

多孔 Ti-Nb 合金材料的制备与性能研究

张美丽^{1,2}, 叱小彤¹, 周春生^{1,2}, 刘彦峰^{1,3}, 方 琛¹, 郑郭刚¹

(1. 商洛学院, 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000; 2. 商洛学院, 陕西省矿产资源清洁高效转化与新材料工程研究中心, 陕西 商洛 726000; 3. 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用粉末冶金添加造孔剂法制备多孔 Ti-Nb 合金, 研究不同 Nb 含量对合金物相结构、微观孔隙形貌、孔隙率、抗压强度及耐腐蚀性能的影响。研究表明: 多孔 Ti-Nb 合金具有 α 和 β 双相组织, 随 Nb 含量的增加, 材料中的 β 相含量逐渐增大, Nb 含量为 25% ~ 30% 时材料的孔隙大小和分布较均匀, 平均孔径为 300 μm 左右; 随 Nb 含量的增加, 材料的孔隙率随之增大, 径向收缩率和抗压强度逐渐减小, 耐腐蚀性呈先增大后减小趋势, 在 Nb 含量 30% 时材料的耐腐蚀性最强, 其孔隙率为 33.6%, 径向收缩率为 7.3%, 抗压强度为 130 MPa。

关键词: 多孔 Ti-Nb 合金; 粉末冶金; 造孔剂; 相结构; 孔隙形貌; 抗压强度; 耐腐蚀性

中图分类号: TF823, TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0084-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.011

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Preparation and properties of porous Ti-Nb alloy materials

Zhang Meili^{1,2}, Chi Xiaotong¹, Zhou Chunsheng^{1,2}, Liu Yanfeng^{1,3}, Fang Chen¹, Zheng Guogang¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo 726000, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center for Mineral Resources Clean & Efficient Conversion and New Materials, Shangluo University, Shangluo 726000, Shaanxi, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: The porous Ti-Nb alloy was prepared by adding pore-forming agent in powder metallurgy. The effects of Nb content on the phase structure, pore morphology, porosity, compressive strength and corrosion resistance of the alloy were investigated. The results show that the porous Ti-Nb alloy has α and β phase structure. With the increase of Nb content, the content of β phase in the material increases gradually. When the content of Nb is 25% ~ 30%, the pore size and distribution of the material are more uniform, and the average pore size is about 300 μm . With the increase of Nb content, the porosity of the material increases, while the radial shrinkage rate and the compressive strength gradually decrease, and the corrosion resistance increases first and then decreases. When the Nb content is 30%, the corrosion resistance of the material is the strongest, with the porosity of 33.6%, the radial shrinkage rate of 7.3% and the compressive strength of 130 MPa.

Key words: porous Ti-Nb alloy, powder metallurgy, pore-forming agent, phase structure, pore morphology, compressive strength, corrosion resistance

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划资助项目 (20JK0618); 商洛市科技局科学技术研究发展计划项目 (2020-Z-0083); 国家大学生创新创业训练计划项目 (S202011396005)。

作者简介: 张美丽 (1985—), 女, 陕西商洛人, 硕士, 讲师, 主要从事有色金属多孔材料相关研究, E-mail: 283233650@qq.com。

0 引言

随着现代科学技术的发展以及人们对生命健康的日益重视,生物医用材料的制备、性能及应用等方面的研究引起了人们的广泛关注。钛及其合金因具有密度低、比强度高、耐蚀性好、植入人体后有良好的抗疲劳和生物相容性等优势,被广泛应用于人体骨骼替换和牙齿修复等领域,在生物医用材料领域具有较好的发展前景^[1-4]。近年来,世界各国都在研发具有更好生物相容性和更低弹性模量的第三代钛合金,即新型 β 型钛合金,这类合金中含稳定 β 相和降低弹性模量的元素,比如 Nb、Zr、Ta、Sn、Pt、Mo 等低毒元素^[5-7]。而 Nb 元素因其安全低毒并能与金属 Ti 形成无限固溶体,同时可降低 Ti 基体的弹性模量,提高 Ti 基体的强度和耐磨性,与金属 Ti 具有更好的力学和生物相容性,同时 Nb 元素在人体内可以作为一些酶的辅助因子,有助于调节人体内的酸碱平衡度^[8],因此对 Ti-Nb 多孔材料的相关研究也越来越多。

目前,粉末冶金法因具有制备工艺简单、成本低、材料成分和孔隙大小可控等优势^[9],被广泛用于多孔材料的制备。同时,参考文献研究^[10-13]发现大部分 Ti-Nb 合金的研究都集中在弹性模量的降低上,对其耐腐蚀性的研究报道较少。为有效改善钛合金的生物相容性,解决其在人体内产生的“应力屏蔽”效应,提高材料在人体内耐腐蚀性,笔者采用粉末冶金添加造孔剂法制备多孔 Ti-Nb 合金,深入研究不同的 Nb 含量对多孔钛合金微观孔隙结构、相组成、力学性能和耐腐蚀性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 材料

试验原材料采用上海超威纳米科技有限公司生产的高纯钛粉和铌粉,粉末平均粒径小于 $75\text{ }\mu\text{m}$,纯度 $\geq 99.9\%$;同时选用硬脂酸锌粉末作为压制成型的脱模剂,碳酸氢铵颗粒作为造孔剂,纯度均为分析纯。

1.2 方法

试验首先在金属 Ti 粉中分别加入质量分数为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35% 的 Nb 粉, Ti 粉和 Nb 粉均经过 200 目($74\text{ }\mu\text{m}$)不锈钢标准筛进行筛分,然后在金属粉末中加入 25% 的碳酸氢铵颗粒,碳酸氢铵粒径均小于 $150\text{ }\mu\text{m}$ 。按原料配比将称量好的金属粉末放在 V 型混料机中进行均匀混

合 5 h,混合后的金属粉末装入 $\varnothing 20\text{ mm}$ 的模具中,在 WAW-300D 型微机控制电液伺服万能试验机上进行单向的压制成型,单向压力为 100 MPa,粉末压坯保压时间为 60 s;最后将金属粉末的压坯试样放在真空炉中进行高温烧结,烧结温度为 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温烧结时间为 1 h,具体的烧结工艺曲线如图 1 所示。

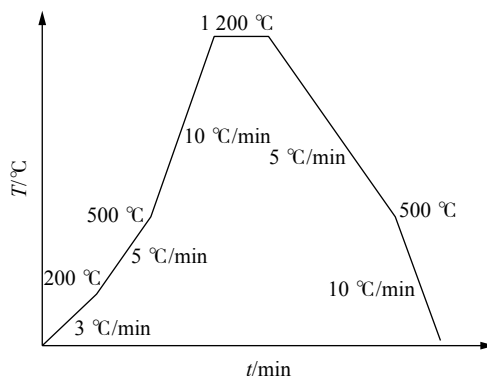


图 1 多孔 Ti-Nb 合金的烧结工艺曲线
Fig. 1 Sintering process curve of porous Ti-Nb alloys

采用 JSM-5600LV 型扫描电镜对不同 Nb 含量的多孔 Ti-Nb 合金进行微观孔隙形貌观察和 EDS 成分分析;用 BLK II -5FF-P 型 X 射线衍射仪分析材料的相结构;根据质量-体积称重法^[14]计算烧结试样的孔隙率;在 WAW-300D 型万能试验机上进行烧结试样的抗压强度性能测试,测试速度为 0.05 kN/s ;耐腐蚀性能测试首次将烧结试样放入酒精中超声波清洗 30 min,取出干燥后用环氧树脂对非测试面进行封装处理,并配制一定量的 Hank's 溶液^[15]模拟人体体液,并作为耐腐蚀性能测试的溶液,用电化学工作站测试材料的交流阻抗图谱和阳极极化曲线,试验采用三电极测试体系,其中以铂片做对电极,饱和甘汞电极做参比电极,多孔 Ti-Nb 合金做工作电极,开路电位为 $-2.5\sim 1.5\text{ V}$,扫描速度 10 mV/s ,采样频率 20 Hz 。

2 试验结果与分析

2.1 物相分析

经 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空烧结后,不同 Nb 含量的多孔 Ti-Nb 合金 XRD 分析图谱如图 2 所示。通过图谱分析可以看出,在基体 Ti 中添加一定量的 Nb 元素后,多孔 Ti-Nb 合金主要由 α 相和 β 相两种相组成,无其他相存在,说明添加的造孔剂碳酸氢铵对合金物相没有影响。且随着 Nb 含量的增加, α -Ti 的衍射峰强度逐渐减小,而 β -Ti 的衍射峰强度逐渐增大,

当基体中的 Nb 添加至 30% 时, β 相的衍射强度明显增大, 说明高温烧结后大部分的 Nb 元素固溶于 Ti 元素中, 通过反应形成了新的 β 相, 并扩大了 β 相区, 使得 β -Ti 的衍射峰强度出现增大的现象。Nb 元素的增加使得 Ti-Nb 合金逐渐由 α 相转变为 β 相, 形成 $\beta+\alpha$ 的双相组织, 且 β 相越来越多, α 相越来越少。

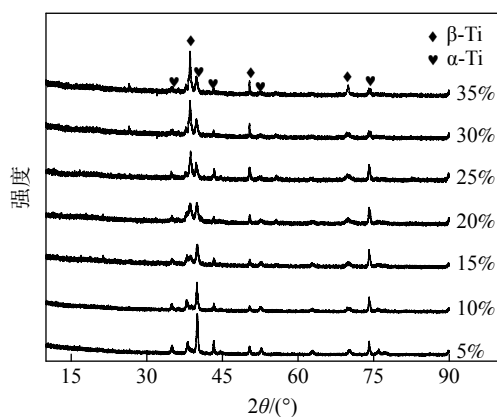


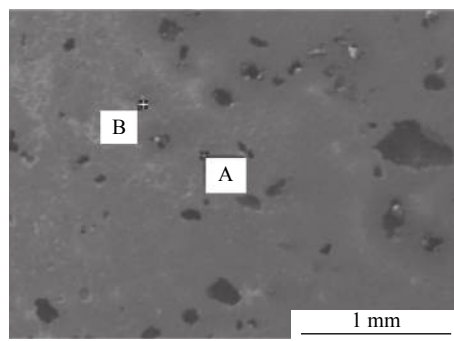
图 2 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

图 3 为多孔 Ti-Nb 合金试样的 EDS 分析结果。由图 3 可知, 多孔 Ti-Nb 合金中发现只含有 Ti、Nb 两种元素。大部分的灰色区域为 α 相和 β 相, 在灰色相上分布有少量的白色颗粒为 Nb 相, 形成原因是因为 Nb 的熔点较高, 在 1 200 °C 烧结 1 h, 烧结温度低且时间短, Nb 没有完全扩散进入基体 Ti 中, 反应不充分造成基体上分布有少量的 Nb 颗粒。XRD 分析未发现 Nb 的衍射峰, 可能是因为未固溶的 Nb 含量较少, 没有明显的衍射峰。

2.2 微观形貌

图 4 为不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的微观孔隙形貌。从图 4 可以看出, 由于在 Ti 基体中加入了 25% 的颗粒状碳酸氢铵作为造孔剂, 在高温烧结时造孔剂发生分解, 形成的气体从材料中逸出, 从而造成材料中原有造孔剂的位置留下大小不一的孔洞。Nb 的添加量为 5% 时, 多孔 Ti-Nb 合金的孔隙形貌如图 4(a) 所示, 可见孔隙比较分散, 有较小的连通性, 孔隙形貌不规则; 如图 4(c) 所示, 当 Nb 含量增加到 15% 时, 合金中的孔隙尺寸有所增大, 但孔隙仍大小不一; 当 Nb 含量继续增加到 35% 时, 孔隙形貌如图 4(g) 所示, 孔隙数量明显增多, 孔隙尺寸也略有增大, 并且孔隙的连通性明显增加。由图 4 可知, 当 Nb 含量为 25% ~ 30% 时, 多孔 Ti-Nb 合金的孔隙数量较多且孔径大小分布相对比较均匀。



元素	点 A		点 B	
	w/%	y/%	w/%	y/%
Ti	93.37	96.47	38.1	54.41
Nb	6.63	3.53	61.9	45.59
总量	100.00	100.00	100.00	100.00

图 3 多孔 Ti-Nb 合金的 EDS 分析

Fig. 3 EDS analysis of porous Ti-Nb alloys

通过质量-体积法进行计算获得多孔 Ti-Nb 合金的孔隙率如表 1 所示, 由表 1 可知, 随着 Nb 含量的增加, 多孔 Ti-Nb 合金的孔隙率也随之增大。当 Nb 元素含量为 5% ~ 15% 时, 试样的孔隙率逐渐上升, 当 Nb 元素含量为 15% ~ 25% 时, 材料的孔隙率上升趋势较为缓慢, 当 Nb 元素含量为 35% ~ 35% 时, 材料的孔隙率又呈明显的上升趋势。随着 Nb 元素含量的增加, 高温烧结时大部分 Nb 固溶入基体 Ti 中, 从而在原有 Nb 元素的部位形成一些空穴, 空穴与造孔剂分解挥发后留下的孔洞连接在一起, 从而使材料中形成一些贯通的烧结孔, 由此增加了 Ti-Nb 合金的孔隙率。同时结合图 3 分析可知, 由于烧结温度低且时间短, 有少部分 Nb 没有完全扩散进入基体 Ti 中, 反应不充分造成基体上分布有少量的 Nb 颗粒, Nb 颗粒起到硬支撑的作用, 使得 Ti-Nb 合金的孔隙率也会随之升高。通过软件计算^[16]获得多孔 Ti-Nb 合金的平均孔径如表 1 所示, 结合孔隙率和平均孔径尺寸可以看出, Nb 元素含量由 5% 增至 35% 时, 材料的孔隙率由 20.46% 增大到 46.04%, 材料的平均孔径由 223 μm 增大至 351 μm 。由此说明 Nb 元素的添加会对多孔 Ti-Nb 合金材料的孔隙率、孔结构分布和孔径大小产生一定的影响, 可通过调整基体中 Nb 元素的含量, 改变多孔 Ti-Nb 合金试样的微观结构和孔隙形貌。

2.3 径向收缩率

高温烧结后, 试样的宏观尺寸发生了明显的变化, 材料的高度、直径和高温烧结前相比尺寸都有所减小, 通过尺寸测量分析得到不同 Nb 含量多孔

Ti-Nb 合金的径向收缩率变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出, 烧结试样随着 Nb 含量的增加, 其径向收缩率逐渐变小, 径向收缩率由 10.35% 逐渐降低至 5.52%。结合表 1 中材料的孔隙率可知, Nb 含

量越高, 材料中孔隙数量越多, 孔隙率低材料相对致密, 所以其径向收缩率较大, 反之材料的径向收缩率较小。

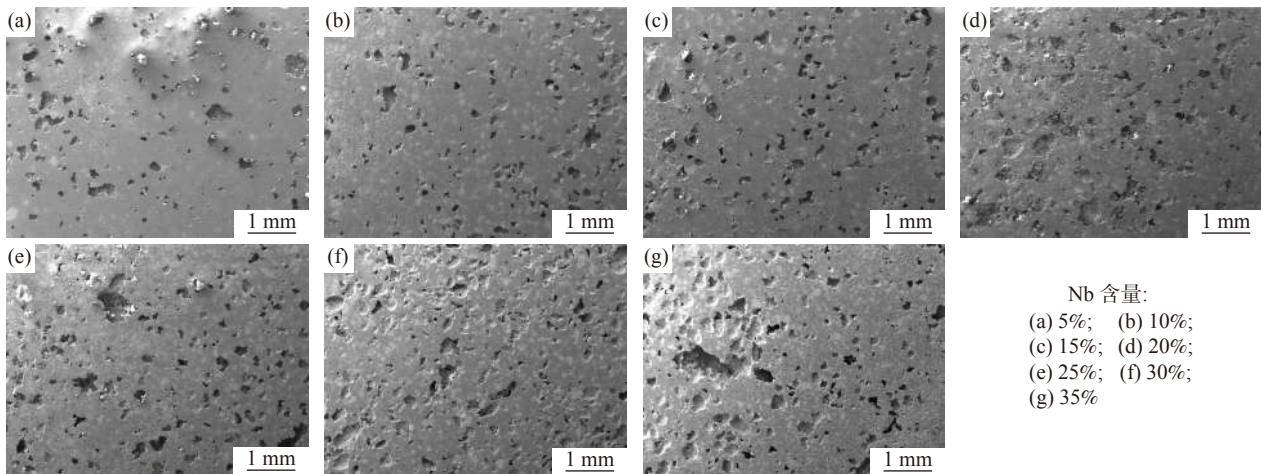


图 4 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的微观孔隙形貌

Fig. 4 Micropore morphology of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

表 1 多孔 Ti-Nb 合金的孔隙率和平均孔径

Table 1 Porosity and average pore size of porous Ti-Nb alloys

w(Nb)/%	孔隙率/%	平均孔径/ μm
5	20.46	223
10	26.70	252
15	29.30	271
20	29.56	310
25	30.85	360
30	33.61	355
35	46.04	351

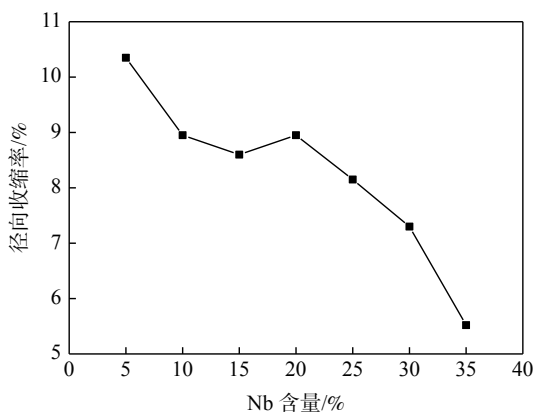


图 5 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的径向收缩率

Fig. 5 Radial shrinkage rate of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

2.4 抗压强度

抗压性能测试获得多孔 Ti-Nb 合金的抗压强度值如图 6 所示。由图 6 可以看出, 随着合金中 Nb 元素含量的增加, 合金的抗压强度值呈逐渐减小的变化趋势, 由前文孔隙率分析可知, Nb 含量的增加使得材料的孔隙率逐渐增大, 从而导致材料的有效承力面积减小, 材料的抗压强度随之减小, 抗压强度由 230 MPa 降低至 126 MPa。

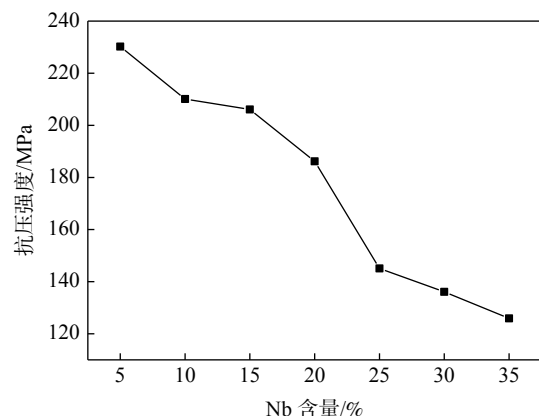


图 6 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

图 7 为多孔 Ti-Nb 合金的抗压性能测试的载荷-位移曲线。由图 7 可以看出, 材料的压缩曲线包括 2 个阶段, 第一阶段为随着加载载荷的增大材料变

形量随之增大的弹性变形阶段,第二阶段为加载载荷达到最大值后材料所加载荷迅速减小的断裂阶段。由此说明,文中制备方法获得的多孔 Ti-Nb 合金随着施加载荷的逐渐增大,孔壁结构发生弹性变形直至断裂,无明显的塑性变形。

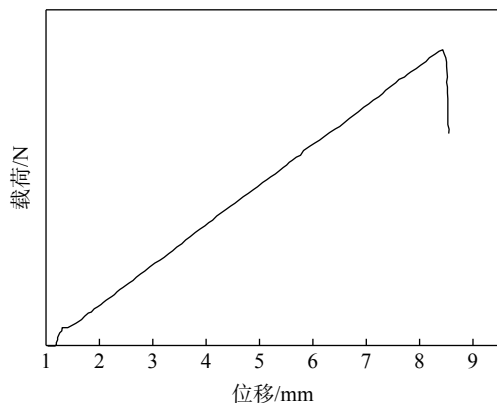


图 7 多孔 Ti-Nb 合金的压缩载荷-位移曲线

Fig. 7 Compressive load-displacement curves of the porous Ti-Nb alloys

2.5 耐腐蚀性

为了模拟分析多孔材料在人体体液中的耐腐蚀性,通过电化学测试获得的不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金材料的阳极极化曲线如图 8 所示,表 2 为不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的自腐蚀电位和最大电流密度。从图 8 与表 2 可以看出,合金中 Nb 元素含量的升高使得多孔材料的自腐蚀电位、腐蚀电流及电流密度均呈先增大后减小变化,综合考虑自腐蚀电位值越正和电流密度值越小,材料的耐腐蚀性越好,发现合金中的 Nb 含量为 25%~30% 时材料的耐腐蚀性能最好,此时材料的自腐蚀电位最大值为 -0.75 V,电流密度最小为 1.96 A/cm²;当 Nb 含量继续增加至 35% 时,材料的自腐蚀电位和电流密度均呈增大的现象。耐腐蚀性增大的主要原因是 Nb 元素的增加使得材料中的 β 相含量升高,由 β 相提高了材料的耐腐蚀性,而当 Nb 元素继续增加后,材料的孔隙率急剧升高,贯通孔的数量增多,使得材料与腐蚀液的接触面积变大,此时 β 相对耐腐蚀性的提高已经弱于大面积腐蚀液对材料的影响,所以其耐腐蚀性反而出现下降的现象。

图 9 为不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的电化学阻抗图谱,由图 9 可知,合金的容抗弧半径随着 Nb 含量的增加逐渐增大,在 Nb 含量为 30% 时容抗弧半径最大,分析结果与自腐蚀电流密度基本一致,说明此时合金的耐腐蚀性能最好。

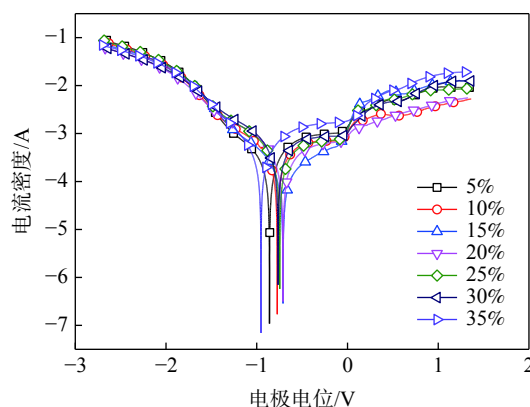


图 8 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的阳极极化曲线

Fig. 8 Anodic polarization curve of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

表 2 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的腐蚀电位

Table 2 The corrosion potential of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

w(Nb)/%	腐蚀电位/V	腐蚀电流/A	电流密度/(A·cm ⁻²)
5	-0.86	-6.77	2.16
10	-0.77	-6.54	2.08
15	-0.71	-6.96	2.22
20	-0.71	-6.50	2.07
25	-0.75	-6.24	1.99
30	-0.76	-6.15	1.96
35	-0.95	-7.16	2.28

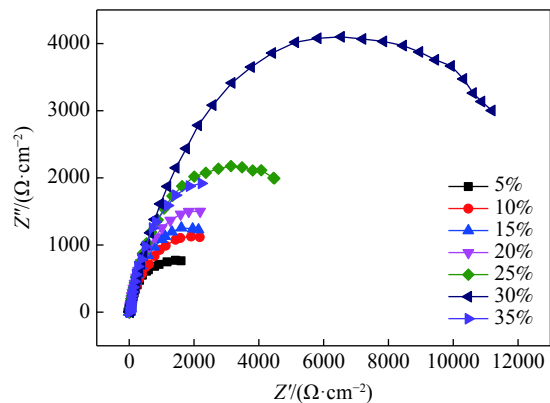


图 9 不同 Nb 含量多孔 Ti-Nb 合金的阻抗图谱

Fig. 9 EIS curves of porous Ti-Nb alloys with different Nb contents

3 结论

1) 多孔 Ti-Nb 合金主由 β 相和少量的 α 相两种相组成,且随着 Nb 含量的增加, α 相含量逐渐减小,而 β 相含量逐渐增大。

2) 通过调节 Nb 元素含量,可以改变多孔 Ti-Nb 合金的微观孔隙形貌。随 Nb 含量的增加,多孔

Ti-Nb 合金的孔隙率可达 46%, 平均孔径为 360 μm 左右, 在 Nb 含量为 25% ~ 30% 时, 材料的孔隙大小和分布相对较均匀。

3) 随着 Nb 含量的增加, 多孔 Ti-Nb 合金的径向收缩率和抗压强度逐渐减小, 耐腐蚀性呈先增强后减弱趋势, Nb 含量为 30% 时, 材料的耐腐蚀性能最好。

参考文献

- [1] Ren Junshuai, Zhang Yingming, Tan Jiang, *et al.* Current research status and trend of titanium alloys for biomedical applications[J]. *Materials Review*, 2016, 30(2): 384–388.
(任军帅, 张英明, 谭江, 等. 生物医用钛合金材料发展现状及趋势[J]. *材料导报*, 2016, 30(2): 384–388.)
- [2] Yu Zhentao, Yu Sen, Cheng Jun, *et al.* Development and application of novel biomedical titanium alloy materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(10): 1238–1264.
(于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(10): 1238–1264.)
- [3] Zhang L C, Chen L Y. A review on biomedical titanium alloys: Recent progress and prospect[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(4): 1–29.
- [4] Zhang Erlin, Wang Xiaoyan, Han Yong. Research status of biomedical porous Ti and its alloy in China[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(12): 1555–1567.
(张二林, 王晓燕, 憨勇. 医用多孔 Ti 及钛合金的国内研究现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(12): 1555–1567.)
- [5] Xu L J, Xiao S L, Tian J, *et al.* Microstructure, mechanical properties and dry wear resistance of β -type Ti–15Mo–xNb alloys for biomedical applications[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(3): 692–698.
- [6] Wang Benli, Li Li, Zheng Yufeng, *et al.* Microstructure and wear behavior of biomedical Ti-Nb based alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(S1): 953–957.
(王本力, 李莉, 郑玉峰. 生物医用 Ti-Nb 基合金的显微组织与耐磨性[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(S1): 953–957.)
- [7] Wu Jie. Synthesis and properties optimization of porous Ti-Nb based memory alloys for biomedical application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
(吴杰. 生物医用多孔 Ti-Nb 基记忆合金的制备及其性能优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.)
- [8] Zhang Meili, Pan Qi, Yang Tao, *et al.* Effect of Mo content on pore morphology and properties of porous Ti-Mo alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(10): 58–64.
(张美丽, 潘旗, 杨涛, 等. 钼含量对多孔 Ti-Mo 合金孔隙形貌及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(10): 58–64.)
- [9] Zou Liming, Yang Chao, Li Yuanyuan. Research progress on preparing Ti-based biomedical materials by powder metallurgy[J]. *Materials Review*, 2011, 25(15): 82–85.
(邹黎明, 杨超, 李元元. 粉末冶金法制备钛基生物医学材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 25(15): 82–85.)
- [10] Li Yonghua, Chen Nan. Research on microstructure and mechanical property of porous Ti-45Nb alloy[J]. *Journal of Jinggangshan University (Natural Science)*, 2019, 40(5): 67–71.
(李永华, 陈楠. 多孔 Ti-45Nb 合金的微观组织与力学性能研究[J]. *井冈山大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 67–71.)
- [11] Liu Chao, Yang Hailin, Li Jing, *et al.* Porosity and mechanical properties of biomedical porous Nb-Ti alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(3): 752–757.
(刘超, 杨海林, 李婧, 等. 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.)
- [12] Zhao Chaoyong, Kuang Lin, Zhang Xuefeng, *et al.* Preparation and mechanical properties of porous Ti-5Nb alloy with the elongated pores[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(6): 62–67.
(赵朝勇, 匡林, 张雪峰. 细长孔的多孔 Ti-5Nb 合金制备及力学性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(6): 62–67.)
- [13] Ibrahim M K, Hamzah E, Saud S, *et al.* Parameter optimization of microwave sintering porous Ti-23Nb shape memory alloys for biomedical applications[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(4): 700–710.
- [14] Liu Peisheng. Determining methods for porosity of porous materials[J]. *Titanium Industry Progress*, 2005, 22(6): 34–36.
(刘培生. 多孔材料孔率的测定方法[J]. *钛工业进展*, 2005, 22(6): 34–36.)
- [15] Bao Luzi. Preparation and hydrothermal activation treatment of the microwave sintered biomedical porous Ti-Mo alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
(鲍路姿. 医用多孔 Ti-Mo 合金的微波烧结制备及水热活化处理[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.)
- [16] Xie Fangxia, He Xueming, Yu Jinghu, *et al.* Structural characteristics and mechanical behavior of selective laser sintered porous Ti-6Mo alloy for biomedical applications[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(6): 1477–1482.
(颀芳霞, 何雪明, 俞经虎, 等. 生物医用多孔 Ti-6Mo 合金选择性激光烧结的结构特征和力学行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(6): 1477–1482.)