

# 多壁管增强泡沫铝结构动态响应及吸能性能研究\*

周睿<sup>1,2</sup>, 张志家<sup>2</sup>, 张旺<sup>2</sup>, 张钱城<sup>2</sup>,  
魏欣<sup>3</sup>, 随亚光<sup>3</sup>, 王建强<sup>2</sup>, 金峰<sup>2</sup>

- (1. 湖北商贸学院, 武汉 430079;
2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;
3. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 为了提高泡沫铝吸能性能, 该文将多壁管及泡沫铝材料相结合, 提出了一种多壁管增强泡沫铝结构. 通过 Hopkinson 压杆试验以及有限元分析软件 ABAQUS/Explicit, 研究了泡沫铝、多壁管及其增强泡沫铝的动态压溃特性. 对比分析了泡沫铝复合多壁管前后的变形模式、吸能性能, 并讨论了多壁管增强泡沫铝的应变率效应以及应变率对多壁管增强泡沫铝耦合增强作用的影响. 研究表明, 有限元仿真能够较好地模拟试验结果. 测试结果表明所采用的泡沫铝应变率效应不明显, 而多壁管及多壁管增强泡沫铝应变率效应较为明显, 在高应变率下其能量吸收可进一步提升. 在动态冲击条件下, 多壁管增强泡沫铝峰值力相比单一多壁管或泡沫有明显的耦合增强, 其能量吸收相比单一多壁管及泡沫铝能量吸收之和提升 10.34%. 通过研究多壁管增强泡沫铝的动态压溃特性, 可为承载吸能构件的应用提供依据和参考.

**关键词:** 多壁管; 泡沫铝; 动态特性; 应变率; 耦合增强

**中图分类号:** TB301 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440186

## Dynamic Response and Energy Absorption Performances of Multi-Walled Tube Reinforced Aluminum Foam Structure

ZHOU Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhijia<sup>2</sup>, ZHANG Wang<sup>2</sup>, ZHANG Qiancheng<sup>2</sup>,  
WEI Xin<sup>3</sup>, SUI Yaguang<sup>3</sup>, WANG Jianqiang<sup>2</sup>, JIN Feng<sup>2</sup>

- (1. Hubei Business College, Wuhan 430079, P.R.China;
2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structure, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R.China;
3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, P.R.China)

**Abstract:** In order to improve the energy absorption performance of the aluminum foam, a multi-wall tube reinforced aluminum foam was proposed. The dynamic crushing characteristics of the aluminum foam, the multi-wall tube, and the multi-wall tube reinforced aluminum foam were studied by Hopkinson pressure rod tests & finite element analysis with software ABAQUS/Explicit. The deformation mode and energy absorption of the aluminum foam was compared with those of the multi-wall tube reinforced aluminum foam, with the strain rate

\* 收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-11-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(面上项目)(12072250)

**作者简介:** 周睿(1997—), 女, 硕士生(E-mail: 1031168574@qq.com);

王建强(1984—), 男, 研究员, 博士(通讯作者. E-mail: zhangzhi151@xjtu.edu.cn).

**引用格式:** 周睿, 张志家, 张旺, 张钱城, 魏欣, 随亚光, 王建强, 金峰. 多壁管增强泡沫铝结构动态响应及吸能性能研究[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(1): 12-24.

effect on the coupling enhancement discussed. The results show that, the finite element analysis can simulate the test results well. The strain rate effect on the aluminum foam is not obvious, while that on the multi-walled tube and the multi-wall tube reinforced aluminum foam is considerably obvious, and the energy absorption improves with higher strain rates. Under the dynamic impact condition, the peak strength of the multi-walled tube reinforced aluminum foam has obvious coupling enhancement compared with that of the multi-walled tube or the aluminum foam, and the corresponding energy absorption of the former increases by 10.34% over the sum of those of the latter ones. The study on dynamic crushing characteristics of the multi-walled tube reinforced aluminum foam provides a reference for the application of energy-absorbing load-carrying components.

**Key words:** multiwalled tube; aluminum foam; dynamic characteristic; strain rate; coupling enhancement

## 0 引 言

泡沫铝(AF)已广泛应用于航空航天、交通运输等防护结构中。冲击载荷作用下,泡沫铝材料应力-应变曲线中存在较长的平台应力区,使其成为一种理想的吸能材料,同时具有密度小、隔音降噪、电磁屏蔽性高、易加工等优点<sup>[1-4]</sup>。但是泡沫铝自身存在不可避免的加工缺陷,会导致其孔壁强度差、屈服应力低,力学和比吸能不能满足实用要求<sup>[5-6]</sup>。与泡沫铝材料不同,多壁管(EMWT)作为一类结构简单、工作可靠、变形模式平稳、可控,能够在发生碰撞时通过自身的塑性变形方式耗散冲击动能,具有比较良好的吸能特性。多壁管吸能过程中,由于薄壁发生折叠引起平台应力波动较大,整个结构并没完全参与塑性变形,导致多壁管结构的结构效率没有得到充分发挥<sup>[7]</sup>。如何克服多壁管的屈曲稳定性及泡沫铝的力学强度低等制约其工程应用的瓶颈,成为过去十几年间的研究热点<sup>[8]</sup>。

为了提高泡沫铝的力学性能,研究者们提出了颗粒和薄壁结构增强泡沫铝的方法<sup>[9-15]</sup>。相比颗粒增强,薄壁结构增强泡沫铝具有易于制备、结构简单高效的优点。杨旭东等<sup>[16]</sup>对泡沫填充多壁管结构准静态轴向压缩性能进行了实验研究,结果表明:泡沫填充多壁管结构的吸能性能高于单一单管、双壁管及多壁管。泡沫铝为金属管内壁提供了足够的侧向支撑,使得管的屈曲波长变短,增加了塑性铰的数量,同时,管壁生成的褶皱侵入泡沫铝,对泡沫铝形成多方向挤压,延缓了泡沫失稳,而泡沫与管件变形不同步将会产生纵向摩擦,这些因素导致结构的力学性能和吸能性能提升。在此基础上,Yan等<sup>[17]</sup>将金属管嵌入泡沫铝内获得管-泡沫复合材料,并对其吸能性能进行了实验研究,结果表明:管-泡沫复合材料吸能能力优于其他密度相同的金属泡沫和蜂窝铝。不同于泡沫填充管形式,将金属管嵌入泡沫铝中,实现了泡沫对金属管的两侧支撑,增强效果和结构效率更高。这种复合方式为泡沫铝强化设计提供了新方向,而将高结构效率的多壁管嵌入泡沫铝可以实现更多接触界面从而导致泡沫铝性能进一步提升。Zhang等<sup>[18-19]</sup>设计并制备了系列新型多壁管增强泡沫铝(MWTRF)复合结构,研究了不同温度和冲击荷载对复合结构的压溃响应和变形模式的影响规律。相比单壁管、多壁金属管和泡沫铝,复合结构承载能力和能量吸收效率大大提升。而且多壁管增强泡沫铝的增强效果要高于单管增强泡沫铝复合材料,增强效果主要来源于多壁管管壁和泡沫铝之间的耦合作用。

现有研究表明薄壁结构增强泡沫铝在静态下具有很好的吸能性能<sup>[20-22]</sup>,但对其动态压溃行为的研究鲜有报道。同时,目前对于泡沫铝-金属管复合结构的研究大多集中在泡沫铝填充圆管或方管,这类结构管壁与泡沫铝之间的接触面积有限。为了提高泡沫铝的屈服强度,实现更加稳定高效的吸能效果,在现有泡沫铝填充金属圆管的基础上,提出将力学性能更好、吸能性能更高的多壁管嵌入泡沫铝,制成多壁管增强泡沫铝结构。泡沫铝-金属管复合结构相比单一管与泡沫铝实现了1+1略大于2的效果,通过引入更高效的结构,充分实现管壁与泡沫铝的耦合作用,以进一步提高泡沫铝-金属管复合结构的力学、吸能性能。因此,本文采用Hopkinson压杆试验对多壁管、泡沫铝及多壁管增强泡沫铝进行了研究,对比了加入多壁管前后泡沫铝的变形模式、吸能性能,并讨论了多壁管增强泡沫铝的应变率效应以及应变率对多壁管增强泡沫铝耦合增强作用的影响,以为相关结构的实际应用提供参考数据。

## 1 试验装置

分离式Hopkinson压杆(SHPB)装置由冲击杆、入射杆、透射杆、缓冲装置、时间间隔器、动态应变片、示

波器以及附属的高速摄影等部分组成。本研究采用的 Hopkinson 压杆装置如图 1 所示。试验过程为：撞击杆由高压气枪中的压缩空气推动产生初速撞击入射杆，产生压力脉冲（入射波），传播至入射杆-试样端面时，入射波产生反射与透射，并往复多次对试样进行加载，试样产生高速变形。时间间隔器记录撞击杆速度，贴于入射杆及透射杆的应变片记录了入射波、透射波及反射波波形。

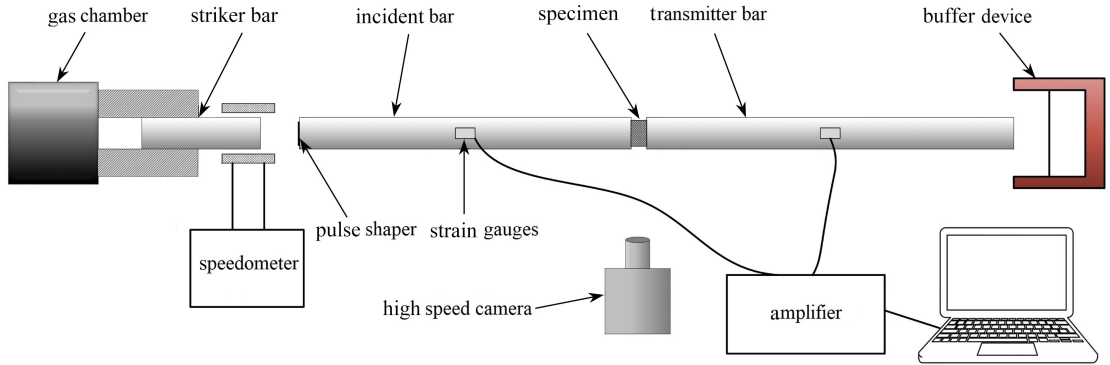


图 1 Hopkinson 压杆试验装置

Fig. 1 Hopkinson pressure bar tester

本研究采用  $\Phi 100$  mm SHPB 试验装置。冲击杆、入射杆及透射杆均为 100 mm 等直径杆，入射杆长度为 4 000 mm，透射杆长度为 3 500 mm，材质为钢，波速  $C_0$  实测为 5 100 m/s，弹性模量为 210 GPa。配套设备包括高速摄影系统、桥式放大器、数字示波器等，完成了对泡沫铝（AF）、多壁管（EMWT）以及多壁管增强泡沫铝（MWTRF）的动态压溃特性试验测试。各试样尺寸及质量如图 2 和表 1 所示，泡沫铝以及多壁管增强泡沫铝直径  $t_2$  为 56 mm，多壁管直径  $d_1$  为 32 mm，壁厚  $t$  为 1 mm。



图 2 MWTRF 试样

Fig. 2 The MWTRF specimen

表 1 动态冲击试验试样参数

Table 1 Specimen parameters for dynamic impact tests

specimen number	height $h$ /mm	diameter $d_1$ /mm	diameter $d_2$ /mm	thickness $t$ /mm	mass $M$ /g
AF-9	40	—	56.78	—	40.4
AF-5	40.015	—	56.715	—	43.2
AF-1	40.04	—	56.73	—	43.8
EMWT-2	40.00	31.80	31.80	1	16
EMWT-3	40.08	31.92	31.92	1	16.2
EMWT-1	40.02	31.99	31.99	1	16.2
EMWT-4	40.08	31.95	31.95	1	16.2
MWTRF-3	40.16	31.80	56.86	1	59
MWTRF-4	40.092	31.92	56.77	1	58.4
MWTRF-1	40.08	31.99	56.79	1	60.2
MWTRF-5	40.056	31.95	56.78	1	58.2
MWTRF-6	40.204	56.85	—	—	59.2

为探究多壁管增强泡沫铝复合结构的动态变形响应及应变率效应，本文对多壁管增强泡沫铝进行了不

同撞击速度下的 SHPB 试验.具体设置如表 2 所示:撞击速度分为 4 m/s,9 m/s,13 m/s,18 m/s 四个级别;同时为了方便进行对比分析,进一步探究多壁管增强泡沫铝的变形模式、增强机理等,对多壁管及泡沫铝进行了 4 m/s,9 m/s 两个撞击速度级别下的 SHPB 试验.以上试验均采用高速摄影记录变形过程.

表 2 试验设置

Table 2 The test setup

sample	speed			
	4 m/s	9 m/s	13 m/s	18 m/s
AF	√	√	-	-
EMWT	√	√	-	-
MWTRF	√	√	√	√

## 2 有限元模型

本文采用 ABAQUS/Explicit 建立了多壁管增强泡沫铝有限元模型,如图 3 所示.模型由上下压板及试样中的多壁管与泡沫铝四个部件组成.上下压头简化为刚体壳,其面积大小可保证压缩过程中试样始终在上下压板范围内,采用四边形壳单元(S4R)进行网格划分,网格尺寸为 1 mm×1 mm.泡沫铝部分简化为实体,采用八节点实体单元(C3D8R)进行网格划分;多壁管采用四边形壳单元(S4R),网格尺寸均为 1 mm×1 mm.描述泡沫铝材料的本构模型均采用可压碎泡沫.关于泡沫铝的失效问题,考虑到本研究主要针对吸能进行讨论,并且在试验过程中未观察到泡沫铝出现碎裂脱落的现象,因此此处不考虑泡沫铝失效准则.描述多壁管的材料模型为双线性各向同性弹塑性模型.试验中下板固定,上板采用恒定应变率加载.变形过程中,上下板与结构、泡沫铝与多壁管对发生接触,整个模型采用通用接触,设置接触属性为切向摩擦因数 0.2.模型的材料参数如表 3 所示.

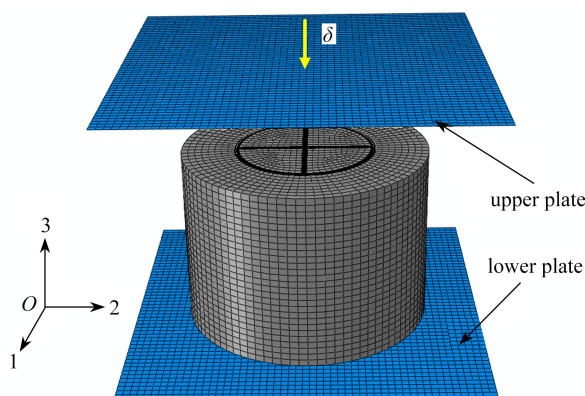


图 3 有限元模型

Fig. 3 The finite element model

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

material	density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	Young's modulus $E / \text{MPa}$	yield strength $\sigma_y / \text{MPa}$	tensile strength $\sigma_t / \text{MPa}$	Poisson's ratio $\nu$
Al6061	2 700	70 000	190	230	0.3
Al foam	400	500	6.09	-	0.11

## 3 结果与讨论

### 3.1 泡沫铝动态压溃试验

动态压溃试验获得了泡沫铝加载波形图、应变率曲线、应力-应变曲线以及高速摄影记录的试件变形过程.图 4 给出了典型的泡沫铝动态加载波形图,其他试样加载波形类似.加载波形图经滤波后得到应变率以及应力-应变曲线.考虑精度问题,此处仅取第一加载过程分析其应力-应变关系.

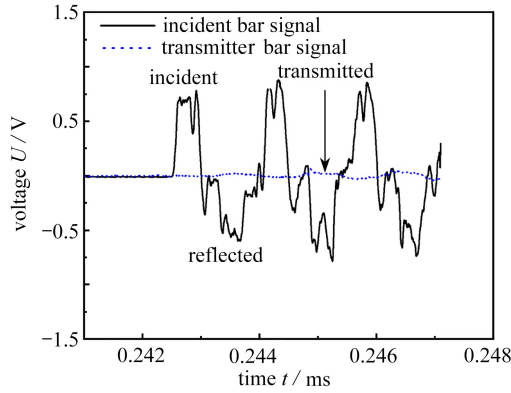


图4 典型的泡沫铝波形图 ( $v = 3.8 \text{ m/s}$ )

Fig. 4 The typical waveforms for the aluminum foam ( $v = 3.8 \text{ m/s}$ )

冲击过程中,泡沫铝应变率不断波动变化,冲击杆速度为  $3.8 \text{ m/s}$  时,对应的泡沫铝平均应变率为  $41 \text{ s}^{-1}$ ;速度为  $8.99 \text{ m/s}$  时,对应的平均应变率为  $102 \text{ s}^{-1}$ .不同应变率下泡沫铝的应力-应变曲线如图5和图6所示,在应变率为  $41 \text{ s}^{-1}$  时,首次加载使泡沫铝刚刚由弹性阶段进入塑性阶段;应变率增加至  $102 \text{ s}^{-1}$  时,首次加载变形应变增大,但应力水平相比  $41 \text{ s}^{-1}$  时无明显提升,泡沫铝具有一定的应变率效应但并不明显。

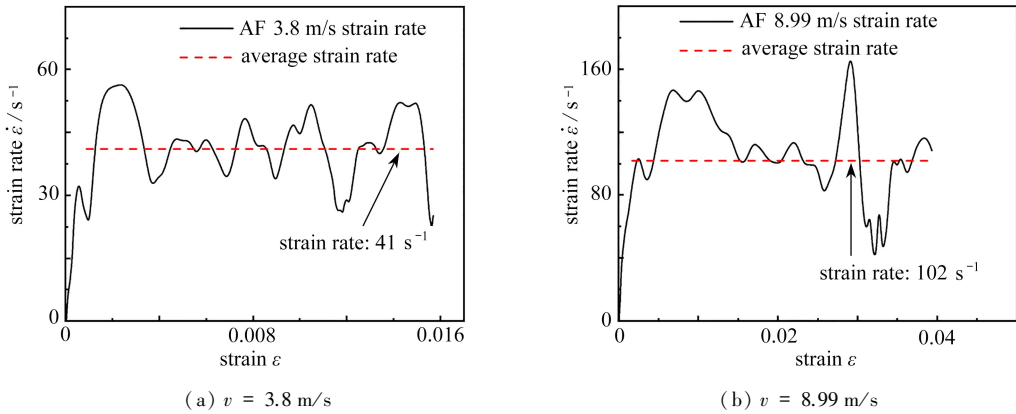


图5 泡沫铝的应变率

Fig. 5 The strain rates of the aluminum foam

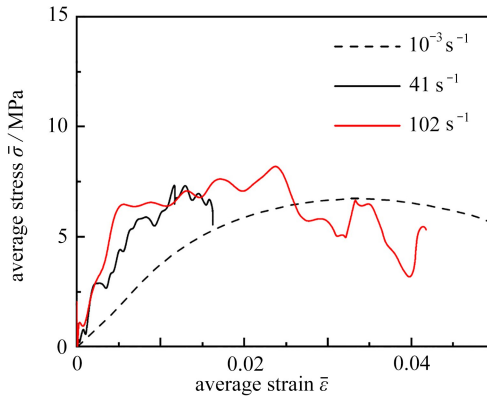
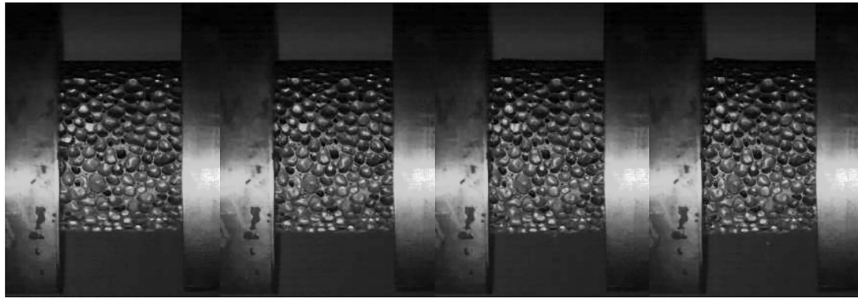


图6 AF不同应变率下的应力-应变曲线

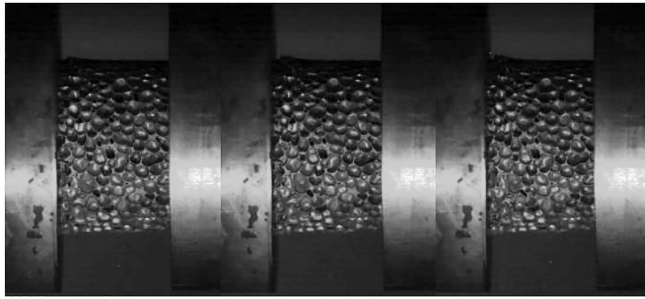
Fig. 6 AF stress-strain curves at different strain rates

图7和图8是在施加应变率为  $41 \text{ s}^{-1}$  和  $102 \text{ s}^{-1}$  时,冲击试验中采集的一系列试件图像。 $t = 0 \text{ ms}$  时记录的是加载脉冲到达入射杆-试样界面之前的时刻,试样此时为原始未变形状态。可以看出,入射杆从右向左侧撞击试样,在  $t = 1.57 \sim 4.71 \text{ ms}$  之间,可以观察到试样前端附近的变形发展。 $t = 1.57 \text{ ms}$  时,应力波对试样第一次冲击,最边缘细胞壁发生塌陷和屈曲,在试样后端试样-透射杆界面附近区域清晰可见。随后,应力波在杆件

之间来回传播,对试件产生多次冲击, $t = 3.14 \text{ ms}$ ,  $t = 4.71 \text{ ms}$  时刻分别为第 2 次及第 3 次冲击多次冲击后的最终变形.应变率为  $41 \text{ s}^{-1}$  时,试样后端附近胞元主要发生屈曲,应变率提升至  $102 \text{ s}^{-1}$  后,胞元壁更早发生剪切断裂,孔壁发生扭曲旋转并且在第 3 次冲击后材料局部致密化.应变率提高后,泡沫铝的变形转变为由一端向另一端发展,局部薄弱处的提前变形占比很小.



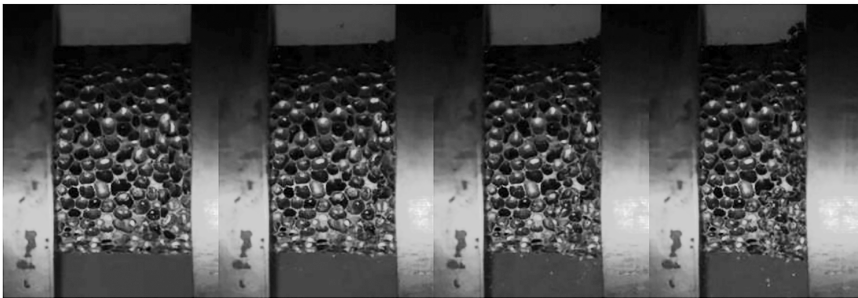
(a)  $t = 0 \text{ ms}$       (b)  $t = 1.57 \text{ ms}$       (c)  $t = 3.14 \text{ ms}$       (d)  $t = 4.71 \text{ ms}$



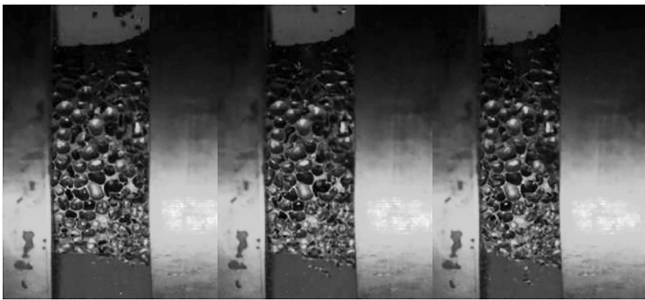
(e)  $t = 6.28 \text{ ms}$       (f)  $t = 7.85 \text{ ms}$       (g)  $t = 9.42 \text{ ms}$

图 7 泡沫铝动态变形过程( $41 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 7 The dynamic deformation process of the aluminum foam ( $41 \text{ s}^{-1}$ )



(a)  $t = 0 \text{ ms}$       (b)  $t = 1.57 \text{ ms}$       (c)  $t = 3.14 \text{ ms}$       (d)  $t = 4.71 \text{ ms}$



(e)  $t = 6.28 \text{ ms}$       (f)  $t = 7.85 \text{ ms}$       (g)  $t = 9.42 \text{ ms}$

图 8 泡沫铝动态变形过程( $102 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 8 The dynamic deformation process of the aluminum foam ( $102 \text{ s}^{-1}$ )

### 3.2 多壁管动态压溃试验

多壁管应变率曲线与泡沫铝类似,但是峰值更加明显.通过求平均值得到:多壁管在冲击杆速度为 3.95 m/s 时的平均应变率为  $50 \text{ s}^{-1}$ ,速度为 9.1 m/s 时平均应变率为  $107 \text{ s}^{-1}$ ,如图 9 所示.不同应变率下的应力-应变曲线如图 10 所示,多壁管在  $50 \text{ s}^{-1}$  及  $107 \text{ s}^{-1}$  应变率下均达到首个峰值并进入塑性段.

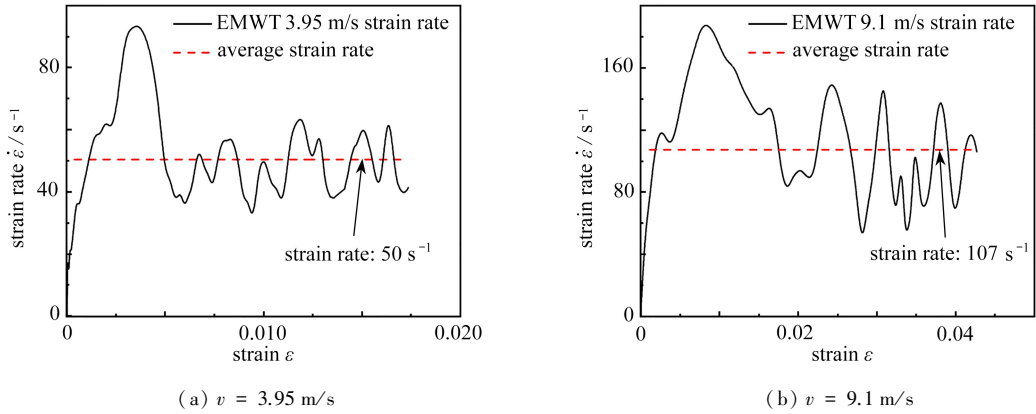


图 9 多壁管的应变率

Fig. 9 Strain rates of the multiwalled tube

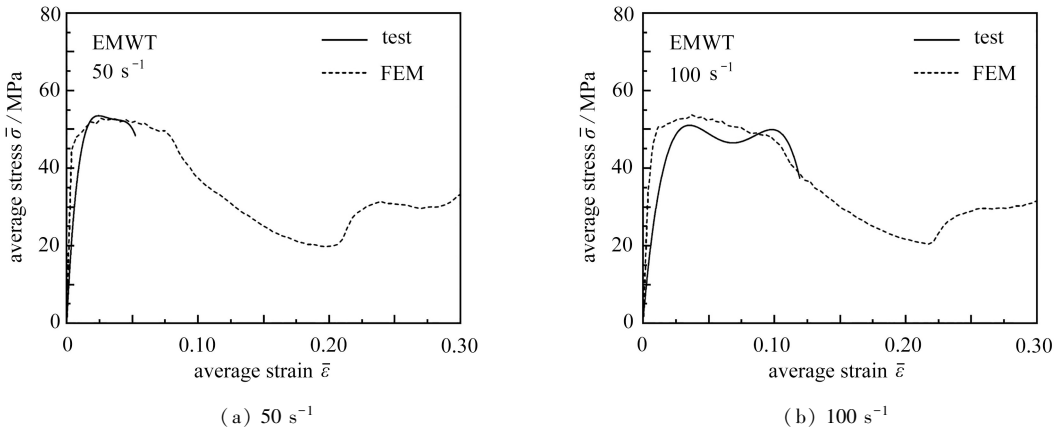
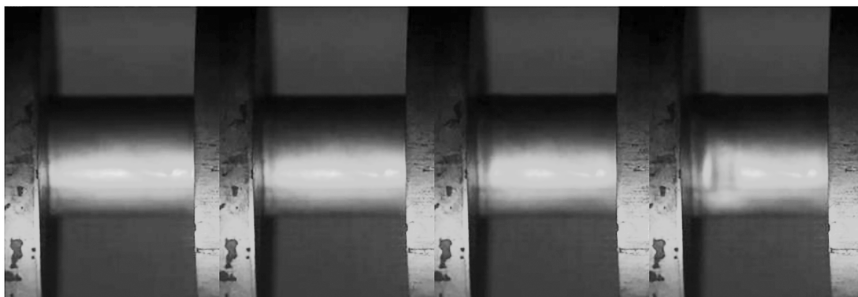


图 10 EMWT 应力-应变曲线试验及有限元结果对比

Fig. 10 Comparison of EMWT stress-strain test curves with finite element results

图 11 和图 12 是多壁管在  $50 \text{ s}^{-1}$  及  $107 \text{ s}^{-1}$  应变率下采集的多壁管变形图像.两个应变率下均进入塑性段,变形模式为金刚石模式.许多研究表明,管状结构轴向压缩变形模式与壁厚等几何尺寸直接相关,主要原因是:Hopkinson 杆试验试件与压杆之间应保证充分润滑,导致多壁管初始变形时边界受约束较小,从而产生变形模式的转变.对比不同应变率下,随着应变率上升,多壁管峰值力提高,说明峰值力具有一定的应变率效应,平均应力及能量吸收也相应提高.

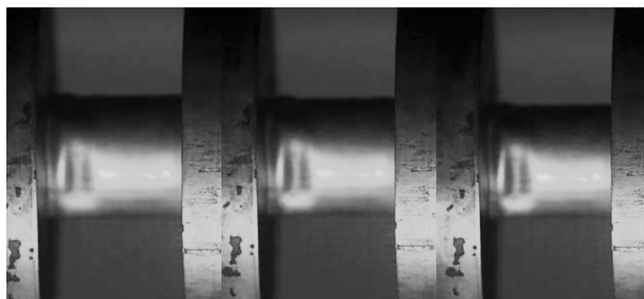
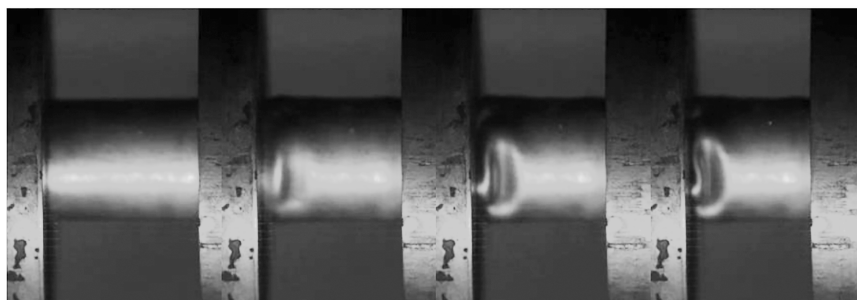
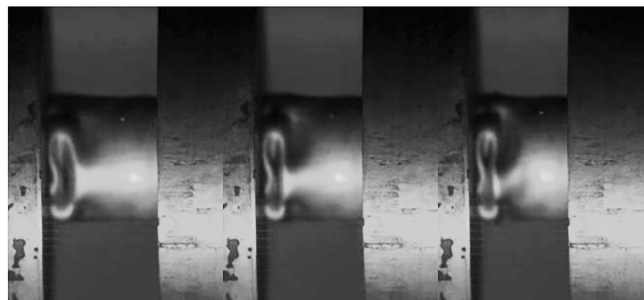


(a)  $t = 0 \text{ ms}$

(b)  $t = 1.57 \text{ ms}$

(c)  $t = 3.14 \text{ ms}$

(d)  $t = 4.71 \text{ ms}$

(e)  $t = 6.28$  ms      (f)  $t = 7.85$  ms      (g)  $t = 9.42$  ms图 11 多壁管动态变形过程( $50 \text{ s}^{-1}$ )Fig. 11 The dynamic deformation process of the multi-walled tube ( $50 \text{ s}^{-1}$ )(a)  $t = 0$  ms      (b)  $t = 1.57$  ms      (c)  $t = 3.14$  ms      (d)  $t = 4.71$  ms(e)  $t = 6.28$  ms      (f)  $t = 7.85$  ms      (g)  $t = 9.42$  ms图 12 多壁管动态变形过程( $107 \text{ s}^{-1}$ )Fig. 12 The dynamic deformation process of the multi-walled tube ( $107 \text{ s}^{-1}$ )

### 3.3 多壁管增强泡沫铝动态压溃试验

多壁管增强泡沫铝相比单一多壁管或泡沫铝有明显的增强,在  $50 \sim 100 \text{ s}^{-1}$  应变率下,结构变形较小,因此增加了  $143 \text{ s}^{-1}$  及  $202 \text{ s}^{-1}$  两个应变率的试验。

多壁管增强泡沫铝应变率曲线峰值较为明显.通过求平均值得到:多壁管在冲击杆速度为  $3.95 \text{ m/s}$  时,平均应变率为  $52 \text{ s}^{-1}$ ;速度为  $8.99 \text{ m/s}$  时,平均应变率为  $108 \text{ s}^{-1}$ ;速度为  $13.04 \text{ m/s}$  时,平均应变率为  $143 \text{ s}^{-1}$ ;速度为  $18.38 \text{ m/s}$  时,平均应变率为  $202 \text{ s}^{-1}$ ,如图 13 和图 14 所示.不同应变率下的应力-应变曲线如图 15 所示,多壁管增强泡沫铝应力-应变曲线介于多壁管及泡沫铝之间,动态条件下,应变率由  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  增加至  $202 \text{ s}^{-1}$ ,各应变率之间应变率效应存在但相对多壁管较小.相比泡沫铝及多壁管,多壁管增强泡沫铝应变率  $100 \text{ s}^{-1}$  左右时能量吸收能力分别提升了 2.22 倍及 0.68 倍,相比二者之和提升了 10.34%,表明动态条件下多壁管与泡沫铝之间存在较强的耦合增强效果。

多壁管增强泡沫铝在不同应变率下的动态变形过程如图 16—19 所示,多壁管增强泡沫铝结构在应变率为  $52 \text{ s}^{-1}$  时,加载三次后仅有部分孔壁发生轻微屈曲,相比单一泡沫铝经过三次加载后局部密实化的情况有明显增强.随着应变率提高,变形由一侧开始发展,同时伴随局部薄弱处的少量变形.当应变率达到  $202 \text{ s}^{-1}$



时,泡沫不再从一侧开始变形,转为从中部开始变形,随着应变增加,泡沫中部隆起,形成鼓形.这一变形模式的改变可能是内部多壁管变形模式的改变引起的.

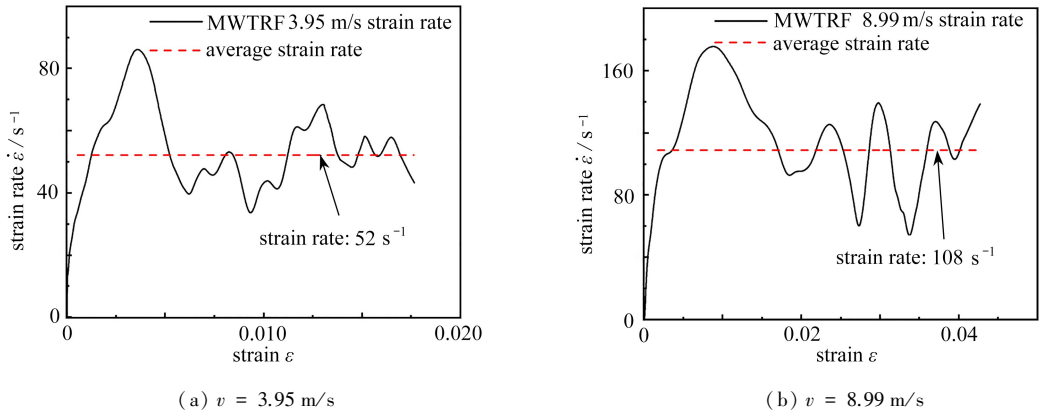


图 13 多壁管增强泡沫铝的应变率

Fig. 13 The strain rates of the multiwalled tube reinforced aluminum foam

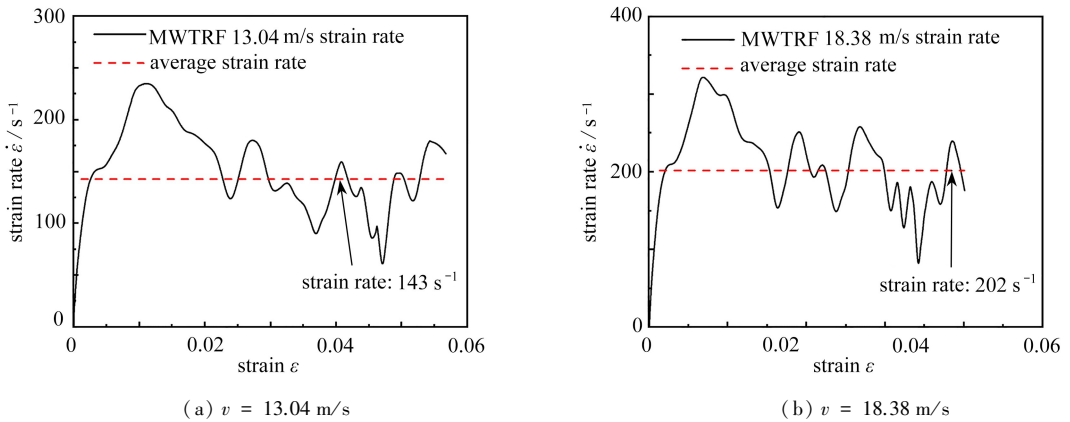
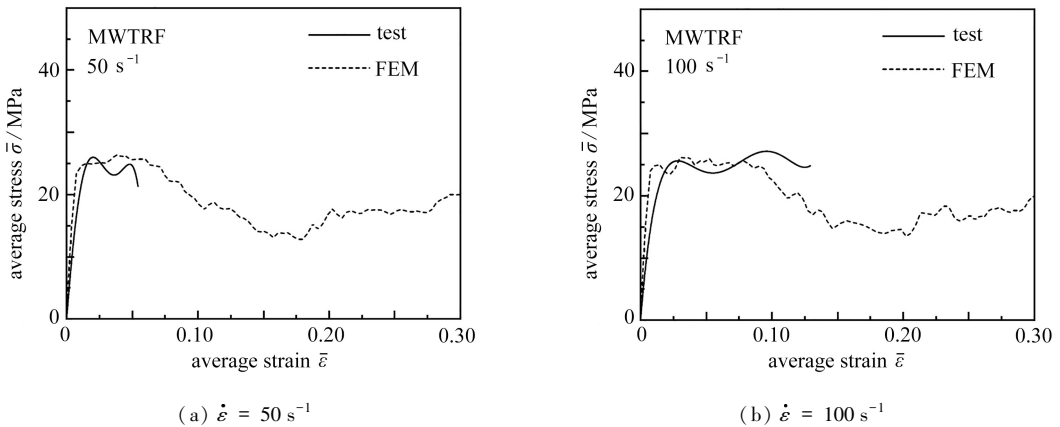


图 14 MWTRF 的应变率

Fig. 14 The strain rates of the MWTRF

### 3.4 应变率影响

本研究采用的泡沫铝为相对密度较低的泡沫铝,根据图 20,泡沫铝在试验应变率范围内,可不考虑应变率效应;这一点与过往的研究中得出的低密度泡沫铝在低应变率下应变率效应不明显的结论一致.目前对于泡沫铝应变率效应的解释仍存在争论,比较普遍的试验结论表明:当临界相对密度在 0.15 以下时,泡沫铝平台力对应变率不敏感.



(a)  $\dot{\varepsilon} = 50 \text{ s}^{-1}$

(b)  $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$

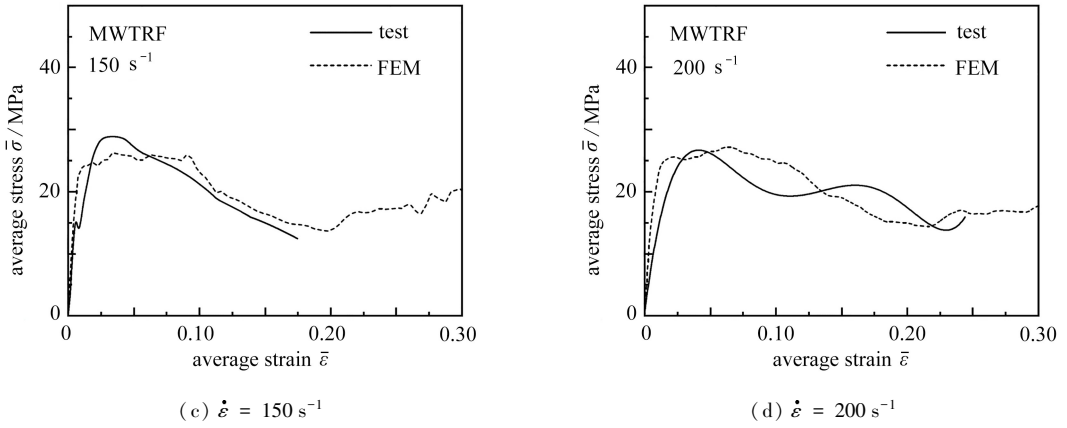
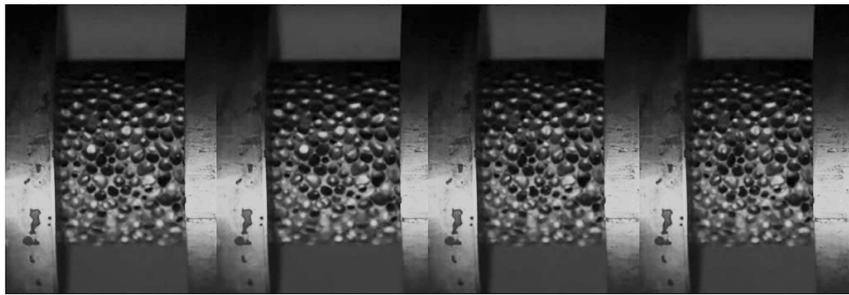


图 15 MWTRF 应力-应变曲线试验及有限元结果对比

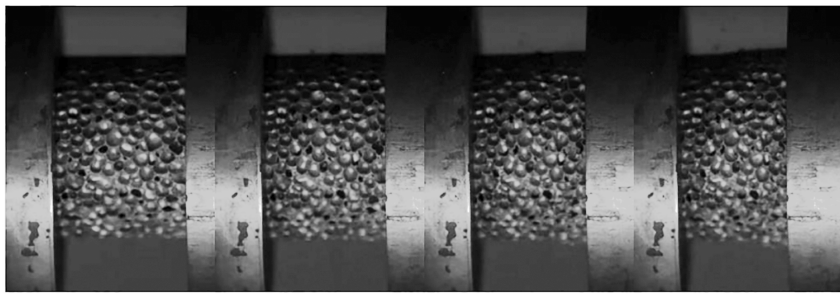
Fig. 15 Comparison of stress-strain test curves with finite element results of the MWTRF



(a)  $t = 0 \text{ ms}$       (b)  $t = 1.57 \text{ ms}$       (c)  $t = 3.14 \text{ ms}$       (d)  $t = 4.71 \text{ ms}$

图 16 多壁管增强泡沫铝动态变形过程( $52 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 16 The dynamic deformation process of the aluminum foam enhanced by multi-walled tubes ( $52 \text{ s}^{-1}$ )



(a)  $t = 0 \text{ ms}$       (b)  $t = 1.57 \text{ ms}$       (c)  $t = 3.14 \text{ ms}$       (d)  $t = 4.71 \text{ ms}$

图 17 多壁管增强泡沫铝动态变形过程( $108 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 17 The dynamic deformation process of the aluminum foam enhanced by multi-walled tubes ( $108 \text{ s}^{-1}$ )

在高应变率下,相对密度较高的泡沫铝应变率敏感行为可能为以下几个原因:1)微惯性与细胞壁的转动和横向运动有关,在动态状态下,微惯性倾向于抑制细胞壁屈曲,从而增加细胞壁的压溃应力;2)当闭孔泡沫变形时,内部的泡沫孔内的气体被压缩,从而抵抗变形导致应力增加.本文主要讨论多壁管增强泡沫铝结构不同应变率条件下的动态吸能性能,因此对于动态试验条件泡沫铝应变率效应不做深入的讨论研究,仅采用获得的试验结果用于多壁管增强泡沫铝的分析.

引入应变率敏感指数作为多壁管及多壁管增强泡沫铝结构应变率敏感性的评价指标,流动应力  $\sigma$  与应变率之间为幂函数关系:

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m, \tag{1}$$

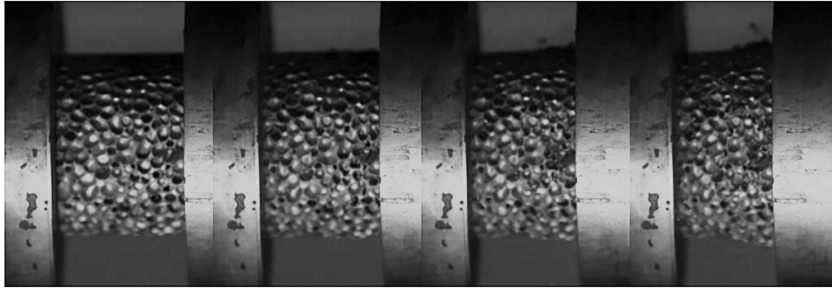
式中,  $C$  为常数,  $m$  为应变率敏感性指数.

对式(1)两边取对数:

$$\lg \sigma = m \lg \dot{\varepsilon}, \quad (2)$$

通过式(2)可得

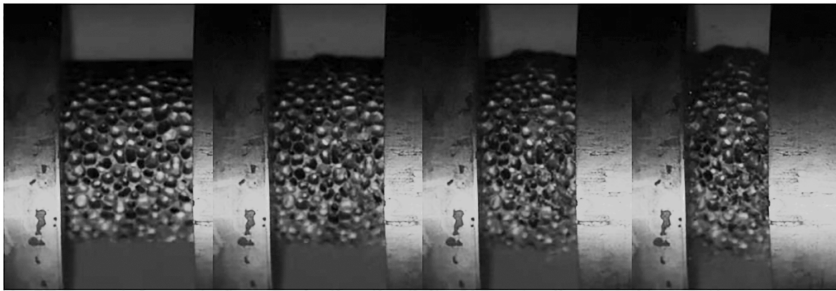
$$m = (d \lg \sigma) / (d \lg \dot{\varepsilon}). \quad (3)$$



(a)  $t = 0$  ms      (b)  $t = 1.57$  ms      (c)  $t = 3.14$  ms      (d)  $t = 4.71$  ms

图 18 多壁管增强泡沫铝动态变形过程( $143 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 18 The dynamic deformation process of the aluminum foam enhanced by multi-walled tubes ( $143 \text{ s}^{-1}$ )



(a)  $t = 0$  ms      (b)  $t = 1.57$  ms      (c)  $t = 3.14$  ms      (d)  $t = 4.71$  ms

图 19 多壁管增强泡沫铝动态变形过程( $202 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 19 The dynamic deformation process of the aluminum foam enhanced by multi-walled tubes ( $202 \text{ s}^{-1}$ )

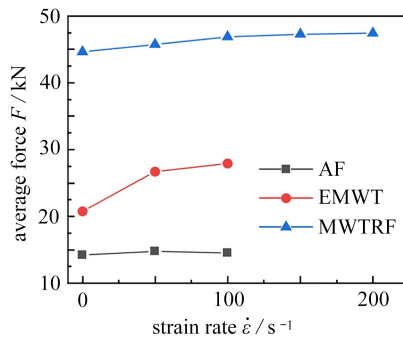


图 20 平均载荷随应变率的变化情况

Fig. 20 The variations of the average load with the strain rates

多壁管与多壁管增强泡沫铝结构相比,多壁管的应变率效应更为明显,多壁管应变率敏感系数  $m$  为 0.024 55,而多壁管增强泡沫铝仅为 0.004 33.这主要是由于泡沫铝的加入降低了多管壁增强泡沫铝结构整体的应变率敏感度.当应变率由  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  提高到  $50 \text{ s}^{-1}$  时,多壁管能量吸收提高了 28.7%,多壁管增强泡沫铝结构能量吸收提高了 2.4%;当应变率由  $50 \text{ s}^{-1}$  提高到  $100 \text{ s}^{-1}$  时,多壁管能量吸收提高了 4.5%,多壁管增强泡沫铝结构能量吸收提高了 2.5%(图 21).

应变率对多壁管增强泡沫铝结构耦合增强作用有也影响.由图 22 可知,随着应变率的上升,多壁管增强泡沫铝结构的能量吸收增强效果降低.多壁管增强泡沫铝相比单一多壁管与泡沫铝能量之和提高 27.51%;应变率  $50 \text{ s}^{-1}$  时,提高 10.34%;应变率为  $100 \text{ s}^{-1}$  时,提高 10.34%.增强幅度随应变率的提高而有所下降,原因在于随着应变率的提高,多壁管能量吸收提高幅度大于多壁管增强泡沫铝结构,而泡沫铝的应变率效应可忽略不计,因此导致多壁管增强泡沫铝结构增强效果在应变率提高后减弱.

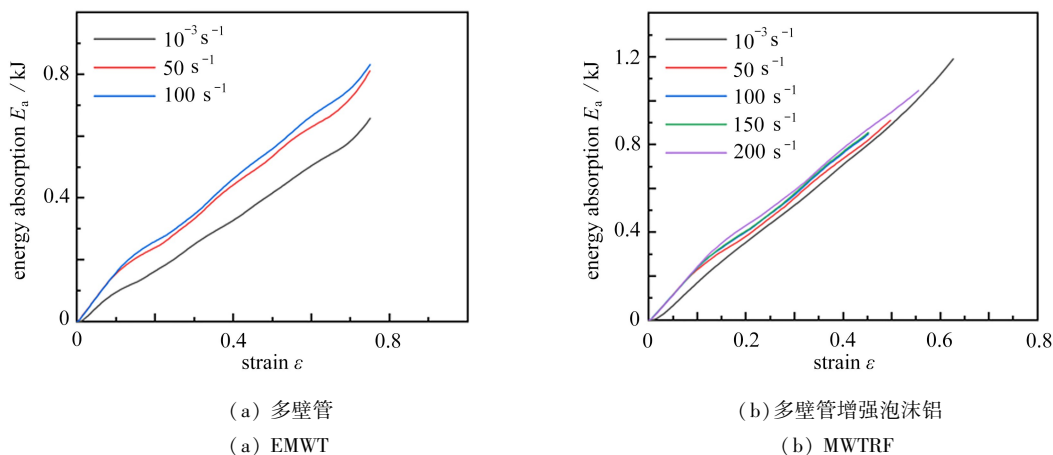


图 21 能量吸收曲线

Fig. 21 The energy absorption curves

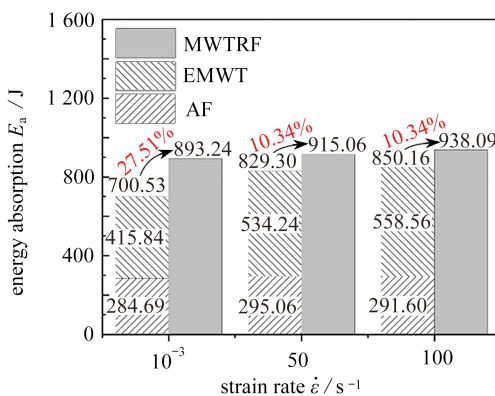


图 22 能量吸收增强示意图

Fig. 22 Schematic diagram of enhanced energy absorption

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本.

## 4 结 论

本文利用试验及仿真的手段对泡沫铝、多壁管及多壁管增强泡沫铝动态压缩响应及吸能性能进行了研究.对泡沫铝、多壁管及多壁管增强泡沫铝进行了 Hopkinson 压杆试验,得到了各结构在不同应变率下的应力-应变曲线及变形过程.建立了动态冲击有限元模型,讨论了应变率对结构吸能性能以及耦合增强效果的影响.由以上分析得出以下结论: 1) 本研究中采用的泡沫铝经实测应变率效应不明显,多壁管及多壁管增强泡沫铝敏感指数分别为 0.024 55 和 0.004 33,表明在高应变率下其能量吸收可进一步提升; 2) 动态冲击条件下,多壁管增强泡沫铝结构存在耦合增强作用,其能量吸收相比单一多壁管及泡沫铝能量吸收之和提升 10.34%; 3) 随着应变率的上升,多壁管增强泡沫铝结构能量吸收增强效果降低.

## 参考文献 (References):

- [1] AL-SAHLANI K, BROXTERMANN S, LELL D, et al. Effects of particle size on the microstructure and me-

- chanical properties of expanded glass-metal syntactic foams[J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2018, **728**: 80-87.
- [2] CIARDIELLO R, DRZAL L T, BELINGARDI G. Effects of carbon black and graphene nano-platelet fillers on the mechanical properties of syntactic foam[J]. *Composite Structures*, 2017, **178**: 9-19.
- [3] MARX J, PORTANOVA M, RABIEI A. A study on blast and fragment resistance of composite metal foams through experimental and modeling approaches[J]. *Composite Structures*, 2018, **194**: 652-661.
- [4] ZHOU R, CROCKER M J. Sound transmission loss of foam-filled honeycomb sandwich panels using statistical energy analysis and theoretical and measured dynamic properties[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, **329**(6): 673-686.
- [5] ASHBY M F, EVANS A, FLECK N A, et al. Metal foams: a design guide[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, **23**(6): 119.
- [6] BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, **46**(6): 559-632.
- [7] GUO Q, LI W B, YAO W J, et al. Mechanical properties and constitutive model applied to the high-speed impact of aluminum foam that considers its meso-structural parameters[J]. *Materials*, 2021, **14**(20): 6206.
- [8] BANHART J. Metal foams: production and stability[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, **8**(9): 781-794.
- [9] MOVAHEDI N, CONWAY S, BELOVA I V, et al. Influence of particle arrangement on the compression of functionally graded metal syntactic foams[J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2019, **764**: 138242.
- [10] YANG K M, YANG X D, HE C N, et al. Damping characteristics of Al matrix composite foams reinforced by in-situ grown carbon nanotubes[J]. *Materials Letters*, 2017, **209**: 68-70.
- [11] DU Y, LI A B, ZHANG X X, et al. Enhancement of the mechanical strength of aluminum foams by SiC nanoparticles[J]. *Materials Letters*, 2015, **148**: 79-81.
- [12] BHOGI S, NAMPOOTHIRI J, RAVI K R, et al. Influence of nano and micro particles on the expansion and mechanical properties of aluminum foams[J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2017, **685**: 131-138.
- [13] DUARTE I, VENTURA E, OLHERO S, et al. A novel approach to prepare aluminium-alloy foams reinforced by carbon-nanotubes[J]. *Materials Letters*, 2015, **160**: 162-166.
- [14] YANG K M, YANG X D, LIU E Z, et al. Elevated temperature compressive properties and energy absorption response of in-situ grown CNT-reinforced Al composite foams[J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2017, **690**: 294-302.
- [15] LINUL E, MARSAVINA L, LINUL P A, et al. Cryogenic and high temperature compressive properties of metal foam matrix composites[J]. *Composite Structures*, 2019, **209**: 490-498.
- [16] 杨旭东, 许佳丽, 邹田春, 等. 泡沫铝填充金属薄壁管复合结构的研究进展[J]. 材料导报, 2019, **33**(21): 111-117. (YANG Xudong, XU Jiali, ZOU Tianchun, et al. Advances in the composite structure of aluminum foam filled metal thin-walled tube[J]. *Materials Reports*, 2019, **33**(21): 111-117. (in Chinese))
- [17] YAN L L, ZHAO Z Y, HAN B, et al. Tube enhanced foam: a novel way for aluminum foam enhancement[J]. *Materials Letters*, 2018, **227**: 70-73.
- [18] ZHANG Z J, HUANG L, LI B, et al. Design of a novel multi-walled tube-reinforced aluminum foam for energy absorption[J]. *Composite Structures*, 2021, **276**: 114584.
- [19] ZHANG Z J, WANG J, WANG Y J, et al. Elevated temperature axial crushing performance of multi-walled tube-reinforced aluminum foam[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, **185**: 110582.
- [20] YIN H F, XIAO Y Y, WEN G L. Multi-objective robust optimization of foam-filled bionic thin-walled structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, **109**: 332-343.
- [21] CHEN W G, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption[J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, **39**(4): 287-306.
- [22] SUN Y, LI Q M. Dynamic compressive behavior of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, **112**: 74-115.