第 21 卷第 4 期 Vol.21 No.4

文章编号:1004-0609(2011)04-0784-12

Fe-Al、Ti-Al 和 Ni-Al 系金属间化合物 多孔材料的研究进展

李婷婷,彭超群,王日初,王小锋,刘 兵,王志勇

(中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083)

摘 要:总结 Fe-Al、Ti-Al、Ni-Al 3 大系金属间化合物的物相结构和基本特性,论述 Fe-Al、Ti-Al 和 Ni-Al 3 大 类金属间化合物多孔材料的制备方法、孔结构表征以及耐腐蚀性能,并指出孔结构参数的可控性研究、复合材料 的制备和焊接性能的提高是金属间化合物多孔材料未来的研究重点。

关键词:金属间化合物; Fe-Al 合金; Ti-Al 合金; Ni-Al 合金; 多孔材料; 耐腐蚀性能 中图分类号:TG146.2 文献标志码:A

Research progress in porous Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallic compound porous materials

LI Ting-ting, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LIU Bing, WANG Zhi-yong

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The phase structures and elemental characteristics of Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallic compound porous materials were summarized. The preparation methods, pore structures and corrosion resistances of these three kinds of intermetallic compound porous materials were discussed. The trends of development of porous Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallics compound porous materials, the controllability of parameters of pore structure, the preparation of composite and the improvement of welding performance, were pointed out.

Key words: intermetallic compound; Fe-Al alloy; Ti-Al alloy; Ni-Al alloy; porous material; corrosion resistance property

多孔材料是指具有一定尺寸和数量孔隙结构的材料,通常孔隙率较大,孔隙结构作为有用的结构存在^[1]。多孔材料种类繁多,按化学成分和孔径尺寸进行分类是目前常用的两种分类方法。根据化学成分的不同可将多孔材料分为无机多孔材料和有机多孔材料。无机多孔材料分为无机多孔材料和有机多孔材料。无机多孔材料主要包括金属多孔材料、陶瓷多孔材料和金属间化合物多孔材料3大类;有机多孔材料 主要包括生物多孔材料和非生物多孔材料。此外,多 孔材料也可根据孔径大小分为微孔(孔径 <2 nm)、介 孔(2 nm 孔径 50 nm)和宏孔(孔径 50 nm)多孔材料。目前,多孔材料已广泛应用于医药、化工、冶金、 海水淡化以及环境保护等领域,为提高工业生产率、 节约能源、保护环境做出了重大贡献。有机多孔材料 存在抗高温高压性能差、不耐有机溶剂,以及抗环境 腐蚀性能较差等缺陷,只能应用于环境较为友好的水 处理和生物等领域。相对于有机多孔材料而言,无机 多孔材料则更能体现其广泛的应用价值^[2]。金属多孔 材料具有较高的机械强度和较优的抗热震性能,以及 较好的机械加工性和焊接性能,但高温强度较低,高 温抗氧化和抗腐蚀性能较差。因此,难以应用于高温 领域或腐蚀性环境。与金属多孔材料比较,陶瓷多孔 材料具有化学稳定好、热稳定性优异以及工作温度高

收稿日期:2010-11-20;修订日期:2011-02-20

通信作者:彭超群,教授,博士;电话:0731-88877197;E-mail:pcq2005@163.com

等优点,但是,室温力学性能和可焊接性能较差,不 易组件化^[3]。

金属间化合物多孔材料是一种介于高温合金与陶 瓷之间的新型无机多孔材料,由于其按照金属键和共 价键共同结合,因此兼有金属材料和陶瓷材料的共同 优点,具有优异的性能,如低密度,高弹性模量,高 导热系数,高比强度和比刚度,优异的高温抗氧化性 能,良好的抗各种强酸、强碱、盐雾、氯分子和氯离 子腐蚀性能以及可加工性等。因此,作为高温催化剂 载体材料和不锈钢的替代材料,具有广阔的应用前 景^[4-6]。此外,在制备 Fe-Al、Ni-Al 和 Ti-Al 金属间化 合物的过程中,由于不同元素本征扩散系数的较大差 异所引起的偏扩散效应,使得材料中不可避免存在 Kirkendall 孔隙^[7-9]。Kirkendall 孔隙的存在严重影响 致密体结构材料的力学性能,必须加以消除,但作为 功能材料,则可对其进行有效利用。因此,近年 来,金属间化合物多孔材料迅速成为材料界研究的热 点之一。

目前,研究较多的金属间化合物多孔材料有 Fe-Al 系(Fe₃A1 和 FeAl)、Ti-Al 系(Ti₃Al 和 TiAl)以及 Ni-Al 系(Ni₃A1 和 NiAl)金属间化合物^[10],其性能特点如表 1 所列。金属间化合物多孔材料的研究主要集中在以 下 3 个方面:1)制备工艺的优化;2)成孔机理的探 讨;3)材料性能的改善和应用范围的扩大。此外,有 关这方面的研究性报道颇多,但综述论文鲜见报道。 因此,本文作者着重从以上3个方面对三大系金属间 化合物多孔材料的研究现状与进展进行系统的分析和 总结。

无机多孔材料的制备方法与性能 表征

1.1 制备方法

多孔材料的性能与其多孔结构有着密切的关系, 这也是目前国内外对多孔材料研究的热点之一^[23-26]。 由于不同的制备技术所得到的多孔材料的性能不同, 因此,要得到性能优良的多孔材料,制备技术显得十 分重要。制备多孔材料的关键和难点在于形成多孔结 构。单纯得到孔隙率很高的材料并不困难,但要控制 孔径及其分布、形状以及三维排列等,则需要对工艺 进行优化设计,选择适当的制备工艺可以得到合适的 孔洞大小、形貌和分布。

无机多孔材料的制备方法很多,目前应用较广的 有 5 种:添加造孔剂法、有机泡沫浸渍法、发泡法、 挤出成型法和颗粒堆积法,其成孔机理和工艺特点见 表 2^[26-29]。

无机多孔材料的制备方法多种多样,不同的制备 方法其孔隙形成机理不尽相同。根据多孔材料制备过 程中孔隙与材料本身两者之间的相互作用,可将无机 多孔材料制备方法中所依据的基本成孔机理分为两大 类:宏观物理成孔机理和微观成孔机理,即化学反应 成孔机理。宏观物理成孔机理包括:原料粒子物理堆 积成孔、添加成分脱除成孔、流体介质排除材料基体 成孔。几乎所有的无机多孔材料制备方法,都是根据 这4类机理中的一种或几种组合机理来制备多孔材料 的^[15]。

- 表1 Fe-Al、Ti-Al和 Ni-Al系金属间化合物多孔材料的性能特点
- Table 1 Property characteristics of Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallic compound porous materials

Material	Open porosity/ %	Maximum air permeability/ (m ³ ·(m ² ·s·Pa) ⁻¹)	Corrosion resistance (pH= $3\rightarrow 2$ or $t=25\rightarrow 90$)	Oxidation limit temperature/	Preparation method	Remark
Fe-Al	80.11 ^[11]	0.375×10 ^{-4[11]}	_	1 200 ^[11]	Addition of pore-making agents, dipping with polymer foams and reactive synthesis ^[11-13]	Larger density of Fe-Al, resulting in specific strength lower than those of high-tensile steel and nickel-base alloy
Ti-Al	58.7 ^[14]	1.7×10 ^{-4[15]}	Corrosion rate increasing a little ^[16]	1 000 ^[17]	Reactive synthesis ^[18]	Smaller density of Ti-Al, resulting in higher specific strength ^[17]
Ni-Al	37.8 ^[19]		Corrosion rate increasing ^[19]	1 250 ^[18]	Reactive synthesis and SHS ^[19, 21–22]	Melting point of Ni-Al of 1 638 ^[20]

786

表 2 无机多孔材料的主要制备方法及其特点^[26-29]

 Table 2
 Main preparation methods of inorganic porous materials and their characteristics^[26-29]

Table 2 Iviali	i preparation methods of i	norganic porous	materials and		105	
Preparation method	Pore formation mechanism	Aperture	Porosity/%	Advantage	Disadvantage	Remark
Addition of pore-making agents	Burning pore-making agents out or dissolution at high temperature to produce pore	10 µm–1 mm	0-50	Controllable pore size and shape, simple process	Inhomogeneous pore distribution, low porosity, pollution of environment	Pore size and shape depend on size and shape of pore-making agents
Dipping with polymer foams	Burning polymer foams out at high temperature to produce pore	100 μm–5 mm	70–90	High porosity and continuous pore	Shape and density of products being difficult to control, and being liable to pollute environment	Slurry should be compatible with polymeric sponge
Foaming	Blister being able to produce gas-discharging reactions in melts to create small pore	10 μm-2 mm	40-95	High porosity, closed pore materials being able to produce	Process being not easy to control	
Extrusion	Reserving honeycomb structures of die	> 1 mm	< 70	Controllable pore size and shape, continuous production	Preparation process with complex equipment, difficult to produce small porous materials	Methods are suitable to produce honeycomb materials
Particle stacking	Coarse aggregate being able to be bonded by fine aggregate, and pore being able to be created between aggregate	0.1–600 μm	20-30	Simple process and high strength of products	Low porosity, uncontrollable pore size and shape	Smaller size of aggregate, distribution of aperture more homogeneous

由于金属间化合物兼有金属与陶瓷共同的性能特 点:一方面,材料学者尝试沿用无机多孔材料的制备 方法来制备金属间化合物多孔材料,具体工艺流程如 图1所示;另一方面,由于金属间化合物原料组分(两 种或两种以上金属粉末)的特殊性,致使其成孔机理多 样化,制备工艺简单化(例如无压反应合成法与 SHS)。 主要表现在金属元素间存在的 Kirkendall 效应,会在 反应过程中产生 Kirkendall 孔隙,形成微孔。因此, 无需将合金粉末进行预合金化,且不需添加其他成孔 剂,就可利用原料粒子间的空隙、反应过程生成的孔 隙等,制备出高孔隙率的多孔材料,从而简化工艺, 减少污染,降低成本。

1.2 表征方法

金属间化合物多孔材料的表征包括孔结构表征和 性能表征。孔结构表征包括孔隙率、最大孔径和孔径 分布。性能表征包括材料性质和传递性能两方面,材 料性质包括机械强度和化学稳定性等,传递性能主要 是指渗透性能^[11]。



图 1 金属间化合物多孔材料制备工艺流程

Fig.1 Preparation flowchart of intermetallic compound porous material

第21卷第4期

1.2.1 孔结构表征

1) 孔隙率及开孔隙率

孔隙率及开孔隙率是多孔材料的主要性能参数。 由于多孔材料的用途广泛,不同的应用领域对其孔隙 形貌特征的要求不同。例如,过滤分离领域要求多孔 材料本身具有足够多的开孔隙,而对于隔热领域,多 孔材料的闭孔隙则成为更为有益的组元。孔隙率的测 量方法主要有显微镜观测法和阿基米德法^[17]。其中, 显微镜观测法可直接观测多孔体的总孔隙率,但不能 测算多孔体的开孔隙率^[11];而阿基米德法可根据渗入 多孔体中流体在凝固后的体积直接测定多孔材料的开 孔隙率,并且在已知材料理论密度的前提下,可以间 接计算其总孔隙率和闭孔隙率^[30]。

2) 最大孔径和孔径分布

最大孔径和孔径分布是过滤材料对流体分离选择 性的决定因素,是过滤材料的重要参数,目前测定孔 径及孔径分布的方法很多,最常用的是压汞法和泡压 法^[11]。压汞法无法区分通孔隙和半通孔隙;泡压法不 但可以直接对成品或半成品的连通孔隙进行孔径分布 分析,而且可检测最大孔径和缺陷尺寸。

1.2.2 性能表征

1) 传递性

多孔材料的传递性能主要是指其渗透性能^[31]。渗 透性能是指流体在一定压差下透过多孔体的能力,其 大小取决于流体的特性、多孔体的通孔率、孔径及其 分布、孔隙形状和多孔层厚度等因素^[30]。常用测量方 法为流体渗透法。渗透法是通过多孔体的阻力来测算 比表面积的一种方法,流体可以是液体或者气体,其 中使用较多的是气体^[30]。

2) 力学强度

力学强度是多孔材料性质表征的重要参数,然而, 到目前为止尚无一种标准的测试方法对其进行合理表 征。现今主要借鉴无机材料力学强度的测试方法。通 常采用抗拉强度和抗弯强度等表示^[11]。

3) 化学稳定性

化学稳定性是多孔材料的另一材料性质表征参数,以其耐酸碱性能表示,即在一定的条件(酸或碱溶液、温度和时间)下考察多孔材料的质量变化、孔隙率变化以及最大孔径的变化^[11]。

2 Fe-Al、Ti-Al 和 Ni-Al 系金属间化合物多孔材料的基本特性与研究现状

2.1 Fe-Al 系金属间化合物多孔材料

2.1.1 Fe-Al 系金属间化合物的物相结构与基本特性

Fe-Al 金属间化合物具有 B_2 和 DO_3 两种有序结构。由其相图^[33](图 2)可知:在室温下,当铝原子摩尔分数为 22.5%~33%时 Fe-Al 金属间化合物为 DO_3 结构,当铝原子摩尔分数为 33%~51%时为 B_2 结构;温度在 540 以上且当铝原子摩尔分数为 22.5%~51%时均为 B_2 结构^[32]。因此,与 DO_3 结构相比, B_2 结构具有更宽的成分范围,更好的相稳定性(约 1 200 下没有相变),而且可以固溶一定比例的第三组元,故可以通过合金化改善其性能。 B_2 型 FeAl 金属间化合物为体心立方结构(图 3)^[33],在化学计量比下 Al 占据体心位置,Fe 占据顶角位置。当 Fe 高于计量比时,形成 Al 亚点阵上的一个空位对和 Fe 亚点阵上的一个错排 Al 原子^[33]。



图 2 Fe-Al 二元合金相图^[33]





图 3 FeAl 的晶体结构^[33]

Fig.3 Crystal structure of FeAl^[33]: (a) B_2 ; (b) DO₃

 B_2 -FeAl 的密度为 5.56 g/cm³, 弹性模量为 259 GPa, 具有较高的比模量和比强度,优良的抗氧化和 抗腐蚀性能,但室温强度不及高强钢和镍基高温合金。

DO₃-FeAl 的密度为 6.72 g/cm³,硬度相对较低,HRC 小于 25,但其加工硬化速率高,具有较好的耐磨性, 经表面氮化处理,其表面硬度可提高 63%。由于 FeAl 金属间化合物具有特殊的超点阵位错结构,用常规方 法制备的金属间化合物塑性较低^[34]。

2.1.2 Fe-Al 系金属间化合物多孔材料的研究现状

近年来,由于 Fe-Al 金属间化合物具有优异的高 温抗氧化性能(其抗氧化极限温度可达 1 200)、较高 的比模量和比强度以及丰富的原料来源,因此,研究 者便开始了对 Fe-Al 金属间化合物多孔材料的制备与 研究。国内外学者对 Fe-Al 金属间化合物的研究大多 集中在制备方法的优化以及成孔机理的探讨,其较为 成熟的研究有 YAMADA^[10]、高鳞等^[35]、贺跃辉等^[36-37] 申请的专利技术。

根据初始原料形态的不同,可将制备工艺分为如 下两大类:第一类,制备前先将 Fe、Al 金属粉末预合 金化化,再进行成型与烧结;第二类,制备时直接将 Fe、Al 金属粉末混合均匀再压制成型与烧结。由于制 备方法的不同,其成孔机理也不尽相同。例如,直接 将 Fe、Al 金属粉末混合制备时,当温度达到铝熔点, 铝发生熔化,产生孔隙;而将金属粉末进行预合金化 后,其成孔机理大多为造孔剂成孔和骨料颗粒间的空 隙成孔。

先将粉末预合金化,再将其进行多孔化,是一种 比较传统的制备方法,有关这方面的研究报道颇多, 其研究的重点是孔结构参数的优化以及力学性能的提 高。例如,刑毅等^[38]采用高压水雾化法制备的 Fe₃Al 预合金粉末(合金粉末的不规则形状确保了良好的成 形性),经冷等静压成型和真空/氢气烧结,制备出平 均孔径为 7~20 µm、气体渗透性大于 2.25×10⁻⁴ L/(cm²·min·Pa)、抗压强度达到 120 MPa 以上的高性能 Fe₃A1 多孔材料。其成孔机理为利用颗粒堆积法,细 骨料将粗骨料粘结,粗骨料间形成孔隙。而庞厚君 等[12, 39]利用球磨机械合金化与真空煅烧相结合的工 艺制备 Fe₃Al 粉末,并采用添加造孔剂的方法,制得 开孔隙率高达 35%且具有渗透性能的多孔金属间化合 物 Fe_3Al 。庞厚君等^[12]所使用的目标造孔剂为 NaCl、 硬脂酸锌、PMMA、脲素以及 TiH₂,其中通过 Image J 软件的分析表明:当以 PMMA 为造孔剂时,孔隙周 长、面积以及形状因子均优于其他造孔剂。成孔机理 为挥发性造孔剂—聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA 高温下 挥发,在基体中留下孔洞,形成多孔结构。此外,陈 斌^[13]也采用机械合金化结合真空热处理的工艺由 Fe 粉和 Al 粉制备出性能稳定的 Fe₃Al 粉末,再利用具有 三维网状结构的聚氨酯泡沫结合浆料浸渍的方法制备 Fe₃Al 多孔材料。但其研究的重点是一次浸渍工艺和 多次离心浸渍工艺,所制备出的 Fe₃Al 多孔材料的最 优性能为:开孔隙率 80.11%,抗压强度 2.13 MPa。该 研究表明,通过多次离心浸渍工艺制备的 Fe₃Al 多孔 材料,相比一次浸渍工艺,堵孔大量减少,材料的均 匀性和稳定性有很大提高。

直接以金属粉末为原料制备金属间化合物多孔材 料是一种新型的制备工艺^[37],其主要特点如下:省去 预合金化工序,简化工艺,降低成本;无需添加造孔 剂就可制得高孔隙率多孔材料,减少环境污染;造孔 机理多样化等。高海燕等^[3-4,11]直接以 Fe 和 Al 元素粉 末为原料,经压制成型和分段无压烧结,制得 Fe-Al 系金属间化合物多孔材料,并系统研究了Al含量、烧 结温度、升温速率、粉末粒度和压制压力等因素对孔 结构参数的影响。其中,升温速率的影响主要表现如 下^[40]:升温速率越大,体积膨胀越大(FeAl 多孔材料 的制备伴随有体积膨胀,主要是由于生成了中间相 Fe₂Al₅), 孔隙率越高, 最大孔径值越大。粉末粒度^[41] 不是决定 FeAl 孔隙度的主要因素,而是影响最大孔径 的主要因素。此外,他们还研究了其成孔机理,主要 有: 低温固态下的 Kirkendall 效应造孔、中温段液态 铝的消耗与反应造孔、高温段的反应相变造孔和贯穿 整个烧结过程的颗粒间孔隙的演变^[11]。

此外,Fe-Al 金属间化合物多孔材料作为一种实 用性很强的材料,焊接组件化是其推广应用过程中所 面临的问题之一,主要包括:Fe-Al 金属间化合物多 孔材料自身的焊接以及它和异体材料(结构材料)的焊 接,例如不锈钢和碳钢等。高海燕等^[42]采用 Cu-10%Sn 粉末压坯为钎料,真空下经过940 保温 15 min 的处 理,可获得 FeAl 多孔材料与不锈钢连接良好的焊接接 头,焊接后的抗拉强度为 83.9 MPa,可达到 FeAl 多 孔材料母体抗拉强度的 90.6%,且其真空钎焊机理为 液态钎料对被焊母体的粘结连接及钎料元素与被焊母 体元素间的互扩散和反应。

2.2 Ti-Al 系金属间化合物多孔材料

2.2.1 Ti-Al 系金属间化合物的物相结构与基本特性

Ti-Al 二元合金相图如图 4 所示^[43]。从图 4 可以看 出,在整个成分范围内随着 Al 含量的逐渐增加,Ti-Al 合金表现出 4 种典型的金属间化合物结构,即 α_2 -Ti₃Al、 γ -TiAl、TiAl₂和 TiAl₃。除 TiAl₂亚稳相外, 其他 3 种金属间化合物由于其特有的结构和性能而被 广泛研究与应用。



图 4 Ti-Al 二元合金相图

Fig.4 Binary phase diagram of Ti-Al alloy



图 5 Ti-Al 合金典型晶体结构

Fig.5 Crystal structures of Ti-Al alloys: (a) α_2 -Ti₃Al; (b) γ -TiAl

α₂-Ti₃Al 的成分范围是 14%~23%(质量分数),属 于 Kumakov 型金属间化合物,这种金属间化合物随温 度变化在约 1 125 存在一个有序-无序转变点,在临 界温度以下即为有序的 α₂-Ti₃Al 相,晶体结构为 DO₁₉ 结构,如图 5(a)所示;在临界温度以上为无序的 α_2 -Ti₃Al 固溶体,具有 hcp 结构。 γ -TiAl 的成分范围是 35%~41.5%(质量分数),属于 Berthollide 型金属间化 合物,其晶体结构为 Ll₀ 结构,即由(002)原子面上交 替排列 Ti 原子和 Al 原子构成,其所属晶系为面心正 方晶系(fct),长短轴比 c/a 大于 1,如图 5(b)所示。这 种晶体结构的 γ -TiAl 金属间化合物在固相线以下的任 何温度下均表现出有序状态。TiAl₃是一种具有化学计 量比成分的相,其成分为 Ti-63%Al(质量分数),晶体 结构为 DO₂₂ 结构,表现出超点阵长程有序结构。TiAl₃ 金属间化合物在 600 以下还存在一个低温相,即 α_2 -TiAl₃相^[17]。

总的来说, Ti-Al 合金具有低密度、高弹性模量、 高导热系数、高抗氧化性能、抗强酸强碱腐蚀性能和 抗氯分子氯离子腐蚀性能,高比强度和比刚度等一系 列优异的物理性能、化学性能和力学性能。在整个成 分范围内,3种典型的金属间化合物 α₂-Ti₃Al、γ-TiAl 和 TiAl₃的基本特性如表 3 所列。

表 3 Ti-Al 金属间化合物的基本特性[17]

 Table 3
 Fundamental performances of Ti-A1 intermetallic compounds^[17]

Alloy	Density/ (g·cm ⁻³)	Module at room temperature/ GPa	Oxidation limit temperature/	Tensile strength/ MPa
α_2 -Ti ₃ Al	4.1-4.7	120-145	650	800-1 140
γ-TiAl	3.7-3.9	160-176	900-1 000	450-700
TiAl ₃	3.3-3.4	-	_	_

2.2.2 Ti-Al 系金属间化合物多孔材料的研究现状

近年来,对 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的研究 主要集中在以下几个方面:原料配比和制备工艺的优 化、耐蚀性能和焊接性能的提高以及复合材料的制 备。原料配比主要指原料配比中粉末 Al 所占的质量分 数。文献[14-15,44-46]报道,Ti-Al 合金的孔结构参 数(开孔隙率、最大孔径和透气度)和成孔机理与 Al 含 量有关:主要表现在随原料粉末中 Al 含量的提高, Ti-Al 合金的最大孔径和开孔隙率都增大,当 Al 含量 达到 60%(质量分数)时,开孔隙率和透气度具有最大 值,分别为 59%和 1.7×10⁻⁴ m³/(m²·s·Pa);且当铝含 量超过 60%(质量分数)时,总孔隙率呈下降趋势。Ti-Al 多孔材料的主要成孔机理为由 Ti-Al 元素偏扩散反应 所引起的 Kirkendall 效应导致的体积膨胀,但孔隙形 成机理随 Al 含量的不同而不同^[15]。

元素粉末反应合成法是制备 Ti-Al 金属间化合物 多孔材料的常用方法之一,其中压制成型是此制备方 法的关键步骤之一,具体表现在压制压力对孔隙率、 最大孔径及渗透系数有很大影响,主要是因为压制压 力的大小决定颗粒之间的间隙大小及数量,从而影响 反应造孔和孔隙长大。当压制压力为 250 MPa 时, TiAl 合金烧结坯具有较大的开孔隙率、较小的孔径和较大 的渗透系数^[47]。由于烧结方法多种多样,采用不同的 烧结方法,所得材料的性能也各不相同。YEHESKEL 和 DARIEL 等^[48]利用超声波速测量技术,研究无压和 热等静压烧结 y-TiAl 中孔隙率对动态弹性模量的影 响,主要依据是经无压和热等静压烧结的样品孔隙率 不同,即比表面积不同,因此所得超声波速不同,即 线性变化趋势不同,反映出动态弹性模量的变化。此 外, Ti-Al 坯体在元素粉末反应合成过程中,表现出突 出的烧结膨胀特性:一方面,这是孔隙形成的重要特 征,且与孔结构性能密切相关。另一方面,也给研究 者一个重要的启示,即可通过控制烧结膨胀特性来控 制多孔材料的孔结构。江垚和贺跃辉^[18]采用普通反应 合成和约束烧结两个过程研究多孔 Ti-Al 的膨胀行为 及其规律,以便优化其孔结构参数。在反应合成过程 中, Ti-Al 合金坯体在 700 左右就发生迅速膨胀, 这 主要是由于 Al 发生熔化,粉末间扩散速率加快所致。 此时,平均膨胀速率达到1.17%/K,体积膨胀达到60% 以上,开孔隙度接近40%。当温度达到800 以上时, Ti-Al 合金坯体膨胀速率减缓,平均速率为0.017%/K, 体积膨胀量约为 1%~3%, 开孔隙度达到 47%。但是, 在约束烧结条件下,当温度低于1000 时,Ti-Al合 金坯体表现出均匀而缓慢的膨胀行为,平均膨胀速率 为 0.057%/K。

耐蚀性主要是指金属间化合物多孔材料在一定温度下的耐酸碱能力,主要用孔结构参数的变化及多孔材料的质量增加来表示。Ti-Al 金属间化合物多孔材料具有优异的耐蚀性能^[16]。据报道^[49],Al 含量为35%(质量分数)的多孔 TiAl 金属间化合物在90 恒温条件下,当pH 值由3减小到2时,耐腐蚀性能略有下降(主要表现为样品质量损失增大,开孔隙率增大),但仍明显优于多孔钛、多孔镍以及多孔不锈钢的。分析认为,多孔 Ti-Al 的优良耐蚀性能主要归因于Ti-Al 金属间化合物特殊的键合特征以及 Ti、Al 元素的强钝化能力。

焊接性能主要是指多孔材料与不锈钢焊接后的整体抗拉强度,无机多孔材料的焊接组件化是实现其应用的一个重要步骤。周群等^[50]采用与 Ti-Al 金属间化 合物具有相似性能的 Ti 基活性焊料(Ti-Cu,此焊料能 形成共晶焊料,熔点低,流动性好,能润湿大部分金属和部分非金属,并能与 Ti-Al 基体发生冶金结合, 提高焊接头的强度)研究了多孔 Ti-Al 金属间化合物与 434L 不锈钢的真空钎焊连接。其结果表明:采用 Ti-Cu 粉焊料可以实现 Ti-Al 合金与不锈钢的连接;当焊接 温度及焊接时间分别为 955 和 240 s时,连接件的 室温抗拉强度达到 65 MPa,可满足多孔材料的工作需 要。

此外,在复合材料方面,由于多孔 Ti-Al 合金的 孔结构可控性高,晶体结构与金属 Pd 的相似,且在 常温下,Pd 与 γ -TiAl 的线膨胀系数极为接近,有望获 得结合良好的界面结构及性能优异的复合材料。在此 背景下,武治锋等^[51]用化学镀法成功制得氢气平均渗 透性能和抗热震性能良好的 Pd/多孔 TiAl 合金基复合 透氢膜。

2.3 Ni-Al 系金属间化合物

2.3.1 Ni-Al 系金属间化合物的物相结构与基本特性

图 6 所示为 Ni-Al 合金二元相图。从图 6 可看出, NiAl 相中含 Ni 量可为 45%~60%(摩尔分数),高温区 相对更宽些,较宽的成分范围为其合金化提供了有利 条件。在 Ni-Al 二元系中,存在 Ni₅Al₃、Ni₂Al₃、NiAl₃、 Ni₃Al 和 NiAl 等化合物,由于 Ni₅Al₃、Ni₂Al₃和 NiAl₃ 熔点均较低,无法与传统 Ni 基高温合金相竞争;此外, 由于实际应用的 Ni₃Al 基合金大多引入一定量的 y 相, 在密度及熔点上比传统 Ni 基合金提高的幅度很有限, 还不能满足更高温度环境的需要。因此,国内外许多 材料研究工作者把目光越来越多地集中在 NiAl 基合 金的研究上^[20]。



图 6 Ni-Al 二元合金相图

Fig.6 Binary phase diagram of Ni-Al alloy

NiAl 晶体结构为类似于体心立方的 B₂ 结构,如 图 7 所示。Ni 原子占据顶角位置,Al 原子占据立方体 中心。其晶格点阵常数与合金成分及温度有关,室温 下化学计量比 NiAl 合金其晶格点阵常数为 0.288 7 nm。NiAl 是一种 β 相电子化合物,其共价电子和原子 的比为 3/2,键合方式为金属键和共价键混合型^[20]。



Fig.7 Crystal structure of NiAl

NiAl 特有的晶体结构决定了其优异的物理性能。 1) 熔点高,其熔点达到 1 638 ,比一般镍基合金高 300~500 ,比 Ni₃Al 高 250 ,其使用温度可达到 1 250 以上;2) 密度低,其密度为 5.86 g/cm³,仅为 镍及高温合金的 2/3,比 Ni₃Al 的密度还低 1.64 g/cm³, 可有效提高比强度;3) 热导率高。NiAl 的热导率高, 为一般高温镍基合金的 4~8 倍,可使零件温度梯度减 少,热应力降低,提高冷热疲劳性能^[20];4) 抗氧化性 能优异、二元 NiAl 合金在单相区的成分和温度范围 内,能够形成一种连续而致密的 Al₂O₃氧化膜,提高 其抗氧化性能^[43]。

2.3.2 Ni-Al 系金属间化合物多孔材料的研究现状

在三大系金属间化合物多孔材料的研究中,Ni-Al 系的研究报道最少,但是所涉及的研究范围较广。此 方面的研究主要包括制备工艺的优化、成孔机理探讨、 复合材料的制备以及耐蚀性的提高等。

Ni-Al 金属间化合物多孔材料常用的制备方法主要有两大类:自蔓延高温合成技术(SHS)和无压反应合成法。自蔓延高温合成技术(SHS),也称为燃烧化学反应合成法。无压反应合成法的基本流程为:以金属元素粉末为原料,经混合以及冷压成形后,进行两阶段固态偏扩散反应烧结,得到样品。采用自蔓延高温合成技术制备 Ni-Al 多孔材料,具有以下特点:1)可得到孔隙率高达55%、孔洞形状不规则、孔结构复杂、孔道曲折和孔壁粗糙的多孔材料^[52];2) 在相同的孔隙

率条件下,SHS与传统方法相比,所得多孔材料具有 更高的强度^[19];3) 混合粉末中 Ni/Al 的比例对孔隙率 有很大影响,例如,试验中得到的 Ni₃Al 的孔隙率最 低(<5%),而 NiAl₃的孔隙率则可达 45%^[21]。此外, 当 Ni/Al 质量比为 4:1 时,孔洞直径较小,颗粒较细 小、均匀^[52]。

采用 SHS 制备 Ni-Al 金属间化合物多孔材料时, 所涉及的成孔机理有^[19, 21]:1) 随着温度升高,Al 颗 粒熔融,产生孔隙;2) 试样内部气体体积基本不变, 温度升高,压强增大,气体逸出,形成孔洞;3) 由于 空 气 中 的 Al 粉 颗 粒 表 面 覆 盖 了 一 层 氧 化 物 (Al₂O₃·3H₂O),而且 Al 粉中溶解了一部分氢,因此反 应过程中有大量的氢气逸出,形成孔隙;4) Ni-Al 二 元合金相图中,液相线和固相线的距离较大,合金的 成分过冷区较大,倾向于形成枝晶,枝晶骨架的交接 使得枝晶间的液体被封闭,难以弥补收缩也是孔洞产 生的原因之一。

采用无压反应合成法制备 Ni-Al 金属间化合物多 孔材料时, 合金成分、粉末粒度和烧结温度等都对材 料的孔结构参数有影响,主要表现在如下几个方 面^[22, 53-55]:1) 随着 Al 含量增加,开孔隙率、最大孔 径和透气度增大,例如,在相同的烧结工艺下,多孔 NiAl 的最大孔径约为 35 µm, 而多孔 Ni₃Al 的约为 5 μm。2) 随着 Al 粉粒度增大,最大孔径和透气度都增 加,透气度的增加趋势更为显著;3)开孔隙度随温度 升高增大到一定值后呈减小趋势;4)由于中间相的形 成取决于烧结温度和 Al 含量,而有些中间相生成伴随 体积膨胀,有些伴随体积收缩,因此体积膨胀率与烧 结温度和 Al 含量有关 ;5) 可通过对 NiAl 压坯的预热 处理来优化孔结构参数。例如, DONG 等^[54]研究预热 处理对 NiAl 压坯的影响,结果表明,在低于 Al 熔点 的温度下对压坯进行预热处理,压坯不发生变形,且 孔结构与预热时间有着紧密联系。此外,由于在制备 NiAl 多孔材料的过程中会生成中间相 Ni₂Al₃, 因此会 导致体积膨胀。而且体积膨胀率、孔隙率和最大孔径 都随预热时间的延长而增大,但预热时间越长,最终 产品的最大孔径越小。

NiAl 金属间化合物多孔材料具有优异的耐蚀性。 例如,采用反应合成法制备的 NiAl 金属间多孔材料的 高温抗氧化性优于 316L 不锈钢的,在环境条件更为 苛刻的情况下可替代 316L 不锈钢^[9]。

在多孔复合材料方面,主要是 NiAl 与陶瓷的复合。例如,崔洪芝等^[56]以(Al₂O₃+TiB₂)为颗粒增强体

系,采用 SHS 制备了 NiAl/Al₂O₃+TiB₂ 多孔复合材料, 对比(Al₂O₃+TiB₂)加入前后,复合多孔材料的孔径减 小,孔隙间的连通性增强,孔隙率升高。崔洪芝^[20]的 研究表明:添加体积分数为 5%的发泡剂(Ti+B₄C), NiAl₃ 的孔隙率可提高到 80%;同时,原料组成对多 孔复合材料的孔隙形貌有很大影响,陶瓷粉末含量较 高时,形成的空隙多为开孔,而当金属粉末含量较高 时,则为球形闭孔。此外,还可采用无压熔渗法制备 TiC 含量较高的 TiC/Ni₃Al 复合材料^[57],并且通过增加 TiC 质量分数可以调节多孔预制件的孔隙结构,使预 制件的孔隙率增加;多孔预制件的孔隙结构,使预 制件的孔隙率增加;多孔预制件的孔隙率越高、 孔隙尺寸越大,则金属间化合物熔体浸渗畅通,复合 材料的孔隙率越小。

3 结语

金属间化合物多孔材料是一种介于高温合金与陶 瓷之间的新型无机多孔材料,性能优异,应用前景可 观。近年来,Fe-Al、Ti-Al、Ni-Al 金属间化合物多孔 材料的研究重点主要集中在制备工艺的优化、原料配 方的设计、可焊接性能和耐蚀性能的提高,以及孔结 构参数的可控性的实现。在Fe-Al、Ti-Al、Ni-Al 3 大 类金属间化合物多孔材料中,Fe-Al 系金属间化合物 多孔材料开孔隙率高达 80.11%,但是其密度较大,导 致其室温强度较高强钢的低。此外,Fe-Al 系金属间 化合物多孔材料的制备方法较少,还未见利用 SHS 制 备 Fe-Al 金属间化合物多孔材料的文献报道。Ti-Al 系 金属间化合物由于其密度较小,因此具有较高的比强 度,且其耐蚀性较好。Ni-Al 系金属间化合物多孔材 料的抗高温氧化能力最好,其抗氧化极限高达 1 250

, 这与其高熔点特性有关。

未来几年,从多孔材料的制备和应用的角度看, 金属间化合物多孔材料的发展趋势如下:1)开发能精 确控制孔结构、孔径大小及其孔径分布或具有特定取 向孔结构的制备工艺;2)多孔材料材质的复合化,即 引入添加剂,提高多孔材料的传递性能和化学稳定性; 3)可靠性焊接技术的研究与开发。焊接性能是金属间 化合物多孔材料实用化过程中所面临的主要问题之 一,直接影响其应用前景。总之,随着金属间化合物 多孔材料的制备工艺、焊接技术、成孔机理以及孔结 构表征等方面研究的深入,其应用化进程必将加快, 无机多孔材料的应用领域将更加广泛。

REFERENCES

- 杨涵崧,朱永长,李慕勤,吕 迎. 多孔陶瓷材料的研究现状 与进展[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2005, 23(1): 88-91. YANG Han-song, ZHU Yong-chang, LI Mu-qin, LÜ Ying. Current situation and development of porous ceramic material[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2005, 23(1): 88-91.
- [2] 席本强. 多孔材料的特性分析[J]. 科技信息, 2007, 23: 316-329.
 XI Ben-qiang. Analysis of the feature of porous material[J]. Science & Technology Information, 2007, 23: 316-329.
- [3] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智, 江 垚, 黄伯云, 徐南平. FeAl 金属间化合物多孔材料的制备[J]. 材料研究学报, 2008, 25(5): 485-489.

GAO Hai-yan, HE Yue-hui, SHEN Pei-zhi, JIANG Yao, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Preparation of porous FeAl material[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 25(5): 485–489.

- [4] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智, 江 垚, 黄伯云, 徐南平. Fe-Al 金属间化合物多孔材料的制备及孔结构表征[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(4): 275-280.
 GAO Hai-yan, HE Yue-hui, SHEN Pei-zhi, JIANG Yao, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Fabrication and pore structure characteristics of porous Fe-Al intermetallics[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2009, 14(4): 275-280.
- [5] JULBE A, FARRUSSENG D, GUIZARD C. Porous ceramic membranes for catalytic reaction-overview and new ides[J]. Journal of the Membrane Society, 2001, 181(1): 3–20.
- [6] 汤慧萍,张正德. 金属多孔材料发展现状[J]. 稀有金属材料 工程, 1997, 26(1): 1-6.
 TANG Hui-ping, ZHANG Zheng-de. Development status of porous metal materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(1): 1-6.
- [7] SALAMON M, MEHRER H. Interdiffusion, Kirkendall effect, and Al self-diffusion in iron-aluminum alloys[J]. International Journal of Materials Research and Advanced Techniques, 2005, 96(1): 4–16.
- [8] JIANG Y, DENG C P, HE Y H, ZHAO Y, XU N P, ZOU J, HUANG B Y, LIU C T. Reactive synthesis of microporous titanium-aluminide membranes[J]. Materials Letters, 2009, 63: 22–24.
- [9] DONG H X, JIANG Y, HE Y H, ZOU J, XU N P, HUANG B Y, LIU C T, LIAW P K. Oxidation behavior of porous NiAl prepared through reactive synthesis[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 122(2/3): 417–423.

李婷婷,等:Fe-Al、Ti-Al和Ni-Al系金属间化合物多孔材料的研究进展

- [10] YAMADA O. Method for producing intermetallic compound porous material: US 7374717B2[P]. 2008–05–20.
- [11] 高海燕. Fe-Al 金属间化合物多孔材料的研究[D]. 长沙: 中南 大学, 2009: 13-16, 33, 93-94.

GAO Hai-yan. Study on FeAl intermetallic compound porous material[D]. Changsha: Central South University, 2009: 13–16, 33, 93–94.

[12] 庞厚军. 汽车尾气净化器载体多孔材料的制备[D]. 南京: 华 东理工大学, 2005: 52-55.

PANG Hou-jun. Preparation of porous Fe₃Al alloy as carrier for automotive exhaust gases purification[D]. Nanjing: East China University of Science and Technology, 2008: 52–55.

- [13] 陈 斌. 浆料浸渍法制备汽车尾气催化剂载体的研究[D].南京: 华东理工大学, 2008: 41-46
 CHEN Bin. Study on Fe₃Al as carrier for automotive exhaust gases purification by slurry infiltration[D]. Nanjing: East China University of Science and Technology, 2008: 41-46
- [14] 黄虎军, 贺跃辉, 江 垚, 黄伯云, 徐南平. 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.
 HUANG Hu-jun, HE Yue-hui, JIANG Yao, HUANG Bai-yun,

XU Nan-ping. Preparation and characteristics of Ti-Al based alloy porous material[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(4): 337–342.

- [15] JIANG Y, HE Y H, XU N P, ZOU J, HUANG B Y, LIU C T. Effects of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys[J]. Intermetallics, 2008, 16: 327–332.
- [16] ZHENG Z, JIANG Y, DONG H X, TANG L M, HE Y H, HUANG B Y. Environmental corrosion resistance of porous TiAl intermetallic compounds[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 581–585.
- [17] 江 垚. Ti-Al 金属间多孔材料的研究[D]. 长沙:中南大学, 2008: 8-12, 17-19.
 JIANG Yao. Research of Ti-Al intermetallic compound porous material[D]. Changsha: Central South University, 2008: 8-12, 17-19.
- [18] 江 垚, 贺跃辉. 反应合成 Ti-35%Al 多孔合金的膨胀特性[J].
 材料研究学报, 2010, 24(2): 191-195.
 JIANG Yao, HE Yue-hui. Swelling behavior of porous Ti-35%Al alloy prepared by reactive synthesis[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(2): 191-195.
- [19] 姚坡元. 燃烧合成法制备 NiAl多孔材料的研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2004: 43-47.
 YAO Po-yuan. Research of NiAl porous material by SHS[D].
 Jinan: Shandong University of Technology, 2004: 43-47.
- [20] 崔洪芝. 多孔金属间化合物/陶瓷载体材料研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009: 14-16.

CUI Hong-zhi. Study on porous intermetallic/ceramic carrier materials[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009: 14-16.

- [21] KANETAKE N, KOBASHI M. Innovative processing of porous and cellular materials by chemical reaction[J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 521–525.
- [22] 吴 靓, 贺跃辉, 董虹星. Ni-Al 金属间化合物多孔材料的制备[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(1): 52-56.
 WU Liang, HE Yue-hui, DONG Hong-xing. Fabrication of porous Ni-Al intermetallic compounds[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2009, 14(1): 52-56.
- [23] HAI C X, WATANABE H, SHIRAI T, FUJI M, TAKAHASHI M, WANG F. Modifying the surface of electrically conductive porous alumina[J]. Materials Letters, 2009, 63(15): 1320–1322.
- [24] WANG X, RUAN J M, CHEN Q Y. Effects of surfactants on the microstructure of porous ceramic scaffolds fabricated by foaming for bone tissue engineering[J]. Materials Research Bulletin, 2009, 44(6): 1275–1279.
- [25] KÜSGENS P, ROSE M, SENKOVASKA I, FRÖDE H, HENSCHEL A, SIEGLE S, KASKEL S. Characterization of metal-organic frameworks by water adsorption[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009, 120(3): 325–330.
- [26] GONZALEZ G, GOMES M E, VITALE G, CASTRO G R. Effect of Al content on phase transitions of zeolite MEL[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009, 121(1/3): 26–33.
- [27] 曾令可,胡动力,税安泽,任雪潭,刘平安,王 慧,程小苏.
 多孔陶瓷制备新工艺及其进展[J].中国陶瓷,2007,43(4):3-7.
 ZENG Ling-ke, HU Dong-li, SHUI An-ze, REN Xue-tan, LIU
 Ping-an, WANG Hui, CHENG Xiao-su. The novel techniques and development of preparation of porous ceramics[J]. China Ceramics, 2007, 43(4): 3-7.
- [28] 王圣威,金宗哲,黄丽容.多孔陶瓷材料的制备及应用研究 进展[J]. 硅酸盐通报,2006,25(4):124-129.
 WANG Sheng-wei, JIN Zong-zhe, HUANG Li-rong. Development of processing and application of porous ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4): 124-129.
- [29] SAITO Y, TAKEI T, HAYASHI S. Effects of amorphous and crystalline SiO₂ additives on gamma A1₂O₃ to alpha A1₂O₃ phase transitions[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(8): 2197–2200.
- [30] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金出版社, 1981: 373-400.
 HUANG Pei-yun. Powder metallurgy principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 373-400.
- [31] 刘培生,杨全成,周茂奇.多孔材料透过性能的表征[J]. 钛工 业进展,2006,23(4):12-16.
 LIU Pei-sheng, YANG Quan-cheng, ZHOU Mao-qi. Expression of permeation property of porous materials[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(4): 12-16.
- [32] IKEDA O, OHNUMA I, KAINUMA R, ISHIDA K. Phase

equilibrium and stability of ordered BCC phases in the Fe-rich portion of the Fe-Al system[J]. Intermetallics, 2001, 9: 755-761.

- [33] YOSHIMI K, HANADA S, YOO M H. On lattice defects and strength anomaly of B₂-type FeAl[J]. Intermetallics, 1996, 4: 159–169.
- [34] DORFRNAN S. Non-empirical study of energy parameters in B₂ and DO₃ phases of Fe-A1 alloy[J]. Computational Materials Science, 2000, 17: 186–190.
- [35] 高 鳞, 贺跃辉, 徐进辉, 汪 涛. FeAl 金属间化合物多孔材料的制备方法:中国, 200810306379.8[P]. 2009-05-27.
 GAO Lin, HE Yue-hui, XU Jin-hui, WANG Tao. The preparation method of FeAl alloy porous material: CN 200810306379.8[P]. 2009-05-27.
- [36] 贺跃辉, 江 垚, 高海燕, 沈培智, 徐南平, 黄伯云. 一种制备孔径梯度 FeAl 金属间化合物均质过滤膜的方法: 中国专利CN 200710035404.4[P]. 2008-01-23.
 HE Yue-hui, JIANG Yao, GAO Hai-yan, SHEN Pei-zhi, XU Nan-ping, HUANG Bai-yun. A preparation method of gradient

pore FeAl alloy homogeneous membrane: CN 200710035404.4[P]. 2008-01-23.

- [37] 贺跃辉, 江 垚, 高海燕, 沈培智, 徐南平, 黄伯云. 一种 FeAl 金属间化合物过滤材料的制备方法:中国, 200710035406.3[P]. 2008-01-23.
 HE Yue-hui, JIANG Yao, GAO Hai-yan, SHEN Pei-zhi, XU Nan-ping, HUANG Bai-yun. A preparation method of FeAl alloy filter material: CN 200710035406.3[P]. 2008-01-23.
- [38] 刑 毅, 麻洪秋, 况春江. Fe₃Al 金属间化合物多孔材料的研究[J]. 粉末冶金技术, 2005, 23(4): 263-267.
 XING Yi, MA Hong-qiu, KUANG Chun-jiang. Investigation on Fe₃Al intermetallic porous materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2005, 23(4): 263-267.
- [39] 庞厚君,叶以富,陈 斌. 多孔 Fe₃Al 金属间化合物的试验研 究[J]. 金属热处理, 2006, 31(3): 55-58.
 PANG Hou-jun, YE Yi-fu, CHEN Bin. Research of porous Fe₃Al intermetallic compound[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(3): 55-58.
- [40] GAO H Y, HE Y H, SHEN P Z, XU N P, ZOU J, JIANG Y, HUANG B Y, LIU C T. Effect of heating rate on pore structure of porous FeAl material[J]. Powder Metallurgy, 2008, 52(2): 171–175.
- [41] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智, 陈 刚, 江 垚, 黄伯云, 徐南平.
 粉末粒度对 FeA1 金属间化合物多孔材料孔结构的影响[J].
 功能材料, 2009, 40(9): 1513-1515.
 GAO Hai-yan, HE Yue-hui, SHEN Pei-zhi, CHEN Gang, JIANG
 Yao, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Effect of powder size on the pore structure of porous FeA1 intermetallics[J]. Functional Materials, 2009, 40(9): 1513-1515.
- [42] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智, 江 垚, 黄伯云, 徐南平. FeAl 多 孔材料与不锈钢的焊接[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1):

90-95.

GAO Hai-yan, HE Yue-hui, SHEN Pei-zhi, JIANG Yao, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Welding of FeAl porous material and stainless steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 90–95.

- [43] 徐春梅, 郭建亭. NiAl 微晶涂层对两种 NiAl 基共晶合金高温 氧化性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(7): 673-678.
 XU Chun-mei, GUO Jian-ting. Effect of NiAl microcrystalline coatings on high temperature oxidation behaviors of two NiAl-based eutectic alloys[J]. Acta Metallrugica Sinica, 2002, 38(7): 673-678.
- [44] JIANG Y, DENG C P, HE Y H, ZHAO Y, XU N P, ZOU J, HUANG B Y, LIU C T. Reactive synthesis of microporous titanium-aluminide membranes[J]. Materials Letters, 2009, 63: 22-24.
- [45] 贺跃辉, 江 垚, 林小芹, 汤义武, 徐南平, 高海燕, 张启修.
 钛、铝元素粉末反应合成制备钛铝金属间化合物过滤膜的方法: 中国, 200410003039.5[P]. 2005-07-20.
 HE Yue-hui, JIANG Yao, LIN Xiao-qin, TANG Yi-wu, XU Nan-ping, GAO Hai-yan, ZHANG Qi-xiu. The preparation method of TiAl alloy membrane by pressureless sintering Ti/Al elemental powder: CN 200410003039.5[P]. 2005-07-20.
- [46] 贺跃辉, 江 垚, 林小芹, 汤义武, 徐南平, 高海燕, 张启修.
 孔径梯度均质钛铝金属间化合物过滤膜的制备方法:中国, 200410002601.2[P]. 2005-07-20.

HE Yue-hui, JIANG Yao, LIN Xiao-qin, TANG Yi-wu, XU Nan-ping, GAO Hai-yan, ZHANG Qi-xiu. The preparation method of gradient pore TiAl alloy homogeneous membrane: CN 200410002601.2[P]. 2005–07–20.

- [47] 张丰收, 贺跃辉, 江 垚, 林小芹, 黄伯云, 刘 咏. 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.
 ZHANG Feng-shou, HE Yu-hui, JIANG Yao, LIN Xiao-qin, HUANG Bai-yun, LIU Yong. Effect of pressing pressure on pore filtering performance in porous structure and TiAl alloy[J].
 Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2006, 11(4): 214-218.
- [48] YEHESKEL O, DARIEL M P. The effect of processing on the elastic moduli of porous γ-TiAl[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 354: 344–350.
- [49] 武治锋, 贺跃辉, 江 垚, 汤烈明, 黄伯云, 徐南平. 多孔 TiAl 金属间化合物的抗热盐酸腐蚀性能[J]. 粉末冶金材料科 学与工程, 2007, 12(5): 311-315.
 WU Zhi-feng, HE Yue-hui, JIANG Yao, TANG Lie-ming, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Corrosion resistance of porous TiAl alloy in hot hydrochloric acid solution[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2007, 12(5): 311-315.
- [50] 周 群, 贺跃辉, 江 垚, 高海燕, 沈培智. 多孔 TiAl 金属间 化合物和434L不锈钢的钎焊连接[J]. 粉末冶金材料科学与工

794

第 21 卷第 4 期

程,2008,13(1):30-34.

ZHOU Qun, HE Yue-hui, JIANG Yao, GAO Hai-yan, SHEN Pei-zhi. Brazing porous TiAl intermetallic to 434L stainless steel[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008, 13(1): 30–34.

[51] 武治锋, 贺跃辉, 江 垚, 汤烈明, 黄伯云, 徐南平. Pd/多孔 TiAl 合金基复合透氢膜的制备与性能[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 454-460.
WU Zhi-feng, HE Yue-hui, JIANG Yao, TANG Lie-ming, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Fabrication and

characterization of Pd/porous TiAl alloy composite membrane[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(5): 454-460. [52] 黑鸿君,崔洪芝,董淑光,张金玲,曹丽丽.反应合成 Ni-Al

金属间化合物多孔材料的研究[J]. 新技术新工艺, 2007(9): 83-85.

HEI Hong-jun, CUI Hong-zhi, DONG Shu-guang, ZHANG Jin-ling, CAO Li-li. Study on Ni-Al intermetallic porous material by SHS[J]. New Technology & New Process, 2007(9): 83–85.

[53] DONG H X, JIANG Y, HE Y H, SONG M, ZOU J, XU N P, HUANG B Y, LIU C T, LIAW P K. Formation of porous Ni-Al intermetallics through pressureless reaction synthesis[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 484: 907-913.

- [54] DONG H X, HE Y H, ZOU J, XU N P, HUANG B Y, LIU C T. Effect of preheating treatment at 575 of green compacts on porous NiAl[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492: 219–225.
- [55] 高 鳞, 贺跃辉, 徐进辉, 汪 涛. NiAl 金属间化合物多孔材 料及其制备方法:中国, 200810304720.1[P]. 2009-02-04 GAO Lin, HE Yue-hui, XU Jin-hui, WANG Tao. NiAl intermetallic compound porous material and their preparation method: CN 200810304720.1[P]. 2009-02-04.
- [56] 崔洪芝,王 勇,黑鸿君,曹丽丽.多孔 TiB₂+Al₂O₃/NiAl 基 复合材料的研究[J]. 粉末冶金技术,2008,26(5):350-353.
 CUI Hong-zhi, WANG Yong, HEI Hong-jun, CAO Li-li. Study on porous TiB₂+Al₂O₃/NiAl-based composite material[J].
 Powder Metallurgy Technology, 2008, 26(5): 350-353.
- [57] 缪燕平,何柏林. 多孔预制件对 TiC/Ni₃Al 复合材料孔隙率的 影响[J]. 粉末冶金工业,2009,19(3):41-44.
 MIAO Yan-ping, HE Bo-lin. Effect of porous performs on porosity of prepared TiC/Ni₃Al composites[J]. Power Metallurgy Industry, 2009, 19(3):41-44.

(编辑 龙怀中)