

特约专栏

## 熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合物研究进展

李 飞<sup>1</sup>, 王 飞<sup>1</sup>, 陈 光<sup>2</sup>, 万柏方<sup>3</sup>, 戴炎麟<sup>1</sup>, 陆 敏<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

(2. 南京理工大学 材料评价与优选设计教育部工程研究中心, 江苏 南京 210094)

(3. 丹阳市精密合金厂有限公司, 江苏 丹阳 212352)

**摘 要:** TiAl 基金属间化合物作为一种新型轻质高温结构材料, 在航空航天和汽车等领域具有广阔的应用前景。熔模精密铸造是当前普遍采用的制备 TiAl 基金属间化合物的方法。主要介绍了熔模精密铸造 TiAl 基合金的铸件以及型壳用粘结剂及耐火材料的发展现状, TiAl 合金的熔炼技术及最新研究进展, 并对 TiAl 基金属间化合物熔模精密铸造技术的不足进行了分析并提出了展望。

**关键词:** TiAl; 金属间化合物; 熔模铸造

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)02-0024-07

## Review of the Investment Casting of TiAl Based Intermetallic Alloys

LI Fei<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, CHEN Guang<sup>2</sup>, WAN Baifang<sup>3</sup>, TAI Yimlin<sup>1</sup>, LU Min<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Engineering Research Center of Materials Behavior and Design, Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(3. Danyang Precision Alloy Factory Co., Ltd., Danyang 212352, China)

**Abstract:** As the new generation light weight high temperature structural material, TiAl based intermetallic alloys have broad application prospects in aerospace and automotive fields. Investment casting is the commonly used manufacturing method for TiAl based alloys. The development of the casting components, and binders and refractory materials for investment casting of TiAl based alloys are introduced. The smelting technology and the latest research progress of TiAl based alloys are reviewed. The obstacles and prospects of investment casting of TiAl based alloys are also represented.

**Key words:** TiAl; intermetallic; investment casting

### 1 前 言

随着现代工业的发展, 低密度高强度的材料越来越受到人们的青睐, 一般的 Ti 合金在强度和抗氧化性能上已无法满足要求。TiAl 基金属间化合物(也称 TiAl 合金)是一种新型轻质的高温结构材料, 密度不到镍基合金的 50%, 兼有金属和陶瓷的性能。它们不仅具有轻质、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, 而且具有优异的常温和高温力学性能, 如图 1 所示, 其使用温度可达到 700~1 000℃。这使其倍受研究工作者的重视, 成为航空航天及汽车发动机用耐热结构件的极具竞争力的材料, 具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

目前, TiAl 基金属间化合物大部分采用铸锭冶金技术(如挤压、锻造、轧制、板材成型)、粉末冶金技术(包括模压和挤压烧结)和熔模精密铸造等成形方法。由于 TiAl 基金属间化合物室温塑性低、成形性差, 所以, 采用熔模精密铸造技术是制作 TiAl 基金属间化合物构件最可行的方法之一, 与其他方法相比, 熔模精密铸造可以一次铸成形状复杂、薄壁的零件, 并且铸件具有高的尺寸精度和低的表面粗糙度<sup>[3]</sup>。本文介绍了熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合物合金及铸件的最新进展, 型壳用粘结剂及耐火材料的发展现状, TiAl 基金属间化合物合金的熔炼技术, 并对 TiAl 基金属间化合物熔模精密铸造技术提出了今后的展望。

### 2 熔模铸造 TiAl 基金属间化合物研究进展

#### 2.1 TiAl 基金属间化合物的发展现状

TiAl 基金属间化合物是当今金属间化合物研究领域

收稿日期: 2009-11-30

通信作者: 陆 敏, 男, 1969 年生, 博士, 研究员

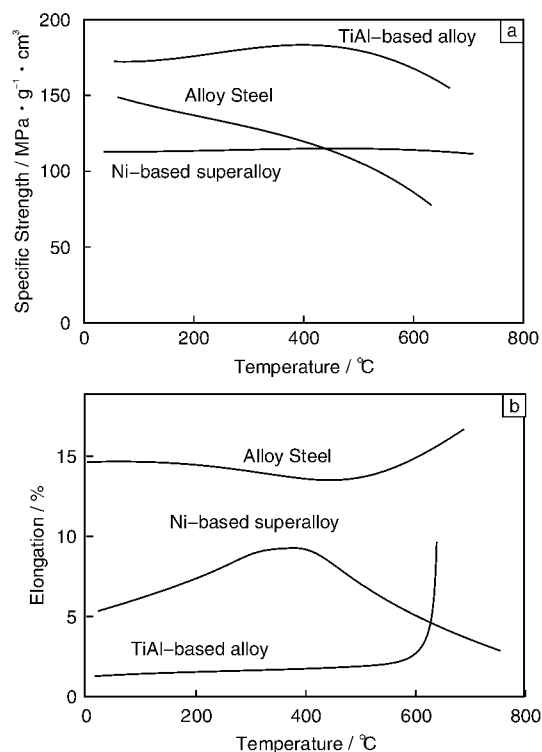


图1 几种合金性能比较

Fig. 1 Properties comparison of several alloys

的最热点。在 TiAl 基金属间化合物的应用研究方面,美、日和西欧等发达国家都做了大量的研究工作。美国 Pratt-Whitney Aircraft 实验室、GE 公司、Howmet 公司、德国 GKSS 研究所、汉堡大学、亚琛工业大学、英国伯明翰大学、欧洲 ABB 公司、奥地利 Plansee 公司、日本 IHI 公司、京都大学、日本东北大学和川崎重工业株式会社等多家单位开展了 TiAl 基金属间化合物的研究,并成功地使其得到应用<sup>[4-5]</sup>。表 1 列出了国外几种典型的 TiAl 基金属间化合物的性能<sup>[6-11]</sup>。

表 1 几种典型 TiAl 基金属间化合物的性能

Table 1 Properties of several typical TiAl alloys

Alloys, $\alpha/\%$	Strength/MPa		Elongation/%
	Yield strength	Breaking strength	
Ti-48Al-2Nb-2Cr	324	442	2.3
Ti-48Al-1V(100-200)	430	500	1.2
Ti-48Al-1V(300-500)	400	475	1.8
Ti-48Al	390	483	0.3~2.1
Ti-48Al-1V	400	507	2.3
Ti-44Al-1V	754	-	0.6
Ti-48Al(1-3)V	520	-	1.5~3.5
Ti-48Al-2Nb-2Mn	392	460	0.9
Ti-47Al-5Nb	480	510	0.5

目前工程用 TiAl 基金属间化合物已形成两个不同使用温度的级别,高温 TiAl 基金属间化合物(高 Nb-TiAl 合金)和普通 TiAl 基金属间化合物,基础合金成分主要差别是在 Nb 含量上。高 Nb 合金由于具有良好的高温强度和抗氧化能力,较普通 TiAl 基金属间化合物有更广阔的应用前景,含(5~10)Nb 的 TiAl 基金属间化合物被认为具有良好的综合性能。少量多元和多量少元是目前合金化的两个趋势,即通过高合金化(如高 Nb, V, Cr 和 Mn)引入少量高温  $\beta$  相和添加少量的 C, B 和 Re 等改善组织及性能。

在国家 863 项目的支持下,北京科技大学的陈国良等人对 Ti-Al-Nb 系中的高 Nb-TiAl 合金相区进行了大量基础研究,在 1991 年得到国家发明专利<sup>[12]</sup>。1990 年开始在国内外召开的国际会议上发表研究成果,特别是 1990 年和 1992 年两次在美国召开的国际会议上做了系统的介绍,产生较大影响<sup>[13-14]</sup>。陈国良在高 Nb-TiAl 合金方面做了大量的基础研究工作,主要包括:Ti-Al-Nb 三元系相图<sup>[15-17]</sup>、成分-力性图、成分-抗氧化性图等<sup>[18-23]</sup>;高 Nb-TiAl 合金中形变诱导界面结构变化<sup>[24-26]</sup>、形变诱导微区有序变化和诱导相变的高分辨研究<sup>[27-28]</sup>;形变孪晶和孪晶交截研究<sup>[29]</sup>;Ti-Al-Nb 系中原子分布的计算和实验研究、工程合金的发展<sup>[30]</sup>等。

国内对 TiAl 基金属间化合物铸造技术的研究也已开展多年,并有铸造 TiAl 排气阀和叶轮的研究报道<sup>[31-32]</sup>。北京钢铁研究总院、北京航空材料研究所和哈尔滨工业大学等多家单位在低成本氧化物陶瓷型壳的研制、TiAl 基金属间化合物的熔炼、铸造工艺的数值模拟、TiAl 基金属间化合物合金的浇注实验方面和大型复杂薄壁铸件方面也进行了卓有成效的研究。

借助于计算机数值模拟技术研究 TiAl 的凝固过程和收缩缺陷形成机制,具有重要的理论意义和实用价值<sup>[33-34]</sup>。但是 TiAl 的熔炼和成形过程不易控制,建立凝固过程的物理数学模型和进行实验验证极为困难,有关 TiAl 基金属间化合物等航空高温材料的成形过程数值模拟研究鲜有报道。梁作俭等<sup>[35]</sup>根据 TiAl 基金属间化合物的凝固物理特性及其成形特点建立了 TiAl 基金属间化合物熔模型壳离心浇注近净形铸造过程的数学模型,从理论上导出了离心压力下 TiAl 铸件收缩和补缩的数学模型,模拟计算和分析 TiAl 增压涡轮的凝固传热及缺陷形成过程,以帮助技术人员预测铸件缺陷,优化生产工艺,提高铸件质量,降低试制费用,缩短生产周期。

## 2.2 熔炼技术的最新研究动态

TiAl 基金属间化合物在高温时具有高的化学活性,

其熔炼过程中存在很多困难,比如合金元素熔炼过程反应热高,对间隙元素敏感性高,合金元素含量高,合金成分容错度小,合金中各元素物性差别大,性能对组织敏感性高等。目前已有 3 种冶金熔炼方法被成功地应用于 TiAl 基金属间化合物的生产:凝壳感应熔炼(Induction Skull Melting)、真空电弧熔炼(Vacuum Arc Melting)和等离子束熔炼(Plasma Melting)<sup>[36]</sup>。3 种熔炼方法都采用了真空及水冷坩埚技术。但这些方法熔炼 TiAl 基金属间化合物均有所不足,如所形成的熔池较浅,熔体温度难以维持,这对成分精确度和均匀性要求较高的 TiAl 基金属间化合物构成不利影响。

电磁冷坩埚悬浮熔炼技术是将分瓣的水冷铜坩埚置于交变电磁场内,利用交变电磁场产生的涡流热熔化金属,并依靠电磁力使金属熔体与坩埚壁保持软接触或者非接触状态,并对炉料进行感应熔炼或者成形的技术<sup>[37]</sup>。该技术充分利用了电磁场和金属相互作用的热效应和力效应<sup>[38]</sup>,具有很多优点:①金属在水冷铜坩埚中悬浮或软接触,可以使金属没有污染地熔化;②感应加热可以熔化高熔点的金属;③电磁力的强烈搅拌使熔体组织成分均匀;④适用范围广,可以熔炼不同成分的合金和材料;⑤高温熔体对冷坩埚无实质性腐蚀,使用寿命长。

1970 年英国成功地进行了感应悬浮熔炼的实验,并申请了专利;1980 年美国硅铁(Duriron)公司将感应悬浮熔炼推向了工业化生产。近年来,悬浮熔炼方法倍受青睐,在美国、俄罗斯、德国、日本、法国等先进国家发展起来。日本大同特殊钢公司<sup>[39]</sup>和法国的 TAR-AMM 公司<sup>[40]</sup>将悬浮熔炼与真空吸铸法、真空压铸法以及离心铸造工艺相结合,生产出了铸件壁厚最小可达 0.5 mm、外形轮廓非常好的铸件。日本大同特殊钢公司开发出的 LEVICAST 技术,可以熔炼出高质量的 TiAl 基金属间化合物,并用于大规模生产。目前需要研制熔化能力更大、熔炼时间短的大型熔炼炉,进一步提高金属利用率,降低熔炼成本。

国内目前应用最多的还是电弧炉和电子束炉。钢铁研究总院在 863 高技术项目资助下,自行开发研制了坩埚容量为 0.6 L 的冷坩埚真空感应悬浮熔炼炉<sup>[41]</sup>。哈尔滨工业大学从德国 ALD 公司引进的水冷铜坩埚真空感应熔炼炉<sup>[42]</sup>,具有 20 世纪 90 年代世界先进水平。利用该熔化炉熔炼 TiAl 基金属间化合物时,熔体温度易于控制,合金成分均匀、准确,间隙元素含量低( $<3.0 \times 10^{-2}$ )。但该技术熔炼 TiAl 基金属间化合物方面还有许多问题需要解决:如真空熔炼 TiAl 基金属间化合物时合金元素的挥发行为;熔炼(Ti + Al)混合炉料时

凝壳形成过程及对合金成分的影响;研究熔炼过程中熔炼功率、炉料量、熔体温度及凝壳尺寸之间的关系;研究不同条件下熔炼过程及工艺参数优化等。

### 3 TiAl 基金属间化合物的熔模铸造

#### 3.1 TiAl 基金属间化合物铸件项目

美国在 TiAl 基金属间化合物上的研究和应用一直处于世界领先地位。从 20 世纪 90 年代后期开始,许多以在飞机发动机上实际应用 TiAl 基金属间化合物为目的的政府和企业的项目纷纷上马。一大批满足发动机质量要求的静止部件和动部件被设计、制造出来。在这一过程中,美国通用电气公司(GE)设计的 Ti-48Al-2Cr-2Nb (x/%) ,简称 Ti-4822,因其在生产中相对易控制化学成分、易成型、易焊接等特点而脱颖而出。在诸如美国精密铸件公司(PCC Structurals, Inc.)等专业从事精密铸造的单位的帮助下,经过 20 余年的努力,目前终于形成了经济地,大规模生产航空用 TiAl 基金属间化合物部件的精密铸造能力。与此同时,在美国宇航局(NASA)的协助下,和铸造工艺几乎具有同等重要意义的 TiAl 基金属间化合物焊接工艺也在本世纪初开发完成,并被应用到大规模生产上<sup>[43]</sup>。

Ti-4822 有很多成功的应用例子。在 20 世纪 90 年代,最为著名的就是它在美国 NASA 主导的民用超音速飞机(High Speed Civil Transport -HSCT)发动机排气喷嘴部分的应用。图 2 是 HSCT 发动机的设计概念图,以及用于排气喷嘴处的 TiAl 基金属间化合物的部件<sup>[43]</sup>。

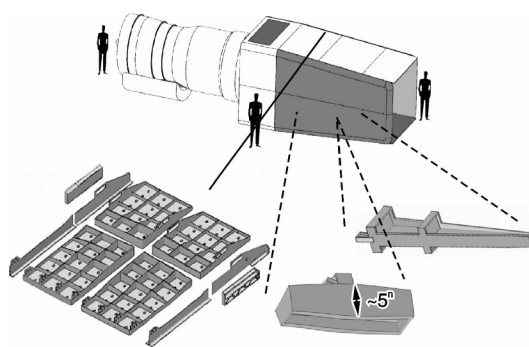


图 2 美国 HSCT 发动机的设计概念图

Fig. 2 Conceptual diagrams of the High Speed Civil Transport engine

由于这些大型薄壁 TiAl 基金属间化合物的 flap 和 beam 很难用锻造和机加工的工艺生产出来(最薄处不到 3 mm),精密铸造就成为制造这些部件的唯一选择。PCC 公司在 1998 年成功地完成了上述 Ti-4822 部件铸造,见图 3<sup>[44]</sup>。其中的 close-out beam 还被电子束焊接

后,通过了地面试验平台测试。

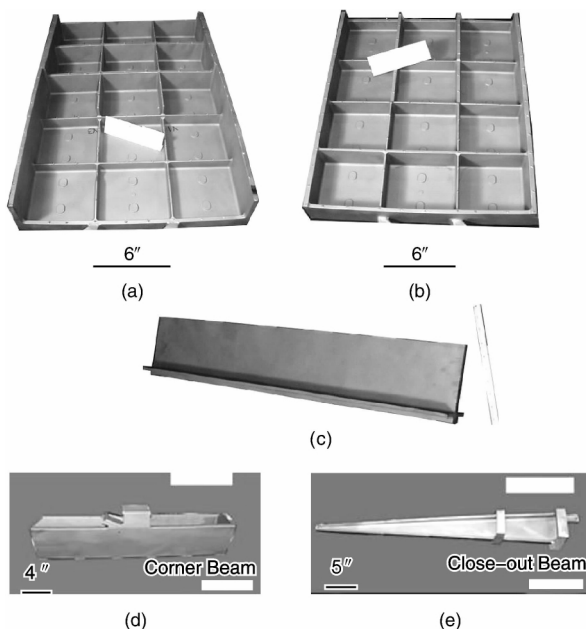


图3 精密铸造的 Ti-4822 用于 HSCT 排气喷嘴出的部件  
Fig.3 Investment cast Ti-48-2-2 HSCT nozzle components: (a)forward flap, (b)after flap, (c) t-bar, (d) corner beam, and (e) close-out beam

这些由精密铸造生产出的 Ti-4822,其室温的机械性能完全满足设计要求:平均屈服强度为 358 MPa,平均极限抗拉强度为 468 MPa,平均延伸率为 2.2%<sup>[44]</sup>。

和美国 HSCT 相对应,日本政府也于 2000 年启动了自己的民用超音速飞机计划(Environmentally Compatible Propulsion System for the Next Generation Super Sonic Transport Research Program -ESPR)。这是日本政府已实施了 10 年的 HYPR 计划的继续,旨在开发出高速民用客机推进系统所需的材料和技术。GE 和 PCC 共同为其提供了 Ti-4822 的环形侧板支持件。图 4 是此部件铸造和机加工后的照片<sup>[44]</sup>。

除此之外,10 余年来,美国空军,海军以及欧洲的一些航空发动机公司在 TiAl 基金属间化合物的开发上也投入了相当多的人力、物力。但是在很长的一段时间里,不管是超音速飞机的发动机也好,或其他现役、新机发动机上的部件也好,由于商业和技术方面的各式各样的原因,都没有使 TiAl 基金属间化合物真正大规模地进入到航空部件的生产上去。世界上大多数和 TiAl 基金属间化合物有关的工作都局限于一两个部件的示范性研发。这个局面一直延续到 2006 年 GE, PCC 和 IHI 共同成功地完成了,为波音 787 飞机配套的,GEEnX 发动机低压涡轮第 6 和第 7 级 Ti-4822 叶片的生产<sup>[45]</sup>。这个采用精密铸造和机加工工艺生产的叶片,使大规模生

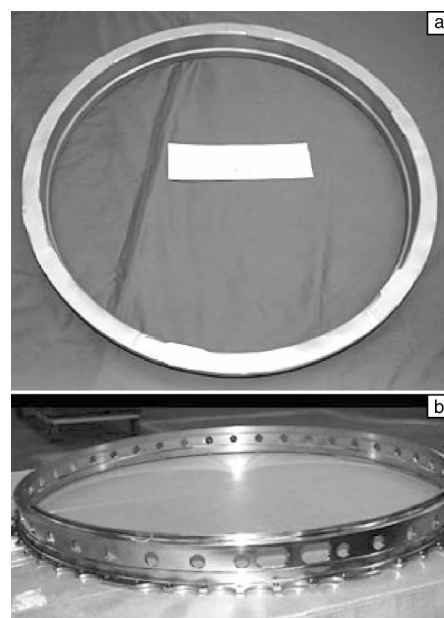


图4 日本 ESPR 项目中所用的 Ti-4822 环形侧板支持件: (a)铸件, (b)机加工件  
Fig.4 Investment cast Ti-48-2-2 ESPR ring: (a) as-cast ring and (b) after machining

产 TiAl 基金属间化合物部件成为现实。组装好的第 6、第 7 级低压涡轮叶片参加了 2006 年 4 月 GEEnX 发动机的第一次地面试车;并在 2007 年 2 月成功地参与完成了第一次飞行试验。

### 3.2 TiAl 基金属间化合物熔模铸造型壳

1965 年美国发布了第一个钛的熔模精密铸造技术专利,20 世纪 70 年代初,钛合金精铸件被正式应用到航空工业上,自此之后,钛合金熔模铸造技术得到了比较快的发展,熔模铸造钛合金的发展史,从某种程度上也可以说就是型壳的发展过程<sup>[46]</sup>。型壳的制备是整个 TiAl 基金属间化合物熔模铸造工艺的最大难点,在制壳工艺已相对成熟的情况下,选择合适的粘结剂和耐火材料显得尤为重要。

#### 3.2.1 粘结剂

粘结剂是 TiAl 基金属间化合物熔模铸造中型壳的重要原材料,是制壳工艺中的难中之难,它直接影响型壳、铸件质量,生产周期和成本。水玻璃、硅酸乙酯等铸造常用粘结剂,只能用作 TiAl 基金属间化合物铸造型壳的背层材料,对于面层,需要的是能够在煅烧后,生成比  $\text{SiO}_2$  更稳定氧化物(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  等)的粘结剂。

保证型壳面层的惰性选择面层粘结剂的主要原则<sup>[47]</sup>,通常铸钛用的粘结剂可分为碳质粘结剂和氧化物粘结剂。目前国内外铸钛生产中使用的碳质粘结剂主

要是合成树脂和合脂,此外还有糊精、淀粉、沥青和胶体石墨等。氧化物粘结剂主要有二醋酸锆、硝酸锆、碳酸锆铵、硅溶胶等,其中二醋酸锆<sup>[48]</sup>是钛合金精铸型壳工艺中重要的金属有机化合物粘结剂,广泛应用于面层涂料工艺。不论是难熔金属面层工艺,还是惰性氧化物面层工艺,都可以用它作主要粘结剂。二醋酸锆价格比较昂贵,因此价格低廉的硅溶胶通过技术改进后也被应用于实际生产<sup>[49-50]</sup>。

从实际制得的铸件质量来看,国内北京航空材料研究所研制的 Gu-1, Gu-3 型粘结剂<sup>[51]</sup>,哈尔滨工业大学研制的 LJ-8 型粘结剂<sup>[52]</sup>均可制备出表面质量良好的薄壁钛合金铸件。目前所用的大多数粘结剂还不能完全适合钛合金铸造,它们的焙烧产物大多与耐火材料的成分相同,与钛的反应依然存在。粘结剂的研制始终滞后于耐火材料的研制,因此,同开发新型耐火材料一样,粘结剂也需进一步的开发。

### 3.2.2 耐火材料

熔融的 TiAl 几乎可以与所有的耐火材料反应,在铸件表面形成污染层,恶化铸件的内在和外观质量,影响铸件尺寸精度,严重时甚至造成铸件的报废,因此,面层材料的选择非常关键。钢、铁、有色金属铸造常用的面层耐火材料都不适用于 TiAl 基金属间化合物的铸造。由于 TiAl 基金属间化合物的异常活性,型壳面层耐火材料除了满足一般要求外,还要满足以下几个特殊要求:①高化学惰性,与熔融 TiAl 基金属间化合物合金接触不发生物理化学反应;②对水分、气体吸附能力小,浇注时释放气体量小;③导热性能低,减小激冷所引起的铸件缺陷<sup>[53]</sup>。

目前所使用的面层耐火材料主要包括碳质耐火材料、难熔金属及其化合物材料、氧化物陶瓷材料<sup>[54]</sup>。碳质型壳收缩率高、表面质量差,难熔金属及其化合物型壳成本昂贵,这些都限制了它们在工业中的应用。

氧化物材料是 TiAl 基金属间化合物熔模铸造型壳材料的发展方向。目前,国际上主要使用惰性氧化物作为型壳面层材料<sup>[55]</sup>,包括  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$  和 CaO,根据热力学分析, $ThO_2$  是最稳定的耐火氧化物,但由于其具有放射性,已基本不用。

电熔氧化锆是 TiAl 基金属间化合物熔模铸造型壳的重要面层材料,它是由化学提纯的无定形  $ZrO_2$ ,经电熔炉熔融冷凝而成的结晶  $ZrO_2$ 。未经稳定化处理的  $ZrO_2$  不能用作造型材料,因为在高温环境中  $ZrO_2$  会发生同素异形体转变,使型壳发生开裂。为了获得稳定的  $ZrO_2$ ,通常加入 4%~8% 的 CaO, MgO 或  $Y_2O_3$ ,使  $ZrO_2$  在 1700℃~2400℃ 煅烧后,生成具有立方晶格

的连续固溶体。

刘爱辉等<sup>[56]</sup>研究了  $ZrO_2$  ( $Y_2O_3$  稳定)陶瓷型壳与 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的高温界面反应。研究表明,高温下, Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金熔体会在紧密结合区域与氧化物陶瓷型壳发生一定程度的界面反应,在型壳表面形成厚度约为 25  $\mu m$  的由  $Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{1.93}$  等复合氧化物组成的界面反应层。

无定形的  $Y_2O_3$  比表面积大,具有很大活性,加上  $Y_2O_3$  本身呈较强的碱性,会使配置涂料发生困难,必须经过高温稳定化处理后才能用作钛合金造型材料。 $Y_2O_3$  陶瓷型壳具有热导率低、强度高等优点,成为近年来国内外研究的热点。目前,  $Y_2O_3$  陶瓷型壳工艺已经比较成熟,  $Y_2O_3$  型壳已经成为生产航空用铸造钛合金零件的主要铸型,可浇注优质的钛合金铸件。

Richerson<sup>[57]</sup>研究了以  $Y_2O_3$  为主,混以少量稀有重金属氧化物制成的陶瓷坩锅和铸型。这种方法比较成功,但是存在着工艺反复、成分复杂、高费用的缺点。

CaO 作为一种低成本的面层耐火材料,已经成为当今 TiAl 基金属间化合物熔模铸造型壳的主要研究方向,得到越来越多的关注。目前,对 CaO 陶瓷型壳的研究正在进行中, LaSalle<sup>[58]</sup>介绍了采用碳酸钙预制涂料浆制备 CaO 面层涂料。Lasalle 已使用这种型壳浇注出涡轮增压器的转子。

另外,考虑到  $Al_2O_3$  的化学组成及高 Al 含量降低了 TiAl 基金属间化合物的活性和对氧的固溶度,且  $Al_2O_3$  与 TiAl 的热膨胀系数非常相近,可以降低因 TiAl 室温塑性较低而导致断裂的几率,人们看好  $Al_2O_3$  在 TiAl 精铸中的应用前景。

## 4 存在的问题及展望

我国在 TiAl 基金属间化合物熔模精密铸造方面取得了一定的成果,但仍存在以下几个问题亟待解决:①熔融 TiAl 基合金化学活泼性高,精铸过程易与型壳发生反应,形成表面脆性层,且国外粘结剂技术采取了保密措施,这就要求必须自力更生研制适于精铸 TiAl 基金属间化合物的粘结剂,制备出具有良好化学稳定性的型壳,深入分析并最终解决型壳与铸件之间的严重反应问题;②TiAl 基金属间化合物本身是一种金属间化合物,密度低,浇注时静压头小, TiAl 基金属间化合物凝固收缩较大,铸件易产生裂纹,作用力过大时会直接断裂,一次成形率较低。因此需研究粉料粒形、粒度、级配、加入辅助添加剂等不同制壳工艺,以期将型壳退让性调整到适于精铸 TiAl 基合金;③TiAl 基金属间化合物的室温脆性是阻碍其通向实用的瓶颈。较好的铸态组

织,既是铸态合金本身的需要,也是热机械加工的基础。铸态组织较粗大,需进行适当的合金化、加入晶粒细化剂、热处理等来调整铸态组织,以便得到最优的力学性能。

2007年,美国GE公司生产的铸造TiAl基金属间化合物叶片已成功地被波音公司用于波音787客机,TiAl合金的应用领域正在逐渐扩展。在民用航空航天领域,除了叶片外,非转动部件、非受力轮盘等都可能应用,汽车的增压涡轮和排气阀等应用也成为发展的重点<sup>[59]</sup>。随着经济的发展,科技水平的提高,预计未来中国的航空航天事业中TiAl基合金将有更广泛的应用。

## 参考文献 References

- [1] Qin Gaowu(秦高梧), Hao Shiming(郝士明). Ti-Al 系金属间化合物[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 1995, 24(2): 1-7.
- [2] Li Wen(李文), Guan Zhenzhong(关振中), Zhang Ruilin(张瑞林). Ti-Al 系金属间化合物的氢脆机理[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 1999, 28(3): 129-131.
- [3] Liu Jian(刘剑), Yang Yi(杨屹), Lu Dong(卢东). 基于 ProCAST 真空条件下钛合金熔模铸造的探究[J]. *Foundry*(铸造), 2008, 57(11): 1155-1158.
- [4] Edward A Loria, Quo Vadis. Gamma Titanium Aluminide[J]. *Intermetallics*, 2001, 9(12): 997-1001.
- [5] Edward A Loria. Gamma Titanium Aluminides as Prospective Structural Materials[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9): 1339-1345.
- [6] Mercer C, Lou J, Soboyejo W O. An Investigation of Fatigue Crack Growth in a Cast Lamellar Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 284(1-2): 235-245.
- [7] Jovanovic M T, Dincic B, Bobic I, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Precision Cast TiAl Turbocharger Wheel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(1): 14-21.
- [8] Kim Y W, Intermetallic Alloys Based on Gamma Titanium Aluminides[J]. *JOM*, 1989, 41(7): 24-30.
- [9] Lipsitt H A. Titanium Aluminides—an Overview[C]//*Mater Res Soc Symp Proc* 39. Pittsburgh: MRS, 1985: 351-360.
- [10] Kuang J P, Harding R A, Campbell J. Microstructure and Properties of Investment Casting of Titanium Aluminide[J]. *Mater Sci Eng*, 2002, A329-331: 31-37.
- [11] Yang R, Cui Y Y, Dong L M, et al. Alloy Development and Shell Mold Casting of Gamma TiAl[J]. *Mater Process Technol*, 2003, 135: 178-188.
- [12] 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*(镍钛铝系金属间化合物耐耐高温材料): China, ZL91111952. 3[P]. 1991-12-31.
- [13] Chen G, Sun Z, Xie X. *Advanced Structural Materials*[M]. Amsterdam North-Holland: Elsevier, 1990: 803-811.
- [14] Chen G L, Zhang W J, Wang Y D, et al. *Structural Intermetallics*[M]. New York: TMS Publication, 1993: 319-324.
- [15] Chen Guoliang(陈国良). *Intermetallics*(金属间化合物)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992.
- [16] Chen G L, Wang X T, Ni K Q, et al. Investigation on the 1000, 1150 and 1400 °C Isothermal Section of the Ti-Al-Nb System[J]. *Intermetallics*, 1996(4): 13-22.
- [17] Chen G L, Wang J G, Wang X T. Reply to the "Comment on Investigation on the 1000, 1100, 1400 °C Isothermal Section of the Ti-Al-Nb System" Part I, Ordering of Nb in  $\gamma$ -TiAl and  $\gamma_1$  Phase[J]. *Intermetallics*, 1998(6): 323-327.
- [18] Chen G L, Sun Z Q, Zhou X. Oxidation and Mechanical Behavior of Intermetallic Alloys in the Ti-Nb-Al Ternary System[J]. *Materials Science and Engineering*, 1992(153): 597-601.
- [19] Chen G, Sun Z, Zhou X. Oxidation of Intermetallics Alloys in Ti-Al-Nb Ternary System[J]. *Corrosion*, 1992(48): 939-946.
- [20] Zhang W J, Chen G L, Wang Y D, et al. Characteristics of Heat Resistant Alloys Ti10Nb45Al and Ti48Nb48Al[J]. *Scripta Metallurgica*, 1993(28): 1113-1118.
- [21] Zhang W J, Chen G L, Sun Z Q. Oxidation of Ternary Ti18Nb48Al and Ti10Nb45Al[J]. *Scripta Metallurgica*, 1993(28): 563-567.
- [22] Wang J G, Chen G L, Sun Z Q, et al. Continuous Ordering in the TiAl + Nb System[J]. *Intermetallics*, 1994(2): 31-36.
- [23] Wang J G, Chen G L, Sun Z Q. Phase Relations in TiAl + Nb System[J]. *Mater Sci Technol*, 1994(10): 359-336.
- [24] Wang J G, Sun Z Q, Chen G L. Structure of a New Ordered Intermetallic Compound in TiAl + Nb System[J]. *Acta Metall Sinica*, 1994(30): 525-530.
- [25] Chen G L, Wang J G, Zhang L Q, et al. Strain Induced Structural Transition of Interfaces and Twin in a Hot Deformed Dual-Phase TiAl Alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1995(8): 273-286.
- [26] Zhang L Q, Chen G L, Wang J G, et al. Hot-Deformation-Induced  $\alpha_2/\gamma$ -Interfacial Structure in a Two-Phase  $\gamma$ -TiAl-Based Alloy[J]. *Materials Letters*, 1998(36): 132-136.
- [27] Zhang L Q, Wang J G, Chen G L, et al. Structural Change of Deformation Twin Boundaries in a Heavily Deformed  $\gamma$ -TiAl-Based Alloy[J]. *Materials Letters*, 2000(45): 320-325.
- [28] Zhang L Q, Wang J G, Chen G L, et al. Twin-Intersection-Related Nanotwinning in a Heavily Deformed  $\gamma$ -TiAl-Based Alloy[J]. *Philosophical Magazine Letters*, 1999(79): 49-54.
- [29] 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.
- [30] Yoshihara M, Kim Y W. Oxidation Behavior of Gamma Alloys Designed for High Temperature Applications[J]. *Intermetallics*, 2005(13): 952–958.
- [31] Xinhua Wu. Review of Alloy and Process Development of TiAlAlloys[J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10): 1 114–1 122.
- [32] Su Yanqing(苏彦庆), Guo Jingjie(郭景杰), Jia Jun(贾均), et al. TiAl基金属间化合物涡轮熔模型壳离心精密铸造[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2002, 31(4): 295–298.
- [33] Zhong Zengyong, Ye Hengqiang. *Intermetallic Compound*[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House. 1992: 1–9.
- [34] Liu B C. Progress in Solidification Modeling of Cast Iron in China[J]. *Int J Cast Metal Res*, 1999, (5): 259–266.
- [35] Liang Zuojian(梁作俭), Xu Qingyan(许庆彦), Li Juntao(李俊涛), et al. TiAl增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2003, 32(3): 164–169.
- [36] Kong Fantao(孔凡涛), Chen Yuyong(陈玉勇), Tian Jing(田竞), et al. TiAl基金属间化合物研究进展[J]. *Materials Science and Technology*(材料科学与工艺), 2003, 11(4): 441–444.
- [37] Chen Ruirun(陈瑞润), Ding Hongsheng(丁宏升), Bi Weisheng(毕维生), et al. 钛合金冷坩埚电磁约束铸造工艺研究[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金), 2005, 25(6): 323–325.
- [38] Chen Ruiren(陈瑞润), Guo Jingjie(郭景杰), Ding Hongsheng(丁宏升), et al. 冷坩埚熔铸技术的研究及开发现状[J]. *Foundry*(铸造), 2007, 56(5): 443–450.
- [39] Noda T. Application of Cast Gamma TiAl for Automobiles[J]. *Intermetallics*, 1998, (6): 709–713.
- [40] Huang Shumei(黄淑梅), Han Mingchen(韩明臣). 钛的悬浮熔炼与铸造[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2002, 38(S): 334–336.
- [41] Feng Di(冯涤), Luo Heli(骆合力), Zou Dunxu(邹敦叙), et al. 冷坩埚感应悬浮熔炼技术[J]. *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报), 1994, 6(4): 24–30.
- [42] Chen Yuyong(陈玉勇), Kong Tao(孔凡涛). TiAl基金属间化合物新材料研究及精密成形[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2002, 38(11): 1 141–1 148.
- [43] Bartolotta P, Krause D. *Titanium Aluminide Applications in the High Speed Civil Transport* [R], Washington D C: NASA, 1999.
- [44] Min Lu, Barrett Jim R, Kelly Tom J. Investment Casting of Gamma Titanium-Aluminides for Aircraft Engine Applications, in *Structural Intermetallics* [C]//TMS Symp Proc. WY: Jackson Hole, 2001: 225–232.
- [45] Guy Norris. *Power House*[R]. Evendale: Flight International, 2006.
- [46] Huang Dong(黄东), Xie Chengmu(谢成木), Nan Hai(南海), et al. 国外钛合金熔模铸造耐火材料的研究[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金), 2004(3): 47–49.
- [47] Huang Dong(黄东), Xie Chengmu(谢成木), Nan Hai(南海), et al. 国外钛和钛合金熔模精铸涂料浆的研究和发展[J]. *Foundry*(铸造), 2004, 53(3): 179–182.
- [48] Cui Guanzhi(崔广智). 钛合金熔模铸造粘结剂二醋酸铝的制备方法[J]. *Journal of Materials Engineering*(材料工程), 1996(3): 14–16.
- [49] Feagin. *Ceramic Shell Molds and Cores for Casting of Reactive Metals*: United States, Patent 5630465[P]. 1997–05–20.
- [50] Yasrebi. *Method for Stabilizing Ceramic Suspensions*: United States, Patent 5643844[P]. 1997–07.
- [51] Zhou Yanbang(周彦邦), Yan Yuanlin(阎渊林), Xiao Xiyun(肖锡云), et al. 新型钛精铸氧化物陶瓷型壳工艺研究[J]. *Journal of Materials Engineering*(材料工程), 1995(5): 43–45.
- [52] Li Bangsheng(李邦盛), Jiang Haiyan(蒋海燕), Li Zhiqiang(李志强). 新型钛精铸用粘结剂及型壳制备工艺的研究[J]. *Foundry*(铸造), 1998(7): 4–6.
- [53] Zhang Litong(张立同), Cao Lamei(曹腊梅), Liu Guoli(刘国利), et al. *Near Net-Shape Casting Theory and Practice*(近净形熔模精密铸造理论与实践)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 115–116.
- [54] Yan Fengyun(阎峰云), Chen Jidong(陈基东), Ma Xiaobin(马孝斌), et al. 钛合金熔模铸造技术[J]. *China Foundry Machinery & Technology*(中国铸造装备与技术), 2009(2): 1–5.
- [55] Xiao Shulong(肖树龙), Chen Yuyong(陈玉勇), Zhu Hongyan(朱洪艳), et al. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2006, 35(5): 678–681.
- [56] Liu Aihui(刘爱辉), Li Bangsheng(李邦生), Nan Hai(南海), et al. TiAl基金属间化合物熔体与氧化物铸型界面的相互作用[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2007, 36(11): 1 975–1 978.
- [57] Rcherson. *Ceramic Composition and Crucibles and Molds Formed Therefrom*: United States, Patent 4040845[P]. 1977.
- [58] LaSalle. *Inert Calcium Facecoats for Investment Casting of Titanium and Titanium-Aluminide Alloys*: United States, Patent 5766329[P]. 1998.
- [59] Lin Junpin(林均品), Chen Guoliang(陈国良). TiAl基金属间化合物的发展[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2009, 28(1): 31–37.