

文章编号:1007-9629(2021)06-1146-08

不同密度等级泡沫混凝土的单轴压缩破坏特征

李升涛¹, 陈徐东¹, 张锦华², 董文³

(1.河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098; 2.东南大学土木工程学院,
江苏南京 210098; 3.96901部队,北京 100089)

摘要:为研究不同密度泡沫混凝土的压缩破坏特征,对密度为500~750 kg/m³的泡沫混凝土开展了不同加载速率下的单轴压缩试验,并采用数字图像相关(DIC)技术和声发射(AE)技术,获得了泡沫混凝土加载过程中的应变云图以及损伤演化特征.结果表明:随着密度的增大,泡沫混凝土的屈服应力、平台应力和能量吸收明显提高,荷载速率的影响更加明显;泡沫混凝土破坏时的裂缝数量减少,裂缝由垂直微裂纹转为带有倾斜角度的剪切型裂纹;声发射信号在峰前的活跃度增加,泡沫混凝土发生破坏时振铃计数突增现象更加集中;泡沫混凝土由延性破坏转变为脆性破坏.

关键词:泡沫混凝土;数字图像相关;声发射;单轴压缩

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.004

Failure Characteristics of Foam Concrete with Different Density under Uniaxial Compression

LI Shengtao¹, CHEN Xudong¹, ZHANG Jinhua², DONG Wen³

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210098, China; 3. Unit 96901, Beijing 100089, China)

Abstract: To study the compression failure characteristics of foam concrete with different density, uniaxial compression tests of foamed concrete with density of 500–750 kg/m³ were carried out at different loading rates. Based on digital image correlation(DIC) and acoustic emission(AE) technology, the damage evolution of foam concrete was analyzed. The results show that with the increase of density, the yield stress, platform stress and energy absorption increase obviously. At the same time, the influence of loading rate is more obvious. The number of cracks decreases when the foam concrete is damaged, and the cracks change from vertical micro-cracks to shear cracks with inclined angle. The activity of AE signal before the peak increases, and the sudden increase of ring count is more concentrated at the damage. The failure behavior shows the tendency from ductile failure to brittle failure.

Key words: foam concrete; digital image correlation(DIC); acoustic emission(AE); uniaxial compression

泡沫混凝土是一种轻质混凝土,具有强度密度可调整、耐火吸声、低碳环保等优点,在软基处理、道路加宽、桥台台背填土、隧道洞口和埋管的填土等方面应用广泛^[1-2].泡沫混凝土的突出特点为内部的泡

沫孔,这使得混凝土轻质化和保温隔热化,但同时其力学性能也受到了影响.其中,压缩特性是泡沫混凝土的主要力学性能之一,与普通混凝土有较大的差异,需要重点研究.

收稿日期:2020-07-21; 修订日期:2020-10-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979090);江苏省自然科学基金资助项目(BK20190075);中央高校基本科研业务费专项资金(B200202076)

第一作者:李升涛(1997—),男,湖南常德人,河海大学博士生.E-mail:13707366178@163.com

通讯作者:张锦华(1981—),男,江苏沐阳人,东南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhangjh@seu.edu.cn

目前,已经有很多学者对泡沫混凝土单轴压缩下的力学特性进行了研究,主要集中在孔隙率、孔形状、密度、抗压强度等之间的关系.Nambiar等^[3]研究发现,泡沫混凝土的抗压强度与密度受孔体积、孔径和孔间距的影响,其内部孔径分布越均匀,强度越高.另一方面,对于多孔材料,密度对力学性能的影响非常明显:侯明显等^[4]发现泡沫混凝土的孔隙率随着其干密度的增大而减小;张亚梅等^[5]的研究表明,随着泡沫混凝土密度等级的增加,其流动度先增大后减小,在密度为600 kg/m³时达到最大值;李广良等^[6]的研究结果显示,泡沫混凝土的吸水率随着密度的增大逐渐降低.但是,现有研究主要集中在基本力学性能和孔结构等方面^[7-8],对不同密度泡沫混凝土的开裂破坏过程研究还很少,损伤破坏机制尚不明确.要实现材料的合理设计和应用,仅从强度角度来考虑其力学性能是不充分的,必须进一步了解其变形失效机理.而如何观测泡沫混凝土的压缩损伤过程,测量多点开裂现象是目前应着重解决的问题.

数字图像相关方法(DIC)是一种新型的观测系统,可实时呈现试件破坏的位移场和应变场^[9].声发射(AE)可以通过获取试件破坏过程中产生的机械波来探测试件内部的损伤开裂^[10].Dai等^[11]利用DIC和AE技术对普通混凝土梁的断裂过程进行了研究,发现AE事件的位置变化与DIC对裂缝的观测结果是一致的.De Sutter等^[12]利用AE观测了不同破坏模式下声发射参数的变化,并利用DIC技术得到的应变场对结果进行了验证.然而,目前对泡沫混凝土破坏过程进行无损监测的研究仍然较少.

本文结合DIC和AE技术,分析了泡沫混凝土的力学性能、应变场及声发射参数,研究了单轴压缩下的裂缝萌生扩展以及破坏演变过程.研究结果有助于进一步了解泡沫混凝土的变形性能和力学响应规律,从而为泡沫混凝土的性能评估与数值建模提供依据.

1 试验方案

1.1 试样制备

发泡剂为产自威海中盛新型建材有限公司的高分子复合发泡剂,稀释倍数1:40;水泥为P·O 42.5R级普通硅酸盐水泥;水为自来水.泡沫混凝土的配合比如表1所示,其中 ρ 为湿密度.试验选用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,以测定泡沫混凝土的基本力学特性.

1.2 试验方案

采用MTS 322型闭环伺服控制试验机进行单轴

表1 泡沫混凝土的配合比
Table 1 Mix proportions of foam concretes

Sample No.	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Mix proportion/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$			m_w/m_B
		Cement	Water	Foam agent	
S5	500	310.00	186.00	0.59	0.6
S6	600	355.00	216.00	0.57	0.6
S7	750	450.00	270.00	0.53	0.6

压缩试验(见图1(a)),准静态加载位移控制速率为0.01 mm/s(L_1).为研究加载速率的影响,再选取2组加载速率($L_2=0.01$ mm/s, $L_3=0.10$ mm/s).采用美国Correlated Solutions公司VIC-3D系统观察试件表面的变形,具体流程如图1(b)所示.其中散斑直径约为0.5 mm,对应大小约为7个像素.将2个分辨率为2 048×2 048的工业相机用三脚架固定,然后进行图像采集和相机标定.另外,采用美国声学物理公司SAMOSTM16通道声发射测试系统采集混凝土损伤破坏的声发射信号.为排除外界的噪声干扰,按照声发射使用手册和预实验结果,设定35 dB为声发射门限值,以保证试验采集数据的有效性.

2 结果与分析

2.1 单轴压缩试验

图2为泡沫混凝土试件压缩荷载与压缩变形的关系曲线,每种工况给出了2条典型的曲线,分别用“1”,“2”表示.由图2可见:(1)泡沫混凝土的压缩响应呈现明显的阶段性,其初期加载行为与普通混凝土明显不同.加载曲线OA段的切线模量存在逐渐增大的过程,表明在起始的接触过程中存在一个初步密实阶段;AB段为弹性阶段,材料内部主要靠胞壁的弯曲等弹性变形方式来承担荷载;BC段为屈服阶段,应力集中发生在试件的薄弱胞壁,荷载和变形开始出现非线性特征;在达到峰值荷载($P_{\max}$)后,承载力会产生突然跌落并在C点后进入平台段,这是微裂纹和宏观裂纹扩展导致发生的局部失稳.试件在之后阶段的变形能力大大增强,其承载力稳定在一个较高的荷载水平($75\%P_{\max}\sim 80\%P_{\max}$).泡沫混凝土内部具有特殊的多孔结构,在受压过程中微小孔隙结构破坏,导致孔隙闭合,试件产生相应的压缩变形,消除了局部失稳.在剩余剪切带中的基质发生摩擦和互锁,使得承载力仍然存在,从而使得泡沫混凝土具有很好的变形性能和缓冲性能.

(2)试件的承载力随着密度的增大而增大,这主要是由于密度等级较高的泡沫混凝土内部的气孔胞

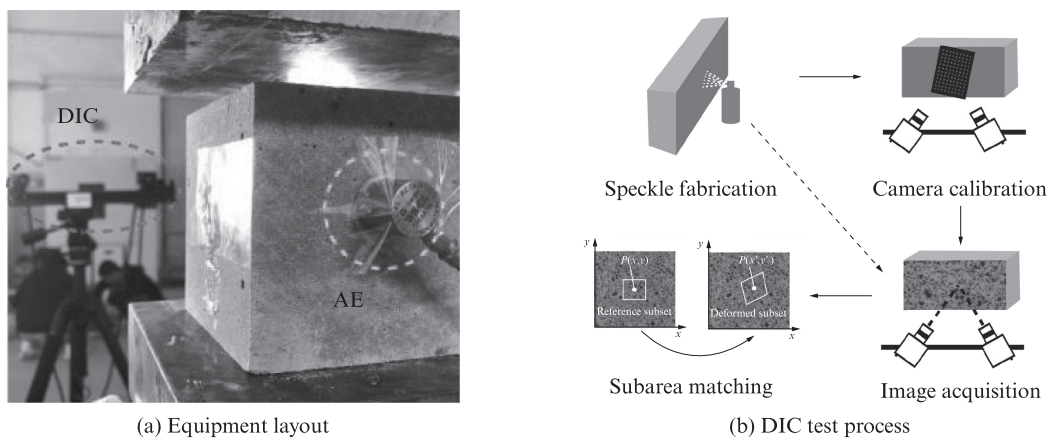


图1 单轴压缩试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of uniaxial compression testing system

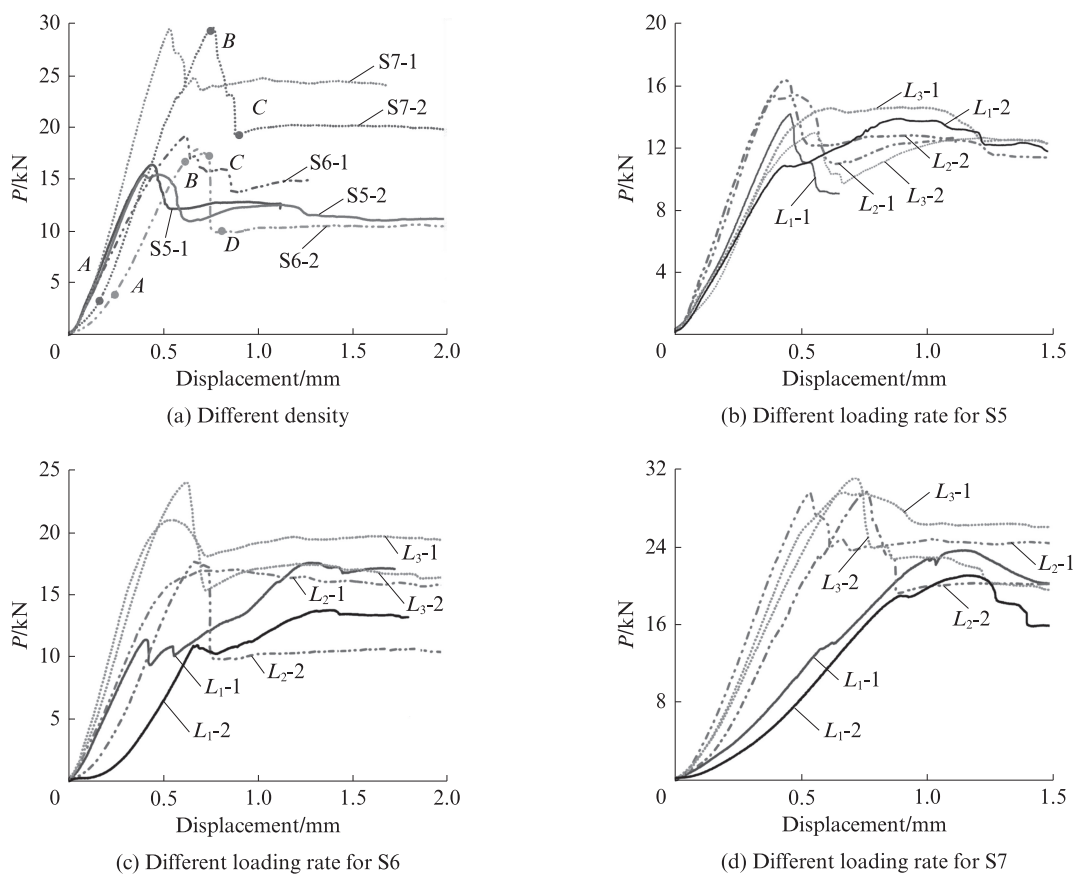


图2 泡沫混凝土的荷载-位移关系曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of foam concretes

壁更加厚实,气孔分布也更加均匀,材料的整体屈服应力提高.密度为 $500 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ 的泡沫混凝土性能提升并不明显,这可能是气孔尺寸和分布的离散性导致的.张亚梅等^[5]对不同密度泡沫混凝土进行CT扫描后发现,密度在 600 kg/m^3 以下的泡沫混凝土边界气泡尺寸明显大于密度等级高的混凝土,其内部气泡尺寸和分布的离散性也较大.但是,密度的

增大也使泡沫混凝土具有更大的脆性.随着密度的增大,泡沫混凝土的加载屈服段不断减小,同时峰后的下降段更加陡峭.根据 Hillerborg^[13]提出的压缩损伤区(CDZ)模型,这也与材料较高的抗压强度有关.文献[14-15]也存在类似的结果,即增加抗压强度增大了材料的脆性.

(3)当泡沫混凝土的密度较低时,加载速率对承

载力曲线和峰值荷载的影响不大,各加载曲线大致相近.当泡沫混凝土的密度较高时,其压缩性能对加载速率的敏感度更高,产生了明显的速率效应,加载速率的提升会增大试件的承载力.当加载速率低至0.001 mm/s时,泡沫混凝土的加载曲线呈现出很明显的延性破坏特征,峰值应变大大增加,峰后曲线平缓下降.

图3为不同密度泡沫混凝土的破坏断面.由图3可见:试件S5的破坏断面存在大量的大孔径孔隙,这

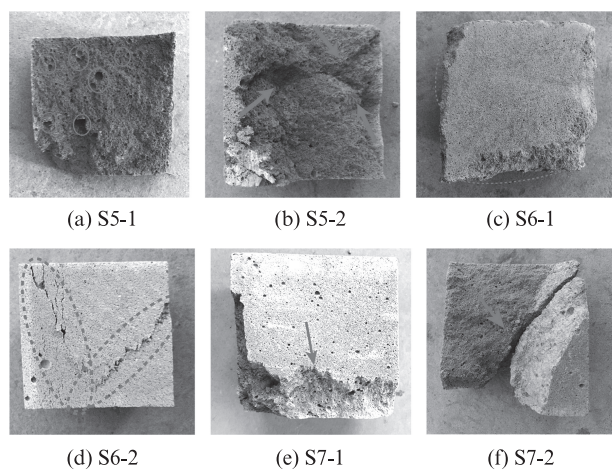


图3 不同密度泡沫混凝土的单轴压缩破坏形态
Fig. 3 Failure modes of foam concretes with different density under uniaxial compression

些是应力集中以及发生压缩密实的主要区域;试件S6产生了一些斜裂缝,外表面部分剥落;试件S7破

坏后裂纹几乎贯穿整个界面,内部的失效面呈现夹角,失效形态呈现“锥形模式”.这表明随着密度的增大,泡沫混凝土在单轴压缩条件下的宏观失效过程主要表现为受剪损伤.

作为一种多孔材料,泡沫混凝土具有很强的能量吸收能力,其在压缩过程中的能量吸收量 W 可以通过名义应力-应变(σ - ϵ)曲线所包围的面积计算得到:

$$W(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

式中: $\sigma(\epsilon)$ 为某时刻的名义应力值,MPa; ϵ 为对应的应变.

材料在压缩过程中的能量吸收效率 η 可定义为应变达到某一值时所吸收的能量与相应名义应力的比值,其表达式如下:

$$\eta(\epsilon) = \frac{W(\epsilon)}{\sigma(\epsilon)} = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \quad (2)$$

已有的研究表明^[16-17],通过平台应力、压缩过程中能量吸收量 W 、能量吸收效率 η 等力学参数,可以有效地评价多孔材料的能量吸收特性.图4为加载过程中不同密度泡沫混凝土应力-应变曲线及能量吸收参数的变化情况.由图4可见:平台阶段内的平均应力是多孔材料能量吸收的重要影响参数,密度最大的泡沫混凝土的平台应力、总能量吸收量最大;密度为500、600 kg/m³ 泡沫混凝土的总能量吸收量接近;低密度泡沫混凝土的能量吸收效率更高,孔隙含量更大.

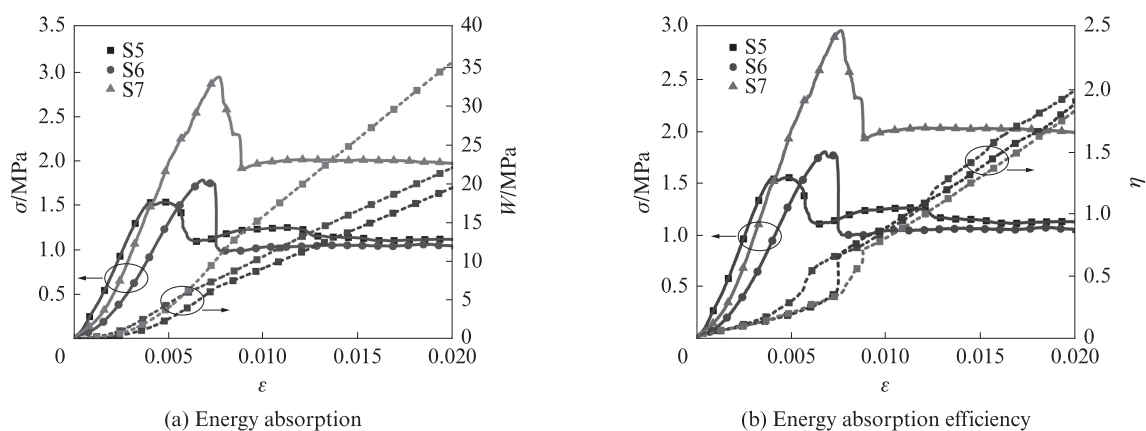


图4 不同密度泡沫混凝土的名义应力-应变曲线及相应能量吸收曲线

Fig. 4 Normal stress-strain curves and corresponding energy absorption performance of foam concretes with different density

2.2 基于DIC的破坏过程研究

DIC技术是一种简单且通用的方法,只需使用摄像机即可轻松地执行全场应变分析.表2为不同密度泡沫混凝土试件的加载曲线以及破坏后的表面形

态,并选取了加载曲线上的关键点,通过DIC获得的横向应变场(ϵ_{xx})分析整个的压缩失效过程.由表2可见:(1)试件S5在非线性行为开始时,即大约极限载荷的80%~90%附近,应变局部化区域开始出现,此

表2 不同密度泡沫混凝土的单轴压缩应变云图演化

Table 2 Strain evolutions of foam concretes under compression with different density

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Loading curve and failure	Development process of strain field			
500					
600					
700					

时在试件右下角出现了1道应变集中区域;峰值时刻试件中部裂缝形成,之后在承载力突然跌落的过程中,裂缝快速增长,表明试件内部出现了局部失稳;随后在试件其他区域出现了多条竖向裂缝,这些宏观裂缝之间有一定联系,间距大概在10~20 mm.

(2)试件S6和S7中也出现了裂缝快速增长的现象,但是试件表面的裂缝逐渐由多裂缝转变为单一裂缝,裂缝发展的方向由垂直型裂缝转变为倾斜发展的剪切型裂缝,这种弯曲的斜裂缝在试件S7中尤为明显.这样的结果说明,随着密度的增大,试件的破坏模式表现出脆性的增加,原有的通过缓慢扩张形成的分散型裂缝转变为突然集中产生的贯穿型裂缝.由此可见,低密度泡沫混凝土主要的破坏形式是延性破坏,主要由材料内部水泥基体中大

量存在的微孔结构引起;密度较高的泡沫混凝土主要表现出准脆性破坏特征,主要由宏观纵向裂缝引起.

2.3 基于AE的破坏过程研究

声发射信号是材料内部产生微裂缝时局部能量快速释放而形成的弹性波,能够反映材料内部的损伤.相比DIC反映的是直观但是偏表层的裂缝发展,AE能够得到材料整体的损伤信号.AE累计振铃计数曲线可以表征AE信号源整体的活跃度.累计振铃计数增长越快,表明信号活跃度越高,损伤发展速率越快.AE幅值可以表征局部损伤的剧烈程度,当某处损伤越剧烈时,所产生的AE幅值越高.试件破坏过程中声发射参数与荷载历程的关系曲线如图5所示.由图5可见:

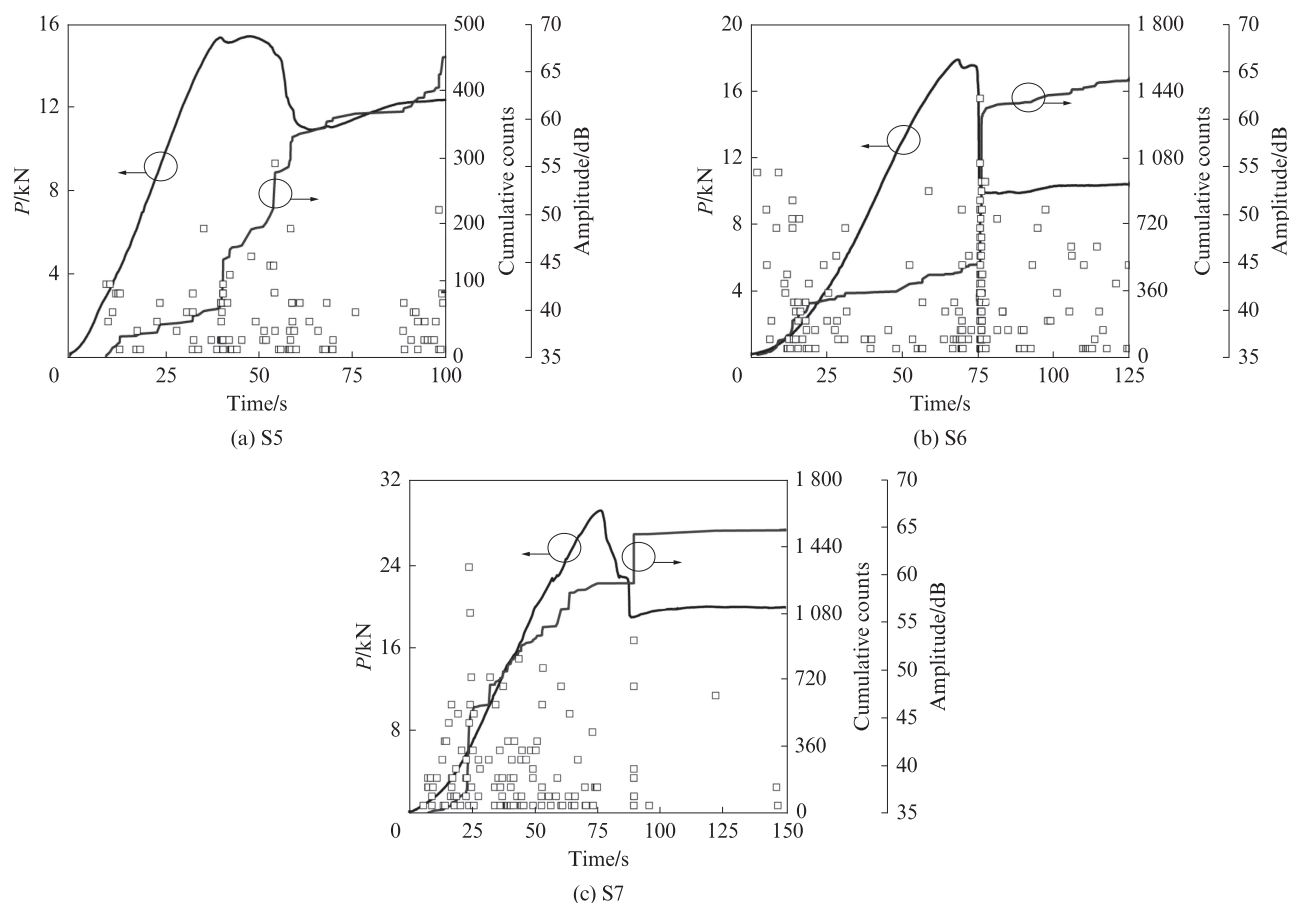


图5 不同密度泡沫混凝土的声发射参数与荷载历程关系曲线

Fig. 5 Relation curves of AE parameters and load histories of foam concrete with different density

(1)加载过程的声发射信号存在明显的阶段性.试件S5在线弹性加载阶段的声发射信号较弱;在加载进入峰值阶段时,声发射信号增强,振铃计数值在该阶段迅速增长;在峰后平台段,声发射信号减弱.这些现象与DIC观察到的裂缝扩展模式相一致:在加载初期,DIC应变云图中无明显的应变集中区域,

此时试件没有出现剧烈声发射信号释放;当加载至峰值时,云图显示裂缝出现失稳扩展现象,在此阶段产生强声发射信号;当试件进入峰后的压缩密实阶段时,此时主要为孔隙的闭合与基质之间的接触摩擦,DIC云图显示裂缝为稳定扩展或长度停止增长,声发射信号减弱.

(2)随着泡沫混凝土密度的增大,不同阶段的声发射信号产生明显变化:试件S6的加载初期开始出现少量强度较高的信号,试件S7在加载初期呈现大量的高强度信号,且振铃计数值在该阶段突增.这是由于在线弹性阶段,材料通过胞壁弯曲等弹性变形方式承担荷载.当密度增大时,由于材料的非均质性,局部应力集中效应增强,试件内部容易产生更剧烈的开裂行为.此外,峰值时刻声发射信号的变化也反映出这样的特征.随着密度的增大,峰值阶段声发射信号的突增现象更加明显,且突增位置更加集中,振铃计数的突增由多次变为单次,在其他试件中也观察到了类似的现象,这反映出材料破坏模式的改变.

3 结论

(1)随着密度的增大,泡沫混凝土的屈服强度、平台应力、能量吸收均有明显的提高.

(2)随着密度的增大,泡沫混凝土试件破坏时的裂缝数量减少,裂缝倾斜角度增大,声发射振铃计数突增现象更加集中,破坏模式呈现出脆性增加的特性.

(3)泡沫混凝土密度增大之后,速率效应更加明显.对于密度为 500 kg/m^3 的泡沫混凝土,加载速率提升对其抗压承载力并无太大影响;对于密度为 750 kg/m^3 的泡沫混凝土,加载速率提升后其抗压强度明显上升,破坏模式由延性破坏转变为脆性破坏.

(4)DIC技术能够对泡沫混凝土试件破坏过程中的微裂纹演化分析提供有效手段.同时AE和DIC的结果能够互相补充,2种技术的结合有助于表征泡沫混凝土中微裂缝的演变规律.

参考文献:

- [1] KUI W, SHAO Z S, QIN S. A solution for squeezing deformation control in tunnels using foamed concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119539.
- [2] SHI X N, HUANG J J, SU Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250:118897.
- [3] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Air-void characterisation of foam concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(2):221-230.
- [4] 侯明显,朱先昌,李国青,等.泡沫混凝土的研究与应用概述[J].硅酸盐通报,2019,38(2):410-416.
HOU Mingyu, ZHU Xianchang, LI Guoqing, et al. Review on the research and application of foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2):410-416. (in Chinese)
- [5] 张亚梅,孙超,王申,等.不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔结构[J].重庆大学学报,2020,43(8):54-63.
ZHANG Yamei, SUN Chao, WANG Shen, et al. Performance and pore structure of foam concrete with different density grades[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(8):54-63. (in Chinese)
- [6] 李广良,郭伟国,赵融,等.轻质泡沫混凝土的力学性能与唯象本构模型[J].材料科学与工程学报,2012,30(3):428-431.
LI Guangliang, GUO Weiguo, ZHAO Rong, et al. Mechanical properties and phenomenological constitutive model of lightweight foamed concrete[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 30(3):428-431. (in Chinese)
- [7] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响[J].建筑材料学报,2017,20(1):93-98.
PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):93-98. (in Chinese)
- [8] 周利睿,耿飞,习雨同,等.气孔结构对泡沫混凝土吸水率和抗压强度的影响[J].新型建筑材料,2017,44(7):71-75.
ZHOU Lirui, GENG Fei, XI Yutong, et al. Effect of pore structure on the water absorption and compressive strength of foam concrete[J]. New Building Materials, 2017, 44(7):71-75. (in Chinese)
- [9] 时金娜,赵燕茹,郝松,等.基于DIC技术的高温后混凝土变形性能[J].建筑材料学报,2019,22(4):584-591.
SHI Jinna, ZHAO Yanru, HAO Song, et al. Deformation behavior of concrete after high temperature based on DIC technology[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4):584-591. (in Chinese)
- [10] 赖于树,熊燕,程龙飞.混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J].建筑材料学报,2015,18(3):380-386.
LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Research and application of acoustic emission characteristics in the whole process of concrete loading test[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3):380-386. (in Chinese)
- [11] DAI S, LIU X, NAWNIT K. Experimental study on the fracture process zone characteristics in concrete utilizing DIC and AE methods[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7):1346-1357.
- [12] DE SUTTER S, VERBRUGGEN S, TYSMANS T, et al. Fracture monitoring of lightweight composite-concrete beams[J]. Composite Structures, 2017, 167:11-19.
- [13] MARKESET G, HILLERBORG A. Softening of concrete in compression—Localization and size effects[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(4):702-708.
- [14] ESKANDARI H, MURALIDHARA S, RAGHUPRASAD B, et al. Size effect in self consolidating concrete beams with and without notches[J]. Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 2010, 35(3):303-317.
- [15] MURALIDHARA S, PRASAD B R, ESKANDARI H, et al. Fracture process zone size and true fracture energy of con-

- crete using acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2020, 24(4):479-486.
- [16] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids[J]. Journal of Cellular Plastics, 2006, 42(5):371-392.
- [17] 苏步云,周志伟,张建军,等. 基于剖球模型的开孔泡沫金属动态力学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3):671-676.
- SU Buyun, ZHOU Zhiwei, ZHANG Jianjun, et al. Dynamic mechanical behavior of open cell metal foams based on the ball splitting model [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(3):671-676. (in Chinese)