

泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式

韩李斌, 杨黎明*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对泡沫混凝土在不同应变率下的动态力学性能及破坏形式进行研究, 并使用高速摄影机记录试件的破坏过程. 实验结果表明: 泡沫混凝土的动态极限抗压强度受密度影响, 表现出明显的应变率相关性; 低应变率下, 破坏形式以均匀压实破坏为主; 高应变率下, 破坏形式呈现为逐层塌落形式; 并且, 应力—应变曲线中存在明显的应力平台. 同时, 还讨论了高应变率下应力不均匀性对泡沫混凝土破坏模式的影响.

关键词: 泡沫混凝土; 动态力学性能; 应变率相关性; 应力平台; 逐层塌落; 应力不均匀

中图分类号: O347.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 01-0068-05

近年来, 人们对安全防护方面的重视度不断加强. 泡沫混凝土因其体积密度小、隔音及抗震性能优良、节省原料等优点而受到广泛关注, 并越来越多地被应用到大型军事、民用、隧道工程当中.

从 20 世纪末开始, 国内外学者就对泡沫混凝土准静态下的力学性能开展了一系列研究, 也取得了很多成果. Jones 等^[1]对泡沫混凝土的组成、性能以及工程应用进行了系统阐述. Kearsley 等^[2]通过对大量实验结果进行分析, 证明孔隙率对泡沫混凝土压缩强度有很大影响. 周顺鄂等^[3]在泡沫混凝土压缩特性实验研究中认为泡沫混凝土压缩过程分为 4 个阶段, 即平台阶段、密实阶段、屈服阶段和衰退阶段. 熊耀清等^[4]通过对轻质多孔混凝土基本受压力学性能进行研究, 分析了其与普通混凝土力学性能的差异. 尚帅旗等^[5]实验研究了龄期对泡沫混凝土强度的影响. 李广良^[6]对泡沫混凝土进行了应变率为 $0.001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 的准静态压缩实验, 讨论了应变率和密度对泡沫混凝土力学性能的影响, 并总结出压缩唯象本构模型. 赵融^[7]通过静、动态实验研究了密度对泡沫混凝土抗压性能的影响. 胡泽斌等^[8]运用 $\Phi 100$ SHPB 装置对大尺寸泡沫混凝土进行了实验研究, 并分析了应变率和 EPS 体积参量对抗压强度的影响.

本文采用 $\Phi 37 \text{ mm}$ 分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对泡沫混凝土进行动态力学性能的实验研究, 同时在实验中使用高速摄影机记录试件破坏过程. 通过对实验结果及摄影记录进行分析, 研究应变率和密度对泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式的影响.

1 实验试件和设备

1.1 实验试件

实验采用密度为 $800 \sim 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、设计尺寸为 $\Phi 32 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 的圆柱形泡沫混凝土试件(图 1).



图 1 泡沫混凝土试件

实验中所有试件均采用统一配比, 且养护环境和养护周期相同. 试件两端表面均打磨光滑, 以消除端面效应, 两端表面不平行度在 0.1 mm 以内.

收稿日期: 2015-11-09.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11390361).

第一作者: 韩李斌(1988—), 男, 内蒙古包头人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: hanlibin874@hotmail.com

*通信作者: 杨黎明(1957—), 男, 福建长乐人, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

1.2 分离式霍普金森压杆(SHPB)

本文采用 $\Phi 37$ mm 铝制 SHPB 装置对试件进行单轴冲击加载实验, 同时利用超高速摄影机记录试件的破坏过程. 实验所用子弹、入射杆、透射杆长度分别为 0.4 m, 2 m, 2 m.

由于泡沫混凝土的波阻抗与 SHPB 材料相差很大, 90%以上的入射脉冲在入射杆与试件交界面发生反射^[9], 由此造成透射信号微弱, 使得普通应变片很难收集到有效信号, 因此在本实验中使用半导体应变片收集透射杆中的信号. 同时, 实验中还使用入射波整形片以改善入射脉冲波形. 入射杆与透射杆中收集的信号如图 2 所示.

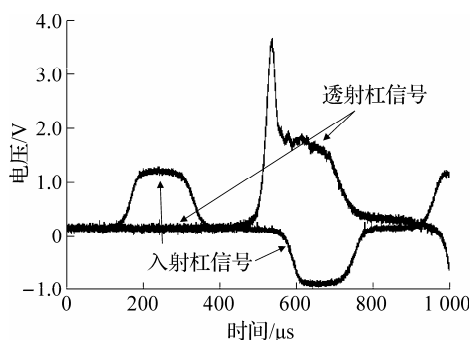


图2 入射杆与透射杆收集的信号

2 实验结果与分析

2.1 SHPB 动态压缩实验结果

实验中共对 22 块试件分别进行应变率约为 200 s^{-1} 、 500 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 的动态实验, 并且尝试了应变率在 1400 s^{-1} 以上的动态实验. 表 1 为其中 12 组具有代表性试件的实验数据, 下文将着重研究应变率、密度的不同对泡沫混凝土动态力学性能和破坏形式的影响.

2.2 应变率对泡沫混凝土抗压强度的影响

诸多学者已通过实验证明, 混凝土材料的动态极限抗压强度与应变率呈较好的递增关系^[8-12]. 由图 3 可见, 泡沫混凝土动态力学性能同样表现出明显的应变率相关性, 当应变率处于 $200\sim 1200\text{ s}^{-1}$ 之间时, 其动态极限抗压强度随应变率增大而增加. 相比之下, 第 10、11、12 的 3 个高应变率尝试实验的结果没有表现出应变率相关性, 可能是由于试件内部应力的不均匀性造成, 其原因将在文中后面章节进行讨论.

对于类似泡沫混凝土的多孔材料, 其动态力

表1 SHPB 动态实验数据

序号	平均应变率($\text{s}^{-1} \times 10^2$)	最大应力/MPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	1.9	3.7	0.770
2	1.9	3.9	0.827
3	2.1	3.4	0.808
4	5.5	4.9	0.882
5	5.4	4.4	0.808
6	5.4	5.1	0.876
7	1.1	5.5	0.879
8	1.1	6.0	0.833
9	1.1	6.0	0.850
10	1.4	3.6	0.856
11	1.7	4.5	0.913
12	1.8	4.3	0.952

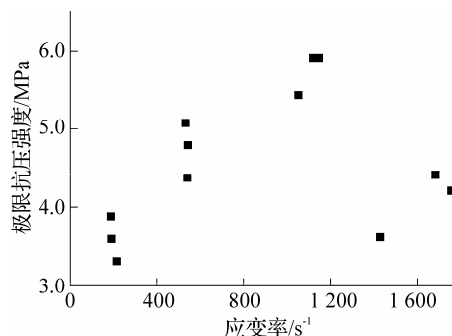


图3 极限抗压强度—应变率关系

学性能的应变率相关性可归于几种原因: (1)混凝土试件中自由水产生的黏滞力随着加载速率的增加而增大, 其作用阻碍了混凝土试件中裂纹的开裂和传播, 由此也提高了混凝土的动态抗压强度. (2)胡时胜等^[13]提出, 动态荷载作用下多孔材料呈逐层破坏的形式变形且变形仅局限于厚度为孔隙直径的小范围内. 当应变率较大时, 由于材料局部区域内的实际变形速度远大于表面变形速度, 根据微惯性硬化机理^[14], 孔壁的惯性作用增大了材料的破坏应力. (3)泡沫混凝土空洞中存在气体, 受到压缩时与孔壁接触产生了碰撞阻力, 造成随材料变形速度的加快而增大能量损失, 增强了泡沫混凝土的宏观动态抗压强度.

2.3 密度对泡沫混凝土抗压强度的影响

Kearsley 等^[15]研究表明, 泡沫混凝土的极限抗压强度随着密度的减小而呈指数方式减小. Visagie 等^[16]的研究结果表明, 当密度在 $500\sim 1000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 泡沫混凝土材料的抗压强度随着孔隙率的

增加而降低。鉴于上述研究,密度对泡沫混凝土的力学性能有明显影响。

泡沫混凝土试件的密度越小,其内部孔隙率越大,试件内部孔洞数量增多导致更多的孔洞缺陷,从而降低了试件的宏观强度。本实验对试件极限抗压强度—密度关系进行了统计(图4)。由图中可知,在同一应变率等级下,泡沫混凝土的动态极限抗压强度呈现随密度增大而增大的趋势;密度相近时,其动态极限抗压强度呈现较明显的应变率相关性。

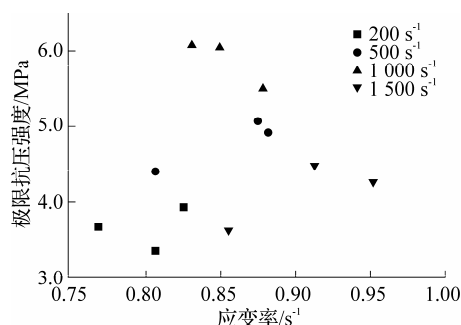


图4 极限抗压强度—密度关系

2.4 不同应变率下应力—应变曲线分析

图5为实验所得不同应变率下的泡沫混凝土动态应力—应变曲线。由图中曲线可看出,泡沫混凝土的动态破坏可主要分为3个阶段——弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段。

第一阶段弹性阶段。在应力—应变曲线上上升段内,由于SHPB测量技术的局限性,本阶段的应力—应变曲线误差较大,但本文假定当 $\sigma < 0.8\sigma_c$ 时,应力与应变近似呈线性比例关系增加。此时,部分入射应力波能量转化成了试件的弹性变性能。

第二阶段屈服阶段。当应力接近最大应力($\sigma > 0.8\sigma_c$)时,塑性应变明显增加,孔洞开始塑性塌落或者脆性破坏,部分入射应力波能量转化成试件的塑性变性能。

第三阶段破坏阶段。当应力值达到最大应力($\sigma = \sigma_c$)时,泡沫混凝土结构开始破坏,应力卸载。其中,泡沫混凝土的动态应力—应变曲线体现出两个不同于普通混凝土材料的特点:(1)在高应变率时,实验测得的极限抗压强度值较低应变率的数值明显降低;(2)其卸载过程中应力值并没有降至0,而是形成了一个较高的应力平台,并且应变率越高,则应力平台越长、越明显。

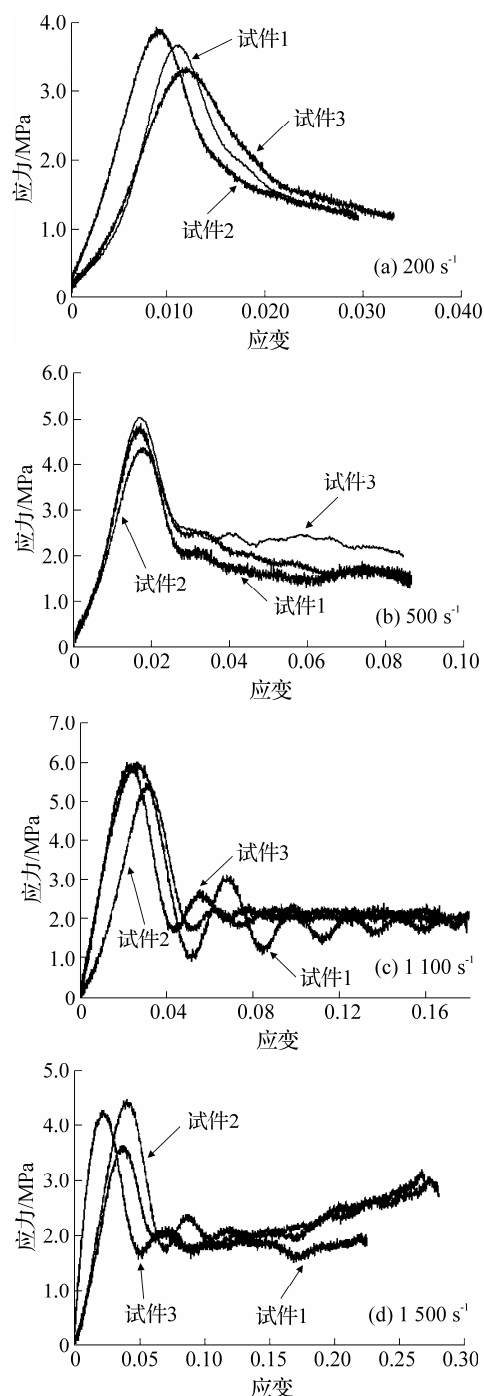


图5 不同应变率下应力—应变曲线

2.4.1 泡沫混凝土的破坏现象讨论

本实验中采用高速摄影机拍摄了应变率分别为500 s⁻¹和1500 s⁻¹时泡沫混凝土试件的破坏过程(图6、图7)。由图中的拍摄记录可看出,在低应变率下,泡沫混凝土主要呈均匀压实方式破坏;在高应变率下,则呈现逐层塌落的破坏形式。泡沫混凝土在受到动态加载时,由于其内部孔洞分布不均

匀, 当较弱的孔洞发生破坏时, 该孔洞周围产生应力集中, 导致破坏在此孔洞周边沿垂直于应力方向的混凝土层中扩展, 直至该层混凝土压实, 应力释放; 而此时被压实孔洞层的上、下两层孔洞相互接触, 上述破坏过程在剩余的孔洞中重复进行, 直至试件整体压实、破坏。

当首先破坏的孔洞层被压实破坏时, 该层应力卸载, 应力随应变增加而减小; 在破坏的孔洞层两侧孔洞接触并被压实的进程中, 应力则随着应变增加而小幅度增加。图 5 中, 此过程则表现为在应力—应变曲线的破坏阶段形成明显的、上下波动的应力平台; 由于高应变率下泡沫混凝土的破坏形式更倾向于逐层破坏, 所以应变率越大应力—应变曲线中的平台越明显。

2.4.2 应力不均匀对极限抗压强度的影响

由图 6 可看出, 当应变率在 $200 \sim 1\,200\text{ s}^{-1}$ 之间时, 试件的破坏过程在开始阶段以整体均匀变形为主, 并没有出现明显的局部变形区域(图 6(2)); 随着变形发展, 在较弱的结构缺陷处会形成局部变形区域(图 6(3)), 直至试件被压实破坏(图 6(4)和图 6(5))为止。整个过程中, 试件中的应力可认为是均匀的; 同时, 局部变形区域会在发展到一定程度时停止扩展, 同时在其他较弱的结构缺陷处形成新的局部变形区域。这与泡沫混凝土的破坏机理相吻合, 并且此时实验测得的动态抗压强度及应变率能体现试件的真实力学性能。

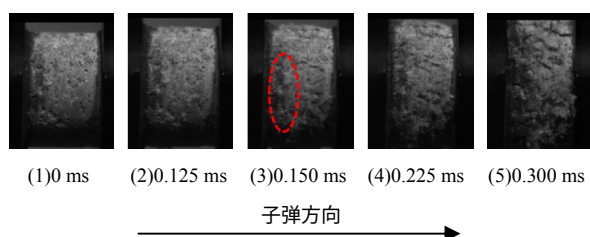


图 6 500 s^{-1} 泡沫混凝土破坏过程

当应变率达到 $1\,400\text{ s}^{-1}$ 以上时, 试件的破坏过程如图 7 所示。在变形初始(图 7(2)), 试件靠近子弹一端由于受到强冲击作用而形成局部变形区域, 并且发生局部破坏, 而此时试件中其他没有和子弹接触的区域变形很小, 试件中变形不均匀(图 7(3)); 随着冲击载荷的继续作用, 局部变形区域沿冲击方向发展(图 7(4)和图 7(5)), 直至试件整体破坏。试件靠近子弹端局部破坏造成的应力不均匀

弱化了冲击荷载对试件的作用, 所以此时实验所测得的动态抗压强度偏低, 这与图 3 中的现象相吻合。同时, 本文所观察到的现象也与章超等^[17]关于泡沫铝材料中应力不均匀性的研究结果相符, 说明应力不均匀性的影响同样适用于泡沫混凝土材料。

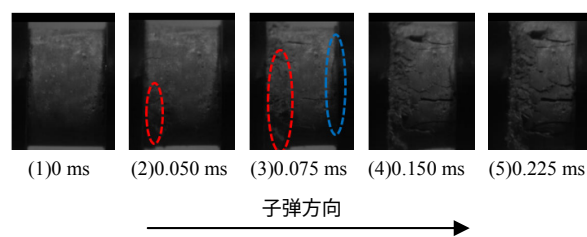


图 7 $1\,500\text{ s}^{-1}$ 泡沫混凝土破坏过程

3 结论

(1) 在应变率为 $200 \sim 1\,200\text{ s}^{-1}$ 的动态条件下, 泡沫混凝土的极限抗压强度呈现明显的应变率相关性。产生应变率相关性的原因可能是: (1) 试件内自由水的黏滞力; (2) 惯性效应; (3) 试件内孔洞间的碰撞阻力。

(2) 密度对泡沫混凝土的极限抗压强度有明显影响。在同一应变率等级下, 泡沫混凝土的动态极限抗压强度呈现随密度增大而增大的趋势; 密度相近时, 其动态极限抗压强度呈现较明显的应变率相关性。

(3) 在动态压缩下, 当泡沫混凝土内孔洞层被压实破坏时, 试件中该层应力卸载, 并随应变增加而减小; 当破坏的孔洞层两侧孔洞接触并被压实时, 应力随应变增加而增加。这造成应力—应变曲线中形成明显的应力平台。

(4) 不同应变率下, 泡沫混凝土的变形模式不同。当应变率在 $200 \sim 1\,200\text{ s}^{-1}$ 之间时, 试件均匀压实破坏为主, 只是在较弱的孔洞区产生较小的局部变形区域, 实验测得的数据能体现试件的真实力学性能。当应变率达到 $1\,400\text{ s}^{-1}$ 以上时, 试件靠近子弹一端首先出现局部变形区域, 试件内应力不均匀, 导致实验测得的动态抗压强度偏低。

参考文献:

- [1] JONES M R, MCCARTHY A. Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications [M]//DHIR R K, NEWLANDS M D, MCCARTHY A.

- Use of Foamed Concrete in Construction. London: Thomas Telford, 2005:61-88.
- [2] KEARSLEY E P, WAINRIGHT P J. Porosity and permeability of foamed concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31:805-812.
- [3] 周顺鄂, 卢忠远, 焦雷. 泡沫混凝土压缩特性及抗压强度模型[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(11):9-12.
- [4] 熊耀清, 姚谦峰. 轻质多孔混凝土受压应力—应变全曲线实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(2):228-232.
- [5] 尚帅旗, 李丹, 陈星明, 等. 泡沫混凝土的单轴抗压力学特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12):24-29.
- [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.
- [7] 赵融. 新型超轻泡沫混凝土的力学性能研究[J]. 科技信息, 2014(13):86-87.
- [8] 胡泽斌, 许金余, 曹珊. 聚苯乙烯混凝土的冲击压缩性能实验研究[J]. 兵工学报, 2009, 32(5):619-624.
- [9] 袁璞, 马芹永, 张海东. 轻质泡沫混凝土 SHPB 实验与分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17):116-119.
- [10] 张志刚, 孔大庆, 宫光明, 等. 高应变率下混凝土动态力学性能 SHPB 实验[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(6):611-618.
- [11] 王建军, 郭伟国, 赵融. 轻质泡沫混凝土吸能特性及其压溃流动应力方程[J]. 土木建筑和环境工程, 2013, 35(6):96-102.
- [12] 董毓立, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程实验研究及其本构模型[J]. 水利学报, 1997(7):72-77.
- [13] 凤仪, 朱震刚, 潘艺. 泡沫铝的动态力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4):544-548.
- [14] KLINTWORTH J W, STRONGE W J. Elastic-plastic yield limits and deformation laws for transversely crushed honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Science, 1988, 30(3/4):273-292.
- [15] KEARSLEY E P, WAIN WRIGHT P J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(1):105-112.
- [16] VISAGIE M, KEARSELY E P. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters[J]. Concrete Beton, 2002, 101:8-14.
- [17] 章超, 徐松林, 王鹏飞, 等. 不同冲击速度下泡沫铝变形和应力的不均匀性[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4):567-575.

Dynamic properties and failure types of foamed concrete

HAN Li-bin, YANG Li-ming*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The dynamic properties and failure types of foamed concrete with different strain rate have been investigated using Split Hopkins Pressure Bar (SHPB). The test results show that: (1) The dynamic compressive strength of foamed concrete is strain rate-dependent. (2) The failure type of foamed concrete is characterized as layer by layer collapse which results a stress-platform in the stress-strain curves. The influence of stress nonuniformity on dynamic mechanical behaviors of foamed concrete is also discussed.

Key words: foamed concrete; dynamic properties; strain rate-dependent; stress-platform; layer collapsing; stress nonuniformity

(责任编辑 章践立)