

泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能分析

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

摘要: **目的** 研究泡沫铝孔径(泡沫铝内部胞孔直径)对泡沫铝压缩性能的影响,并对泡沫铝、聚氨酯(PU)、泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能和吸能性能进行对比分析。分析泡沫铝孔隙率、聚氨酯含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能和吸能性能的影响规律。**方法** 对试样进行准静态压缩试验。**结果** 通过准静态压缩试验,分别得出对应的应力-应变曲线,并通过应力-应变曲线推导出吸能-应变曲线。**结论** 从试验所得的应力-应变曲线和吸能-应变曲线可知,泡沫铝压缩性能、吸能性能随着泡沫铝孔径的增加而变好,且在泡沫铝中加入聚氨酯形成泡沫铝-聚氨酯复合材料后,其压缩性能、吸能性能相对于单纯泡沫铝、聚氨酯有很大提升。当泡沫铝孔隙率一定时,泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能会随着聚氨酯含量的增加而变好。当聚氨酯含量一定时,泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能会随着泡沫铝孔隙率的减小而变好。

关键词: 泡沫铝-聚氨酯; 复合材料; 压缩性能; 吸能特性

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0006-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.002

Compression Properties of Aluminum Foam-polyurethane Composites

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

ABSTRACT: The work aims to study the effect of aluminum foam pore size (foam diameter inside aluminum foam) on the compression properties of aluminum foam, compare and analyze the compression and energy-absorbing properties of aluminum foam, polyurethane (PU) and aluminum foam-polyurethane composites, and analyze the influence of aluminum foam porosity and polyurethane content on the compression and energy-absorbing properties of aluminum foam-polyurethane composites. The sample was subject to quasi-static compression experiments. Through si-static compression experiments, the corresponding stress-strain curves were respectively obtained, and the energy absorption-strain curve was derived from the stress-strain curve. The stress-strain curves and energy absorption-strain curves obtained from the experiments show that, the compression and energy-absorbing properties of aluminum foam increase with the increase of the pore size of aluminum foam; and after the foam aluminum foam is added with polyurethane to form the aluminum foam-polyurethane composites, the compression and energy-absorbing properties are greatly improved compared to those of the simple aluminum foam and polyurethane. When the porosity of aluminum foam is constant, the compression and energy-absorbing properties of aluminum foam-polyurethane composites increase with the increase of thane content. When the polyurethane content is constant, the compression and energy-absorbing properties of aluminum foam-polyurethane composites will increase with the decrease of porosity of aluminum foam.

KEY WORDS: aluminum foam-polyurethane; composites; compression property; energy-absorbing property

球形孔开孔泡沫铝是内部泡舱呈球状且相对规则的一种泡沫铝。泡沫铝具有密度小、耐腐蚀、抗冲

收稿日期: 2018-03-26

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。

击性好等优点,被广泛应用于汽车、化工、军事等领域^[1-7]。泡沫铝具有独特的内部孔隙结构,使得它在吸能抗冲击方面更加优越。研究将泡沫铝和一些易塑性材料结合形成新的复合材料,是目前一些学者的研究热点。聚氨酯作为一种聚合物,具有质轻、塑性好、造价低等优点,从而被广泛作为孔隙材料的填充物,且其自身具有很好的吸能特性^[8-10]。将聚氨酯这种特殊吸能材料填充到泡沫铝中形成的新型复合材料——聚氨酯-泡沫铝复合材料,必然会对本身基体材料的性能造成影响。由于聚氨酯-泡沫铝复合材料具有独特的吸能性能,常被作为精密仪器的包装材料,广泛应用于航空、航天、航海等领域^[11-13],其在精密仪器运输工作时可以起到极好的保护作用^[14-15]。文中主要对泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能进行对比,并分析泡沫铝孔隙率、聚氨酯含量对泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能、吸能性能的影响。

1 实验

1.1 材料

这里所用泡沫铝由北京中实强业提供,是采用渗流法制备的球形孔开孔泡沫铝板,通过线切割方法将其切割成直径为 35 mm,厚度为 20 mm 的圆柱型试样,见图 1。聚氨酯是德国拜耳 9370A 型聚氨酯颗粒,密度为 1.18 g/cm³,邵氏硬度为 70。

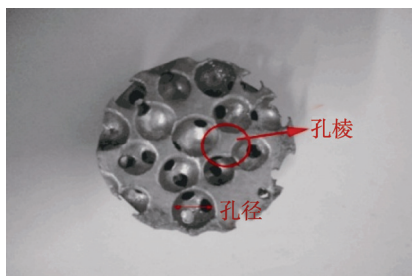


图 1 泡沫铝试样

Fig.1 Aluminum foam samples

1.2 仪器

实验中采用 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

将定量的聚氨酯颗粒置于 1 L 的三口烧瓶内,将烧瓶置于 230 °C 油浴内恒温加热。打开搅拌器,设置转速为 200 r/min,直至聚氨酯融化为液态状。此时提高搅拌机转速至 500 r/min,快速搅拌 5~10 min,停止搅拌,然后迅速将聚氨酯倒入装有泡沫铝样品的模具内(模具材料为聚四氟乙烯),见图 2。将模具放在平整的桌面上,封闭模具并对模具盖施加一个垂直于模具盖的力,促使泡沫铝与聚氨酯更好地结合,随后将模具放入 80 °C 的恒温鼓风干燥箱内固化 12

h,得到了泡沫铝-聚氨酯初样,然后通过打磨机对其打磨,以保证其光滑平整,得到的泡沫铝-聚氨酯最终试样见图 3。随后称量记录数据,并将样品进行标码分类。聚氨酯样品是通过模具制作的一个圆柱体(直径为 35 mm,高为 20 mm)。



图 2 装有泡沫铝试样的模具

Fig.2 Mould with aluminum foam sample



图 3 聚氨酯-泡沫铝试样

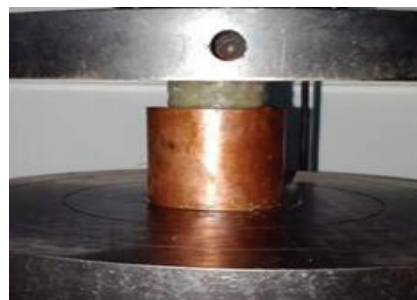
Fig.3 Polyurethane-aluminum foam samples

1.4 准静态压缩试验

一般应变速率为 10^{-3} s^{-1} 的压缩试验为准静态压缩试验。首先设定伺服控制拉力试验机的各项参数。设置最大载荷为 50 kN,加载速度为 5 mm/min,并进行准静态压缩试验,见图 4。通过计算机采集数据,



a 泡沫铝



b 泡沫铝-聚氨酯

图 4 压缩试验

Fig.4 Compression test

利用 origin 软件绘制应力-应变曲线。

2 结果分析

2.1 聚氨酯准静态压缩试验分析

通过对聚氨酯进行准静态压缩试验, 得出了应力-应变曲线, 见图 5。从应力-应变曲线中可以看到聚氨酯在压缩变形时分为 3 个特殊阶段: 第 1 阶段为弹性阶段, 相对较短, 该阶段主要反映了聚氨酯在弹性变形时的力学性能; 第 2 阶段为强化阶段, 该阶段的应变增加, 应力缓慢增加, 主要反映了聚氨酯被压垮屈服的过程; 第 3 阶段为致密压实阶段, 该阶段的应变缓慢增加, 应力增加幅度相对较大, 主要反映了聚氨酯被压实致密的过程。从应力-应变曲线可知, 该型号聚氨酯的屈服强度 (产生 0.2% 残余变形的应力值) 为 4.7 MPa。

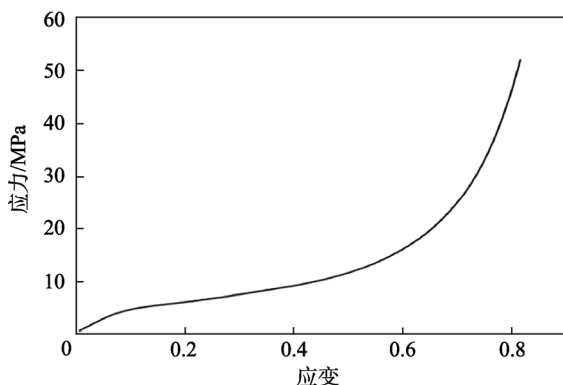


图 5 聚氨酯准静态压缩应力应变曲线
Fig.5 Quasi-static polyurethane compressive stress-strain curve

2.2 泡沫铝准静态压缩试验分析

泡沫铝选择了 3 个孔径不同的试样进行对比, 具体参数见表 1。文中主要分析了孔径不同对泡沫铝压缩性能的影响, 其应力-应变曲线见图 6。从图 6 中可以看出, 泡沫铝试样符合多孔材料的 3 个阶段, 但是球形孔开孔泡沫铝与常规不规则泡沫铝有一定的区别, 球形孔开孔泡沫铝的 3 个阶段分别为弹性阶段、加强阶段、致密压实阶段。与常规不规则泡沫铝的第 2 阶段平台应力阶段有一定的不同。常规不规则泡沫铝的第 2 阶段 (平台应力阶段) 随着应变的增加, 应力基本不变, 主要原因在于球形孔泡沫铝孔壁相对较厚、孔棱较大。从图 6 还知, 随着泡沫铝孔径的增加, 在同等应变下, 泡沫铝所能承受的载荷也越大, 试样 1[#]比试样 2[#]、3[#]的压缩性能相对较好, 试样 2[#]、3[#]的压缩性能相近, 在应变为 0~0.5 内, 同等应变下试样 3[#]比试样 2[#]所能承受的载荷相对较大。由于 2[#]试样和 3[#]试样来自 2 块不同的泡沫铝板, 后对这 2 类泡沫铝 (与 2[#]参数相同, 且来自同一块泡沫铝板的其他试

样, 与 3[#]参数相同, 且来自于同一块泡沫铝板的其他试样) 结构进行分析发现, 与 2[#]参数相同且来自于同一块泡沫铝板的其他试样其内部孔壁发生了断裂现象。说明该类泡沫铝由于泡沫铝板本身内部结构有一定的缺陷, 从而导致从该块泡沫铝板上切割的样品本身就带有一定的缺陷。在压缩的第 1 阶段和第 2 阶段以及同等应变下, 2[#]泡沫铝试样较 3[#]泡沫铝所能承受的载荷相对较小, 出现了误差。由于实验条件限制, 试验继续选用了该类泡沫铝。从图 6 知, 试样 1[#] 的屈服强度为 13.4 MPa, 试样 3[#]为 8.6 MPa。试样 1[#] 相对于试样 3[#], 其孔径增加了 4 mm, 屈服强度增加了 4.8 MPa。试样 1[#]相较于试样 2[#] 和 3[#]在同等应变下所能承受的载荷得到大幅提升, 因此文中认为导致这种现象的主要原因在于, 随着泡沫铝孔径的增加, 泡沫铝内部孔棱相对变大, 在压缩变形时更加容易被压垮, 所能承受的载荷就会变大。

表 1 泡沫铝各项参数
Tab.1 Aluminum foam parameters

试样	质量/g	密度/ (g·cm ⁻³)	孔径/ mm	孔隙率/ %
1 [#]	20.34	0.98	9.5	63.7
2 [#]	19.52	0.98	7.5	63.7
3 [#]	20.82	0.98	5.5	63.7

2.3 泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯复合材料对比分析

在制备泡沫铝-聚氨酯复合材料时, 所选取的泡沫铝孔径为 7.5 mm, 具体参数见表 2, 并确定聚氨酯含量一定, 孔隙率不同时, 所测得应力-应变曲线见图 7。由图 7 可知, 在同等应变下, 泡沫铝试样 2[#]要比聚氨酯试样所能承受的载荷大, 而泡沫铝-聚氨酯复合材料又比泡沫铝所能承受的载荷大, 这也直接说明 2 种材料复合提升了整体复合材料的压缩性能。由图 7 还可知, 试样 4[#]的屈服强度为 10.1 MPa。试样 5[#]的屈服强度为 5.9 MPa, 试样 6[#]的屈服强度为 5.7 MPa, 试样 7[#]的屈服强度为 3.6 MPa。试样 5[#]、6[#]、7[#]的曲线相对接近, 造成这种现象的主要原因是泡沫铝填充相对不充分, 以及泡沫铝自身结构不均匀。从整体趋势来看, 泡沫铝的孔隙率越小, 泡沫铝-聚氨酯复合材料所能承受的载荷也会越大, 呈负相关的关系。试样 4[#]比 7[#]泡沫铝的孔隙率减少了 4.4%, 屈服强度增加了 6.5 MPa。导致这种现象的主要原因是泡沫铝孔隙率相对减少, 导致泡沫铝孔壁变厚, 在泡沫铝发生变形时, 所能承受的载荷相对变大, 从而直接影响了泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能, 最终导致屈服强度的增加。第 2 阶段、第 3 阶段也是, 随着泡沫铝孔隙率的减少, 聚氨酯-泡沫铝复合材料所能

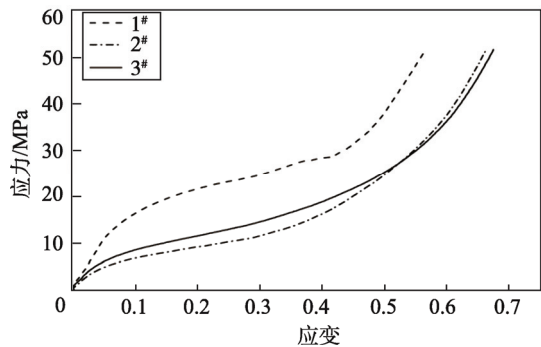


图 6 孔径不同泡沫铝的应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves of aluminum foam with different pore sizes

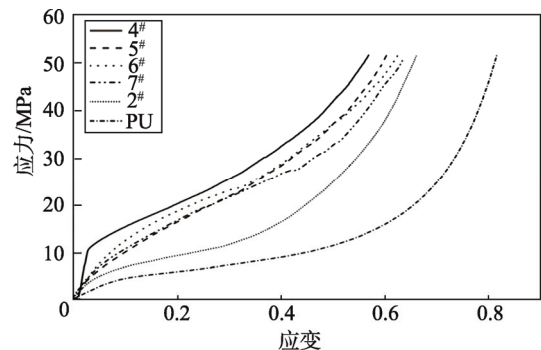


图 7 试样对比应力-应变曲线
Fig.7 Sample vs. stress-strain curve

承受的载荷变大，呈负相关的关系。

2.4 聚氨酯不同泡沫铝-聚氨酯复合材料准静态试验分析

确定泡沫铝孔隙率一定，泡沫铝孔径都为 7.5 mm，聚氨酯含量不同，具体参数见表 3，所得的应力-应变曲线见图 8。从图 8 可知，试样 8[#]、9[#]、10[#]、11[#]的弹性阶段非常相近，屈服强度也大致相同，该阶段是由泡沫铝-聚氨酯复合材料的骨架泡沫铝发生变形来承受载荷，由于所选泡沫铝一样，所以出现了上述现象。从第 2 阶段加强段开始，在压缩变形时聚氨酯也开始承受载荷，通过表 3 可知，试样 11[#]、10[#]、9[#]，

8[#]聚氨酯的含量依次增加。因此从第 2 阶段开始，4 条曲线开始发生变化，到第 3 阶段时更加明显。从图 8 可以看出，随着聚氨酯含量的增加，在同等应变下泡沫铝-聚氨酯所能承受的载荷逐渐增加，主要原因：在泡沫铝-聚氨酯复合材料内部聚氨酯含量不同，在发生压缩变形时，聚氨酯含量较多的试样在变形时更加困难，聚氨酯抑制了整个材料的变形，从而导致所能承受的载荷增加。

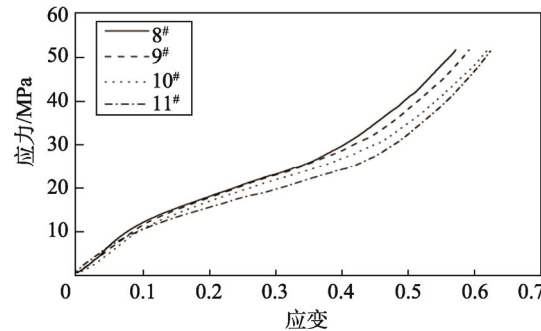


图 8 聚氨酯含量不同对应的应力-应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves corresponding to the different polyurethane contents

3 泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能特性分析

泡沫铝-聚氨酯复合材料在进行准静态压缩试验时，泡沫铝充当骨架发生弯曲断裂变形，聚氨酯发生弹性变形，两者通过以上的 2 种形变来进行吸能，单位体积吸收的能量可以用单位体积的形变功来表示，表达式如下：

$$S = \int_0^{\epsilon_m} \sigma_m$$

式中： S 为应力应变曲线下方的面积，通过应力应变曲线积分获得； ϵ_m 为压缩过程中的任意工程应变； σ_m 为 ϵ_m 所对应的应力。

3.1 孔径不同泡沫铝吸能性能分析

根据图 6 得到泡沫铝孔径不同时对应的泡沫铝

表 2 孔隙率不同泡沫铝-聚氨酯各项参数

Tab.2 Aluminum foam-polyurethane parameters with different porosities

试样	泡沫铝质量/g	泡沫铝密度/(g·cm ⁻³)	泡沫铝孔径/mm	聚氨酯质量/g	孔隙率/%
4 [#]	20.46	1.04	7.5	20	61.5
5 [#]	20.27	1.02	7.5	20	62.2
6 [#]	19.57	0.99	7.5	20	63.3
7 [#]	18.63	0.95	7.5	20	64.8

表 3 聚氨酯含量不同泡沫铝-聚氨酯复合材料各项参数

Tab.3 Aluminum foam-polyurethane composite parameters with different polyurethane contents

试样	泡沫铝质量/g	泡沫铝密度/(g·cm ⁻³)	泡沫铝孔径/mm	聚氨酯质量/g	孔隙率/%
8 [#]	18.26	0.93	7.5	20.96	65.6
9 [#]	18.53	0.93	7.5	20.09	65.6
10 [#]	18.62	0.93	7.5	19.82	65.6
11 [#]	18.81	0.93	7.5	19.06	65.6

吸能-应变曲线,见图9。C1, C2, C3 分别是该组试样 1[#], 2[#], 3[#]所对应的能量-应变曲线。由图9可知, 3条曲线都是随着应变的增加, 所吸收的能量逐渐增加, 且试样 1[#]的吸能性能最好, 2[#]由于内部缺陷导致吸能性能差于 3[#]。从整体趋势可以看出, 泡沫铝随着孔径的增加, 其吸能性能增加, 主要原因是由于随着泡沫铝孔径的增加, 泡沫铝内部孔棱相对变大, 在压缩变形时更加不容易被压垮, 所能承受的载荷就会变大, 吸能增加。

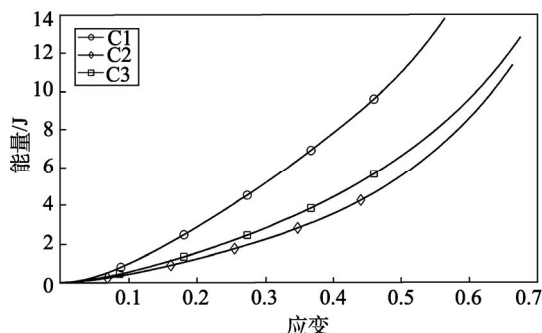


图9 泡沫铝孔径不同时的泡沫铝吸能-应变曲线
Fig.9 Aluminum foam energy-absorption-strain curves with different pore sizes of aluminum foam

3.2 泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯吸能性能对比分析

根据图7得出泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝-聚氨酯吸能-应变曲线,见图10。C4, C5, C6, C7 分别是试样 4[#], 5[#], 6[#], 7[#]所对应的能量-应变曲线。试样 C2 是泡沫铝试样 2[#]对应的能量-应变曲线。C(PU)是试样聚氨酯对应的能量-应变曲线。由图10可知, 泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能比泡沫铝好, 泡沫铝比聚氨酯的吸能性能好, 聚氨酯的吸能性能排最后。这也说明将泡沫铝、聚氨酯这2种材料结合形成的复合材料, 其吸能性能要强于单纯的泡沫铝、聚氨酯。通过对 C4, C5, C6, C7 等4条曲线进行对比可以看出, 随着泡沫铝孔隙率的增加, 材料的吸能性能越差。主要原因在于泡沫铝孔隙率越大, 其内部孔壁越薄, 在压缩变形时所能承受的载荷越小, 更容易被压塌压

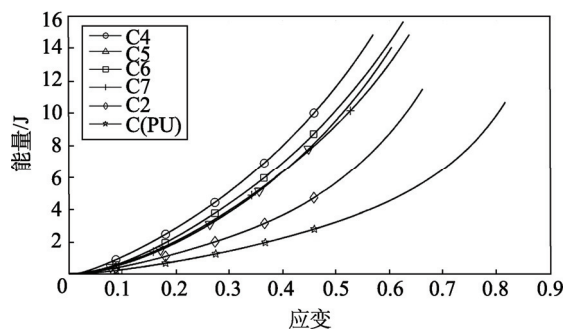


图10 泡沫铝、聚氨酯、泡沫铝聚氨酯吸能-应变曲线
Fig.10 Aluminum foam, polyurethane, aluminum foam-polyurethane energy absorption-strain curves

实, 最终导致其吸能性能越差。

3.3 聚氨酯含量不同泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能分析

根据图8得到聚氨酯含量不同时泡沫铝-聚氨酯的吸能-应变曲线,见图11。C8, C9, C10, C11 分别是试样 8[#], 9[#], 10[#], 11[#]所对应的吸能-应变曲线。由图8可知, 泡沫铝-聚氨酯复合材料随着聚氨酯含量的增加, 吸能性能越好。曲线前面部分接近重合, 第1阶段主要由泡沫铝骨架承受载荷, 由于泡沫铝都相同, 所以所吸收的能量相同。从第2阶段开始聚氨酯开始承受载荷, 由于各试样内部聚氨酯含量不同所表现的结果也不同, 聚氨酯含量越大, 整体所能承受的载荷也越大, 材料整体也越不容易被压垮压实, 所能吸收的能量也越多。

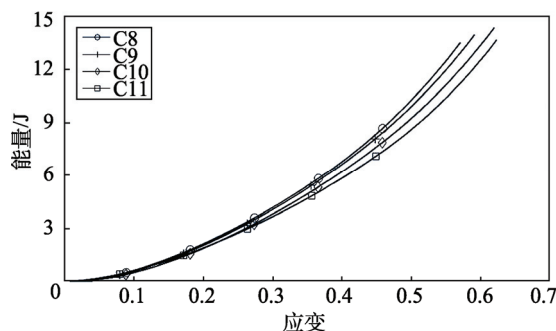


图11 聚氨酯含量不同泡沫铝-聚氨酯吸能-应变曲线
Fig.11 Aluminum foam-polyurethane energy absorption-strain curve with different polyurethane contents

4 结语

在泡沫铝-聚氨酯复合材料的制备过程中, 应适当加压, 以保证聚氨酯尽量多地充满泡沫铝内部孔洞。

泡沫铝压缩性能、吸能性能随着泡沫铝孔径的增加而变好, 且泡沫铝中加入聚氨酯形成泡沫铝-聚氨酯复合材料, 其压缩性能、吸能性能相对于单纯泡沫铝、聚氨酯有很大的提升。当泡沫铝孔隙率一定时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能随着聚氨酯含量的增加而变好。当聚氨酯含量一定时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩性能、吸能性能随着泡沫铝孔隙率的减小而变好。

参考文献:

- [1] 张伟, 齐明思, 赵志芳, 等. 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, et al. Preparation and Mechanical Properties of Foamed Aluminum-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2017, 38 (21): 35—40.
- [2] 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. High-performance Foam Aluminum Vibration Mechanism and Mechanical Properties of Experimental Study[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [3] 孙亮, 齐明思, 王俊元, 等. 基于冲击试验的泡沫铝-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 Cushioning Properties of Foamed Aluminum-polyurethane Based on Impact Experiment[J]. Packaging Engineering, 2015, 36 (15): 73—76.
- [4] 刘欢. 泡沫铝材料的吸能与防爆特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- LIU Huan. Foam Aluminum Materials, Energy Absorption and Explosion Characteristics[D]. Shengyang: Northeastern University, 2014.
- [5] 余为, 杨柳, 刘学谨, 等. 两种孔隙形状泡沫铝/环氧树脂复合材料弹性常数研究[J]. 燕山大学学报, 2013, 37(3): 278—282.
- YU Wei, YANG Liu, LIU Xue-jin, et al. Study on Elastic Constants of Two Kinds of Aluminum /Epoxy Composites with Pore Shape[J]. Yenshan University, 2013, 37 (3): 278—282.
- [6] 王玲. 泡沫铝力学性能的有限元模拟[D]. 太原: 太原科技大学, 2012.
- WANG Ling. Finite Element Eimulation of Mechanical Properties of Aluminum Foam[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2012.
- [7] 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[J]. Forging Press and Manufacturing Technology, 2011, 46(3): 74—77.
- [8] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学试验[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 Composite[J]. Journal of Composites, 2011, 28(3): 103—108.
- [9] 齐明思, 张晋宁, 杨卫, 等. 泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2013, 31(19): 6—9.
- QI Ming-si, ZHANG Jin-ning, YANG Wei, et al. Study on Cushioning Properties of Aluminum Foam- Polyurethane Composite Structure[J]. Packaging Engineering, 2013, 31(19): 6—9.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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: 43—49.
- [13] KADKHODAPOURJ, RAEISI S. Micro-macro Investigation of Deformation and Failure in Closed-cell Aluminum Foams[J]. Computational Materials Science, 2014, 83(2): 137—148.
- [14] WANG N, CHEN X, LI Y, et al. The Cell Size Reduction of Aluminum Foam with Dynamic Gas Injection Based on the Improved Foamable Melt[J]. Colloids & Surfaces a Physicochemical & Engineering Aspects, 2017, 527: 123—131.
- [15] JIGH B H G, TOUDESHPY H H, FARSI M A. Experimental and Multi-scale Analyses of Open-celled Aluminum Foam with Hole under Compressive Quasi-static Loading[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 695: 133—141.