

## 轻质泡沫混凝土 SHPB 试验与分析

袁 璞, 马芹永, 张海东

(安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为研究轻质泡沫混凝土的冲击动力学性能, 结合半导体应变测试技术和入射脉冲整形技术对铝质分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 装置进行改进, 解决了泡沫混凝土类低阻抗多孔介质材料透射信号难采集问题, 满足了加载过程中试件内部应力均匀性要求。通过调整冲击气压对密度为  $220 \text{ kg/m}^3$  轻质泡沫混凝土实施了不同撞击杆速度下的单轴冲击压缩试验。试验结果表明, 泡沫混凝土试件在冲击荷载作用下依次经历线性弹性阶段、屈服阶段和孔壁破坏 3 个阶段, 且泡沫混凝土试件平均应变率与撞击杆速度表现出较强的线性相关性。

**关键词:** 泡沫混凝土; 分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB); 半导体应变片; 入射脉冲整形

**中图分类号:** O347.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2014.17.021

### SHPB tests for light weight foam concrete

YUAN Pu, MA Qin-yong, ZHANG Hai-dong

(MOE Research Center of Mine Underground Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact dynamic properties of light-weight foam concrete, semiconductor strain test technology and incident pulse shaping technique were adopted to make an aluminium split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus suitable for low impedance porous materials. Then, the problem being difficult in collecting transmitted signals was solved with the semiconductor strain test technology and the internal stress uniformity requirements in loading process were met with the incident pulse shaping technique. Uniaxial impact compression tests at various striker velocities were conducted by adjusting the pressure of compressed air for light-weight foam concrete with mass density of  $220 \text{ kg/m}^3$ . The test results showed that under impact loads, the foam concrete specimens go through 3 stages including linear elastic stage, yield stage and pore compaction stage; moreover, there is a stronger linear correlation between the average strain rate of foam concrete specimens and the striker velocity.

**Key words:** foam concrete; split Hopkinson pressure bar (SHPB); semiconductor strain gauge; incident pulse shaping

随着对安全和防护的重视, 泡沫铝、泡沫塑料、泡沫混凝土等多孔介质材料因其良好的缓冲和吸能特性受到了广泛的关注, 尤其是多孔介质材料在冲击荷载下的动态力学性能<sup>[1-4]</sup>。多孔介质材料是一种密度低、成型容易且节省原料的工程材料。

泡沫混凝土外观结构与加气混凝土相似, 采用机械方法掺入泡沫形成的多孔结构, 不需蒸压养护, 价格低廉, 并能充分利用工业废料粉煤灰。泡沫混凝土中均匀分布着大量气孔, 泡沫混凝土密度越小, 气孔直径越大。陈兵等<sup>[5]</sup>采用粉煤灰和微硅粉取代混凝土中粗细骨料制备密度为  $800 \sim 1\,500 \text{ kg/m}^3$  泡沫混凝土, 并研

究了粉煤灰和微硅粉的掺入对其抗压强度、抗拉强度以及干燥收缩性能的影响。Just 等<sup>[6]</sup>采用偏光显微镜和扫描电子显微镜研究了铝粉和化学添加剂对轻质高强泡沫混凝土的微观结构的影响。Ramamurthy 等<sup>[7-8]</sup>研究表明气孔体积、气孔直径和气孔间距对其密度和强度有影响, 与气孔形状无关; 同时还分析了硫酸盐对泡沫混凝土膨胀损失、质量损失和强度损失的影响。

国内外针对泡沫混凝土的研究主要集中在静态物理力学性能方面, 较少涉及泡沫混凝土的动态力学性能。为此, 本文以密度为  $220 \text{ kg/m}^3$  的轻质泡沫混凝土为研究对象, 采用直径为  $37 \text{ mm}$  铝质分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 试验装置, 并对其改进以满足低阻抗材料冲击压缩试验的要求, 研究轻质泡沫混凝土的动态力学性能。

# 1 试验方法

## 1.1 轻质泡沫混凝土基本物理力学性能

泡沫混凝土以普通硅酸盐水泥、粉煤灰、微硅粉等为原料,通过发泡剂将气孔引入料浆中形成的一种多孔介质材料。泡沫混凝土的孔隙率很高,且孔壁较薄,气孔直径远大于孔壁厚度;具有密度低、波阻抗低、气孔均匀分布的特点。试验用泡沫混凝土密度为 220 kg/m<sup>3</sup>,气孔尺寸较大,孔径约为 2 mm,见图 1。泡沫混凝土的基本物理力学性能见表 1 所示。在进行 SHPB 试验时,泡沫混凝土试件直径应比其最大孔径高 1 个数量级,因此试件直径确定为 37 mm。

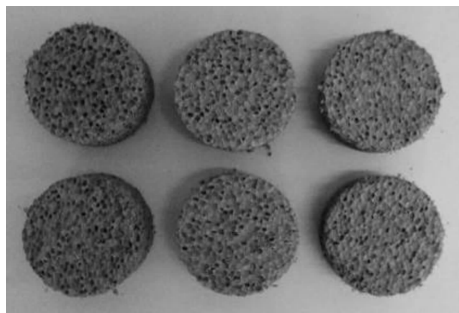


图 1 轻质泡沫混凝土试件

Fig. 1 Light weight foam concrete specimens

表 1 轻质泡沫混凝土基本物理力学性能

Tab. 1 Basic physical-mechanical properties of light weight foam concrete

表观密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	真密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	孔隙率/ %	纵波波速/ (m · s <sup>-1</sup> )	应变率/ s <sup>-1</sup>	抗压强度/ MPa
220	2 330	90.6	1 812	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.40

研究表明<sup>[9]</sup>,当试件长度  $l_s$  与试件半径  $r_s$  之比  $l_s/r_s = 0.875 + 0.540\varepsilon_{end}$  时,SHPB 试验中试件惯性效应和摩擦效应较小, $\varepsilon_{end}$  表示试件的最终应变值。将泡沫混凝土加工成  $\phi 37 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$  的圆柱体试件,试件两端表面不平行度和表面平整度分别控制在 0.05 mm 和 0.02 mm 以内。

## 1.2 分离式 Hopkinson 压杆装置

采用安徽理工大学冲击动力学实验室  $\phi 37 \text{ mm}$  铝质 SHPB 试验装置对泡沫混凝土实施单轴冲击压缩试验。撞击杆、入射杆和透射杆均为铝合金,长度分别为 0.60 m、2.00 m 和 2.00 m;密度为  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 70 GPa,纵波波速为 5 090 m/s。

通过黏贴在入射杆表面的普通箔式电阻应变片测量较强的入射信号和反射信号,黏贴在透射杆表面的半导体应变片测量微弱的透射信号。根据一维应力波传播理论,通过测量黏贴在压杆表面上应变计采集的电压信号,可间接得到泡沫混凝土试件的动态力学性能参数,如应力、应变和应变率等。

## 1.3 SHPB 压杆改进措施

由于泡沫混凝土这类多孔介质材料的一些特性,采用常规 SHPB 试验装置对其进行冲击压缩试验时会遇到以下两个方面的困难。

第一,多孔介质材料密度小、波阻抗低,泡沫混凝土材料的波阻抗仅为压杆材料的 3%,当入射脉冲传播到压杆与试件界面处时,反射系数为 94%、透射系数为 6%。大部分入射信号被反射,透射信号极其微弱,采用普通箔式电阻应变片不能够采集到有效的透射信号。

第二,多孔介质材料的波速一般较压杆材料低,在试验加载过程中泡沫混凝土试件内应力均匀性难以保证。因此,必须对 SHPB 试验装置进行改进。

针对微弱透射信号主要从以下两个方面进行处理:一是降低透射杆的波阻抗或广义波阻抗,常采用的方法有使用黏弹性杆<sup>[10]</sup>、空心铝杆<sup>[11]</sup>作为透射杆;二是改变透射信号测量手段,常采用的方法有石英压电传感器<sup>[12]</sup>、半导体应变片<sup>[13]</sup>等。由于黏弹性杆中的黏性效应,空心铝杆对透射信号提高不大,石英压电传感器会增加压杆中的界面,效果均不是很理想。

普通箔式电阻应变片具有敏感栅尺寸准确、横向效应小、机械滞后小、绝缘性好等优点,但其灵敏系数较小,仅为 2.08,不适宜微弱信号的采集;半导体电阻应变片以半导体材料制作敏感栅,具有体积小、灵敏系数高等优点,其灵敏系数一般为 110,但其电阻和灵敏系数的温度稳定性差,测量较大应变时非线性严重、灵敏度分散性大,最大测量应变为 6 000  $\mu\varepsilon$ 。图 2 为试验中同时使用 HU-101B-120 型半导体应变片和 BX120-3AA 型箔式电阻应变片采集透射信号的测试结果。图 2 表明,使用普通箔式电阻应变片未能采集到有效的透射信号,透射信号被噪波等干扰信号淹没。当改用半导体应变片进行采集时,因半导体应变片灵敏系数较高,即使透射杆受到的扰动较小,也能采集;而且采集信号的信噪比较高,噪波对信号的干扰大大减弱。因此,试验采用半导体应变片技术测量微弱的透射信号。

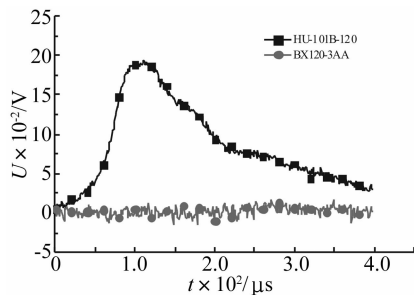


图 2 半导体应变片与电阻应变片透射波形对比图  
Fig. 2 Comparison of transmission waves gathered by semiconductor strain gauge and resistance strain gauge

针对试验加载过程中泡沫混凝土试件内部应力均匀性问题,可采用入射脉冲整形技术<sup>[14]</sup>对入射脉冲进行预处理,改善入射脉冲加载波形,延长入射脉冲加载升时。一维应力波传播理论分析表明<sup>[15]</sup>,加载波在试件内来回反射3次以上即可满足试件内应力均匀性的要求。在撞击杆速度相同时,对比分析了未整形入射脉冲信号和整形入射脉冲信号,如图3所示。

从图3可以看出,未使用整形器时,入射脉冲波形为梯形波,其前沿升时仅为30 μs,对于泡沫混凝土这类多孔介质材料(波速为1 812 m/s),即使是很薄的试件,要使其达到应力平衡所需的时间也远大于30 μs。当采用黄油作为入射脉冲整形器时,加载波形明显得到改善,加载波形变得更宽,上升前沿变缓;此时加载波形前沿升时约为150 μs,有利于试件在加载过程中的应力均匀。同时,入射脉冲作用时间也由原来的小于300 μs延长至400 μs左右。

### 2 SHPB 试验数据处理

采用改进铝质 SHPB 试验装置对密度为 220 kg/m<sup>3</sup> 的轻质泡沫混凝土实施单轴冲击压缩试验。

由于经典二波法在数据处理中会引入相当大的计

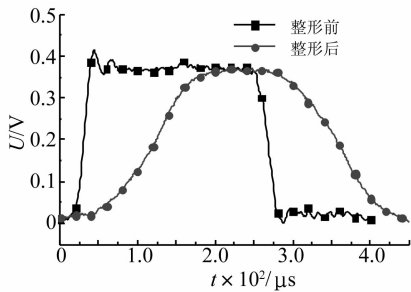


图3 入射波整形前后对比图  
Fig. 3 Comparison of incident waves before and after shaping

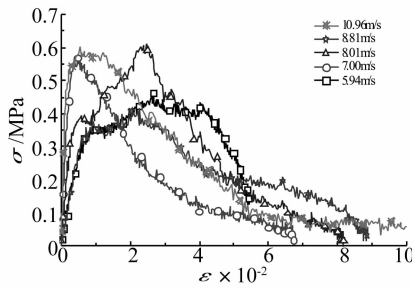


图4 轻质泡沫混凝土动态应力应变曲线  
Fig. 4 Dynamic stress - strain curve of light weight foam concrete

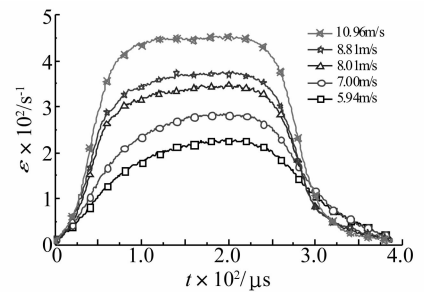


图5 轻质泡沫混凝土应变率时程曲线  
Fig. 5 Curves of strain rate to time for light weight foam concrete

### 3 分析

图4 泡沫混凝土动态应力应变曲线表明,加载初期,试件的应力应变关系基本成线性关系,当动态载荷增大到某一最大值时,这一最大值可认为是材料的弹性极限,材料强度便开始下降,但强度下降速率明显较加载时缓的多,有时出现一明显的屈服平台段之后才开始下降。泡沫混凝土在一维应力状态下动态应力应变曲线主要分为三个阶段:线弹性阶段、屈服阶段、孔壁破坏阶段。

第一阶段线弹性阶段。加载初期,泡沫混凝土试件孔壁骨架具有一定的承载能力,此阶段荷载由孔壁骨架承受,应力与应变基本成线性关系,符合力学中的胡克定律,部分入射应力波能量转化为试件的弹性变

算误差<sup>[16]</sup>;采用三波法进行数据处理时,由于试验采集入射信号与反射信号十分接近,在计算入射端应力时,常因为测试数据误差导致计算结果完全不符。针对泡沫混凝土材料的特殊性,采用简化的三波法进行数据处理,即试件应变和应变率采用三个信号进行计算:

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)]$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_i(\tau) - \epsilon_r(\tau) - \epsilon_t(\tau)] d\tau$$

试件应力采用透射信号进行计算:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s} \epsilon_t(t)$$

对单轴冲击压缩试验中采集的入射波、反射波和透射波使用简化的三波法进行数据处理,得到轻质泡沫混凝土在不同应变率下的动态应力应变曲线,如图4所示。图4表明,泡沫混凝土的动态强度极低,仅为0.6 MPa左右。

图5为不同撞击杆速度下,轻质泡沫混凝土试件的应变率时程曲线。从图5中可以看出,泡沫混凝土试件应变率与撞击杆速度具有明显的相关性。

形能。

第二阶段屈服阶段。当外载荷继续增大,超过泡沫混凝土试件孔壁骨架的承受能力时,孔壁开始塑性坍塌或脆性破坏,但试件仍具有一定的承载力,此时部分入射应力波能量转化为试件的塑性变形能。

第三阶段孔壁破坏阶段。泡沫混凝土试件在压密过程中孔壁结构逐渐破坏,试件承载力逐渐下降,当孔壁结构完全破坏时,试件不再承受荷载。轻质泡沫混凝土的冲击破坏形态见图6。

以撞击杆速度  $v$  为横坐标,泡沫混凝土试件平均应变率  $\dot{\epsilon}$  为纵坐标绘制散点图,如图7所示。可以发现,泡沫混凝土试件平均应变率随撞击杆速度增加而增加,两者之间基本为线性关系。

对图7中数据进行线性拟合,得到泡沫混凝土试

件平均应变率  $\bar{\varepsilon}$  与撞击杆速度  $v$  的关系为:

$$\bar{\varepsilon} = 25.33v \quad R^2 = 0.998$$

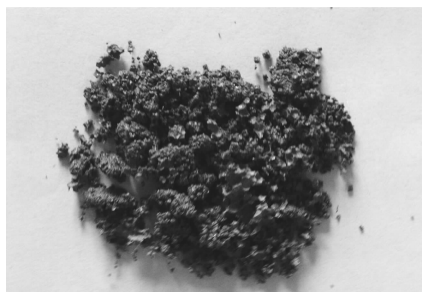


图 6 轻质泡沫混凝土冲击破坏形态

Fig. 6 Impact failure mode of light weight foam concrete

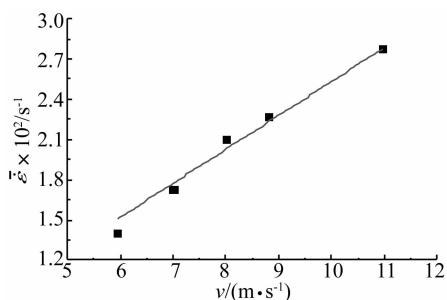


图 7 轻质泡沫混凝土平均应变率 - 撞击杆速度曲线

Fig. 7 Curves of average strain rate to striker velocity for light weight foam concrete

## 4 结 论

(1) 灵敏系数较高的半导体应变片技术可较好地捕捉微弱的透射应力信号,实现对泡沫混凝土类多孔介质材料试件大变形、近似恒应变率的动态压缩试验。

(2) 使用黄油作为入射脉冲整形器,加载波形具有较长的前沿升时和平缓的上升前沿,能够满足泡沫混凝土材料应力平衡的要求。

(3) 轻质泡沫混凝土动态应力应变曲线表明,在冲击荷载作用下,轻质泡沫混凝土依次经历线弹性阶段、屈服阶段和孔壁破坏 3 个阶段。

(4) 试验结果表明,轻质泡沫混凝土试件平均应变率与撞击杆速度表现出较强的线性相关性。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 王嵩,卢子兴. SHPB 冲击压缩实验中泡沫塑料应力均匀化过程的数值模拟[J]. 振动与冲击,2006,25(5):54-57.  
WANG Song, LU Zi-xing. Numerical simulation of stress homogenization in foamed plastics in split Hopkinson pressure bar experiment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 54-57.

[ 2 ] 刘新让,田晓耕,卢天健,等. 泡沫铝夹芯圆筒抗爆性能研究[J]. 振动与冲击,2012,31(23):166-173.  
LIU Xin-rang, TIAN Xiao-geng, LU Tian-jian, et al. Blast-resistance behaviors of sandwich-walled hollow cylinders with aluminum foam cores[J]. Journal of Vibration and Shock,

2012, 31(23): 166-173.

[ 3 ] 王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构与材料动态响应研究的新进展[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2):81-88.  
WANG Li-li. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 81-88.

[ 4 ] 胡时胜,王悟,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):13-18.  
HU Shi-sheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain rate effect on the properties foam materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 13-18.

[ 5 ] 陈兵,刘 捷. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2010,13(3):286-290.  
CHEN Bing, LIU Jie. Experimental research on properties of foamed concrete reinforced with polypropylene fibers [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3): 286-290.

[ 6 ] Just A, Middendorf B. Microstructure of high-strength foam concrete[J]. Materials Characterization, 2009, 60(7): 741-748.

[ 7 ] Kunhanandan Nambiar E K, Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(2): 221-230.

[ 8 ] Indu Siva Ranjani G, Ramamurthy K. Behaviour of foam concrete under sulphate environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7): 825-834.

[ 9 ] Pankow M, Attard C, Waas A M. Specimen size and shape effect in split Hopkinson pressure bar testing[J]. The Journal of Strain analysis for Engineering Design, 2009, 44(8): 689-698.

[ 10 ] Zhao H, Gray G, Klepaczko J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(4): 319-330.

[ 11 ] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(2): 81-85.

[ 12 ] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 1-6.

[ 13 ] 刘剑飞,王正道,胡时胜. 低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术[J]. 实验力学,1998,13(2):218-223.  
LIU Jian-fei, WANG Zheng-dao, HU Shi-sheng. The SHPB experiment technology for low wave impedance porous materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(2): 218-223.

[ 14 ] 戴凯,刘彤,王汝恒,等. 混凝土 SHPB 试验的波形整形材料研究[J]. 西南科技大学学报,2010,25(1):24-29.  
DAI Kai, LIU Tong, WANG Ru-heng, et al. Research on SHPB experiment of wave-shaping material of concrete[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2010, 25(1): 24-29.

[ 15 ] 毛勇建,李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性[J]. 爆炸与冲击,2008,28(5):448-454.  
MAO Yong-jian, LI Yu-long. Axial stress uniformity in specimens of SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 448-454.

[ 16 ] 宋力,胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.  
SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368-373.