文章编号: 1001-1455(2014)04-0433-06 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)04-0433-06

高温下轻质泡沫铝动态力学性能实验*

王鹏飞,徐松林,李志斌,胡时胜
(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230027)

摘要: 对传统的分离式 Hopkinson 压杆装置加以改进,设计了一种长杆直接撞击 Hopkinson 杆的实验方案,检测出低波阻抗材料在高温动态加载下的应力均匀性。对轻质泡沫铝材料的实验表明,在同一撞击速度下,温度越高,试件两端的应力均匀性越差,增加温度与提高撞击速度均会导致泡沫铝材料冲击端与支撑端的应力不均匀性。根据高温下应力均匀性的实验结果,确定高温下试件均匀变形对应的冲击速度,再通过传统的分离式 Hopkinson 压杆实验得出泡沫铝在高温动态下的力学性能。

关键词: 固体力学;应力均匀;Hopkinson 杆;轻质泡沫铝;高温;动态
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 1301540 **文献标志码**: A

轻质泡沫铝是一种具有高孔隙度的材料,具有良好的吸声、吸能、隔热等特性,在航空航天、汽车运输、船舶交通等领域获得广泛的应用。

当前,对泡沫铝在常温下的动态力学性能有了探讨[1-2],而在高温下力学性能的研究很少。M. Hakamada 等[3]讨论了闭孔泡沫铝在准静态与中应变率(0.000 8~0.2 s^{-1})高温下的力学性能,总结出泡沫铝的性能随温度的变化趋势与其基体材料类似;C. M. Cady 等[4]研究了 Alporas 泡沫铝在低温下的动态力学性能,Alporas 具有很强的温度依赖性。

随着航空航天技术的发展,泡沫材料的应用范围也逐渐拓宽,空间飞行器苛刻的环境温度以及穿透大气层摩擦生热导致的复杂环境,使高温动态下泡沫铝力学行为及其机理的研究具有重要的意义。

由于轻质泡沫铝材料本身的分散性,以及在动态加载过程中应变率效应与惯性效应的相互耦合的情况,使对泡沫铝的应变率效应的研究具有一定的挑战,也对高温下泡沫铝动态力学性能的探讨提出了更高的要求。

1 高温下动态力学性能测试面临的问题

目前,均匀性假定是分离式 Hopkinson 压杆的基本假定[5]。在常温下,利用 SHPB 实验技术对轻质泡沫材料动态力学性能的研究主要面临两个问题:一个是在低速撞击下,试件厚度造成的应力不均匀性(波动效应);另一个是在高速撞击下,泡沫结构破坏的局域化导致试件的应变/应力不均匀性,主要由泡沫结构惯性效应引起[6-7]。前者要求缩减应力均匀化时间,主要通过缩短试件厚度或通过整形器改变加载波形[8]实现。后者则需要控制打击杆速度,不能太高,要求试件的变形一定是“均匀变形模式”的[5],在较高的撞击速度下,泡沫材料先从冲击端开始变形,对应变形模式的“冲击模式”[6-7],此时冲击端的应力远大于后面支撑端的应力[9]。

为解决第一个问题,我们采用石英晶体片技术检测两端应力,并确定试件厚度为 15 mm 保证试件应力的均匀性[10],如图 1(a)所示。利用石英片检测的试件前后端面应力较一致(消除了薄片惯性力造成的实验误差),如图 1(b)所示。

为解决第二个问题,我们采用了两次撞击测量方法[11],如图 2(a)所示。通过两次实验分别测量试件在同一撞击速度下冲击端与支撑端的应力,通过此方法获得的两端应力可代表试件在“一次撞击”过

* **收稿日期**: 2012-12-10; **修回日期**: 2013-04-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(90916026)
作者简介: 王鹏飞(1985—),男,博士。

程中两端的应力，利用此测量方法可以探讨试件在高速撞击过程中的应力均匀性，并可研究泡沫材料在不同撞击速度下对应的三种变形模式[9]：均匀模式，过渡模式，冲击模式。冲击模式下冲击端与支撑端的应力曲线显示，在高速撞击下，试件的应力并不满足均匀性假定，如图 2(b)所示。

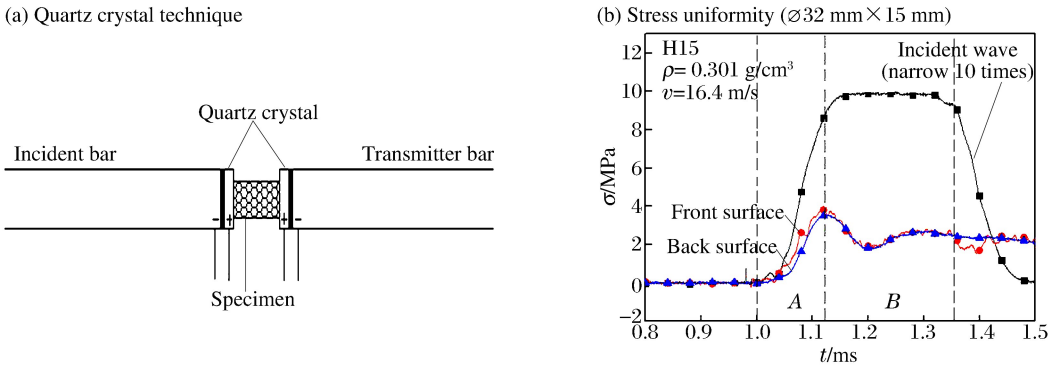

图 1 SHPB 实验中试件两端应力检测的石英晶体片法[10]

Fig. 1 Detect the stresses uniformity of specimen by quartz-crystal method[10]

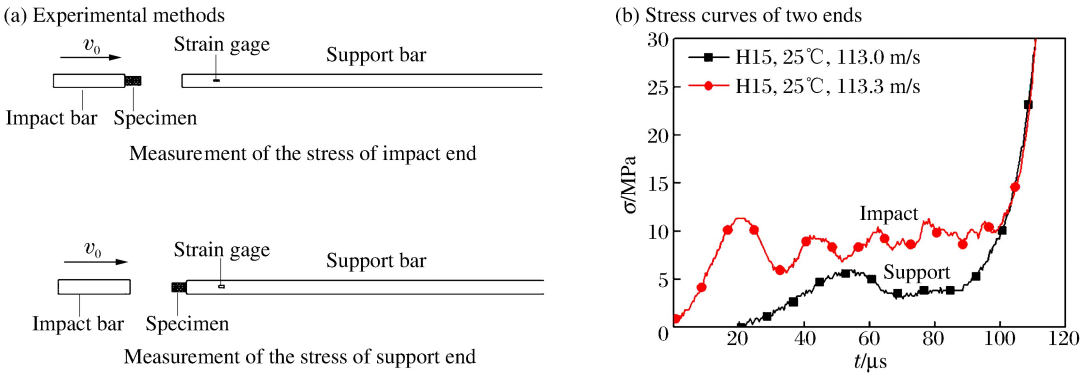

图 2 高速撞击下测量泡沫铝两端应力的实验方法[11]

Fig. 2 Experimental methods to measure the stresses of two ends of foams[11]

综上所述，常温动态加载下泡沫材料两端的应力可以通过如图 1(低速下)、图 2(高速下)所示的测试技术获得，但高温动态下材料力学性能的实验技术更加复杂。首先，动态高温下，图 1 所示的石英晶体片技术难以应用；其次，图 2(a)所示的测量冲击端应力的实验方案已难以实施(见 2.1 节)。因此，发展高温、动态加载下泡沫材料两端应力的测量技术很有必要。

本文中，主要在 Hopkinson 压杆的基础上设计一种高温动态实验技术，重点测量高温动态加载下泡沫材料的两端应力。利用较长的打击杆作为子弹直接撞击 Hopkinson 杆，可以有效地检测高温、动态加载下轻质泡沫铝试件两端的应力曲线。采用此实验方案，观察泡沫铝均匀变形所对应的有效撞击速度，可利用传统的分离式 Hopkinson 压杆实验得到泡沫铝在高温动态下的应力应变曲线。

2 高温下两端应力的检测

2.1 实验方案

以前，通过两种改进的 Hopkinson 压杆实验装置(见图 2)，分别检测试件在常温下冲击端与支撑端的应力曲线，证实了随着撞击速度的提高，泡沫铝两端应力差越大，变形越不均匀[11]。但是在测量冲击端应力的实验中(见图 2(a))，试件与打击杆黏结在一起，难以对试件进行加热与保温，所以此方案很难应用在高温实验中。

因此，我们设计了一种直接撞击法检测高温下冲击过程中试件两端的应力曲线，可以检测高温高速加载下试件的变形模式，如图 3 所示。

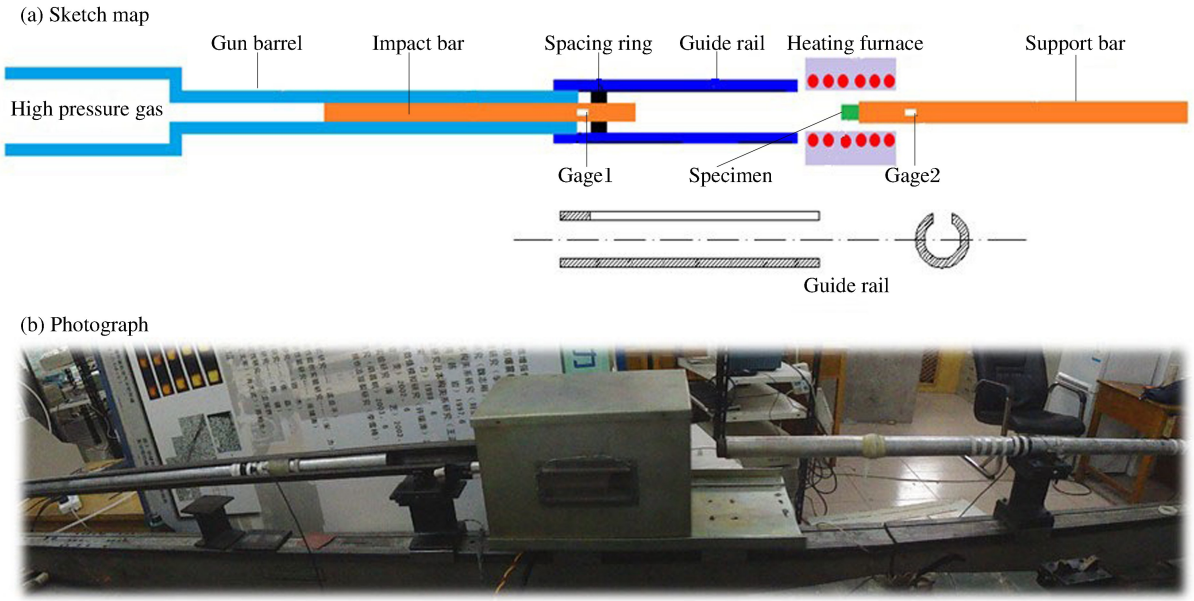

图 3　改进的直接撞击法实验装置

Fig. 3　Improved method of direct impact

枪管内是 1 750 mm 长的打击杆，贴在杆端的应变片可直接测量冲击端的应力曲线。采用较长的打击杆，一方面可保证应变片信号在测试的时间(600 μs)内不受反射波的干扰，另一方面可以确保打击杆在气枪中有较长的加速段，以达到较高的撞击速度。右边安置的是长度为 4 000 mm 的支撑杆，通过支撑杆上的应变片可测量支撑端的应力曲线。打击杆和支撑杆的杆材为超硬铝，直径 37 mm，打击杆通过长导管确保对心碰撞。

高温炉能对静止的试件进行加热并保温，在高温炉的侧面还开有石英玻璃窗口，可利用高速 CCD 拍摄高温下的试件高速变形过程。基于周国才等[12]对封闭式高温炉 SHPB 实验技术进行的探讨以及在处理数据时对温度梯度的修正方法，采用长杆直接撞击 Hopkinson 杆实验可以得到可靠的结果。

2.2　实验结果

通过直接撞击实验得出了泡沫铝试件在不同速度和温度下冲击端与支撑端的应力曲线，如图 4～5 所示。在撞击速度 $v\approx6.5$ m/s 下，无论是室温 25 ℃还是高温 350 ℃的环境，冲击端与支撑端的应力具有很好的重合性，试件变形为均匀模式。随着撞击速度的增加(17～26 m/s)，25 ℃下两端的应力重合性尚好，但是在 350 ℃的环境温度下，冲击端与支撑端应力的差异越来越明显，变形模式已不再均匀。

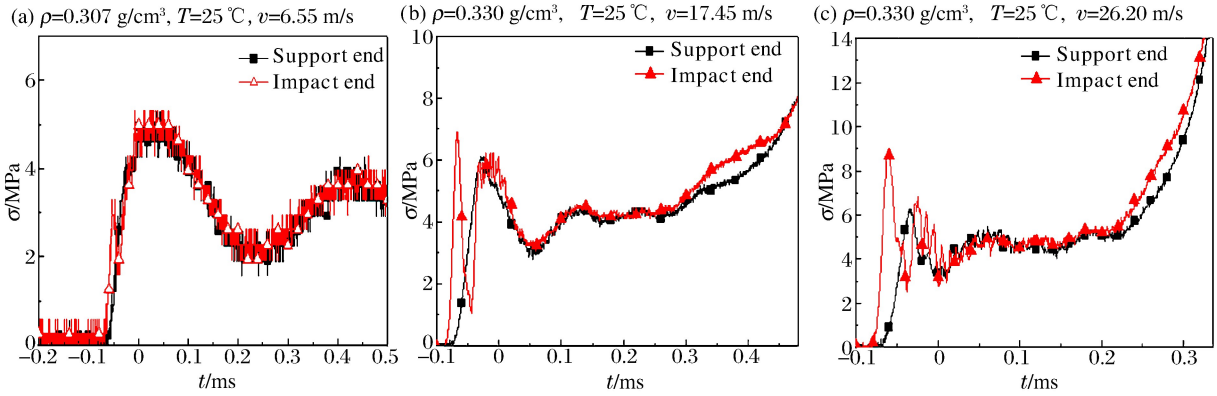

图 4　不同撞击速度下的两端应力曲线(25 ℃)

Fig. 4　Stress curves of two ends under different impact velocity (25 ℃)

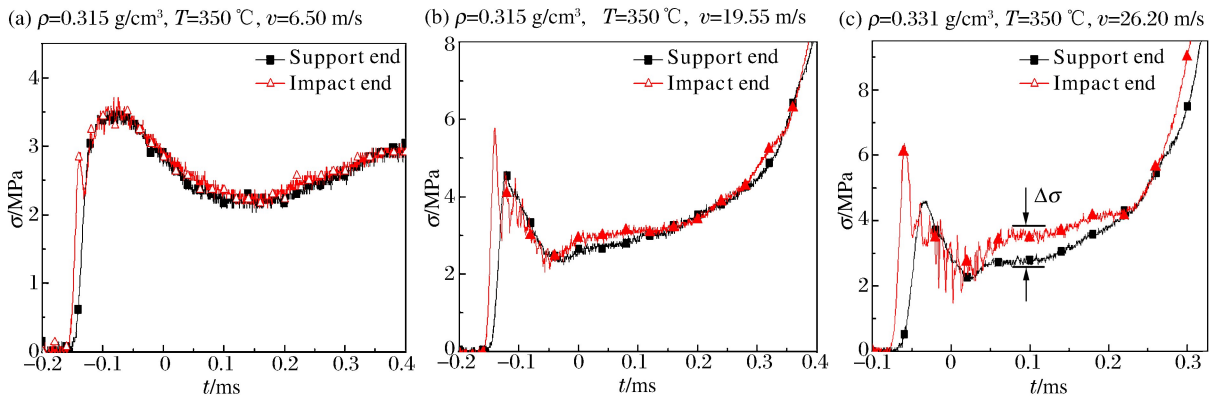

图 5 不同撞击速度下的两端应力曲线(350 ℃)

Fig. 5 Stress curves of two ends under different impact velocity (350 ℃)

以上结果表明,在同一撞击速度下,温度越高,试件两端的应力均匀性越差,增加温度与提高撞击速度均会导致泡沫铝材料冲击端与支撑端的应力不均匀性。

3 泡沫铝高温下的 SHPB 实验

在传统的分离式 Hopkinson 压杆实验中,对于波阻抗较低的材料(如肌肉、泡沫材料等),可以通过石英晶体片技术,检测试件在常温下前端面与后端面在 SHPB 动态加载过程中的应力均匀性,但限于实验条件,并未对高温下 SHPB 实验的应力均匀性进行检测,由实验结果(见图 4~5)可以看出,在高温下试件的应力均匀性更难满足。

在 SHPB 实验中,弹性波在试件中经过三四个来回的反射,才可满足"均匀性"假设的要求[13-14]:

$$t_{\mathrm{equ}} = n\frac{2L_1}{c_1(T)} \tag{1}$$

$$c_1(T) = \sqrt{\frac{E(T)}{\rho}} \tag{2}$$

式中:t_{equ}为应力均匀所需的时间,n 为弹性波在试件中来回传播的次数,$c_1(T)$和 $E(T)$分别是弹性波在试件中传播的波速与弹性模量。

从实验结果可以直观看出,高温下的应力均匀性变差。对泡沫试件,随着温度的升高,$E(T)$逐渐降低,$c_1(T)$也降低,温度越高,$c_1(T)$越小,应力均匀所需的时间t_{equ}也较长。

在 SHPB 实验中,通过整形器技术改变入射波上升沿,可使试件尽早达到应力均匀状态[8,15]。由于 SHPB 石英晶体片技术在高温下难以应用,两端应力难以获取,因此我们设计了长杆直接撞击 Hopkinson 杆实验方案检测两端应力,通过实验得出在高温、同一撞击速度下,两端应力的不均匀性更严重,对于低波阻抗材料的 SHPB 高温实验,更需检测其应力均匀性。

在高温 350 ℃下,速度 19.55 m/s 时两端应力尚存在一些差别,并不显著,但速度 26.20 m/s 时已呈现明显的差别。因此可以确定,在此高温下需保证两端应力相对均匀的冲击速度 $v \leqslant 19$ m/s,低于这个速度一定可基本消除应力不均匀的影响。同时,取试件的尺寸 ∅32 mm×15 mm、密度 0.315~0.335 g/cm³,可以消除尺寸效应与密度分散性的影响[10]。

轻质泡沫铝材料在高温下的 SHPB 实验装置如图 6 所示,子弹长度 800 mm,入射杆、透射杆均 2 000 mm。原始波形如图 7 所示,其中入射波、反射波用电阻应变片测量,透射波用半导体应变片测量,每种应变率 3 次重复实验。不同温度、不同应变率下的工程应力应变曲线如图 8 所示。在 350 ℃、1 000 s^{-1}下,对应的子弹速度约 16 m/s,小于在此高温下保持两端应力均匀的冲击速度(约 19 m/s),因此所得到的实验结果有效。图 8 中还给出泡沫铝在静态(0.001 s^{-1})、高低温下的应力应变曲线,比较表明,此泡沫铝在高低温下均具有一定的应变率效应,且高温下的应变率效应比常温下更显著。

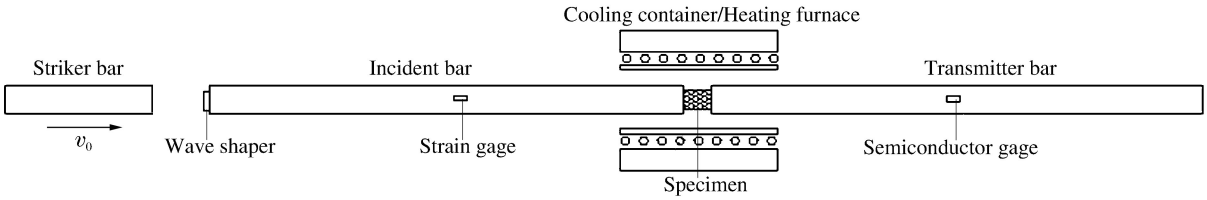

图 6　SHPB 高温实验装置图

Fig. 6　Experimental device of SHPB

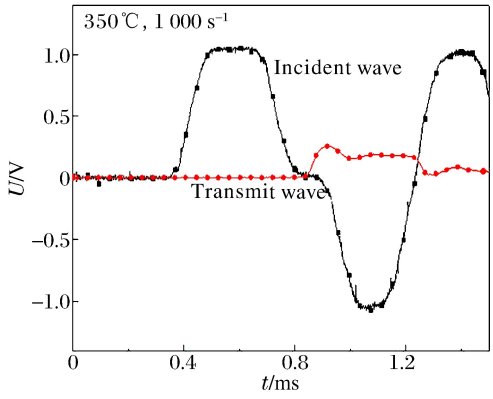

图 7　SHPB 实验中的原始波形

Fig. 7　Original waveform of SHPB

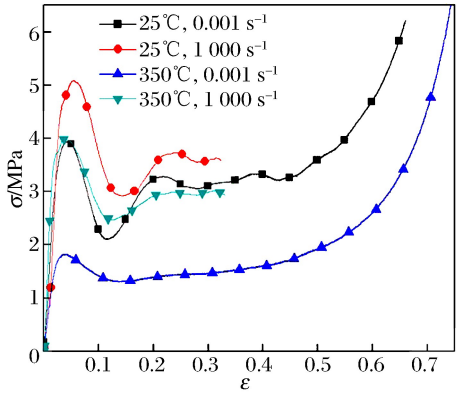

图 8　不同应变率、高低温下的应力应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curves under different strain-rates, temperatures

4　总　结

通过对 Hopkinson 压杆装置的改进，设计了直接撞击法实验方案，采用长子弹撞击，成功检测出高温高速下泡沫铝试件冲击端与支撑端的应力。实验结果指出，在同一撞击速度下，温度越高，试件两端的应力均匀性越差，增加温度与提高撞击速度均会加剧试件两端的应力不均匀性。利用直接撞击的实验结果，确定了泡沫铝在 350 ℃高温下的保证均匀变形的撞击速度，再通过传统的分离式 Hopkinson 压杆实验得出泡沫铝在高温动态下的力学性能，实验表明泡沫铝在高低温下均具有一定的应变率效应。

参考文献：

[1]　Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24:277-298.

[2]　Dannemann K A, James L J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000,293:157-164.

[3]　Hakamada M, Nomura T, Yamada Y, et al. Compressive deformation behavior at elevated temperatures in a closed-cell aluminum foam[J]. Materials Transactions, 2005,46(7):1677-1680.

[4]　Cady C M, Gray Ⅲ G T, Liu C, et al. Compressive properties of a closed-cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,525:1-6.

[5]　Chen Wei-nong, Song Bo. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing and applications[M]. Springer, 2011.

[6]　Tan P J, Harrigan J J, Reid S R. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam[J]. Materials Science and Technology, 2002,18:480-488.

[7]　Lopatnikov S L, Gama B A, Haque M J, et al. Dynamics of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment[J]. Composite Structures, 2003,61:61-71.

[8]　Song B, Chen W. Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2004,44(3):300-312.

[9] Liu Y D, Yu J L, Zheng Z J, et al. A numerical study on the rate sensitivity of cellular metal[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009,46:3988-3998.

[10] 王鹏飞,胡时胜.轴向尺寸对泡沫铝动静态力学性能的影响[J].爆炸与冲击,2012,32(4):393-398.
Wang Peng-fei, Hu Shi-sheng. The mechanics property of foam aluminum with different sizes[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):393-398.

[11] 王鹏飞,徐松林,胡时胜.变形模式对多孔金属材料 SHPB 实验结果的影响[J].力学学报,2012,44(5):928-932.
Wang Peng-fei, Xu Song-lin, Hu Shi-sheng. Influence of deformation modes on SHPB experimental results of cellular metal material[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012,44(5):928-932.

[12] 周国才,胡时胜,付峥.用于测量材料高温动态力学性能的 SHPB 技术[J].实验力学,2010,25(1):9-15.
Zhou Guo-cai, Hu Shi-sheng, Fu Zheng. SHPB technique used for measuring dynamic properties of material in high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010,25(1):9-15.

[13] Yang L M, Shim V. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(2):129-150.

[14] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994,77(1):263-267.

[15] 宋力,胡时胜.SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率[J].爆炸与冲击,2005,25(3):207-216.
Song Li, Hu Shi-sheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(3):207-216.

An experimental study on dynamic mechanical property of ultra-light aluminum foam under high temperatures*

Wang Peng-fei, Xu Song-lin, Li Zhi-bin, Hu Shi-sheng
(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: An improved split Hopkinson pressure bar device was applied and a direct impact Hopkinson experimental program with long bullets was designed to measure the dynamic properties of closed-cell aluminum foam under high temperatures. Stress-time curves of both ends of aluminum foam specimens were obtained. It is found that the temperature markedly influence the stress uniformity of the specimens. As the temperature increases, the stress non-uniformity in the specimen becomes serious under the same impact velocity. Thus, both the increment in the test temperature and the impact velocity will cause stress non-uniformity of aluminum foam specimens. For aluminum foams, homogeneous deformation mode is dominant when the impact velocity is low, and the meso-scopic deformation pattern may vary but the stress field of the foam specimen is macroscopically homogeneous. Finally, the SHPB experiment is used to obtain the stress-strain curve under high temperature and high strain rate, after ensuring homogeneous deformation of the specimen.

Key words: solid mechanics; stress uniformity; Hopkinson bar; ultra-light aluminum foam; high temperature; dynamic

* Received 10 December 2012; Revised 12 April 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (90916026)
Corresponding author: Xu Song-lin, slxu99@ustc.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)