

特约专栏

Ti-Al 金属间化合物多孔材料的研究进展

江 焱¹, 贺跃辉¹, 黄伯云¹, 林均品², 杨 帆²

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

(2. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: Ti-Al 金属间化合物多孔材料兼备陶瓷和金属多孔材料的性能优势, 为具有很大发展潜力的新型无机多孔材料。目前, 对于 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的研究包括以下 3 个方面: 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的制备及孔结构形成过程和机理; 偏扩散-反应合成-烧结制备的 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的物理、化学性能; 偏扩散-反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的应用及其潜力。Ti-Al 金属间化合物多孔材料包括多孔体、多孔膜和多孔纸型膜等多种形式; Ti-Al 金属间化合物多孔材料的性能主要包括膨胀特性、孔结构性能、抗环境腐蚀性能及焊接性能; Ti-Al 金属间化合物多孔材料的现有应用范围主要包括过程工业中流体介质的过滤分离净化, 以及化学工业中复合钎膜的支撑体。

关键词: Ti-Al 金属间化合物; 多孔材料; 反应合成; 性能; 应用

中图分类号: TG146.2+3 文献标识码: 文章编号: 1674-3962(2010)03-0018-05

Progress in Research on Ti-Al Intermetallic Compound Porous Material

JIANG Yao¹, HE Yuehui¹, HUANG Baiyun¹, LIN Junpin², YANG Fan²

(1. State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Ti-Al intermetallic compound porous material colligates the property advantages of both porous ceramics and metals, which is regard as a novel inorganic porous material with great development potential. Currently, researches on Ti-Al intermetallic compound porous material include three parts: fabrications, properties, and applications. The fabrications of this porous material include reactive synthesis of porous body, porous membrane and paper membrane; the properties include swelling behavior, pore structure, environment corrosion resistivity and welding property; the applications of this porous material include filtration elements used in the separation process for industrial fluid and supports of compound Pd membrane in chemical engineering.

Key words: Ti-Al intermetallic compound; porous material; reactive synthesis; properties; application

1 前 言

二十多年来, Ti-Al 金属间化合物一直被作为具有潜在应用前景的高温轻质高强结构材料而进行研究^[1-5], 而忽略了 Ti-Al 金属间化合物具有的一系列优异的化学性能^[6-8]、物理性能和力学性能^[1,9-10]。为了更大程度挖掘该新材料的应用可能性, 提出 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的概念, 并研究出元素混合粉偏扩散-反应合成-烧结制备方法, 其制造成本低廉, 工艺简

单、可控, 所制备的材料组织细小均匀, 且属于近净成形工艺等特点, 是一种非常有发展前景的制备方法。反应合成法的最大优势在于合成过程可控性强, 即可以通过成形方式, 成形压力, 烧结方式, 以及烧结过程参数的调节来控制最终合成多孔材料的孔结构和性能。Ti, Al 之间的反应合成过程如图 1 所示。在元素 Al 粉与 Ti 的反应过程中, 研究者观察到^[11], 压坯的体积膨胀量可高达 30%。这一现象产生的原因在于^[12-13]: ①低温段加热过程中, Ti, Al 固相扩散时, Al 偏扩散造成 Kirkendall 效应, 留下很多 Kirkendall 孔隙; ②继续升温加热过程中, 剩余 Al 熔化后, 在毛细管力和表面张力作用下, 液态 Al 对 TiAl₃ 相的颗粒进行破碎, 造成蜂窝孔结构; ③TiAl₃ 的形成导致 Ti 颗粒的中心位置发生偏移; ④在反应过程中, 吸附在原料颗粒表面以及压坯中

收稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目 (50825102); 973 基础研究项目 (2009CB623406)

通信作者: 贺跃辉, 男, 1963 年生, 博士, 教授

存在的气体大量逸出。

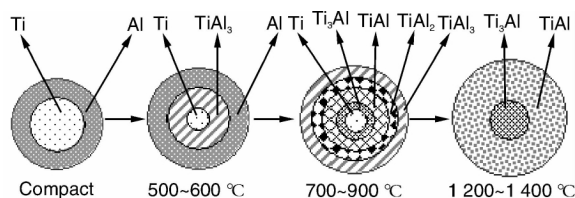


图1 Ti, Al 元素粉末反应合成过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reactive synthesis procedure of Ti/Al elemental compacts

进一步通过对 Ti, Al 元素混合粉固相扩散反应合成-烧结过程的控制,充分利用 Al 元素快速偏扩散引起 Kirkendall 效应进行造孔,可以实现对 Ti-Al 新型多孔材料孔结构的精确控制^[14-15]。目前,对该新型多孔材料展开了以下 3 个方面的研究^[14-17]: 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的制备及孔隙形成机理;偏扩散-反应合成-烧结制备 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的性能;偏扩散-反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的应用。

2 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的制备

2.1 元素混合粉末偏扩散反应合成制备 Ti-Al 金属间化合物多孔材料

Ti-Al 金属间化合物多孔材料的制备采用偏扩散-反应合成-烧结的粉末冶金技术方法。真空烧结阶段是整个 Ti-Al 金属间化合物多孔材料制备过程的关键,分为普通真空烧结和约束烧结两种方式^[14-15]。普通烧结中的三阶段烧结工艺,即低温阶段除去氧化性吸附气体;中温阶段促使 Ti/Al 元素发生固相反应,生成预反应层,同时阻碍两者之间可能发生的自蔓延反应;高温阶段促进 Ti-Al 烧结坯中的平衡相成分均匀化。其中的关键在于,中温阶段的固相扩散反应过程中元素 Al 粉的大量消耗和足够厚度中间预反应层的生成,这直接影响到 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的孔结构控制和坯体终极形状。采用三阶段真空普通烧结工艺,可以制备出良好近净成型的复杂形状的 Ti-Al 金属间化合物多孔材料。普通烧结工艺中, Ti-Al 坯体表现出大幅度的体积膨胀特性。

经过三阶段烧结工艺, Ti-Al 金属间化合物多孔材料表现出良好的孔结构形貌,其孔隙按数量、孔径及形成特点可以分为两类^[14-17]。大量的孔径相对较粗大的孔隙产生在金属间化合物中生成物的颗粒之间。其中,不同相结构的金属间化合物多孔材料的孔隙形貌有所不

同。 α_2 -Ti₃Al 金属间化合物中的孔隙主要呈短条状, γ -TiAl 金属间化合物中的孔隙主要呈短条状和等轴状两种形貌,而 TiAl₃ 金属间化合物中的孔隙则主要呈等轴状或近等轴状。此外,一小部分孔径在 2~5 μm 范围内的细孔在生成物的颗粒内部产生,这部分孔隙基本呈现等轴状形貌。颗粒间孔隙大都沿骨架颗粒或晶界相互连通。

以三阶段烧结工艺为特征的普通烧结方法,制备成本低廉,易实现批量化生产。约束烧结工艺具有烧结周期短和孔径控制方便等优势,但同时,此方法对烧结模具尺寸有严格要求^[14]。由于 Ti-Al 坯体的径向膨胀在反应合成过程中被严格限制,在其生成物的颗粒之间所产生大量孔隙表现出细小孔径的特征^[14-16]。

2.2 粉末/薄膜偏扩散反应合成-烧结制备非对称 Ti-Al 金属间化合物多孔膜

粉末/薄膜偏扩散反应合成-烧结方法是元素混合粉末反应合成制备多孔材料的延伸和应用,其核心技术及孔隙形成机理与元素混合粉末反应合成方法相同^[15]。此外,由于溅射薄膜的沉积颗粒细小、尺寸均匀,并且膜厚尺度小,由此制备的 Ti-Al 金属间化合物多孔膜具有非常细小且分布均匀的孔隙。同时, Ti-Al 金属间化合物多孔膜中大量的孔隙大都在生成物颗粒之间形成,一小部分更为细小的等轴状孔隙在颗粒内部形成,这与元素粉末反应合成工艺是一致的。Ti-Al 金属间化合物多孔膜中的颗粒间孔隙在 620 $^{\circ}\text{C}$ 时即已产生,并且倾向于在颗粒之间的富 Al 区域首先形成。在颗粒内部形成的细小等轴状孔隙与颗粒间孔隙同时产生,也是通过固相扩散产生的 Kirkendall 孔隙^[15,17]。

非对称 Ti-Al 金属间化合物多孔膜是由 Ti-Al 金属间化合物多孔材料支撑体和其表面的 Ti-Al 金属间化合物多孔膜两部分通过冶金结合构成。非对称 Ti-Al 金属间化合物多孔膜在保证 Ti-Al 金属间化合物多孔支撑体高孔隙度和高通量的基础上,同时具有 Ti-Al 金属间化合物多孔膜的细小孔径。这种结构的多孔体应用到过滤领域,即为具有高通量和高过滤精度的无机分离膜材料,具有广阔的高端应用前景^[15,17]。

2.3 致密薄膜反应合成制备 Ti-Al 金属间化合物多孔纸型膜

Ti-Al 金属间化合物多孔纸型膜以 Al 箔为基体,通过磁控溅射方式在其一端表面上沉积一层金属 Ti 膜所形成。致密薄膜反应合成工艺是元素粉末反应合成工艺的进一步延伸^[18]。具体工艺路线为,金属箔→表面处理→溅射镀膜→反应合成。与现有的多孔纸型膜的制备工艺相比较^[19],这种薄膜的反应合成工艺具有制备流

程简单,成本低廉,适合工业化生产等特点。

厚度相当的 Ti/Al 膜层经反应合成后最终形成了单一 γ -TiAl 相的金属间化合物多孔纸型膜^[18]。这种多孔纸型膜两端膜面的生成物形貌及孔结构形貌基本相似。生成物呈现不规则的多边颗粒状形貌,大量的孔隙仍然在生成物的颗粒之间形成,尺度在 2~5 μm 范围内,并且大多以贯通孔的形式存在。

Ti-Al 金属间化合物多孔纸型膜孔径分布均匀且贯通,因此具有高的过滤精度。同时无支撑体结合,如果能实现与其它多孔体的连接便可立即减小其孔径,提高其过滤精度,因而具有良好的过滤分离的应用前景^[18]。

2.4 元素粉末反应合成制备 TiAl-Nb 多孔材料

高 Nb Ti-Al 金属间化合物具有优异的抗高温氧化性能,其多孔体可作为良好的高温隔热材料。研究者研究了 Nb 元素粉和 Nb-Al 金属间化合物粉的添加对 Ti-48Al 多孔材料孔结构和拉伸性能的影响。研究表明,Nb 含量低于 2% 时,材料物相为 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al, Ti-48Al-2Nb 金属间化合物的孔结构与 Ti-48Al 多孔材料相似; Nb 含量高于 2% 时,物相增加了 AlNb₂,孔结构发生改变。采用 Nb 元素粉,许多颗粒在骨架表面上形成,随着 Nb 元素含量的增加,材料的拉伸强度急剧降低。采用 Nb-Al 金属间化合物粉,微孔沿着大孔出现,随着 Nb 元素含量的增加,材料的拉伸强度升高^[20]。

研究者对元素粉末合成 Ti-45Al-8.5Nb-(W, B) (原子百分数)金属间化合物的组织和力学性能进行了研究。研究结果表明,经过 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 热压, Nb 颗粒分散在 Ti-Al 基体上。随着热压温度和烧结时间的增加,组织变得均匀。1 400 $^{\circ}\text{C}$ /0.5 h 的条件下, Nb 的扩散是不均匀的; 1 400 $^{\circ}\text{C}$ /2 h 或 1 500 $^{\circ}\text{C}$ /1 h 的条件下,全层状组织粗化。Nb 元素通过扩散溶进 Ti-Al 基体,孔隙原位形成。热等静压处理仅能一定程度上减少孔隙度,并不能全部消除孔隙。Nb 含量越高,材料的压缩强度越高,但韧性比铸造金属间化合物差很多^[21-22]。

3 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的性能

3.1 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的膨胀特性

金属间化合物的成分,烧结温度以及烧结方式均对反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的烧结膨胀特性有着显著的影响^[14,16]。

原料成分中的 Al 元素含量直接影响到多孔体中的 Kirkendall 孔隙的含量^[16]。在 20%~60% Al (质量分数) 含量范围内, Ti-Al 金属间化合物多孔材料的体积膨胀

率 α 与 Al 含量 c 之间表现出 $\alpha = K \cdot c - \varepsilon$ 的线性关系。Ti-65Al 金属间化合物由于相对 TiAl₃ 相过量的液态 Al 的出现导致体积的相对回缩。偏扩散造成的 Kirkendall 效应是导致 Ti-Al 金属间化合物膨胀行为的主要原因。

Ti-Al 金属间化合物的烧结膨胀特性受外界约束的影响明显^[14]。在约束烧结的连续升温过程中,由于作用在坯体径向和轴向上的约束力及其不均匀性,导致 Ti-Al 金属间化合物在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以下温度表现出膨胀速率为 0.06%/K 的缓慢而均匀的膨胀行为,同时坯体径向上的最大膨胀量仅为轴向上的 5.5%。

3.2 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的孔结构性能及其影响因素

研究者系统研究了原料成分以及压制压力等制备参数对 Ti-Al 金属间化合物多孔材料孔结构性能包括孔隙度,最大孔径和透气度的影响^[16,23]。

Al 含量是决定 Ti-Al 金属间化合物多孔材料孔隙度的主要因素^[16]。在质量分数为 20%~60% 的 Al 含量范围内, Ti-Al 金属间化合物多孔材料的孔隙度与 Al 含量之间遵循严格的直线增加规律。Ti-Al 金属间化合物多孔材料中的 Kirkendall 孔隙度 θ_K 与 Al 含量 c_{Al} 之间遵循 $\theta_K = K_c \cdot c_{\text{Al}}$ 的直线规律。Al 含量在质量分数为 45% 以下时,最大孔径和透气度的随 Al 含量增加缓慢;随 Al 含量的进一步增加,压坯中 Al 颗粒的团聚导致最大孔径的快速增大,同时金属间化合物开孔隙度的进一步增加导致透气度的快速增大。

压制压力对上述孔结构性能参数影响不显著,可以用来调节金属间化合物多孔材料的孔隙曲折程度。随着压制压力的增大, Al 颗粒变形加剧,导致多孔体的孔隙曲折程度增大。随压制压力的增大,金属间化合物总孔隙度以 2.8%/100 MPa 的平均速率缓慢减少,这主要归因于压坯间孔隙度的减少^[23]。

Ti-Al 金属间化合物多孔材料的透气度 K 与开孔隙度 θ 和最大孔径 d_m 之间严格满足 Hagen-Poiseuille 方程^[16]。反应合成过程中,多孔体开孔隙度的变化过程可以分为孔隙度增长速率截然不同的 4 个主要阶段,每个阶段的开孔隙度 θ 与温度 T 之间均遵循 $\theta = k_i \cdot T + c_i$ 的直线变化规律。约束烧结过程中,多孔体开孔隙度及最大孔径的变化行为相似,根据变化速率的不同分为各自呈现直线规律变化的 3 个阶段。约束烧结多孔体开孔隙度和最大孔径的变化行为是由约束条件、膨胀行为和连续烧结工艺共同决定的。

3.3 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的抗环境腐蚀性能

研究者研究了 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的抗高温氧化性能和抗强酸腐蚀性能^[24-25]。研究表明,与当前普

遍使用的金属多孔材料相比, Ti-Al 金属间化合物多孔材料具有优异的抗高温氧化性能和抗强酸腐蚀性能。

Ti-Al 金属间化合物多孔材料的 600 °C 空气中的循环氧化行为遵循抛物线规律, 其氧化动力学方程为 $\Delta m^2 = 1.08 \times 10^{-5} \cdot t$ 。Ti-Al 金属间化合物多孔材料优异的抗高温氧化性能由 TiAl 基金属间化合物致密材料的优异抗氧化性和多孔体的孔结构特征共同决定^[25]。

Ti-Al 金属间化合物多孔材料在 pH = 2, 温度为 90 °C 的盐酸溶液中的循环腐蚀行为遵循抛物线规律, 其动力学方程为 $\Delta m^2 = 5.41 \times 10^{-5} \cdot t - 2.08 \times 10^{-4}$ 。Ti-Al 金属间化合物多孔材料优异的抗腐蚀性能归因于 TiAl 金属间化合物中的化学键结构^[24]。

3.4 Ti-Al 金属间化合物多孔材料与 434L 不锈钢的钎焊连接性能

采用 Ti-Cu 粉焊料可以实现多孔 Ti-Al 金属间化合物与 434L 不锈钢的真空钎焊连接^[26]。在所选择的工艺参数范围内, 室温抗拉强度随焊接时间延长呈上抛物线型变化, 在焊接温度为 955 °C 及焊接时间为 240 s 时, 连接件的抗拉强度达到最大值 65 MPa, 可以满足多孔材料的工作需要。多孔 TiAl/Ti-Cu 焊料/434L 不锈钢接头界面形成 4 个反应层, 整个接头界面结构依次为: 多孔 TiAl, $\text{Ti}_3\text{Al} + \text{Ti}_2\text{Cu}$, $\text{TiCu} + \text{Ti}_2\text{Cu}$, 富 Ti 层, 富 Fe 层和 434L 不锈钢。

4 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的应用

4.1 TiCl_4 悬浊液的固液分离

研究者研究了元素混合粉末偏扩散反应合成 - 烧结 Ti-Al 金属间化合物多孔材料在粗四氯化钛固液分离工业过程中的应用^[15]。利用 Ti-Al 金属间化合物多孔体结构对固液体系中固体颗粒的截留, 可以实现具有高开孔隙度的 Ti-Al 金属间化合物多孔材料在过滤领域的应用。金属间化合物多孔材料具有抗强腐蚀性介质 TiCl_4 溶液腐蚀的能力, 取代现行布袋间隙式过滤, 实现 TiCl_4 溶液连续过滤、净化, 解决 TiCl_4 溶液生产过程中大量 HCl 污染水源和空气的重大环保问题。以 Ti-Al 金属间化合物多孔材料管为过滤介质, 结合过滤 - 反冲洗技术, 可以完全实现长期的密封式连续过滤过程, 大幅度减轻或避免原料的损失和环境污染, 同时, Ti-Al 金属间化合物多孔材料管具有长期稳定的高通量和高过滤精度, 采用最大孔径为 17 μm 的 Ti-Al 过滤管, 滤液固体含量稳定在 0.1% 左右, 完全满足工厂生产要求^[15]。

4.2 Pd/多孔 TiAl 金属间化合物基复合透氢膜

氢能作为一种清洁高效的新能源受到关注。Ti-Al

系金属间化合物因其特殊的混合键特征, 兼具陶瓷和金属的优良物理性能和化学性能。多孔 Ti-Al 金属间化合物的孔结构可控性高, 与金属 Pd 的晶体结构相似, 在大的温度范围内金属 Pd 与 γ -TiAl 的线膨胀系数极为接近, 可获得结合良好的界面结构^[27-29]。

用反应合成法制备了 Al 质量分数为 35% 的多孔 TiAl 金属间化合物, 用约束烧结优化孔结构后多孔体的最大孔径约 2~3 μm , 用化学镀方法制备了 Pd/多孔 TiAl 金属间化合物基复合透氢膜, 复合膜的纯 Pd 膜表面膜层致密, 厚度约为 7 μm 。在 600 °C 以下, Pd/多孔 TiAl 金属间化合物复合膜具有良好的界面热稳定性。复合膜具备良好的抗热震性能, 表面膜与基体结合良好。对复合膜进行真空退火可进一步提高其抗热震性能^[28-29]。退火后复合膜的氢分离性能为: 在温度为 500 °C、压差为 0.02 - 0.18 MPa 条件下, 复合膜的氢气平均渗透系数 F 为 $5.1 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, H_2/N_2 选择性为 323 - 400。

5 反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的应用展望

元素粉末反应合成 Ti-Al 金属间化合物多孔材料, 可以应用于当前无机多孔材料所普遍应用的领域外, 对于强腐蚀性, 强氧化性等苛刻环境下的应用, 具有如下明显的优势。

过滤、分离和净化领域 Ti-Al 金属间化合物多孔材料具有良好的孔结构可控性, 可根据服役条件的不同, 调节多孔体的通量及孔径特征, 满足不同过滤过程的需要^[15,17]。

化学合成领域 Ti-Al 系金属间化合物因其特殊的混合键特征, 兼具陶瓷和金属的优良物理性能和化学性能, 可广泛应用于化学化工领域^[27-29]。

隔热及散热材料领域 Ti-Al 系金属间化合物具有优异的抗高温氧化性能, 尤其是高 Nb 钛铝多孔材料, 在 800 °C 以上仍具有良好的结构稳定性, 适用于高温领域的隔热或散热过程^[20-22]。

参考文献 References

- [1] Hu D, Wu X, Loretto M H, *et al.* Advances in Optimisation of Mechanical Properties in Cast TiAl Alloys [J]. *Intermetallics*, 2005, 13(9): 914 - 919.
- [2] Lin Dongliang (林栋梁). 高温有序金属间化合物研究的新进展[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 1998, 32(02): 95 - 108.
- [3] Noda T. Application of Cast Gamma TiAl for Automobiles [J]. *Intermetallics*, 1998, 6(7/8): 709 - 713.

- [4] Cheng T, McLean M. Characterization of TiAl intermetallic Rods Produced from Elemental Powders by Hot Extrusion Reaction Synthesis (HERS) [J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32 (23): 6 255 - 6 261.
- [5] Fu Hengzhi(傅恒志), Guo Jingjie(郭景杰), Su Yanqing(苏彦庆), et al. TiAl 金属间化合物的定向凝固和晶向控制 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 2003, 13(04): 797 - 810.
- [6] Kamide H, Kashima H. Hot Corrosion Behaviour of TiAl with Salt in Artificial Sea-Water [J]. *Corrosion Engineering*, 1997, 46(2): 83 - 89.
- [7] Tang Z, Wang F, Wu W. Hot-Corrosion Behavior of TiAl-Base Intermetallics in Molten Salts [J]. *Oxidation of Metals*, 1999, 51(3): 235 - 250.
- [8] Wang W J, Lin J P, Wang Y L, et al. Isothermal Corrosion TiAl-Nb Alloy in Liquid Zinc [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 452 - 453(15): 194 - 201.
- [9] Kim Y W. Advances in Fundamental Understanding for Designing Engineering Gamma TiAl Alloys [J]. *Transactions of the Chinese Institute of Engineers*, 1999, 22(1): 13 - 25.
- [10] Zhong Z, Zou D, Li S. Advance in Ti_3Al and TiAl Intermetallic Materials [J]. *Acta Metallurgica Sinica, Series A: Physical Metallurgy & Materials Science*, 1995, 8(4/6): 531 - 541.
- [11] Kazuhisa Shibue. Production of TiAl (γ)/ Ti_3Al (α_2) Alloys [J]. *Material Japan*, 1996, 35(6): 616 - 622.
- [12] Liu Yong(刘咏), Huang Boyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉), et al. 元素粉末冶金方法制备 TiAl 基金属间化合物 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 1999, 4(3): 189 - 194.
- [13] Wang G X, Dahms M, Leitner G, et al. Titanium Aluminides from Cold-Extruded Elemental Powders with Al-Contents of 25 - 75 at% Al [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, 29(7): 1 847 - 1 853.
- [14] Huang Hujun(黄虎军), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. Ti-Al 系金属间化合物多孔材料的制备和性能 [J]. *Journal of Material Research*(材料研究学报), 2007, 21(4): 337 - 342.
- [15] He Yuehui, Jiang Yao, Xu Nanping, et al. Fabrication of Ti-Al Micro/Nanometer-Sized Porous Alloys through the Kirkendall Effect [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19: 2 102 - 2 106.
- [16] Jiang Y, He Y H, Xu N P, et al. Effects of the Al Content on Pore Structures of Porous Ti-Al Alloys [J]. *Intermetallics*, 2008, 16: 327 - 332.
- [17] Gao Lin(高麟), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. TiAl 金属间化合物微滤膜的制备与性能 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 2005, 10(4): 216 - 219.
- [18] Jiang Yao, Deng Chuping, He Yuehui, et al. Reactive Synthesis of Microporous Titanium-Aluminide Membranes [J]. *Materials Letters*, 2009, 63: 22 - 24.
- [19] Rosler J, Nath O, Jager S, et al. Fabrication of Nanoporous Ni-Based Superalloy Membranes [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(5): 1 397 - 1 406.
- [20] Wang Y H, Lin J P, He Y H, et al. Effect of Nb on Pore Structure and Tensile Property of Ti-48Al Cellular Alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 456: 297 - 303.
- [21] Wang Y H, Lin J P, He Y H, et al. Reaction Mechanism in High Nb Containing TiAl Alloy by Elemental Powder Metallurgy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16: 853 - 857.
- [22] Wang Y H, Lin J P, He Y H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of High Nb Containing TiAl Alloys by Reactive Hot Pressing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 461: 367 - 372.
- [23] Zhang Fengshou(张丰收), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. 压制压力对多孔 TiAl 金属间化合物孔结构及过滤性能的影响 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 2006, 11(4): 214 - 218.
- [24] Wu Zhifeng(武治锋), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. 多孔 TiAl 金属间化合物的抗热盐酸腐蚀性能 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 2007, 12(5): 310 - 315.
- [25] Zheng Zhi, Jiang Yao, Dong H X, et al. Environmental Corrosion Resistance of Porous TiAl Intermetallic Compounds [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19: 581 - 585.
- [26] Zhou Qun(周群), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. 多孔 TiAl 金属间化合物和 434L 不锈钢的钎焊连接 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 2008, 13(1): 30 - 34.
- [27] Gong H R, He Y H, Huang B Y. Bond Strength and Interface Energy between Pd Membranes and TiAl Supports [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(10): 101 907 - 101 910.
- [28] Wu Zhifeng(武治锋), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. Pd/多孔 TiAl 金属间化合物基复合透氢膜的制备与性能 [J]. *Journal of Materials Research*(材料研究学报), 2008, 22(5): 454 - 459.
- [29] Chen Murong(陈慕容), He Yuehui(贺跃辉), Jiang Yao(江垚), et al. 化学镀方法制备钯/多孔 TiAl 金属间化合物复合膜 [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程), 2008, 13(2): 115 - 119.