮,孙冰,等.干燥和饱水状态下岩石混凝土一体两介质受力特征试验研究[J].硅酸盐通报,2018,37(7):2206-2209,2213.
- [4] 王孝政,彭刚,罗曦,等.混凝土单轴循环加卸载试验及声发射特性[J].水利水运工程学报,2016(4):92-97.

- [5] 胡海蛟,彭刚,谢玖杨,等.混凝土循环加卸载动态损伤特性研究[J].工程力学,2015,32(6):141-145.
- [6] 吴彬,胡伟华,唐克静,等.混凝土循环加卸载动态损伤演化推移分析及损伤值估计模型[J].长江科学院院报,2016,33(10):140-144.
- [7] 王普,陈灯红,彭刚,等.基于能量法的混凝土循环加卸载动态损伤特性[J].水利水电技术,2020,51(2):192-197.
- [8] MENG Q B,ZHANG M W,ZHANG Z Z,et al. Experimental research on rock energy evolution under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J].Geotechnical Testing Journal,2017,41(4):717-729.
- [9] MENG Q B,ZHANG M W,HAN L J,et al. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(10):3873-3886.
- [10] 彭刚,王乾峰,陈灯红,等.基于声发射参数的混凝土循环加卸载动态损伤破坏特性研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(6):1-9.
- [11] 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.
- [12] 梁辉,彭刚,邹三兵,等.循环荷载下混凝土应力-应变全曲线研究[J].土木工程与管理学报,2014,31(4):55-59.
- [13] 刘智,赵兰浩,吴晓彬,等.循环荷载下考虑滞回效应的混凝土损伤模型[J].工程科学与技术,2020,52(4):117-123.
- [14] 胡善超.循环加卸载下高孔隙率混凝土力学特性及能量响应特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [15] 肖杰,彭刚,邓媛,等.循环加卸载下混凝土滞回环特性研究[J].水利水运工程学报,2016(6):97-102.
- [16] 于江,皮滢杰,秦拥军.循环荷载下再生混凝土损伤声发射特性[J].材料导报,2021,35(13):13011-13017.
- [17] 张永亮,姚华彦,朱大勇,等.饱水混凝土常规三轴压缩力学特性研究[J].混凝土,2015(3):63-66.