



网状结构高孔率泡沫钛的特性

刘培生¹, 侯红亮², 顷淮斌¹, 王耀奇², 张艳苓²

(1. 北京师范大学 核科学与技术学院 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 北京航空制造工程研究院, 北京 100024)

摘要: 网状泡沫钛属于弹脆性多孔材料, 其压缩曲线的平台区为锯齿形, 并在总体上呈缓慢增长的趋势; 其平台区结束的极限应变较大, 且密实化阶段的应力-应变曲线不是那么陡峭。采用浸浆烧结法制备获得了一种孔率在85%~90%之间、孔径分布在1~3 mm之间的网状泡沫钛。结果表明: 该泡沫钛制品的热导率随着样品孔率的提高而明显地减小, 且总体上具有良好的隔热性能, 孔率为87%~89%的试样的室温热导率为0.4~0.8 W/(m·K)。此外, 还测试该泡沫钛试样在200~6300 Hz声频范围内的吸声系数, 发现其第一共振频率出现在4000 Hz左右, 此时试样的吸声系数达到约0.9。

关键词: 多孔材料; 泡沫金属; 泡沫钛; 特性; 网状结构

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Characteristic of highly porous foamed titanium with netlike structure

LIU Pei-sheng¹, HOU Hong-liang², QING Huai-bin¹, WANG Yao-qi², ZHANG Yan-ling²

(1. Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification, Ministry of Education,
College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: The foamed titanium belongs to the elastic-brittle material, and its compression curve has a hackle-like plateau and rise slowly. The terminal strain is quite large when this plateau ends, and the stress-strain curve in the densification stage is not so steep. A sort of reticulated foamed titanium with porosity of 85%–90% and pore diameter of 1–3 mm was prepared by the organic foam impregnating method. The results show that the thermal conductivity decreases markedly with increasing porosity for this foamed titanium, which performs a good heat-insulation. The room-temperature thermal conductivity of the sample with 87%–89% porosity is 0.4–0.8 W/(m·K). In addition, the sound absorption coefficient of this foamed titanium is also measured in 200–6300 Hz, the first resonant frequency occurs at about 4000 Hz, and the sound absorption coefficient reaches up to 0.9.

Key words: porous material; foamed metal; foamed titanium; characteristic; netlike structure

泡沫金属是一种轻质结构的多孔材料, 同时具有消音降噪、吸能减震、隔热阻火、电磁屏蔽等功能特性^[1-6]。人们对泡沫铝开展了大量的工作, 制备工艺和性能研究都取得了丰富的成绩^[1-12]。相对于金属铝, 金属钛有着更高的熔点、更好的耐腐蚀性、更低的热导

率和良好的生物相容性。泡沫钛比泡沫铝更耐高温、更耐腐蚀, 隔热性更好, 因此, 在温度和环境等要求更苛刻的情况下, 特别是在航空、航天、军事等方面具有更大的优势。而且, 泡沫钛的生物相容性还为其在生物医学领域开辟了良好的应用前景。

基金项目: 北京市凝聚态物理重点学科共建项目(XK100270454); 北师大测试基金 C14 支持项目

收稿日期: 2014-08-27; **修订日期:** 2014-11-15

通信作者: 刘培生, 教授, 博士; 电话: 010-58806024; E-mail: Liu996@263.net

由于金属钛的熔点较高,而且较易氧化,因此,制备泡沫钛比泡沫铝困难,很难通过液态工艺来制备泡沫钛,目前主要技术是粉末冶金法^[13-17]。而且,已研制出来的泡沫钛制品的孔率一般都不高,大多在 70% 以下^[18-20],少数情况下能够很高,但也在 80% 以下^[16,21]。后来,也有电沉积工艺制备三维网状泡沫钛的研究,虽有更高孔率的制品,但工艺复杂、成本高,而且不利于环保。

泡沫金属的性能研究以力学性能最为基本^[1]。而在泡沫钛的研究方面,各项工作都远少于泡沫铝的。目前,对泡沫钛的研究应用主要是钛合金多孔植入材料,性能研究也主要是对泡沫钛医学植入方面的工作,研究的试样孔率一般在 75% 以下^[22-27]。而作为工程材料,有关其他很多方面的探讨相对很少。

由于制备泡沫钛的实际可行技术有着不同于泡沫铝的特点,因此,能够得到的孔隙结构和形态也就有着不同于泡沫铝的特征。目前,仍缺乏对泡沫钛足够的系统性研究,对其吸声性能、导热性能、电磁屏蔽性能等方面的研究甚少,有关其研究鲜见报道。为了实现更广阔的工程应用,在其基本性能方面开展更多的工作,有着良好的实践价值。本文作者将研究目标放到挂浆烧结法制备网状泡沫钛的研究上,不但有可能获得性能符合应用要求的较高孔率制品,而且可以降低成本,减少环境污染,因而,具有良好的实际意义。鉴于对泡沫金属的轻质结构应用与声、热等基本物理性能应用要同时发挥作用的需求,本文作者利用挂浆法制备了高孔率网状泡沫钛,在网状泡沫金属基本拉压研究^[1,28-31]的基础上,对该泡沫钛的压缩行为、导热性能以及吸声特性等基本性能一并进行了初步的探讨,获得了一些有参考作用的结果。

1 实验

1.1 泡沫钛的制备

本研究中采用挂浆烧结法^[6]、以钛粉和镍粉的混合粉末为主原料制备泡沫钛。

1) 基体的选择

挂浆工艺首先需要孔隙相互连通的易去除性基体,聚氨酯的热分解温度在 400~600 °C 左右,实验表明其适合于钛合金粉末在 800 °C 以上的烧结。而且,不同孔隙结构的聚氨酯泡沫也比较容易获得。因此,本文作者决定选用通孔的聚氨酯泡沫塑料作为本工艺的基体。

2) 挂浆

原料采用粒度小于 40 μm 的脱氢钛粉和电解镍粉,按质量比 75:25~85:15 在球磨机中混料一定时间,将两种金属粉末混合均匀。将混合均匀的金属粉末与 L1 黏结剂按照一定比例配制成浆料,配制比例为:金属粉末松装体积和黏结剂体积比为 1:(1~3)。充分搅拌均匀后,把浆料挂入泡沫塑料基体的孔隙中,挤出多余的浆料,借助于基体自身弹性得到挂浆坯体,放到干燥箱中进行吹风加热干燥,首先在 80 °C 的温度下干燥 2 h,然后在 120 °C 的温度下再干燥 2 h。挂浆干坯的孔隙结构传承了泡沫塑料基体的基本构架。

3) 烧成

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,先在室温(25 °C)下抽真空至炉膛压力小于 5×10^{-2} Pa,再设程用 30 min 的时间升温至 120 °C,保温 2 h,持续抽真空最后达到最小压力在 10^{-2} Pa 的水平。然后正式设定程序运行,最后的设程升温保温过程如下:以 5 °C/min 的升温速率将炉温由 120 °C 提高到 400 °C;再以 2 °C/min 的升温速率将炉温由 400 °C 提高到 500 °C,过程耗时约为 50 min;接着直接将炉温提高到 800~1000 °C,然后保温 2 h 以上。完成后关机炉冷,保持真空炉冷至 120 °C 以下才可以出炉取样,得到的制品是如图 1 所示的三维网状结构泡沫钛。

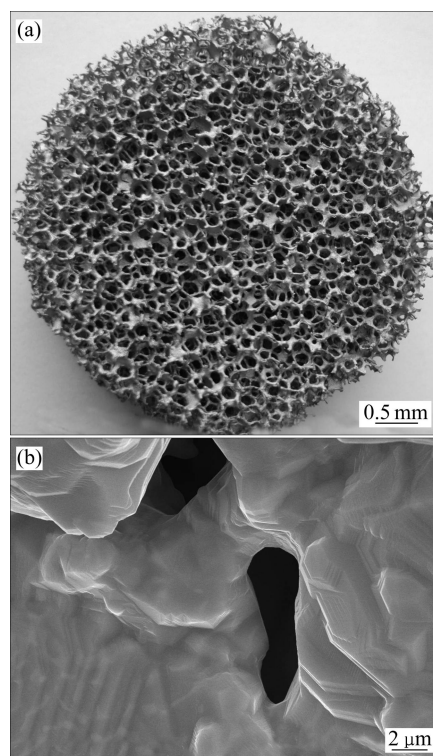


图 1 所制三维网状泡沫钛的形貌

Fig. 1 Morphologies of 3D reticulated foamed titanium:

(a) Circular sample; (b) Microporous structure of pore

这和挂浆干燥后的坯体孔隙结构情况一致,从而也从根本上传承了泡沫塑料基体的孔隙结构,只是在泡沫塑料基体仅存在孔棱的基础上出现了少量的孔壁结构。

1.2 性能测试

采用 X'PertPRO MPD 型 X 射线衍射仪对金属粉末混合原料以及所得泡沫钛制品进行了 XRD 分析测试(见图 2),结果表明:钛粉和镍粉经球磨混料后物相没有出现变化,仍然是金属钛和金属镍的特征谱线;烧结后的制品则不再显示金属镍的衍射峰,取而代之的是生成的新相 NiTi_2 , 金属钛保持为主相。

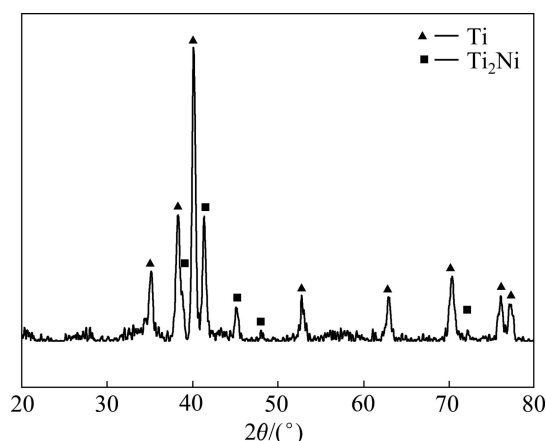


图2 所得泡沫钛制品的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of foamed titanium

为了实现对制品孔隙结构的控制,首先要选好泡沫塑料基体。虽然基体的孔隙结构在很大程度上决定了最后泡沫钛制品的孔隙结构,但最后制品的孔隙结构也在基体孔隙结构的基础上有一定的改变。比如挂浆过程中浆料的性质、烧结过程中的热处理制度等都会对最后制品的孔隙结构产生作用,特别是孔隙尺寸的收缩,而且孔隙形状也有相应的变化,比如孔壁的出现。

2 结果与分析

2.1 泡沫钛的压缩行为

泡沫金属的结构特点使其不能完全适用传统金属材料的压缩实验方法,本文作者参考 ISO 13314:2011(E)《多孔金属压缩测试》国际标准对其进行室温准静态压缩测试。制备用于压缩试验的样品是尺度大致为 d

30 mm×35 mm 的泡沫钛圆柱,孔率约 85%,平均孔径 2 mm 左右。在测试开始之前,先在设备的两个压头端面上刮抹一层石墨,以尽量减小设备压头与试样端面的位移摩擦。压缩试验采用 WDW-3050 型万能试验机,设备最大载荷为 5 t,压缩速度设定为 1 mm/min。

本泡沫钛的压缩曲线(见图 3)显示了初始应力随应变较快提高的弹性阶段、中期应力随应变增加基本保持稳定的平台阶段以及最后应力又随应变较快增长的密实化阶段。这一规律与泡沫铝等泡沫金属基本相同^[1],但“平台区”明显的锯齿状波动表明其逐层发生的坍塌属于脆性破坏,本网状泡沫钛属于弹脆性多孔材料。通过对压缩过程的观察还可以看到,样品中孔隙的逐层坍塌破碎,主要是通过紧靠压头的孔隙层优先发生破坏而推进的。压缩时样品孔隙坍塌产生的固体碎块有一部分会直接崩落到试样之外,更多的虽然起初会填充到还未坍塌或未完全坍塌的孔隙内,但其中还会有一部分碎块(主要是尺度较小的碎块)在后续的压缩进程中通过试样的连通网孔而移动、脱落到试样之外,所以整个压缩过程都不会出现比较完全的压实状态,最后是将样品压成了碎末。因此,本压缩曲线的“平台区”可以延伸到应变更高的状态,而且“密实化”阶段的应力也不会随应变增长太快,即在这个阶段的应力-应变曲线不会太陡峭。

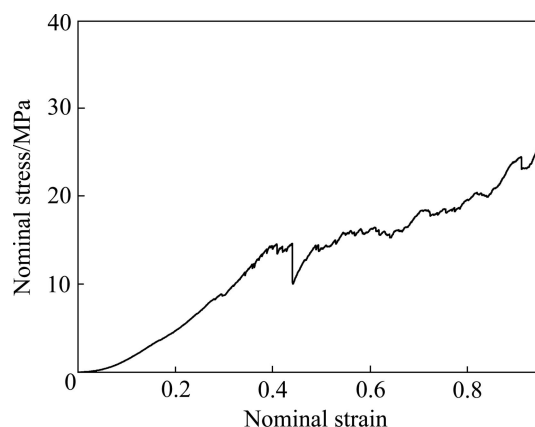


图3 网状泡沫钛的压缩曲线

Fig. 3 Relationship between nominal stress and nominal strain of foamed titanium

当然,由于上述坍塌碎块填充到还未坍塌的孔隙内会产生桥架支撑作用,从而引起“平台区”应力值随着应变增大而发生缓慢的增长。碎块在试样中的不断累积,使得试样不断趋于“密实化”,最后还是导致应力值比“平台区”有较快一些的提高,即达到“密实化区”。只是在该压缩曲线中,最后的这一“密实化

区”的出现,要明显滞后于常见的泡沫铝等弹塑性泡沫材料。但是,这种通过碎块在孔隙中堆积而形成的“密实化”,其“密实”部分内部存在的刚性空隙很多,这完全不同于泡沫铝等弹塑性泡沫材料在对应阶段形成的密实化结构。

采用 SEM4800 型冷场发射扫描电子显微镜对试样压缩破坏的孔棱断口微观形貌进行观测,对应形貌显微照片见图 4。由图 4 可看出,其孔棱断口形貌为解理状,属于脆性断裂破坏特征,与图 3 中压缩曲线的锯齿平台相对应。

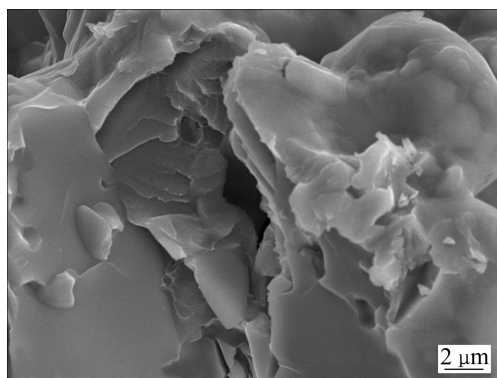


图 4 泡沫钛试样压缩破坏后的断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of pore-strut of foamed titanium

2.2 泡沫钛的热导率

热导率是最重要和主要的热物性能,采用 Hot Disk 热常数分析仪进行常温热导率测试试验,使用的外部护层材料为聚酰亚胺。采用制备的能够进行热导率测试的泡沫钛试样呈圆板状,表观尺寸大致为 $d 70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,其表观体密度在 $0.5 \sim 0.7 \text{ g/cm}^3$ 之间,孔率为 $87\% \sim 89\%$ 。在测试样品的热导率时,被膜装的镍螺旋探头夹于两块样品之中。记录测试时间内探头的阻值变化,建立探头所经历的温度随时间变化的关系。根据样品的热导率大小选择不同的测试参数,包括输出功率、测试时间、探头尺寸等,对热导率较小的材料一般选用较低的输出功率和较长的测试时间。

用于热导率测试的有关样品参数见表 1。测试试验结果表明:对于体密度在 $0.5 \sim 0.7 \text{ g/cm}^3$ 之间、平均孔率在 $87\% \sim 89\%$ 之间的本泡沫钛试样,其热导率大致在 $0.4 \sim 0.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 之间(不同试样的对应值一同列于表 1)。该热导率指标小于几个知名品牌的泡沫铝产品,如体密度在 $0.3 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ 之间的 Alulight 产品对应的热导率为 $8.9 \sim 13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,体密度为 0.54 g/cm^3 的 Cymat 产品对应的热导率为 $0.91 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,体密度在 $0.15 \sim 0.30 \text{ g/cm}^3$ 之间的 Norsk Hydro 产品对应的热导率为 $1.5 \sim 2.1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。因此,本泡沫钛制品具有更好

的隔热性能。

表 1 样品的参数及测试结果

Table 1 Parameters and testing results of samples.

Sample No.	Pore-diameter range/mm	Mean pore-diameter/mm	Mean porosity/%	Mean thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
1	1.0–2.0	1.6	87.0	0.8
2	1.5–3.0	2.2	88.6	0.4
3	1.0–3.0	1.9	87.4	0.6

对结果进行分析可以看到,对于本泡沫钛制品,其室温热导率比较明显地呈现出随着样品孔率提高而减小的趋势。在本研究对象和研究条件的范围内,没有发现这一变化规律受到样品孔隙大小及孔径分布等结构因素的影响。

泡沫金属多孔材料的热传导由金属物质的固体传导、孔隙介质的热传导、孔隙中的对流传热以及材料的辐射传热所组成。高温情况下,辐射传热起主导作用;常温常压情况下,当孔径大于 10 mm 时,才会有显著的自然对流。因此,当多孔体的孔径不是太大,则在常温常压情况下可以忽略对流传热和辐射传热两个因素。如果此时孔隙中填充的又是热导率较低的介质(比如空气),那么整个多孔试样的热导率就可以只考虑固相骨架的热传导了^[1, 32]。试样的孔率越高,其金属骨架所占体积含量就越低,因此,对应的固相热传导就越小。表 1 中的数据充分展示了这一点。金属钛的常温热导率是 $15.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,孔率为 88.6% 的泡沫钛试样的常温热导率只有不到 $0.4 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,为致密金属钛的 2.7% 左右,这说明本泡沫钛制品具有优秀的隔热性能。

2.3 泡沫钛的吸声性能

通过常用的驻波管法对本泡沫钛试样的吸声系数进行检测^[6]。使用设备为 JTZB 型吸声系数测试系统,其原理是在一个刚性圆管中,由扬声器向一端的试样发射声波,通过入射波和试样反射波的叠加产生驻波声场。利用可移动的探管接收这种声场中声压极大值 $p_{\max}$ 和极小值 $p_{\min}$,从而计算出材料的吸声系数:

$$\alpha_N = \frac{4p_{\max} / p_{\min}}{(1 + p_{\max} / p_{\min})} \quad (1)$$

用于吸声试验的样品孔率约 88.5% ,孔径分布大致在 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 之间,平均孔径约为 1.6 mm ,厚度在 0.8 cm 左右。使用三分之一倍频程法来测量试样的吸声性能,该法基于驻波比原理。在本测试系统可以测试的 $200 \sim 6300 \text{ Hz}$ 这一声频范围内,各个三分之一倍频程

的中心频率分别为 200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000、6300 Hz。

图 5 所示为测试得到的泡沫钛试样吸声系数曲线。从图 5 中可以看出,当声波频率在 200~1600 Hz 这一区间时,试样的吸声系数维持在一个很低的值;声波频率超过 1600 Hz 后,试样的吸声系数开始缓慢提高,一直到 3150 Hz;当声波频率为 4000 Hz 时,试样出现第一共振峰,此时试样的吸声系数达到 0.9 左右;当声波频率为 5000 Hz 时,吸声系数又下降到 0.3~0.4 左右;当声波频率为 6300 Hz 时,吸声系数继续升高到 0.6 以上。

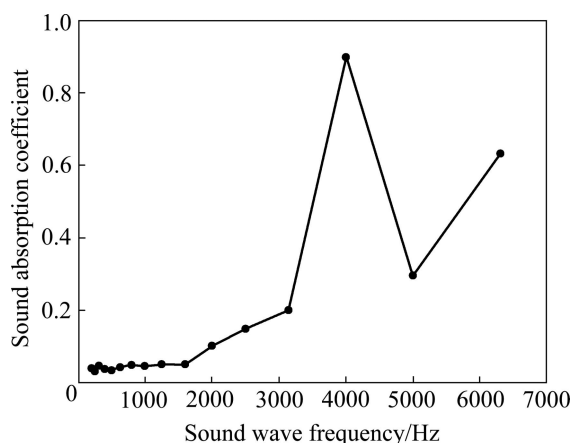


图 5 样品的吸声曲线

Fig. 5 Sound absorption curve of sample

泡沫金属的吸声机制主要有摩擦和黏滞耗散、反射衰减和固体阻尼等^[32]。摩擦和黏滞耗散是由孔隙内的流体随声波振动而与固体孔壁发生相互摩擦和黏滞作用所引起,摩擦和黏滞作用使部分声能转化为热能而耗散;反射衰减是通过声波在孔隙表面发生的漫反射而干涉消音;固体阻尼是材料本身的内在阻尼衰减。由于大多数金属和陶瓷的内在阻尼能力都较低,因此,泡沫金属对声波的衰减机制主要是摩擦和黏滞效应,以及丰富的内部孔隙表面的不规则反射效应。低频声波的能量较小,在多孔体的孔壁上发生反射时产生弹性碰撞,能量损失较少,因此,本泡沫钛试样在 200~1600 Hz 这一声波频率范围内时,其吸声系数一直在 0.1 以下。当声波频率提高到 1600~3150 Hz 时,试样的吸声系数虽随频率增大而有所增加,但仍然没有超过 0.2。能量较大的高频声波则有较大的振幅,可以在多孔体的孔壁上发生非弹性碰撞,从而引起较多的能量损失。所以,当声波频率大于 3150 Hz 后,本

泡沫钛试样的吸声系数得到显著提升。

3 结论

1) 制备获得的网状泡沫钛的孔隙尺度为毫米量级,孔率在 85%~90%之间,属于一种高孔率的多孔钛材料。制品包含两个物相,其中金属钛为主相,金属间化合物 NiTi_2 为副相。

2) 此网状泡沫钛属于弹脆性多孔材料,其压缩曲线包括常见泡沫材料所有的 3 个阶段,即弹性区、压缩平台区和密实化区。其中“平台区”呈锯齿形,并且可以延伸到应变较高的状态;其“密实化”过程是孔隙坍塌碎块的不断堆积过程,而且密实化阶段的应力-应变曲线不会太陡。

3) 泡沫钛试样的热导率随孔率的提高而出现快速的下降,总体上其制品具有良好的隔热性能:孔率在 87%~89%之间、孔径分布在 1~3 mm 之间的试样,其室温热导率大致在 0.4~0.8 W/(m·K)之间。

4) 泡沫钛试样在所测声频范围内(200~6300 Hz)只出现一个共振频率,该第一共振频率为 4000 Hz 左右,此时试样的吸声系数在 0.9 左右;声波频率为 5000 Hz 时,吸声系数从共振吸声下降到 0.3~0.4 左右;声波频率为 6300 Hz 时,再继续升高到 0.6 以上,可望随着声波频率的继续升高而出现第二共振频率。

REFERENCES

- [1] ASHBY M F, EVANS A, FLECK N A, GIBSON L J, HUTCHINSON J W, WADLEY H N G. Metal foams: A design guide[M]. Boston: Elsevier, 2000.
- [2] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.
- [3] LIU P S, LIANG K M. Functional materials of porous metals made by P/M, electroplating and some other techniques[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(21): 5059-5072.
- [4] 左孝青, 孙加林. 泡沫金属制备技术研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(3): 452-456.
ZUO Xiao-qing, SUN Jia-lin. Review on foam metal manufacture techniques[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(3): 452-456.
- [5] 戴长松, 张亮, 王殿龙, 胡信国. 泡沫材料的最新研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 337-340.
DAI Chang-song, ZHANG Liang, WANG Dian-long, HU Xin-guo. The newest developments of foam materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(3): 337-340.

- [6] 刘培生, 陈 祥, 李言祥. 泡沫金属[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
LIU Pei-sheng, CHEN Xiang, LI Yan-xiang. Metal foams [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
- [7] 王录才, 王 芳, 游晓红, 于利民. 泡沫铝的气流噪声降噪性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): s91-s93.
WANG Lu-cai, WANG Fang, YOU Xiao-hong, YU Li-min. Gas noise damping property of foamed aluminum[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): s91-s93.
- [8] 罗洪杰, 姚广春, 张晓明, 魏 莉, 吴林丽. 闭孔泡沫铝材料制备[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1377-1381.
LUO Hong-jie, YAO Guang-chun, ZHANG Xiao-ming, WEI Li, WU Lin-li. Formation and evolution of bubble in fabricating closed-cell aluminum foam[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1377-1381.
- [9] 周向阳, 龙波, 刘宏专, 李 劫. 轻合金泡沫材料制备技术研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(9): 61-63.
ZHOU Xiang-yang, LONG Bo, LIU Hong-zhuan, LI Jie. Development of light alloy foam materials preparation technology [J]. Materials Review, 2005, 19(9): 61-63.
- [10] 何思渊, 龚晓路, 何德坪. 多孔铝合金连通孔对压缩性能的影响[J]. 材料研究学报, 2009, 23(4): 380-386.
HE Si-yuan, GONG Xiao-lu, HE De-ping. Effect of "through-hole" on porous aluminum alloy compressive mechanical properties[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(4): 380-386.
- [11] 范雪柳, 陈 祥, 刘兴男, 李言祥. 吹气法制备泡沫铝的性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1320-1327.
FAN Xue-liu, CHEN Xiang, LIU Xing-nan, LI Yan-xiang. Properties of aluminum foam prepared by gas injection method[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1320-1327.
- [12] 黄 粒, 杨东辉, 王 辉, 叶 丰, 吕昭平. 钪锆元素增强泡沫铝合金的压缩和吸能性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 718-723.
HUANG Li, YANG Dong-hui, WANG Hui, YE Feng, LÜ Zhao-ping. Improving compressive strength and energy absorption properties of cellular Al foams alloyed with Sc and Zr[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(3): 718-723.
- [13] DUNAND D C. Processing of titanium foams[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(6): 369-376.
- [14] 李 艳, 郭志郝, 郝俊杰. 医用多孔钛植入材料凝胶注模成形工艺研究[J]. 粉末冶金工业, 2008, 18(1): 10-13.
LI Yan, GUO Zhi-meng, HAO Jun-jie. Study on gel-casting of medical porous titanium implants[J]. Powder Metallurgy Industry, 2008, 18(1): 10-13.
- [15] 李士同, 朱瑞富, 甄 良, 吕宇鹏, 赵光锋, 詹英杰, 雷廷权. 烧结温度对多孔钛组织结构与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 93-95.
LI Shi-tong, ZHU Rui-fu, ZHEN Liang, LÜ Yu-peng, ZHAO Guang-feng, ZHAN Ying-jie, LEI Ting-quan. Effect of sintering temperature on microstructure and properties of porous titanium[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(2): 93-95.
- [16] WEN C E, XIONG J Y, LI Y C, HODGSON P D. Porous shape memory alloy scaffolds for biomedical applications: A review[J]. Physica Scripta, 2010, T139: 014070.
- [17] 胡海波, 刘会群, 王杰恩, 易丹青, 傅 上, 孙武令. 生物医用多孔钛及钛合金的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 262-266.
HU Hai-bo, LIU Hui-qun, WANG Jie-en, YI Dan-qing, FU Shang, SUN Wu-ling. Research progress of biomedical porous titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2012, 26(19): 262-266.
- [18] 李伯琼, 王德庆, 陆 兴. 粉末冶金多孔钛的研究[J]. 大连铁道学院学报, 2004, 25(1): 74-78.
LI Bo-qiong, WANG De-qing, LU Xing. Study of porous Ti by powder metallurgy[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 2004, 25(1): 74-78.
- [19] 张 艳, 汤慧萍, 李增峰, 向长淑. 泡沫钛合金的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(S1): s476-s481.
ZHANG Yan, TANG Hui-ping, LI Zeng-feng, XIANG Chang-shu. Progress in titanium alloy foam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(S1): s476-s481.
- [20] 张 力, 曹书豪, 段 可, 翁 杰. 颗粒造孔制备多孔钛中结构及性能影响因素[J]. 热加工工艺, 2013, 42(18): 84-87.
ZHANG Li, CAO Su-hao, DUAN Ke, WENG Jie. Effects of processing condition on microstructure and properties of porous titanium prepared by porogen-based vacuum sintering[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(18): 84-87.
- [21] 刘学斌, 马 蓼, 王秀锋, 吴学庆, 林建国, 文翠娥. 开孔泡沫钛力学性质的温度相依性[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(2): 277-280.
LIU Xue-bin, MA Mo, WANG Xiu-feng, WU Xue-qing, LIN Jian-guo, WEN Cui-e. Temperature-dependence of mechanical properties of open-cell titanium foam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(2): 277-280.
- [22] TAKEMOTO M, FUJIBAYASHI S, NEO M, SUZUKI J, KOKUBO T, NAKAMURA T. Mechanical properties and osteoconductivity of porous bioactive titanium[J]. Biomaterials, 2005, 26(30): 6014-6023.
- [23] 王玺涵, 李述军, 贾明途, 郝玉琳, 杨 锐, 郭正晓. 多孔医用Ti-24Nb-4Zr-8Sn合金的制备和力学性能[J]. 材料研究学报, 2010, 24(4): 378-382.
WANG Xi-han, LI Shu-jun, JIA Ming-tu, HAO Yu-lin, YANG Rui, GUO Zheng-xiao. Fabrication and mechanical properties of porous Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy for Biomedical applications[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(4): 378-382.
- [24] 张宇鹏, 赵四勇, 马 骁, 张新平. 高线性超弹性多孔NiTi合

- 金的压缩力学行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2167–2172.
- ZHANG Yu-peng, ZHAO Si-yong, MA Xiao, ZHANG Xin-ping. Compression mechanical behavior of porous NiTi alloys exhibiting high linear superelasticity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2167–2172.
- [25] RESNINA N, BELYAEV S, VORONKOV A, KRIVOSHEEV A, OSTAPOV I. Peculiarities of mechanical behaviour of porous TiNi alloy, prepared by self-propagating high-temperature synthesis[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(23): 6364–6367.
- [26] 刘 超, 杨海林, 李 婧, 阮建明. 生物医用多孔 Nb-Ti 合金的孔隙率和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 752–757.
- LIU Chao, YANG Hai-lin, LI Jing, RUAN Jian-ming. Porosity and mechanical properties of biomedical porous Nb-Ti alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(3): 752–757.
- [27] HSU H C, HSU S K, WU S C, WANG P H, HO W F. Design and characterization of porous titanium foams with bioactive surface sintering in air[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 575(5): 326–332.
- [28] LIU P S. Tensile fracture behavior of foamed metallic materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 384(1/2): 352–354.
- [29] 刘培生. 泡沫金属双向承载的力学模型[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 567–574.
- LIU Pei-sheng. Mechanical model for metallic foams under biaxial loads[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(4): 567–574.
- [30] LIU P S. Mechanical Relation of foamed metals under uniaxial and biaxial loads of collective tension and compression[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 507(1/2): 190–193.
- [31] LIU P S. Mechanical relations for porous metal foams under several typical loads of shearing, torsion and bending[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(29/30): 7961–7966.
- [32] 奚正平, 汤慧萍. 烧结金属多孔材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- XI Zeng-ping, TANG Hui-ping. Sintered metallic porous materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- (编辑 李艳红)