

## 粉煤灰空心球/Al复合泡沫材料准静态力学性能及本构模型

张博一 高金涛 王理 张箭 王伟 武高辉

### Quasi-static mechanical properties and constitutive model of fly ash cenosphere/aluminum syntactic foam

ZHANG Boyi, GAO Jintao, WANG Li, ZHANG Jian, WANG Wei, WU Gaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu复合材料的高温变形行为](#)

High temperature deformation behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu composites

复合材料学报. 2017, 34(8): 1825–1832 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161107.001>

#### [负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能](#)

In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete

复合材料学报. 2020, 37(8): 2005–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191207.001>

#### [纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体准静态压缩吸能机制](#)

Energy absorption mechanism of filament wound composite sandwich cylinder under quasi-static compression loading

复合材料学报. 2017, 34(8): 1764–1771 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161130.002>

#### [碳纤维增强环氧树脂复合材料圆管多胞填充结构吸能特性的准静态压缩试验研究](#)

Quasi-static compression experimental study on energy absorption characteristics of multicellular structures filled with carbon fiber reinforced epoxy composite tubes

复合材料学报. 2021, 38(9): 2894–2903 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201201.003>

#### [Si元素对碳纳米管增强铝基复合泡沫组织与性能的影响](#)

Effect of Si on microstructure and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composite foams

复合材料学报. 2021, 38(1): 186–197 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.001>

#### [30%Cr-Cu复合材料热变形及动态再结晶临界条件](#)

Hot deformation and critical conditions of dynamic recrystallization of the 30%Cr-Cu composites

复合材料学报. 2017, 34(6): 1308–1315 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161104.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003

粉煤灰空心球/Al 复合泡沫材料  
准静态力学性能及本构模型



分享本文

张博一<sup>\* 1,2</sup>, 高金涛<sup>1,2</sup>, 王理<sup>1,2</sup>, 张箭<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 武高辉<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨工业大学 金属基复合材料与工程研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为研究粉煤灰空心球/Al(Fly ash cenosphere/aluminum syntactic foam, FAC/Al) 复合泡沫材料静力性能, 采用万能试验机对铝基复合泡沫材料进行了准静态轴向压缩性能试验, 考察了不同空心球平均粒径(分别为 150、200 和 300  $\mu\text{m}$ ) 对铝基复合泡沫材料变形失效模式及力学性能的影响, 并获取了具有不同空心球粒径的复合材料在准静态下的应力-应变曲线, 在此基础上分析了空心球粒径大小对复合材料能量吸收性能的影响。试验结果表明, 在准静态荷载作用下, 随着空心球粒径的增大, 复合材料的压缩屈服强度、吸能能力及理想吸能效率有着明显的降低。此外, 在获得的应力-应变曲线基础上, 采用最小二乘法拟合得到了铝基复合泡沫在准静态荷载作用下的本构方程, 并对其进行了验证, 结果表明该方程具有较好的拟合度。

**关键词:** 铝基复合泡沫; 准静态压缩; 应力-应变曲线; 吸能性能; 本构方程

中图分类号: TB331; TB333      文献标志码: A      文章编号: 1000-3851(2021)08-2655-11

Quasi-static mechanical properties and constitutive model of fly ash  
cenosphere/aluminum syntactic foam

ZHANG Boyi<sup>\*1,2</sup>, GAO Jintao<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, WU Gaohui<sup>3</sup>

(1. Key Lab of Structure Behavior and Control of China Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Center for Metal Matrix Composite Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to study the quasi-static performance of fly ash cenosphere/aluminum (FAC/Al) syntactic foam, quasi-static compression performance tests were conducted on the FAC/Al specimens by using a universal testing machine. The effects of different average particle sizes on the deformation and failure modes and mechanical performance of the aluminum matrix composite foam material specimens were investigated, and the stress-strain curves of the material specimens with different particle sizes under quasi-static load were obtained. And based on the stress-strain curves, the effects of particle sizes on the energy absorption performance of the material were analyzed. And the test results show that the compressive yield strength and energy absorption capacity and the ideal absorption efficiency of the material decrease with the increase of the particle sizes. In addition, by using the least square method to fit based on the stress-strain curves, the constitutive equation of FAC/Al under quasi-static load was given and verified, and the results show that the equation has a good fitting.

**Keywords:** aluminum syntactic foam; quasi-static compression; stress-strain curve; energy absorption performance; constitutive equation

收稿日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-11-05; 网络首发时间: 2020-11-16 16:54:50  
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003>  
基金项目: 国家自然科学基金 (51578201; 51778196)  
通信作者: 张博一, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为能源工程结构抗爆抗冲击、吸能材料及结构动态力学性能 E-mail: zhangby@hit.edu.cn  
引用格式: 张博一, 高金涛, 王理, 等. 粉煤灰空心球/Al 复合泡沫材料准静态力学性能及本构模型 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2655-2665.  
ZHANG Boyi, GAO Jintao, WANG Li, et al. Quasi-static mechanical properties and constitutive model of fly ash cenosphere/aluminum syntactic foam[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2655-2665(in Chinese).

泡沫铝具有低密度、高比强度、高比刚度及缓冲吸能等优势，作为能量吸能材料，常用于汽车缓冲器及机械减振装置等<sup>[1-4]</sup>。Zhang 等<sup>[5]</sup>研究了高速冲击载荷下双层泡沫铝的力学行为和细观变形模式，建立了材料的细观模型。姚卓等<sup>[6]</sup>将泡沫铝与钢板结合包裹在桥墩外围制成泡沫铝基桥墩复合防撞结构，有效地降低了冲击力，获得了良好的防护能力。Huo 等<sup>[7]</sup>利用不同形状和尺寸的冲击头对泡沫铝夹芯板进行了低速冲击试验，并结合数值模拟的结果指出多层夹芯结构的压缩力效率要明显高于单层夹心结构。

普通泡沫铝的压缩屈服平台较低<sup>[8]</sup>，难以适应一些具有较高冲击能量的荷载工况。作为一种极具应用潜力的缓冲吸能材料，铝基复合泡沫不仅具有较高的强度与良好的承载能力，且具有较宽的屈服应力平台，能够在较高应力水平下持续发生变形，从而吸收较多的能量<sup>[9-14]</sup>。丁珂<sup>[15]</sup>从微细观上对粉煤灰空心球 (FAC)/Al 铝基复合泡沫进行了破坏机制分析，研究表明：在准静态轴向压缩荷载下，铝基复合泡沫内部空心微球通过挤压、剪切产生较大的塑性变形，在此过程中吸收了能量，因此铝基复合泡沫能够表现出较高的吸能能力。张博一等<sup>[16]</sup>利用分离式霍普金森压杆对空心微珠铝基复合泡沫进行了研究，结果表明应变率硬化效应对复合材料的流动应力的影响明显大于应变硬化的影响。Zhang 等<sup>[17]</sup>通过对玻璃珠/5A03 复合泡沫进行实验研究发现，复合泡沫在动态加载下表现出了良好的吸能能力，吸能密度达到  $63.4\text{ MJ/m}^3$ ，相比于准静态加载高了 23%。相比于普通泡沫铝，FAC/Al 复合泡沫材料在高铁、汽车、航空航天、土木工程防灾等领域具有更广阔的应用前景<sup>[18-19]</sup>。

泡沫材料压缩破坏的过程实质就是其吸能耗能的过程，FAC/Al 复合泡沫的性能与其增强基体种类、FAC 大小及其物理力学性能有很大关系，相比于普通泡沫铝<sup>[20-22]</sup>，对 FAC/Al 复合泡沫的研究较主要集中在静力性能及冲击性能研究。本文以不同 FAC 平均粒径的 FAC/Al 复合泡沫为研究对象，使用万能试验机对其进行了准静态压缩试验，研究其在准静态荷载作用下的力学性能和吸能性能，并基于应力-应变曲线采用最小二乘法拟合得到 FAC/Al 复合泡沫在准静态下的本构方程。

1 试验概况

1.1 FAC/Al 复合泡沫的设计与制备

复合材料的设计思路如图 1 所示，基体材料选择不同的铝合金用以调整材料密度与性能，通过筛选不同粒径的粉煤灰空心球 (FAC) 颗粒，作为复合材料的增强体。本文试验所用的 FAC 的平均粒径分别为 150、200 和 300  $\mu\text{m}$ 。FAC/Al 复合泡沫制备的工艺流程为首先筛分出试验所用的平均粒径分别为 150、200 和 300  $\mu\text{m}$  的 FAC，分别制作成 FAC 预制块；其次，将制作好的预制块放入模具中，两者共同加热至 600~650℃，铝材熔化后加热至预定温度 (700~800℃)；最后将熔化的铝材倒入模具进行浇铸，浇铸的同时施加压力将铝液渗透入预制块，在保持一定压力下逐渐降温，待凝固成型后，脱模即制得 FAC/Al 复合泡沫试验块。具体制作工艺流程见图 2。

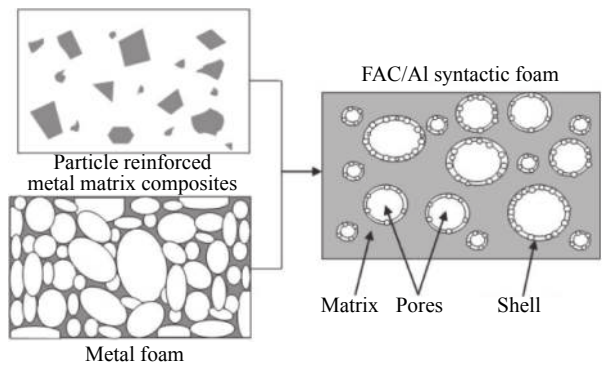


图 1 粉煤灰空心球 (FAC)/Al 基复合泡沫的设计思路<sup>[23]</sup>

Fig. 1 Design for fly ash cenosphere (FAC)/aluminum syntactic foam

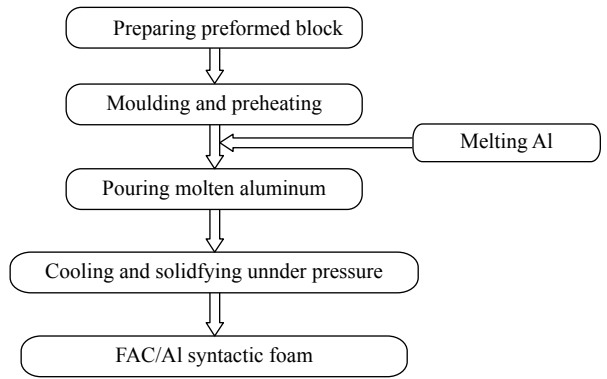


图 2 FAC/Al 复合泡沫制作流程图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Fabricated technics of FAC/Al syntactic foam<sup>[23]</sup>

为保证试件加工后能够维持原有的力学性能，确保试件加工精度及试验件内部构造的完整性，对预制块的加工采用线切割的方法，加工后试件样品见图 3，SEM 图像见图 4。



图3 FAC/Al 基复合泡沫试样  
Fig. 3 Sample of FAC/Al syntactic foam

1.2 材料试样基本参数

准静态压缩性能试验试件采用三种不同规格的铝基复合泡沫，其空心球粒径大小分别是 150、200 和 300  $\mu\text{m}$ ，共制作 12 个，分为 4 组，每组采用相同应变率不同空心球粒径大小的复合材料以研究空心球粒径对复合泡沫材料力学性能的影响，通过前三组的对比试验，考察在准静态范围内不同应变率对试件力学及吸能性能的影响，并为以后试验选择合适的加载应变率提供参考；通过设置 5 mm 高度试件组来研究不同高径比对试件力学性能的影响，具体参数见表 1。

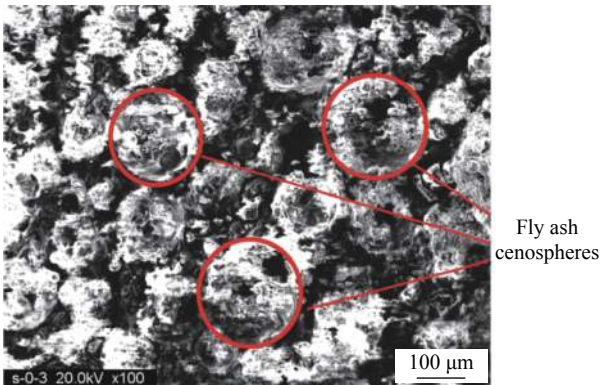


图4 FAC/Al 基复合泡沫的 SEM 图像  
Fig. 4 SEM image of FAC/Al syntactic foam

1.3 试验装置及加载方案

FAC/Al 复合泡沫准静态轴向压缩性能试验所用加载设备为哈尔滨工业大学材料分析测试中心的 INSRTON5569 型电子万能试验机，该设备能提供的压力最大量程为 50 kN，试验设备见图 5。试验测试在室温条件下进行，试验试样尺寸见表 1，试验中压头移动速度分别选择 0.9 mm/min、9 mm/min、90 mm/min 和 3 mm/min，相应的试件的应变率  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、 $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

准静态压缩性能试验主要包含以下步骤：(1)为减小试件端面 and 压头接触面上的摩擦，在万能材料试验机压头及试件上下端面处涂抹凡士林润滑剂，然后再安放试件；(2)在计算机上设定好压头的给定加载速度并安放位移传感器以测量试件变形；(3)将位移传感器清零后按照试验要求由程序控制加载；(4)通过数据采集系统实时采集记录得

表 1 FAC/Al 复合泡沫试件几何参数及加载应变率

Table 1 Geometric parameters and loading strain rates of FAC/Al syntactic foam specimens

Group	Foam	Length/mm	Cenosphere particle size/ $\mu\text{m}$	Strain rate/ $\text{s}^{-1}$	Diameter/mm
Group1	P-R001-L15-150	15	150	0.001	10
	P-R001-L15-200	15	200	0.001	10
	P-R001-L15-300	15	300	0.001	10
Group2	P-R01-L15-150	15	150	0.01	10
	P-R01-L15-200	15	200	0.01	10
	P-R01-L15-300	15	300	0.01	10
Group3	P-R1-L15-150	15	150	0.1	10
	P-R1-L15-200	15	200	0.1	10
	P-R1-L15-300	15	300	0.1	10
Group4	P-R01-L5-150	5	150	0.01	10
	P-R01-L5-200	5	200	0.01	10
	P-R01-L5-300	5	300	0.01	10

Notes: P—Compression; R001, R01 and R1—Strain rate are 0.001, 0.01 and 0.1, respectively; L15 and L5—Length are 15 and 5 mm, respectively; 150, 200 and 300—Cenosphere particle size.



到的压缩荷载与位移绘制相应的压缩应力应变曲线，并进行相关分析。

2 试验结果与讨论

2.1 FAC/Al 复合泡沫试验现象与失效模式

图 5(a)~5(c) 为高度为 15 mm、不同 FAC 粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件在  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  应变率作用下的最终形态。可见，所有试件都在中间位置出现鼓出现象，不同的是，150  $\mu\text{m}$  粒径 FAC/Al 复合泡沫试件出现了大约  $45^\circ$  方向的开裂现象，最终形成一个通缝，而 200  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$  粒径 FAC/Al 复合泡沫试件没有出现开裂现象，且变形过程中试件基本处于对称变形状态，表现出良好的塑性变形能力，其中，200  $\mu\text{m}$  FAC/Al 复合泡沫粒径试件表面一直保持比较光滑的状态直至被压实，而 300  $\mu\text{m}$  粒径 FAC/Al 复合泡沫试件在被压缩过程中出现了材料掉渣的现象。

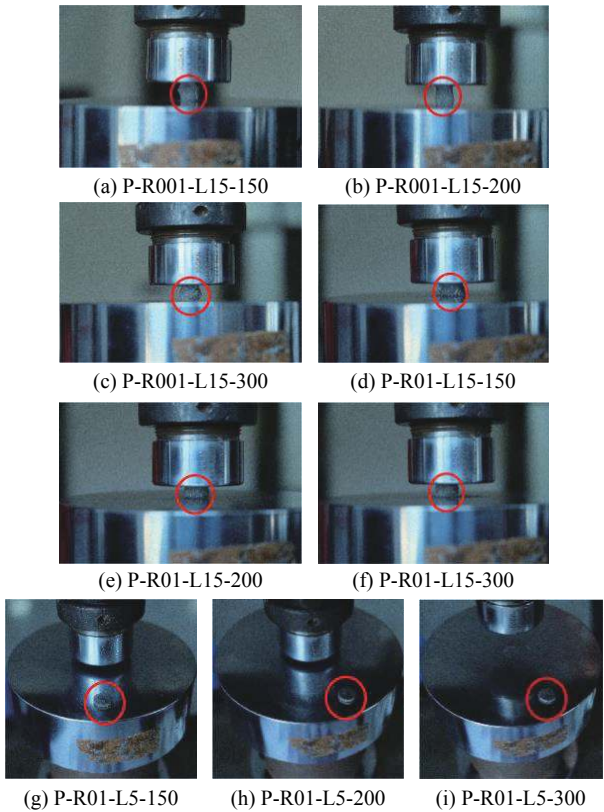


图 5 所有 FAC/Al 复合泡沫试件的最终形态  
Fig. 5 Final forms of all FAC/Al syntactic foam

图 5(d)~5(f) 为高度 15 mm、不同 FAC 粒径的 FAC/Al 试件在  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  应变率作用下的最终形态。可以看出，150  $\mu\text{m}$  粒径试件由于在压缩过程中产生了裂缝，在上下接触面的约束作用下使试件在

变形过程中产生了不对称的变形。其他试件的试验现象与  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  作用下的试验现象基本一致。

高度为 15 mm 试件在应变率为  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  应变率作用下的变形失效过程与上述 2 种应变率作用下的变形失效过程类似。

图 5(g)~5(i) 为 5 mm 高，不同 FAC 粒径的 FAC/Al 试件在  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  应变率作用下的最终形态。可知，所有试件均未出现开裂现象，只是 300  $\mu\text{m}$  粒径的试件出现些许掉渣。在相同应变率作用下，试件的长径比对试件的破坏形态产生一定的影响，高度较小的 FAC/Al 复合泡沫试件还未表现出明显的裂缝已经被压扁，试件的最终变形形态也未出现表面裂缝。

图 6(a) 和图 6(b) 分别是试验前、后复合泡沫的金相显微图像。可以看到试验前的 FAC 在铸造后仍保持球形，而在试验后，FAC 被压缩，呈现带状的破碎现象，较好地吸收了能量。

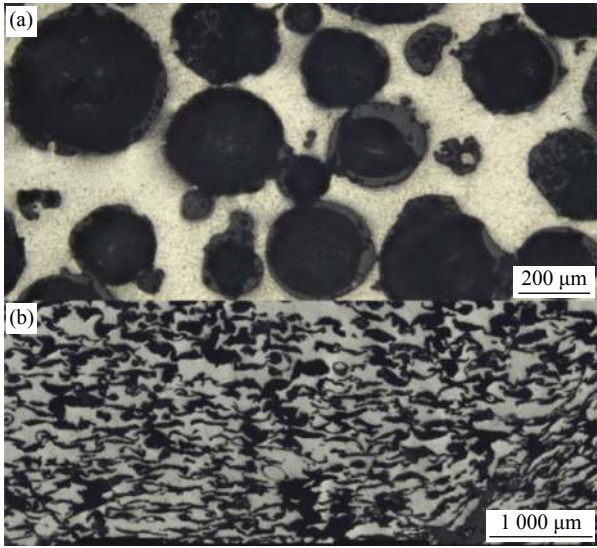


图 6 试验前后 FAC/Al 复合泡沫的金相显微图像  
Fig. 6 Metallographic microscopic images of FAC/Al composite foams  
((a) Before test; (b) After test)

2.2 FAC/Al 复合泡沫的力学性能

图 7 是平均粒径为 200  $\mu\text{m}$  的复合泡沫复合泡沫试件在应变率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  作用下的应力应变曲线。加载初期，设备压头刚接触 FAC/Al 复合泡沫试件，此时试件未受力，应力应变均为 0，试件未产生变形，如图 7(a) 所示；随着荷载继续施加，FAC/Al 复合泡沫材料试件持续受力，当试件应变达到约 0.06 时，应力达到阶段最大值，试件开始屈服；FAC/Al 复合泡沫材料压缩屈服过程中，内部大量 FAC 会产生破碎，材料塑性变形就是在这个阶段

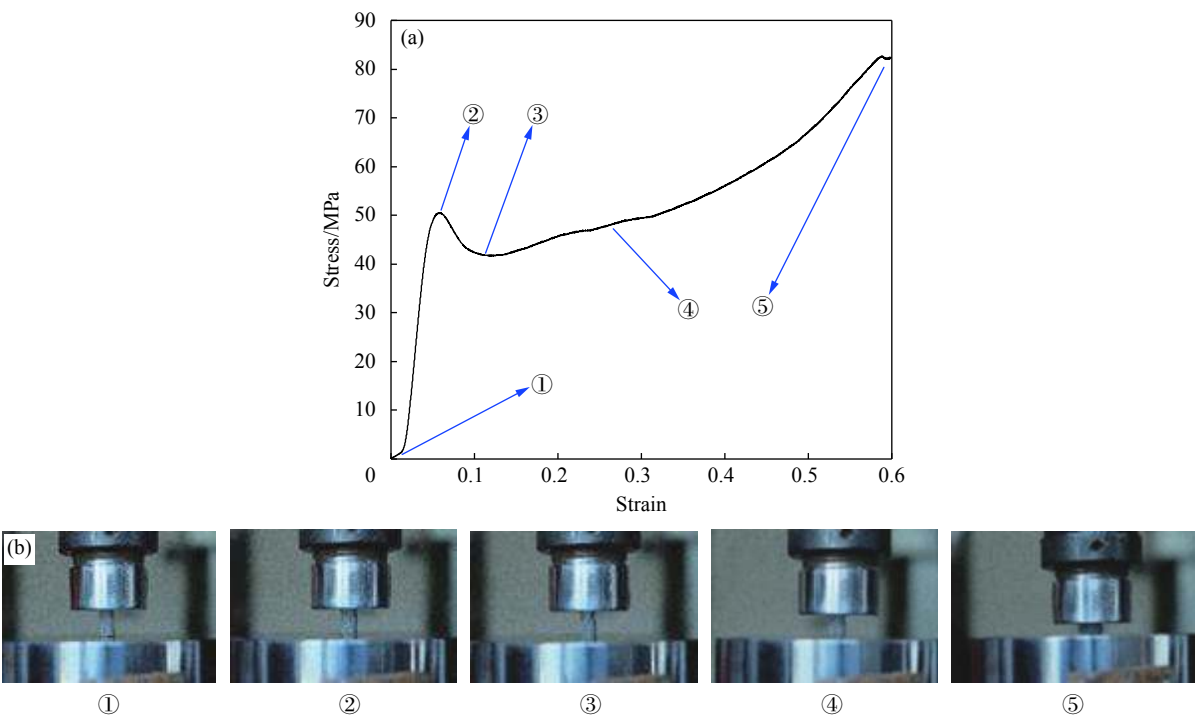


图 7 P-R001-L15-200 FAC/Al 复合泡沫试件在应变率  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  下的应力-应变曲线 (a) 和变形过程 (b)

Fig. 7 Stress-strain curve (a) and deformation process (b) of FAC/Al syntactic foam specimen P-R001-L15-200 under the strain rate of  $10^{-3}\text{s}^{-1}$

发生的，宏观上表现就是试件中间渐渐鼓出，在这个过程中会有一个卸载区段，在达到最低点后，试件持续受力，FAC 虽然会继续破碎，但已足以支撑荷载，表现为随着应变的增大，应力有略微的增加，持续到试件被逐渐压实，之后应力随应变的增加迅速增加。

2.2.1 应力-应变曲线

试验测得高度为 15 mm 的复合泡沫复合泡沫试件在应变率分别为  $10^{-2}\text{s}^{-1}$  和  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  加载作用下的应力-应变曲线如图 8、图 9 所示。高度为 5 mm 的复合泡沫复合泡沫试件在应变率为  $10^{-2}\text{s}^{-1}$  加载作用下的应力-应变曲线如图 10 所示。

FAC/Al 复合泡沫材料在三种应变率作用下，应力-应变曲线具有一般多孔材料所具有的典型“三阶段”：线弹性阶段、塑性坍塌屈服阶段及致密上升(应力强化)阶段。

① 试件从刚被压缩至 FAC/Al 复合泡沫里面的空心球开始破坏前，此阶段称为线弹性阶段，在此阶段，应力应变基本呈线性关系，材料试件主要是靠 FAC 和铝基体承担荷载，依靠铝基体和 FAC 的弹性变形吸收能量；

② 塑性坍塌屈服阶段(平台段)，主要是指 FAC 从开始破坏至压碎这个过程，在此阶段，试

件中的 FAC 受压变形，首先应力值表现在达到第一峰值后迅速下降至平台段，其次，在平台段，试件产生较大的塑性变形，在应力波动较小甚至恒定不变的情况下，应变一直增加，直至 FAC 被完全压碎，在 FAC 被压碎的过程中，FAC/Al 复合泡沫会吸收大量的能量，此阶段也是 FAC/Al 复合

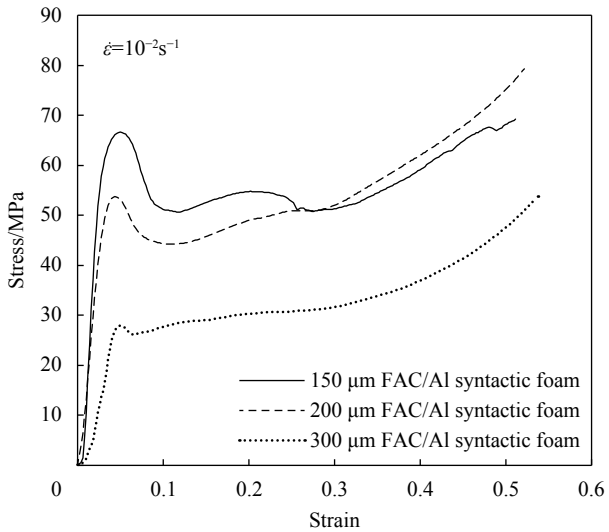


图 8 15 mm 高 FAC/Al 复合泡沫试件在应变率  $10^{-2}\text{s}^{-1}$  下的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with height of 15 mm under the strain rate of  $10^{-2}\text{s}^{-1}$

泡沫吸能的主要阶段，此平台段越长说明材料的吸能效果相对较好，由图 8 可知，随着应变增加，在应变达到 0.35 之前的塑性区内，应力的增加并不明显，这个阶段可以看成 FAC/Al 复合泡沫试件在应变率为  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  情况下的应力平台段；

③ 致密化上升阶段，当外荷载继续作用，FAC 被压碎，孔壁之间开始相互接触，相互挤压下产生接触作用力，材料进入致密化上升阶段，此阶段，材料应力会随应变增大而迅速变大。

从图 8 和图 10 可以看出，在相同应变率作用下，15 mm 高 FAC/Al 试件随着复合材料内 FAC 平均粒径的增加，其对应的屈服平台应力有着比较明显的降低。在弹性阶段，直线的斜率(即材料的弹性模量)也随着降低，FAC 粒径为  $150 \mu\text{m}$  的试件在弹性阶段的最大应力是  $300 \mu\text{m}$  粒径相应阶段最大应力的 2~3 倍；在塑性屈服阶段，也是随着平均粒径的增加而降低，但需要注意的是：在屈服平台段即将结束进入致密段时， $150 \mu\text{m}$  试件与  $200 \mu\text{m}$  FAC/Al 复合泡沫试件的应力应变曲线有一个交汇点，此时，两者应力应变大小一致，在此之后， $200 \mu\text{m}$  试件在相同应变下应力增幅大于  $150 \mu\text{m}$  试件。相比较而言，在应变率为  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  作用下，在弹性阶段的最大应力和致密阶段的最大应力有所增加，且在致密段在相同应变下增加的幅值更加明显，表现出了一定的应变率效应。

由图 8 和图 10 可知，在相同应变率( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )下，高径比对复合材料应力-应变曲线有一定影响。对于平均粒径为 150、 $200 \mu\text{m}$  的 FAC/Al 复合泡沫试件，在弹性阶段，相较于 15 mm 高试件，5 mm 高度的试件有较高的弹性应力值；其次，5 mm 高度 FAC/Al 试件的屈服平台段变窄，更早进入致密化阶段；最后，在致密化后，在相同的应变变化条件下，5 mm 高度的 FAC/Al 试件应力幅值增大的更加明显。这表明随着高度的增加，15 mm 高 FAC/Al 试件在准静态压缩过程中由于高径比较大，稳定性相比较 5 mm 高 FAC/Al 试件稍差，导致在试验过程中试件过早的屈服，同时由于长度的原因，试件内的 FAC 数量增加，并且力的传递路径加长，使试件内的 FAC 从开始屈服到致密化的过程加长，从而显得较高试件的屈服应力平台段比较长。

2.2.2 应变率对力学性能的影响

图 11 是高 15 mm、FAC 粒径为  $200 \mu\text{m}$  的 FAC/Al 复合泡沫试件在不同应变率作用下的应力-

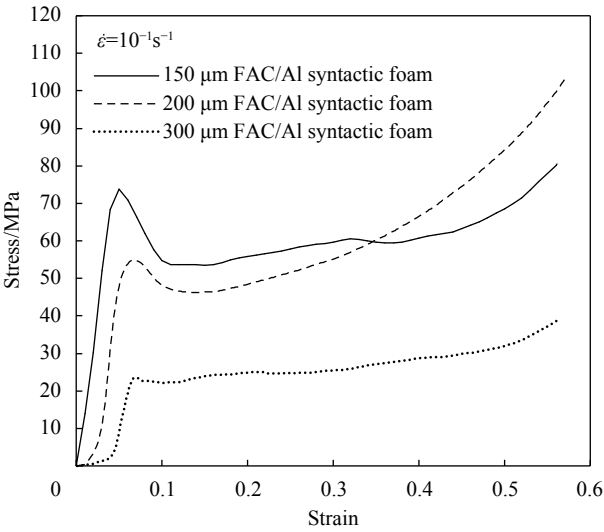


图 9 15 mm FAC/Al 复合泡沫试件在应变率  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  下的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with height of 15 mm under the strain rate of  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$

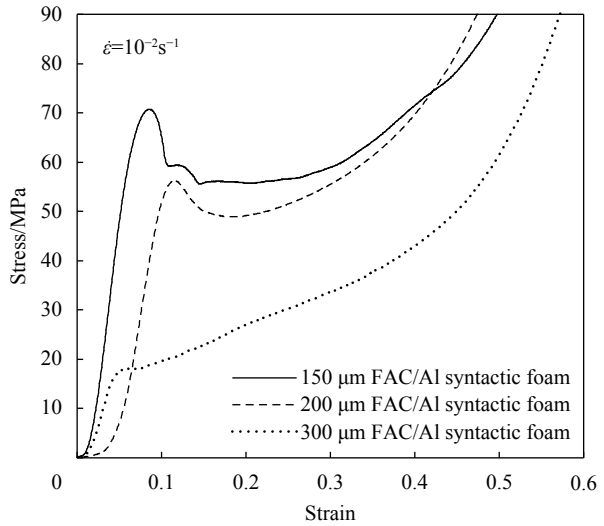


图 10 5 mm 高 FAC/Al 复合泡沫试件在应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  下的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with height of 5 mm under the strain rate of  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$

应变曲线。可见，随着应变率的增加，试件的线弹性段的斜率，即弹性模量有所降低，同时线弹性段的最大应力有所增加，屈服阶段及致密化阶段应力也随着应变率的增大而增大，应变率对试件有一定的应力强化作用。

图 12 是高度为 15 mm、不同 FAC 粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件平均弹性模量与应变率的关系曲线。宏观上，不同粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件随着应变率的增大，材料的平均弹性模量降低，说明 FAC/Al 复合泡沫的平均弹性模量对应变率是



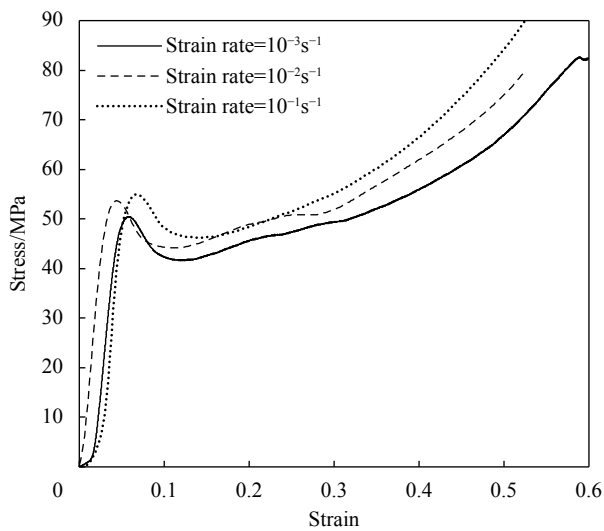


图 11 不同应变率下 15 mm 高、200 μm 粒径 FAC/Al 复合泡沫试件的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with 200 μm cenosphere in height of 15 mm under different strain rates

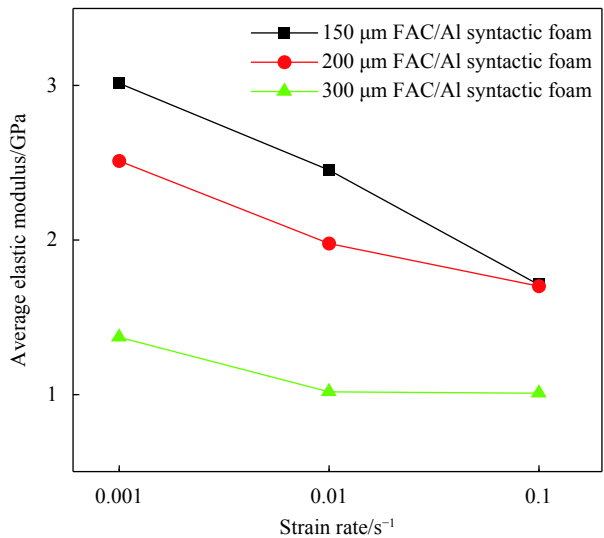


图 12 15 mm 高、不同 FAC 粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件平均弹性模量与应变率的关系

Fig. 12 Relationship between the average elastic modulus and strain rate of the FAC/Al syntactic foam specimens with different cenospheres in height of 15 mm

具有一定的敏感度的。对于不同粒径的 FAC/Al 复合泡沫材料对应变率的敏感度也是有所区别的，在应变率由  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  变到  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  后，150 μmFAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低了约 564 MPa，200 μm 铝基复合泡沫平均弹性模量降低了约 536 MPa，300 μm FAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低了约 352 MPa，150 μmFAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低率约为 300 μm FAC/Al 复合泡沫平均弹性模量的 1.6 倍，在应变率由  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  变到  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  后，

150 μm FAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低了约 740 MPa，200 μm FAC/Al 复合泡沫的平均弹性模量降低了约 277 MPa，300 μm FAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低了约 9 MPa，150 μmFAC/Al 复合泡沫平均弹性模量降低率约为 300 μm FAC/Al 复合泡沫的平均弹性模量的 82 倍，说明 150 μm FAC/Al 复合泡沫对应变率变化的敏感度比 300 μm FAC/Al 复合泡沫的高，特别是在较高应变率情况下，150 μm FAC/Al 复合泡沫的平均弹性模量对于应变率具有较高的敏感度。

2.3 FAC/Al 复合泡沫的吸能性能

泡沫铝在被压缩变形的过程中，因其比较高而宽的应力屈服平台，可以在保持应力基本恒定的情况下能够吸收大量能量。J.Miltz 等<sup>[24]</sup>提出了对泡沫材料进行吸能性能评估的吸能能力公式、吸能效率公式和理想吸能效率公式：

$$W = \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \tag{1}$$

$$E = \frac{1}{\sigma_m} \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \tag{2}$$

$$I = \frac{1}{\sigma_m \epsilon_m} \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \tag{3}$$

式中： $\epsilon_m$ 为任意应变； $\sigma_m$ 为任意应力。通过式 (1)~(3) 可以获得吸能效率和理想吸能效率曲线，进而可以直观的判断材料的吸能效果。一般认为泡沫材料都可以应用这些公式，压实应变以下能够发挥其最佳吸能性能。

本文以 15 mm 高在应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  作用下不同粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件为例来说明 FAC/Al 复合泡沫材料的吸能性能，并对比 FAC 粒径大小对吸能性能的影响，应力-应变曲线见图 7。利用式 (1)~(3) 分别对 FAC/Al 复合泡沫材料应力应变曲线参数进行积分，分别获得 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫的吸能能力、吸能效率及理想吸能效率与应力的关系曲线，如图 13~15 所示。

图 13 是 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫在应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  作用下吸能能力-应变曲线。可以看出随着 FAC 平均粒径的增大，呈现出吸能能力降低的趋势，其中 150 μm 粒径和 200 μm 粒径的 FAC/Al 复合泡沫吸能能力相差不大，这是由于从本构曲线上看，粒径越小，材料的综合强度越高，因此平台应力越高，吸能量越多。但在相同应变的情况下，相比于部分 FAC/Al 复合泡沫<sup>[3, 16]</sup>

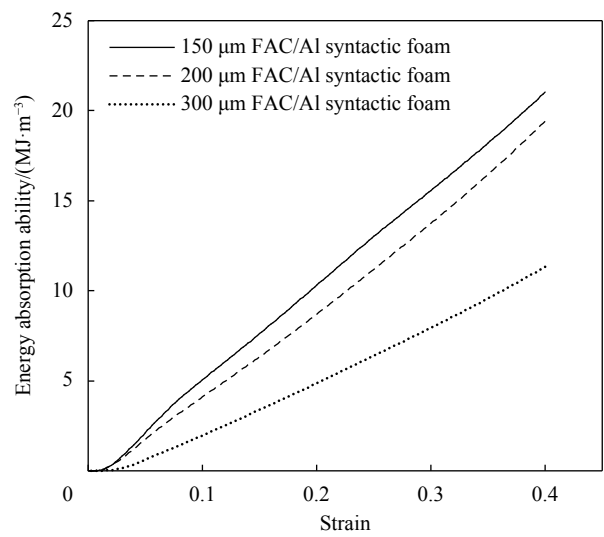


图 13 15 mm 高、不同 FAV 粒径 FAC/Al 复合泡沫吸能能力-应变曲线  
Fig. 13 Energy absorption ability-strain curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with different cenospheres in height of 15 mm

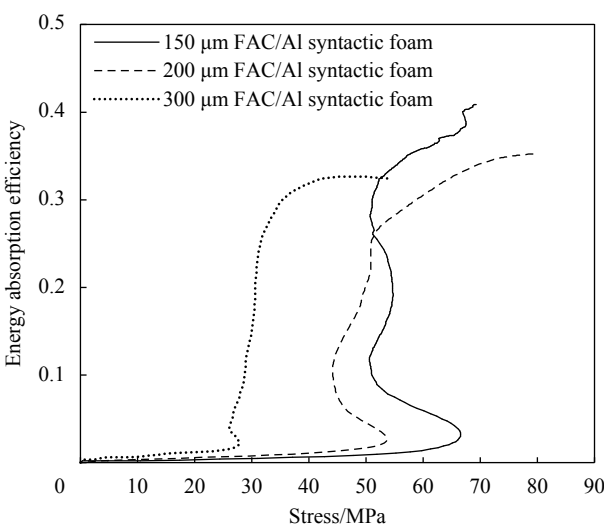


图 14 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫吸能效率-应力曲线  
Fig. 14 Energy absorption efficiency-stress curves of the FAC/AL specimens with different cenospheres in height of 15 mm

与普通泡沫铝<sup>[5]</sup>, 单位体积 FAC/Al 复合泡沫的吸能有着数倍乃至数十倍的提升。一般认为当 FAC/Al 复合泡沫的应变大于压实应变后, 材料中空心球已经被压实, 此时已经充分发挥了 FAC/Al 复合泡沫吸能体的作用, FAC/Al 复合泡沫的压实应变大约在 0.35~0.5 范围内。

图 14 是 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫在应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  作用下吸能效率与应力关系曲线。可以看出, 随着平均粒径的增加, 吸能效率的峰值呈现降低的趋势, 这个与前述的吸能能力保持了一致性。

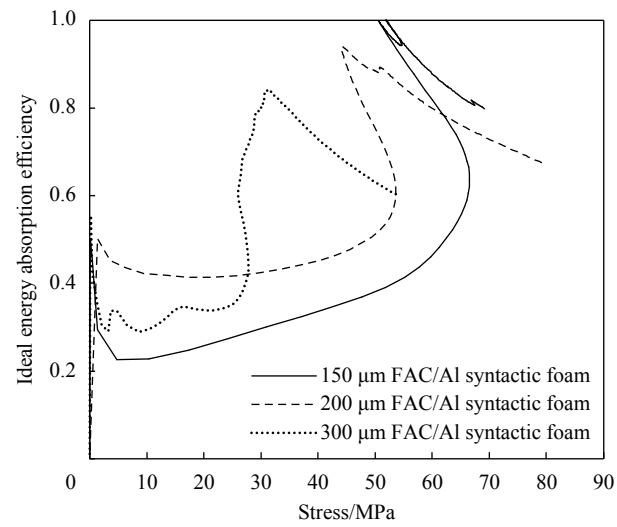


图 15 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫理想吸能效率-应力曲线  
Fig. 15 Ideal energy absorption efficiency-stress curves of the FAC/Al syntactic foam specimens with different cenospheres in height of 15 mm

图 15 为 15 mm 高、不同 FAC 粒径 FAC/Al 复合泡沫在应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  作用下理想吸能效率与应力关系曲线, 随着平均粒径的增加, 理想吸能效率的峰值呈现降低的趋势, 三种不同粒径的 FAC/Al 复合泡沫的理想吸能效率均在 0.8 以上, 理想吸能效率反映的是材料和理想材料之间的接近程度, 这说明 FAC/Al 复合泡沫材料具有很好的吸能效果。

### 3 FAC/Al 复合泡沫本构方程

本文借鉴 James 等<sup>[23-26]</sup>做法, 将压缩应力分解成弹性模量和与应变相关的形状函数的乘积, 弹性模量与应变率有关, 表示成应变率影响函数, 同时考虑密度的影响, 形状函数使用十次多项式, 表达式如下:

$$\sigma = G(\rho)M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})f(\varepsilon) \quad (4)$$

式中:  $G(\rho)$  为密度影响函数;  $M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  为应变率影响函数,  $M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]$ ;  $f(\varepsilon)$  为与应变相关形状函数,  $f(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{10} A_i \varepsilon^i$ ;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率。

选取 15 mm 高平均粒径为 200  $\mu\text{m}$  的 FAC/Al 复合泡沫的密度为参考密度, 参考应变率为  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 此时  $G(\rho)$  和  $M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  的值均为 1, 有

$$\sigma = G(\rho)M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})f(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{10} A_i \varepsilon^i \quad (5)$$

使用式 (5) 对应应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  作用下 200  $\mu\text{m}$  粒径 FAC/Al 复合泡沫材料的应力-应变曲线进行拟合, 如图 15 所示, 可得  $A_i$  的值, 如表 2 所示。

表 2 FAC/Al 复合泡沫应变相关形状函数的拟合参数  $A_i$

Table 2 Fitting parameters of strain dependent shape function $A_i$ of FAC/Al syntactic foam specimens									
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
2 199.66	-21 182.08	-265 269.12	$6.70\times10^6$	$-5.71\times10^7$	$2.62\times10^8$	$-7.13\times10^8$	$1.15\times10^9$	$-1.02\times10^9$	$3.83\times10^8$

保持密度不变，使应变率变为  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，此时  $G(\rho)$  为 1，有

$$\sigma = G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})f(\varepsilon) = \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \cdot \sum_{i=1}^{10} A_i \varepsilon^i \quad (6)$$

使用式 (6) 对应变率  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  作用下  $200 \text{ }\mu\text{m}$  粒径的 FAC/Al 复合泡沫试件应力应变曲线进行拟合，如图 16 所示，可得  $C$  的值为 0.01638。

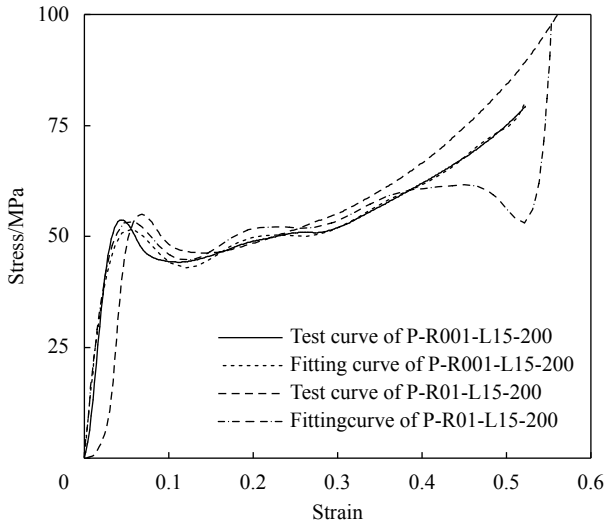


图 16 FAC/Al 复合泡沫试件 P-R001-L15-200 和 P-R01-L15-200 的试验与拟合曲线对比  
Fig. 16 Test curve and fitting curve of the FAC/Al syntactic foam specimen P-R001-L15-200 and P-R01-L15-200

保持应变率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  不变，应力应变曲线如图 8 所示。从不同 FAC 粒径的 FAC/Al 复合泡沫应力应变曲线可以看出，密度对材料的影响还是比较大的。此时， $M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})$  值为 1，则

$$\sigma = G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})f(\varepsilon) = G(\rho)f(\varepsilon) \quad (7)$$

由此可得，

$$G(\rho) = \sigma / f(\varepsilon) \quad (8)$$

由于空心球粒径为  $200 \text{ }\mu\text{m}$  的 FAC/Al 复合泡沫的密度是参考密度，故此时  $G(\rho) = 1$ ，由图 8 应力-应变曲线可知，对于 FAC 粒径为  $150 \text{ }\mu\text{m}$  和  $300 \text{ }\mu\text{m}$  的 FAC/Al 复合泡沫的密度影响函数，如图 17 所

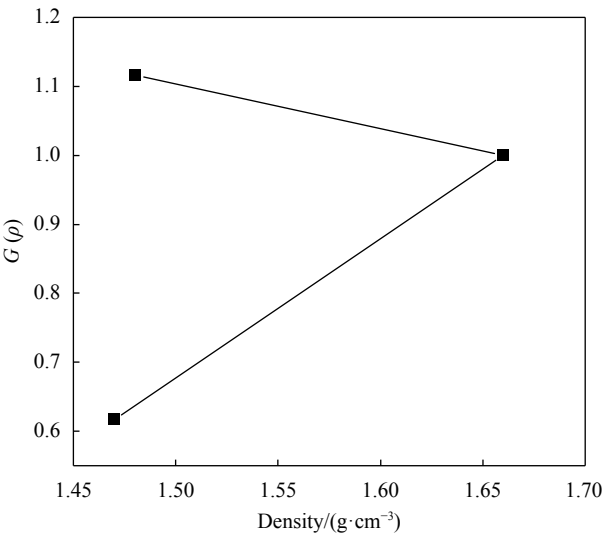


图 17 FAC/Al 复合泡沫密度影响函数  $G(\rho)$  与密度的关系  
Fig. 17 Relationship between  $G(\rho)$  and density of FAC/Al syntactic foam

示，与密度的关系可以采用双线性表示，其中平均粒径在  $150\sim200 \text{ }\mu\text{m}$  之间 (即密度在  $1.48\sim1.66 \text{ g/cm}^2$  之间)，有下式：

$$G(\rho) = -0.65\rho + 2.07 \quad (9)$$

平均粒径在  $200\sim300 \text{ }\mu\text{m}$  之间 (即密度在  $1.66\sim1.47 \text{ g/cm}^2$  之间)，有下式：

$$G(\rho) = 2.02\rho - 2.35 \quad (10)$$

综上，将所得参数代入式 (4) 即得到 FAC/Al 复合泡沫的本构方程 ( $A_i$  见表 2)：

$$\sigma = G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})f(\varepsilon) = \begin{cases} (-0.65\rho + 2.07) \times \left[1 + 0.016 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \times \sum_{i=1}^{10} A_i \varepsilon^i & 150 \text{ }\mu\text{m} < \text{Average diameter} < 200 \text{ }\mu\text{m} \\ (2.02\rho - 2.35) \times \left[1 + 0.016 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \times \sum_{i=1}^{10} A_i \varepsilon^i & 200 \text{ }\mu\text{m} < \text{Average diameter} < 300 \text{ }\mu\text{m} \end{cases} \quad (11)$$

为了验证本构方程的有效性，根据式 (11) 对 P-R01-L15-300 和 P-R1-L15-150 的应力-应变曲线进行拟合，如图 18 所示，虽然应力第一峰值比实际的第一峰值应力要小，但曲线变化趋势基本与试验结果一致，基本符合客观规律。

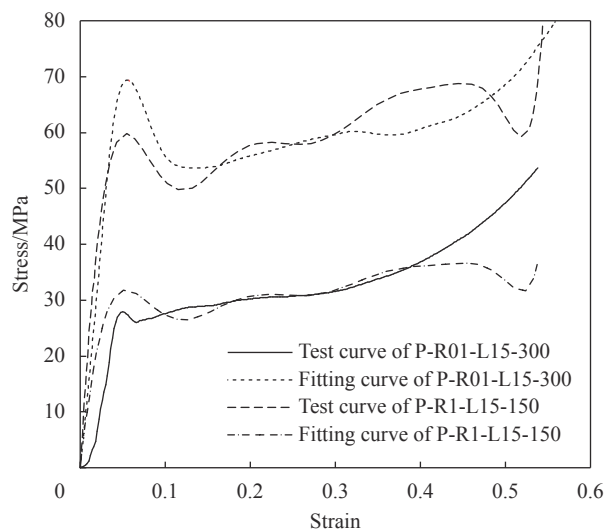


图 18 FAC/Al 复合泡沫试件 P-R01-L15-300 和 P-R1-L15-150 的试验曲线与拟合曲线对比

Fig. 18 Test and fitting curves of the FAC/Al syntactic foam specimen P-R01-L15-300 and P-R1-L15-150

## 4 结论

利用万能试验机分别对具有不同空心球粒径的粉煤灰空心球 (FAC)/Al 复合泡沫材料进行了准静态压缩试验, 通过调整加载速度获得三种应变率作用下材料的应力-应变曲线, 考察 FAC/Al 复合泡沫在不同应变率作用下的变形失效模式、力学及吸能性能, 并建立了基于试验数据的铝基复合泡沫本构关系方程。得到了如下结论:

(1) FAC/Al 复合泡沫的塑性变形能力随着空心球平均粒径的增大而提高, FAC/Al 复合泡沫在准静态压缩下, 应力-应变曲线都表现出典型的“三阶段”特征, 其中, 长径比较小的试件更早地进入致密阶段。

(2) 在相同应变率下, 随着 FAC 平均粒径的减小, FAC/Al 复合泡沫的第一峰值应力增大, 且材料平均弹性模量对应变率表现出更高的敏感度; 随着 FAC 平均粒径减小, 材料的吸能效率和理想吸能效率变高, 且三种 FAC/Al 复合泡沫的理想吸能效率均达到 0.8 以上, 表明 FAC/Al 复合泡沫是一种比较理想的吸能材料。

(3) 采用最小二乘法得到了 FAC/Al 复合泡沫在准静态荷载作用下拟合度较好的经验型本构方程。

## 参考文献:

- [1] GIBSON L. Mechanical behavior of metallic foams[J]. *Annual Review of Materials Science*, 2000, 30: 191-227.
- [2] GARAI F, BÉRES G, WELTSCH Z. Development of tubes filled with aluminum foams for lightweight vehicle manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 790: 139743.
- [3] YANG D, ZHANG Z, CHEN X, et al. Quasi-static compression deformation and energy absorption characteristics of basalt fiber-containing closed-cell aluminum foam[J]. *Metals*, 2020, 10(7): 921.
- [4] KUMAR R, JAIN H, SRIRAM S, et al. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 240: 122274.
- [5] ZHANG J, CHEN L, WU H, et al. Experimental and microscopic investigation of double-layer aluminum foam under impact loading[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 110859.
- [6] 姚卓, 王国斌. 泡沫铝基复合防撞技术在公路桥墩中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017(S1): 127-131.
- YAO Zhuo, WANG Guobin. Application of foam aluminum base composite anti-collision technology in highway piers[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)*, 2017(S1): 127-131(in Chinese).
- [7] HUO X, LIU H, LUO Q, et al. On low-velocity impact response of foam-core sandwich panels[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020(181): 105681.
- [8] 窦作勇, 姜龙涛, 武高辉. 新型低成本空心球/Al 多孔材料的冲击吸能特性[C]. 中国力学学会. 第十五届全国复合材料学术会议论文集(上册). 中国力学学会, 2008: 163-166.
- DOU Zuoyong, JIANG Longtao, WU Gaozhui. Impact energy absorption characteristics of new type low cost cenosphere/Al porous materials[C]. *The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of The 15<sup>th</sup> National Conference on Composite Materials(Volume 1)*. The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008: 163-166(in Chinese).
- [9] 李硕. 铝基复合泡沫填充圆钢管静态力学及吸能性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- LI Shuo. Study on static mechanical properties and energy absorption performance of aluminum matrix composite foam-filled circular tube[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [10] DOU Z Y, JIANG L T, WU G H, et al. High strain rate compression of cenosphere-pure aluminum syntactic foams[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(10): 945-948.
- [11] WU G H, DOU Z Y, SUN D L, et al. Compression behaviors of cenosphere-pure aluminum syntactic foams[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(3): 221-224.
- [12] 武高辉, 姜龙涛. 含微小封闭孔洞的泡沫铝: 中国,



- 03200299.8[P]. 2004-05-26.
- WU Gaohui, JIANG Longtao. Aluminum foam with tiny closed holes: China, 03200299.8[P]. 2004-05-26(in Chinese).
- [13] 武高辉, 姜龙涛. 一种高强轻质泡沫铝复合材料及其制备方法: 中国, 03100180.7[P]. 2003-06-18.
- WU Gaohui, JIANG Longtao. The cenosphere-aluminum syntactic foam with high strength and lightweight and its fabricating method: China, 03100180.7[P]. 2003-06-18(in Chinese).
- [14] 王瑞, 林振荣, 卢玉松, 等. 爆炸荷载作用下泡沫铝复合材料数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(6): 127-130.
- WANG Rui, LIN Zhenrong, LU Yusong, et al. Numerical simulation of foam aluminum composite under explosion loading[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(6): 127-130(in Chinese).
- [15] 丁珂. 冲击作用下铝基复合泡沫填充管动态力学及吸能性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- DING Ke. Study on dynamic mechanical properties and energy absorption performance of aluminum matrix composite foam-filled circular tube under impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [16] 张博一, 王伟, 武高辉. 空心微珠/Al复合材料的动态压缩力学性能和吸能特性[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(1): 28-34.
- ZHANG Boyi, WANG Wei, WU Gaohui. Dynamic-compression mechanical properties and energy-absorption capability of fly-ash cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam[J]. Explosion and Shock, 2014, 34(1): 28-34(in Chinese).
- [17] ZHANG Q, LIN Y, CHI H, et al. Quasi-static and dynamic compression behavior of glass cenospheres/5A03 syntactic foam and its sandwich structure[J]. Composite Structures, 2018, 183: 499-509.
- [18] 许庆彦, 陈玉勇, 李庆春. 多孔泡沫金属的研究现状[J]. 铸造设备研究, 1997(1): 18-24, 55.
- XU Qingyan, CHEN Yuyong, LI Qingchun. Research status of porous foam metals[J]. Research on casting equipment, 1997(1): 18-24, 55(in Chinese).
- [19] 左孝青, 孙加林. 泡沫金属制备技术研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2004(3): 452-456.
- ZUO Xiaoqing, SUN Jialin. Review on foam metal manufacturing techniques[J]. Journal of materials science and Engineering, 2004(3): 452-456(in Chinese).
- [20] 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(1): 13-18.
- HU Shisheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain rate effect on the properties foam materials[J]. Explosion and Shock, 2003(1): 13-18(in Chinese).
- [21] 王曦, 虞吉林. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001(4): 438-443.
- WANG Xi, YU Jilin. Uniaxial mechanical behavior of aluminum foam[J]. Experimental Mechanics, 2001(4): 438-443(in Chinese).
- [22] 王二恒, 虞吉林, 王飞, 等. 泡沫铝材料准静态本构关系的理论和实验研究[J]. 力学学报, 2004(6): 673-679.
- WANG Erheng, YU Jilin, WANG Fei, et al. Theoretical and experimental study on quasi-static constitutive relationship of aluminum foam[J]. Journal of Mechanics, 2004(6): 673-679(in Chinese).
- [23] 邹林池. 空心球/Al微孔材料的压缩变形行为和吸能性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZOU Linchi. Compressive deformation behavior and energy absorption property of cenosphere/Al syntactic foam[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [24] JAMES A S, COLIN C F. Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading[J]. Polymer Engineering and Science, 1992, 32(16): 1138-1146.
- [25] 胡永乐, 王峰超, 胡时胜. 泡沫铝经验型动态本构模型及其在LS-DYNA中的实现[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 46-50.
- HU Yongle, WANG Fengchao, HU Shisheng. An empirical dynamic constitutive model for aluminum foams and its implementation in LS-DYNA[J]. Journal of China Ordnance, 2014, 35(2): 46-50(in Chinese).
- [26] 王婧. 强冲击载荷作用下多孔钛动态力学行为研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- WANG Jing. Investigation on dynamic behavior of cellular titanium subjected to impact loading[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017(in Chinese).