

文章编号:1007-9629(2024)05-0432-07

湿筛混凝土循环拉伸和循环拉压力学特性

吴 瑾¹, 陈徐东^{1,*}, 甘元楠², 张忠诚¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024;

2. 中国安能集团第二工程局有限公司, 江西 南昌 330095)

摘要:为探究湿筛混凝土在循环轴拉作用下的损伤过程和裂缝演变规律,基于声发射(AE)技术,对加载速率为 $1, 10 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的混凝土试件分别进行循环拉伸和循环拉压试验。结果表明:随着循环次数的增加,试件的卸载和重加载刚度降低,塑性应变增大;当位移达到 0.1 mm 时,试件的载荷-位移曲线已接近软化阶段,此后裂缝发展速率降低,损伤变量减小;试件在循环加载过程中,随着位移的增加,AE累计振铃计数和累计撞击次数基本呈阶梯式增长。

关键词:湿筛混凝土;循环拉伸加载;循环拉压加载;声发射

中图分类号:TV431

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.007

Cyclic Tensile and Cyclic Tension Compression Properties of Wet-Screened Concrete

WU Jin¹, CHEN Xudong^{1,*}, GAN Yuannan², ZHANG Zhongcheng¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. China Anergy Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330095, China)

Abstract: To investigate the damage process and crack evolution of wet screened concrete under the action of cyclic tensile and cyclic tension compression, the cyclic tensile tests and cyclic tension compression tests of concrete specimens with loading rates of $1, 10 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ were carried out by acoustic emission (AE). The results show that the specimens of the unloading and reloading stiffness decreases with the increase of the cycle times, and the plastic strain increases with the cyclic loading. When the displacement reaches 0.1 mm , the load displacement curve of the specimen is approaching the softening stage, and then the crack development speed decreases, and the damage index decreases. In the process of cyclic loading, with the increase of the displacement, the AE accumulative ring counts and the cumulative numbers of hit basically increase in a step pattern.

Key words: wet-screened concrete; cyclic tensile loading; cyclic tension compression loading; acoustic emission

大坝混凝土内部裂缝的发展与大坝的整体性和安全性存在重要关联性^[1-2]。在工程设计中,混凝土材料大多被设计为受压构件;然而,实际受荷情况往往更加复杂^[3],混凝土构件还会受到重复拉应力的作用。为此,徐慧颖等^[4]探究了不同缝高比大坝混凝土的断裂特性,发现其失稳断裂韧度随着缝高比的增大而减小;宋玉普等^[5]将动态三轴拉压应力状态下的

大骨料混凝土试件和湿筛二级配混凝土试件的强度特征进行对比,发现后者应变敏感率更高。目前,大体积混凝土材料的动态试验一般是在湿筛后进行的^[6],因此,开展湿筛混凝土的循环轴拉试验研究尤为重要^[7]。

声发射(AE)信号是指在外来荷载作用下材料内部发生变形或者损伤时,应变能以弹性波的形式

收稿日期:2023-07-05;修订日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979090, 52379124);河海大学优秀研究生学位论文培育项目(422003471)

第一作者:吴 瑾(1997—),女,江西萍乡人,河海大学硕士生.E-mail:jnwwu0151@163.com

通讯作者:陈徐东(1985—),男,江苏如东人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail:cxdong1985@163.com

释放的一种信号^[8]. AE技术是一种有效监测混凝土材料裂缝特征的方法^[9].

为探究湿筛混凝土在循环轴拉作用下的裂缝发展特征,本文采用不同加载速率对湿筛二级配混凝土开展循环拉伸试验和循环拉压试验,同时结合AE技术和数字图像相关方法探究了其损伤发展特性和裂缝演变特征,以期为湿筛混凝土结构在循环轴拉状态下的断裂特性提供一定的参考.

1 试验

1.1 试件制备

采用湿筛法将原级配为四级配的混合集料制作为二级配湿筛混凝土,每种工况共制作3组尺寸为 $\phi 150\times 300$ mm圆柱体试件. 水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料采用级配连续的碎石;细骨料为细度模数为2.5的河砂;粉煤灰为活性指数为80%的F类Ⅱ级粉煤灰;拌和水为当地自来水;减水剂为含固量(质量分数)为30%的聚羧酸高性能减水剂. 湿筛混凝土配合比如表1所示.

采用MTS322型电液伺服万能试验机进行循环轴拉加载. 将试件侧表面分为8等分,间隔粘贴AE传感器和引伸计,如图1所示. 循环拉伸试验加载过程采用应变控制,加载速率分别为1、10 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$,卸载过程采用荷载控制;循环拉压试验加载方式与循环拉伸试验相同,底部压力为10 kN.

1.2 声发射测试

选用美国PAC公司的8通道SAMOSTM型AE检测设备对试件进行实时监测,前置放大器增益设置为40 dB,阈值设置为30 dB,采样频率为1 MHz. 在试件表面相应位置粘贴U型夹头,为确保声信号的良好传导,先在AE传感器表面涂抹凡士林;再将传感器固定至预设位置. 6个传感器分别距离试件上下表面20 mm.

2 结果与分析

2.1 荷载-位移特征曲线

图2为试件在循环拉伸和循环拉压加载作用下

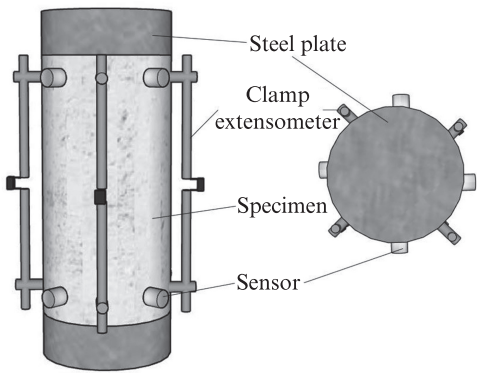


图1 试件加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen loading

的荷载-位移曲线. 其中 l_s 代表循环拉伸加载, l_y 代表循环拉压加载,后缀数字1、10分别表示加载速率1、10 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

由图2可见:(1)不同加载速率下试件循环拉伸加载与循环拉压加载下的荷载-位移曲线包络线基本一致,在加载和卸载过程中,试件的卸载应力-应变曲线未沿着加载曲线原路返回,而是形成一个滞回环;当加载至某一应力水平后卸载,卸载曲线与原加载曲线不重合,且低于原加载曲线,并与后续相邻的再加载曲线形成一个封闭的环形区域.(2)随着加载速率的提高,试件的荷载-位移曲线滞回环斜率有所减小,这意味着试件的刚度衰减加快,可能是由于加载速率提高后,混凝土的损伤累计和能量耗散加大,导致其内部结构和力学性能更加恶化.

由图2还可见:试件在循环拉伸加载作用下,当加载速率为1、10 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时对应的最终位移平均值分别为0.643、0.750 mm;试件在循环拉压加载作用下,当加载速率为1、10 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时对应的最终位移平均值分别为0.755、0.750 mm. 一方面,这是因为从开始加载至达到峰值荷载阶段,试件裂缝逐渐产生并延伸,而加载速率较快时,试件内部裂缝无法充分开展;另一方面,是因为在循环拉压加载作用下,试件在压缩过程中产生了更多的微裂纹和塑性变形,导致其刚度降低,而试件在拉伸过程中,其损伤程度相对较小,这也证明了混凝土材料存在拉压异性和滞后效应.

表1 湿筛混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of wet-screened concrete

Unit: kg/m^3

Cement	Sand	Gravel				Water	Fly ash	Water reducer
		0-20 mm	20-40 mm	40-80 mm	80-120 mm			
150.80	591.00	400.00	320.00	400.00	180.00	115.00	81.20	2.66

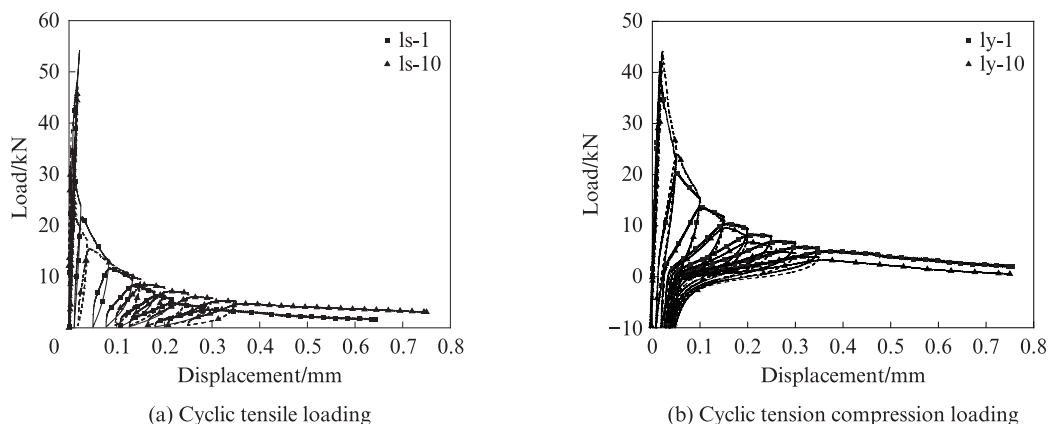


图2 试件在循环拉伸和循环拉压加载作用下的荷载-位移曲线
Fig. 2 Load-displacement curves of specimens under cyclic tensile and cyclic tension compression loading

2.2 损伤定量分析

损伤变量 $D^{[10]}$ 是一种表征材料内部结构不可逆演化过程的物理量. 根据损伤力学理论和各向同性的假设, D 可以表示为0(内部无损伤)~1(结构完全失效)的标量,它能够清晰地分析材料内部损伤的变化过程,从而获得材料的失效特征. 因此,本试验以混凝土试件的位移为参数,采用 D 对湿筛混凝土内部结构损伤过程进行定量分析,计算表达式为:

$$D = \frac{\sum_0^{x'} P}{\sum_0^x P} \quad (1)$$

式中: x 为加载结束时试件发生的位移; x' 为某一时刻试件发生的位移; P 为应变发生时刻的荷载,kN.

试验过程中,将试件各时刻的荷载-位移曲线所围面积(图3阴影部分)与加载结束时的荷载-位移曲线所围面积之比作为损伤变量 D ,对加载过程进行归一化处理,最终得到图4.

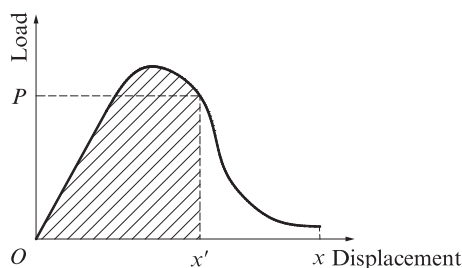


图3 试件的损伤变量计算示意图
Fig. 3 Schematic diagram of damage index calculation of specimen

由图4可见:(1)不论是循环拉伸加载还是循环拉压加载,试件在加载过程中的损伤变量变化速率均随着时间的延长而逐渐减小. 对比荷载-位移曲线(图2)可以看出,当位移达到0.1 mm时,荷载-位移

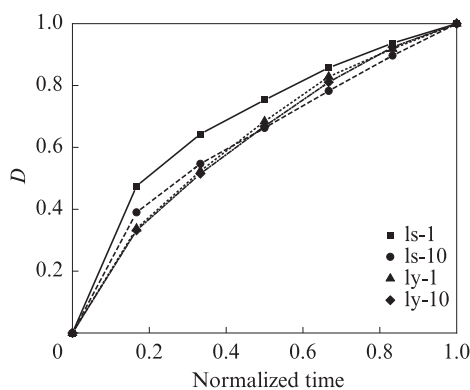


图4 不同加载速率下试件的循环拉伸和循环拉压损伤变量
Fig. 4 Cyclic tensile and cyclic tension compression damage indexes of specimens at different loading rates

曲线已经接近软化阶段,此后裂缝扩展速率逐渐降低,因此损伤变量也逐渐减小.(2)当达到相同位移值时,加载速率越大的试件,其损伤变量越小,说明随着加载速率的提高,试件的损伤变量逐渐向线性发展,破坏阶段时间短,破坏也更加突然. 相比循环拉伸作用,试件在循环拉压作用下损伤变量的减小趋势较缓慢,这可能是试件在压缩过程中,塑性应变积累速率降低,拉伸荷载下产生的微裂缝在压缩荷载作用下发生闭合所致.

3 声发射信号

3.1 振铃计数

振铃计数是衡量AE信号活跃性的重要指标. AE振铃计数的累计特征能够反映加载过程中AE活动的总量和频度^[11],可通过累计振铃计数反映AE信号的活跃度,以此来表述混凝土内部损伤与裂纹开展的剧烈程度.

图5、6为不同加载速率下试件的循环拉伸和循

环拉压载荷-位移曲线。

由图5、6可见:当荷载达到峰值荷载之前,AE累计振铃计数和累计撞击数均较低,说明此阶段混凝土内部结构变化较少,内部损伤发展程度较轻;当载荷-位移曲线进入软化阶段时,累计振铃计数和累计撞击数增速急剧增加,此时裂纹不断扩展,内部损伤加剧;在载荷-位移曲线下落阶段,AE累计振铃计数

和累计撞击数均急剧增加,可能是加载前期的荷载呈线性增长,内部裂纹来不及扩展。

由图5、6还可见,试件在试验过程中,随着位移的变化,AE累计振铃计数和累计撞击数基本呈阶梯式增长,且每个阶梯逐级递减。可能是在卸载过程中,几乎没有AE信号,试件内部几乎没有裂缝产生。

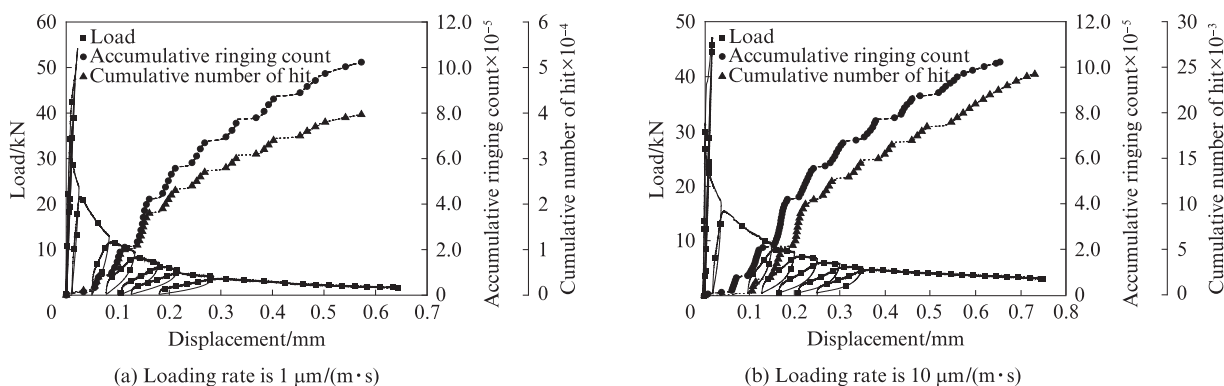


图5 循环拉伸加载作用下试件的AE累计振铃计数、累计撞击数与载荷-位移曲线

Fig. 5 AE accumulative ring counts, cumulative numbers of hit and load-displacement curves of specimens during cyclic tensile loading

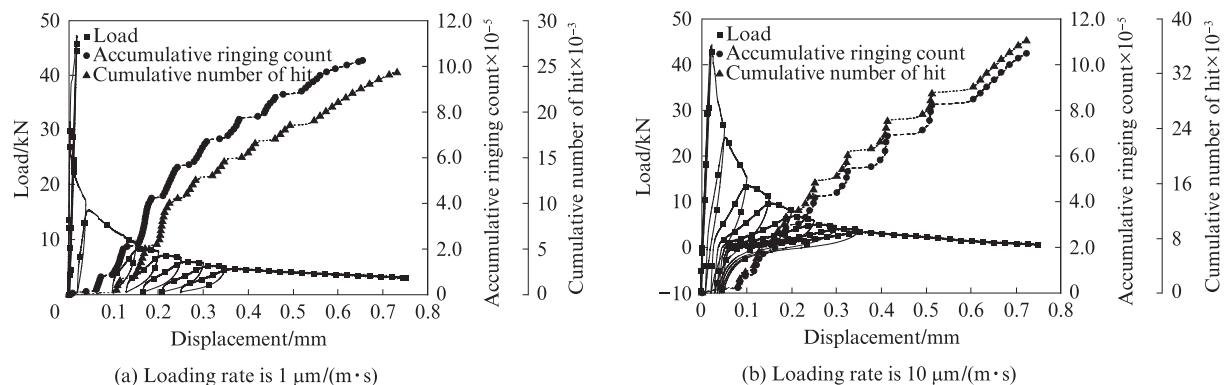


图6 循环拉压加载作用下试件的AE累计振铃计数、累计撞击数与载荷-位移曲线

Fig. 6 AE accumulative ring counts, cumulative numbers of hit and load-displacement curves of specimens during cyclic tension compression loading

图7、8为循环拉伸和循环拉压加载作用下试件的AE累计振铃计数、累计撞击次数和载荷-时间曲线。由图7、8可见:(1)AE累计振铃次数从载荷的峰值开始急剧增加。(2)混凝土试件达到循环拉伸载荷峰值的时间很短,应变变化很小。这是由于在微裂纹形成过程中,弹性波能量较低,捕捉到的AE信号较少;此外,载荷达到峰值后,裂纹的大小和数量迅速增加,导致传感器捕获到大量AE事件,从而使AE累计振铃计数迅速增加。

3.2 b 值特征

b 值可反映区域内不同级别地震之间的比例关系和地下介质的应力变化情况,通常与研究区域的应力水平成反比。在混凝土结构开裂过程中存在类

似于地震活动的行为,且所得到的AE信号与地震波相似。 b 值代表的是幅值较小的AE事件在所有事件中所占的比例^[12],该值越大说明幅值较小的AE事件越多。小幅值的AE事件代表的是混凝土结构中微裂纹的活动情况;大幅值的AE事件则代表混凝土结构中大裂缝的扩展。因此, b 值可以反映混凝土结构在整个加载过程中各个时间段的内部损伤情况。针对混凝土结构,将 b 值作为AE事件的分布斜率,调整后的计算表达式如式(2)所示^[13]:

$$\lg N = a - b \left(\frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (2)$$

式中: A_{dB} 为AE事件的幅值; N 为幅值大于 A_{dB} 的AE事件数; a 为经验常数。

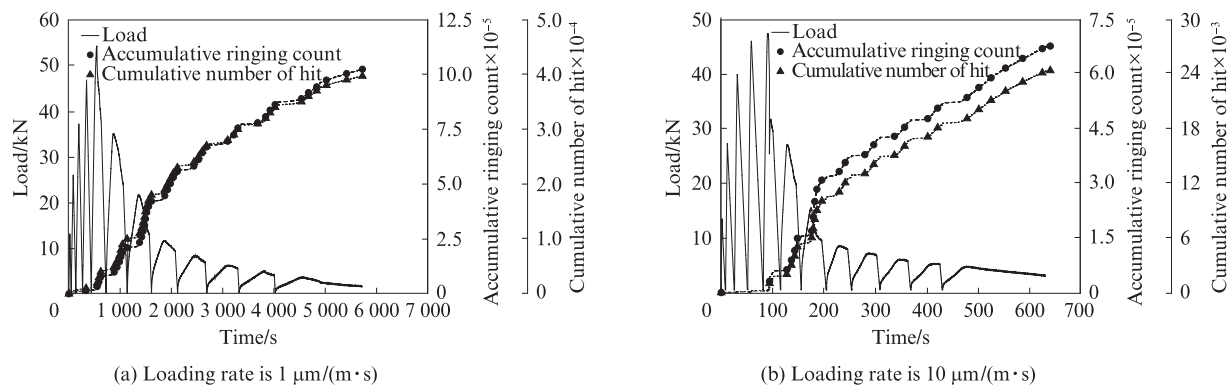


图7 循环拉伸加载作用下试件的AE累计振铃计数、累计撞击数与载荷-时间曲线

Fig. 7 AE accumulative ring counts, cumulative numbers of hit and load-time curves during cyclic tensile loading

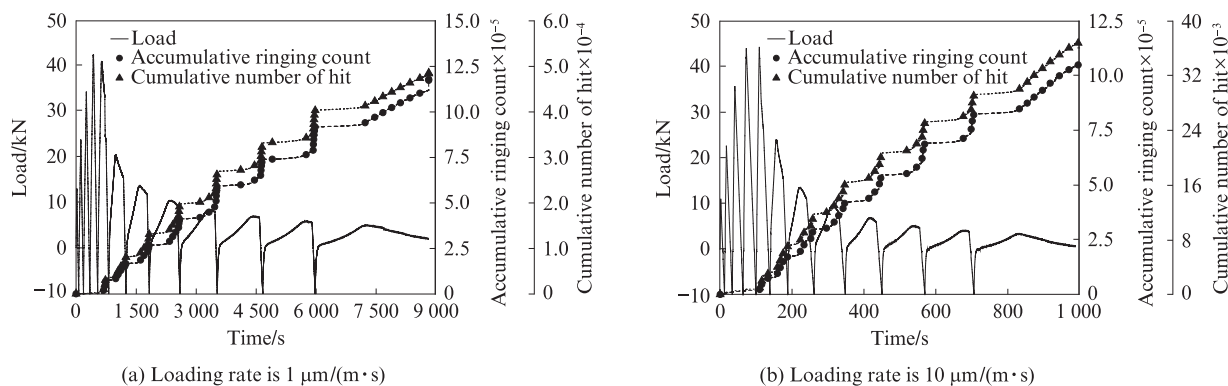


图8 循环拉压加载作用下AE累计振铃计数、累计撞击数与载荷-时间曲线

Fig. 8 AE accumulative ring counts, cumulative numbers of hit and load-time curves during cyclic tension compression loading

图9、10为循环拉伸和循环拉压加载作用下试件的 b 值与载荷-时间曲线。由图9可见:(1)在循环拉伸加载作用下,当荷载由0至峰值荷载时, b 值较大,说明在此阶段试件未产生裂缝或仅产生较小的微裂纹;而当荷载下降时, b 值曲线开始呈波动状变化,说明试件内部裂缝开始发展。(2)当加载速率为1 μm/(m·s)时, b 值曲线波动剧烈且密集;当加载速率为10 μm/(m·s)时, b 值曲线分布更为曲折。这说明在裂缝开展过程中,加载速率较小时试件内部裂缝能够充分发展;而加载速率较大时,试件内部裂缝发展过程不够充分,往往会突然产生较大裂缝。由图10可见:(1)在循环拉压加载作用下,当荷载由0达到峰值荷载之前, b 值较小,说明在循环拉压加载作用下,试件在达到峰值荷载前也会产生大裂缝。(2)在循环拉压加载作用下,当荷载加载到一个小峰值或卸载到10 kN时, b 值均会出现极小值,说明试件在这2个阶段均会产生较大裂缝。

由试件循环拉伸加载和循环拉压加载的 b 值曲线基本趋势上看,二者均是在波动中下降的。不同的是,当加载速率为10 μm/(m·s)时, b 值在峰后一段时间内迅速下降至全曲线的最小值。该时间段内,单位时间产生的AE事件数量递增, b 值减小,表明该时

间段内不仅AE事件数量的增速变快,而且其幅值较高的AE事件占比也不断增加,这时1个大裂缝迅速开展,应变能剧烈释放;当加载速率为1 μm/(m·s)时, b 值在荷载峰后的下降就稍显缓慢,可分成2个阶段的下降过程——峰后的第1个下降阶段表明有一定程度的大裂缝扩展,释放出较多的应变能;在第2次下降之前,有1个明显的 b 值上升过程,该过程是大量微裂纹开展、应变能积聚的过程。当微裂纹发展到一定阶段即开始向大裂缝扩展时,应变能的积聚也达到极值,开始剧烈释放。

3.3 裂缝破坏特征

采集AE信号可对混凝土结构的损伤位置进行区域定位^[14]。图11为不同加载工况下声发射数据定位。由图11可见,在循环拉伸加载过程中,试件内部的AE信号主要集中在其中间位置,即试件在加载过程中的破坏原因主要是其中心产生了裂缝并不断扩展,最终导致其被拉断。图11(b)显示,AE信号多数处于试件边缘,其原因可能是拉伸过程中存在偏心,导致该处受拉应力值较大。

为探究AE信号来源,本研究将AE采集的信号按能量大小分为[0,100)(图中方形点)、[100,500)(图中圆形点)和[500,∞)(图中五角星点)3种类别。

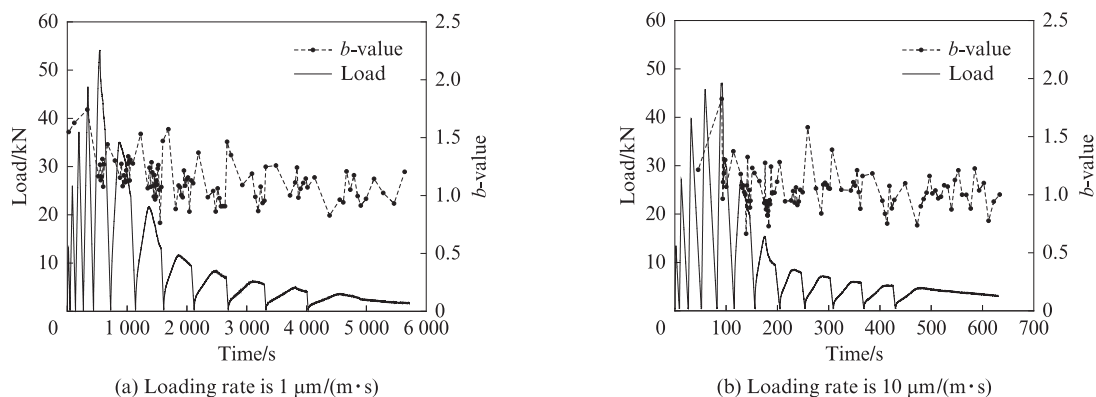
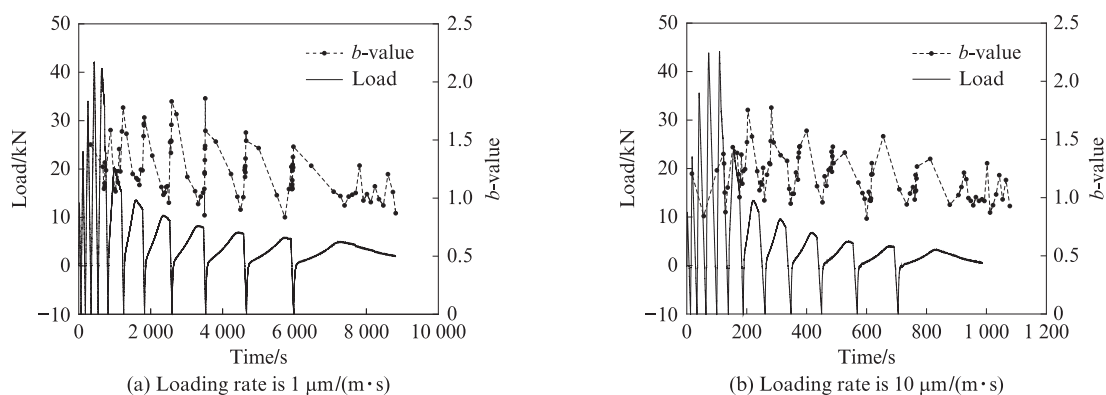
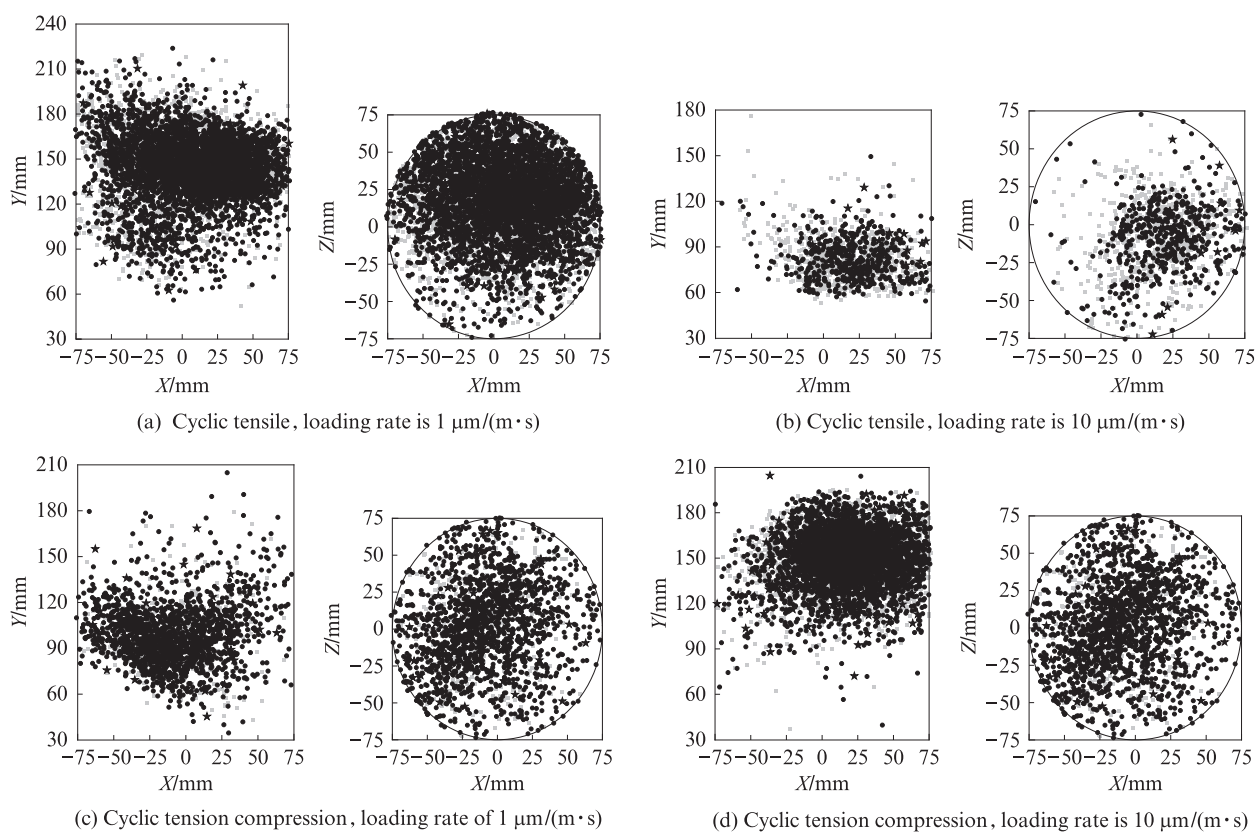
图9 循环拉伸加载作用下试件的 b 值与载荷-时间曲线Fig. 9 b -value and load-time curves of specimens during cyclic tensile loading图10 循环拉压加载作用下试件的 b 值与载荷-时间曲线Fig. 10 b -value and load-time curves of specimens during cyclic tension compression loading

图11 不同加载工况下AE数据定位

Fig. 11 AE data location under different loading conditions

由图11还可见,试件在加载过程中能量值为[100, 500)的信号最多,占总数的65%~80%,能量值[500, ∞)的信号最少,仅占总数的2%~3%。这是因为试件在循环加载时,伴随着微裂纹的扩展和愈合,裂缝开展较充分,产生了较多的[100, 500)信号。对比图11(c)、(d)可知,在循环拉压加载作用下,加载速率为 $10 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的试件能量值大于500的信号比加载速率为 $1 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的试件多,表明加载速率大的试件破坏程度更高。

4 结论

(1)随着循环次数的增加,混凝土的卸载和重加载刚度不断降低,塑性应变随着循环加载的持续进行而逐渐增大。

(2)混凝土在循环拉伸和循环拉压加载过程中的损伤变量均呈逐渐减小趋势。当位移达到0.1 mm时,混凝土的荷载-位移曲线已经接近软化阶段,此后裂缝开展速率逐渐降低,损伤指数也逐渐减小。

(3)随着位移的增加,混凝土的AE累计振铃计数和累计撞击次数基本呈阶梯型增长,且每个阶梯逐级递减。循环拉伸加载作用下,混凝土的AE累计振铃计数和累计撞击次数在前期增速较快,后期增速变缓,且加载速率越快,曲线凹凸性越明显;循环拉压加载作用下,混凝土的AE累计振铃计数和累计撞击次数在各个阶段的增速基本相近。

参考文献:

- [1] 徐世烺,周厚贵,高洪波,等.各种级配大坝混凝土双K断裂参数试验研究——兼对《水工混凝土断裂试验规程》制定的建议[J].土木工程学报,2006,39(11):50-62.
XU Shilang, ZHOU Hougui, GAO Hongbo, et al. An experimental study on double-K fracture parameters of concrete for dam construction with various grading aggregates[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 50-62. (in Chinese)
- [2] 徐潇航,胡张莉,刘加平,等.基于机器学习回归模型的三峡大坝混凝土强度预测[J].材料导报,2023,37(2):45-53.
XU Xiaohang, HU Zhangli, LIU Jiaping, et al. Concrete strength prediction of the Three Gorges Dam based on machine learning regression model[J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 45-53. (in Chinese)
- [3] 张娇艳,贡力,贾治元,等.基于改进物元可拓模型的水工混凝土耐久性影响因素分析[J].硅酸盐通报,2022,41(5):1617-1626.
ZHANG Jiaoyan, GONG Li, JIA Zhiyuan, et al. Analysis on influencing factors of durability of hydraulic concrete based on improved matter-element extension model[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1617-1626. (in Chinese)
- [4] 徐慧颖,卜静武,吴新宇.不同缝高比大坝混凝土断裂性能及声发射特性[J].水电能源科学,2022,40(3):100-104.
XU Huiying, BU Jingwu, WU Xinyu. Fracture properties and acoustic emission characteristics of dam concrete with different seam height ratios[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 100-104. (in Chinese)
- [5] 宋玉普,段小亮,施林林.大骨料混凝土在动态三轴拉压应力状态下的强度[J].建筑材料学报,2015,18(5):721-726.
SONG Yupu, DUAN Xiaoliang, SHI Linlin. Strength of large aggregate concrete under dynamic triaxial compression-compression-tensile stress state[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 721-726. (in Chinese)
- [6] 宋玉普,徐秀娟,刘浩.冻融循环后全级配混凝土及其湿筛混凝土的力学性能比较[J].水利学报,2012,43(1):69-75.
SONG Yupu, XU Xiujuan, LIU Hao. Comparison of mechanical properties of fully graded concrete and its wet-sieved concrete after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 69-75. (in Chinese)
- [7] 杲晓龙,王俊颜,郭君渊,等.循环荷载作用下超高性能混凝土的轴拉力学性能及本构关系模型[J].复合材料学报,2021,38(11):3925-3938.
GAO Xiaolong, WANG Junyan, GUO Junyuan, et al. Axial tensile properties and constitutive relationship model of ultra-high performance concrete under cyclic loading[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3925-3938. (in Chinese)
- [8] WU S X, CHEN X D, ZHOU J K. Influence of strain rate and water content on mechanical behavior of dam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 448-457.
- [9] CARPINTERI A, XU J, LACIDOGNA G, et al. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 529-537.
- [10] 何浩祥,陈奎,范少勇.基于弹塑性耗能率的地震损伤评估模型及分析方法[J].振动工程学报,2018,31(3):382-390.
HE Haoxiang, CHEN Kui, FAN Shaoyong. Seismic damage assessment model and analysis method based on elastic-plastic dissipation differential rate[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(3): 382-390. (in Chinese)
- [11] 王岩,王瑶,路桂娟,等.变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):45-49.
WANG Yan, WANG Yao, LU Guijuan, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete under variable amplitude cyclic tension loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2014, 42(1): 45-49. (in Chinese)
- [12] GUO Y Z, CHEN X D, YANG H Q, et al. Experimental study on direct tension behavior of concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2042-2055.
- [13] COLOMBO I S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using "b-value" analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 280-286.
- [14] 段进涛,仇培云,刘建勇,等.混凝土结构损伤声发射分析方法研究进展[J].科学技术与工程,2023,23(11):4487-4501.
DUAN Jintao, QIU Peiyun, LIU Jianyong, et al. Progress of study on acoustic emission analysis methods for damage of concrete structures[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4487-4501. (in Chinese)