

# 泡沫钛孔隙结构及力学性能

王耀奇<sup>1,2,3</sup>, 刘培生<sup>4</sup>, 侯红亮<sup>1,2,3</sup>, 张艳芬<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

(2. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

(3. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

(4. 射线束技术与材料改性教育部重点实验室 北京师范大学, 北京 100875)

**摘要:** 通过挂浆烧结法制备了两种不同孔隙结构的泡沫钛, 利用数码相机和扫描电镜对泡沫钛孔隙结构与形貌观特征进行了观察, 通过静态的室温压缩试验, 测试了泡沫钛的力学性能与吸能特性。研究发现, 应用挂浆烧结法制备的泡沫钛继承了先驱体的结构特征, 呈三维立体网状结构, 且孔棱是非致密的, 存在大量的微孔。泡沫钛是应变速率不敏感的, 在应变速率  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  范围内, 其屈服强度为 1.00~2.38 MPa, 且泡沫钛具有一定的吸能特性, 细孔泡沫钛和粗孔泡沫钛的最大吸能量分别为 0.78 和 0.22 MJ/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 挂浆烧结法; 泡沫钛; 孔隙结构; 力学性能

中图分类号: TG146.2\*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-134-05

泡沫钛是由金属骨架与内部孔隙组成的一种新型材料, 按照其孔隙的结构特征可以分为开孔泡沫钛与闭孔泡沫钛<sup>[1]</sup>。由于钛合金的生物相容性较好, 且可以通过其内部的孔隙来调整弹性模量, 因此以钛合金为基体的泡沫钛在生物医学领域具有巨大的应用潜力<sup>[2]</sup>。同时, 泡沫钛既保留了钛合金的轻质、高比强、耐高温等结构材料的特点, 又具有泡沫材料的多功能特性。因此在航空、航天以及兵器领域也同样具有广泛的应用前景<sup>[3]</sup>。

由于钛合金的熔点较高, 且在高温下的化学活性高, 极易与环境气氛发生反应, 因此还无法使用液态法来制备泡沫钛。目前泡沫钛的制备工艺主要以粉末冶金法为主, 如松装烧结法、占位体烧结法, 挂浆烧结法、气体捕捉法与自蔓延合成法等<sup>[4-8]</sup>。在这些方法当中, 占位体烧结法研究的最为深入, 它可以通过控制占位体的体积分数来实现泡沫钛孔隙率的调控, 孔隙率一般低于 70%, 而用于制备高孔隙率泡沫钛的挂浆烧结法的研究则相对较少<sup>[9-11]</sup>。在性能方面的研究大多是以生物医学为背景, 主要集中于孔隙率在 70% 以下的泡沫钛的力学性能研究, 而在高孔隙率泡沫钛的性能方面研究的不够充分, 特别是功能特性方面, 如吸能特性等<sup>[12-14]</sup>。

本实验基于挂浆烧结法制备了两种不同孔隙结构

的泡沫钛, 通过微观分析对孔壁的结构特征进行了研究, 利用静态压缩实验对其力学性能与吸能特性进行了评价与表征, 为高孔隙率泡沫钛在结构方面的应用提供依据。

## 1 实验方法

以钛粉和镍粉为泡沫钛的基体, 以聚氨酯泡沫为泡沫钛的先驱体, 应用挂浆烧结法来制备泡沫钛。钛粉、镍粉以及聚氨酯泡沫的形貌如图 1 所示, 钛粉和镍粉的粉末粒度均为 300 目 (约 48 μm), 钛粉颗粒呈多边形, 表面凸凹不平, 而镍粉颗粒呈絮状。聚氨酯泡沫呈三维立体网状结构, 孔隙分布均匀, 通过进一步的观察, 其棱边为三棱形状。

将钛粉和镍粉按质量比 90:10 置于 KQM-X4 型行星式四头快速球磨机中混料 2 h, 将混合均匀的金属粉末与黏结剂按照一定比例配制成浆料, 配制比例为: 金属粉末体积:黏结剂体积=1:(1~3)。充分搅拌均匀后, 将聚氨酯泡沫在浆料中反复浸渍, 并在 80 °C/2 h+120 °C/2 h 条件下进行干燥处理。将挂浆干燥后的坯体样品置于真空炉设定温度点的匀温区, 抽真空至炉膛压力小于  $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ , 然后以 4 °C/min 的升温速率升温至 120 °C, 保温 2 h, 持续抽真空最后达到最小压力在  $10^{-2} \text{ Pa}$  的水平。之后以 5 °C/min 的升温速率将炉

收稿日期: 2016-12-08

基金项目: 中航工业集团创新基金 (2012E62523R)

作者简介: 王耀奇, 男, 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 北京 340 信箱 106 分箱, 北京 100024, 电话: 010-85701237, E-mail: xiaoqigh@sina.com

温 由 1 2 0

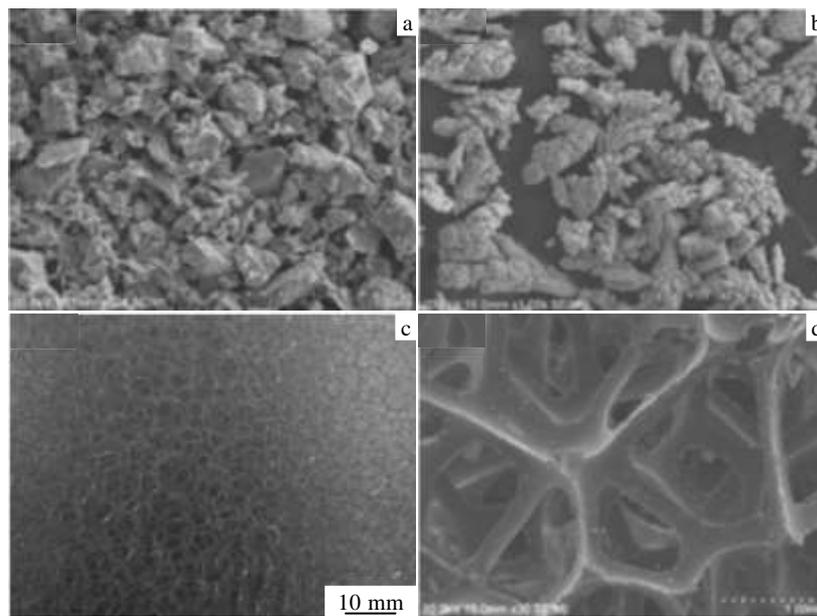


图 1 原始材料形貌

Fig.1 Morphologies of original material: (a) titanium powder, (b) nickel powder, (c) PU foam, and (d) pore edge of PU foam

℃提高到 400 ℃；再以 2 ℃/min 的升温速率将炉温由 400 ℃提高到 500 ℃；接着以 10℃/min 的速率将炉温提高到 800 ℃，最后以 5 ℃/min 的速率将炉温提高到 900 ℃；然后在 900 ℃保温 210 min。完成后关机炉冷，保持真空炉冷至 120 ℃以下出炉取样。试验中选用了两种不同孔隙尺寸的聚氨酯泡沫作为先驱体。

采用数码相机记录了泡沫钛的宏观形貌，利用扫描电镜对泡沫钛孔棱的形貌进行了观察。应用 LETRY DL-20T 万能力学试验机进行泡沫钛的压缩实验，对其力学性能进行评价，试样的尺寸规格为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ，实验过程中万能力学试验机的横梁速度不变，横梁速度为 0.18, 0.6, 1.8, 6 mm/min，因此，初始应变速率分别为  $3 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ ,  $3.3 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，为了降低试样与夹头之间摩擦力对压缩过程的影响，在试样的端部涂敷有  $\text{MoS}_2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 泡沫钛孔隙形貌与孔壁组织

应用挂浆烧结法制备的泡沫钛形貌如图 2 所示。可以看出，泡沫钛继承了聚氨酯泡沫的孔隙结构特征，呈三维立体网状结构，在此基础上还形成了一定的孔壁结构。利用显微观测法测定泡沫钛孔隙尺寸，图 2a 的孔隙尺寸为 1.5~3.0 mm，平均孔径为 2.2 mm（简称粗孔），图 2b 的孔隙尺寸为 1.5~3.0 mm，平均孔径为 1.6 mm（简称细孔），两者的密度为 0.5~0.7 g/cm<sup>3</sup>，孔

隙率在 86%~90%。

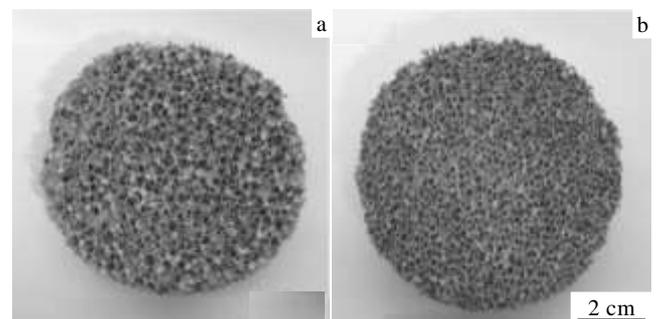


图 2 泡沫钛孔隙结构特征

Fig.2 Pore structure of titanium foam: (a) coarse pore and (b) fine pore

细孔泡沫钛孔棱形貌如图 3 所示。观察发现，泡沫钛孔棱是由不连续的粉体颗粒组成的，颗粒形貌依然可见，且颗粒间是非连续的，存在大量的微孔。刨开孔棱后可见，孔棱内部也并非致密的，如图 3b 所示，先驱体在烧结过程中，通过分解反应去除，但其所占据的空间并没有消失，而是以孔隙的形式存在于孔棱当中。上述的这些孔隙都会对泡沫钛的力学性能产生一定的影响。

### 2.2 泡沫钛力学性能与吸能特性

不同压缩速率泡沫钛的工程应力-工程应变曲线如图 4 所示，平均孔径为 1.6 mm。研究发现，泡沫钛

的工程应力-工程应变曲线呈现了典型的 3 个阶段：线性阶段，平台阶段与压实阶段。在线性阶段，随着应

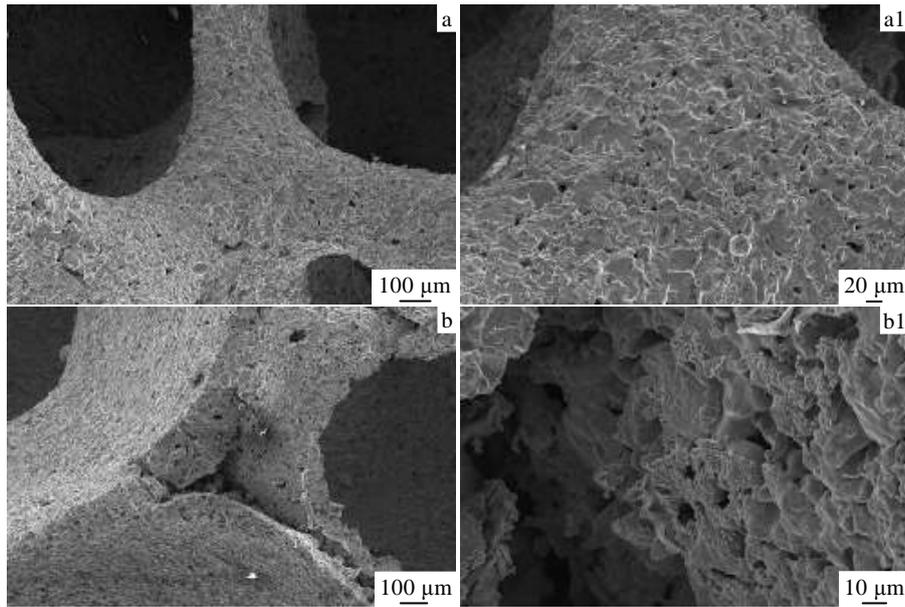


图 3 细孔泡沫钛孔棱形貌

Fig.3 Morphologies of pore edge of titanium foam with fine pore: (a) pore edge and (b) section of pore edge

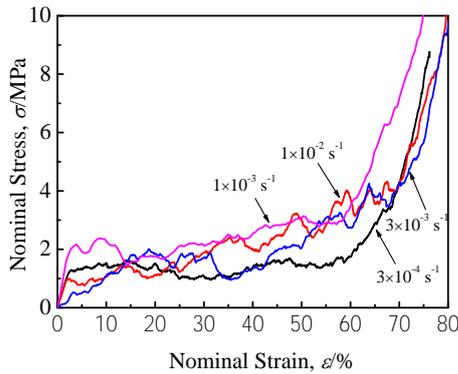


图 4 不同应变速率泡沫钛工程应力-工程应变曲线

Fig.4 Nominal stress-nominal strain curves of titanium foam under different strain rates

变的增加，应力单调增加，泡沫钛发生弹性变形；在平台阶段，应力并不随应变的变化而变化，而是呈现稳定的状态，在某一应力值附近波动，泡沫钛发生不均匀塑性变形，塑性变形由一个区域转移到另一个区域；在压实阶段，随着应变的增加，应力快速增加，泡沫钛发生断裂，断裂的孔棱交互叠压在一起。在实验应变速率范围内 ( $3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )，泡沫钛并没有表现出较强的应变速率敏感性，随着应变速率的提高，泡沫钛的力学性能并没有呈现出规律性变化，其压缩强度在 1.00~2.38 MPa 范围内。在  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  应变速率下，不同孔径的泡沫钛的工程应力-工程应变曲线如图

5 所示。研究发现，不同孔径的泡沫钛变形行为相似，

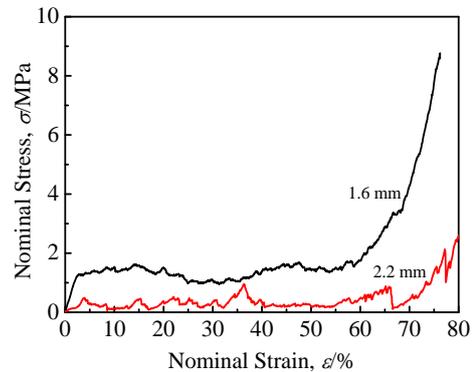


图 5 不同孔径泡沫钛工程应力-工程应变曲线

Fig.5 Nominal stress-nominal strain curves of titanium foam with different pore sizes

都呈现 3 个阶段，但孔径越大，压缩强度越小，当泡沫钛的平均孔径由 1.6 mm 增加至 2.2 mm 时，其压缩强度则由 1.5 MPa 降低至 0.24 MPa。

基于不同孔径泡沫钛的工程应力-工程应变关系曲线，对  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  应变速率条件下，泡沫钛的吸能特性进行了评价。能量吸收效率  $\mu$  可以用式 (1) 表示<sup>[15]</sup>：

$$\mu = \frac{\int_0^\epsilon \sigma_{\max} d\epsilon}{\epsilon} \tag{1}$$

式中： $\sigma_{\max}$  为应变  $0 \sim \epsilon$  范围内的最大应力；致密化应变可以用不同的方式进行定义，在本实验中致密化应

变用能量法进行定义，如式（2）所示。能量吸收效率达到最大时的应变被定义为致密化应变<sup>[16]</sup>。

$$\left. \frac{d\mu}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (2)$$

泡沫钛的单位体积吸收能量  $W_v$  可以用式（3）表示<sup>[16]</sup>：

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

不同孔径泡沫钛能量吸收效率如图 6 所示。研究显示，与泡沫钛的工程应力-工程应变曲线相对应，能量吸收效率也存在一个平台区域，在该平台区域内，泡沫钛具有较高的能量吸收效率，且孔径越小，能量吸收效率越高。对于平均孔径为 1.6 mm 的泡沫钛，其能量吸收效率平台值为 0.8，而对于平均孔径为 2.2 mm 的泡沫钛，其能量吸收效率平台值为 0.68。

不同孔径泡沫钛单位体积吸收能量如图 7 所示。观察发现，随着应变的增加，泡沫钛的吸收能量单调增加，在相同应变的条件下，小孔径泡沫钛的吸收能量高于大孔径泡沫钛，对于小孔径泡沫钛和大孔径泡沫钛，其最大吸收能量分别为 0.78 和 0.22 MJ/m<sup>3</sup> ( $\varepsilon=\varepsilon_d$ )。

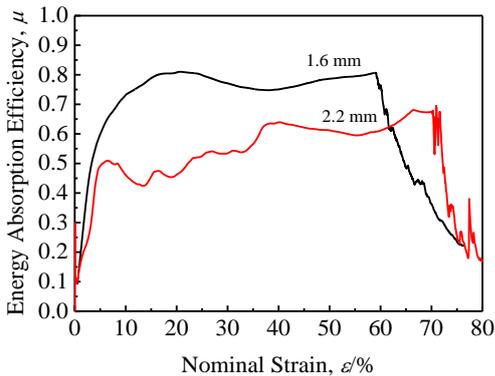


图 6 不同孔径泡沫钛能量吸收效率

Fig.6 Energy absorption efficiency of titanium foam with different pore sizes

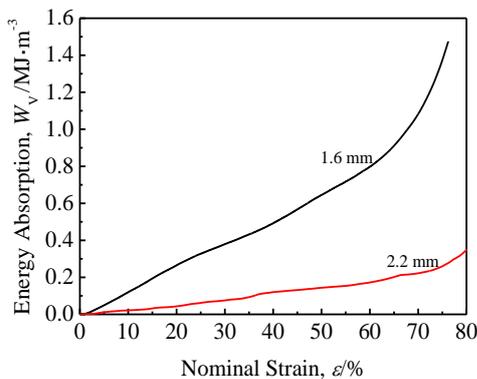


图 7 不同孔径泡沫钛单位体积吸收能量

Fig.7 Energy absorption per unit volume of titanium foam with different pore sizes

### 3 结 论

1) 泡沫钛继承了先驱体的结构特征，呈三维立体网状结构，其孔棱及孔棱内部均是非致密的，布满了大量的微孔。

2) 泡沫钛的压缩变形是应变速率不敏感的，且随着孔径的增加，压缩强度降低，能量吸收效率与单位体积的吸收能量也降低。

### 参考文献 References

[1] Dai Changsong(戴长松), Zhang Liang(张亮), Wang Dianlong(王殿龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 337

[2] Zhu Feng(朱峰). *World Nonferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2007(8): 28

[3] Niu Wenjuan(牛文娟), Bai Chengguang(白晨光), Qiu Guibao(邱贵宝) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2009, 27(4): 301

[4] Dunand D C. *Advanced Engineering Materials*[J], 2004, 6: 369

[5] Hu Yuebo(胡曰博), Zhang Xinna(张新娜), Sun Wenxing(孙文兴) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S3): 297

[6] Zhang Yan(张艳), Tang Huiping(汤慧萍), Li Zengfeng(李增峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(S1): 476

[7] Ahmad S, Muhamad N, Muchtar A *et al. International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*[J], 2010, 5(2): 244

[8] Li Boqiong(李伯琼), Wang Deqing(王德庆), Lu Xing(陆兴). *Journal of Dalian Railway Institute*[J], 2004, 25(1): 74

[9] Niu Wenjuan, Bai Chengguang, Qiu Guibao *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 506: 148

[10] Murray N G D, Dunand D C. *Composites Science and Technology*[J], 2003, 63: 2311

[11] Bing Ye, Dunand D C. *Materials Science and Engineering A* [J], 2010, 528: 691

[12] Xiang Changshu, Zhang Yan, Li Zengfeng *et al. Procedia Engineering*[J], 2012, 27: 768

[13] Liang Fanghui(梁芳慧), Wang Keguang(王克光), Zhou Lian(周廉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(10): 1013

[14] Vasconcellos L M R D, Oliveira M V D, Graça M L D A *et al.*

- Materials Research*[J], 2008, 11(3): 275
- [15] Mondal D P, Jha N, Gull B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 560: 601
- [16] Li Q M, Magkiriadis I, Harrigan J J. *Journal of Cellular Plastics*[J], 2006, 42: 371

## Pore Structure and Mechanical Properties of Titanium Foam

Wang Yaoqi<sup>1,2,3</sup>, Liu Peisheng<sup>4</sup>, Hou Hongliang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yanling<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

(2. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

(3. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China)

(4. The Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Two kinds of titanium foam with different pore structures were prepared by a slurry method. The pore structure and morphology of titanium foam were observed by digital camera and scanning electron microscope. The mechanical properties and energy absorption properties of titanium foam were investigated by the static compression tests. The results show that the titanium foam prepared by the slurry method inherits the structure of precursor, and has a 3D net structure. The edge of titanium foam is not compact, on which there are many fine pores. Titanium foam is not sensitive to strain rates, and the yield strength is in the range of 1.00~2.38 MPa at strain rate of  $3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Titanium foam has the properties of absorbing energy, and the titanium foam of fine pore and coarse pore can absorb the max energy of 0.78 and 0.22 MJ/m<sup>3</sup>, respectively.

**Key words:** slurry method; titanium foam; pore structure; mechanical properties

---

Corresponding author: Wang Yaoqi, Master, Senior Engineer, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701237, E-mail: xiaoqigh@sina.com