

文章编号: 1001-1455(2011)04-0402-05

# 聚苯乙烯混凝土动态劈裂实验\*

胡俊<sup>1</sup>, 巫绪涛<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑工业学院土木工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 利用直径为 74 mm 的分离式 Hopkinson 压杆径向冲击巴西圆盘试样, 测试了不同聚苯乙烯 (expanded polystyrene, EPS) 颗粒粒径、不同体积含量的 EPS 混凝土的动态拉伸性能。为了保证实验的可靠性, 在试样和入射杆、透射杆之间加上精确设计的垫块, 防止试样两端因应力集中而被压碎破坏; 通过选择合适的整形器, 保证试样有足够的时间达到应力均匀。并分析了 EPS 混凝土劈裂破坏形态。实验结果表明: EPS 混凝土的劈裂强度随应力率的增大而增大; 在 EPS 体积含量较低的 EPS 混凝土中, EPS 混凝土的劈裂强度表现出一定的粒子尺寸效应, 随 EPS 颗粒体积含量的增加, 这一现象逐渐消失。

**关键词:** 固体力学; 劈裂强度; 分离式 Hopkinson 压杆; EPS 混凝土

**中图分类号:** O347.1

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

轻质混凝土被越来越广泛地应用于现代结构工程中。目前, 用于配制混凝土的轻质骨料主要有 2 类: 一类是天然的骨料, 如浮石、硅藻土等; 另一类是人造的骨料, 如膨胀珍珠岩、膨胀页岩、EPS 颗粒等。EPS 颗粒是一种轻质、内部含有不连续空气的泡沫, 将 EPS 颗粒掺入砂浆或混凝土中能制备不同表观密度的轻质混凝土<sup>[1]</sup>。为了更好地开展对 EPS 混凝土这种新型复合材料的缓冲吸能研究, 必须对其力学性能进行研究, 才能为其缓冲吸能特性研究提供有效的本构关系和材料性能参数。

由于 EPS 混凝土的抗拉强度远小于其抗压强度, 在受载时经常会发生拉伸破坏, 并且这种破坏往往与加载率 (应力率) 有关, 因此动态拉伸强度是 EPS 混凝土力学性能的重要指标之一。考虑到直接拉伸实验受加载条件的限制, 因此混凝土的拉伸强度一般由间接拉伸实验得出。巴西圆盘拉伸实验 (劈裂实验) 被广泛应用于混凝土抗拉强度的测试中, 许多国际混凝土规范 (ASTM C-496、ISO4105、BS1881-117 等) 都采用劈裂实验作为测定混凝土拉伸强度的标准方法<sup>[2-4]</sup>。

高应变率下, EPS 混凝土动态劈裂性能研究应该考虑波传播的影响。对动态劈裂拉伸实验的完整评价至少须考虑 3 个关键问题: 弹性行为的假设、随时间变化试样内应力分布的情况以及破坏模式<sup>[5]</sup>。目前对 EPS 混凝土动态力学性能测试主要采用分离式霍普金森压杆 (SHPB), 利用该设备测量巴西圆盘 EPS 混凝土动态拉伸强度, 可以研究 EPS 混凝土动态拉伸强度与加载率之间的关系。

本文中主要利用材料试验机和 SHPB 装置测得 EPS 混凝土准静态和动态下的劈裂拉伸强度, 得到 EPS 混凝土劈裂强度随加载率变化的一些规律, 同时分析 EPS 混凝土劈裂破坏特征。

## 1 试样的制备

### 1.1 原材料与配比

水泥: 强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 其 28 d 抗压强度为 48.4 MPa, 密度为 3.1 t/m<sup>3</sup>。粗骨料: 石子公称粒径为 5~10 mm, 泥的质量含量为 0.3%。细集料: 采用河沙, 细度模数为 2.5, 表观密度为 2 660 kg/m<sup>3</sup>。EPS 颗粒: 直径 3.0 mm, 密度 18 kg/m<sup>3</sup>; 直径 1.0 mm, 密度 30 kg/m<sup>3</sup>。减水剂: 聚羧酸高效减水剂。水灰质量比为 0.27, 其他配合比如表 1 所示, 其中  $\omega$  (水泥)、 $\omega$  (水)、 $\omega$  (石)、 $\omega$  (砂)、

\* 收稿日期: 2010-06-17; 修回日期: 2011-02-22

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重点项目 (KJ2010A270)

作者简介: 胡俊 (1973—), 男, 博士研究生。

$w(\text{EPS})$ 、 $w(\text{减水剂})$  分别为水泥、水、石、砂、EPS、减水剂在 EPS 混凝土中的体积质量,  $d(\text{EPS})$  为 EPS 颗粒的粒径,  $v(\text{EPS})$  为 EPS 在 EPS 混凝土中的体积含量。

表 1 EPS 混凝土的配比

Table 1 Proportion of EPS concrete mixes

| $w(\text{水泥})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | $w(\text{水})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | $w(\text{石})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | $w(\text{砂})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | $w(\text{EPS})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) | $d(\text{EPS})$<br>/mm | $v(\text{EPS})$ | $w(\text{减水剂})$<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|---|--|--|--|--|------------------------|-----------------|--|
| 570                                     | 154                                    | 934                                    | 788                                    | 0  | 1                      | 0               | 4.6                                      |
|   |  |  |  | 0  | 3                      |                 |  |
| 570                                     | 154                                    | 793                                    | 669                                    | 3.0                                      | 1                      | 0.1             | 4.6                                      |
|   |  |  |  | 1.8                                      | 3                      |                 |  |
| 570                                     | 154                                    | 652                                    | 550                                    | 6.0                                      | 1                      | 0.2             | 4.6                                      |
|   |  |  |  | 3.6                                      | 3                      |                 |  |
| 570                                     | 154                                    | 511                                    | 431                                    | 9.0                                      | 1                      | 0.3             | 4.6                                      |
|   |  |  |  | 5.4                                      | 3                      |                 |  |
| 570                                     | 154                                    | 299                                    | 252                                    | 12.0                                     | 1                      | 0.4             | 4.6                                      |
|   |  |  |  | 7.2                                      | 3                      |                 |  |

1.2 试样制作

采用 30 L 的搅拌机进行拌合。先将砂、水泥加入搅拌机中拌合 2 min;接着加入石子拌合 2 min;然后加入 EPS 颗粒拌合 5 min;最后将减水剂加入水中拌合均匀并逐步加入拌合物中拌合 5~10 min,将均匀的 EPS 混凝土拌合物装入模具振捣成型。24 h 后脱模,用铝纸包好放在标准养护室养护 28 d。试样采用直径为 70 mm、高度为 35 mm 的圆柱体。

1.3 实验原理及装置

1.3.1 实验原理

由弹性理论可以知道,巴西圆盘试样在准静态对径压缩下,如图 1 所示,试样加载直径上(施力点附近除外)的应力状态为

$$\sigma_c = \frac{2P}{\pi dh} \frac{d^2}{r(d-r)}, \quad \sigma_t = -\frac{2P}{\pi dh} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$  为压缩应力; $\sigma_t$  为拉伸应力; $d$ 、 $h$  分别为圆盘的直径和厚度; $r$  为从加载点到微单元点的距离。试样的拉伸强度可通过实验中测得的最大载荷代入式(1)中的第 2 式进行计算。本文中取压应力为正。

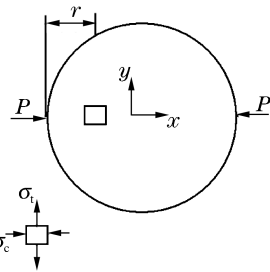


图 1 巴西圆盘对径压缩

Fig. 1 Diametral compression on the Brazilian disc

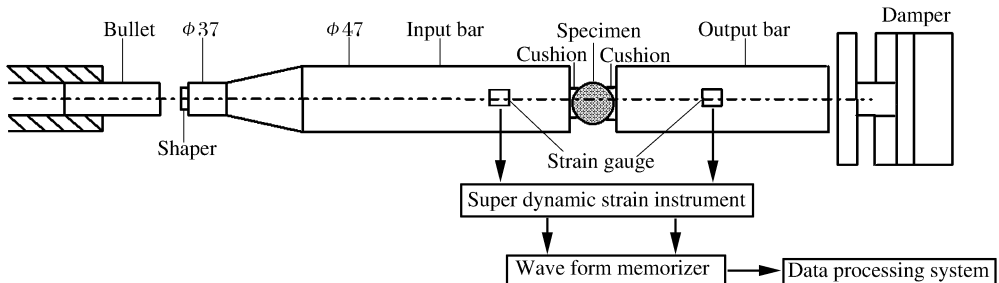


图 2 SHPB 装置示意图

Fig. 2 Schematic of the SHPB setup

1.3.2 实验装置

准静态劈裂实验在材料试验机上进行,动态劈裂实验在 SHPB 装置上进行,实验装置见图 2。输入杆、输出杆与试样直接接触处由于应力集中产生的压应力极高,容易引起该处 EPS 混凝土的破坏,造成

试样不是由中心起裂破坏,这与巴西实验的基本原理不符。对此,在试样两端加上钢垫块,垫块的角度为  $20^\circ$ ,把集中力改为均布力,改善接触部位的受力状态,见图 3。根据 Griffith 强度准则计算的相当应力在中心最大,并从圆心开始随半径增大而逐渐减小,故可以保证中心起裂<sup>[6-7]</sup>。

常规 SHPB 实验中,陡峭的梯形脉冲容易导致试样在小变形下的严重应力不均匀。对于脆性材料,斜坡加载波形有助于试样中应力均匀,所以在 EPS 混凝土 SHPB 劈裂实验中,采用了脉冲整形技术,典型入射、反射、透射波形见图 4。

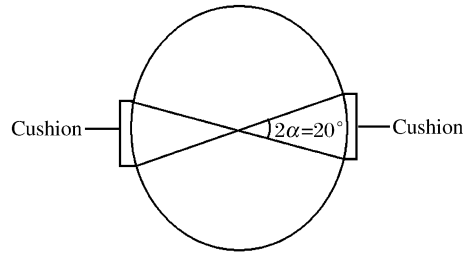


图 3 改进的巴西圆盘对径压缩  
Fig. 3 Dimetral compression on the modified Brazilian disc

## 2 实验结果及分析

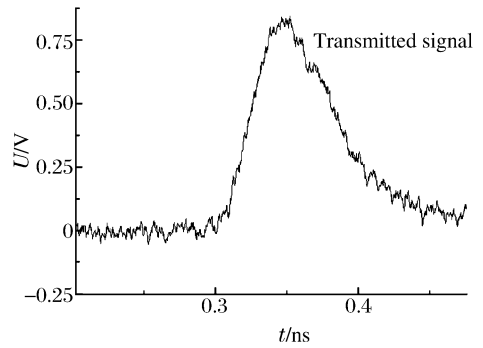
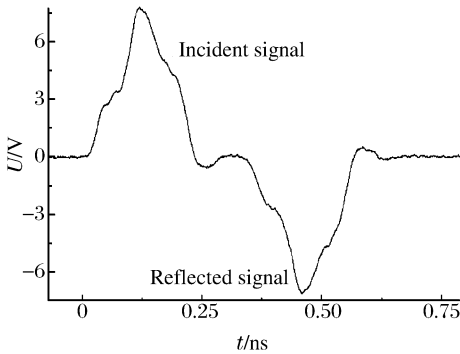


图 4 动态实验中典型的记录信号

Fig. 4 Typical oscilloscope signals in SHPB experiments

由于 EPS 混凝土的拉伸强度与应力率(加载速率)密切相关,应力率的定义为拉伸应力对时间的导数,为了简便起见,计算加载速率时采用近似公式  $\dot{\sigma} = \sigma_t / t$ ,式中  $t$  为试样拉伸破坏时间,是试样达到最大载荷即拉伸强度所用的时间; $\sigma_t$  为试样劈裂拉伸强度。

图 5 给出了 EPS 体积分数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的 EPS 混凝土劈裂强度与应力率之间的关系。从图中可以看出,随应力率的增大,EPS 混凝土的劈裂强度逐渐增大;随 EPS 颗粒体积分数的增加,其劈裂强度逐渐降低。从图 5(a)中可以看出,对于 EPS 体积分数为 0.1 的 EPS 混凝土,EPS 粒径为 1 mm 的 EPS 混凝土的劈裂强度略微大于 EPS 粒径为 3 mm 的 EPS 混凝土的劈裂强度,EPS 混凝土劈裂强度表现出粒子尺寸效应,即 EPS 颗粒粒径的大小对 EPS 混凝土的劈裂强度有影响,对于同样密度的 EPS 混凝土,劈裂强度随 EPS 颗粒粒径的减小而增大。而从图 5(b)~(d)中可以看出,对于 EPS 体积分数分别为 0.2、0.3、0.4 的 EPS 混凝土,这种粒子尺寸效应不明显。这主要是由于 EPS 颗粒大小对裂纹扩展的影响作用不同。随 EPS 体积分数的增加,应力率对 EPS 混凝土劈裂强度的影响减小。另外,随 EPS 体积分数的增加,EPS 混凝土的抗压强度降低,容易在试样两端产生局部压碎破坏,见图 6。

图 6 展示了 SHPB 实验中 EPS 混凝土试样的破坏形态。把中心起裂并随后沿垂直加载直径扩展的裂纹叫主裂纹,把在其他部位起裂和扩展的裂纹叫次生裂纹。如果试样的初始破坏主要由主裂纹引起,认为实验有效,反之,实验无效。图 6(a)为试样在准静态下的破坏形态,从图中可以看出,在准静态下试样基本是从中心开裂,试样中没有出现次生裂纹;图 6(b)是在较小冲击速度下的试样破坏形态,从图中可以看出,试样中有一条沿加载直径的主裂纹,同时还有其他次生裂纹,但试样两端没有出现破坏,破坏形式较理想;图 6(c)是在较高冲击速度下试样的破坏形态,试样基本沿撞击方向破裂为两半,并在试样与 2 个垫块接触处有三角形区域的粉碎情况,主要是由于在高速撞击下,在试样两端与垫块接触处产生应力集中而导致试样在两端被压碎而破坏,但从试样破坏形态看,试样的破坏主要是由于沿加载直径方向的劈裂而引起的。

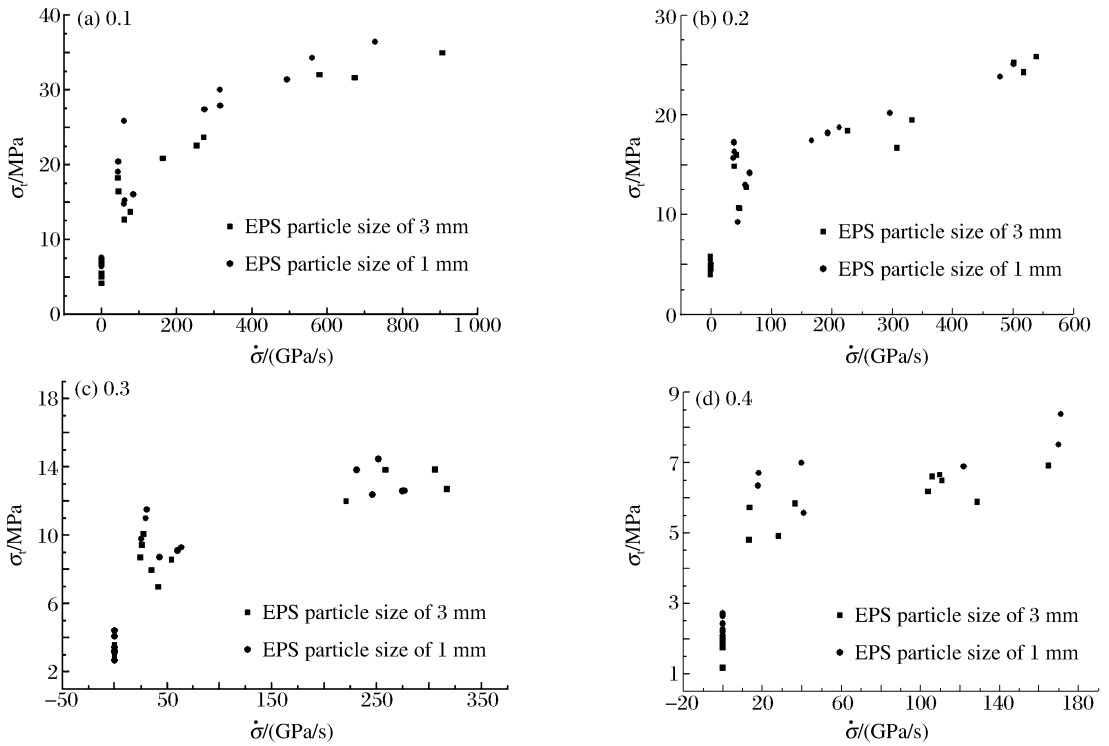


图 5 不同 EPS 体积分数的 EPS 混凝土的劈裂强度随应力率的变化

Fig. 5 Variation of splitting strength with stress rate for EPS concrete with different EPS volume concentration

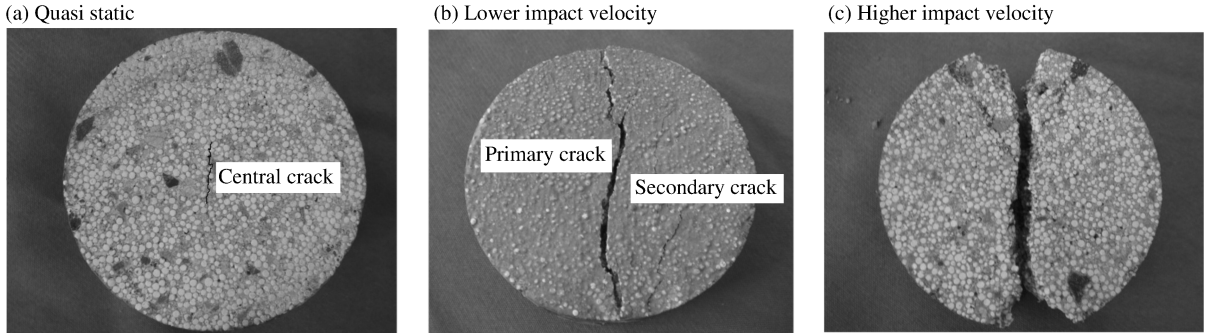


图 6 SHPB 实验中 EPS 混凝土试样的破坏形式

Fig. 6 Splitting failure patterns of EPS concrete specimens in SHPB experiments

### 3 结 论

(1)通过设计合适的垫块,可以改善加载处的应力状态,加大冲击杆与试样的接触面积,减弱应力集中,有利于试样的变形均匀,使试样不会在开裂前由于两端压碎破坏而失效。

(2)通过对 EPS 体积分数不同、粒径大小不同的 EPS 混凝土的动态劈裂强度的测定发现,EPS 混凝土劈裂强度随应力率的增大而增大,但随体积分数的增加,应力率对 EPS 混凝土劈裂强度的影响减小;在 EPS 体积分数为 0.1 时,EPS 混凝土的劈裂强度表现出一定程度的粒子尺寸效应,但在 EPS 体积分数为 0.2、0.3、0.4 时,这一现象不明显。

(3)分析试样破坏形态可知,在弹速较小时,试样基本是从中心开裂;但随弹速的增大,试样两端由于应力集中会出现局部压碎,所以设计合适的垫块,改善两端的受力状态对实验具有重要意义。

### 参考文献:

[1] Ramamurthy K, Kunhanandan Nambiar E K, Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam

concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009,31(6):388-396.

- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens[S]. ASTM C496-90, 1991,4:266-269.
- [3] British Standards Institution. BS 1881: Part 117: Testing concrete method for the determination of tensile splitting strength[S]. London: British Standards Institution, 1983.
- [4] ISO 4108 (E) Concrete; Determination of tensile splitting strength of test specimens[S]. International Standard, 1980;1-3.
- [5] Rodríguez J, Navarro C, Sánchez-Gálvez V. Splitting tests: An alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials[J]. *Journal de Physique IV*, 1994,4(c8):101-106.
- [6] 王启智, 贾学明. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第一部分: 解析与数值结果[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002,21(9):1285-1289.  
WANG Qi-zhi, JIA Xue-ming. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened Brazilian disc specimen—Part I: Analytical and numerical results[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002,21(9):1285-1289.
- [7] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第二部分: 实验结果[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004,23(2):199-204.  
WANG Qi-zhi, WU Li-zhou. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened Brazilian disc specimen—Part II: Experimental results[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004,23(2):199-204.

## Dynamic splitting test of expanded polystyrene (EPS) concrete \*

HU Jun<sup>1</sup>, WU Xu-tao<sup>2</sup>

(1. *Civil Engineering School, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, Anhui, China;*

2. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)*

**Abstract:** To explore the splitting strength of expanded polystyrene (EPS) concrete with the different volume concentrations of EPS, Brazilian disc specimens were diametrically impacted by using a 74-mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) at different impact velocities. For each volume concentration of EPS, the Brazilian disc specimens were tested in the cases of two different particle sizes of EPS, respectively. And accurately designed cushions were placed in the interspaces between the input and output bars and the specimens to prevent the specimens from being crushed due to the stress concentration at the two ends of the specimens. At the same time, an appropriate pulse shaper was used to ensure enough time for the specimens to reach an equilibrium stress state during the experiment. And the splitting failure patterns of EPS concrete were analyzed. The results display that the splitting strength of EPS concrete increases with the increase of stress rate; and that in the EPS concrete with the low volume concentration of EPS, the splitting strength of EPS concrete takes on a certain particle size effect, and this effect disappears gradually with the increase of the EPS volume concentration.

**Key words:** solid mechanics; splitting strength; split Hopkinson pressure bar(SHPB); EPS concrete

\* Received 17 June 2010; Revised 22 February 2011

Corresponding author: HU Jun, jhu0805@163.com