

## 泡沫铝-聚氨酯的制备及其吸能特性分析

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

**摘要:** **目的** 制备泡沫铝-聚氨酯复合材料, 并研究球形开孔泡沫铝的孔隙率、聚氨酯(PU)的含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能和吸能性能的影响。分析泡沫铝孔隙率、聚氨酯含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能效率和理想吸能效率的影响规律。**方法** 通过对复合材料试样进行准静态压缩试验, 得出对应的应力-应变曲线, 进一步推导出吸能-应变曲线、吸能效率-应力曲线和理想吸能效率-应力曲线。**结果** 当泡沫铝的孔隙率一定时, 随着 PU 含量的上升, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能和吸能性能得到提升。当 PU 含量一定时, 随着泡沫铝孔隙率的减小, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能和吸能性能会增加。**结论** 明确了吸能效率曲线和理想吸能效率曲线的应用范围, 为缓冲材料的选择提供了依据。

**关键词:** 泡沫铝-聚氨酯; 准静态压缩; 孔隙率; 聚氨酯含量; 吸能特性

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0081-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.014

## Preparation of Aluminum Foam-polyurethane and Analysis of Its Energy Absorption Characteristics

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

**ABSTRACT:** The work aims to prepare aluminum foam-polyurethane composites and study the effect of porosity and polyurethane (PU) content of spherical open-cell aluminum foam on the compression and energy absorption properties of aluminum foam-polyurethane composites, and analyze the law of effects of porosity and polyurethane content of aluminum foam on the energy absorption efficiency and ideal energy absorption efficiency of aluminum foam-polyurethane composites. The specimens of composites were subject to a quasi-static compression test to obtain the corresponding stress-strain curves, and the energy absorption-strain curve, energy absorption efficiency-stress curve and ideal energy absorption efficiency-stress curve were further derived. When the porosity of the aluminum foam was constant, the compression and energy absorption properties of aluminum foam-polyurethane composites were improved with the increase of PU content. When the PU content was constant, the compression and energy absorption properties of the aluminum foam-polyurethane composites would increase as the porosity of the aluminum foam decreased. The application range of the energy absorption efficiency curve and the ideal energy absorption efficiency curve is clarified, which provides a basis for the selection of buffer materials.

**KEY WORDS:** aluminum foam-polyurethane; quasi-static compression; porosity; polyurethane content; energy absorption characteristics

泡沫铝是以铝或者铝合金为骨架, 其内部含有大量孔洞的一种轻质多孔材料<sup>[1]</sup>。一些学者根据孔型结构不同, 将泡沫铝分为闭孔泡沫铝和开孔泡沫铝

等 2 种。球形开孔泡沫铝是一种性能较为优良的新型材料, 其内部孔型为球形且分布相对规则, 具有耐高温、吸收能力强、密度小、抗腐蚀等优点, 被

收稿日期: 2018-08-16

基金项目: 山西省自然科学基金(201601D102035, 2015011063)

作者简介: 强志鹏(1993—), 男, 中北大学硕士生, 主攻泡沫铝-聚氨酯缓冲性能。

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。

广泛应用于汽车运输行业、航空航天器材和建筑结构建设等方面<sup>[2-8]</sup>。泡沫铝独特的空间结构使其能够和其他一些易塑性的材料结合起来,从而提升某些方面的性能,是目前较为热门的一个研究方向。聚氨酯(PU)本身具有良好的耐磨性、耐热性、吸能性能<sup>[9-10]</sup>以及易塑性,因此广泛应用于填充孔隙材料,进而制备复合材料。将PU填充到泡沫铝的孔隙结构中,形成的泡沫铝-聚氨酯复合材料具有极强的吸能性能,因此可以用于贵重精密仪器的包装<sup>[11-13]</sup>以及在运输行业中广泛使用。

目前一些学者对泡沫铝、PU以及泡沫铝-聚氨酯复合材料的力学性能等进行了研究,但对其吸能效率方面的研究较少。Bai等<sup>[14]</sup>通过静态压缩试验,对不同蜂窝铝进行了研究,根据得出的应力-应变曲线,对蜂窝铝的变形机理进行了分析。Liu等<sup>[15]</sup>研究了泡沫铝-聚氨酯复合材料在循环压缩条件下的力学性能,并对其阻尼能力进行了评价。文中主要研究泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能和吸能性能,并分析泡沫铝孔隙率、PU含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能效率和理想吸能效率的影响规律以及PU增强泡沫铝吸能性能的机理<sup>[16-17]</sup>。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验中选用的球形开孔泡沫铝样品是由泡沫铝板(北京中实强业泡沫金属有限公司提供)通过线切割法加工而成。样品呈圆柱状,直径为35 mm,厚度为20 mm,见图1。PU是德国拜耳9370A型聚氨酯颗粒,密度为 $1.18 \text{ g/cm}^3$ ,邵氏硬度为HA70。

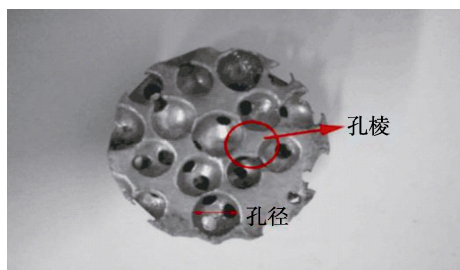


图1 泡沫铝试样  
Fig.1 Aluminum foam samples

### 1.2 仪器

准静态压缩试验中采用的仪器为 TLS-W50000A 型微机控制弹簧试验机,其可加载的最大载荷为50 kN。

### 1.3 样品的制备

取定量的PU颗粒装入1 L的三口烧瓶内,将三口烧瓶用夹持装置固定于试验架上,烧瓶置于230 ℃的油浴锅内恒温加热。打开置于瓶内的搅拌装置,设

置搅拌速度为200 r/min,直至聚氨酯熔化。随后将搅拌速度调整为500 r/min,搅拌6~10 min后关闭搅拌装置,将三口烧瓶取下,把熔化后的聚氨酯快速倒入提前准备好的模具内(将泡沫铝试样提前放置于模具中),模具样式见图2。将模具用盖子密封,并用力挤压模具两端,使聚氨酯充分进入泡沫铝的孔隙,然后将处理过的模具放置于准备好的恒温鼓风干燥箱内,调整温度为80 ℃,固化12 h后得到所需的泡沫铝-聚氨酯初样。随后用打磨机对试样进行打磨,便于进行后续的准静态压缩试验,且可对聚氨酯含量进行控制,得到所需的试样,见图3。对试样进行编码分类,试样是直径为35 mm、厚度为20 mm的圆柱体。



图2 泡沫铝及模具样品  
Fig.2 Aluminum foam and mold samples



图3 泡沫铝-聚氨酯复合材料样品  
Fig.3 Aluminum foam-polyurethane composite sample

### 1.4 准静态压缩试验

准静态压缩试验的一般应变速率为 $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。试验前要对伺服控制拉力试验机各项参数进行设定,其最大载荷为50 kN,加载速度为5 mm/min,见图4及图5。通过设备自带计算机采集产生的数据,利用origin软件绘制应力-应变曲线,再利用公式进一步推导出其他所需曲线。



图4 压缩泡沫铝  
Fig.4 Compressed aluminum foam

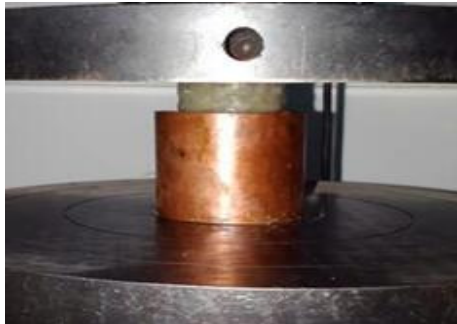


图 5  压缩泡沫铝-聚氨酯样品  
Fig.5 Compressed aluminum foam-polyurethane sample

2  结果分析

2.1  聚氨酯含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料静态压缩性能的影响

选取泡沫铝孔隙率相同，孔径皆为 7.5 mm，但聚氨酯含量不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料样品进行试验，各项数据见表 1。试验所得数据绘制的应力-应变曲线见图 6，可以看出试样 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>的曲线趋势大致相近，皆分为 3 个阶段。第 1 阶段为弹性阶段，该阶段较短，主要反映了泡沫铝弹性变形的过程。第 2 阶段为强化阶段，这一阶段聚氨酯也开始参与压缩变形。第 3 阶段为致密压实阶段，主要反映了泡沫铝-聚氨酯复合材料被压垮屈服的过程。在弹性阶段，3 者的曲线变化区分度并不明显，屈服强度（产生 0.2% 残余变形的应力值）大致相同。这是由于在这一过程中，仅泡沫铝被压缩承受载荷，吸收压缩能量，而 3 个试样是来源于同一块泡沫铝板，因此出现了上述情况。在强化阶段，泡沫铝-聚氨酯复合材料中的聚氨酯也开始承受载荷。据表 1 所知，1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>的聚氨酯含量依次下降，因此在第 2 阶段曲线区分度开始变化，第 3 阶段曲线区分度最为明显。从图 6 可以看出，随着聚氨酯含量的增加，同一应变下泡沫铝-聚氨酯

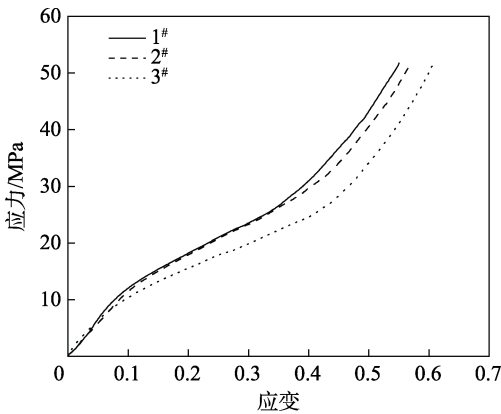


图 6  聚氨酯含量不同对应的应力-应变曲线  
Fig.6 Stress-strain curves corresponding to the different polyurethane contents

表 1  聚氨酯含量不同的泡沫铝-聚氨酯  
复合材料各项参数  
Tab.1 Parameters of aluminum foam-polyurethane  
composites with different PU contents

| 试样             | 泡沫铝<br>质量/g | 泡沫铝<br>密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 泡沫铝<br>孔径/mm | 聚氨酯<br>质量/g | 孔隙率/<br>% |
|----------------|-------------|-------------------------------------|--------------|-------------|-----------|
| 1 <sup>#</sup> | 18.53       | 0.93                                | 7.5          | 20.09       | 65.6      |
| 2 <sup>#</sup> | 18.62       | 0.93                                | 7.5          | 19.82       | 65.6      |
| 3 <sup>#</sup> | 18.81       | 0.93                                | 7.5          | 19.06       | 65.6      |

复合材料所能承受的载荷逐渐增加。这是由于聚氨酯本身具有吸能性能，且变形较为困难，因此对泡沫铝-聚氨酯复合材料试样的整体变形产生了极大的抑制作用，使其能够承受的载荷增加。

2.2  泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料静态压缩性能的影响

从试验样品中选取孔径都为 7.5 mm 的泡沫铝-聚氨酯复合材料样品，保证其聚氨酯含量相同，孔隙率不同，详细参数见表 2。对所选样品进行压缩，得到的应力-应变曲线见图 7。从图 7 中可以发现，同等应变下纯泡沫铝能够承受的载荷比聚氨酯高，而泡沫铝-聚氨酯复合材料能够承受的载荷又比纯泡沫铝高，说明纯泡沫铝和聚氨酯的结合提高了材料的压缩性能。通过曲线可以计算出试样 4<sup>#</sup>对应的屈服强度为 10.1 MPa，试样 5<sup>#</sup>对应的屈服强度为 5.8 MPa，试样 6<sup>#</sup>对应的屈服强度为 3.5 MPa。试样 5<sup>#</sup>和试样 6<sup>#</sup>对应的屈服强度较为相近，且两者应力-应变曲线第一阶段的区分度也并不明显，这是泡沫铝板本身结构的不均匀性以及未能将聚氨酯完全填满泡沫铝导致的。对比试样 4<sup>#</sup>和试样 6<sup>#</sup>发现，试样 4<sup>#</sup>比试样 6<sup>#</sup>的孔隙率低 4.4%、屈服强度高 6.6 MPa。这主要是因为孔隙率下降，导致泡沫铝孔壁加厚，从而提高了泡沫铝承受载荷的能力，进而影响到了泡沫铝-聚氨酯复合材料承受载荷的能力，所以屈服强度得到提升。从图 7 整

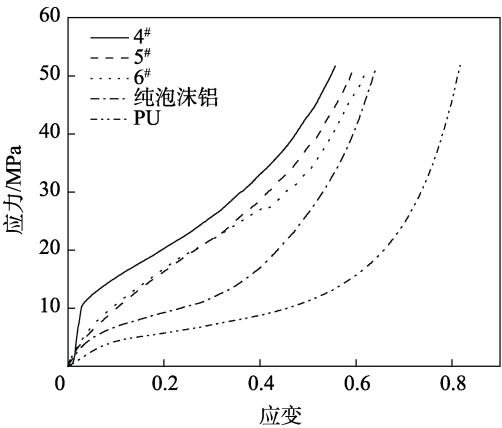


图 7  试样对比应力-应变曲线  
Fig.7 Stress-strain curve for sample comparison

表2 试样各项参数  
Tab.2 Sample parameters

| 试样             | 泡沫铝<br>质量/g | 泡沫铝密<br>度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 泡沫铝<br>孔径/mm | 聚氨酯<br>质量/g | 孔隙率/<br>% |
|----------------|-------------|---------------------------------|--------------|-------------|-----------|
| 4 <sup>#</sup> | 20.46       | 1.04                            | 7.5          | 20          | 61.5      |
| 5 <sup>#</sup> | 20.27       | 1.02                            | 7.5          | 20          | 62.2      |
| 6 <sup>#</sup> | 18.63       | 0.95                            | 7.5          | 20          | 64.8      |
| 纯泡沫铝           | 19.52       | 0.98                            | 7.5          | 0           | 63.7      |

体来看,可以发现随着泡沫铝孔隙率的下降,泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能得到提升,因此泡沫铝孔隙率与聚氨酯复合材料承受载荷的能力呈负相关的关系。

### 3 泡沫铝-聚氨酯复合材料缓冲吸能特性分析

在进行准静态压缩试验时,泡沫铝-聚氨酯复合材料通过泡沫铝发生断裂变形和填充的聚氨酯发生弹性变形来对能量进行吸收。对能量的吸收能力可以用复合材料在变形过程中吸收的形变功  $C$  表示,表达式如式(1)所示。

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

式中:  $C$  为应力-应变曲线下方的面积;  $\varepsilon_m$  为任意应变;  $\sigma_m$  为对应的应力。为了进一步研究泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能特性,文中还引入了吸能效率曲线和理想吸能效率曲线对其进行评估,表达式分别如式(2—3)所示。

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

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

式中:  $E$  为泡沫铝-聚氨酯复合材料在静态压缩过程中所吸收的能量与其相对应应力的比值(吸能效率);  $I$  为泡沫铝-聚氨酯复合材料在静态压缩过程中实际吸收的能量和理想情况下吸收能量的比值(理想吸能效率)。

#### 3.1 聚氨酯含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

根据图6得出聚氨酯含量不同时泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能-应变曲线,见图8。从图8可以看出,随着聚氨酯含量的增加,泡沫铝-聚氨酯复合材料能够吸收的能量也逐渐增加,吸能性能提高。第1阶段曲线区分度较低,是因为在这一阶段泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩变形主要是通过作为骨架的泡沫铝断裂变形来吸收能量,而泡沫铝来源于同一块泡沫铝板,所以出现上述情况。从第2阶段开始,聚氨酯开始参与变形吸收能量。随着应变的增加,发现由于聚

氨酯含量不同,泡沫铝-聚氨酯复合材料能够吸收的能量出现较大差别。聚氨酯含量与泡沫铝-聚氨酯复合材料能够吸收的能量呈正相关关系。

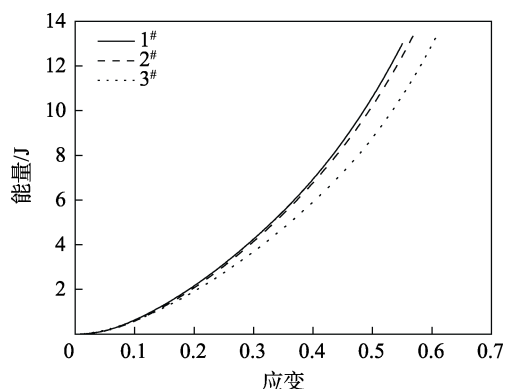


图8 聚氨酯含量不同的泡沫铝-聚氨酯吸能-应变曲线  
Fig.8 Energy absorption-strain curve of aluminum foam-polyurethane with different PU contents

根据图6得出的聚氨酯含量不同时泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能效率-应力曲线见图9。从图9可以看出,试样1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>的吸能效率都达到最大值时,对应的应力分别为52.5, 45.3, 27.5 MPa,说明试样1<sup>#</sup>相对试样2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>来说,能适应强度需求更大的场合,且应力为52.5 MPa时,泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能将得到更大的发挥。由此我们可以看出聚氨酯含量越高,泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能效率最高值对应的应力越大。当吸能效率取得最大值时,表明在该应力处,泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能特性最好。试样1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>的聚氨酯含量依次下降,吸能效率最大值对应的应力也依次下降。

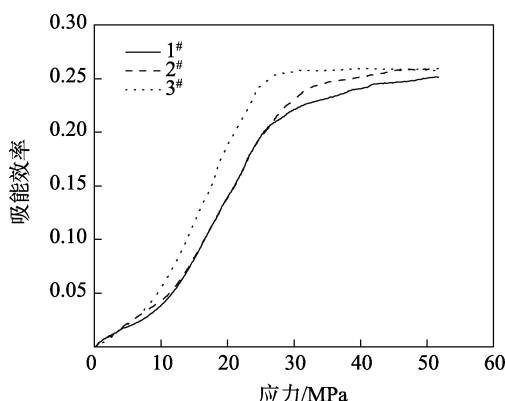


图9 聚氨酯含量不同的泡沫铝-聚氨酯吸能效率-应力曲线  
Fig.9 Energy absorption efficiency-stress curve of aluminum foam-polyurethane with different PU contents

根据图6得出的聚氨酯含量不同时泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率-应力曲线见图10。由图10可知,随着聚氨酯含量的变化,其理想吸能效率曲线的最大值并未发生明显的波动,证明理想吸能效

率是能够真正反映材料本身的一种属性。理想吸能效率先下降后上升是由于泡沫铝第 1、第 2 阶段参与压缩吸能的材料不同造成的。通过曲线可以发现, 虽然聚氨酯含量有一定的差异, 但泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率最大值都超过了 0.6, 所以是可以应用于各行业的优良缓冲吸能材料。

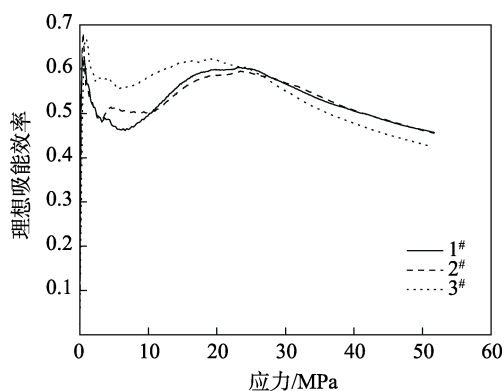


图 10 聚氨酯含量不同的泡沫铝-聚氨酯理想吸能效率-应力曲线

Fig.10 Ideal energy absorption efficiency-stress curve of aluminum foam-polyurethane with different PU contents

### 3.2 泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

从图 7 可以推导出纯泡沫铝、聚氨酯及泡沫铝孔隙率不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能-应变曲线, 见图 11。由图 11 可知, 聚氨酯的吸能性能最差, 纯泡沫铝的吸能性能居中, 而泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能最好, 说明纯泡沫铝和聚氨酯的复合使得材料的吸能性能得到了提升。随着泡沫铝的孔隙率降低, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能性能得到提升, 是因为随着泡沫铝孔隙率的降低, 泡沫铝内部孔壁变厚, 在准静态压缩试验时更加难以压缩断裂变形, 可以承受更多的载荷, 因此吸能性能得到提高。

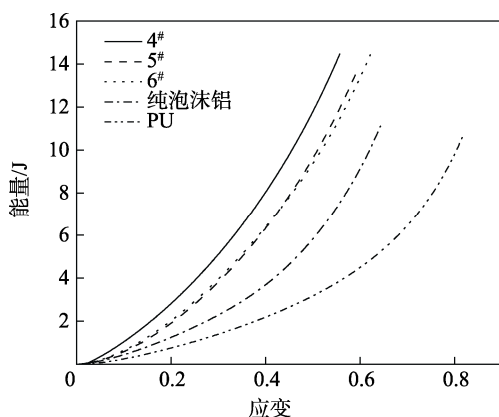


图 11 试样对比吸能-应变曲线

Fig.11 Energy absorption-strain curve of sample comparison

根据图 7 得出的纯泡沫铝、聚氨酯及泡沫铝孔隙率不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能效率-应力曲线见图 12。由图 12 可知, 当试样 4#、试样 5#、试样 6#、纯泡沫铝、聚氨酯的吸能效率达到最大值时, 所对应的应力分别为 47.3, 39.7, 33.9, 16.1, 12.7 MPa。相比于聚氨酯, 纯泡沫铝能够适用强度需求更大的场合, 而泡沫铝-聚氨酯复合材料达到吸能效率最大值时对应的应力值更大, 说明将泡沫铝、聚氨酯等 2 种材料结合形成的复合材料吸能性能要强于单纯的泡沫铝、聚氨酯。随着孔隙率的增加, 泡沫铝-聚氨酯复合材料最大吸能效率所对应的应力值下降, 两者呈负相关关系。

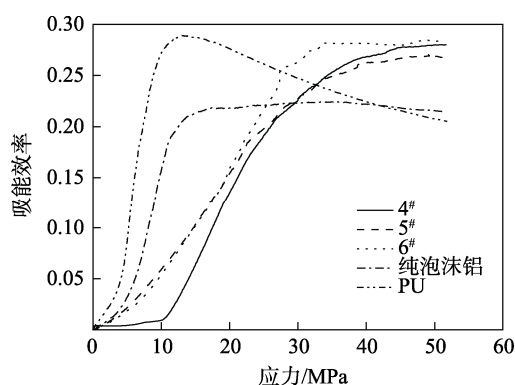


图 12 试样对比吸能效率-应力曲线

Fig.12 Energy absorption efficiency-stress curve of sample comparison

根据图 7 得出的纯泡沫铝、聚氨酯及泡沫铝孔隙率不同的泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率-应力曲线见图 13。由图 13 可知, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率最大值并未随着孔隙率的变化而发生明显变化, 且纯泡沫铝、聚氨酯的理想吸能效率最大值与泡沫铝-聚氨酯复合材料相近, 进一步说明了理想吸能效率只是反映材料本身的一种属性。纯泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯复合材料的理想吸能效率最大值都达到了 0.6 以上, 说明这 3 种材料都具有较好的吸能性能。

### 3.3 聚氨酯增强泡沫铝吸能性能机理分析

纯泡沫铝在生产过程中容易产生一定的缺陷, 包括孔壁与孔棱的褶皱以及孔棱的弯曲。由准静态压缩试验可知, 这些部位在压缩载荷的作用下容易发生应力集中, 从而导致泡沫铝的断裂变形最先出现在这一部分区域。应力集中用应力集中系数  $\alpha$  来表示。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_n$  为平均应力;  $\sigma_{\max}$  为对应的应力集中区域最大应力。聚氨酯的粘结性能较好, 具有优良的复原性能, 能够充分填充到泡沫铝中, 从而减少了裂缝尖端的应力集中, 降低了应力集中系数, 进而抑制了

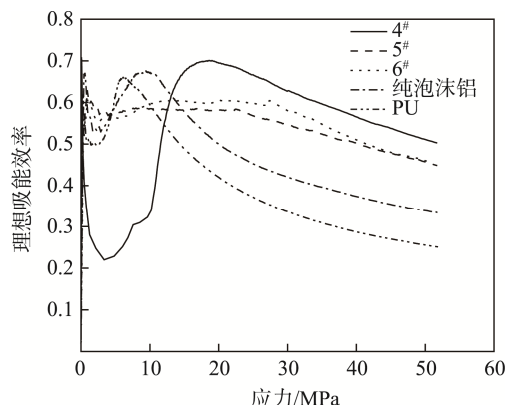


图13 泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯的理想吸能效率-应力曲线

Fig.13 Aluminum foam, polyurethane, aluminum foam-polyurethane's ideal energy absorption efficiency-stress curves

裂缝的产生和发展。此外,聚氨酯也具有较好的吸能性能,在准静态压缩试验时吸收转移了部分载荷,因此在泡沫铝孔洞内填充了聚氨酯之后,其吸能性能得到了提升。

## 4 结语

在泡沫铝-聚氨酯复合材料制备过程中,适当加压可以使聚氨酯填充更充分,试验结果更加可靠。

当泡沫铝孔隙率一定时,随着泡沫铝-聚氨酯复合材料中聚氨酯含量的上升,无论是压缩性能还是吸能性能均得到了一定的提升,最大吸能效率对应的应力值上升,可适用于强度需求更大的场合。当聚氨酯含量一定时,随着泡沫铝孔隙率的增加,泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能降低,最大吸能效率对应的应力值下降,适用于强度需求较小的场合。通过对理想吸能效率曲线的研究,研究人员可以确定材料本身的缓冲吸能性能是否足够优良,以便于在实际应用中对材料进行选取,同时参考吸能效率曲线可以更加充分地利用材料的吸能性能。

## 参考文献:

- [1] 于丽丽,李爱群,解琳琳,等.泡沫铝压缩和吸能性能的影响因素分析[J].建筑技术,2018,49(3): 315—318.  
YU Li-li, LI Ai-qun, XIE Lin-lin, et al. Analysis of Factors Affecting Foam Aluminum Compression and Energy Absorption Performance[J]. Building Technology, 2018, 49(3): 315—318.
- [2] 张伟,齐明思,赵志芳,等.泡沫铝-聚氨酯静态压缩特性及吸能特性分析[J].包装工程,2018,39(11): 72—76.  
ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang, et al. Static Compression Characteristics and Energy Absorption

Characteristics of Aluminum Foam-polyurethane[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 72—76.

- [3] 刘彦强,樊建中,马自力,等.泡沫铝三明治板的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(15): 101—107.  
LIU Yan-qiang, FAN Jian-zhong, MA Zi-li, et al. Research and Application Progress of Foam Aluminum Sandwich Panels[J]. Materials Review, 2017, 31(15): 101—107.
- [4] 朱梦蛟,周素洪,王渠东,等.泡沫铝材料的制备技术及应用现状[J].热加工工艺,2017,46(12): 21—25.  
ZHU Meng-jiao, ZHOU Su-hong, WANG Qu-dong, et al. Preparation Technology and Application Status of Foamed Aluminum Materials[J]. Thermal Processing Technology, 2017, 46(12): 21—25.
- [5] 于英华,刘明,陈玉明,等.泡沫铝层合结构汽车发动机罩板研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(4): 461—465.  
YU Ying-hua, LIU Ming, CHEN Yu-ming, et al. Research on Automobile Hood Panel of Foam Aluminum Laminated Structure[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(4): 461—465.
- [6] 马聪承,兰凤崇,陈吉清.泡沫铝复合结构改善汽车侧撞安全的仿真研究[J].汽车工程,2017,39(4): 432—439.  
MA Cong-cheng, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing. Simulation Research on Improving the Side Impact Safety of Automobile Aluminum Composite Structure[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(4): 432—439.
- [7] 李原,崔守荣.基于泡沫铝的新型建筑结构研究概述[J].建材与装饰,2016(39): 194—195.  
LI Yuan, CUI Shou-rong. Overview of New Building Structure Based on Aluminum Foam[J]. Building Materials and Decoration, 2016(39): 194—195.
- [8] 王刚,杨红新,焦孟旺,等.泡沫铝在汽车上的开发应用[J].稀有金属,2015,39(7): 660—665.  
WANG Gang, YANG Hong-xin, JIAO Meng-wang, et al. Development and Application of Foam Aluminum in Automobiles[J]. Rare Metals, 2015, 39(7): 660—665.
- [9] 李彬.碳纳米聚氨酯泡沫吸能特性研究及其应用[D].长春:吉林大学,2017.  
LI Bin. Study on Energy Absorption Characteristics of Carbon Nano-polyurethane Foam and Its Application[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [10] 鲁林,李晓峰.冲击环境作用下聚氨酯材料的应变率分布及吸能特性研究[J].兵工学报,2015,36(S1): 213—219.  
LU Lin, LI Xiao-feng. Study on Strain Rate Distribution and Energy Absorption Characteristics of Polyurethane Materials under Impact Environment[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 213—219.
- [11] KADKHODAPOUR J, RAEISI S. Micro-macro Inves-

- tigation of Deformation and Failure in Closed-cell Aluminum Foams[J]. Computational Materials Science, 2014, 83(2): 137—148.
- [12] MOZAFARI H, MOLATEFI H, CRUPI V, et al. In Plane Compressive Response and Crushing of Foam Filled Aluminum Honeycombs[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(26): 3215—3228.
- [13] KISHIMOTO S, WANG Q, TANAKA Y, et al. Compressive Mechanical Properties of Closed-cell Aluminum Foam-polymer Composites[J]. Composites Part B Engineering, 2014, 64(64): 43—49.
- [14] BAI Z, GUO H, JIANG B, et al. A Study on the Mean Crushing Strength of Hexagonal Multi-cell Thin-walled Structures[J]. Thin-walled Structures, 2014, 80(9): 38—45.
- [15] LIU S, LI A, HE S, et al. Cyclic Compression Behavior and Energy Dissipation of Aluminum Foam-polyurethane Interpenetrating Phase Composites[J]. Composites Part A, 2015, 78: 35—41.
- [16] 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 Buffer Energy Absorption[J]. Explosion and Shock Waves, 2002(4): 358—362.
- [17] 闫畅, 宋绪丁, 荆传贺, 等. 工业闭孔泡沫铝压缩力学性能及变形机理[J]. 材料导报, 2017, 31(18): 92—96.
- YAN Chang, SONG Xu-ding, JING Chuan-he, et al. Mechanical Properties and Deformation Mechanism of Industrial Closed Cell Aluminum Foam[J]. Materials Review, 2017, 31(18): 92—96.