

烧结温度对多孔 Ti-15Al 合金 微观结构与性能的影响

张美丽^{1,2}, 代卫丽^{1,2}, 刘彦峰^{1,2}, 韩 茜^{1,2}

(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)

摘 要:以金属 Ti 粉和 Al 粉为原料, 采用粉末冶金法制备多孔 Ti-15Al 合金材料, 并研究不同的烧结温度对其物相成分、微观孔隙结构、抗压性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明: 多孔 Ti-15Al 合金在高温烧结后, 因金属 Ti 和 Al 之间发生偏扩散和固相反应而形成了 α -Ti 和 Ti_3Al 的平衡相, 随着烧结温度的升高, 合金中孔隙结构逐渐由长条状的贯通孔向近似球状的封闭孔转变, 且孔隙率和平均孔径尺寸均呈先增大后减小的变化, 在 1 300 °C 烧结后的孔隙率和孔径尺寸最小, 最小值分别为 11.6% 和 13.8 μm ; 因材料孔隙结构的转变, 导致多孔 Ti-15Al 合金的抗压强度和耐腐蚀性能均随烧结温度的升高先增大后减小, 烧结温度为 1 300 °C 时的抗压强度和耐腐蚀性能最好, 最大抗压强度为 79 MPa, 最小腐蚀电流密度为 $2.05 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

关键词:多孔 Ti-15Al 合金; 粉末冶金; 烧结温度; 物相成分; 孔隙结构; 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(2022)04-0055-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.009

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of sintering temperature on microstructure and properties of porous Ti-15Al alloy

Zhang Meili^{1,2}, Dai Weili^{1,2}, Liu Yanfeng^{1,2}, Han Xi^{1,2}

(1. Shannxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo 726000, Shannxi, China; 2. Shannxi Engineering Research Center for Mineral Resources Clean & Efficient Conversion and New Materials, Shangluo University, Shangluo 726000, Shannxi, China)

Abstract: The porous Ti-15Al alloy materials were prepared by powder metallurgy with Ti and Al powder as raw materials. The effects of different sintering temperatures on the phase composition, micropore structure, compressive and corrosion resistance were studied. The results show that the equilibrium phase of α -Ti and Ti_3Al is formed due to partial diffusion and solid-phase reaction between metal Ti and Al after the porous Ti-15Al alloy sintered at high temperature. With the increase of sintering temperature, the structure gradually changes from elongated through-holes to nearly spherical closed pores, and the porosity and average pore size both increases first and then decreases. The porosity and pore size after sintering at 1 300 °C reach the minimum, with values of 11.6% and 13.8 μm , respectively. Due to the change of pore structure, the compressive strength and corrosion resistance of porous

收稿日期: 2022-03-14

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); 商洛市高性能有色金属制备与加工技术创新团队 (SK2019-75)。

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

Ti-15Al alloy increase first and then decrease with the increase of sintering temperature. The compressive strength and corrosion resistance of porous Ti-15Al alloy are the best when the sintering temperature is 1 300 °C, the maximum compressive strength is 79 MPa, and the minimum corrosion current density is 2.05×10^{-7} A/cm².

Key words: porous Ti-15Al alloy, powder metallurgy, sintering temperature, phase composition, pore structure, compressive strength, corrosion resistance

0 引言

Ti-Al 系金属间化合物材料因具有低密度、良好的高温比强度和比模量、优异的抗氧化和耐酸碱腐蚀等性能,成为一种理想的航空轻量型高温结构材料^[1-4]。因为 Ti 和 Al 两种元素具有不同的扩散系数,高温条件下 Al 元素易与 Ti 元素进行 Kirkendall 偏扩散反应,在原有 Al 元素的位置会生成一些孔洞,同时因元素间的固相反应而在新相内生成一些 Frenkel 孔隙,从而原位形成一种 Ti-Al 多孔材料,进一步降低了 Ti-Al 合金的重量,满足其在航空航天领域的使用要求^[5-7]。

目前制备多孔金属材料的方法中常用的有粉末冶金法、传统铸造法、金属沉积法、自蔓延高温合成等,其中粉末冶金法因制备工艺简单、孔隙率和孔径大小可控等特点被广泛应用于多孔材料的制备^[8-11]。然而江焱、李婷婷等人^[1-2]研究发现,采用粉末冶金技术制备 Ti-Al 多孔材料时也存在较多问题,比如 Ti、Al 元素粉末在反应合成过程中,材料的孔隙结构难以控制,且形成的 Kirkendall 孔隙通

常为闭孔,难以形成通孔结构,无法满足多孔材料的使用要求。由于 Ti-Al 合金多孔材料的成孔机制分为低温固相阶段和高温扩散阶段,低温时元素粉末发生 Kirkendall 反应而形成小孔隙,高温时小孔隙与粉末压坯中残留的孔隙经高温扩散聚集而形成一些贯通的通孔,由此说明高温烧结是致使 Ti-Al 多孔材料形成通孔的一个重要工艺参数,分析烧结温度对多孔材料的微观结构和性能的影响非常重要^[12-13]。因此笔者采用粉末冶金技术烧结制备了多孔 Ti-15Al 合金,并研究了不同的真空烧结温度对其物相成分、微观孔隙结构、抗压性能和耐腐蚀性能的影响,以期获得更为质轻、性能更高的多孔 Ti-Al 合金,并为 Ti-Al 系多孔材料的研究提供部分可参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验原材料分别用粒径小于 45 μm 的金属 Ti 粉和 Al 粉,粉末纯度均大于 99.5%,其化学成分分别如表 1、2 所示。

表 1 Ti 粉的化学成分
Table 1 Chemical composition of Ti powder

%

C	H	O	N	Fe	Mn	Mg	Si	Ti
0.013	0.022	0.28	0.009	0.028	<0.01	<0.01	0.02	Bal.

表 2 Al 粉的化学成分
Table 2 Chemical composition of Al powder

%

Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Mg	Si	Al
0.45	0.5	0.05	0.009	0.028	<0.01	<0.01	0.02	Bal.

1.2 试验方法

首先将金属 Ti 粉和 Al 粉按质量比 85 : 15 称重配料,放在 VH015 型 V 型混料机中混合 48 h;然后将混合均匀的金属粉末装入 Ø 20 mm 的压制模具中,用 YP-32TB 型粉末压片机进行压制成型,压制

压力为 100 MPa,保压时间为 30 s;最后将粉末压坯试样在 ZM-10-16 型真空钼丝烧结炉中进行高温烧结,为了确保高温相变的形成,依据 Ti-Al 二元合金相图确定烧结温度分别为 1 100、1 200、1 300、1 400 °C,具体的烧结工艺曲线如图 1 所示。

烧结后的试样分别经 600[#]、800[#]、1 200[#]砂纸打磨后超声清洗 1 h, 抛光后用混合酸溶液(2 mL HF+4 mL HNO₃+94 mL H₂O)进行腐蚀; 用 DMI3000M 型光学显微镜观察试样的显微组织, 用 JSM-5600LV 型扫描电镜观察试样的微观结构形貌, 用 BLKII-5FFP 型 X 射线衍射仪分析试样的物相成分; 采用质量-体积称重法^[14] 计算试样的孔隙率和径向收缩率, 利用 WDW-50 型万能材料试验机测试试样的抗压性能; 耐腐蚀性能通过电化学阳极极化曲线进行分析, 测试前试样用环氧树脂进行封装, 露出 1 cm² 的待测试面, 在 3.5%NaCl 溶液中进行阳极极化曲线的性能测试, 测试采用三电极测试体系, 其中对电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极, 工作电极为烧结试样, 腐蚀电位扫描范围为-1.5 ~ 1.5 V, 扫描速度为 5 mV/s。

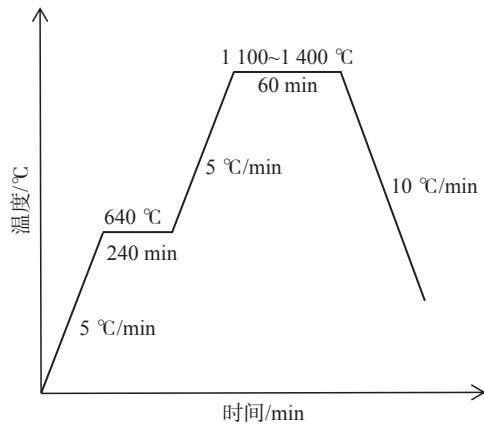


图1 多孔 Ti-15Al 合金的烧结工艺曲线

Fig. 1 Sintering process curve of the porous Ti-15Al alloys

2 试验结果与分析

2.1 物相分析

图2为多孔 Ti-15Al 合金的 XRD 图谱。由图2的 XRD 分析图谱可知, 除基体 α -Ti 相以外, 多孔 Ti-15Al 合金在不同温度烧结后形成了一种 Ti_3Al 相。结合如图3所示的 Ti-Al 二元合金相图^[1] 分析可知, Ti-15Al 合金中的 Al 含量仅有 15%, 依据相图可见, Al 元素的成分范围在 14% ~ 23% 时, 不同烧结温度下 Ti-Al 合金均为一种 α_2 - Ti_3Al 相, 结合文献[1, 15]可知, α_2 - Ti_3Al 是一种 Kumakov 型金属间化合物, 这种金属间化合物在临界温度 1 125 °C 时会发生一个有序-无序的转变, 即在 1 125 °C 以下时为有序的 α_2 - Ti_3Al 相, 在 1 125 °C 以上时为无序的 α_2 - Ti_3Al 相, 因此多孔 Ti-15Al 合金在不同温度烧结后均形成了 α -Ti 和 Ti_3Al 的平衡相。

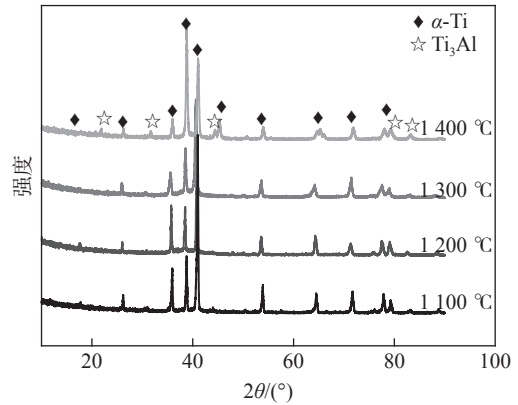


图2 多孔 Ti-15Al 合金的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the porous Ti-15Al alloys

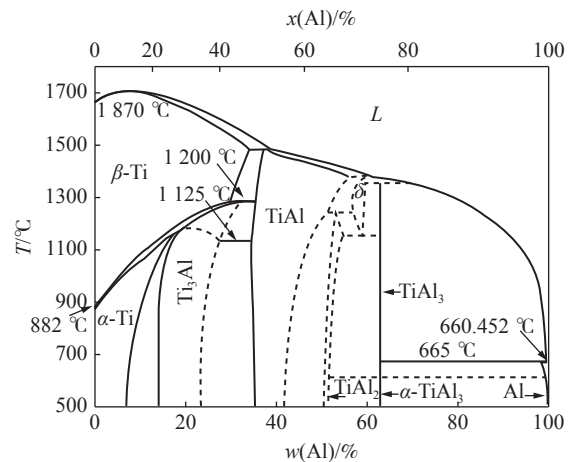


图3 Ti-Al 二元合金相图^[1]

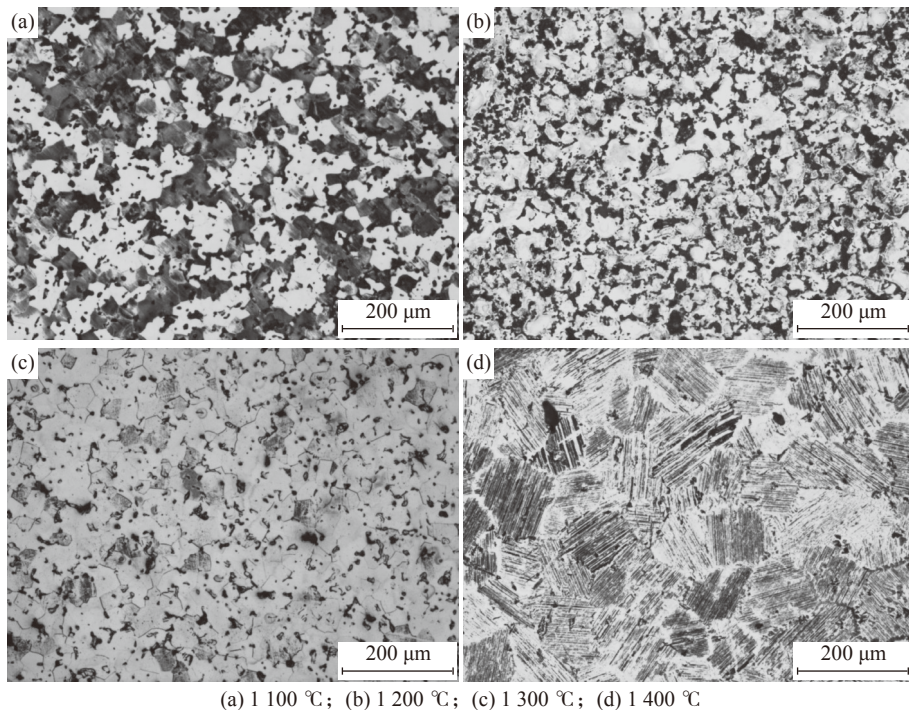
Fig. 3 Binary phase diagram of Ti-Al alloy

2.2 微观结构分析

图4为不同温度烧结的多孔 Ti-15Al 合金显微组织。由图4可见, 合金中的白色骨架组织为基体 α -Ti 相, 在白色基体相周围分布有一定量的灰色 Ti_3Al 相, 黑色为骨架间所形成的孔隙。随着烧结温度的升高, 合金中的 Ti_3Al 相逐渐增多, 孔隙数量逐渐减少。在烧结温度为 1 100 ~ 1 200 °C 时, 由于温度较低, 金属原子间的扩散距离短, 形成的烧结颈较细, 所以由图4(a)、(b)可见, 合金中骨架间形成的大多为长条状的通孔。在烧结温度为 1 300 °C 时, 两种金属原子相互之间的扩散变得更加充分, 烧结颈变粗, 所以由图4(c)可见, 合金中均匀分布着大小不一的闭孔, 其中骨架间的大孔隙主要是高温烧结过程中, 由于 Ti 和 Al 两元素之间发生了偏扩散, Al 原子通过界面扩散进入到 Ti 晶粒内部, 从而在原有的 Al 原子位置形成了一些大孔隙, 同时有一部分是粉末压坯间隙在烧结后残留下来所形成的大孔隙; 骨架内的小孔隙是在 Ti_3Al 相中由于 Al 和 Ti

的 Kirkendall 效应而产生的一些 Frenkel 孔隙。当烧结温度升至 1 400 ℃ 时,金属颗粒间产生了出现互溶,烧结开始颈变粗变短,固相反应更为充分,材

料变得致密,所以在图 4(d)中可见孔隙数量较少,同时可见基体上灰色的 Ti_3Al 相明显增多。



(a) 1 100 ℃; (b) 1 200 ℃; (c) 1 300 ℃; (d) 1 400 ℃

图 4 不同烧结温度的多孔 Ti-15Al 合金显微组织

Fig. 4 Microstructure of the porous Ti-15Al alloys at different sintering temperatures

图 5 为不同温度烧结多孔 Ti-15Al 合金的微观孔隙形貌,表 3 为多孔 Ti-15Al 合金的孔隙率和平均孔径尺寸。由图 5 可见,1 100 ℃ 烧结时合金中主要以长条状通孔为主,孔隙率为 22.18%,平均孔径为 25.1 μm,烧结温度继续升高,合金中的长条状通孔越来越少,近似球状的闭孔越来越多,且孔隙率和平均孔径尺寸均有所减小,在烧结温度为 1 300 ℃ 时,孔隙率和孔径尺寸均最小,最小孔隙率为 11.6%,最小平均孔径为 13.8 μm。当烧结温度升至 1 400 ℃ 时,由于颗粒间的烧结颈变短变粗,合金中的小孔隙已经消失,部分大孔隙在相互融合和扩散过程中出现了聚集长大,所以在图 5(d)中可见一些大的孔隙,其孔隙率和平均孔径均有所升高。

2.3 径向收缩率

图 6 是不同烧结温度条件下多孔 Ti-15Al 合金的径向收缩率。径向收缩率与多孔材料的内部孔隙结构有较大关系,随着烧结温度的升高,金属粉末颗粒间的距离因高温扩散而逐渐变短,所以材料均发生了一定量的收缩现象。由图 6 可见,多孔 Ti-15Al 合金的径向收缩率呈先增大后减小的变化

趋势,烧结温度为 1 100 ℃ 和 1 400 ℃ 时,合金的径向收缩率最小为 0.7%,而因 1 300 ℃ 烧结后合金的孔隙率最小,所以此时的径向收缩最大,最大收缩率为 7%。

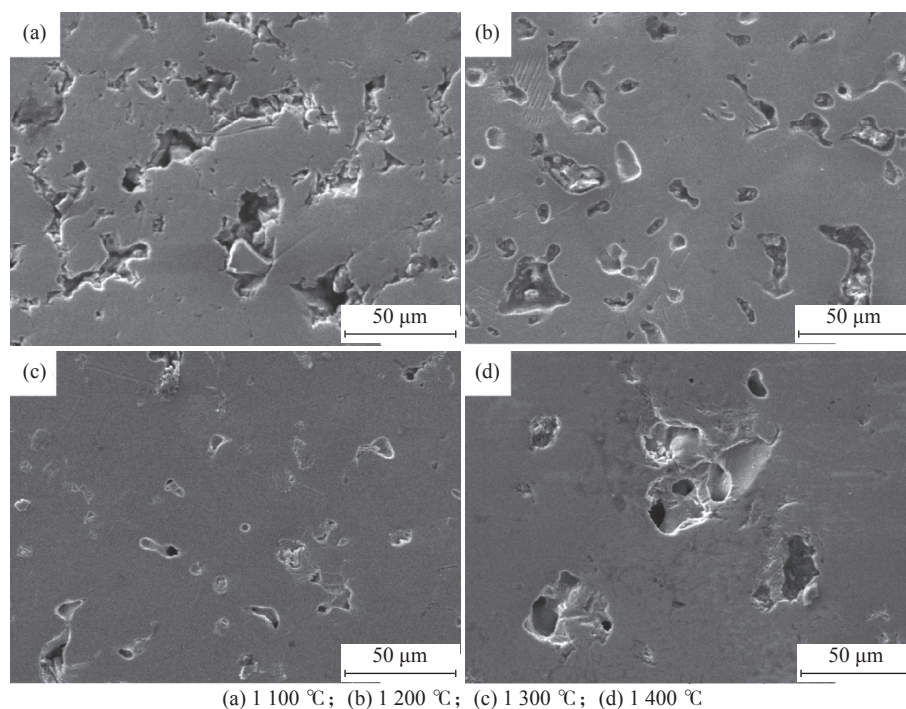
2.4 抗压性能

图 7 是多孔 Ti-15Al 合金抗压性能测试的压缩载荷-位移曲线。由图 7 可见,不同温度烧结的合金在压缩过程中的变形过程主要为三个阶段:第一阶段是随变形量的增大载荷迅速增大的弹性变形阶段,第二阶段是随变形的增大载荷基本保持的塑性变形阶段,第三阶段是过载后的断裂阶段。且随孔隙率的减小,在同等变形量条件下,合金所受的最大载荷值越大,由此说明其抗压性能越好。

图 8 是多孔 Ti-15Al 合金的抗压强度。由图 8 可以看出,合金的抗压强度随烧结温度的升高先增大后又随之减小,引起抗压性能变化的主要原因是合金中的孔隙结构和孔隙数量,参照文中 2.2 合金的微观结构分析可知,在 1 100 ℃ 烧结的合金孔隙数量较多,且大部分为贯通孔结构,导致合金的承载面积相对较少,所以其抗压强度值最小,而 1 300 ℃

烧结的合金因孔隙数量最少, 且大部分是封闭的孔隙, 所以其可承载面积大, 抗压性能较好, 其最大抗

压强度值为 79 MPa, 相比 1 100 °C 烧结的合金抗压强度提高了 18%。



(a) 1 100 °C; (b) 1 200 °C; (c) 1 300 °C; (d) 1 400 °C

图 5 不同烧结温度的多孔 Ti-15Al 合金孔隙形貌

Fig. 5 The pore morphology of the porous Ti-15Al alloys at different sintering temperatures

表 3 多孔 Ti-15Al 合金的孔隙率和平均孔径

Table 3 Porosity and average pore size of the porous Ti-15Al alloys

烧结温度/°C	孔隙率/%	平均孔径/μm
1 100	22.2	25.1
1 200	19.1	16.5
1 300	11.6	13.8
1 400	14.3	25.8

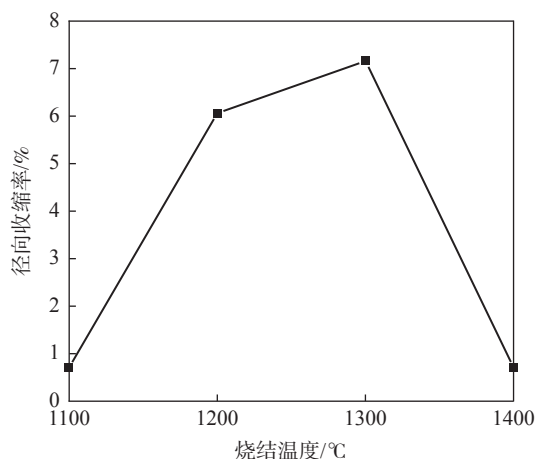


图 6 多孔 Ti-15Al 合金的径向收缩率

Fig. 6 Radial shrinkage of the porous Ti-15Al alloys

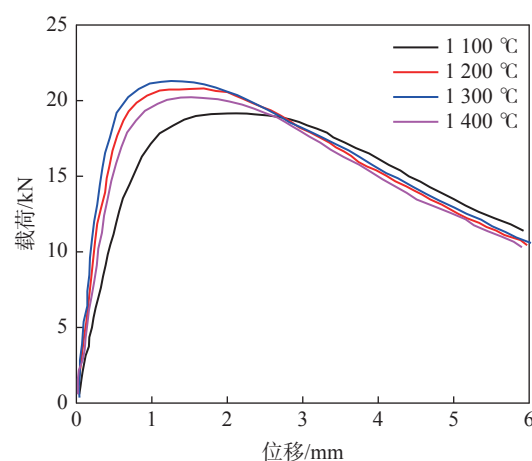


图 7 多孔 Ti-15Al 合金的压缩载荷-位移曲线

Fig. 7 Compressive load-displacement curves of the porous Ti-15Al alloys

2.5 耐腐蚀性能

不同温度烧结多孔 Ti-15Al 合金的电化学阳极极化曲线如图 9 所示。由图 9 可见, 合金的阳极极化曲线变化趋势基本一致, 在腐蚀初期材料的自腐蚀电流密度逐渐增大, 合金表面的腐蚀迅速发生, 随着腐蚀的持续进行, 合金与腐蚀介质反应形成的腐蚀产物不断在合金表面聚集, 从而使合金的阳极反

应受到抑制,所以其自腐蚀电流密度又开始减小,最后逐渐变得稳定。

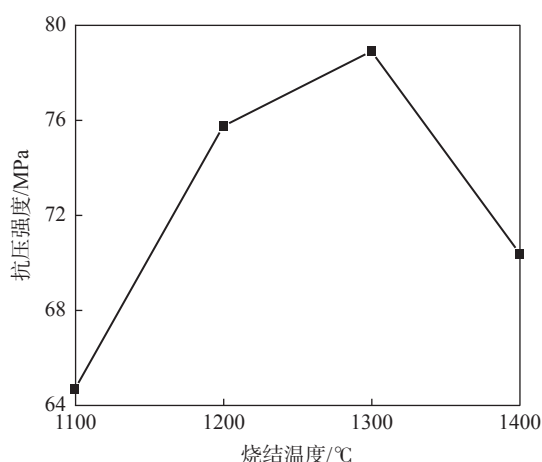


图8 多孔 Ti-15Al 合金的抗压强度

Fig. 8 Compressive strength of the porous Ti-15Al alloys

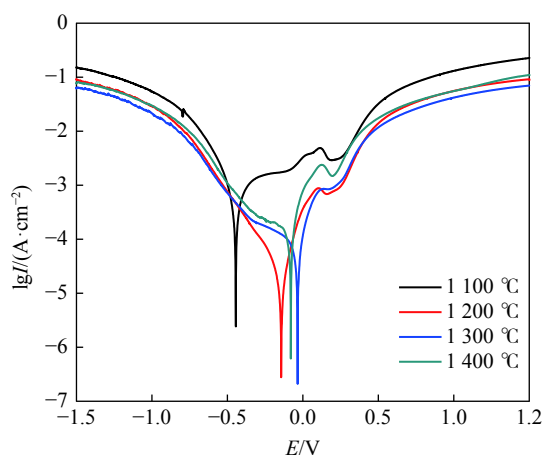


图9 多孔 Ti-15Al 合金的阳极极化曲线

Fig. 9 Anodic polarization curves of the porous Ti-15Al alloys

表4是多孔 Ti-15Al 合金的阳极极化曲线拟合的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度值。通过表4中数值分析可知,随着烧结温度的升高,合金的自腐蚀电位先向正移后又向负移动,自腐蚀电流密度先逐渐减小后又有所增大。一般材料的自腐蚀电位越向正

移,自腐蚀电流密度值越小,材料的抗腐蚀性能越好,由此可知多孔 Ti-15Al 合金的耐腐蚀性能由大到小依次为: 1 300 °C>1 200 °C>1 400 °C>1 100 °C。结合图5的孔隙形貌和表3的孔隙率分析可知,在烧结温度为 1 300 °C 时,多孔 Ti-15Al 合金中的孔隙数量最少,且大部分孔隙为封闭孔,所以其与 3.5%NaCl 溶液的接触面积相对较少,腐蚀面积的减小使其耐腐蚀性能较好,因此在 1 300 °C 烧结后合金的自腐蚀电流密度值最小为 2.05×10^{-7} A/cm²,其耐腐蚀性能最好。

表4 多孔 Ti-15Al 合金的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度
Table 4 Self-corrosion potential and current density of the porous Ti-15Al alloys

烧结温度/°C	腐蚀电位/V	电流密度/(A·cm ⁻²)
1 100	-0.44	2.38×10^{-6}
1 200	-0.14	2.73×10^{-7}
1 300	-0.04	2.05×10^{-7}
1 400	-0.08	6.04×10^{-7}

3 结论

1)多孔 Ti-15Al 合金在高温烧结后,因金属 Ti 和 Al 之间发生偏扩散和固相反应而形成了由基体 α -Ti 和 Ti₃Al 相组成的平衡组织,且烧结温度越高,基体中的 Ti₃Al 相越多。

2)随着烧结温度的升高,多孔 Ti-15Al 合金中孔隙结构逐渐由长条状的贯通孔向近似球状的封闭孔转变,且孔隙率和平均孔径尺寸均呈先增大后减小的变化,在 1 300 °C 烧结后的孔隙率和孔径尺寸最小,最小值分别为 11.6% 和 13.8 μ m。

3)因材料孔隙结构的转变,导致多孔 Ti-15Al 合金的抗压强度和耐腐蚀性能均随烧结温度的升高先增大后减小,烧结温度为 1 300 °C 时的抗压强度和耐腐蚀性能最好,最大抗压强度为 79 MPa,最小腐蚀电流密度为 2.05×10^{-7} A/cm²。

参考文献

- [1] Li Tingting, Peng Chaoqun, Wang Richu, *et al.* Research progress in porous Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallic compound porous materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(4): 784-795.
(李婷婷, 彭超群, 王日初, 等. Fe-Al、Ti-Al和Ni-Al系金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(4): 784-795.)
- [2] Jiang Yao, He Yuehui, Huang Baiyun, *et al.* Progress in research on Ti-Al intermetallic compound porous material[J]. *Materials China*, 2010, 29(3): 18-22.

- (江焱, 贺跃辉, 黄伯云, 等. Ti-Al金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(3): 18–22.)
- [3] Feng Peizhong, Su Jian, Zhou Yaguo, *et al.* Microstructure and formation mechanism of porous Ti-Al intermetallics prepared by pressureless sintering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(11): 2721–2727.
(冯培忠, 苏健, 周亚国, 等. 无压烧结Ti-Al多孔材料的组织结构与反应机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(11): 2721–2727.)
- [4] Liu Yanan, Jiao Xinyang, Feng Peizhong. Research progress of intermetallic compounds porous materials[J]. *Materials China*, 2017, 36(7): 532–540, 565.
(刘亚南, 焦欣洋, 冯培忠, 等. 含Al金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2017, 36(7): 532–540, 565.)
- [5] Liu Yuzuo, Li Xide, Li Juying, *et al.* Effect of pore-forming agent $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ and urea on properties of porous TiAl intermetallics[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2019, 24(3): 255–260.
(刘羽祚, 李喜德, 李菊英, 等. 造孔剂 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 和尿素含量对TiAl多孔材料性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(3): 255–260.)
- [6] Li Daren, Cui Liqun, Cai Yixiang. Research on structure property of TiAl-based porous material prepared by titanium hydride foaming[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2014, 32(2): 96–99.
(李达人, 崔利群, 蔡一湘. TiH_2 发泡制备TiAl基多孔材料及其组织性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2014, 32(2): 96–99.)
- [7] Zhang Meili, Luo Shushu, Dai Weili, *et al.* Preparation and properties of porous Ti-Al alloy[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(4): 48–53, 59.
(张美丽, 罗姝淑, 代卫丽, 等. 多孔 Ti-Al 合金材料的制备与性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 48–53, 59.)
- [8] Chen Yuyong, Su Yongjun, Kong Fantao. Research progress in preparation of TiAl intermetallic based compound[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(3): 757–762.
(陈玉勇, 苏勇君, 孔凡涛. TiAl金属间化合物制备技术的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(3): 757–762.)
- [9] Chen Murong, Jiang Yao, Tian Li, *et al.* Effect of molding parameters on pore structure Ti-35%Al porous material[J]. *Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition)*, 2013, 35(2): 70–74.
(陈慕容, 江焱, 田俐, 等. 成型参数对Ti-35%Al多孔材料孔结构的影响[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 70–74.)
- [10] 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.)
- [11] Qiao Jichao, Xi Zhengping, Tang Huiping, *et al.* Current status of metal porous materials by powder metallurgy technology[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(11): 2054–2058.
(乔吉超, 奚正平, 汤慧萍, 等. 粉末冶金技术制备金属多孔材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(11): 2054–2058.)
- [12] Li Jing, Yang Hailin, Jie Yunfeng, *et al.* Effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of TiNi alloy[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(6): 897–901.
(李婧, 杨海林, 节云峰, 等. 烧结温度对多孔TiNi合金微观结构和力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 897–901.)
- [13] Li Shitong, Zhu Ruifu, Zhen Liang, *et al.* Effect of sintering temperature on microstructure and properties of porous titanium[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(2): 93–95.
(李士同, 朱瑞富, 甄良, 等. 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.)
- [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] Zhang Junhong, Cao Qincun. Preparation of sub-microstructure powder metallurgical titanium aluminide[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2013, 18(5): 687–692.
(张俊红, 曹钦存. 细晶粉末冶金TiAl合金的制备[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(5): 687–692.)