

包装材料

## 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析

张伟, 齐明思, 赵志芳, 孙起帆

(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 研究泡沫铝相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数(硬段在热塑性聚氨酯弹性体橡胶中所占的质量分数)对泡沫铝-聚氨酯复合材料力学性能的影响。**方法** 自行制备泡沫铝-聚氨酯复合材料,对制备的泡沫铝-聚氨酯样品进行准静态压缩实验。**结果** 通过准静态压缩实验,得出了不同泡沫铝的相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数分别对应的应力应变曲线。当聚氨酯硬段质量分数和聚氨酯含量一定时,泡沫铝相对密度从5.4%提升到6.1%,泡沫铝-聚氨酯屈服强度增加了12.8%,流变应力增加了29.8%。当聚氨酯硬段质量分数和泡沫铝相对密度一定时,聚氨酯含量从9.21 g提升到13.19 g,泡沫铝-聚氨酯屈服强度增加了32.6%,流变应力增加了10.9%。当聚氨酯含量和泡沫铝相对密度一定时,聚氨酯硬段质量分数从15%提升到25%,泡沫铝-聚氨酯屈服强度增加了95%,流变应力增加了55.5%。**结论** 不同的泡沫铝相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数与泡沫铝-聚氨酯复合材料的力学性能成正相关的关系,泡沫铝相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数与泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲吸能特性成正相关的关系。

**关键词:** 泡沫铝-聚氨酯; 准静态压缩实验; 复合材料; 力学性能

**中图分类号:** TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0035-06

## Preparation and Mechanical Property Analysis of Aluminum Foam-Polyurethane Composites

ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang, SUN Qi-fan  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of aluminum foam's relative density, polyurethane content and polyurethane mass fraction of the hard segment (the mass fraction of hard segment occupying the thermoplastic polyurethane elastomer rubber) on the mechanical properties of aluminum foam-polyurethane composites. The aluminum foam-polyurethane composites were self-prepared. The quasi-static compression experiments were carried out on the aluminum foam-polyurethane samples prepared. Through the quasi-static compression experiment, the stress-strain curves respectively corresponding to the relative density, polyurethane content and polyurethane mass fraction of the hard segment of different aluminum foams were obtained. From the analysis, the relative density of aluminum foam was increased from 5.4% to 6.1%, the yield strength of aluminum foam-polyurethane was increased by 12.8% and the flow stress was increased by 29.8% when the polyurethane mass fraction of the hard segment and the polyurethane content were constant. The polyurethane content was increased from 9.21 g to 13.19 g, the aluminum foam-polyurethane yield strength was increased by 32.6% and the flow stress was increased by 10.9% when the polyurethane mass fraction of the hard segment and the relative density of the aluminum foam were constant. Based on the stress-strain curves in the results, the relative density of different aluminum foams, polyurethane content and polyurethane mass fraction of the hard segment are positively correlated with the mechanical properties of aluminum foam-polyurethane composites. The relative density of aluminum foam, the polyurethane content, the polyurethane mass fraction of the hard segment and the buffer ener-

收稿日期: 2017-05-13

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

作者简介: 张伟(1991—),男,中北大学硕士生,主攻泡沫铝-聚氨酯缓冲性能。

通讯作者: 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。

gy-absorption characteristics of aluminum foam-polyurethane composites are positively correlated.

**KEY WORDS:** aluminum foam-polyurethane; quasi-static compression test; composites; mechanical properties

泡沫铝是由纯铝经过发泡而形成的具有复杂孔隙结构的质量较轻、强度较大的新型结构材料,由于其独特的孔隙结构而具有很好的缓冲、减震、吸能等特性<sup>[1-7]</sup>,从而在航空航天、航海、汽车制造业、建筑方面被广泛应用<sup>[7-9]</sup>,由于其独特的孔隙结构,使得其力学性能更加复杂,在其内部孔洞中填充弹性塑性较好的新型材料而形成的新复合材料成为了国内外研究的热点<sup>[9-13]</sup>。聚氨酯作为一种较轻、易加工、成本低的多孔聚合物,被广泛用作结构型材料的填充物,且由于其自身具有良好的吸能特性,更加适合用作缓冲减震材料。2种具有特别吸能缓冲特性的材料结合成一种新型的复合材料必然会对两者的性能产生影响<sup>[13-15]</sup>,由于聚氨酯在制备初期具有很好的流动性,可以与泡沫铝完美结合,使得复合材料在性能上得到了更大的提升。泡沫铝-聚氨酯由于其独特的结构和性能,常被用作包装缓冲材料,对一些精密仪器进行包装缓冲。这里通过自行制备的实验样品,研究不同泡沫铝相对密度、聚氨酯含量、聚氨酯硬段质量分数对泡沫铝-聚氨酯复合材料的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料和仪器

**主要材料:**实验使用的泡沫铝是辽宁融达泡沫铝公司提供的通过高压渗流法制备的开孔泡沫铝板,其孔隙率为65%~75%,孔径为5 mm,运用线切割法将其切割成直径为35 mm,厚度为15 mm的圆柱型试样,见图1;聚氨酯通过预聚体法自行制备,所用原料主要有二苯基甲烷-4,4'-二异氰酸酯(MDI,相对分子质量为250),聚四亚甲基醚二醇(PTMEG,相对分子质量为2000),1,4-丁二醇(BDO,相对分子质量为90),均由上海阿拉丁生化科技有限公司提供。



图1 泡沫铝试样

Fig.1 Aluminum foam samples

**主要仪器:**恒温加热磁力搅拌机,上海邦西仪器科技有限公司,功率为120 W,调速范围为100~3000

r/min; AL-7000M 伺服控制拉力试验机,高铁检测仪器(东莞)有限公司,电源为AC220 V/50 Hz,准静态压缩实验仪器。

### 1.2 实验样品的制备

首先通过预聚体法合成聚氨酯,将定量的PTMEG装于500 mL干燥的三口烧瓶内,放入110℃油浴内加热,打开搅拌器,转速为200 r/min,脱水90 min,逐渐将体系温度降至80℃,加入定量的MDI(在80℃烘烤箱中已经熔化),保持温度以及转速不变的情况下反应2 h后,整体粘度逐渐变大,并且会泛出蓝光,聚氨酯预聚体制备成功。随后将整体温度降至50℃,加入定量的BDD,提高搅拌器的转速至400 r/min,快速搅拌5~10 min,停止搅拌,将体系温度提升至100℃,出料。然后迅速倒入泡沫铝样品中(泡沫铝样品放入提前做好的容器内),通过加压将聚氨酯尽量多地充满泡沫铝孔泡,通过称量来确定各影响因素含量,随后放入100℃的烘烤箱内熟化12 h,得到了泡沫铝-聚氨酯试样,见图2。



图2 泡沫铝-聚氨酯试样

Fig.2 Aluminum foam-polyurethane samples

### 1.3 准静态压缩实验

设定伺服控制拉力试验机的各项参数,最大载荷为20 kN,极限变形率为31.4%,加载速度为2 mm/min,进行准静态压缩实验,得出应力应变曲线。

## 2 试验结果分析

通过应力应变曲线可以发现,由于复合材料密度较小,在压缩时导致平台应力较低,从而也间接说明在选取泡沫铝时其密度的重要性,适当的基体密度与材料整体的力学性能密切相关,选取的泡沫铝密度太低,就会在能量还没有被完全吸收时就被压实,如果密度太大,平台应力会高于应力许可值,文中选取的泡沫铝密度相对较低,因此平台应力较低。不同的应用领域应该选择不同密度的基体材料。

2.1 泡沫铝相对密度

聚氨酯含量和聚氨酯硬段质量分数一定,泡沫铝相对密度不同,具体参数见表 1,泡沫铝-聚氨酯在准静态压缩试验后得到应力应变曲线,见图 3。从应力应变曲线中可以看到泡沫铝-聚氨酯在压缩变形时符合多孔材料的 3 个特别阶段的特征,即弹性阶段、应力平台阶段和致密压实阶段。这和动态压缩实验有一定的区别,动态实验当应变不足时只有弹性阶段和应力平台阶段,而不会有明显的致密阶段。这是因为在低应变情况下,其能量不足以将整个试样压实,导致压缩曲线并不完整。应变较高的动态压缩,则会出现明显的 3 个阶段。从应力应变曲线中可以看到弹性阶段特别短,在应变很小时泡沫铝-聚氨酯处于弹性阶段,此过程中泡沫铝骨架发出弹性变形。随着应力的增加,泡沫铝-聚氨酯开始进入平台应力阶段,该阶段应变增加,应力缓慢增加,主要反映了其内部结构被压垮屈服的过程。随着应力的增大,逐渐进入致密压实阶段。由图 3 可知,试样 1<sup>#</sup>的屈服强度为 1.23 MPa,流变应力为 1.57 MPa;试样 2<sup>#</sup>的屈服强度为 1.15 MPa,流变应力为 1.43 MPa;试样 3<sup>#</sup>的屈服强度为 1.09 MPa,流变应力为 1.21 MPa。由图 3 可知,随着泡沫铝相对密度的增大,试样 2<sup>#</sup>比试样 3<sup>#</sup>的屈服强度提高了 5.5%,流变应力提高了 18.2%。试样 1<sup>#</sup>比试样 2<sup>#</sup>的屈服强度提高了 6.9%,流变应力提高了 9.7%。由图 3 和表 1 可知,泡沫铝相对密度从 5.4%提升到 6.1%,泡沫铝-聚氨酯屈服强度增加了 12.8%,流变应力增加了 29.8%。导致这种现象的主要原因是因为泡沫铝相对密度的增加,导致其内部孔隙率的减少,孔壁变厚,使得泡沫铝在发生变形时,其所能承受的载荷变大,直接影响了泡沫铝-聚氨酯的性能,导致在压缩过程中泡沫铝-聚氨酯的屈服强度和流变应力随之增加。

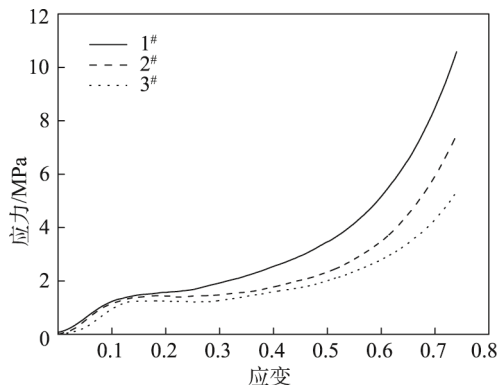


图 3 不同相对密度对应的应力应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curve corresponding to different relative densities

2.2 聚氨酯含量

泡沫铝相对密度和聚氨酯硬段质量分数一定,聚氨酯含量不同,具体参数见表 2,所测得的应力应变

表 1 相对密度不同时的其他各项参数  
Tab.1 Other parameters when the relative density is different

| 试样             | 泡沫铝质<br>量/g | 泡沫铝-<br>聚氨酯质<br>量/g | 聚氨<br>酯质<br>量/g | 聚氨酯硬<br>段质量分<br>数/% | 泡沫铝<br>相对密<br>度/% |
|----------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| 1 <sup>#</sup> | 2.46        | 15.58               | 13.12           | 20                  | 6.1               |
| 2 <sup>#</sup> | 2.28        | 15.40               | 13.12           | 20                  | 5.7               |
| 3 <sup>#</sup> | 2.09        | 15.21               | 13.12           | 20                  | 5.4               |

曲线见图 4,可知试样同样符合多孔材料的 3 个阶段。图 4 中试样 5<sup>#</sup>和试样 6<sup>#</sup>在前 2 个阶段出现波动,主要是因为泡沫铝内部没有填充完全,导致受力不均匀,受力发生变化,应力应变曲线上波动。在制备实验样品时,需让泡沫铝内部尽量填满聚氨酯材料,可在制备时适当加大压力,使内部更加均匀充实。试样 6<sup>#</sup>刚开始的曲线基本与横坐标重合,这是因为试样的表面没有打磨光滑导致受力出现问题导致。在试验开始时,必须让试样的表面光滑平整,这样才能使它的受力更加接近真实值。由图 4 可知,试样 4<sup>#</sup>的屈服强度为 1.38 MPa,流变应力为 1.63 MPa;试样 6<sup>#</sup>的屈服强度为 1.04 MPa,流变应力为 1.47 MPa。两者相比,泡沫铝-聚氨酯复合材料的屈服强度增加了 32.6%,流变应力增加了 10.9%。造成这种现象的主要原因是聚氨酯含量增加时,泡沫铝-聚氨酯内部泡沫铝孔泡内的聚氨酯增加,当泡沫铝发生压缩变形时,其内部聚氨酯的增加抑制了泡沫铝的变形,使泡沫铝的变形变得更加困难,所能承受的载荷也大大增加,导致泡沫铝-聚氨酯在发生压缩变形时,其屈服强度和流变应力随之增加。

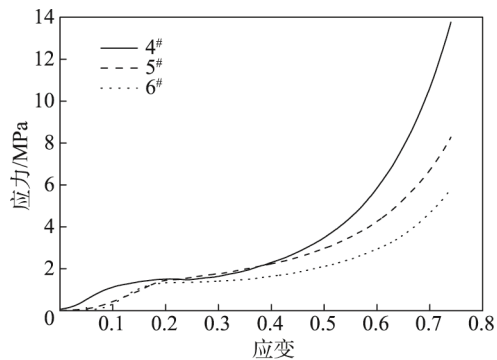


图 4 聚氨酯含量不同对应的应力应变曲线  
Fig.4 Stress-strain curves for differen polyurethane contents

表 2 聚氨酯含量不同的各项参数  
Tab.2 Various parameters for differen polyurethane contents

| 试样             | 泡沫铝质<br>量/g | 泡沫铝-<br>聚氨酯质<br>量/g | 聚氨<br>酯质<br>量/g | 聚氨酯硬<br>段质量分<br>数/% | 泡沫铝<br>相对密<br>度/% |
|----------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| 4 <sup>#</sup> | 2.31        | 15.50               | 13.19           | 20                  | 5.7               |
| 5 <sup>#</sup> | 2.30        | 13.51               | 11.21           | 20                  | 5.7               |
| 6 <sup>#</sup> | 2.29        | 11.50               | 9.21            | 20                  | 5.6               |

### 2.3 聚氨酯硬段质量分数

聚氨酯硬段质量分数是指硬段在热塑性聚氨酯弹性体橡胶 (TPU) 中所占的质量分数, TPU 配方的不同会直接影响聚氨酯的性能, 聚氨酯硬段质量分数的计算为:

$$\omega_h = \frac{m_i + m_d}{m_i + m_d + m_g} \quad (1)$$

$$r = \frac{m_i}{M_i} \left/ \left( \frac{m_d}{M_d} + \frac{m_g}{M_g} \right) \right. \quad (2)$$

根据式 (1—2) 可得到:

$$\omega_h = \frac{r \cdot \frac{m_g}{M_g} \cdot \overline{M_i} + \left( 1 + \frac{r \cdot \overline{M_i}}{\overline{M_d}} \right) \cdot m_d}{\left( \frac{r \cdot \overline{M_i}}{\overline{M_d}} + 1 \right) \cdot m_d + \left( \frac{r \cdot \overline{M_i}}{\overline{M_g}} + 1 \right) \cdot m_g} \quad (3)$$

式中:  $\omega_h$  为聚氨酯硬段质量分数;  $m_i$ ,  $m_d$ ,  $m_g$  分别为 MDI, BDD, PTMEG 质量;  $\overline{M_i}$ ,  $\overline{M_d}$ ,  $\overline{M_g}$  分别为 MDI, BDO, PTMEG 的相对分子质量;  $r$  为异氰酸酯指数。

TPU 弹性体分子质量随着  $r$  的增加而增加, 在  $r=1$  时较好, 这里取  $r=1$ 。以 100 g PTMEG 为基础进行计算。TPU 配方见表 3。

表 3 TPU 配方  
Tab.3 TPU formula

| 编号 | 聚氨酯硬段<br>质量分数/% | PTMEG<br>质量/g | MDI<br>质量/g | BDO 质<br>量/g |
|----|-----------------|---------------|-------------|--------------|
| 1  | 25              | 100           | 27.82       | 5.51         |
| 2  | 20              | 100           | 21.39       | 3.61         |
| 3  | 15              | 100           | 16.28       | 1.36         |

泡沫铝相对密度和聚氨酯含量一定, 聚氨酯硬段质量分数不同, 具体参数见表 4, 对应的应力应变曲线见图 5, 试样 8<sup>#</sup> 由于泡沫铝孔泡没有充实出现波动。由图 5 可知, 试样 7<sup>#</sup> 的屈服强度为 1.78 MPa, 流变应力为 1.82 MPa。试样 8<sup>#</sup> 的屈服强度为 1.72 MPa, 流变应力由于泡沫铝孔泡没充实而出现误差偏低; 试样 9<sup>#</sup> 的屈服强度为 0.91 MPa, 其流变应力为 1.17 MPa。试样 9<sup>#</sup> 相比试样 8<sup>#</sup> 屈服强度得到了大幅度的提高, 试样 8<sup>#</sup> 比试样 7<sup>#</sup> 的屈服强度提高了 3.5%, 由图 5 和表 4 可得, 聚氨酯硬段质量分数从 15% 增加到 25%, 泡沫铝-聚氨酯屈服强度增加了 95%, 流变应力增加了 55.5%。造成这种现象的主要原因是随着聚氨酯硬段含量的增加, 聚氨酯的硬度增加, 弹性变小, 在压缩变形时会抑制整体的变形, 所能承受的载荷增大, 导致泡沫铝-聚氨酯在压缩变形时屈服强度随之增加。聚氨酯硬段含量越高, 其硬度越大, 流动性越差, 在制备试样时会比较难控制, 因此聚氨酯硬段用于填

充于泡沫铝的最佳含量还有待进一步研究。

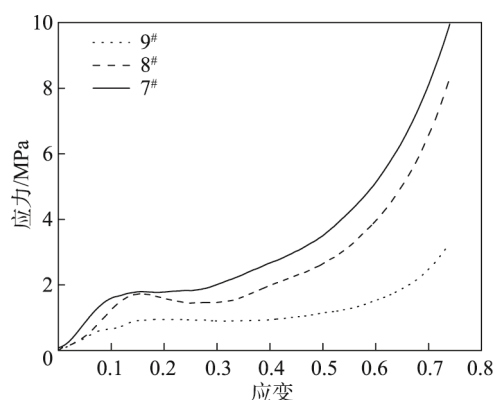


图 5 聚氨酯硬段质量分数不同对应的应力应变曲线  
Fig.5 The stress-strain curves corresponding to the different mass fractions of polyurethane of the hard segment

表 4 聚氨酯硬段质量分数不同时的各项参数  
Tab.4 Various parameters for different polyurethane mass fractions of the hard segment

| 试样             | 泡沫<br>铝质<br>量/g | 泡沫铝-<br>聚氨酯质<br>量/g | 聚氨<br>酯质<br>量/g | 泡沫铝<br>相对密<br>度/% | 聚氨酯硬<br>段质量分<br>数/% |
|----------------|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 7 <sup>#</sup> | 2.25            | 14.34               | 12.09           | 5.8               | 25                  |
| 8 <sup>#</sup> | 2.21            | 14.28               | 12.07           | 5.7               | 20                  |
| 9 <sup>#</sup> | 2.21            | 14.30               | 12.09           | 5.7               | 15                  |

### 3 泡沫铝-聚氨酯复合材料缓冲特性分析

泡沫铝-聚氨酯复合材料在进行准静态压缩实验时, 内部泡沫铝发生弯曲变形, 聚氨酯发生弹性变形。泡沫铝-聚氨酯复合材料在发生压缩变形时, 泡沫铝、聚氨酯两者通过上面 2 种形变来进行缓冲, 根据应力应变曲线可以得出泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲系数-最大应力曲线, 基本理论如下所述。

1) 将应力应变曲线下的面积分为若干个区域, 区域划分越小, 则计算越精确, 如按应力  $\sigma$  取 10 个间隔点  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3 \dots 10$ ), 对应得到应变  $\varepsilon_i$  ( $i=1, 2, 3 \dots 10$ )。

2) 求各应力区域段的变形能的增量, 即计算各区域的面积  $\Delta u_i$ :

$$\Delta u_i = \frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_{i-1}) (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \quad (4)$$

3) 计算各应力  $\sigma_i$  所对应的形变能  $u_i$ :

$$u_i = \sum \Delta u_k \quad (k=1, 2, 3 \dots i) \quad (5)$$

4) 计算各应力  $\sigma_i$  所对应的缓冲系数:

$$C_i = \sigma_i / u_i \quad (6)$$

5) 以  $C$  为纵坐标, 应力  $\sigma$  为横坐标, 作出缓冲系数-最大应力曲线。

由于选取的泡沫铝试样的基体密度较小, 导致复合材料的缓冲系数-最大应力曲线的区别相对较小,

一般会导致误差较大,因此选取适当的基体泡沫铝的密度对整体复合材料的性能有很大影响。

根据图3得到不同泡沫铝相对密度所对应的缓冲系数-最大应力曲线,见图6。 $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 曲线分别是该组试样3#, 2#, 1#对应的缓冲系数-最大应力曲线。由图6可知,3组曲线都是随着应力的增大,缓冲系数先呈急剧上升趋势,又急剧下降,最后变化较为缓慢,且泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲系数有一个最大点。由于缓冲系数越小,其代表的缓冲性能越好,由图6可知试样1#的缓冲性能最好,其次是试样2#,最后是试样3#。

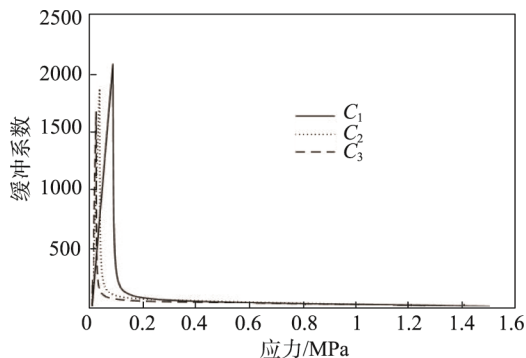


图6 泡沫铝相对密度不同对应的缓冲系数-最大应力曲线  
Fig.6 Buffer coefficient-maximum stress curve corresponding to the different relative densities of aluminum foam

根据图4得到不同聚氨酯含量对应的缓冲系数-最大应力曲线,见图7。 $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ 曲线分别是该组试样6#, 5#, 4#对应的缓冲系数-最大应力曲线。由于试样5#和试样6#的应力应变曲线前2个阶段出现波动,这主要是因为泡沫铝内部没有填充完全,导致受力不均匀,受力发生变化,应力应变曲线上波动,导致其缓冲系数-最大应力曲线受到影响。曲线的趋势随着应力的增大,缓冲系数先急剧增加到一个最大值,然后急剧减小,随后缓慢变化。由图7可知,试样4#的缓冲性能最好,试样5#的其次,最后为试样6#。

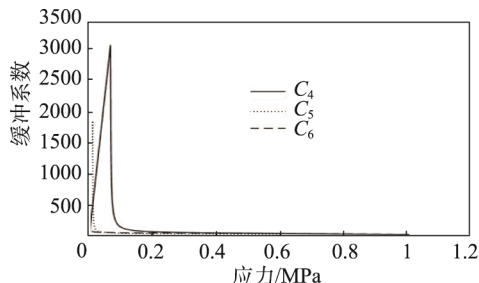


图7 聚氨酯含量不同对应的缓冲系数-最大应力曲线  
Fig.7 Buffer coefficient-maximum stress curve corresponding to the different polyurethane contents

根据图5得到不同聚氨酯硬段含量对应的缓冲系数-最大应力曲线,见图8。 $C_7$ 曲线是该组试样7#对应的缓冲系数-最大应力曲线, $C_8$ 曲线是该组试样8#对应的缓冲系数-最大应力曲线, $C_9$ 曲线是该组试

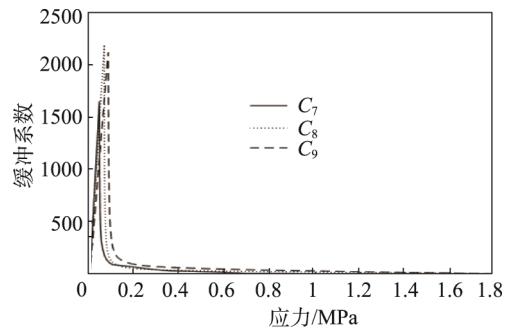


图8 聚氨酯硬段质量分数不同对应的缓冲系数-最大应力曲线

Fig.8 Buffer coefficient-maximum stress curve corresponding to the different polyurethane mass fractions of the hard segment

样9#对应的缓冲系数-最大应力曲线。由图8可知,3条曲线的趋势随着应力的增加,缓冲系数先急剧增加到最大值,然后急剧减小,最后缓慢变化。由图8可知试样7#的缓冲性能最好,试样8#的其次,最后为试样9#。

#### 4 结语

1) 适当的基体泡沫铝相对密度对于整体材料的性能有很大的影响,因此在制备复合材料时,要选取适当的基体材料。

2) 在制备泡沫铝-聚氨酯的过程中,要使泡沫铝内部尽可能多地充满聚氨酯材料,在制备过程中可以进行适当的加压处理,使泡沫铝-聚氨酯内部更加密实。

3) 泡沫铝-聚氨酯复合材料随着泡沫铝相对密度的增加,其整体力学性能随之增强。同时,泡沫铝相对密度的增加,也使得泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲性能得到提升。随着聚氨酯含量的增加,泡沫铝-聚氨酯力学性能也随之增强,同时泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲性能也随之得到提升。随着聚氨酯硬段质量分数的增大,泡沫铝-聚氨酯复合材料的力学性能随之增强,泡沫铝-聚氨酯复合材料的缓冲性能也随之增强。

#### 参考文献:

- [1] 轩鹏. 高性能泡沫铝减振机理及力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
XUAN Peng. Study on Damping Mechanism and Mechanical Properties of High Performance Foam Aluminum[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] 孙亮, 齐明思, 王俊元, 等. 基于冲击实验的泡沫铝-聚氨酯缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 73—76.  
SUN Liang, QI Ming-si, WANG Jun-yuan, et al. Study on Buffer Properties of Foam Aluminum-Polyurethane Based on Impact Experiment[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 73—76.
- [3] 杨江涛, 马喜宏, 邬琦. 聚氨酯与泡沫铝的冲击响应

- 分析及可靠性研究[J]. 热加工工艺, 2015(8): 74—78.
- YANG Jiang-tao, MA Xi-hong, WU Qi. Study on Impact Response and Reliability of Polyurethane and Aluminum Foam[J]. Hot Working Technology, 2015 (8): 74—78.
- [4] 张勇, 陈力, 陈荣俊, 等. 聚氨酯泡沫铝动力学性能实验及本构模型研究[J]. 爆炸与冲击, 2014(3): 373—378.
- ZHANG Yong, CHEN Li, CHEN Rong-jun, et al. Study on Dynamic Performance and Constitutive Model of Polyurethane Foam Aluminum[J]. Exploration and Shock, 2014(3): 373—378.
- [5] 王超, 安振涛, 甄建伟, 等. 玻璃纤维/玻璃微珠混杂增强聚氨酯泡沫铝压缩性能研究[J]. 材料导报, 2012(18): 116—118.
- WANG Chao, AN Zhen-tao, ZHEN Jian-wei, et al. Study on Compressive Properties of Glass Fiber/Glass Beads Mixed Reinforced Polyurethane Foam Aluminum[J]. Materials Review, 2012(18): 116—118.
- [6] 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(3): 103—108.
- XIE Wei-hong, DU Hong-tao, LI Shun-cai. Study on Dynamic Mechanics of Polyurethane Foam Aluminum Composites[J]. Chinese Journal of Composites, 2011(3): 103—108.
- [7] 张峰, 刘亚青, 齐明思. 泡沫铝-聚氨酯复合材料的厚度对其缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2011, 32(9): 24—26.
- ZHANG Feng, LIU Ya-qing, QI Ming-si. Effect of Thickness of Aluminum Foam Polyurethane Composites on Buffering Performance[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 24—26.
- [8] 王应武. 通孔泡沫铝制备及其吸声性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- WANG Ying-wu. Study on Preparation and Sound Absorption Performance of Through-hole Aluminum Foam[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [9] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 泡沫铝与聚氨酯泡沫铝吸能特性对比[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011(2): 307—311.
- XIE Wei-hong, DU Hong-tao, LI Shun-cai. Comparison of Absorption Characteristics of Foam Aluminum and Polyurethane Foam Aluminum[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2011(2): 307—311.
- [10] CARANFIL M. Mechanical Properties of Aluminum Foams with Open Cells[J]. Metalurgia International, 2012, 17(2): 164—166.
- [11] LIU H, CAO Z K, LUO H J, et al. Performance of Closed-cell Aluminum Foams Subjected to Impact Loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 570: 27—31.
- [12] 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.
- [13] SESMA F G, GENNARI F C, ANDRADE-GAMBOA J, et al. An Optimum Path to Obtain  $\beta$  Cu-Zn-Al by Mechanical Alloying[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 573: 122—127.
- [14] BERTOLINO G, LAROCLETTE P A, CASTRODEZA E M. Mechanical Properties of Martensitic Cu-Zn-Al Foams in the Pseudoelastic Regime[J]. Materials Letters, 2010, 64(13): 1448—1450.
- [15] MU Y, YAO G, LUO H. Anisotropic Damping Behavior of Closed-cell Aluminum Foam[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 610—612.