

# 泡沫铝-聚氨酯复合材料力学及吸能性能分析

贺高峰, 齐明思, 张伟, 薛洋洋, 强志鹏  
(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 研究泡沫铝相对密度、孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料准静态压缩力学性能、吸能性能、吸能效率和理想吸能效率的影响。**方法** 将制备的泡沫铝-聚氨酯复合材料试样在万能材料试验机上进行准静态压缩试验, 得出对应的应力-应变曲线, 由应力-应变曲线分析材料的吸能性能、吸能效率、理想吸能效率。**结果** 当泡沫铝孔径一定, 泡沫铝相对密度由 0.350 提升至 0.384 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料屈服强度提升了 4.38 MPa, 而最大吸能效率由 0.29 下降至 0.27, 准静态压缩性能有所提高。当泡沫铝相对密度一定, 泡沫铝孔径由 5 mm 增加至 9 mm 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料屈服强度提升了 6.16 MPa, 而最大吸能效率由 0.25 升高到 0.27, 准静态压缩性能有所提高。**结论** 当进行准静态压缩时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能随相对密度的增大而增大, 随孔径的增大而增大; 泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能随相对密度的增大而增大, 随孔径的增大而增大; 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率随相对密度的增大而减小, 随孔径的增大变化微小。

**关键词:** 泡沫铝; 准静态压缩; 力学性能; 吸能效率; 理想吸能效率

**中图分类号:** TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)21-0048-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.010

## Mechanical and Energy Absorption Properties of Foamed Aluminum-Polyurethane Composites

HE Gao-feng, QI Ming-si, ZHANG Wei, XUE Yang-yang, QIANG Zhi-peng  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study effects of relative density and pore size of foamed aluminum on quasi-static compression mechanical properties, the energy absorption properties, the energy absorption efficiency and the ideal energy absorption efficiency of the aluminum foam-polyurethane composites. The prepared aluminum foamed-thane composite were subjected to quasi-static compression experiments on a universal material testing machine and the corresponding curves of the stress-stain were obtained. The energy absorption properties, the energy absorption efficiency and the ideal energy absorption efficiency of materials were analyzed by the corresponding curves of the stress-strain. When the pore size of aluminum foam was constant, the relative density of aluminum foam was increased from 0.350 to 0.384; and the yield strength of aluminum foam-polyurethane composites was increased by 4.38 MPa. The quasi-static compression performance was improved, but the maximum energy absorption efficiency was decreased from 0.29 to 0.27. When the relative density of aluminum foam was constant, and the pore size of aluminum foam was increased from 5 mm to 9 mm; the yield strength of aluminum foam-polyurethane composites was increased by 6.16 MPa; the maximum energy absorption efficiency was increased from 0.25 to 0.27 and the quasi-static compression performance was improved. When performing quasi-static compression, the compression properties of the aluminum-polyurethane foam composites is increased with the increasing of the relative density and the pore size; the energy absorption properties of the aluminum-polyurethane foam composites is increased with the increasing of the relative density and the pore size. The maximum energy absorption efficiency is decreased with the increasing of the relative density, and changed slightly

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 山西省自然科学基金 (201601D102035)

作者简介: 贺高峰 (1992—), 男, 中北大学硕士生, 主攻包装材料。

通信作者: 齐明思 (1979—), 男, 博士, 中北大学副教授, 主要研究方向为机械系统动态测试等。

with the increasing of the pore size.

**KEY WORDS:** foam aluminum; quasi-static compression; mechanical properties; energy absorption efficiency; ideal energy absorption efficiency

泡沫铝是一种具有特殊胞孔结构的新型泡沫金属材料<sup>[1-2]</sup>, 其具有良好的力学性能及能量吸收性能, 泡沫铝还是一种功能材料, 具有广泛的应用前景<sup>[3-5]</sup>。目前, 由于泡沫铝具有独特的吸能性能, 已经被广泛用于精密仪器的包装, 军事工业中防弹、防爆的冲击材料等方面<sup>[6-7]</sup>。聚氨酯是一种新兴的有机高分子材料, 因其优良的性能而被广泛应用于众多领域。近几年, 聚氨酯作为一种填充物被广泛应用于内部具有复杂孔隙结构的材料中, 而且聚氨酯本身的优良特点使得聚氨酯具有良好的吸能缓冲性能<sup>[8-9]</sup>。将聚氨酯这种有机高分子材料填充到泡沫铝孔洞中会对泡沫铝材料的性能造成一定的影响, 由于泡沫铝是一种多孔材料, 泡沫铝本身也具有良好的冲击吸能性, 所以泡沫铝和聚氨酯这 2 种材料的复合对其冲击吸能性能会有一定的影响<sup>[10-11]</sup>。

目前, 国内外学者主要针对泡沫铝的性能进行了研究, 对泡沫铝-聚氨酯复合材料的性能研究相对较少。Han 等<sup>[11]</sup>利用泡沫铝及其复合材料的冲击试验研究了泡沫铝复合材料的力学性能和冲击吸能性能; Lamanna 等<sup>[12]</sup>研究了泡沫铝复合材料的力学性能, 并且利用实验结果验证理论模型对力学性能的预测; 王斌等<sup>[13]</sup>研究了纯泡沫铝及其泡沫铝复合材料在单向压缩条件下的应力-应变曲线, 分析了其形变, 并讨论了其能量吸收和能量吸收效率。同时, 国内学者利用 Hopkinson 杆对泡沫铝与泡沫铝-聚氨酯复合材料进行了在不同相对密度、应变率和聚氨酯含量下的动态压缩实验, 分析了其动态力学性能<sup>[14]</sup>。文中泡沫铝采用球形孔泡沫铝材料, 以球形孔泡沫铝为基体, 研究了不同相对密度、不同孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能、吸能效率和理想吸能效率的影响。

## 1 试验

### 1.1 仪器和材料

**主要材料:** 试验所用泡沫铝由北京中实强业泡沫铝金属有限公司提供, 为球形孔泡沫铝板, 并用机床进行线切割, 将泡沫铝板切割成直径为 35 mm, 厚度为 20 mm 的圆柱型试样, 见图 1; 聚氨酯采用德国拜耳 TPU9370A 型聚氨酯颗粒。

**主要仪器:** TLS-W50000A 型万能材料压缩试验机, 济南思达特试验机厂; 恒温加热磁力搅拌机, 功率为 120 W, 调速范围为 100~3000 r/min, 上海邦西仪器有限公司。



图 1 泡沫铝试样  
Fig.1 Aluminum foam sample

### 1.2 试验样品的制备

首先合理安装制备复合材料试件所用的仪器, 并将试验仪器调整到最佳位置, 将称量好的聚氨酯颗粒放入容量为 1000 mL 的三口烧瓶中, 并将烧瓶进行恒温油浴, 其中油浴温度为 220 °C。为了确保温度恒定, 应将搅拌机打开, 进行搅拌并设置其转速为 200 r/min, 直到聚氨酯融化为液态。这时, 快速地将液态聚氨酯的一部分倒入已经准备好的模具内(模具为统一制作的高度为 20 mm, 直径为 35 mm 的圆柱体, 见图 2), 然后将泡沫铝试样放入已经倒入液态聚氨酯的模具中。在泡沫铝上表面再一次迅速倒入一部分的液态聚氨酯, 随后放入干燥箱内固化, 设置干燥箱温度为 70 °C, 放置 12 h。这样就制成了泡沫铝-聚氨酯复合材料的初试样品, 然后将固化好的泡沫铝-聚氨酯复合材料在已经准备好的打磨机上将多余的聚氨酯打磨掉, 并且尽可能地保持上下表面光滑平整, 得到泡沫铝-聚氨酯复合材料的试样, 见图 3。随后进行称量, 并进行标注以便后续工作的开展。



图 2 放有泡沫铝的模具  
Fig.2 Mold with aluminum foam



图 3 泡沫铝-聚氨酯试样  
Fig.3 Foam aluminum-polyurethane sample

### 1.3 准静态压缩力学试验

设定 TLS-W50000A 型万能材料压缩试验机的各项参数, 设置最大载荷为 500 N, 加载速度为 5 mm/min, 进行准静态压缩试验, 得出相应的应力-应变曲线。

## 2 试验结果分析

### 2.1 相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料的影响

泡沫铝相对密度不同时的各项参数见表 1。用万能材料试验机对泡沫铝-聚氨酯复合材料、纯泡沫铝、纯聚氨酯进行准静态压缩, 其中纯泡沫铝孔径为 7 mm, 质量为 19.52 g, 相对密度为 0.363, 纯聚氨酯高度和直径与纯泡沫铝的高度和直径相同。通过准静态压缩试验得到相应的应力-应变曲线, 见图 4。由图 4 的应力-应变曲线可知, 泡沫铝孔径相同时, 相对密度不同对泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能有显著影响, 泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷的能力高于纯泡沫铝、纯聚氨酯。这说明 2 种材料的复合提升了单独泡沫铝和聚氨酯的压缩性能, 从应力-应变曲线中可以得出泡沫铝-聚氨酯复合材料试样符合多孔材料的 3 个阶段, 即弹性阶段、塑性加强阶段、致密压实阶段。弹性阶段形变较小, 当泡沫铝-聚氨酯复合材料在弹性阶段承受载荷时, 此时承受载荷的主要部分是泡沫铝骨架, 当载荷卸载后, 泡沫金属即可恢复原状, 这个阶段的过渡时间相对较短。在塑性加强阶段, 泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷时, 泡沫铝骨架与泡沫铝孔洞中的聚氨酯同时承受载荷, 此时随着泡沫铝相对密度的增加, 泡沫铝-聚氨酯复合材料屈服强度增加。泡沫铝的相对密度增加, 泡沫铝的孔壁变厚, 在弹性阶段所能承受的载荷增大, 导致屈服强度变大。当泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷达到一定值时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料将被压实, 此时泡沫铝-聚氨酯复合材料符合多孔材料的第 3 阶段, 即致密压实阶段。

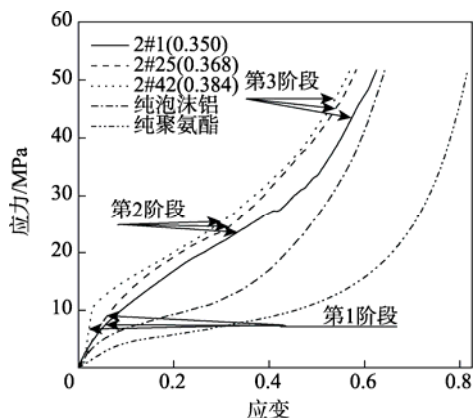


图 4 试样应力-应变曲线对比

Fig.4 Comparison for stress strain curve of specimen

表 1 泡沫铝相对密度不同时的各项参数  
Tab.1 Parameters of foam aluminum of different relative density

| 试样   | 泡沫铝质量/g | 泡沫铝孔径/mm | 泡沫铝相对密度 |
|------|---------|----------|---------|
| 2#1  | 18.63   | 7        | 0.350   |
| 2#25 | 19.57   | 7        | 0.368   |
| 2#42 | 20.46   | 7        | 0.384   |

### 2.2 相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能特性的分析

泡沫铝-聚氨酯复合材料在进行准静态压缩试验时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料主要通过前 2 个阶段的变形来吸能, 其中泡沫铝-聚氨酯复合材料的应力-应变曲线与应变轴之间所包含的面积表示其吸收的能量, 表达式为:

$$C = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_m$  为任意应变;  $\sigma$  为应力。

由式(1)得出泡沫铝-聚氨酯复合材料、泡沫铝、聚氨酯的吸能-应变曲线, 见图 5, 可以看出泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量高于泡沫铝, 这是因为在泡沫铝内部孔洞中填充聚氨酯后, 在承受载荷时, 泡沫铝骨架和聚氨酯同时承受载荷, 导致泡沫铝-聚氨酯复合材料比泡沫铝吸收的能量多。泡沫铝孔洞中填充聚氨酯可以有效提高泡沫铝的吸能性能, 并且随着泡沫铝相对密度的增大, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能逐渐增大。泡沫铝相对密度越大, 其内部孔壁越厚, 在泡沫铝内部孔洞中填充聚氨酯时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的承载能力越强, 导致泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量越多。

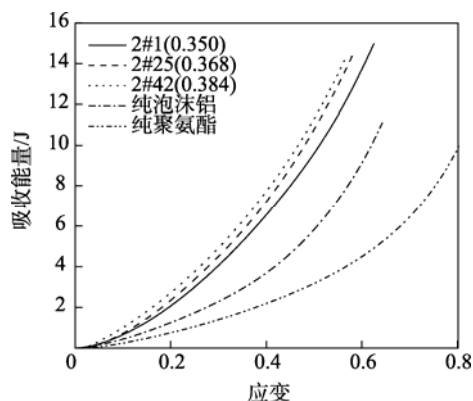


图 5 不同试样的吸能曲线

Fig.5 Energy curve of different specimens

泡沫材料的吸能性能是一个非常重要的特征, 其中缓冲器是利用泡沫铝制作的典型的能量吸收装置, 因此对泡沫铝、泡沫铝复合材料吸能性能优劣的评估尤为重要。

Milts 等<sup>[15]</sup>提出了用吸能效率  $E$  和理想吸能效率  $I$  对泡沫铝、泡沫铝复合材料的吸能性能优劣进行评估。理想吸能效率  $I$  为实际泡沫材料在压缩过程中任意应变下所吸收的能量与理想吸能材料在相同应变下吸收能量的比值；吸能效率  $E$  为实际泡沫铝所吸收的能量与对应应力的比值。

吸能效率  $E$  的定义为：

$$E = \frac{1}{\sigma_m} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon \tag{2}$$

理想能效率  $I$  的定义为：

$$I = \frac{1}{\varepsilon_m \sigma_m} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon \tag{3}$$

式中： $\sigma_m$  为  $\varepsilon_m$  对应的应力。

不同试件的吸能效率曲线见图 6，可知随着泡沫铝相对密度的减小，泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率有所提高，纯泡沫铝的最大吸能效率低于泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率，也就是说，聚氨酯和泡沫铝这 2 种材料复合可以提高材料的最大吸能效率。当泡沫铝相对密度从 0.384 减小到 0.350 时，泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率由原来的 0.27 提高到 0.29，由此可知泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率随相对密度的减小而变大，这是因为聚氨酯的最大吸能效率大于泡沫铝的最大吸能效率，泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷时，除了泡沫铝承担相应的载荷外，聚氨酯也会承受相应的载荷，并且泡沫铝的相对密度越小，内部孔壁越薄，导致泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率随相对密度的增大而变小。泡沫铝-聚氨酯复合材料在最大吸能效率下，吸能性能才能够得到最充分的发挥，吸能性能最好，可有效地确定材料的最佳吸能状态。

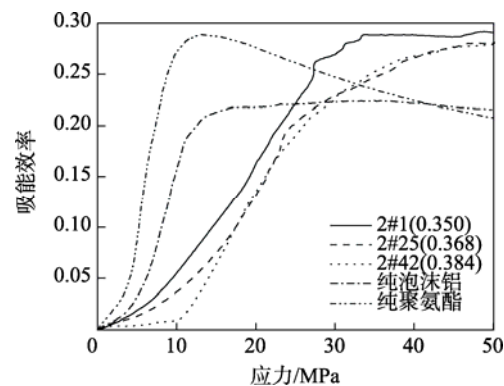


图 6 不同试件的吸能效率曲线  
Fig.6 Energy-absorption efficiency curves of different specimens

不同试件的理想吸能效率曲线见图 7，可知纯泡沫铝、纯聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大理想吸能效率都接近 0.70，理想吸能效率  $I$  越大，其材料越接近于理想的吸能材料。由于各种原因的束缚，

要达到这种理想的吸能效果非常困难，因此理想吸能效率反映了真实材料与理想吸能材料的接近程度。

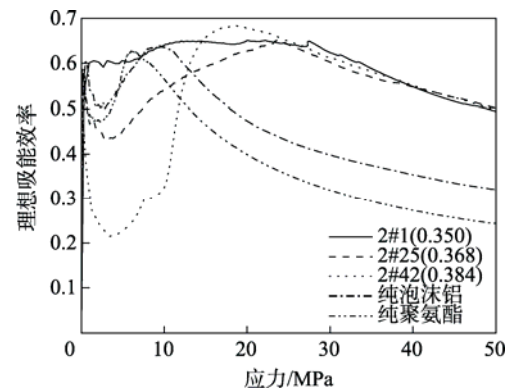


图 7 不同试件的理想吸能效率曲线  
Fig.7 Ideal energy-absorption efficiency curve of different specimens

2.3 孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料的影响

泡沫铝孔径不同时对应的各项参数见表 2。不同孔径的泡沫铝-聚氨酯复合材料的应力-应变曲线见图 8，可知泡沫铝相对密度相同的复合材料在进行准静态压缩时，泡沫铝孔径由 5 mm 增加至 9 mm，泡沫铝-聚氨酯复合材料屈服强度提升了 6.16 MPa。由此可知，随着孔径的增加，泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷的能力增加，而且孔径越大，屈服强度越高。这是因为泡沫铝的相对密度相同，其孔隙率相同，随着泡沫铝孔径的增大，泡沫铝内部孔棱柱相对变大，在进行准静态压缩时，材料变形较小，导致承受载荷的能力增强，其屈服强度变大。

表 2 泡沫铝孔径不同时对应的各项参数  
Tab.2 Parameters corresponding to different pore sizes of aluminum foam

| 试样   | 泡沫铝质量/g | 泡沫铝孔径/mm | 泡沫铝相对密度 |
|------|---------|----------|---------|
| 1#6  | 20.58   | 5        | 0.376   |
| 2#43 | 20.22   | 7        | 0.376   |
| 3#3  | 20.64   | 9        | 0.376   |

2.4 不同孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

由式（1）计算得到泡沫铝孔径不同，泡沫铝相对密度相同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能曲线，见图 9。由图 9 可以看出，不同孔径的泡沫铝随着应变的增加，吸收的能量不断变大。泡沫铝孔径的大小对泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能有显著影响，当应变为 0.1 时，其泡沫铝孔径为 5 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量为 0.48 J，泡沫铝孔径为 7 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量为 0.8 J，

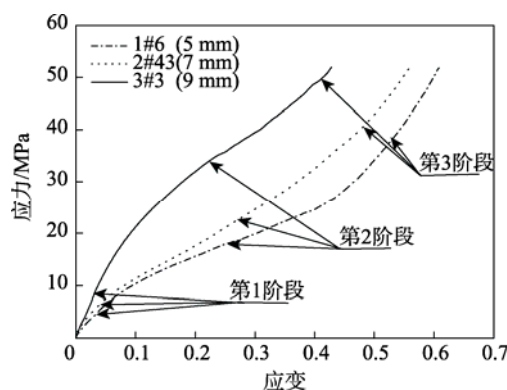


图8 不同孔径的泡沫铝-聚氨酯复合材料的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of foamed aluminum-polyurethane composites with different pore sizes

泡沫铝孔径为 9 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量为 1.2 J; 当应变为 0.4 时, 其孔径为 5 mm 的泡沫铝-聚氨酯材料吸收的能量为 5.8 J, 孔径为 7 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量为 7.0 J, 孔径为 9 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料吸收的能量为 11.1 J。造成吸收能量不同的原因与泡沫铝-聚氨酯复合材料的变形机制有关系, 泡沫铝-聚氨酯复合材料在被压缩时, 除了泡沫铝承担相应的载荷外, 聚氨酯也会承受相应的载荷, 孔径越大其吸能越多。随着泡沫铝孔径的增大, 泡沫铝内部孔棱相对变大, 在进行准静态压缩时, 材料变形较小, 所能承受的载荷就会变大, 导致吸能性能提高。

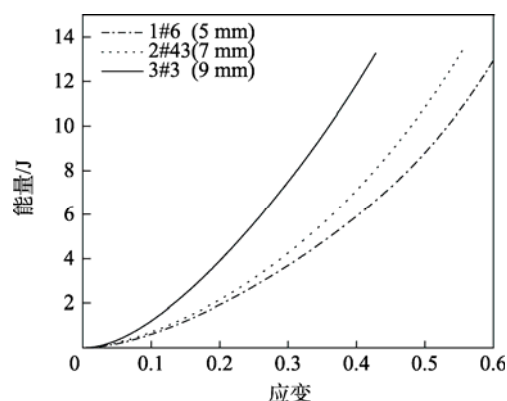


图9 孔径不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能曲线

Fig.9 Energy-absorption curves of foamed aluminum-polyurethane composites with different pore sizes

由式(2—3)计算得到泡沫铝孔径不同, 泡沫铝相对密度相同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能效率和理想吸能效率, 见图 10—11。由图 10 可以看出, 泡沫铝孔径为 5 mm 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率为 0.2629; 当泡沫铝孔径为 7 mm 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率为 0.2579; 当泡沫铝孔径为 9 mm 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率为 0.2555。由此可知, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率随着孔径增大变化微小。泡沫铝-聚氨酯复合材料在最大吸能效率时的吸能性能最好。

大吸能效率为 0.2555。由此可知, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大吸能效率随着孔径增大变化微小。泡沫铝-聚氨酯复合材料在最大吸能效率时的吸能性能最好。

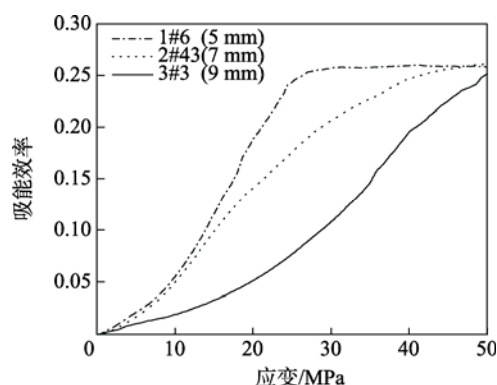


图10 孔径不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能效率曲线

Fig.10 Energy-absorption efficiency curves of foamed aluminum-Polyurethane composites with different pore sizes

由图 11 可以看出, 泡沫铝孔径大小对泡沫铝-聚氨酯复合材料的最大理想吸能效率的影响不明显, 其中最大理想吸能效率为 0.65。理想吸能效率  $I$  越大, 其材料越接近理想的吸能材料, 它反映了真实材料与理想吸能材料的接近程度, 可采用最大理想吸能效率评价泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的优劣。

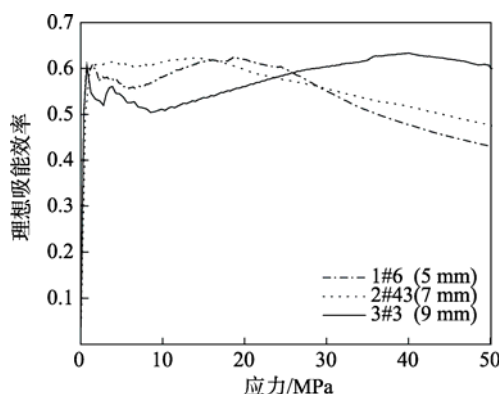


图11 孔径不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率曲线

Fig.11 The ideal energy-absorption efficiency curve of foam aluminum-polyurethane composites with different pore sizes

### 3 结语

1) 泡沫铝-聚氨酯复合材料进行准静态压缩时, 泡沫铝的相对密度和孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能和吸能性能有显著的影响。泡沫铝相对密度越大, 则泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能越好, 吸能性能越好; 泡沫铝孔径越大, 则泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能越好, 吸能性能越好。

2) 可用吸能效率和理想吸能效率对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的优劣进行评估。吸能效率可以有效确定材料的最佳吸能状态, 理想吸能效率反映真实材料与理想吸能材料的接近程度。在进行泡沫铝-聚氨酯复合材料准静态压缩时, 泡沫铝的相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能效率的影响十分显著, 泡沫铝相对密度越大, 泡沫铝-聚氨酯最大吸能效率越小, 而泡沫铝孔径的大小对泡沫铝-聚氨酯最大吸能效率的影响微小。

#### 参考文献:

- [1] 曾繁波, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 泡沫铝结构的吸能特性影响参数试验分析[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 14—18.  
ZENG Fan-bo, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing, et al. Effects of Energy Absorption Characteristics of Aluminum Foam Structures on Parameter Test Analysis[J]. Machine Design and Manufacturing, 2014(9): 14—18.
- [2] 黄建峰, 曹晓卿. 开孔泡沫铝材料静态压缩力学性能与吸能特性[J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46(3): 74—77.  
HUANG Jian-feng, CAO Xiao-qing. Static Compressive Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Open-cell Aluminum Foam Materials[J]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2011, 46(3): 74—77.
- [3] 陈静友, 李成兵. 泡沫铝力学性能与吸能特性研究进展[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(4): 104—113.  
CHEN Jing-you, LI Cheng-bing. Research Progress on Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(4): 104—113.
- [4] 杜金晶, 王斌, 曹卓坤, 等. 镀铜碳纤维增强铝基泡沫材料准静态压缩力学性能及吸能特性[J]. 有色金属工程, 2016, 6(3): 1—4.  
DU Jin-jing, WANG Bin, CAO Zhuo-kun, et al. Quasi-static Compression Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Copper-coated Carbon Fiber Reinforced Aluminum Foams[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(3): 1—4.
- [5] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击, 2002(4): 358—362.  
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation and Characteristics of Buffer Aluminum Absorb Energy[J]. Explosion and Shock Waves, 2002(4): 358—362.
- [6] ZHANG Chun-ji, FENG Yi, ZHANG Xue-bin. Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-filled Square Tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1380—1386.
- [7] 齐明思, 张晋宁, 杨卫. 泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 6—9.  
QI Ming-si, ZHANG Jin-ning, YANG Wei. Study on Buffer Performance of Foam Aluminum-polyurethane Composite Structure[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 6—9.
- [8] 张伟, 齐明思, 赵志芳. 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 35—40.  
ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang. Preparation and Mechanical Properties Analysis of Foam Aluminum-Polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 35—40.
- [9] KISHIMOTO S, WANG Q, TANAKA Y, et al. Compressive Mechanical Properties of Closed-cell Aluminum Foam-polymer Composites[J]. Composites Part B, 2014, 64: 43—49.
- [10] CHO J U, KIM Y C. Comparative Study between Impact Behaviors of Composites with Aluminum Foam and Honeycomb[J]. Current Nanoscience, 2014, 10(1): 23—27.
- [11] HAN M S, BANG S O, CHO J U, et al. Experimental Study on the Impact Characteristics of a Sandwich Composite with an Aluminum Foam Core[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(1): 61—66.
- [12] LAMANNA E, GUPTA N, CAPP A P, et al. Evaluation of the Dynamic Properties of an Aluminum Syntactic Foam Core Sandwich[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 2987—2994.
- [13] 王斌, 何德坪, 舒光冀. 泡沫 Al 合金的压缩性能及其能量吸收[J]. 金属学报, 2000, 36(10): 1037—1040.  
WANG Bin, HE De-ping, SHU Guang-ji. Compression Properties and Energy Absorption of Foamed Al Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(10): 1037—1040.
- [14] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学实验[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 103—108.  
XIE Wei-hong, DU Hong-tao, LI Shun-cai. Dynamic Mechanical Experiment of Polyurethane Foam Aluminum Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 103—108.
- [15] MILTZ J, GRUENBANM G. Evaluation of Cushion Properties of Plastic Foams Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering Science, 1981, 21(15): 1010—1014.