

# 空心球/铝基复合泡沫材料制备及性能研究

范琦琪, 姜凤春, 果春焕, 王春鹤, 于天淼,  
常云鹏, 王振强, 王建东, 牛中毅

(哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 采用粉末冶金技术制备了不同孔隙率空心球/铝基复合泡沫材料, 对其进行 T7 热处理, 并开展了不同孔隙率材料压缩性能及隔声性能的测试。结果表明, 制备的泡沫材料中空心球均匀分布于基体内, 且空心球与基体之间形成明显的过渡层; 空心球/铝合金基复合泡沫材料的压缩应力-应变曲线呈现线弹性、应力平台、致密化 3 个阶段。随着孔隙率的增加, 空心球/铝合金基复合泡沫材料的压缩峰值应力、平台应力及能量吸收能力均呈先上升后下降的变化趋势; 随着孔隙率的增加, 复合泡沫材料隔声性能逐渐下降。

**关键词:** 金属空心球; 复合泡沫材料; 粉末冶金; 吸能特性; 隔声性能

**中图分类号:** TF125.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2020)03-0248-05

## Investigation on Fabrication and Properties of Hollow Spheres/Aluminum Matrix Composite Foams

FAN Qiqi, JIANG Fengchun, GUO Chunhuan, WANG Chunhe, YU Tianmiao,  
CHANG Yunpeng, WANG Zhenqiang, WANG Jiandong, NIU Zhongyi

(College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Hollow spheres/aluminum matrix composite foams with different porosity were prepared by powder metallurgy technology and T7 heat treatment, and the compressive properties and sound insulation properties of different porosity materials were tested. The results show that hollow spheres in matrix are distributed evenly, and transition layer between hollow spheres and matrix could be observed obviously. The compressive stress-strain curves of composite foams are mainly divided into three stages: linear elastic stage, stress plateau stage and densification stage. With the increasing of porosity, the compressive peak strength, platform stress and energy absorption capacity of the hollow spheres/aluminum alloy composite foams increase first and then decrease. And with the increasing of porosity, the sound insulation property of the materials decreases gradually.

**Key words:** metal hollow spheres; composite foams; powder metallurgy; energy absorption ability; insulation property

### 1 前 言

空心球/铝基复合泡沫材料是一种将空心球与铝基体结合形成的新型金属复合泡沫材料 (metal composite foams, MCFs), 这种空心球/铝基复合泡沫材料在传统金属泡沫材料原有性能 (高强度、高能量吸收能力) 基础上结合了铝基复合材料的高韧性、疲劳耐久性等优点<sup>[1, 2]</sup>。

与全致密型铝基复合材料相比, 金属复合泡沫材料表现出低密度、高比刚度、高能量吸收能力、优异的机械及声学阻尼性能等性能优点<sup>[3-5]</sup>。空心球周围金属基体的填充使得空心球球壁和材料整体结构的稳定性得到了提升, 此外相同规格的金属空心球使得金属复合泡沫材料中的孔隙分布均匀, 克服了材料非均匀变形问题<sup>[6-8]</sup>; 而金属空心球规格尺寸及数量的可调性保证了金属复合泡沫结构与性能的可控性, 通过设计相应的孔隙尺寸、孔隙率及不同的孔隙结构可实现金属复合泡沫材料在不同领域的应用<sup>[9]</sup>。

金属复合泡沫材料作为一种新型功能材料, 在航空航天、交通运输、国防等领域有着广阔的应用前景, 近年受到了各国学者的广泛关注及研究。Rabiei 等<sup>[10, 11]</sup>分别采用重力铸造法、粉末冶金法将铝 (不锈钢) 基体与不

收稿日期: 2019-01-30    修回日期: 2019-05-20

基金项目: 双百工艺项目 (JCKY2018604C004)

第一作者: 范琦琪, 女, 1994 年生, 硕士研究生

通讯作者: 果春焕, 女, 1980 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: guochunhuan@hrbeu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201901028

锈钢空心球结合,制备了不同基体的金属复合泡沫材料,并对材料进行压缩试验。测试结果表明,两种金属复合泡沫材料在准静态载荷作用下的应力-应变曲线展现了泡沫材料在压缩条件下的典型弹性-塑性行为。金属复合泡沫材料的压缩应力-应变曲线主要经历弹性、平台应力(材料在相对恒定应力下经历的均匀变形)、致密化3个阶段。另一方面,金属复合泡沫材料作为一种封闭式泡沫,由于孔隙间的相互独立性,也可应用于隔音领域,但关于金属复合泡沫材料隔声性能的研究较少<sup>[12-14]</sup>。目前金属复合泡沫材料中,铁铝复合泡沫材料大都采用铸造法制备,且铝基体大多采用纯铝基体,本研究采用粉末冶金技术,以316L不锈钢空心球和7075铝合金为原材料,制备空心球/铝基复合泡沫材料,并对不同孔隙率的试样进行压缩试验及隔声测试。

## 2 材料与实验方法

### 2.1 原材料与材料制备

本文采用的原材料为316L不锈钢空心球及7075铝合金粉,其中空心球外径为2.8 mm、壁厚为0.24 mm。采用粉末冶金技术对原材料在真空环境下进行烧结,随后进行T7热处理,其主要制备过程如下:①将清洗后的空心球与铝合金粉末均匀混合后置于模具内;②将模具置于真空热压烧结炉内进行分段加热保温,具体工艺如图1所示;③对烧结后的材料进行T7处理,即固溶处理+稳定化处理,具体工艺如图2所示。

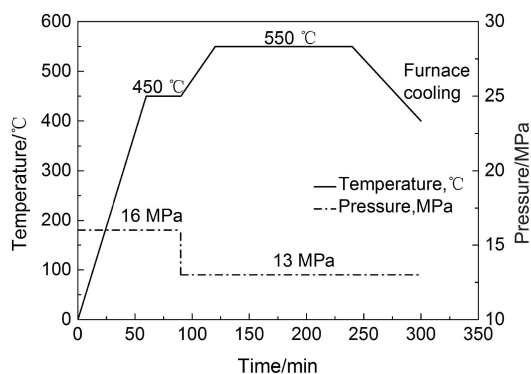


图1 空心球/铝基复合泡沫材料热压烧结工艺

Fig.1 The process curve of hot-pressed sintering for hollow spheres/aluminum matrix composite foams

### 2.2 性能表征

利用Instron 5500R 万能试验机对制备的空心球/铝基复合泡沫材料进行压缩性能测试,试样尺寸为4 mm×4 mm×6 mm,测试应变率为0.1 s<sup>-1</sup>。同时采用阻抗管法进行材料的隔声特性测试,测量隔声损失频率范围为1600~6300 Hz,样品直径为30 mm。

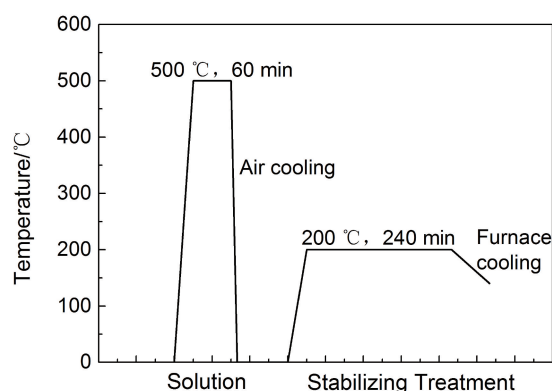


图2 复合泡沫材料热处理工艺

Fig.2 The process curve of heat treatment for composite foams

文中孔隙率是指空心球内腔在复合材料中所占比例,测试方法为图像分析法<sup>[15]</sup>,即利用低倍显微照片测量、统计空心球内腔的总截面积占整个被测试样截面积的比值,从而计算出复合材料的孔隙率。

## 3 结果与分析

### 3.1 空心球/铝基复合泡沫材料组织形貌

图3a为热处理后空心球/铝基复合泡沫材料横截面照片,空心球均匀分布于基体中,且其球形结构保持着较好的完整性。由于切割位置对应空心球位置不同,因此截面中对应空心球孔隙大小不同。图3b为复合泡沫材料内空心球微观形貌,可看出空心球与7075铝合金基体

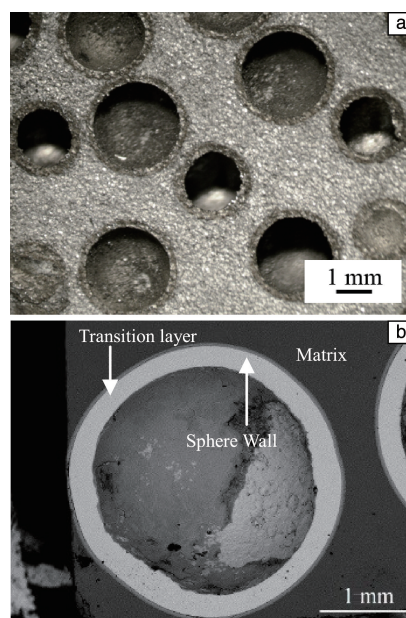


图3 空心球/铝基复合泡沫材料组织形貌:(a)横截面照片,(b)空心球SEM照片

Fig.3 Morphology of composite foam:(a) section image,(b) SEM image of hollow sphere

间存在明显的过渡层。图中深灰色部分为铝合金基体,亮白色部分为空心球球壁,两者间浅灰色过渡区为空心球与基体间的过渡层,过渡层总厚度约为  $41.3\ \mu\text{m}$ 。过渡层均匀地分布在空心球外壁周围,且连续性良好,无明显缺陷。

### 3.2 空心球/铝基复合泡沫材料压缩性能

图 4 为不同孔隙率空心球/铝基复合泡沫材料的压缩应力-应变曲线,可以看出复合泡沫材料压缩应力-应变曲线均表现出 3 阶段特征:线弹性阶段、平台应力阶段、致密化阶段。

此外,可以看出随着孔隙率的逐渐增加,材料峰值应力、平台应力呈先上升后下降的变化趋势。在大多数情况下,金属泡沫被用于能量吸收领域,单位体积的能量吸收能力(定义为应力-应变曲线下的面积)是评价金属泡沫性能的一个重要参数,可以通过公式(1)计算:

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

其中  $W$  是吸收的能量,  $\sigma$  是应变  $\varepsilon$  处对应的应力。图 4 中应力-应变曲线下所对应面积为材料变形过程中吸收的能量。不同孔隙率试样应变为 0.35 时对应的能量吸收列于表 1,可以看出其能量吸收能力的变化趋势与峰值应力及平台应力的变化趋势相同。在复合泡沫材料中,空心球周围填充的铝合金基体起到承载载荷及支撑空心球的作用,适当含量的铝合金基体可以提高材料整体结构稳定性、克服材料的非均匀变形问题<sup>[16]</sup>;而试样中空心球与基体的结合连接主要依靠过渡层来实现,两者间更好的结合可以对材料起到强化作用。随着孔隙率的逐渐增加,空心球与基体间的过渡层厚度逐渐增加,因此在加载过程中材料的峰值应力逐渐增加。但随着孔隙率的继续增加,单位体积内的基体材料逐渐减少,基体材料对载荷的承载作用及对空心球的支撑作用逐渐减小,基体

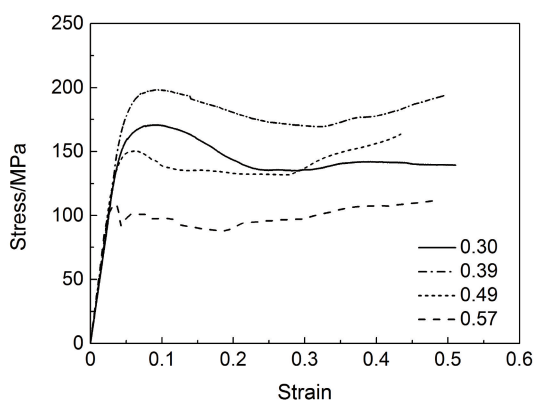


图 4 不同孔隙率复合泡沫材料真实压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Compression stress-strain curves of composite foams with different porosity

表 1 不同孔隙率复合泡沫材料的能量吸收能力

Table 1 Energy absorption capacity of composite foam with different porosity

Porosity	Energy absorption capacity (Strain = 0.35)/(MJ · m <sup>-3</sup> )
0.30	53.54
0.39	65.15
0.49	46.20
0.57	34.49

铝合金不足以在压缩过程中协调变形,因此复合泡沫材料在压缩变形过程中均匀性变差,峰值应力开始减小。

### 3.3 空心球/铝基复合泡沫材料隔声性能

图 5 为热处理后不同孔隙率复合泡沫材料的隔声性能对比,随着频率逐渐增加,材料的声传递损失总体呈上升趋势。这是由于随着频率的增加,声波波长逐渐减小,相对于介质层的尺寸减小,从而使得材料受到共振的影响逐渐减小,受到声波激发的振动速度因此减小,隔声量因此而增加。当材料孔隙率为 0.30 时,随着频率逐渐增加材料的传递损失波动较大,这主要是由于该孔隙率材料的隔声结构在 2000~6300 Hz 的频率范围内产生共振,故曲线会出现相应低谷点。另一方面,随着孔隙率的增加,材料的传递损失即隔声性能呈下降趋势,这是由于随着孔隙率的增加,相同横截面面积中,空心球所占面积增加,即空心球内空腔面积、过渡层面积增加。在声波的传递过程中,孔洞及裂纹介质的存在相当于材料中透射系数为 1 的部分,而空心球内的空腔相当于孔洞介质的存在,空心球空腔是复合泡沫材料隔声性能中的薄弱环节,对材料的隔声性能有严重的消极影响,故随着孔隙率的逐渐增加,复合泡沫材料的隔声性能逐渐降低。此外,将制备的复合泡沫材料与现阶段常见单层隔声墙(石膏圆孔板墙)<sup>[17]</sup>的隔声量进行对比,结果表明,孔隙率为 0.30 和 0.39 的复合泡沫材料在 1000~4000 Hz 区间隔声量大于石膏圆孔板墙,即隔声性能优于石膏圆孔板墙。

空心球/铝基复合泡沫材料的隔声原理与单层介质在原则上是相同的,下面以单个空心球及周围铝合金基体为单元说明声波在复合泡沫材料中的传递过程。如图 6 所示,在隔声测试中,声波自左向右垂直入射复合泡沫材料,则在复合泡沫材料的截面中存在图中所示的各列平面波。图 6a 为空心球及合金基体前后介质层的隔声,图 6b 和图 6c 分别为图 6a 中黑色虚线框内 I 区、II 区的隔声示意图。主要讨论图中声波透过基体合金并穿过空心球球壁及空心球球内空腔的情况。声波经过图中单元



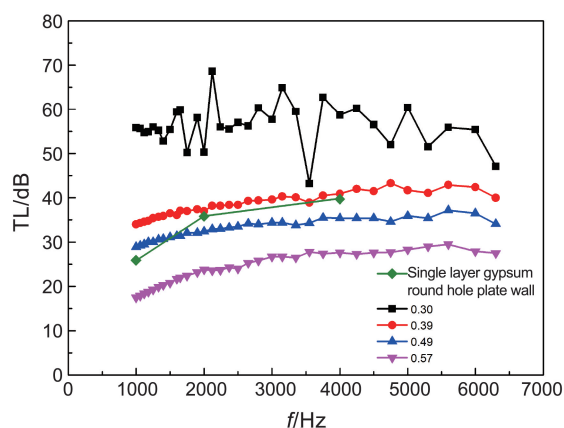


图5 不同孔隙率复合泡沫材料频率-传递损失曲线

Fig. 5 Frequency-transmission loss curves for composite foams with different porosity

结构时需依次透过8种界面,即:空气到基体材料的界面、基体材料到过渡层的界面、过渡层到空心球球壁的界面、空心球球壁到球内空气的界面、球内空气到空心球球壁的界面、空心球球壁到过渡层的界面、过渡层到铝合金基体的界面、基体材料到空气的界面。在声波的传递过程中:声入射能量=反射能量+吸收能量+声透射能量。在空心球/铝基复合泡沫材料中孔隙以封闭的形式存在,孔隙间不相互连接,大部分入射声波将被反射,并且只有一部分声波被微孔或裂缝吸收和透射,因此声波穿过材料后声透射能量较低<sup>[18]</sup>。另一方面,由于材料复杂的隔声结构内包含多种多个介质层,各个介质层界

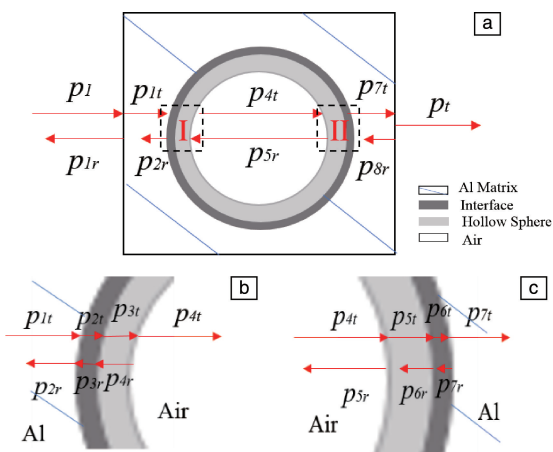


图6 声波穿透空心球/铝基复合泡沫材料示意图:(a)空心球及周围基体介质的隔声,(b)I区介质的隔声,(c)II区介质的隔声

Fig. 6 Schematic diagram of sound wave penetrating composite foams: (a) sound insulation of hollow spheres and surrounding matrix media, (b) sound insulation of Region I, (c) sound insulation of Region II

面两侧介质特征阻抗的突然变化,使声波在界面处发生反射,声波在介质间的多次反射使声波强度逐渐衰减,声波透射能量开始逐渐降低,因此在声波传递过程中材料隔声量逐渐增加。相对于具有相同孔隙率的闭孔泡沫材料,空心球/铝基复合泡沫材料隔声性能也相对较好。

## 4 结论

利用粉末冶金法制备了不同孔隙率的空心球/铝基复合泡沫材料,并对其进行T7热处理,研究了不同孔隙率金属复合泡沫材料的压缩性能和隔声性能,得到如下结论:

(1)通过真空热压烧结技术成功制备了空心球/铝基复合泡沫材料,空心球均匀分布于基体中且保持较好的球形结构;空心球与基体间形成明显的过渡层,过渡层均匀分布于空心球周围;材料无明显缺陷。

(2)空心球/铝基复合泡沫材料压缩应力-应变曲线可分为3阶段:线弹性阶段、应力平台阶段、致密化阶段。随着空心球/铝基复合泡沫材料孔隙率的逐渐增加,材料峰值应力、平台应力、能量吸收能力总体呈先上升后下降的变化趋势,空心球/铝基复合泡沫材料的变形与基体的塑性、强度,空心球的强度及空心球与基体间的结合都有着紧密联系。

(3)空心球内空腔相当于透射系数为1的介质,由于空腔对材料隔声性能的消极影响,随着孔隙率的逐渐增加,材料在同一频率下的隔声量逐渐下降,即材料的隔声性能逐渐降低。

## 参考文献 References

- [1] SHUKLA M, DHAKAD S K, AGARWAL P, *et al.* Materials Today: Proceedings[J], 2018, 5(2): 5830-5836.
- [2] JASWINDER S, AMIT C. Ceramics International[J], 2016, 42(1): 56-81.
- [3] GUPTA N, ROHATGI P K. Metal Matrix Syntactic Foams: Processing, Microstructure, Properties and Applications[M]. Pennsylvania, USA: DEStech Publications Inc., 2014.
- [4] MARKAKI A E, CLYNE T W. Acta Materialia[J], 2001, 49(9): 1677-1686.
- [5] MILMAN Y, BYAKOVA A, SIRKO A, *et al.* Materials Science Forum Vols[J], 2006, 519-521: 573-578.
- [6] KATONA B, SZLANCSIK A, TÁBI T, *et al.* Materials Science & Engineering: A[J], 2019, 739: 140-148.
- [7] BANHART J. Progress in Materials Science[J], 2001, 46(6): 559-632.
- [8] 王少恒, 杨震琦, 管公顺, 等. 高压物理学报[J], 2013, 27(3): 440-446.

WANG S H, YANG Z Q, GUAN G S, *et al.* Chinese Journal of High

- Pressure Physics[J], 2013, 27(3): 440-446.
- [9] ORBULOV I N, GINSZTLER J. Composites Part A: Applied Science Manufacturing[J], 2012, 43(4): 553-561.
- [10] NEVILLE B P, RABIEI A. Materials and Design[J], 2008, 29(2): 388-396.
- [11] RABIEI A, VENDRA L J. Materials Letter[J], 2009, 63(5): 533-536.
- [12] YU H J, YAO G C, WANG X L, *et al.* Applied Acoustics[J], 2007, 68: 1502-1510.
- [13] GUAN D, WU J H, WU J L, *et al.* Applied Acoustics[J], 2015, 87: 103-108.
- [14] DOUTRES O, ATALLA N, BROUILLETTE M. Applied Acoustics[J], 2014, 79: 110-116.
- [15] 杨宝华, 吴爱祥, 缪秀秀. 工程科学学报[J], 2016, 38(3): 328-334.
- YANG B H, WU A X, MIAO X X. Chinese Journal of Engineering [J], 2016, 38(3): 328-334.
- [16] VENDRA L J, RABIEI A. Materials Science & Engineering: A[J], 2007, 465(1/2): 59-67.
- [17] 孙丹群, 张斌, 孙家麒, 等. 噪声控制工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 610-636.
- SUN D Q, ZHANG B, SUN J Q, *et al.* Noise Control Engineering [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2013: 610-636.
- [18] 陈小剑. 舰船噪声控制技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 249-257.
- CHEN X J. Ship Noise Control Technology[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 249-257.
- (编辑 惠 琼)