

多孔 Ti-Al 合金材料的制备与性能研究

张美丽, 罗姝淑, 代卫丽, 刘彦峰, 李 春, 杨超普

(陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 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: 采用粉末冶金技术, 通过元素粉末混合、偏扩散、反应烧结的方法制备多孔 Ti-Al 合金材料, 研究不同的 Al 粉添加量对其相结构、孔隙形貌、孔隙率、抗压性能和耐腐蚀性能的影响。研究表明: 多孔 Ti-Al 合金材料在 Al 含量为 5% ~ 15% 时, 主要平衡相为 α -Ti 和少量 Ti_3Al , 具有大小并存的闭孔结构; 在 Al 含量为 20% ~ 30% 时, 主要平衡相为 Ti_3Al 和少量 TiAl, 具有相互贯通的开孔结构; 随着 Al 含量的增加, 材料的孔隙率逐渐增大, 抗压强度逐渐减小, 耐腐蚀性呈先增大后减小趋势, 在 Al 含量为 20% 时, 多孔 Ti-Al 合金材料的孔隙率为 26.7%, 抗压强度为 63.9 MPa, 耐腐蚀性最强。

关键词: 多孔 Ti-Al 合金; 相结构; 孔隙率; 抗压强度; 耐腐蚀性

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)04-0048-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Preparation and Properties of Porous Ti-Al Alloy

Zhang Meili, Luo Shushu, Dai Weili, Liu Yanfeng, Li Chun, Yang Chaopu

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

Abstract: The porous Ti-Al alloys were prepared by powder metallurgy technique with elemental powder mixing, partial diffusion and reaction sintering. The effects of Al powder addition on phase structure, pore morphology, porosity, compressive properties and corrosion resistance of the alloy were investigated. The results show that the main equilibrium phase of the porous Ti-Al alloy is α -Ti and a small amount of Ti_3Al at the Al content of 5% ~ 15%, and it has a closed pore structure with different sizes. The main equilibrium phase of the porous Ti-Al alloy is Ti_3Al and a small amount of TiAl at the Al content of 20% ~ 30%, and it has an interpenetrating open-pore structure. As the Al content increases, the porosity of the alloy increases gradually, and the compressive strength decreases gradually, with the corrosion resistance increasing first and then decreasing. At the Al content of 20%, the porosity of the porous Ti-Al alloy is 26.7%, and the compressive strength is 63.9 MPa with the strongest corrosion resistance.

Key words: porous Ti-Al alloy, phase structure, porosity, compressive strength, corrosion resistance

0 引言

多孔 Ti-Al 合金是一种新型的金属间化合物材

料, 具备金属多孔材料和陶瓷材料的性能优势^[1-4], 且具有低密度、高的比强度和比模量、抗高温氧化性和耐腐蚀性能好、优良的隔热性和可焊接性等优点^[5-7],

收稿日期: 2020-06-09

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(20JK0618); 陕西省大学生创新创业训练计划项目(S201911396038); 商洛学院科研项目(18SKY010)。

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。

常被作为一种轻质的高温结构材料,广泛应用于航空航天、汽车、兵器、化工、生物医药等领域^[8-10]。

多孔 Ti-Al 合金材料的制备方法主要有去除填隙粒子和化学反应造孔两种成孔机制^[11-12],这两种方法均采用了粉末冶金技术。其中,去除填隙粒子是在金属粉末中添加一定量造孔剂,利用造孔剂在高温燃烧或挥发,使其原有造孔剂的位置留下空位而形成孔隙,此类方法制备的多孔材料可通过调节造孔剂颗粒大小和形状对材料的孔隙结构和孔隙率进行控制,加工成本低,成形性好,但是杂质含量较高,且烧结性能较差;而化学反应造孔是通过 Ti 和 Al 两种元素之间的 Kirkendall 固相扩散反应,生成 Frenkel 孔洞,此方法工艺简单可控、能耗低、材料组织细小均匀,可实现近净成型,具有很好的应用发展前景,但反应合成时如何控制孔的形状尺寸和提高材料孔隙率是其制备难点^[13-14]。所以,如何通过反应合成制备工艺和合金成分来控制多孔材料的孔隙形状及孔径,并以此优化材料综合性能具有重要的研究意义。

目前,大量的研究表明,采用粉末混合—压力成形—烧结合成的方法可制备出具有较高孔隙率和性能的多孔 Ti-Al 合金材料,但仍存在一些急需解决的问题,如多孔金属间化合物材料制备过程中,孔径及孔隙率等微观结构的可控性并没有完全实现^[14]。因此,笔者采用粉末冶金技术,通过元素粉末混合、偏扩散、反应烧结的方法制备多孔 Ti-Al 合金,研究不同的 Al 粉添加量对其相结构、孔隙形貌、孔隙率、抗压性能和耐腐蚀性能的影响,为后续多孔 Ti-Al 合金材料的制备工艺优化提供部分可参考试验依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料

试验原材料选用纯度大于 99.5%、粉末粒度小于 45 μm 的金属 Ti 粉和 Al 粉,材料的化学成分如表 1、2 所示。粉末压制成型用脱模剂选用硬脂酸锌,纯度为分析纯。

表 1 Ti 粉的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of Ti powder
(mass fraction) %

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(质量分数)
Table 2 Chemical composition of Al powder
(mass fraction) %

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 方法

试验依次在金属 Ti 粉中加入质量分数为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 的 Al 粉,将称量好的混合金属粉末放入 V 型混料机中进行均匀混合,混料机转速 80 r/min,混料时间 48 h;然后将混合均匀的粉末装入 $\varnothing 20$ mm 的模具中,在万能材料试验机上进行压制成型,压制压力 100 MPa,保压时间 30 s;最后将压坯试样在真空钼丝烧结炉中进行高温烧结,试验采用三阶段烧结工艺,第一阶段以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 640 $^{\circ}\text{C}$ 等温停留 4 h,保证 Al 和 Ti 能充分反应,第二阶段以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h 进行高温烧结,第三阶段以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至室温并取出试样。

对烧结试样进行磨制、抛光,配制混合酸溶液(2 mL HF : 4 mL HNO_3 : 94 mL H_2O) 进行腐蚀,在徕卡光学显微镜下观察其金相显微组织;采用 JSM-5600LV 型扫描电镜对烧结试样进行微观形貌观察,用质量—体积称重法^[15] 计算试样的孔隙率和径向收缩率,用 X 射线衍射仪分析试样的相结构;利用 WDW-50 型万能试验机进行试样的抗压性能测试,测试力速 0.05 kN/s;并配制 3.5% NaCl 盐溶液作为试样的耐腐蚀性能测试溶液,采用德国 Zennium 电化学工作站测试试样的阳极极化曲线,试验测试采用三电极体系,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。

2 试验结果与分析

2.1 多孔 Ti-Al 合金的相结构

原材料金属经过高温烧结后,经过一系列的物理化学反应,最终形成的平衡相组成如图 1 所示。在低温 640 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h 加热过程中,由于 Al 在 Ti 中的固溶度较大,Al 向基体 Ti 发生偏扩散,并反应形成亚稳相 TiAl_3 ;随着加热温度继续升高,剩余的 Ti 和 TiAl_3 相继续发生固相扩散反应,形成 TiAl_2 等过渡相;经高温烧结后 Ti 完全消失,最终形成平衡相 Ti_3Al 相和少量 TiAl 相,反应方程式如表 3 所示。

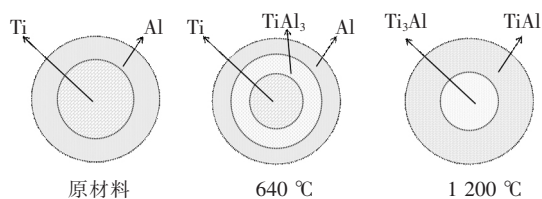


图 1 Ti 与 Al 元素反应烧结过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the reaction sintering process of Ti and Al elements

表 3 Ti 与 Al 元素反应方程式

Table 3 Reaction equation of Ti and Al element

步骤	方程式
1	$6\text{Ti} + 6\text{Al} \rightarrow 4\text{Ti} + 2\text{TiAl}_3$
2	$4\text{Ti} + 2\text{TiAl}_3 \rightarrow \text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiAl} + 2\text{TiAl}_2$
3	$\text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiAl} + 2\text{TiAl}_2 \rightarrow 6\text{TiAl}$

图 2 为不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的 XRD 分析图谱。由图 2 可知,当 Al 含量为 5% ~ 15% 时,材料主要平衡相为 α -Ti 及 Ti_3Al ,这是因为材料中添加的 Al 含量太少,Al 只与部分 Ti 发生固相反应而形成 Ti_3Al 相,大部分仍然是 α -Ti 相,随着 Al 含量的增加, α -Ti 相逐渐减小, Ti_3Al 相逐渐增多;当 Al 含量达到 20% ~ 30% 时, α -Ti 相完全消失,材料主要平衡相为 Ti_3Al 和少量 TiAl 。

2.2 多孔 Ti-Al 合金的显微组织

图 3 是 1 200 °C 烧结条件下,Al 含量分别为 5%、10%、15%、20% 时多孔 Ti-Al 合金材料的金相显微组织。如图 3 所示,多孔 Ti-Al 合金材料中分布有大量的黑色孔洞,且 Al 含量越高,材料中的孔洞数量越多;除了孔洞之外,结合 XRD 数据分析可知,材料中的灰色组织为 TiAl 相,白色组织为 Ti_3Al 相。主要原因是在高温烧结环境下,材料内部的金属 Ti 和 Al 发生固相扩散反应,首先形成 Ti_3Al 相,由于添加 Al 含量的不同, Ti_3Al 相在毛细管力的作用下,逐渐产生新的物相 TiAl ,并渗透到 Ti_3Al 中,且大部分分布在 Ti_3Al 相边缘。

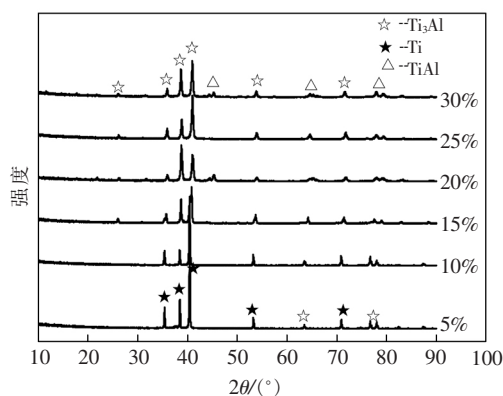
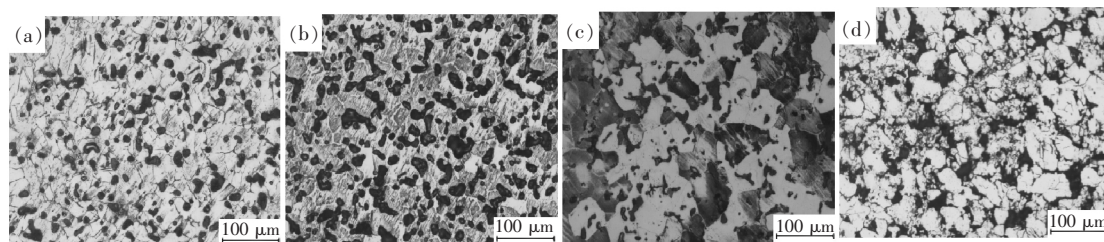


图 2 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的 XRD 图谱

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



(a) 5 %; (b) 10 %; (c) 15 %; (d) 20 %

图 3 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的显微组织

Fig. 3 Microstructure of porous Ti-Al alloys with different Al contents

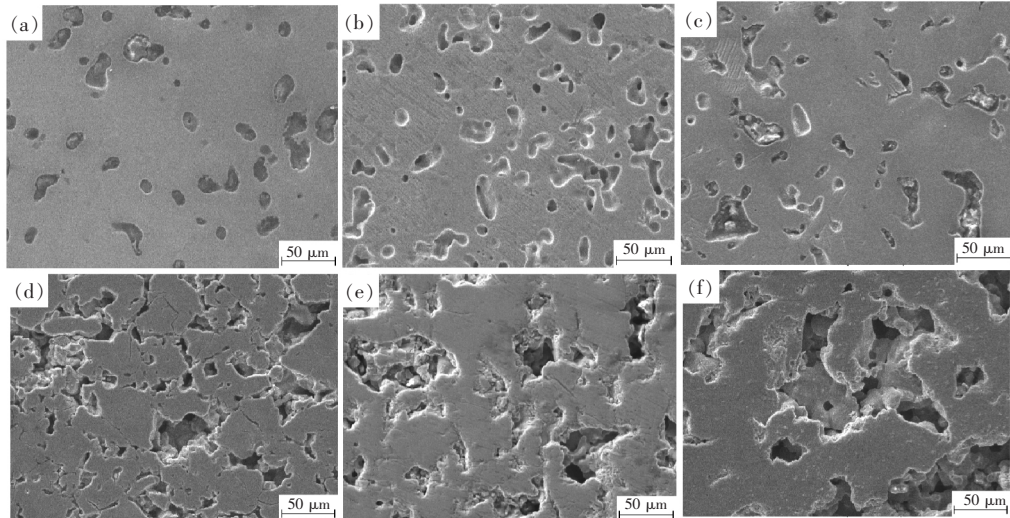
2.3 多孔 Ti-Al 合金的微观形貌

图 4 是 1 200 °C 烧结条件下,不同 Al 含量时多孔 Ti-Al 合金材料在扫描电镜下的微观形貌。如图 4 所示,Al 含量为 5% ~ 15% 时,材料中主要为封闭孔结构,主要是在压制过程中,由于粉末间不致密而形成了一部分小的间隙孔,同时在加热过程中,Ti 与 Al 发生固相扩散反应,Al 发生偏扩散而进入到 Ti 基体中,在 Al 粉颗粒的原有位置产

生大的孔洞,由此出现孔洞大小不一,间隙孔和原位生成孔并存的现象。在 Al 含量为 20% ~ 30% 时,材料主要为相互贯通的通孔结构,且孔隙数量增多,孔径增大,主要形成原因是大量 Al 元素通过晶界扩散至 Ti 晶粒内部,从而导致在 Ti 界面附近留下大量空位,空位发生聚集并长大,形成相互贯通的孔隙结构。同时,烧结过程中未来得及扩散的部分 Al 发生熔化,Al 液在毛细管力的作用下沿

Ti 颗粒表面铺展并与之反应,在基体界面处留下细孔,且覆盖在大孔洞上,出现闭孔孔隙球化和缩小的过程,随着反应的进一步进行,剩余 Al 液与 Ti 粉充分反应产生新相 Ti_3Al 相和 $TiAl$ 相,随着 Al

含量的增加,材料中熔化的 Al 增多,材料的孔隙数量也随之增加,从而形成较多蜂窝状连通孔。由此说明 Al 含量可改变多孔 Ti-Al 合金材料的孔隙结构。



(a) 5 %; (b) 10 %; (c) 15 %; (d) 20 %; (e) 25 %; (f) 30 %

图 4 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的微观形貌

Fig. 4 Pore morphology of porous Ti-Al alloys with different Al contents

图 5 为不同 Al 含量对多孔 Ti-Al 合金材料孔隙率的影响。

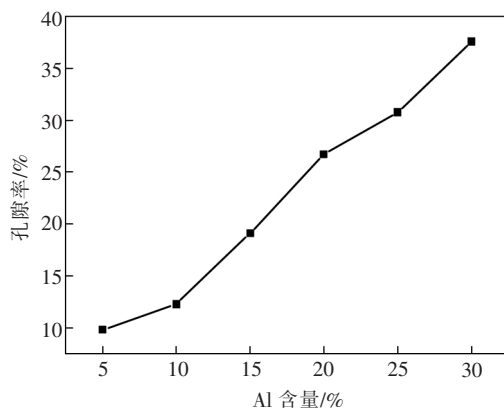


图 5 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的孔隙率

Fig. 5 Porosity of porous Ti-Al alloys with different Al contents

由图 5 可知,Al 含量与多孔 Ti-Al 合金材料的孔隙率呈线性关系,随着 Al 含量的增加,材料的孔隙率也随之增加。材料在烧结时温度升高,金属 Al 与 Ti 之间发生相互的固相扩散,由于两元素的 Kirkendall 效应,Al 发生偏扩散而进入到金属 Ti 中,在原有 Al 的位置产生较多空位,从而

形成一些封闭的孔洞; Al 含量越多,在其发生固相扩散的同时,部分 Al 与 Ti 发生反应而产生新相越多,产生的蜂窝状孔隙就越多。当 Al 含量达到 30%,材料的孔隙率最大,孔隙率由 9.8% 增至 37.6%。

2.4 多孔 Ti-Al 合金的径向收缩率

图 6 是添加不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金材料的径向收缩率。

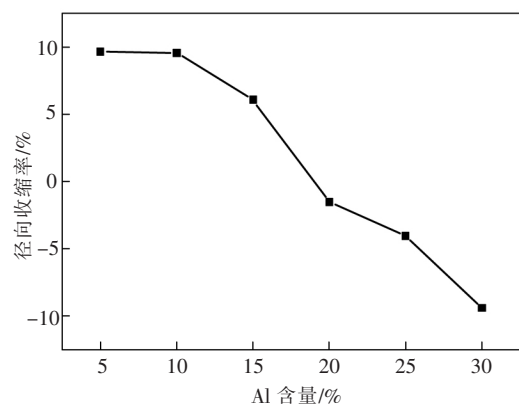


图 6 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的径向收缩率

Fig. 6 Radial shrinkage of porous Ti-Al alloys with different Al contents

由图 6 可知,随着 Al 含量的增加,多孔 Ti-Al 合金材料的径向收缩率整体呈减小趋势。当 Al 含量为 5% ~ 15% 时,试样的径向收缩率为正值,表明试样在烧结之后发生了径向收缩,收缩量随 Al 含量的增加而减小;当 Al 含量为 20% ~ 30% 时,试样的径向收缩率为负值,表明试样在烧结之后发生了径向膨胀,膨胀量随 Al 含量的增加而增大。

径向收缩率与多孔 Ti-Al 合金材料的内部孔隙结构有较大关系,在烧结过程中 Ti、Al 两元素之间发生固相扩散,粉末颗粒之间的距离减小并形成闭孔结构,故材料出现收缩现象;随着烧结温度进一步升高,Al 偏扩散进入 Ti 基体晶格中发生相变,并与 Ti 反应产生第二相及过渡相,从而在材料中产生大量贯通的孔隙导致材料体积膨胀,且 Al 含量越高,偏扩散效应越明显,材料的体积膨胀量越大。

2.5 多孔 Ti-Al 合金的抗压强度

图 7 是不同 Al 含量对多孔 Ti-Al 合金材料抗压性能的影响。

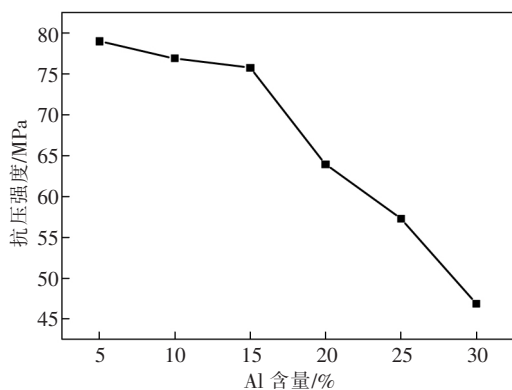


图 7 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of porous Ti-Al alloys with different Al contents

由图 7 可知,随着 Al 含量的增加,材料的抗压强度呈减小的趋势。主要原因是随着 Al 含量的增加,材料的孔隙率随之增加,材料内部的闭孔逐渐转变为通孔,使得材料间的骨架和承力面积减小,故抗压强度随之降低。在 Al 含量为 5% ~ 15% 时,材料的抗压强度变化不大,强度值在 75 ~ 78 MPa,是因为材料在烧结过程中由于 Al 的添加相对较少,仅发生了 Ti 与 Al 两金属之间的固相扩散而形成闭孔,孔结构单一且相对较少;在 Al 含量为 20% ~ 30% 时,材料的抗压强度急剧下降,强度值由 78 MPa 降至 47 MPa,原因是高温环境下材料中添加的 Al 在固相扩散的同时,

由于高温作用出现了部分 Al 熔化而产生液态 Al,液态 Al 使材料的孔结构及大小发生变化,形成了大量的蜂窝状通孔,孔壁随 Al 含量增加而变薄,承载能力下降,所以材料的抗压强度逐渐减小。

2.6 多孔 Ti-Al 合金的耐腐蚀性

为了对比不同 Al 含量对多孔 Ti-Al 合金材料耐腐蚀性能的影响,用电化学腐蚀方法测试了材料的极化曲线,依据极化曲线中的腐蚀电位和电流密度评价材料的耐腐蚀性能。图 8 是不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金烧结试样在 3.5% NaCl 溶液中耐腐蚀性测试的极化曲线;表 4 是极化曲线中腐蚀电位、电流和电流密度值。

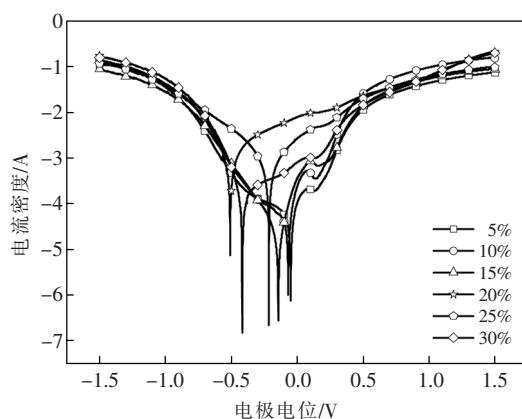


图 8 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的极化曲线

Fig. 8 Polarization curve of porous Ti-Al alloys with different Al contents

表 4 不同 Al 含量多孔 Ti-Al 合金的极化曲线参数

Table 4 Polarization curve parameter of porous Ti-Al alloys with different Al contents

$w(\text{Al}) / \%$	腐蚀电位/V	腐蚀电流/A	电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
5	-0.050	-6.123	1.95
10	-0.068	-5.997	1.91
15	-0.144	-6.563	2.09
20	-0.508	-5.128	1.63
25	-0.215	-6.657	2.12
30	-0.417	-6.835	2.18

结合图 8 和表 4 可以看出,随着 Al 添加量的增大,多孔 Ti-Al 合金材料的电化学腐蚀电位呈先增大后减小,电流密度呈先减小后增大的变化趋势。当 Al 含量为 5% ~ 15% 时,材料的腐蚀电位和电流密度值相近,说明材料在 3.5% NaCl 溶液中的耐腐蚀性能基本相同;Al 含量为 20% 时,材料的腐蚀电位最大值为 -0.508 V,腐蚀电流密度最小值为 1.63

A/cm^2 , 腐蚀电位增大, 电流密度减小, 此时材料的耐腐蚀性能最好; 而随 Al 含量增至 25% ~ 30% 时, 腐蚀电位随之减小, 电流密度随之增大, 材料的耐腐蚀性能又有所下降。

3 结论

1) 多孔 Ti-Al 合金材料主要平衡相为 α -Ti、 Ti_3Al 和 $TiAl$, 随着 Al 含量的增加, α -Ti 相逐渐减小, Ti_3Al 相逐渐增多, 当 Al 含量达到 20% ~ 30% 时, α -Ti 相完全消失, 材料主要平衡相为 Ti_3Al 和少量 $TiAl$ 。

2) 多孔 Ti-Al 合金材料的孔隙率随 Al 含量的增加逐渐增大, 最大孔隙率为 37.6%; Al 含量为 5% ~ 15% 时, 材料发生径向收缩并具有大小孔洞并存的闭孔结构, Al 含量为 20% ~ 30% 时, 材料发生

径向膨胀并具有相互贯通的开孔结构。

3) 多孔 Ti-Al 合金材料的抗压强度随 Al 含量的增加而降低, Al 含量为 5% ~ 15% 时, 材料的强度为 75 ~ 78 MPa, Al 含量为 20% ~ 30% 时, 材料的抗压强度急剧下降, 强度值由 78 MPa 降至 47 MPa。

4) 多孔 Ti-Al 合金材料的耐腐蚀性呈先增大后减小变化趋势, 在 Al 含量为 20% 时, 多孔 Ti-Al 合金材料的耐腐蚀性最强, 其腐蚀电流密度值最小为 $1.63 A/cm^2$ 。

5) 本文研究结果, 为多孔 Ti-Al 系金属间化合物材料的制备工艺优化、材料孔隙结构控制提供部分可参考的试验数据, 后期将对其在生物医用领域的应用性能进行研究, 为满足人体植入材料的需求, 多孔 Ti-Al 材料的生物相容性、高强度、低模量将是其研究重点。

参考文献

- [1] Liu Yanan, Jiao Xinyang, Feng Peizhong. Research progress of intermetallic compounds porous materials [J]. Materials China, 2017, 36 (Z1): 532-540, 565.
(刘亚南, 焦欣洋, 冯培忠. 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 (Z1): 532-540, 565.)
- [2] Su Shulan, Rao Qihua, He Yuehui. Effects of porosity on tensile properties of the Ti-Al intermetallic compound porous material [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (5): 1258-1261.
(苏淑兰, 饶秋华, 贺跃辉. 孔隙率对 Ti-Al 金属间化合物多孔材料拉伸性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (5): 1258-1261.)
- [3] Li Xianyu, Hao Gangling, Wang Weiguo, et al. The preparation of multifunctional intermetallic compound porous materials based Ti-Al [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2017, 36 (1): 35-37.
(李先雨, 郝刚领, 王伟国, 等. 多功能泡沫 Ti-Al 金属间化合物材料的制备工艺研究 [J]. 延安大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (1): 35-37.)
- [4] Chen Murong, Jiang Yao, Tian Li, et al. Effect of molding parameters on pore structure Ti-35% Al porous material [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2013, 35 (2): 70-74.
(陈慕容, 江垚, 田俐, 等. 成型参数对 Ti-35% Al 多孔材料孔结构的影响 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2013, 35 (2): 70-74.)
- [5] Liu Yuzuo, Li Xide, Li Juying, et al. Effect of pore-forming agent $(NH_4)_2CO_3$ 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 $(NH_4)_2CO_3$ 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] Di Yuli. Effect of rare earth LaF_3 and sintering process on properties of porous Ti-Al alloy material [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (18): 123-129.
(狄玉丽. 稀土 LaF_3 及烧结工艺对多孔 Ti-Al 合金材料性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (18): 123-129.)
- [7] Zhang Fengshou, He Yuehui, Jiang Yao, et al. Effect of pressing pressure on pore structure and filtering performance in porous TiAl alloy [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2006, 11 (4): 214-218.
(张丰收, 贺跃辉, 江垚, 等. 压制压力对多孔 TiAl 合金孔结构及过滤性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2006, 11 (4): 214-218.)
- [8] Huang Hujun, He Yuehui, Jiang Yao, et al. Preparation and characteristics of Ti-Al based alloy porous material [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21 (4): 337-342.
(黄虎军, 贺跃辉, 江垚, 等. Ti-Al 系金属间化合物多孔材料的制备和性能 [J]. 材料研究学报, 2007, 21 (4): 337-342.)

(下转第 59 页)

- by micro-milling and anodic oxidation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 1-4.
- [6] Wu Jingrong. Discussion on phase transformation of high strength trace-Ti alloy steel in continuous cooling process [J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 427-429.
(吴京戎. 连续冷却过程中高强度建筑用微钛合金钢相变问题探讨 [J]. 铸造技术, 2016, 37(3): 427-429.)
- [7] Zou Tao, Chen Changjun, Zhang Min, et al. Study on laser welding mechanisms of glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 76-81.
(邹涛, 陈长军, 张敏, 等. 建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 76-81.)
- [8] Li Na. Application analysis of titanium and titanium alloy materials in the field of environmental protection construction [J]. Shanxi Metallurgy, 2016, 39(5): 51-52, 66.
(李娜. 钛及钛合金材料在建筑环保领域的应用分析 [J]. 山西冶金, 2016, 39(5): 51-52, 66.)
- [9] Liu Xing, Chen Changjun, Wang Xiaonan, et al. Study on process and performance of architectural glass-to-titanium alloy TC4 with laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 58-64.
(刘星, 陈长军, 王晓南, 等. 建筑用玻璃与钛合金 TC4 的激光封接工艺及性能研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 58-64.)
- [10] Li Yan, Zhang Xiaochen, Song Meihui, et al. Research progress of processing method for titanium alloy [J]. Heilongjiang Science, 2018, 9(9): 158-159.
(李岩, 张晓臣, 宋美慧, 等. 钛合金成型方法的研究进展 [J]. 黑龙江科学, 2018, 9(9): 158-159.)
- [11] Chen Ronghao, Yang Ming. Optimization of electromagnetic pulse forming process of titanium alloy pipe fittings for sports equipment [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 150-153.
(陈荣浩, 杨明. 体育器材用钛合金管件的电磁脉冲成形工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 150-153.)

编辑 杨冬梅

(上接第53页)

- [12] Tan Ping, Ge Yuan, Tang Huiping, et al. Study on TiAl porous metal [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S4): 561-564.
(谈萍, 葛渊, 汤慧萍, 等. TiAl 多孔材料的研制 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S4): 561-564.)
- [13] Lin Junpin, Chen Guoliang. Development of TiAl intermetallic based compound [J]. Materials China, 2009, 28(1): 31-37.
(林均品, 陈国良. TiAl 基金属间化合物的发展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(1): 31-37.)
- [14] 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.)
- [15] Li Xianyu, Wang Weiguo, Hao Gangling, et al. Preparation and property of one new intermetallic compound porous materials based Ti-Al with spherical pores [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(5): 20-24.
(李先雨, 王伟国, 郝刚领, 等. 新型超轻高强球形孔 Ti-Al 的制备及其力学性能研究 [J]. 有色金属工程, 2017, 7(5): 20-24.)
- [16] Hao Gangling, Wang Hui, Li Xianyu, et al. Preparation and mechanical property of novel ultralight TiAl materials with high porosity [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2379-2384.
(郝刚领, 王辉, 李先雨, 等. 新型超轻 TiAl 多孔材料的制备及其力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2379-2384.)
- [17] 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.)
- [18] Liu Peisheng. Determining methods for porosity of porous materials [J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 34-36.
(刘培生. 多孔材料孔隙率的测定方法 [J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 34-36.)

编辑 杨冬梅