

泡沫铝-聚氨酯静态压缩特性及吸能特性分析

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** 研究球形孔开孔泡沫铝相对密度、孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料力学性能的影响, 以及对其吸能性能的影响。**方法** 对制备的泡沫铝-聚氨酯复合材料进行准静态压缩实验。**结果** 通过准静态压缩实验, 得出分别对应的应力-应变曲线, 并通过应力-应变曲线推导出吸能-应变曲线。当泡沫铝孔径一定时, 泡沫铝相对密度从 35.0% 提升到 38.4% 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的屈服强度增加了 6.5 MPa。当泡沫铝相对密度一定时, 泡沫铝孔径从 5.5 mm 增大到 9.5 mm 时, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的屈服强度增加了 3.38 MPa。**结论** 泡沫铝的相对密度、孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料的性能有很大的影响, 泡沫铝的相对密度越大, 复合材料的性能越好, 泡沫铝孔径越大复合材料性能越好, 且泡沫铝相对密度越大, 复合材料吸能特性越好, 泡沫铝孔径越大, 复合材料吸能特性越好。

关键词: 泡沫铝-聚氨酯; 准静态压缩实验; 复合材料; 力学性能; 吸能特性

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0072-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.013

Static Compression Characteristics and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-Polyurethane

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 the relative density and pore size of open-cell aluminum foam with spherical pores on the mechanical properties of aluminum foam-polyurethane composites and their energy absorption properties. The prepared aluminum foam-polyurethane composites were subject to quasi-static compression experiments. Through the quasi-static compression experiments, the corresponding stress-strain curves were obtained and the energy absorption-strain curves were deduced from the stress-strain curves. When the pore size of aluminum foam was constant, the relative density of aluminum foam was increased from 35.0% to 38.4%, and the yield strength of aluminum foam-polyurethane composites was increased by 6.5 MPa. When the relative density of aluminum foam was constant, and the pore size of aluminum foam was increased from 5.5 mm to 9.5 mm, the yield strength of aluminum foam-polyurethane composites was increased by 3.38 MPa. The relative density and pore size of aluminum foam have a great influence on the properties of aluminum foam-polyurethane composites. The larger the relative density of aluminum foam is, the better the composite properties are. The larger the pore size of aluminum foam is, the better the composite properties are; moreover, the larger the relative density of foam aluminum is, the better the energy absorption property of the composites is; the larger the pore size of aluminum foam is, the better the energy absorption property of the composites is.

KEY WORDS: aluminum foam-polyurethane; quasi-static compression experiment; composites; mechanical property; energy absorption property

收稿日期: 2018-01-22

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

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, 具有密度小、较轻、耐腐蚀、抗冲击性好等优点, 成为当今力学以及材料工作者研究的热点材料, 并被应用于汽车工业、建筑业、化工业、军事工业等方面^[1-7]。泡沫铝独特的内部孔隙结构使得它在吸能抗冲击方面更加优越。将泡沫铝和一些易塑性材料结合形成新的复合材料, 是目前一些研究学者的研究热点。聚氨酯作为一种聚合物, 质轻、塑性好、造价低被广泛应用一些孔隙材料的填充物, 且自身具有很好的吸能特性^[8-9]。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性能造成影响, 聚氨酯-泡沫铝复合材料由于其独特的吸能性能常作为精密仪器的包装材料, 被广泛地应用于航空航天航海等精密仪器的包装^[10-11], 在精密仪器运输工作时可以起到极好的保护作用。

目前国内外研究学者主要针对泡沫铝以及聚氨酯这 2 种材料单独的性能做了研究, 对两者的复合材料的性能相对研究较少。H.Liu 等^[11]研究了不同种泡沫铝的冲击行为以及变形机制以及吸能性能; BAI.Z^[12]研究了不同铝蜂窝的静态压缩实验, 并得出应力-应变曲线, 分析了其变形机理; M.D. Goel 研究了泡沫铝-泡沫粉碳灰复合材料的压缩行为以及泡沫铝相对密度与孔径对泡沫铝的吸能性能的影响^[13-14]; Caranfil.M^[15]对泡沫铝的机械性能及吸能性能进行了分析。文中泡沫铝采用球形孔泡沫铝为基体材料, 该种材料相对于常规泡沫铝在结构方面有很大的区别, 拟研究不同泡沫铝相对密度、泡沫铝孔径对聚氨酯-泡沫铝复合材料的静态压缩特性及吸能特性的影响。

1 实验

1.1 材料和仪器

主要材料: 实验所用泡沫铝是直接购买北京中实强业公司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。

准静态压缩实验的仪器为 TLS-W50000A 的微机控制弹簧试验机, 由济南思达特试验机厂提供。



图 1 泡沫铝试样

Fig.1 Aluminum foam sample

1.2 实验样品的制备

首先将颗粒状的聚氨酯进行融化, 将定量的聚氨酯颗粒置于 1000 mL 的三口开口反应容器内, 并将烧瓶置于 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, 然后迅速倒入装有泡沫铝样品的模具内 (见图 2), 封闭模具, 施加压力使得聚氨酯与泡沫铝尽可能多地结合, 随后将模具整体放入 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上下两面进行打磨以保证光滑平整, 得到泡沫铝-聚氨酯最终实验试样见图 3。随后称量记录数据, 并将样品进行标码分类。



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 Aluminum foam-polyurethane sample

1.3 准静态压缩实验

首先设定 TLS-W50000A 的微机控制弹簧试验机各项参数。最大载荷为 50 kN, 加载速度为 5 mm/min, 进行准静态压缩实验, 得出应力-应变曲线。

2 结果分析

通过应力-应变曲线可以发现, 基体材料泡沫铝的相对密度较大, 静态压缩实验仪器所能施加的最大载荷相对较小, 从而导致泡沫铝-聚氨酯复合材料没有被完全压垮压实, 应力-应变曲线不太完整, 因此做压缩实验时应该选择最大载荷相对较大的实验仪器, 从而保证应力-应变曲线相对完整。

2.1 泡沫铝相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料静态压缩性能的影响

首先确定泡沫铝孔径相同, 泡沫铝相对密度不

同, 各项数据见表 1。通过实验后得到复合材料的应力-应变曲线, 见图 4。从图 4 中可知球形孔开孔泡沫铝-聚氨酯复合材料 3 个阶段比较特殊与常规不规则开孔泡沫铝-聚氨酯复合材料有一定区别。球形孔开孔泡沫铝-聚氨酯复合材料在发生压缩变形是会出现 3 个阶段弹性阶段、强化阶段、致密阶段。主要原因在于球形孔泡沫铝孔壁相对较厚。该实验由于实验仪器最大载荷相对较小, 泡沫铝-聚氨酯复合材料没有完全被压实, 实验仪器已经达到最大载荷, 最终导致应力-应变曲线第 3 阶段不太完整, 只有部分曲线。通过应力-应变曲线可以看到第 1 阶段弹性阶段相对较短, 该阶段主要是泡沫铝-聚氨酯复合材料的骨架泡沫铝发生变形。第 2 阶段强化阶段, 该阶段应变增加, 应力相对增加, 主要反映了整体材料压缩变形过程加剧压垮屈服的阶段。第 3 阶段致密阶段, 主要反映了泡沫铝-聚氨酯复合材料被压实致密的阶段。从图 4 可以看出 4 个样品都符合 3 个特殊阶段, 并且随着泡沫铝相对密度的增加, 聚氨酯复合材料屈服强度相对增加。由图 4 可知试样 1[#]的屈服强度为 10.1 MPa, 试样 2[#]的屈服强度为 5.9 MPa, 试样 3[#]的屈服强度为 5.7 MPa, 试样 4[#]的屈服强度为 3.6 MPa。通过图 4 可以看出试样 2[#], 3[#], 4[#]曲线相对接近, 造成这种现象的主要原因是由于泡沫铝填充相对不充分以及泡沫铝自身结构不均匀造成的, 从整体趋势来看, 泡沫铝相对密度越大, 泡沫铝-聚氨酯复合材料所能承受的载荷也会越大, 呈正相关的关系, 试样 1[#]比试样 2[#]泡沫铝相对密度增加了 0.7%, 屈服强度增加了 4.2 MPa。试样 1[#]比试样 4[#]泡沫铝相对密度增加了 3.4%, 屈服强度增加了 6.5 MPa。出现该现象的主要原因在于泡沫铝相对密度增加, 内部孔隙减小, 泡沫铝孔壁变厚, 在整体材料发生变形时, 所能承受的载荷相对变大, 抑制了材料的变形过程, 最终导致屈服强度增加。

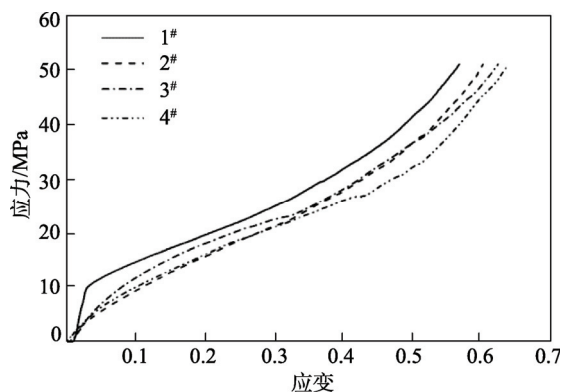


图 4 泡沫铝相对密度不同时的应力-应变曲线
Fig.4 The stress-strain curve corresponding to the aluminum foam of different relative densities

表 1 泡沫铝相对密度不同时的各项参数
Tab.1 Various parameters for the aluminum foam of different relative densities

试样	质量/g	孔径/mm	相对密度/%
1 [#]	20.46	7.5	38.4
2 [#]	20.27	7.5	37.7
3 [#]	19.57	7.5	36.7
4 [#]	18.63	7.5	35

2.2 泡沫铝孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料静态压缩性能的影响

首先确定泡沫铝相对密度一定, 孔径不同, 各项数据见表 2。通过实验后得到复合材料的应力-应变曲线, 见图 5。试样 6[#]由于填充不充分, 导致受力不均匀, 曲线出现上下波动, 出现一定的误差。由图 5 可知试样 5[#]的屈服强度为 13.18 MPa, 试样 7[#]的屈服强度为 9.80 MPa。试样 5[#]和试样 7[#]相比孔径增加, 屈服强度强加了 3.38 MPa。整体趋势泡沫铝孔径越大, 所能承受的载荷越大, 造成这种现象的主要原因在于, 泡沫铝孔径越大, 其内部结构孔棱越大, 这样在泡沫铝承受载荷时, 抑制了材料的变形过程。最终导致屈服强度增加。

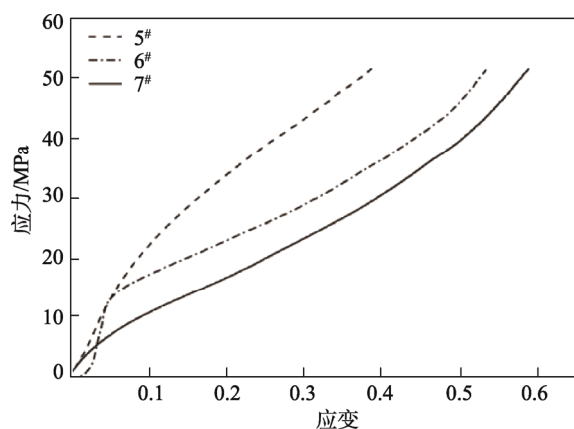


图 5 泡沫铝孔径不同时的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves corresponding to aluminum foam with different pore sizes

表 2 泡沫铝孔径不同时的各项参数
Tab.2 Various parameters corresponding to aluminum foam with different pore sizes

试样	质量/g	孔径/mm	相对密度/%
5 [#]	20.58	9.5	37.7
6 [#]	20.22	7.5	37.6
7 [#]	20.64	5.5	37.7

3 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实验

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, 表达式为:

$$C = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m$$

式中: C 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 泡沫铝相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能特性的影响

根据图 4 得到不同相对密度所对应的吸能-应变, 见图 6。 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 曲线分别是该组 1[#], 2[#], 3[#], 4[#] 对应的能量-应变曲线。由图 6 可知, 3 组曲线都是随着应变的增大, 能量呈上升趋势。从图 6 可知试样 1[#] 吸能性能最好, 试样 2[#], 3[#] 由于聚氨酯填充不充分原因, 应力-应变曲线出现一定误差从而影响其吸能-应变图, 从而出现波动出现一定的误差。试样 2[#], 3[#] 的吸能性能较差, 试样 4[#] 的吸能特效最差, 这和通过图 4 应力-应变曲线所分析的结果相一致。这说明泡沫铝相对密度越大, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能特性越好。

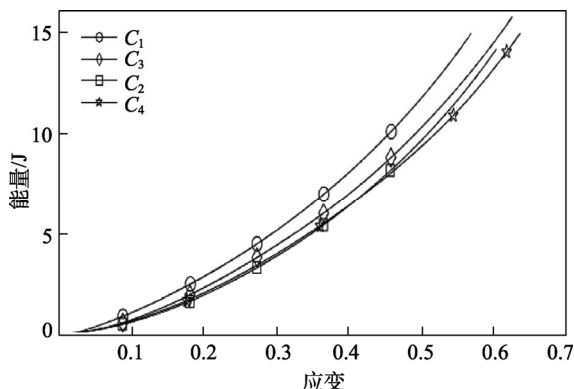


图 6 泡沫铝相对密度不同时对应的能量-应变曲线
Fig.6 Energy-strain curve corresponding to the aluminum foam of different relative densities

3.2 泡沫铝孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能特性的影响

根据图 5 得到泡沫铝孔径不同对应的吸能-应变, 见图 7。 C_5 , C_6 , C_7 曲线分别是该组试样 5[#], 6[#], 7[#] 所对应的吸能-应变曲线。曲线趋势也是随着应变的增加, 能量也增加, 从图 7 可知试样 5[#] 的吸能特性最好, 其次是试样 6[#], 最后是试样 7[#]。这与通过图 5 应力应变曲线所分析的结果一致, 这也说明泡沫铝孔径越大, 泡沫铝-聚氨酯复合材料的吸能特性越好。

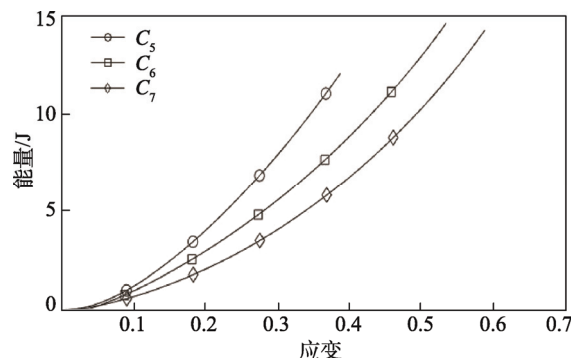


图 7 泡沫铝孔径不同的能量-应变曲线

Fig.7 Energy strain curve corresponding to aluminum foam with different pore sizes

4 结语

在做泡沫铝-聚氨酯复合材料的准静态压缩实验时, 如果选取的基体材料相对密度较大, 在选择仪器时, 应选择最大载荷相对大的仪器, 否则就会出现泡沫铝-聚氨酯复合材料不能完全被压塌, 从而出现应力应变曲线相对不完整的情况, 会影响后续分析。

泡沫铝相对密度、泡沫铝孔径对泡沫铝-聚氨酯复合材料的性能有很大的影响, 泡沫铝相对密度越大, 复合材料性能越好, 泡沫铝孔径越大复合材料性能越好, 且泡沫铝相对密度越大, 复合材料吸能特性越好, 泡沫铝孔径越大, 复合材料吸能特性越好。

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 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. Energy Absorption and Explosion Proof Ability of Aluminum Foam[D]. Shenyang: Northeast-

- ern 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 Simulation 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 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-zi, 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] 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] GOEL M D, MONDAL D P, YADAV M S, et al. Effect of Strain Rate and Relative Density on Compressive Deformation Behavior of Aluminum Cenosphere Syntactic Foam[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 590(1): 406—415.
- [14] MONDAL D P, GOEL M D, DAS S. Effect of Strain Rate and Relative Density on Compressive Deformation Behaviour of Closed Cell Aluminum-fly Ash Composite Foam[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1268—1274.
- [15] CARANFIL M. Mechanical Properties of Aluminum Foams with Open Cells[J]. Metalurgia International, 2012, 17(2): 164—166.