

TiAl 基合金熔模精密铸造技术的发展现状

陈玉勇, 陈艳飞, 田 竟, 孔凡涛, 肖树龙, 徐丽娟

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: TiAl 基合金作为一种新型轻质高温结构材料, 以其密度低、比强度和比模量高, 具有较好的抗氧化和蠕变性能以及优异的抗疲劳性能, 在航空航天和汽车等领域具有广阔的应用前景。本文主要介绍了 TiAl 基合金的熔炼技术、熔模精密铸造技术及应用研究, 并提出了 TiAl 基合金熔模精密铸造技术的不足与展望。

关键词: TiAl 基合金; 熔模精密铸造; 熔炼技术; 应用研究

中图分类号: TG146.2⁺3; TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0554-05

随着对宇航业的开发及国防等工业的发展, 尤其是先进军用飞机要求具有高的灵活性以及要求发动机具有大的推重比, 设计者们越来越青睐密度低而强度高的材料。Ti 合金在许多方面满足了这种需要, 因此在航空航天上的应用比例越来越大。可是, 基于强度和抗氧化上的考虑, 目前最先进的钛合金(如 IMI834 和 Ti-1100)只能局限于 600 °C 应用, 另外, 普通钛合金还受限于损伤容限、蠕变强度及高温抗自燃阻力^[1]。与常规钛合金相比, γ -TiAl(以下简称 TiAl)基合金密度更小, 兼有金属与陶瓷的性能, 不仅具有高的比强度和比模量, 而且该合金在高温时依然可维持这些特性, 同时具有良好的抗蠕变、抗氧化能力, 这使其倍受科研工作者的重视, 从而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^[2-6]。

目前已开发出的一些铸造 TiAl 基合金, 虽然能满足一些涡轮、发动机部件的性能要求, 但是由于 TiAl 基合金室温塑性低及随之而来的成形性差, 所以采用精密铸造技术是制作汽车和飞机等行业用 TiAl 基合金构件的最可行的方法之一。本文综述了 TiAl 基合金的熔炼技术、熔模精密铸造技术及应用研究概况, 指出了 TiAl 基合金熔模精密铸造技术的不足并进行了展望。

1 TiAl 基合金熔炼技术

目前, 虽然熔炼高活性金属的方法很多, 但关于 TiAl 基合金熔炼的资料甚少。TiAl 基合金同 Ti 合金一样, 在高温时具有高的化学活性, 因此一般沿用熔

炼 Ti 合金的方法。但相对于熔炼 Ti 合金来说, 熔炼 TiAl 基合金又具有自身特点, 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, 这使 TiAl 基合金熔炼和铸锭更加困难^[7]。详细研究 TiAl 基合金的熔炼技术对其性能的预测和后续组织的控制非常有意义。

对于 TiAl 这样的金属间化合物, 在追求提高合金质量时, 选择熔炼方法的重要依据是能否实现目标成分, 能否控制合金熔体的过热度, 能否最大限度地降低间隙元素含量。目前已有 3 种冶金熔炼方法被成功地应用于 TiAl 基合金的生产: 感应凝壳熔炼、真空电弧熔炼和等离子束熔炼^[8]。其中感应凝壳熔炼主要用于制备尺寸为 75~125 mm 的小直径铸锭, 后两种方法用于制备直径尺寸为 200~350 mm 的铸锭。采用后两种工艺应注意大直径尺寸铸锭温度场不均匀引起的热应力造成 TiAl 基合金铸锭开裂。但这些方法熔炼 TiAl 基合金均有所不足, 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 基合金构成不利影响。

悬浮熔炼较之其它熔炼方法, 熔融金属与坩埚接触少, 甚至不接触, 避免了来自坩埚的污染, 特别适合熔炼活性金属及金属间化合物。1970 年, 英国 Hukin 成功地在分块的坩埚中进行金属的悬浮熔炼并取得了专利, 美国矿务局 Clites 等人对用 CaF_2 作绝缘层的感应渣熔炼工艺进行了研究。1980 年美国硅铁(Duriron)公司发展了无渣感应凝壳熔铸工艺, 消除了熔渣与合金元素所产生的气孔, 把冷坩埚感应熔炼——悬浮熔炼推

收稿日期: 2008-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50674037)

作者简介: 陈玉勇, 男, 1956 年生, 博士生导师, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418802, E-mail: yfchn@hotmail.com

向工业化生产。法国 TARAMM 公司的研究人员提出了名为 RARAMM 工艺的冷坩埚感应悬浮熔炼技术^[9,10], 该技术包括真空熔炼系统和浇注系统。真空熔炼系统是在感应凝壳炉基础上改进线圈和分瓣坩埚形状在坩埚内熔体底部产生电磁斥力, 熔炼过程中仅少量的熔化金属钛液与坩埚壁接触形成了凝壳, 使活泼金属熔体实现电磁学意义上的悬浮熔炼, 彻底避免了坩埚材料对熔体污染, 并且由于熔融的金属钛与坩埚间的热交换少, 可使重达 5 kg 的熔融金属钛达到过热状态。此外, 在感应电磁力的强有力的持续搅拌下, 熔融金属钛的化学成分及过热度更加均匀。浇注系统采用离心浇注, 当熔融钛在到所需温度倾斜坩埚使钛液注入高速旋转的陶瓷模中, 铸模旋转产生的离心力使钛液充满整个型腔, 可获得尺寸精度相当高的铸件, TARAMM 工艺适合生产从几克到 2000 g 左右的钛铸件。

日本大同特殊钢公司对 Ti 的感应熔炼炉进行了研究和改进, 设计制造了水冷铜坩埚感应熔炼炉——悬浮熔炼炉, 再将悬浮熔炼方法与真空吸铸法相结合, 开发出了 LEVICAST 技术。此方法通过控制铸型室和熔炼室的压力差, 使熔融金属液与坩埚不接触, 避免了来自坩埚的污染。铸型室相对于熔化室保持气密状态, 而且可以移动, 能够较容易地在保持洁净气氛的情况下替换陶瓷铸型, 可以熔炼出高质量的 TiAl 基合金, 并用于大规模生产^[11]。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 Ti 的熔炼成本。

在国内, 目前应用最多的是电弧炉, 其适应性较强, 但熔体质量偏低。电子束炉除高真空带来的合金元素挥发问题外, 其有利方面占主导地位。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^[12], 而在该设备条件下的熔炼工艺有待研究。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^[13], 具有 20 世纪 90 年代世界先进水平。利用该熔炼炉熔炼 TiAl 基合金时, 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 基合金方面还有许多问题需要解决: 如真空熔炼 TiAl 基合金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; 研究不同条件时熔炼过程及工艺参数优化等。

2 TiAl 基合金熔模精密铸造技术研究状况

采用熔模精密铸造工艺制备 TiAl 基合金构件具有

其他方法无可比拟的优点, 常用于航空、航天、汽车工业耐热构件的成形, 特别是形状复杂薄壁的构件, 该方法可得到无余量或近无余量的精密复杂构件, 大幅度减少金属损耗, 提高材料的利用率, 减少大量机加工, 大幅度降低生产成本, 引起了世界各国的极大兴趣, 如欧洲于 2005 年启动了一个雄心勃勃的计划——IMPRESS (Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification), 其中一个主要课题就是旨在用铸造方法生产出能够用于飞机发动机和静止燃气涡轮机的 40 cm 长 TiAl 基合金涡轮叶片^[14,15]。

国内外科研工作者针对 TiAl 基合金优异的综合性能, 结合熔模精密铸造在金属成形方面的优越性, 探索和发展了几种 TiAl 基合金熔模精密铸造典型工艺^[16,17]。其中, 氧化物陶瓷型壳有取代石墨型壳和金属钨面层陶瓷型壳的趋势, 是一种很有前途的工艺。

熔融的 TiAl 基合金具有很高的化学活性, 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, 面层耐火材料的选择非常关键^[18]。研究者们选取了氧化钙 (CaO)^[19]、莫来石 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)^[20]、锆英石 (ZrSiO_4)^[21]、氧化锆 (ZrO_2)、氧化铝 (Al_2O_3) 和氧化钇 (Y_2O_3)^[22] 等耐火材料进行研究。其中: CaO 型壳极易吸潮导致胀裂的特性要求对湿度的控制极其严格, 增加了操作的难度; 莫来石、锆英石含有的 Si 元素精铸时会与熔融 TiAl 液发生剧烈的反应。

ZrO_2 是一种热力学稳定、性价比较高的化合物, 与 Ti 液的润湿性较差, 因而在钛合金的熔炼和精铸方面得到了应用。但不同的实验条件下, 铸件表面也存在反应层^[23-26]。用 ZrO_2 陶瓷坩埚熔炼 TiAl 合金时在金属中发现大量的夹杂物^[27], 说明 ZrO_2 与高温下的 TiAl 熔液发生了严重的化学反应。经 CaO 或 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 型壳与 TiAl 反应层的厚度可控制在几十微米。

哈尔滨工业大学^[28]用 Y_2O_3 作为面层材料, 采用自制粘结剂制备型壳, 成功地浇注出轮廓清晰、表面光亮的大型复杂薄壁钛合金铸件。但 Y_2O_3 较高的价格限制了其应用。有研究者^[29]选用稀土混合氧化物作为耐火材料也大大改善了钛合金铸件的表面质量。Barbosab 等^[30]用 SIMS 方法测量了型壳污染对 TiAl 基合金的影响, 发现 SiO_2 扩散深度最大, 并得出 $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ 在 TiAl 基合金精铸中大有可为。

考虑到 Al_2O_3 的化学组成及高 Al 含量降低了 TiAl 基合金的活性和对氧的固溶度^[31-33], 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。英国伯明翰大学和韩国 Sungkyunkwan 大学开展了 Al_2O_3 型壳精铸 TiAl 基合金研究^[34-36]。Kuang 等人^[27]发现用 Al_2O_3 坩埚熔炼 TiAl 合金时,在界面上存在明显的反应区;TiAl 精铸时,则在铸件一侧产生 200 μm 的反应层和 500 μm 的硬化区。Kim 等人^[37,38]的研究表明,合适的粘结剂将降低 Al_2O_3 与 TiAl 合金的界面反应。

Harding 等^[39]首次开展了缩孔位置氧化膜及包覆气泡的研究,发现作为非均匀形核的质点的包覆气泡造成了 TiAl 铸件中心线部位的缩松。捷克材料物理研究所的 Dlouhy^[40]研究发现,通过在型壳面层适当喷涂 Al_2O_3 或 Y_2O_3 (不含 SiO_2 的粘结剂)能极大减少坩埚壁冲击脱落;TiAl 铸件和型壳由于热膨胀不同导致铸件破坏,并建立了 1D-1D 冷却模型,模拟了浇注型壳的热流和应力,优化了过热度、型壳预热温度、冷却动力学和型壳组成等工艺参数。

英国伯明翰大学 Rolls-Royce 实验中心拥有 30 kg 和 90 kg 感应水冷坩埚钛合金铸造设备,用此设备开发的 TiAl 合金铸件不仅结构复杂,而且质量良好^[41]。德国采用标准的去壳技术和重力铸造技术相结合的方法生产出 TiAl 薄壁结构件。新的氩弧凝壳熔炼技术单炉可以熔铸 500 kg 钛合金,直接生产制造直径达 1500 mm,高度达 800 mm 的精密铸件,其最薄部位厚度仅 1.6 mm^[42]。

传统的精铸型壳以水玻璃、硅溶胶或硅酸乙酯为粘结剂,靠 Si—O 链结合,焙烧后的产物均含有 SiO_2 , SiO_2 的存在降低了型壳的化学稳定性而导致精铸过程中与 TiAl 液发生化学反应,严重影响铸件的表面质量和力学性能。科研工作者在探寻粘结剂方面做了不少工作,但各厂家及研究者实行技术保密,因此需进一步研制质优价廉的精铸 TiAl 基合金用粘结剂,尽量降低或消除铸件表面反应层。

3 TiAl 基合金的应用研究

针对 TiAl 基合金的性能特点, TiAl 基合金至少在以下 3 方面具有广阔的应用前景: (1) TiAl 基合金高的弹性模量使它适于制备航空发动机要求低间隙的结构件,如机匣、支撑架和鼓筒等,优于传统结构材料 50% 的比模量可将声学原因造成的震动移向较高的频率,适于制作发动机叶片和喷管中的相关部件; (2) 低的密度和在 600~800 $^{\circ}\text{C}$ 具有较好的抗蠕变性能, TiAl 基合金可以代替高温合金,制备相应的结构件; (3) TiAl 基合金具有优异的阻燃性能(接近高温合金),可以替代密度大和昂贵的阻燃钛合金。为此,在 TiAl 基合金的应用研究方面,美、日、欧等国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 基合金的研究,并成功地得到应用^[43-45]。

1993 年,通用电气公司成功地进行了 Ti-47Al-2Cr-2Nb 铸造低压涡轮叶片(LPTBs)的模拟飞行实验。实验时,将 98 片 TiAl 基合金叶片装配到 CF6-80C 发动机上,经过 1000 次循环后,叶片没有任何损坏^[46,47]。然后,将 7 片其它成分的 TiAl 基合金叶片插上去,再经过 500 次循环,叶片仍然完好无损。这次实验的成功是 TiAl 基合金研究历史上的一个里程碑,它大大增强了 TiAl 基合金研究界及材料设计者对 TiAl 基合金的信心。除此之外,Pratt & Whitney 公司的高压涡轮叶片座等也先后通过了发动机实验^[48]。

国际上主要的发动机制造商如 GE、PWA、R-R 等对 TiAl 基合金铸件进行了广泛的研究,这些铸件主要由 PCC 及 Howmet 提供。美国 Howmet 公司研究的 TiAl 合金增压涡轮及进、排气阀已在一定范围商业化。PCC 精铸出大型 TiAl 基合金发动机扩压器,铸件外径 61 cm,宽 6.25 cm,厚 5 cm,外围有 16 个脊,只有两处需要焊接修复,并已成功进行了 650 $^{\circ}\text{C}$ 实验。

近年来,在汽车发动机部件中,研究最集中的是增压涡轮和排气阀,国外车用发动机部件应用轻质 TiAl 基合金的研究已取得成功。德国材料研究所 Wagner 用熔模精密铸造方法制成 TiAl 基合金发动机叶片,在汽轮机工作条件下(700 $^{\circ}\text{C}$, 1600 r/min)成功进行了旋转实验^[49]。日本川崎重工株式会社和大同特殊钢公司宣布,用熔模精密铸造方法生产的 TiAl 基合金叶轮比耐热合金叶轮达到 110 000 r/min 的时间缩短约 16%,达到 170 000 r/min 所需的时间缩短 26%,提高了最大转速,充分体现了 TiAl 基合金的比性能优势。日本京都大学新开发 Ti-47Al-Fe-B 合金车用整体精铸发动机,外径 80 mm 的增压涡轮,来替代铸造镍基高温合金,可使涡轮转子减重 50% 以上,使 TiAl 金属间化合物涡轮增压的发动机节省启动时间,加速响应时间显著减少,排气阀耐久力测试结果表明稳定性良好。日本另一种用于精铸涡轮的 TiAl 基合金名义成分为 Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si,采用反压铸造法新技术铸造的 TiAl 金属间化合物增压涡轮已应用于三菱等跑车。TiAl 涡轮增压器应用最成功的是在日本,1998 装备了 1000 台左右 Lancer 汽车,到 2003 年的时候已经增加到 20000 台,这些涡轮增压器的成分为 Ti-46Al-6.5Nb 和一些微量元素^[50]。

国内对TiAl合金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^[14,51], TiAl排气阀已通过台架测试^[52], 但TiAl叶轮目前还没有进行台架试验的报道。北京钢铁研究总院张继等^[53]在Al₂O₃基陶瓷型壳表面层中添加3%~10%的稀土氧化物改善型壳表面的化学稳定性; 在含硅酸乙酯制壳料浆中掺入1%~5%的碳水化合物改善型壳的透气性, 所开发的多重氧化物陶瓷型壳用于TiAl基合金涡轮精铸成形, 以轻质TiAl合金取代现用镍基铸造高温合金, 大大降低转子系统的转动惯量, 解决了中国某重点国防工程研制样车在试运行过程中启动慢和冒黑烟问题。哈尔滨工业大学在低成本氧化物陶瓷型壳的研制、TiAl基合金的熔炼、铸造工艺的数值模拟、TiAl基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^[13,18,28]。

4 TiAl 基合金熔模精密铸造存在的问题及展望

熔模精密铸造 TiAl 基合金在国内外科工作者的不断努力下已取得了一定的成果, 但仍存在以下问题: (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, 这就要求研制适于精铸 TiAl 基合金的耐火材料和粘结剂, 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; (2)TiAl 合金本身是一种金属间化合物, 密度低, 浇注时静压头小, TiAl 基合金凝固收缩较大, 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; (3)TiAl 基合金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, 如: 晶粒尺寸、层片间距、层片组织(α_2/γ)体积分数、 α_2 相体积分数、 γ 相晶格参数以及 B2 相含量形态等, 以便得到最优的力学性能。

值得一提的是, 2007 年波音公司成功将铸造 TiAl 基合金叶片用于波音 787 客机, 这一消息极大地鼓舞了从事 TiAl 基合金的研究者们, 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] Kim Y W. *JOM*[J], 1989, 41(7): 24

- [2] Dimiduk D M *et al. Materials Science and Technology*[J], 1992, 8(3): 365
- [3] Kim Y W *et al. Gamma Titanium Aluminides*[C]. Warrendale: TMS, 1995: 405
- [4] Qin Gaowu(秦高梧) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1995, 24(2): 1
- [5] Appel F *et al. Intermetallics*[J], 2000, 8: 1283
- [6] Li Wen(李文) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(3): 129
- [7] Guther V *et al. Gamma Titanium Aluminides*[C]. Warrendale: TMS, 2003: 241
- [8] Semiatin S L. *Gamma Titanium Aluminides*[C]. Warrendale: TMS, 1995: 509
- [9] Huang Shumei(黄淑梅) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(S): 334
- [10] Gagnoud A *et al. Trans ISIJ*[J], 1988, 28(1): 36
- [11] Noda T. *Intermetallics*[J], 1998, 6: 709
- [12] Feng Di(冯 涤) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 1994, 6(4): 24
- [13] Chen Yuyong(陈玉勇) *et al. Acta Metall Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(11): 1141
- [14] Wu Xinhua. *Intermetallics*[J], 2006, 14: 1114
- [15] Jarvie D J *et al. Mater Sci Eng*[J], 2005, A413-414: 583
- [16] M Yasrebi *et al. Modern Casting*[J], 2000, 1: 34
- [17] Jia Qing(贾 清). *Doctoral Thesis*(博士论文)[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, 2004
- [18] Xiao Shulong(肖树龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 678
- [19] Su Yanqing(苏彦庆) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 1999, 19(4): 11
- [20] Kuang J P *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2002(329~331): 31
- [21] Kim M G *et al. Met Mater Inter*[J], 2002, 18(3): 289
- [22] Suzuki K *et al. Mat Trans JIM*[J], 1997, 38(1): 54
- [23] Chen Y Y *et al. J Mater Sci Technol*[J], 2001, 17(1): 71
- [24] Ding H S *et al. J Mater Sci Tech*[J], 2001, 17(1): 99
- [25] Wictorin L *et al. Cast Metals*[J], 1992, 4(4): 182
- [26] Jovanovic M T *et al. J Mater Proc Tech*[J], 2005, (167): 14
- [27] Kuang J P *et al. Int J Cast Metals Res*[J], 2001, 13: 277
- [28] Chen Yuyong(陈玉勇) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1999, 35(S): 569
- [29] Richerson D W *et al. US Patent 4040845*[P]. 1977: 8
- [30] Teodoroa O M N D *et al. Appl Surf Sci*[J], 2004, 231~232: 854
- [31] Larsen D E *et al. Mater Sci Eng*[J], 1991, A144: 45
- [32] Srivats V R A M *et al. Titanium '95: Science and Technology*

- [C]. London: The Institute of Materials, 1996: 88
- [33] Zalar A *et al.* *Thin Solid Films*[J], 1999, 352: 151
- [34] Joaquim Barbosa *et al.* *Intermetallics*[J], 2007, 15: 945
- [35] Nourbakhsh S *et al.* *Acta Metall Mater*[J], 1995, 43(8): 3035
- [36] Romine J C. *J Am Ceram Soc*[J], 1987, 8: 755
- [37] Kim M G *et al.* *Materials Transactions*[J], 2002, 43(4): 745
- [38] Frueh C *et al.* *Metal Mater Trans B*[J], 1997, 28B: 919
- [39] Mi J *et al.* *Intermetallics*[J], 2003(11): 377
- [40] Dlouhý A *et al.* *Mater Sci Forum*[J], 2007, 539~543: 1463
- [41] Malcolm W C. *Ti-2007 Sci and Tech, 11th World Conference on Titanium*[C]. New Osaka: Metallurgy Industry Press, 2007: 16
- [42] Dietmar H. *Ti-2007 Sci and Tech, 11th World Conference on Titanium*[C]. New Osaka: Metallurgy Industry and Press, 2007: 5
- [43] Bartolotta P A *et al.* *Gamma Titanium Aluminides*[C], Warrendale: TMS, 1999: 3
- [44] Loria E A. *Intermetallics*[J], 2001(9): 1997
- [45] Loria E A. *Intermetallics*[J], 2000(8): 1339
- [46] Bartolotta P *et al.* *JOM*[J], 1997, 5: 48
- [47] Moll J H. *Metal Powder Industries*[M]. Princeton, 1987
- [48] Donald E Larsen Jr. *Mater Sci Eng*[J], 1996, A213: 128
- [49] Appel F *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2000, 2(11): 699
- [50] Toshimitsu Tetsui. *Mater Sci Eng*[J], 2002, A329~331, 582
- [51] Su Yanqing(苏彦庆) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(4): 295
- [52] Liu Yong(刘咏) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2000, 10(1): 59
- [53] Zhang Ji(张继). *Postdoctoral Thesis*(博士后论文)[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 1998

Development and Research Status of Investment Casting TiAl-Based Alloys

Chen Yuyong, Chen Yanfei, Tian Jing, Kong Fantao, Xiao Shulong, Xu Lijuan

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: TiAl-based alloys are emerging as potential light-weight, high-temperature structural materials and possess wide capacities of engineering applications in aeronautics, space and automobile industries because of their low density, high specific strength and specific modulus, good oxidation-resistance and creep-resistance, and excellent fatigue properties. The paper will focus on the melting and investment casting technology of TiAl-based alloys. Some applications of TiAl components are summarized and some shortcomings and challenges for the investment casting of TiAl-based alloys are also proposed.

Key words: TiAl-based alloys; investment casting; melting technology; application research

Biography: Chen Yuyong, Doctoral Supervisor, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418802, E-mail: yfchn@hotmail.com