

特约专栏

轻质 γ -TiAl 金属间化合物的研究进展

林均品, 张来启, 宋西平, 叶 丰, 陈国良

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: γ -TiAl 金属间化合物是一种新型轻质的高温结构材料, 是当代航空航天工业、民用工业等领域的优秀候选高温结构材料之一, 具有重要的工程化应用潜力。介绍了 γ -TiAl 基金属间化合物的发展过程, 以及成分-组织-性能-制备关系, 产业化和应用状况。特别指出, 北京科技大学发展的高 Nb-TiAl 金属间化合物为国内外 TiAl 基金属间化合物发展的重点方向。最后总结了 TiAl 基金属间化合物的国家需求和发展趋势。

关键词: TiAl 金属间化合物; 高 Nb-TiAl 金属间化合物; 发展趋势

中图分类号: TG146.2; TG146.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)02-0001-08

Status of Research and Development of Light-Weight γ -TiAl Intermetallic Based Compounds

LIN Junpin, ZHANG Laiqi, SONG Xiping, YE Feng, CHEN Guoliang

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

Abstract: γ -TiAl alloys belong to the group of most promising novel light-weight structural materials for use in aerospace and automotive applications. The development process of conventional TiAl intermetallic compound was introduced, and the relations among composition, microstructure, properties and fabrication, industrialization and application were reviewed. It was shown that the high Nb containing TiAl alloys, developed by University of Science and Technology Beijing, are the vital developing direction for TiAl alloys. Finally, the national needs and development trend for TiAl alloys were summarized.

Key words: TiAl intermetallic compound; high Nb containing TiAl intermetallic compound; development trend

1 前 言

γ -TiAl 金属间化合物是一种新型轻质的高温结构材料, 体积质量不到镍基合金的 50%, 具有轻质、高比强、高比刚、耐蚀、耐磨、耐高温以及优异的抗氧化性等优点, 并具有优异的常温和高温力学性能, 使用温度可达到 700~1 000 °C, 成为当代航空航天工业、兵器工业以及民用工业等领域的优秀候选高温结构材料之一, 具有重要的工程化应用潜力。

2007 年美国波音公司宣布, 其 787 民用客机使用的 GE 公司发动机 GENX 低压涡轮后两级叶片将采用 TiAl 合金, 减轻发动机质量约 800 磅。这是 TiAl 合金最重要的应用, 这对航空发动机的减重意义重大, 推动了全球 TiAl 合金的应用热潮。1998 年和 2003 年日本三菱重工

采用真空熔炼反重力低压铸造法制备了高 Nb-TiAl 合金, 并应用在赛车汽车发动机用增压涡轮, 以替代较重的镍基合金 Incone 1 713C 涡轮。使用 TiAl 合金节省启动时间, 提高了最大转速, 在民用工业也显示出极大的潜力。

经过近二十多年的努力, 国内外在 TiAl 合金的成分-组织-性能等方面的基础研究已经取得丰硕成果, 国内在 TiAl 合金的研制方面与国际先进水平基本同步, 在有些方向如高 Nb-TiAl 合金属于国际领先水平, 引领高温 TiAl 合金的国际研究方向。

在 TiAl 合金的工程化、应用方面, 国外开展研制的单位和知名生产企业较多, 比如美国 GE 公司、PCC 公司、UES、Howmet 公司、代顿大学, 德国 ALD 公司、GKSS、GfE, 奥地利的 Plansee 公司, 英国 Rolls-Royce 公司、伯明翰大学, 日本三菱公司和 Daido 制钢公司等都在进行大量的工程化试验研究, 一些部件已经应用于航空、航天以及汽车领域。而国内还没有形成真正意义上的工程化和应用, 主要是没有解决

收稿日期: 2009-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(50771013, 50871121)资助

通信作者: 林均品, 男, 1963 年生, 教授

TiAl 合金工程化的关键技术,特别是缺乏制备和加工方面的基础研究。

目前,国内在 TiAl 合金工程化和应用领域投入的人力、物力、财力不能与国外相比,因此,国内特别急需大型企业能够参与到 TiAl 合金的研制和生产开发上来。在科研院所多年研究的基础上,加强产学研结合,调动企业强大的工程化研制、生产能力,解决 TiAl 合金工程化的关键技术,以便尽快实现现有技术的产业化,促进 TiAl 合金的应用。

2 国外本领域基础研究现状及发展趋势

经过二十多年的发展,结构金属间化合物中只有 TiAl 合金在国内外还是研究热点,保持良好的势头。如图 1 所示,国内外 TiAl 合金领域发表的文章一直保持着高数量,说明了这一趋势。

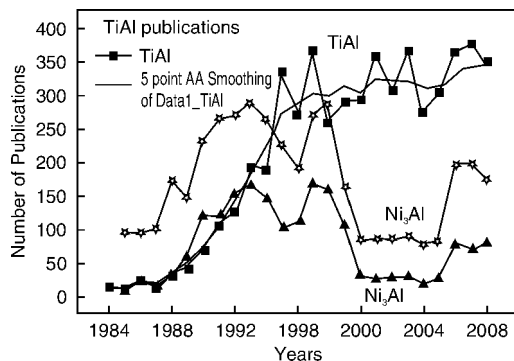


图 1 发表文章数与发表年代的关系

Fig. 1 Relationship between published papers and published years

2.1 TiAl 合金的成分 - 组织 - 性能关系

TiAl 合金的研究从 50 年代初开始,当时首次测量了铸造合金的性能,但由于室温塑性太差而放弃。1975~1983 年美国空军材料实验室发展单相 TiAl 合金。随后发现具有工业应用前景的合金为含 Al 较低(48%,除特殊标注外,文中全为原子分数)的 $\alpha_2 + \gamma$ 两相 TiAl 合金。双相 γ -TiAl 合金的强度和塑性都明显优于单相 γ -TiAl 合金^[1-2]。

双相 γ -TiAl 合金的组织控制是影响宏观力学性能的一个重要因素。将铸态和热加工态 TiAl 合金在不同的温度区间进行热处理,可以产生 4 种不同的典型显微组织:等轴近 γ 组织、双态组织、近片层组织、全片层组织。

TiAl 合金组织对拉伸性能有着巨大影响,小晶粒的双态组织的塑性高、断裂韧性低,而大晶粒的全片层组

织正相反。全片层组织常是大晶粒的片层组织,大晶粒使强度和塑性都低,而片层组织使韧性增高。当晶粒尺寸太大时导致低塑性。等轴近 γ 组织晶粒较大,又无片层组织,导致塑性和韧性均低。大尺寸变形 TiAl 合金的全片层组织难以控制得到均匀细小组织,因此国际上的发展趋势是利用均匀细小的双态组织或不同比例片层团的双态组织,总之, TiAl 合金的组织是可以控制的,发展趋势是根据使用条件需求及制备技术来优选 TiAl 合金组织。

2.2 工程 TiAl 合金的发展

对 γ -TiAl 合金的成分来说,首先要控制铝含量,为得到双相合金含铝量必须小于 48%,单相 TiAl 合金室温拉伸延伸率一般小于 1%,合金化后双相 TiAl 室温拉伸延伸率可达 1%~4%、室温屈服强度一般在 500~600 MPa。进一步 W, Si, C, B 合金化,可进一步提高高温强度,细化晶粒。高 Nb 合金化使 TiAl 合金的发展进入新阶段,室温屈服强度可达 800 MPa, 760 °C 高温强度可达 550 MPa,同时保持原有室温拉伸延伸率不降,特别是大幅度提高了合金的抗氧化性^[1-3]。

在过去年代里,全世界范围内发展了很多不同的 TiAl 合金,表 1 按照产生的年代顺序列出了一些代表性的合金,图 2 是代表合金的性能。一般来讲,工程用 γ -TiAl 合金的成分范围可以合并一起表示为 Ti-45(45~48)Al-(0~2)(Cr, Mn)-(1~8)Nb-xB-yC-zSi。从表 1 中可以看到,Al 含量是逐渐降低的,而 Nb 含量则逐渐升高,这点反映在使用温度的不断提高上。硼元素的添加逐渐变得普遍,作为一种晶粒细化的途径,硼在锻造合金中的添加量要稍微少于在铸造合金中的添加量。低 Nb 合金化的 TiAl 合金中有时添加少量碳或硅元素来提高合金的蠕变抗力^[4]。

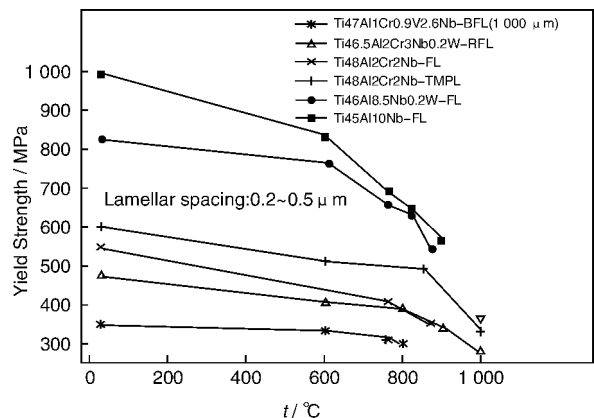


图 2 代表性 TiAl 合金的屈服强度与试验温度的关系

Fig. 2 Relationship between yield strength and temperature for typical TiAl alloys

表1 工程 γ -TiAl 合金的发展
Table 1 Development of engineering γ -TiAl alloys

Name	Composition(x)/%	Uses	Processing
GE/ALD 4822	Ti-48Al-2Nb-2Cr	Low-pressure turbine blades/valves	C
Howmet	Ti-(45, 47) Al-2Nb-2Mn-0.8v% TiB ₂	Blades/valves	C
GKSS/R-R	Ti-47Al-1.5Nb-1Mn-1Cr-0.7(Si, B)	High-Pressure compressor blades	W
ABB	Ti-47Al-2W-0.5Si	LB Turbine blades	C
Plansee	Ti-45.5Al-4(Cr, Nb, Ta, B)	Plates	W
395MM	Ti-46Al-4(Cr, Nb, Mo)-x(B, C)	High-Pressure compressor wheel	W
AF-K5	Ti-46Al-3Nb-2Cr-0.3W-0.2B-0.4(C, Si)	Wheels, Valves	W
MHI	Ti-46Al-6.5Nb-0.6Cr-0.2Ni	Turbo Booster	C
Plansee/GKSS	Ti-45Al-5Nb-xB-yC	Valves/Plates/blades	W/C
Del West	Ti-44Al-6Nb-xW-xB	Valves	W
AF	Ti-45Al-xNb-y(W, Hf, Mo)-z(B, C, Si)	Antioxidant	W

C: Casting; W: Deformation

可以看出工程 TiAl 合金已发展形成两个不同使用温度的级别, 高温 TiAl 合金(高 Nb-TiAl 合金)和普通 TiAl 合金, 基础合金成分主要差别在 Nb 含量上:

X: Ti-48Al-2Nb, 对于普通 TiAl 合金;

Y: Ti-45Al-(5~10)Nb, 对于高 Nb-TiAl 合金。

值得指出的是国外的高 Nb-TiAl 合金研究是在北京科技大学高 Nb 合金化开拓性的系统研究工作之后进行的^[5-10]。

目前, 美国 GE 公司自己的 48-2-2 铸造合金已经在波音 787 发动机上使用。美国 Kim Y W 发展了 K5 合金; 日本发展的高 Nb-TiAl 合金, 一般为 45Al/7Nb。R-R 公司早期发展 45-2-2XD 铸造合金, 随后发展为 Ti-46Al-5Nb-1W 合金。近期和 GKSS 合作发展了 TNB 牌号高 Nb 低 Al 的 TiAl 合金, 目前 Nb 含量可减低至 4~5 和 Al 含量降低到约 43%。

高 Nb 添加显著提高了 TiAl 合金的高温抗氧化性, 典型合金进行的循环抗氧化性曲线如图 3 所示^[11]。在 1 000 h 的试验中, 从不含 Nb 的合金(Ti-46Al 合金)到 8Nb 的合金(98G), 抗氧化性随着 Nb 含量的增加而显著增强。与高温合金相比, TiAl 合金的长期抗氧化性不足, 通过添加 Y 等稀土元素可以得到显著改善^[12-14]。

2.3 TiAl 合金的制备和加工技术

2.3.1 铸造成形

(1) 精密铸造成形 国外对 TiAl 合金精密铸造技术研究得比较系统, 主要体现在航空、航天及汽车工业用发动机部件等方面的应用。精密铸造工艺具有保证零件的近净成形性和低加工成本的特点。美国 GE 公司

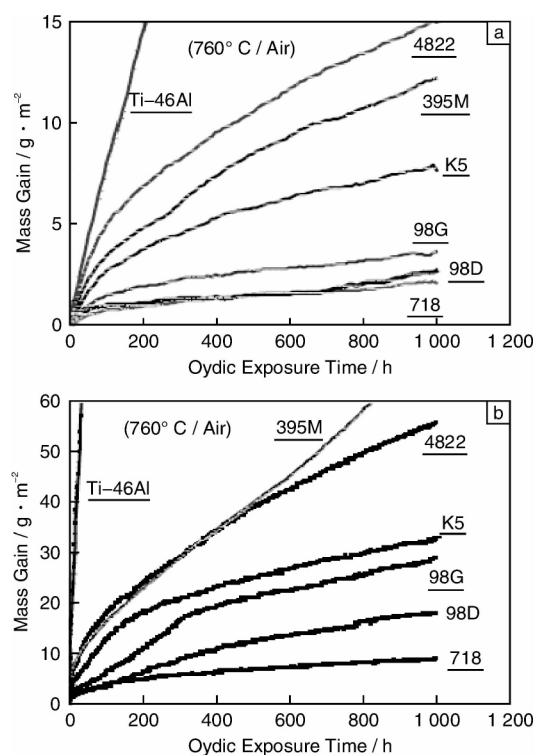


图3 不同成分 TiAl 合金的循环氧化行为, 室温到 760 °C (a) 和室温到 870 °C (b) (合金成分见表 1, 98G 和 98D 是高 Nb-TiAl 合金, 718 是 Ni 基高温合金)

Fig. 3 The cyclic oxidation behavior of the TiAl alloys at (a) 760 °C and (b) 870 °C

用熔模精铸法铸造出 Ti48Al2Cr2Nb 合金低压涡轮机叶片, 并成功应用到波音 787 飞机上^[15-19]。图 4 为该叶

片的照片。日本三菱公司和 Daido 制钢公司采用真空熔炼反重力低压铸造法进行了汽车发动机用 TiAl 合金增压涡轮的研究,以替代较重的镍基合金 Inconel 713C 涡轮。使用 TiAl 合金更节省启动时间,提高了最大转速。采用同样的铸造工艺生产的排气阀零件表明,经过耐久力测试,其稳定性良好^[20]。德国 ALD 公司也采用水冷铜坩埚熔炼工艺,成功地浇注了 TiAl 合金排气阀,并用在奔驰轿车的发动机上。尽管如此,铸造 TiAl 合金仍然存在一些难题,例如,如何达到生产可接受的损失率,如何得到无缺陷的铸锭和组织均匀细化难题仍然存在。



图 4 波音 787 引擎上 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金铸造低压涡轮机叶片

Fig. 4 The precision Ti-48Al-2Nb-2Cr cast blade of low pressure turbo of Boeing 787 engine

(2) 定向凝固技术 由于定向凝固 TiAl 合金具有巨大的性能潜力,所以为 TiAl 合金的扩大应用开辟了一条新道路。欧美、日本等国家的部分研究单位自上世纪 90 年代以来,不断发表有关 TiAl 合金定向凝固的研究成果。国外在 TiAl 合金小尺寸(直径小于 10 mm)定向凝固试样的制备方面集中开展了一些研究工作,探索了 TiAl 包晶反应凝固途径对组成相生长状态和取向的影响^[21-24]。国外在 TiAl 合金定向凝固制备工艺方面有可能在短期内达到 TiAl 定向凝固成形技术的实际应用水平。近期国外正在探索高 Nb-TiAl 合金的定向凝固技术。

(3) 高洁净度熔炼 普通 TiAl 合金一般采用真空自耗电弧炉熔炼和等离子冷床炉熔炼。国外采用真空自耗电弧炉熔炼可以制备出直径约 400 mm 高 1 000 mm 的铸锭。对于高 Nb-TiAl 合金,研究表明,当铸锭尺寸较小时(小于 160~200 mm),可以用真空自耗电弧炉熔炼,得到成分和组织均匀的材料。但当铸锭尺寸较大时,容易发生铸锭开裂等。

国外的发展趋势是利用等离子冷床熔炼生产 TiAl 铸坯。有报道称,国外利用等离子冷床炉已经熔炼出质量 3 000 kg 的 TiAl 铸^[25]。

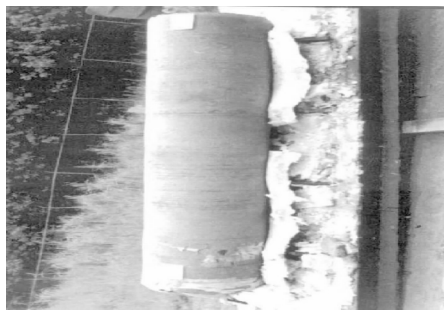


图 5 P&W 公司制备的直径 432 mm, 长 2 540 mm, 质量约 1 179 kg 的等离子熔炼锭

Fig. 5 432 mm diameter x 2 540 mm long PAM ingot. 1 179 kg by P&W

2.3.2 TiAl 合金的热加工技术

对 TiAl 合金开展塑性加工研究的目的是获得细晶组织,在提高材料塑性的同时,精确控制合金的热变形工艺,以减小成分偏析和控制晶粒度。目前成功用于铸态 TiAl 合金铸锭组织开坯的热加工工艺主要有 3 种:等温锻造、包套锻造、包套挤压。这些工艺的实现都要以铸锭的预等静压或者均匀化热处理为前提。R-R 公司和 GKSS 研究中心联合开发了用于生产高压喷气式发动机涡轮叶片的工艺路线。路线包括铸锭材料的挤压,后续的分步等温锻造和最终的热处理。图 6 是德国 GfE 公司制备的异型挤压件,反映出很高的技术水平。

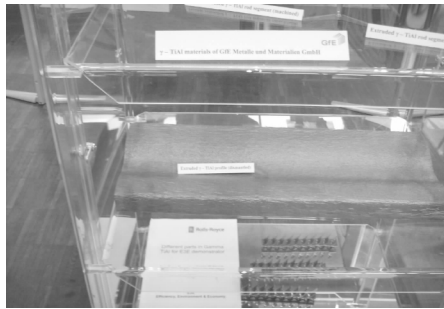


图 6 德国 GfE 公司制备的 TiAl 合金挤压件

Fig. 6 The extruded bars of TiAl alloys for german GfE

国际上铸态 TiAl 合金的开坯热加工发展趋势是首先包套挤压,然后等温锻造,以保证足够的变形量。传统上的 $\alpha + \gamma$ 两相区热加工的发展趋势是将温度上升到 α 单相区变形,以获得原位片层组织,可以同时提高强度和塑性。由于 α 单相区加工温度高等因素,组织精确控制较难,有待进一步研究。

已有大量的轧制板材制备技术的研究,面临的主要挑战是大尺寸的板材。许多大尺寸板材必须采用包套高温轧制^[26-29]。国外对高 Nb-TiAl 合金板材制备的研究已取得较大进展。德国制备的 TNB 合金板材最大尺寸为

1 000 mm × 450 mm × 1 mm。而 γ -METPX 合金: Ti-45Al-(5~10)Nb-X(B, C) 板材的最大尺寸为 750 mm × 350 mm × 0.25 mm^[27]。

2.3.3 粉末 TiAl 合金板材的加工技术

粉末 TiAl 合金的制备分预合金化法和元素粉末法。预合金化法由于工艺复杂和成本高, 逐步淡出研发领域; 而元素粉末法由于氧含量太高, 作为大尺寸锭材的制备也不合适。通过元素粉末法制备合金薄板显然是发展趋势。

TiAl 合金板材的应用被认为是实现 TiAl 基合金实用化的突破口之一。粉末冶金 TiAl 合金适合制作轧制 TiAl 合金板材的原材料坯料, 而且, 粉末冶金工艺方法具有近净成型等技术优点, 能克服 TiAl 合金难成形的缺点。在 TiAl 合金板材研制方面, 国外取得了较大进展。一种具有特色和优势的 TiAl 合金板材制备工艺为元素粉轧制及反应合成技术, 它简称为 RPM (Reactive Powder Metallurgy Processing)。RPM 技术采用塑性变形性能良好的 Ti, Al 元素混合粉作为原始材料, 经过压制、挤压、温轧等加工过程近净成形为 Ti, Al 混合粉板材。成形后的板材在随后的烧结、热压或热等静压过程中通过活化反应生成 TiAl 合金。RPM 技术有效地避免了脆性 TiAl 合金的变形加工过程, 是一种低成本的 TiAl 合金板材制备工艺。采用 RPM 技术可以制备超薄 TiAl 合金板材。德国和 Plansee 公司已制备出了晶粒尺寸在 5~20 μm 之间的无缺陷的 TiAl 合金板材^[30-33], 其最大尺寸达到 1 600 mm × 400 mm × (0.02~1.0) mm。

国外薄板加工的发展趋势是利用元素粉轧制及反应合成技术。近期, 高 Nb-TiAl 合金板材研制和应用研究又成为热点^[33-35]。

3 国内本领域基础研究现状

国内在 TiAl 合金的研制方面与上述的国际先进水平基本同步, 在有些方向如高 Nb-TiAl 合金研制属于国际领先水平, 引领着高温 TiAl 合金的国际研究方向。而 TiAl 多孔合金是中南大学首先进行研究的。

3.1 高温 TiAl 合金(高 Nb-TiAl 合金)

高温 TiAl 合金的使用温度比普通 TiAl 合金高 60~100 $^{\circ}\text{C}$ 。北京科技大学陈国良等进行了 Ti-Al-Nb 系大量基础研究, 并发展了高 Nb 含量的 TiAl 合金, 在 1995 年第一届 TiAl 合金国际会议上, 会议主席 Young-Won Kim 博士的报告指出, 高 Nb 含量的 TiAl 合金是发展高温、高性能 TiAl 合金的首例。

图 7 是含 8Nb 和 10Nb 的 Ti-(44~49)Al 准二元相图^[36]。对比 Ti-Al 二元相图(图中用虚线给出), 8~10Nb 合金化对相关系产生了显著影响, 其中, 大幅度

提高熔点, 和 Nb 显著提升高温抗氧化性一起被国外称为发展 TiAl 合金的经典^[36-41]。

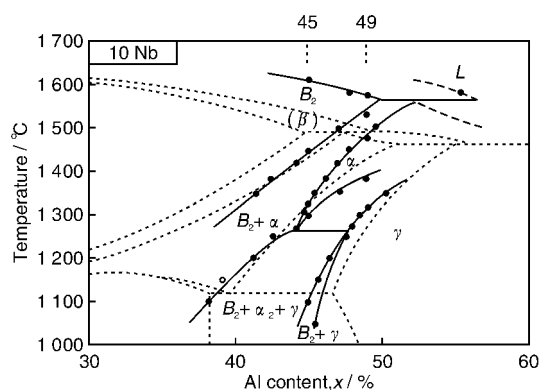


图7 含 8Nb 和 10Nb 的 TiAl 合金的准相图(实线)虚线为 Ti-Al 二元相图

Fig. 7 Quasi-phase diagram (solid) of TiAl alloy with 8Nb and 10Nb, and binary phase diagram (dotted) of TiAl

近年来在大尺寸高 Nb TiAl 合金的制备和加工方面上取得了突破性进展。利用等离子冷床炉冶炼出的 60~100 kg 铸锭, 并解决了显微偏析问题。得到多次等温锻造的大变形量饼材, 锻件质量比较好, 晶粒均匀细小^[42-46]。材料表现出优异的室温和高温力学性能, 室温塑性达到了 2.3%。还成功制备出挤压棒材和轧制板材。抗氧化性优于一般 TiAl 合金, 900 $^{\circ}\text{C}$ /100 h 平均氧化增重 0.06~0.08 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。测定了全部物理性能, 含弹性模量、热导率、线膨胀系数、体积质量、质量热容和切削性能等。

西北有色金属研究院通过参与国家自然科学基金重大项目, 与北京科技大学共同研究高 Nb-TiAl 合金, 为该系列合金的研发做出了贡献^[47]。北京航空材料研究院、上海宝钢股份有限公司参加了大尺寸高 Nb TiAl 合金的制备和加工方面的研究。

3.2 TiAl 合金多孔材料

TiAl 合金在多孔材料领域的扩展和在过滤材料领域的应用, 由中南大学粉末冶金国家重点实验室的贺跃辉等人率先提出, 并进行了较为深入和系统的研究^[48]。

他们采用 Ti, Al 元素粉末为原料, 通过复合成形和反应合成, 成功制备出具有表面自组装结构的 TiAl 合金多孔材料, 其孔分布均匀, 平均孔径为 1.2 μm , 孔隙率高达 43%。随着 TiAl 合金表面孔径的进一步修饰减小, 这种具有优异特性(耐酸、碱及盐腐蚀, 耐高温氧化, 耐有机溶剂, 易密封)的新型多孔材料特别适合于极端条件下, 如四氯化钛悬浊液的固液分离和高温烟尘的固气分离领域的应用。北京科技大学新金属材料国家重点实验室与中南大学粉末冶金国家重点实验室在

国家 863 计划的支持下,开展了新型高 Nb-TiAl 多孔隔热材料的研究,采用 Ti, Al, Nb 元素粉末为原料,成功制备出优异隔热性能的多孔材料^[49]。目前该领域尚未见国际上其他研究组报道。

3.3 TAC 系列合金

北京钢铁研究总院发展的高 V, 名义成分为 Ti-47.0Al-2.5V-1.0Cr 的铸造合金已列入标准牌号,室温断裂强度为 550 MPa,应用目标为动力增压器涡轮和高推重比航空发动机涡轮器等,合金设计思路是以提高影响金属间化合物可靠性的室温塑性和韧性等为主、但 V 对合金抗氧化性不利,合金用 Cr 来兼顾 800 °C 以下抗燃气腐蚀性能。该合金已精密铸造成车辆增压涡轮在某型号发动机上试验。

3.4 板材

我国在 TiAl 合金板材研制上落后于国际水平,无法提供航天航空工业等对大尺寸薄板材的需求。

中南大学与西北有色研究院共同研究 TiAl 合金粉末板材,得到了我国第一块尺寸为 300 mm × 200 mm × 1.5 mm TiAl 合金粉末板材。航天 703 所也开展了 TiAl 合金粉末板材的研制。哈尔滨工业大学近期制备出较大尺寸的 TiAl 合金板材。已经采用自行研制的特种高温包套轧制工艺,在国内率先成功轧制出尺寸为 500 mm × 200 mm × 1.5 ~ 3 mm 的含 V, Y 元素的 TiAl 合金板材,并且板材已经通过了航天部门的应用评价。

3.5 精密铸造和定向凝固

钢铁研究总院、哈尔滨工业大学、中南大学、中国科学院沈阳金属研究所等单位开展了 TiAl 合金熔模精密铸造的研究,已初步制造出车辆发动机用的增压涡轮和排气阀门以及飞机发动机喷口零件,目前正处于实验室研制阶段。

哈尔滨工业大学率先采用冷坩埚连续熔铸技术对 TiAl 合金进行了定向凝固成形试验,可以有效地克服合金可能受到的污染,非常适合 TiAl 合金这样高活性合金的定向凝固,已经初步制备出样品。

上海交通大学也承担了国家计划,主要从事以细化组织为主的铸造技术研究。

4 结语

由于 TiAl 合金具有优越的轻质、耐高温、耐腐蚀及比强度高优点,被公认为是应用前景最为广阔的一种轻质高温结构材料,世界上几乎所有的先进工业国家都对这种材料投入了巨大的人力、物力进行研究。随着武器装备性能要求的提高,必须提高 TiAl 合金用量, TiAl 合金已成为新一代武器装备和高技术产品高性能、低成

本、长寿命和轻量化的重要物质基础。

TiAl 合金的工程化和应用对提高我国新型武器系统的性能具有重要的军事意义,并在民用领域带来可观的经济效益。我国航空航天中、长期发展规划中对 TiAl 合金的材料技术支撑体系有着明确的要求。由 TiAl 合金工程化研究所获得的 TiAl 合金材料及先进的制备技术,将对新一代飞机、卫星、空间动量拦截器、高马赫数导弹、以及主战坦克和先进车辆耐热部件研制过程中的关键技术提供新技术指导,也为今后 10 ~ 15 年内提升新一代武器系统用耐热结构材料的精密成形的制造关键技术提供新方法指导。

我国的大飞机项目已经列入国家重大计划进行实施。飞机的减重也是一个重大课题,对于能源紧张的今天,降低能源消耗尤为重要。减重是实现先进飞机发动机高推重比的关键,关系到国家的安全。我国航天某重大专项明确对 TiAl 合金提出需求。我国在 TiAl 高温结构合金的研究领域已取得原始性创新成果,并已在国际上产生重大影响。特别是高 Nb-TiAl 合金具有我国自主知识产权,在工程化方面也取得了一些进展。想购买国外 TiAl 合金是不可能的,例如订购 PCC 公司的 TiAl 合金部件必须得到美国政府的批准,因此 TiAl 合金成为具有重大应用潜力,关系到国家安全的战略物资。必须发展具有我国自主知识产权的 TiAl 合金。TiAl 合金在我国的民用和军用领域拥有巨大的应用潜力和经济价值。

目前,美国 GE 公司自己的 48-2-2 铸造合金已经在波音 787 发动机上使用。美国 Kim Y W 发展了 K5 合金;日本在跑车上用高 Nb-TiAl 合金做增压涡轮,日欧等国做 TiAl 合金的排气阀, R-R 公司早期发展了 45-2-2XD 铸造合金,随后发展为 Ti-46Al-5Nb-1W 合金。近期和 GKSS 合作发展了 TNB 牌号高 Nb 低 Al 的 TiAl 合金叶片。

TiAl 合金的应用领域正在扩展,在民用航空航天领域,除了叶片外,非转动部件、非受力轮盘、薄板蒙皮等都可能应用。汽车的增压涡轮和排气阀等也成为发展重点。近来又发展了多孔 TiAl 材料, Ti-48Al-6Nb 多孔材料在 800 °C 时的导热系数仅为 $1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。抗氧化耐腐蚀新型 TiAl 合金,抗液锌腐蚀比传统材料提高约 10 倍。

TiAl 合金展示了重要而广阔的应用前景。

参考文献 References

- [1] Chen Guoliang (陈国良), Lin Junpin (林均品). *Physical Metallurgy for Ordered Intermetallics* (有序金属间化合物结构材料物理金属学基础) [M]. Beijing: Metallurgical Industry

- Press, 1999.
- [2] Appel F, Wagner R. Microstructure and Deformation of Two-Phase γ -Titanium Aluminides [J]. *Mater Sci Eng*, 1998 (R22): 187–268.
- [3] Liu C T, Maziasz P J. Microstructural Control and Mechanical Properties of Dual-Phase TiAl Alloys [J]. *Intermetallics*, 1998 (6): 653–661.
- [4] Kim Y W (金永元), Tadeu Cameiro (大雕·卡内洛). *Nb High Temperature Application* (铌·高温应用) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 167–185.
- [5] Chen Guoliang (陈国良), Zhang Weijun (张卫军), Sun Zuqing (孙祖庆), et al. *Nb-Ti-Al Intermetallics for High Temperature Use* (铌钛铝系金属间化合物耐热高温材料): China, ZL91111952.3 [P]. 1991–12.
- [6] Chen G, Sun Z, Xie X. *Advanced Structural Materials v. 2* [M]. Amsterdam North Holland: Elsevier, 1990: 803–811.
- [7] Chen G L, Zhang W J, Wang Y D, et al. *Structural Intermetallics* [M]. New York: TMS Publication, 1993: 319–324.
- [8] Kim Y W. *Gamma Titanium Aluminides* [M]. Warrendale PA: TMS, 1995: 637–654.
- [9] Chen Guoliang (陈国良). *Intermetallics* (金属间化合物) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992.
- [10] Lin J P (林均品), Chen G L (陈国良). Development of TiAl Intermetallic Based Compound [J]. *Material China*, 2009, 28 (1): 31–37.
- [11] Yoshihara M, Kim Y W. Oxidation behavior of Gamma Alloys Designed for High Temperature Applications [J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 952–958.
- [12] Zhang Ning (张宁), Lin Junpin (林均品), Chen Guoliang (陈国良). 合金元素 Y 对高铌 TiAl 高温长期抗氧化性的影响 [J]. *Journal of Aeronautical Materials* (航空材料学报), 2006, 26: 42–45.
- [13] Zhao L L, Lin J P, Wang Y L, et al. Ti50Al 和 Ti45Al8Nb 合金高温初期抗氧化性研究 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2008, 44: 557–564.
- [14] Zhao L L, Lin J P, Chen G L, et al. Structural Aluminides for Elevated Temperatures. Gamma Titanium and Other Metallic Aluminides [C]//*Proceedings of the Structural Aluminides for Elevated Temperatures Symposium*. New Orleans: TMS, 2008: 275–88.
- [15] Bartolotta P, Krause D. *Titanium Aluminide Applications in the High Speed Civil Transport* [R]. Washington DC: NASA, 1999.
- [16] Lu Min, Barrett Jim R, Kelly Tom J. Investment Casting of Gamma Titanium-Aluminides for Aircraft Engine Applications [C]//*TMS Symp Proc*. WY: Jackson Hole, 2001: 225–232.
- [17] Guy Norris. *Power House* [R]. Evendale: Flight International, 2006.
- [18] Feagin. *Ceramic Shell Molds and Cores for Casting of Reactive Metals*: United States, Patent 5630465 [P]. 1997–05–20.
- [19] Yasrebi. *Method for Stabilizing Ceramic Suspensions*: United States, Patent 5643844 [P]. 1997–06.
- [20] Toshimitsu T. *Development of a New TiAl Turbocharger for High Temperature Use* [R]. Bamberg Bavaria Germany: 3rd International Workshop on γ -TiAl Technologies, 2006.
- [21] Lapin J, Ondrus L, Nazmy M. Directional Solidification of Intermetallic Ti-46Al-2W-0.5Si Alloy in Alumina Moulds [J]. *Intermetallics*, 2004(10): 1 019–1 031.
- [22] Johnson D R, Inui H, Yamaguchi M. Crystal Growth of TiAl Alloys [J]. *Intermetallics*, 1998(6): 647–652.
- [23] Yamaguchi M, Inui H, Darolia R, et al. *Structural Intermetallics* [M]. Warrendale (PA): TMS, 1993: 127.
- [24] Umeda H, Kishida K, Inui H, et al. Effects of Al-Concentration and Lamellar Spacing on the Room-Temperature Strength and Ductility of PST Crystals of TiAl [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 239–240: 336–343.
- [25] Das Gopal, Kim Y W, Rosenberger A H. *Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Gamma TiAl* [R]. Bamberg Bavaria Germany: 3rd International Workshop on γ -TiAl Technologies, 2006.
- [26] Koeppe C, Bartels A, Clemens H, et al. Optimizing the Properties of TiAl Sheet Material for Application in Heatprotection Shields or Propulsion Systems [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1995, 201: 182–193.
- [27] Gopal D, Kestler H, Clemens H, et al. Sheet Gamma TiAl: Status and Opportunities [J]. *JOM*, 2004(11): 42–45.
- [28] Miao Jishi (缪家士), Lin Junpin (林均品), Wang Yanli (王艳丽), et al. 高铌钛铝基合金板材的高温包套轧制 [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2004, 33: 436–438.
- [29] Kong Fantao (孔繁涛), Chen Yuyong (陈玉勇), Wang Wei (王威), et al. Microstructures and Mechanical Properties of Hot-Pack Rolled Ti-43Al-9V-Y Alloy Sheet [J]. *Tans Nonferrous Met Soc China*, 2009, 19: 1 126–1 130.
- [30] Rainer Gerling, Amo Bartels, Helmut Clemens, et al. Structural Characterization and Tensile Properties of a High Niobium Containing Gamma TiAl Sheet Obtained by Powder Metallurgical Processing [J]. *Intermetallics*, 2004(12): 275–280.
- [31] Bystrzanowski S, Bartels A, Clemens H, et al. Creep Behaviour and Related High Temperature Microstructural Stability of Ti-46Al-9Nb Sheet Material [J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 515–524.
- [32] Gerling R, Schimansky F P, Stark A, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti45Al5Nb + (0–0.5C) Sheets [J]. *Intermetallics*, 2008, 16: 689–697.
- [33] Kim Y W, Rosenberger A, Dimiduk D M. Microstructural Changes and Estimated Strengthening Contributions in a Gamma Alloy Ti-45Al-5Nb Pack-Rolled Sheet [J]. *Intermetallics*,

- 2009, 17: 1 017 – 1027.
- [34] Bystrzanowski S, Bartels A, Clemens H, *et al.* Characteristics of the Tensile Flow Behavior of Ti-46Al-9Nb Sheet Material Analysis of Thermally Activated Processes of Plastic Deformation[J]. *Intermetallics*, 2008, 16: 717 – 726.
- [35] Draper S L, Krause D, Lerch B, *et al.* Development and Evaluation of TiAl Sheet Structures for Hypersonic Applications [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 464: 330 – 342.
- [36] Chen G L, Zhang W J, Liu Z C, *et al.* *Proceedings of Gamma Titanium aluminides 1999* [M]. New York: TMS, 1999: 371.
- [37] Zhang L Q, Chen G L. TEM Investigation of Twin Intersection in a Ti-45Al-9Nb-2. 5Mn Alloy Deformed at Room Temperature [J]. *Intermetallics*, 2000(8): 539 – 544.
- [38] Chen G L, Zhang W J, Liu Z C, *et al.* *Gamma Titanium Aluminides 1999*[M]. Warrendale PA: TMS, 1999: 371 – 380.
- [39] Chen G L, Wang J G, Ni X D, *et al.* A New Intermetallic Compound in TiAl + Nb Composition Area of the Ti-Al-Nb Ternary System[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 329 – 336.
- [40] Song X P, Chen G L. Determination of the Stacking Fault Energy in High-Nb-TiAl[J]. *J of Materials Science letters*, 2001, 20: 659 – 661.
- [41] Liu Z C, Lin J P, Li S J, *et al.* Effect of Al and Nb Contents on the Microstructures and Mechanical Properties of TiAl Based Alloys[J]. *Intermetallics*, 2002(10): 653 – 659.
- [42] Xu X J, Lin J P, Wang Y L, *et al.* On the Microsegregation of Ti-45Al-(8-9) Nb-(W, B, Y) Alloy[J]. *Materials Letters*, 2007, 61: 369 – 373.
- [43] Xu X J, Lin J P, Wang Y L, *et al.* Deformability and Microstructure Transformation of Pilot Ingot of Ti-45Al- (8-9)Nb-(W, B, Y) alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 416: 98 – 103.
- [44] Lin J P, Xu X J, Wang Y L. Microstructure and Tensile Properties of as-Cast Ti-45Al-(8-9) Nb-(W, B, Y) Alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 414: 131 – 136.
- [45] Xu X J, Lin J P, Wang Y L, *et al.* Effect of Forging on Microstructure and Tensile Properties of Ti-45Al- (8-9)Nb-(W, B, Y) Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 414: 175 – 180.
- [46] Xu X J, Xu L H, Lin J P, *et al.* Pilot Processing and Microstructure Controlling of High Nb Containing TiAl Alloy[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 337 – 341.
- [47] Yan Yunqi, Zhang Zhenqi, Luo Guozhen, *et al.* Microstructures Observation and Hot Compressing Tests of TiAl Based Alloy Containing High Nb [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 280: 187 – 191.
- [48] He Y H, Jiang Y, Huang B Y, *et al.* Fabrication of Ti-Al Micro/Nano Sized Porous Alloys Through the Kirkendall Effect[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19: 2 102 – 2 106.
- [49] Wang Y H, Lin J P, He Y H, *et al.* Effect of Nb on Pore Structure and Tensile Properties of Ti-48Al Cellular Alloy[J]. *J Alloys and Compounds*, 2008, 456: 297 – 303.

Attacking Cancer Tumors with Tiny Discs

The idea that magnetic particles could be used to target cancer tumors has been in the research community for several decades. The general principle is that drugs intended to destroy targeted cells could be attached to magnetic particles and guided to the appropriate places in the human body using external magnetic fields. Given the precision promised by this approach, it could offer obvious advantages over the crude targeting of chemotherapy, which can leave patients feeling extremely unwell. Despite their early promise, however, these therapies have yet to yield much success in the field of oncology, mainly due to a number of technical issues. Now, researchers have designed a technique in which the particles themselves attack the cancerous cells by exerting a mechanical force. Using a gold-shelled iron-based alloy that they developed, the researchers have created tiny circular discs that are just 60 nm thick with diameters of approximately 1 μm . In this geometry, the magnetic moments are following the disc circumference and form a vortex-like structure with almost perfect closure of the magnetic flux within the disc itself. Instead of being guided by a magnetic field, the tiny discs are coated in antibodies that are able to hone in on the affected cells. Once a disc is alongside a cancerous cell, an alternating magnetic field can be applied, which causes the vortex structure in the disc plane to shift and the magnetic disk to oscillate. Therefore the disks exert a lateral force towards the targeted cancer cell. This very small force, in the order of a few tens of pN, is strong enough to trigger the redistribution of calcium inside the cancer cell that can result in cell death known as apoptosis.

(From: Physics World)