

泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

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

摘要: **目的** 研究在压缩过程中, 泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响。**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泡沫铝以及不同孔隙率的泡沫铝-聚氨酯复合材料的应力-应变曲线, 分析可知泡沫铝孔隙率从 94.6% 降到 93%, 其吸能性能增加了 71.9%。**结论** 在泡沫铝中加入聚氨酯形成的泡沫铝-聚氨酯复合材料相比于泡沫铝的吸能性能得到很大提高, 且泡沫铝的孔隙率与泡沫铝-聚氨酯的吸能性能成负相关的关系。

关键词: 泡沫铝-聚氨酯; 孔隙率; 准静态压缩实验; 复合材料; 吸能性能

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0120-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.017

Influence of Porosity of Aluminum Foam on Energy Absorption Properties of Aluminum-Foam Polyurethane Composites

QI Ming-si, ZHANG Wei, 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 influence of the porosity of aluminum foam on the energy absorption properties of aluminum foam-polyurethane composites. A quasi-static compression test was carried out on the prepared aluminum foam-polyurethane composites. The stress-strain curves of aluminum foam and aluminum foam-polyurethane composites with different porosity were obtained by quasi-static compression test. The analysis showed that, the energy absorption properties of aluminum foam increased by 71.9% when its porosity decreased from 94.6% to 93%. The energy absorption properties of aluminum foam-polyurethane composites formed by aluminum foam filled with polyurethane can be greatly improved, compared with those of aluminum foam; and the porosity of aluminum foam has the negative correlation with the energy absorption properties of aluminum foam-polyurethane composites.

KEY WORDS: aluminum foam-polyurethane; porosity; quasi-static compression test; composites; energy absorption properties

泡沫铝作为一种具有特殊胞孔结构的新型泡沫金属材料, 具有良好的力学性能及吸能性能^[1—5], 由于其独特的吸能性能, 已被广泛用于精密仪器的包装, 以及军事工业中防弹、防爆的冲击材料等方面^[6—7]。聚氨酯是一种新兴的有机高分子材料, 近几

年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性能和缓冲性能^[8—9]。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

收稿日期: 2018-10-17

基金项目: 山西省自然科学基金 (201601D102035)

作者简介: 张伟 (1991—), 男, 中北大学硕士生, 主攻缓冲材料。

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等。

材料, 泡沫铝本身也具有良好的冲击吸能性能, 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^[10]。

Han 等^[11]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^[12]研究了泡沫铝复合材料的力学性能, 且利用实验结果验证了理论模型对力学性能的预测。王斌等^[13]研究了泡沫纯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情况和能量吸收效率。李爱群^[14]研究了开孔泡沫铝-聚氨酯复合材料的单轴压缩性能。东南大学刘少波^[15]研究了泡沫铝-聚氨酯复合材料经循环压缩的力学行为, 并研究了泡沫铝孔径对整体复合材料的影响规律。文中主要通过实验研究泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料在压缩过程中吸能性能的影响。

1 实验

1.1 材料和仪器

主要材料: 实验所用开孔泡沫铝板来源于辽宁融达泡沫铝公司, 后将泡沫铝板通过机床进行线切割, 切割成半径为 17.5 mm, 厚度为 15 mm 的圆柱型试样, 见图 1; 聚氨酯采用德国拜耳 TPU9370A 型固体聚氨酯颗粒。

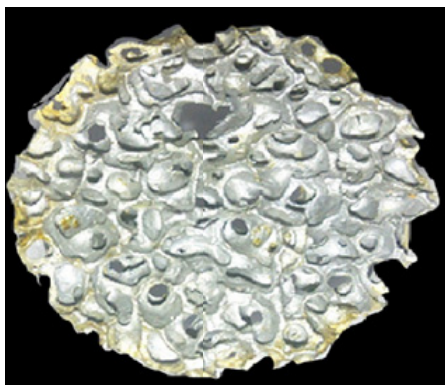


图 1 泡沫铝试样
Fig.1 Aluminum foam samples

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, 见图 2。

1.2 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 1 L 的三口烧瓶中, 并将烧瓶进行恒温油浴, 油浴温度为 220 °C。为了确保温度恒定, 应将搅



a



b

图 2 集热式恒温加热磁力搅拌机

Fig.2 Collective thermostatic heating magnetic stirrer

拌机打开, 并设置其转速为 200 r/min, 直到聚氨酯融化为液态。同时快速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 15 mm, 直径为 35 mm 的圆柱体), 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。由此, 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。随后进行称量并标注, 以便后续工作的开展。

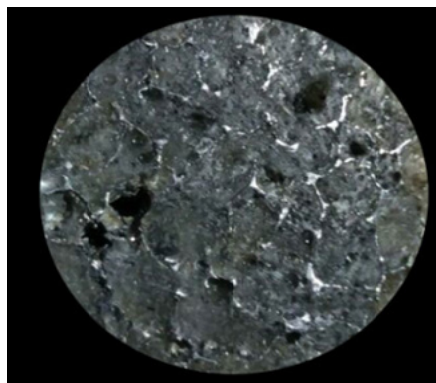


图 3 泡沫铝-聚氨酯试样

Fig.3 Aluminum-foam polyurethane samples

1.3 准静态压缩实验

设定 TLS-W50000A 型万能材料压缩试验机的基本参数,该仪器所能提供的最大载荷为 50 kN。设定极限变形率为 31.4%,压缩时加载速率为 2 mm/min。

2 实验结果分析

泡沫铝经过压缩实验得到的应力-应变曲线见图 4。泡沫铝质量为 2.11 g,其孔隙率为 94.6%,通过泡沫铝应力-应变曲线可知,泡沫铝在压缩变形时大体趋势符合多孔材料 3 个阶段的特征,即弹性阶段、应力平台阶段、致密压实阶段^[10—15]。由于泡沫铝孔隙率相对较大,内部孔太多,导致铝骨架相对较薄,在压缩实验时(加载过程为均匀加载),平台应力阶段应力-应变曲线出现一定波动。这也间接证明了泡沫铝内部复杂结构的不均匀性。泡沫铝孔隙率相对较大,导致平台应力较低,因此泡沫铝的孔隙率对其整体性能影响较大。在不同应用领域,应适当地选取不同的基体材料孔隙率,文中由于选取的泡沫铝孔隙率相对较大,导致平台应力阶段出现一定的误差,而且平台应力相对较低。

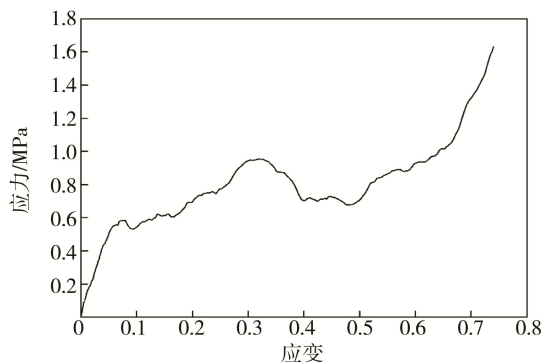


图 4 泡沫铝应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of aluminum foam

不同孔隙率时参数的设定见表 1,泡沫铝-聚氨酯在准静态压缩实验后得到的应力-应变曲线见图 5。由图 5 可知,在泡沫铝中添加聚氨酯,弥补了泡沫铝孔隙率较大而造成的一些误差,说明聚氨酯和泡沫铝可完美结合,相互弥补本身基体材料的一些不足,在整体性能上有所提高。由图 4—5 可知,在泡沫铝中添加聚氨酯形成的新型泡沫铝-聚氨酯复合材料在整体性能上有大幅度提升,复合材料屈服强度方面,试样 1[#],试样 2[#],试样 3[#]的屈服强度分别为 1.38, 1.30, 1.04 MPa,试样 1[#],试样 2[#],试样 3[#]的流变应力分别为 1.63, 1.58, 1.47 MPa。泡沫铝的屈服强度为 0.55 MPa,可知泡沫铝在加入聚氨酯后形成的复合材料其性能大幅度提高,造成这种现象的主要原因是聚氨酯材料填充了泡沫铝材料的内部孔洞,在发生压缩变形

时,聚氨酯可以抑制材料的变形,吸收一部分的能量,从而导致整体性能的提升。

由图 5 可知,复合材料整体屈服强度方面,试样 1[#]较试样 2[#]提高了 6%,试样 2[#]较试样 3[#]提高了 25%,试样 1[#]较试样 3[#]提高了 32.6%。流变应力方面,试样 1[#]较试样 2[#]增大了 3.2%,试样 2[#]较试样 3[#]增大了 7.5%,试样 1[#]较试样 3[#]增大了 10.9%。产生这种现象的主要原因在于泡沫铝孔隙率越大,其内部孔洞越多,由于整体体积相等,泡沫铝骨架相对较薄,因内部填充的聚氨酯的量相同,导致泡沫铝孔隙率较大的材料所能承受的载荷较低,影响整体的复合材料性能,因此材料在发生压缩变形时,泡沫铝-聚氨酯复合材料的屈服强度和流变应力随泡沫铝孔隙率的增大而减小。

表 1 孔隙率不同的其他各项参数
Tab.1 Other parameters when the porosity is different

试样	泡沫铝质量/g	聚氨酯质量/g	泡沫铝孔隙率/%
1 [#]	2.73	13.12	93
2 [#]	2.45	13.12	93.7
3 [#]	2.11	13.12	94.6

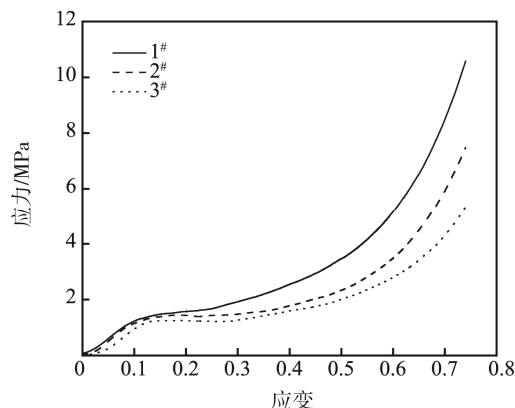


图 5 不同泡沫铝孔隙率对应的应力-应变曲线
Fig.5 Corresponding stress-strain curves for different aluminum foam porosity

3 泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

泡沫铝-聚氨酯复合材料在进行准静态压缩实验时,泡沫铝内部结构充当的骨架发生变形甚至断裂,聚氨酯发生弹性变形。泡沫铝-聚氨酯复合材料在受到压缩载荷导致的变形时,泡沫铝、聚氨酯分别通过各种方式来抑制变形吸收能量。复合材料在压缩变形过程中单位体积所能吸收的能量可以通过单位体积的形变功表示:

$$W = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m d\varepsilon$$

式中: ε_m 为压缩过程中的任意工程应变; σ_m 为 ε_m

在压缩时所对应的应力。

试样的压缩吸收能量见图6, 可知在准静态压缩实验时, 3[#]泡沫铝-聚氨酯复合材料比纯泡沫铝的吸能性能提升了133%。当其他参数一定, 泡沫铝孔隙率发生变化时, 由图6可知泡沫铝孔隙率由94.6%提升到93%, 泡沫铝-聚氨酯的吸能性能提升了71.9%。

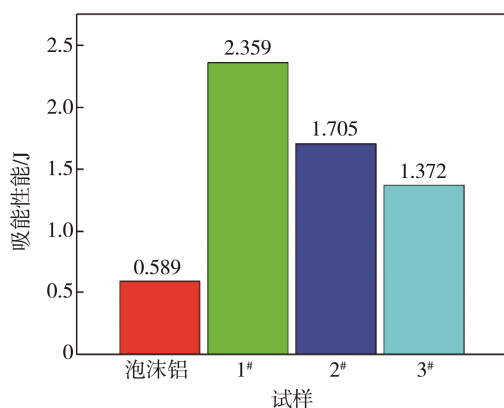


图6 试样的压缩吸收能量

Fig.6 Compressed energy absorption of samples

4 结语

泡沫铝与聚氨酯复合形成的泡沫铝-聚氨酯复合材料, 其吸能性能相比于纯泡沫铝材料有较明显的提升, 且泡沫铝-聚氨酯的吸能性能随着泡沫铝孔隙率的降低而增加, 呈负相关的关系。由此, 泡沫铝孔隙率对泡沫铝-聚氨酯复合材料的整体吸能性能有很大的影响, 在不同的应用领域应该选择不同孔隙率的泡沫铝作为基体材料。

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 Aluminum Foam[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 Im-

pact 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 Aluminum Foam[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 Aluminum Foam 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 Aluminum Foam[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] 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]. Interna-

- tional 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(10): 1037—1040.
WANG Bin, HE De-ping, SHU Guang-ji. Compression Properties and Energy Absorption of Foamed Al Al-
- loys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000(10): 1037—1040.
- [14] BAO H, LI A. Study on Quasi-static Uniaxial Compression Properties and Constitutive Equation of Spherical Cell Porous Aluminum-polyurethane Composites[J]. Materials, 2018, 11(7): 1261.
- [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.