

TiAl 合金精密成形技术发展现状及展望

谢华生, 刘时兵, 赵军, 张志勇, 包春玲

(沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 沈阳 110022)

摘要: TiAl 合金是一种优异的轻质耐高温结构材料, 在航空、航天、汽车、兵器等热端部件制造领域具有广泛的应用和发展前景, 但其较低的室温塑性、韧性和较差的冷/热加工性能, 限制了其工程化的进程。为挖掘 TiAl 合金的应用潜力, 国内外研究机构和企业从材料设计、组织性能调控到成形工艺等方面开展了卓有成效的研究。总结了近年来国内外在 TiAl 合金精密成形领域的研究进展, 包括精密铸造、铸锭冶金、粉末冶金和增材制造技术, 目前, TiAl 合金精密铸造叶片和热加工叶片已成功应用到航空发动机上, 粉末冶金成形和增材制造技术在复杂构件成形和板材成形上体现出独特优势, 但仍需在低成本化和工艺稳定性上进一步提升。

关键词: TiAl 合金; 精密成形; 精密铸造; 铸锭冶金; 粉末冶金; 增材制造

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.01.006

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2022)01-0044-11

Development Status and Prospect of Precision Forming Technology for TiAl Alloy

XIE Hua-sheng, LIU Shi-bing, ZHAO Jun, ZHANG Zhi-yong, BAO Chun-ling

(State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-end Equipment, Shenyang
Research Institute of Foundry, Co., Ltd., Shenyang 110022, China)

ABSTRACT: As an excellent lightweight and high temperature resistant structural material, TiAl alloy has wide application and development prospect in hot end components for aviation, aerospace, automobile, weapons, etc. However, due to its poor cold and hot workability, low room temperature plasticity and fracture toughness, there are still great obstacles in further engineering. To tap the application potential of TiAl alloy, research institutions and enterprises all over the world have carried out fruitful research from material design, microstructure and property regulation to forming process. The work summarized the research progress in precision forming of TiAl alloy in recent years, including investment casting, ingot metallurgy, powder metallurgy and additive manufacturing technology. At present, TiAl alloy investment casting blades and hot working blades have been successfully applied to aeroengines. Powder metallurgy forming and additive manufacturing technology show unique advantages in complex component forming and sheet metal forming. However, they still need to be further improved in terms of low cost and process stability.

KEY WORDS: TiAl alloy; precision forming; investment casting; ingot metallurgy; powder metallurgy; additive manufacturing

TiAl 合金是一种新型的耐高温结构材料, 具有低密度 ($3.8\sim 4.2\text{ g/cm}^3$)、高比强、高比刚、优异的高温抗蠕变和抗氧化等性能, 在 $600\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下应用

极具竞争力。TiAl 合金弥补了常规高温钛合金和镍基高温合金在这一温度区间抗氧化性差和密度高的不足, 因此受到了国际上航空航天巨头企业和相关研究

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2008300)

作者简介: 谢华生 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进钛合金精密成形技术。

机构的青睐,美国、欧洲、中国和日本分别开发了其各自的 TiAl 合金体系^[1-3]。TiAl 合金的发展主要历经了 4 代: 20 世纪 70 年代第 1 代 TiAl 合金以高 Al 含量和低合金元素含量为特征,其典型代表为 Ti-48Al-1V-0.3C, 然而其工作温度仅限于 650 °C 以下,因综合性能不能满足发动机高温部件使用要求而被迫放弃; 为了进一步提高 TiAl 合金的工作温度, 80 年代 TiAl 合金的发展向着低 Al 含量发展, Al 的原子数分数为 45%~48%, 第 3 组元元素含量有所增加,其典型合金是美国空军材料研究所和 GE 公司共同开发的 Ti-48Al-2Cr-2Nb (4822) 和 Ti-45Al-2Mn-2Nb-0.8%TiB₂ (45XD) (体积分数) 合金,其综合性能明显优于第 1 代; 为了进一步提高使用温度, 第 3 代 TiAl 合金以高含量第 3 组元含量为特点 (5%~10%, 原子数分数), 合金元素包括 Nb, Ta, W, V, B, C, Cr, Mn, Mo 等, 其中高 Nb-TiAl 合金, TNB 和 TNM 合金是典型代表。高 Nb-TiAl 合金是北京科技大学陈国良院士等人最早提出来的, 高 Nb 含量可以显著提高合金的抗氧化性能, 高含量第 3 组元的固溶强化可以显著提高合金的高温力学性能和抗蠕变性能^[4]。南京理工大学陈光课题组根据 β 向 α 转变过程中界面能各向异性, 通过控制凝固过程, 获得了同时具备高强度、高塑性特性的 Ti-45Al-8Nb 合金 PST (Polysynthetically Twinned Crystal) 晶体, 克服了传统籽晶法制备单晶的弊端, 展现了第 3 代 TiAl 合金单晶的巨大应用前景^[5]。随着增材制造技术的快速发展, 德国最近针对电子束增材制造开发了第 4 代 TiAl 合金 Ti-47.5Al-5.5Nb-0.5W 合金^[6], 分别借鉴了第 2 代和第 3 代高 Al 高第 3 组元元素的设计思路。在 TiAl 合金的应用产业化方面, GE, Howmet, Pratt-Whitney, MTU, Rolls-Royce 和 IHI 等公司起到了较大的推动作用, 主要应用领域和目标为航空发动机高压压气机叶片、低压涡轮叶片、涡轮盘, 汽车发动机增压器涡轮、排气阀等。在此基础上, TiAl 合金应用正不断在新的领域发展, 美国 NASA 曾报告, 到 2020 年, TiAl 合金及其复合材料在航空航天发动机中的使用份额将达到 20%~25%。作为一种结构材料, 实现其零部件的制造并应用至关重要, 国内外在该方面也做了大量工作。文中针对近年来国内外 TiAl 合金精密成形技术的发展现状和待解决的问题进行了系统总结和分析, 为后续相关研究提供指导。

1 TiAl 合金精密铸造技术

铸造是实现 TiAl 合金构件制造最为直接高效的方式。TiAl 合金的精密铸造技术目前主要有熔模铸造、金属型铸造等几种, 其中金属型铸造适合于结构相对简单、尺寸精度要求低的构件, 而熔模铸造更适合于生产薄壁且具有复杂结构的零件, 如航天、航空、

汽车发动机上的耐热构件 (见图 1), 精密铸造技术因其较低的制造成本和机械加工成本在 TiAl 合金精密成形工艺上具有较大优势^[7]。在熔模精密铸造方面, 早在 20 世纪 90 年代^[8], 在美国 NASA 主导的民用超音速飞机上, 发动机排气喷嘴的翼板和支撑梁实现了 TiAl 合金部件的应用, 这些大型薄壁 TiAl 合金构件最薄处不到 3 mm, 很难通过锻造和机加工生产出来。1993 年, 美国 Howmet 公司首次采用 Ti-4822 合金铸造出低压涡轮叶片, 并在 CF6-80C 发动机试车。2006 年, PCC 公司通过熔模精密铸造将 Ti-48Al-2Cr-2Nb 应用到 GE 公司最新一代发动机 GEnxTM, GEnxTM-1B, GEnxTM-2B 低压涡轮的最后 2 级叶片上, 陆续装配波音 787 和 747-8s 客机上, 首次实现了 TiAl 合金在航空发动机中的规模化应用, 使发动机质量减轻约 180 000 g, 实现了节油 20%、降噪 50%、减少 NO_x 排放量 80% 的显著效果^[9]。英国罗-罗公司也致力于将精密铸造 TiAl 合金叶片应用到发动机低压涡轮最后一级。在汽车发动机部件中, 日本三菱公司和大同特殊钢公司采用真空熔炼反重力低压铸造技术 (CLV) 生产了 Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si 合金增压器涡轮, 替代镍基 Inconel713C 增压器涡轮应用在三菱蓝瑟跑车上, 叶片尖端仅为 0.35 mm, 显著降低了涡轮响应时间。美国 Howmet 公司研制的增压器涡轮及进气阀、排气阀, 在一定范围内实现了商业化, 由 ABB 公司用在 2 个柴油发动机上运行了 4000 h, 取得了成功。国内中科院金属所采用离心熔模铸造制造的 Ti-45Al-2Mn-2Nb-1B 合金低压涡轮叶片已经在罗-罗公司的新型发动机 Trent XWB 上完成模拟飞行循环考核试验。北京航空材料研究院、沈阳铸造研究所有限公司、西北工业大学、哈尔滨工业大学、北京钢铁研究总院等单位也开展了 TiAl 合金精密铸造技术研究, 研制了 TiAl 合金扩压器、叶片和增压器涡轮等铸件^[10-13]。沈阳铸造研究所有限公司采用熔模精密铸造技术成功研制出最大尺寸为 800 mm 的薄壁 TiAl 合金弹翼骨架, 大力推动了 TiAl 合金铸件在航天领域的应用。

TiAl 合金在熔融状态下活性高、流动性差、凝固收缩率大、凝固过程易开裂的特点对复杂薄壁构件的尺寸精度控制、表面质量、内部缺陷控制提出了较大挑战, 有研究表明在基础尺寸为 10~80 mm 时, Ti4822 合金的自由线收缩率为 3.11%~2.09%, 是常规 ZTC4 合金的 2 倍左右, 收缩率大导致 TiAl 合金铸件尺寸难以控制、残余应力大^[14]。熔模精密铸造的关键在于型壳质量和性能, 如何在保持较高表面质量的同时提高陶瓷型壳的退让性是 TiAl 合金铸造区别传统钛合金的关键。在型壳制备方面, 国内外学者对适用于 TiAl 合金的面层耐火材料、粘结剂和制备方法进行了有意义的探索。TiAl 合金主要使用惰性氧化物作为型

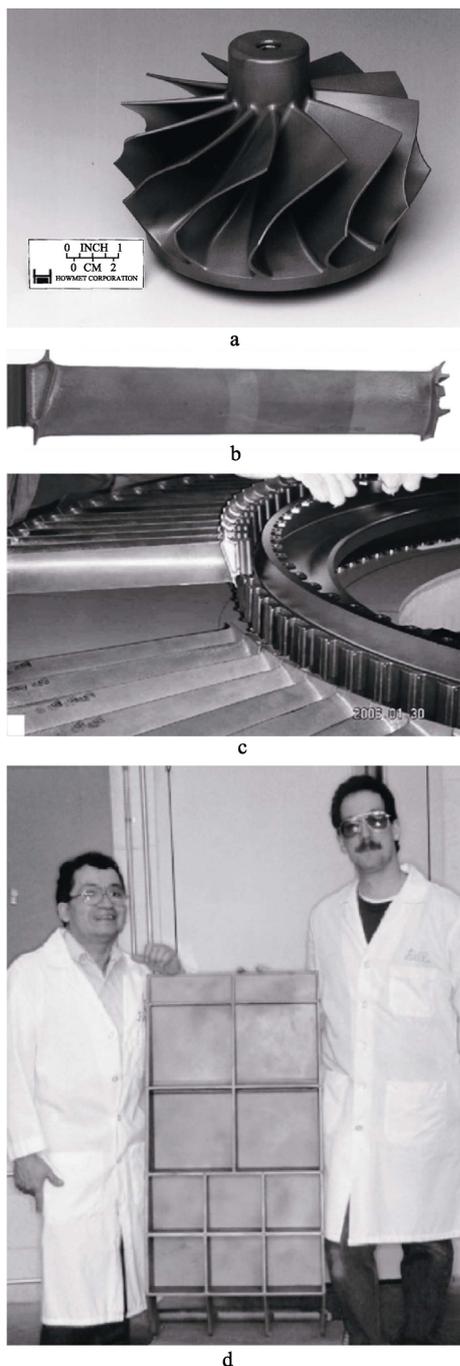


图1 TiAl合金熔模铸造典型精密铸件^[8]

Fig.1 Typical investment casting components of TiAl alloy

壳面层材料,主要包括 Y_2O_3 , ZrO_2 , CaO 和 Al_2O_3 等。林秀德等^[15]对比研究了高Nb-TiAl合金与 Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 陶瓷材料的界面反应,得出界面反应厚度分别为40, 170, 20 μm (见图2),从界面反应角度看, Y_2O_3 仍是TiAl合金最佳的面层耐火材料。 Y_2O_3 型壳面层工艺是生产航空航天铸造钛合金的成熟工艺,具有高化学惰性、低热导率和高强度,浇注TiAl合金铸件可获得较高的表面质量^[16]。英国伯明翰大学系统研究了经 CaO 稳定的 ZrO_2 面层工艺^[17],并研究了不同型壳预热温度下的界面反应,研究表明该面层

工艺相比于传统锆石/氧化硅面层具有相当的力学性能和更好的退让性能,相比于氧化钇面层,该面层工艺的抗摩擦磨损性得到了改善。此外测得在500, 1000, 1200 $^{\circ}C$ 的型壳预热温度下,该型壳面层与TiAl合金的界面反应层厚度分别为18.0, 36.4, 57.4 μm 。中科院金属所采用增强界面反应方法研究了 ZrO_2 面层与TiAl熔体的界面反应机理^[18],并指出高温下 ZrO_2 分解成Zr和O,Zr与Al反应生成的 Al_2Zr 相分布枝晶间,O向内扩散形成TiO和 Al_2O_3 的界面产物。在低成本制造的推动下, CaO 和 Al_2O_3 也被考虑作为TiAl合金的面层材料,并被浇注出增压器涡轮等铸件, Al_2O_3 与TiAl合金的热膨胀系数非常相近,可降低TiAl合金发生开裂的几率,因此人们看好 Al_2O_3 作为TiAl合金面层的应用前景。

TiAl合金面层粘结剂通常延续钛合金面层粘结剂体系,采用二醋酸锆、钇溶胶和锆溶胶,并在此基础上进行技术改进,但受商业和技术保密影响,相关报道较少,开发新型面层粘结剂,提高面层惰性,降低成本是未来TiAl合金面层粘结剂的发展方向。TiAl合金型壳退让性的提高主要通过调整粘结剂和耐火材料种类,调整涂挂层数以及在型壳背层涂料加入高聚物。在型壳背层涂料中添加高聚物,在高温焙烧的过程中,添加物被烧蚀而形成多孔型壳,多孔型壳一方面提高了型壳退让性和透气性,另一方面可以有效减缓传热,保温性好,可以减少铸件产生欠浇和热裂缺陷,值得注意的是,高聚物的添加量需依据铸件尺寸和型壳强度进行设计^[19-20]。左家斌等^[21]研究了粘结剂种类对型壳退让性的影响,型壳面层粘结剂均为二醋酸锆,背层粘结剂分别采用硅溶胶和硅酸乙酯,其他材料和工艺都相同的条件下,硅溶胶型壳的平均抗弯强度为6.87 MPa,硅酸乙酯型壳的平均抗弯强度为3.42 MPa,高温挠度测试表明硅酸乙酯型壳的退让性优于硅溶胶型壳。

2 TiAl合金铸锭冶金成形技术

铸态TiAl合金的组织通常由较粗大的近片层组织组成,室温塑性较差,通过铸锭冶金的方式进一步破碎TiAl合金的组织,可在一定程度上调控合金的力学性能,提升合金的室温塑性^[22]。TiAl合金较常用的铸锭冶金工艺包括等温锻造、包套锻造、热挤压、热轧制等热加工工艺,在热加工之前需要对铸锭进行热等静压和均匀化退火处理,以消除显微铸造缺陷和偏析。TiAl合金开坯手段包括包套锻造、等温锻造和包套挤压,德国GKSS研究中心采用 $\alpha+\gamma$ 两相区的一次等温锻造制备出了最大直径为600 mm的锻坯。国内哈尔滨工业大学、西北工业大学等单位通过包套锻造制备出最大直径为400~500 mm、厚度为40~50 mm的TiAl合金锻坯,主要利用了合金中高温下具有较

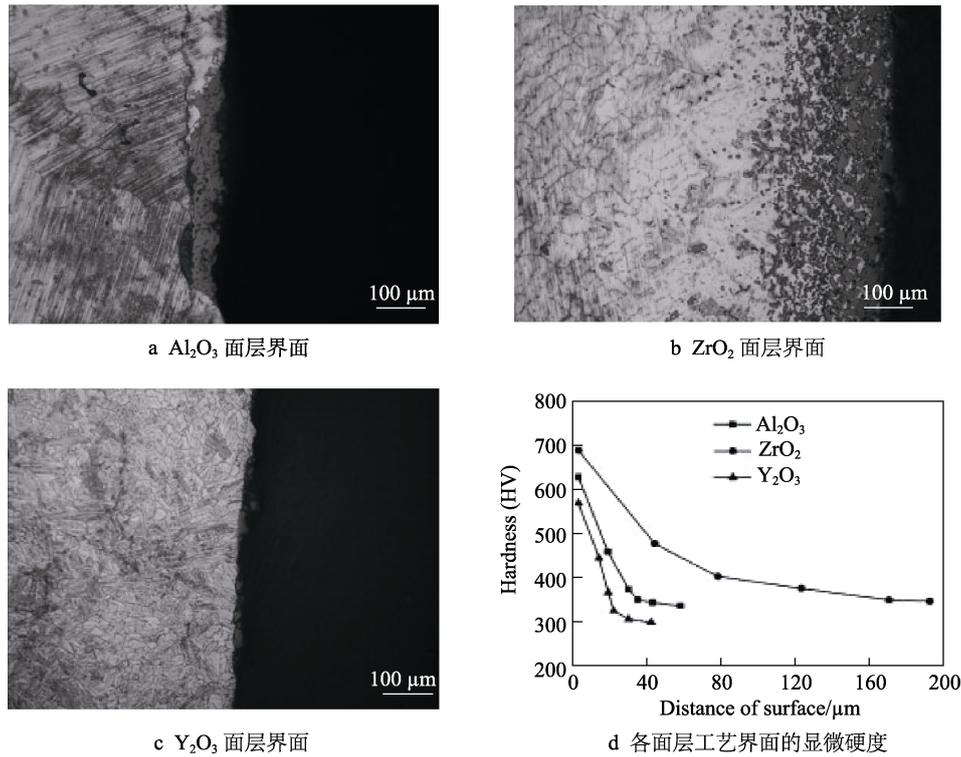


图 2 TiAl 合金与耐火材料的界面反应^[14]

Fig.2 Interface reaction between TiAl alloy and refractory materials

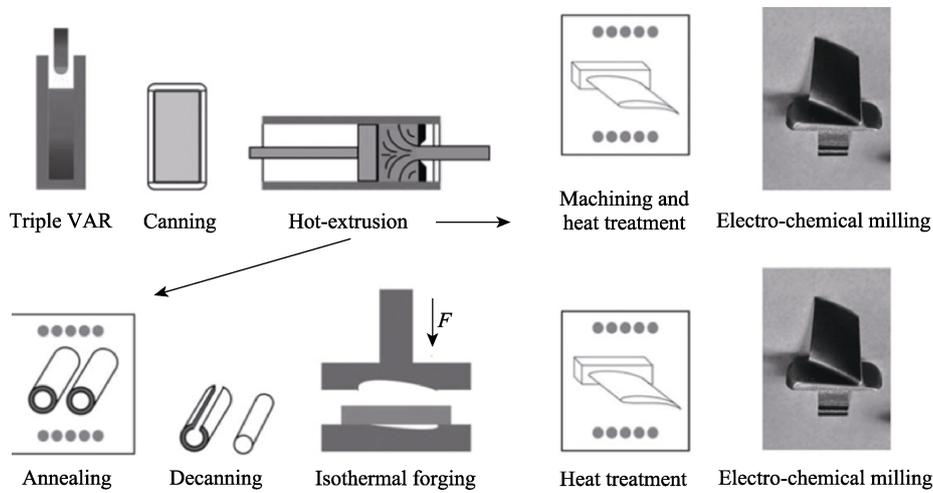


图 3 航空发动机高压压气机 TiAl 合金叶片成形工艺示意^[8]

Fig.3 Forming process diagram of TiAl alloy blade of aeroengine high pressure compressor

好变形能力的 BCC 结构的 β 相。包套锻造相比等温锻造具有更细小的组织，但组织均匀程度差。包套挤压相比于包套锻造和等温锻造工艺可控性更好，德国 GKSS 研究中心将包套挤压 TNB 合金进行直接机加工或等温锻造相结合制造高压压气机 TiAl 合金叶片（见图 3），成为了高压压气机 TiAl 叶片的主要制备方法^[8]。

2016 年，德国 MTU 公司宣布将锻造 TNM 低压涡轮叶片应用在 A320 客机的 PW1100G-JM 发动机上，并已完成首飞。锻造 TiAl 合金叶片的应用展示了变形 TiAl 合金的巨大应用前景，截至 2015 年，已经为 PW1100G 发动机装配了 10 000 个锻造 TNM 合

金叶片。作为 β 凝固 TiAl 合金，TNM 合金表现出良好的热加工性能，通过铸坯在 β 单相区两次锻造成形和后续热处理获得了理想的组织和综合力学性能^[23]。锻后热处理主要分为 2 步，首先在 α 转变温度以下进行再结晶退火，然后在共析温度以下进行稳定化退火，通过调整第 1 步再结晶退火温度可以获得 2 种组织，一种是细小片层团、等轴 γ 晶和 $\beta/B2$ 晶粒体积比相近的 triplex 组织，另一种是近片层组织，其中含有少量等轴 γ 相、 $\beta/B2$ 相，2 种组织都具有较高的强度，但近片层组织具有更好的高温抗蠕变性能，而 triplex 组织表现出更好的韧塑性（见图 4）。

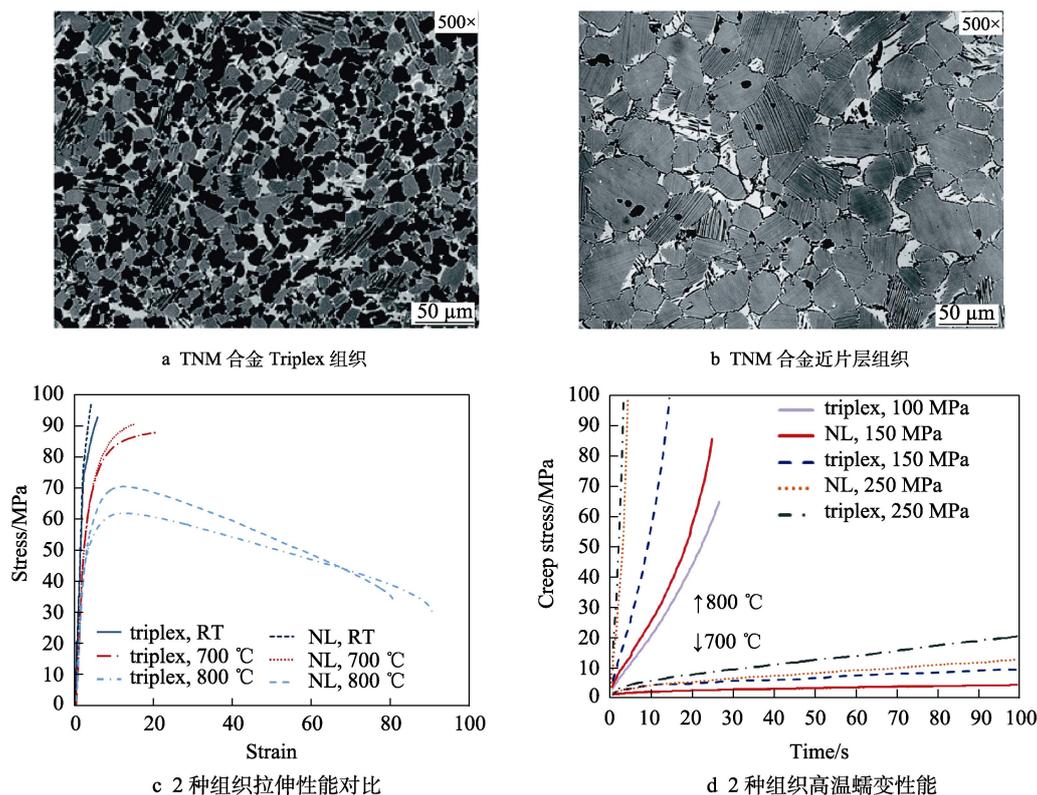
图4 TNM 合金的 2 种组织及力学性能^[23]

Fig.4 Two microstructures and mechanical properties of TNM alloy

TiAl 合金具有良好的超塑成形性, 因此为 TiAl 合金成形提供了另一种可能, 目前, 利用 TiAl 合金的超塑性, 已经成功轧制出 TiAl 基合金板材并制造出复杂的薄板构件^[24]。TiAl 合金板材在航空航天领域有着广阔的应用市场, 美国已将 TiAl 板材列为主要航空计划的备选材料, 另外, TiAl 合金板材还是理想的弹体蒙皮材料。Plansee AG 技术中心开发了先进的轧制技术^[25], 它采用 $\alpha+\gamma$ 两相区以较低的轧制速度成功轧制出大尺寸 Ti-48Al-2Cr 及 Ti-47Al-2Cr-0.2Si 合金板材, 至今已轧制出的 TiAl 合金板材的最大尺寸为 2000 mm × 500 mm × 1 mm, 代表了 TiAl 合金板材制备的最高水平。俄罗斯金属超塑性研究所采用包套锻造和共析温度以下等温轧制技术制备出尺寸为 200 mm × 120 mm × 1.7 mm 的 Ti-45.2Al-3.5(Cr, Nb, B)合金板材^[26]。另一种轧制采用铸坯直接轧制的方法, 极大简化了板材轧制工艺, 省去了铸锭热等静压、均匀化热处理以及热锻工序。NASA 格伦研究中心发展了这一轧制工艺, 并在一些 TiAl 合金中有着成功案例, 相比于传统 P/M 和 I/M, 铸坯直接轧制可降低约 35% 的成本。国内也开展了相关研究并取得突破, 采取铸锭直接包套热轧的方法成功制备了高 Nb-TiAl 合金板材, 板材尺寸为 360 mm × 100 mm × 3.5 mm, 轧制板材在 950 °C 以上和高应变速率下表现出良好的超塑性^[27]。

3 TiAl 合金粉末冶金成形技术

粉末冶金成形在消除 TiAl 合金成分偏析、疏松、缩孔等方面具有较大优势, TiAl 预合金粉末的制备方法主要包括雾化法和机械合金化法。采用惰性气体雾化、等离子旋转电极雾化法和感应熔炼气雾化制得的预合金粉末具有成分均匀性好, 间隙杂质含量低、力学性能好的优点, 但成本较高, 制备难度较大。机械合金化是制备 TiAl 合金预合金粉末的一种工艺, 因混合元素粉末反复经历冷焊、破碎、再冷焊、再破碎, 可以获得非晶态或纳米晶粉末, 该工艺的关键是控制球磨过程中杂质 O 和 N 的含量。元素粉末法使用 Ti 粉、Al 粉和其他元素粉末, 成本较低, 成形性好, 但是杂质含量高, 烧结性能差^[28]。粉末冶金 TiAl 合金的微观组织主要有近 γ 组织、双态组织和全片层组织等, 当微观组织为细小晶粒的双态组织或全片层组织时, 粉末冶金 TiAl 合金才会表现出较好的综合力学性能。根据合金 T_a 温度, 可指定不同的热处理制度获得上述组织, 一般来说, 双态组织的抗拉强度和伸长率都优于全片层组织材料, 原因在于双态组织相对全片层组织更细小。滑移带长度缩短, 滑移面位错运动长度和位错堆积减少, 降低了滑移面交接处和晶界的应力集中。

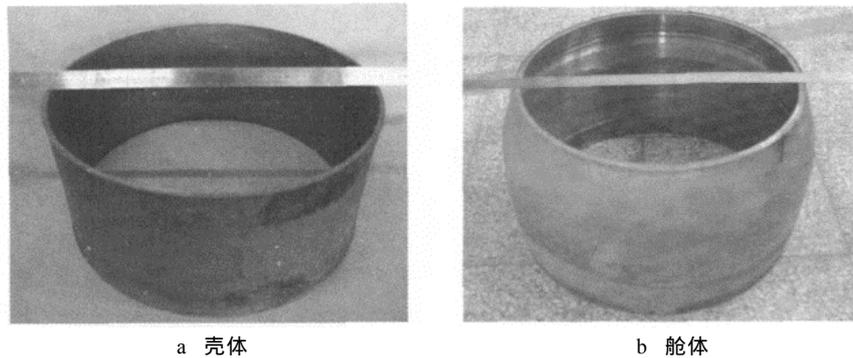
图 5 热等静压粉末冶金成形 TiAl 合金壳体和舱体^[29]

Fig.5 Shell and cabin of HIP-PM forming TiAl alloy

预合金粉末的成形方法有热等静压近净成形、热加工成形（锻造、挤压、轧制）、金属注射成形、喷射成形和放电等离子烧结。航空材料及工艺研究所采用热等静压粉末近净成形技术研制了 TiAl 合金壳体、舱体和骨架构件典型结构件（见图 5），其中壳体最大轮廓尺寸为 $\phi 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ，构件内外壳形成中空结构，壁厚仅为 3 mm，部分构件已经进行了热试车，具备了在航空航天等型号中的应用条件^[29]。很多学者对热等静压工艺参数和 TiAl 合金组织致密化行为进行了研究，He 等^[30]研究了高 Nb-TiAl 合金 PREP 粉末的致密化和组织特征，发现粉末压坯的显微组织

和性能受粉末粒径影响，显微组织显示出部分初始颗粒边界；Hamble 等^[31]研究表明 Ti-46Al-2Cr-2Nb 合金的拉伸性能主要受微观组织影响，而热等静压温度对合金最终拉伸性能的影响很小；Yang 等^[32]研究表明，粉末粒径和 HIP 后时效对 Ti4522XD 合金的拉伸性能影响较小；Li 等^[33]研究了粉末冶金热等静压 Ti-45Al-7Nb-0.3W 合金的组织 and 高温力学性能，发现其显微组织为典型的近 γ 组织形貌（见图 6），从室温到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ，应力峰值出现在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ，抗拉强度和屈服强度分别为 575 MPa 和 534 MPa，塑性在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上快速增加。

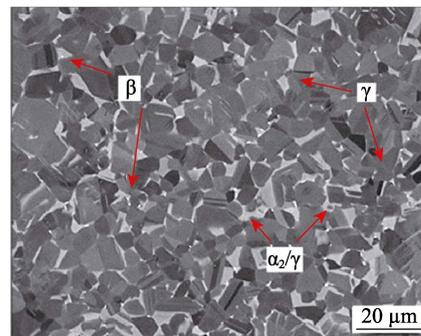
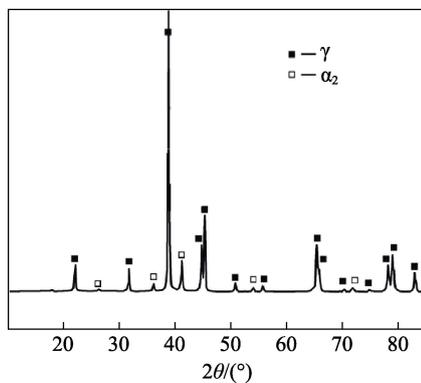
图 6 粉末热等静压 TiAl 合金的 XRD 衍射图谱和显微组织^[33]

Fig.6 XRD pattern and microstructure of HIP-PM TiAl alloy

元素粉末的成形方法包括热压烧结、热加工成形和放电等离子烧结，元素粉末热压烧结工艺采用单向或三向压力作用于模具内的粉末，在高温下粉末产生塑性变形或蠕变以达到致密化，该工艺存在压坯密度不均匀和难以脱模的问题。中南大学采用元素粉末经冷等静压和径向热压相结合工艺，按 Ti-47Al-2Cr-2Nb 成分配比制备了 483Q 柴油机排气阀，其中排气阀的端部采用元素粉末冶金制造，杆部采用铸造 TiAl 合金制造，再通过真空扩散连接形成完整排气阀，在发动机台架试验展现出良好的服役性能，经台架试验后，粉末冶金 TiAl 基合金排气阀外

形完好，无明显损伤和氧化皮剥落现象^[34]。热压烧结和热加工成形面临的共同问题是难以获得均匀的组织，从而导致构件不同部位的力学性能发生变化。放电等离子烧结的特点在于较快的加热速率和较短的烧结时间，在粉末致密化的过程中有效避免了晶粒长大，由于有限扩散机制，放电等离子烧结工艺可获得均匀的组织，避免了力学性能离散。Voisin 等^[35]通过放电等离子烧结工艺成功制备了 Ti-4822 合金涡轮叶片（见图 7），与精密铸造 Ti-4822 合金相比，该工艺获得的室温力学性能和 $700 \text{ }^\circ\text{C}/300 \text{ MPa}$ 抗蠕变性能更加优异。

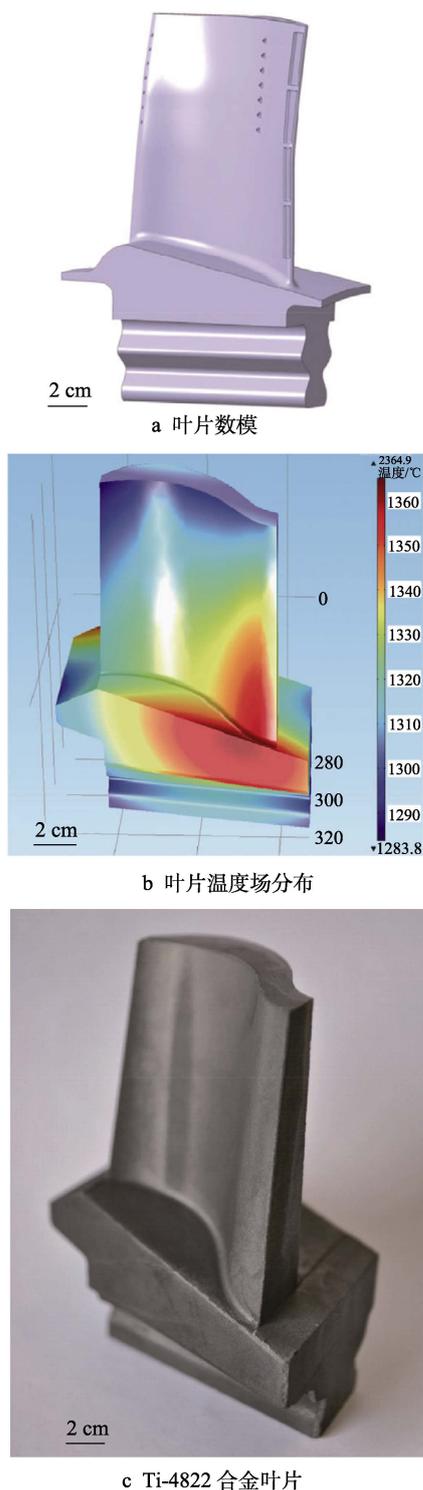


图7 SPS制备Ti-4822合金叶片^[35]
Fig.7 Ti-4822 alloy blade fabricated by SPS

因粉末冶金轧制板材可以获得组织更为均匀细小、性能良好的TiAl合金板材,在航空航天领域有着广阔的应用前景,成为了近年来的研究热点。通过粉末冶金轧制工艺解决了铸锭冶金工艺难以消除成分偏析和获得大尺寸TiAl板材的难题。Plansee公司和GKSS研究中心利用ASRP工艺成功制备了1000 mm×450 mm×1 mm和750 mm×350 mm×

0.25 mm的箔材^[36]。中科院金属所采用粉末包套热等静压和包套热轧工艺制备了Ti-47Al合金板材,尺寸为220 mm×370 mm×2 mm。热轧后组织细小均匀、室温拉伸性能 R_m 为668 MPa, $R_{p0.2}$ 为6.8 MPa, A 为2.56%,通过Gleeble热轧模拟表明TiAl合金锻造态及HIP态热轧工艺窗口很窄,必须严格控制轧制工艺参数,才能有效避免轧制过程中裂纹产生^[37]。

4 增材制造

增材制造技术基于离散-堆积原理,由零件三维数据驱动,采用逐层堆积材料的方法,可实现实体零件的快速成形,具有设计自由度大、材料利用率高、产品研发周期短的优点,因此为TiAl合金成形提供了一种可能,与传统工艺相比,增材制造过程降低了缩孔、缩松的形成倾向,有利于形成细小的晶粒组织,提高构件的力学性能^[38-40]。目前应用TiAl合金的增材制造技术主要包括选区激光熔化(SLM)、激光金属沉积(LMD)、电子束选区熔化(EBM)和电弧增材制造。

激光增材制造以高能量密度的激光束为热源,将金属粉末逐层熔化堆积,直接形成金属构件(见图8),在激光束反复加热、冷却过程中,TiAl合金易产生较大热应力,随着增材制造TiAl合金沉积厚度的增加,残余应力随之增加。SLM技术的最大优点在于成形件具有较高的表面精度,适合涡轮叶片等复杂形状构件的近净成形。TiAl合金固有的脆性特征,使SLM成形的TiAl合金极易产生裂纹。一般认为,SLM成形TiAl合金开裂的主要原因是快速冷却造成的高残余应力超过了合金的基体强度,因此降低冷却速率是抑制裂纹产生的主要方法。研究表明通过增加激光能量输入、提高基板预热温度、降低扫描速度有利于减小材料的热应力^[41-44],另有研究发现调整激光离焦量,使更多激光能量作用于粉末而不是沉积件上,可降低TiAl合金件的裂纹倾向^[45-49]。激光金属沉积技术(LMD)通常配备更高的额定功率和更大的光斑直径,熔池尺寸较SLM更大,因采用同轴送粉方式,扫描速度低于SLM,表面质量和尺寸精度差,需要后续的二次加工,LMD的优点是可以在现有零部件上直接打印,使金属零部件的修复成为可能,另外借助LMD技术可实现梯度材料零件的成形。在合金成分控制上,因TiAl合金中Al元素蒸气压较高,在激光束的扫描下,易产生挥发损失,从而使微观组织发生改变,其挥发损失主要与激光能量密度有关,随着能量密度的增加,Al元素挥发损失量明显增多。

电子束选区熔化(EBM)以电子束作为能源,相比于激光增材有其独特的优缺点,其优点在于电子束可以对粉末进行有效预热,从而降低TiAl合金构件

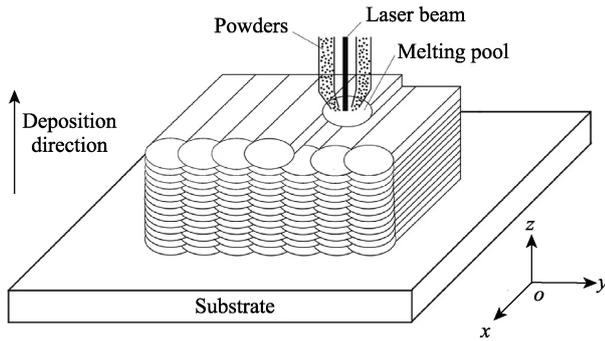


图 8 激光增材制造工艺 (LMD) 示意^[48]
Fig.8 Sketch map of LMD process

的开裂倾向,但电子束增材制造没有 Ar 气保护,需在真空环境下进行,因此易挥发元素的含量不易控制。Yue 等研究表明,随着电子束流的增加,Al 元素的含量不断减少,使 TiAl 合金最终凝固组织的 B2 相和 α_2 相数量随之增多, γ 相数量逐渐减少,另外还发现电子束增材制造由于冷却速度快和残余应力较大,会导致 γ 晶内产生大量的变形孪晶和位错。在 TiAl 合金的逐层沉积过程中,每一层的沉积都相当于对上一层进行了退火,因此减少了沉积层的位错密度^[50]。意大利 Avio 公司与瑞典 Arcam 公司合作,采用电子束熔融技术制造出了 GENx 飞机发动机 TiAl 涡轮叶片并进行了测试^[51](见图 9),超高的预热温度、较高的成形效率和良好的成形质量使 EBM 被认为是目前最适合 TiAl 合金复杂件成形的增材制造技术,EBM 甚至可以在成形过程中利用红外成像对温度分布和缺陷等进行实时监控,进而实现对缺陷的实时修复。

电弧增材制造与其他成形技术相比,具有成形速度快、成本低、材料利用率高且不易污染等优点。目前,电弧增材制造 TiAl 合金的研究开展并不多,澳大利亚卧龙岗大学和国内哈尔滨工业大学开展了该技术的基础研究^[52],包括基板选材、送丝方式、焊接电流和沉积速度等工艺参数的研究,以及微观组织、晶粒取向和力学性能的研究。在增材制造 TiAl 合金时,通过 2 个独立送丝机构将钛丝和铝丝添加到



图 9 电子束增材制造 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金 LPT 叶片^[51]
Fig.9 Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy LPT blade produced by EBM

熔池内,沉积层的成分和显微组织存在差异,沿着沉积方向 α_2 和 γ 相的体积分数也发生了变化,因此电弧增材制造的成分、组织的均匀性控制仍需要进一步解决。此外,如何在电弧增材制造中添加其他合金元素也是有待解决的重要问题。

增材制造 TiAl 合金在室温下微观组织以 γ 相为主,重复熔化会导致沿成形方向上的组织分层,相比于传统铸造工艺,增材制造具有快速冷却的特点,细晶效应产生更好的拉伸性能和硬度值,分层组织间较差的结合界面使成形方向上的断裂强度通常较低。TiAl 合金增材制造成形通常需要进行热等静压和两步热处理以消除孔隙缺陷^[53],进一步调整组织形态。

5 总结与展望

TiAl 基合金作为一种轻质耐高温结构材料,满足了航空、航天、汽车等领域的减重、降油耗、减排放的迫切需要,应用前景十分广阔。在几代科技工作者的努力下,TiAl 基合金的成分设计理念日益成熟,大量组织性能关系研究工作让人们看到了 TiAl 基合金的未来潜力。近 10 年来,国内外材料科技工作者已着重从应用层面反向梳理 TiAl 合金发展存在的障碍,并以此为切入点开展了针对性的研究工作。TiAl 合金的精密成形技术是 TiAl 合金走向应用的重要环节,也是该材料发展的最大难点,虽然国内外在 TiAl 合金精密成形上取得了重要的突破,但是仍然需要在低成本制造和加强各个成形工艺的成熟度上加大投入。

TiAl 合金的精密铸造技术是相对成熟的近净成形工艺,低成本制壳技术、复杂结构件的铸造缺陷、尺寸精度控制和通过后序处理提升服役性能是 TiAl 精密铸造成形的发展方向;粉末冶金制备 TiAl 合金在获得均匀细小的组织、合金成分控制方面具有很大优势,已成为 TiAl 合金精密成形技术的一个重要研究领域,其难点在于消除孔隙及间隙元素含量控制,因此研制高质量 TiAl 合金粉末,减少微观缺陷产生和污染是未来的工作重点。TiAl 合金板材在未来航空航天工业中有着巨大需求,粉末冶金和铸锭冶金作为板材成形的 2 个主要途径,还需要继续完善 TiAl 合金的挤压、锻造、轧制的热变形技术。无论是激光增材制造还是电子束增材制造,目前的研究都集中在工艺-组织-性能关系和以提高构件致密性、消除裂纹缺陷的工艺优化上,低成本 TiAl 合金粉末制备和适合于增材制造的 TiAl 合金开发是未来的发展方向,另外作为 TiAl 合金成形效果最好的 EBM 技术,需要从工程化应用出发,进一步建立工艺和产品标准,对成形工艺稳定性,成形过程缺陷实时监控和修复、质量检验、性能测试进一步规范。

参考文献:

- [1] RAJI S A, POPOOLA A P I, PITYANA S L, et al. Characteristic Effects of Alloying Elements on β Solidifying Titanium Aluminides: A Review[J]. Heliyon, 2020, 6: 1-15.
- [2] KLEIN T, RASHKOVA B, HOLEC D, et al. Silicon Distribution and Silicide Precipitation during Annealing in an Advanced Multi-Phase γ -TiAl Based Alloy[J]. Acta Materialia, 2016(110): 236-245.
- [3] LIN J P, CHEN G L. Development of TiAl Intermetallic Based Compound[J]. Material China, 2009, 28(1): 31-37.
- [4] 陈国良, 张卫军, 孙祖庆, 等. 铌钛铝系金属间化合物耐热高温材料: 中国, CN1069775[P]. 1993-03-10. CHEN Guo-liang, ZHANG Wei-jun, SUN Zu-qing, et al. High Temperature Niobium-Titanium-Aluminum Intermetallic Compound: China, CN1069775[P]. 1993-03-10.
- [5] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, et al. Polysynthetic Twinned TiAl Single Crystals for High-Temperature Applications[J]. Nature Materials, 2016, 15: 876-882.
- [6] REITH M, FRANKE M, SCHOFFER M. Processing 4th Generation Titanium Aluminides via Electron Beam Based Additive Manufacturing-Characterization of Microstructure and Mechanical Properties[J]. Materialia, 2020, 14: 100902.
- [7] APPEL F, PAUL J D H, OEHRING M. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology[M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2011.
- [8] KOTHARI K, RADHAKRISHNAN R, WERELEY N M. Advances in Gamma Titanium Aluminides and Their Manufacturing Techniques[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 55: 1-16.
- [9] BEWLAY B P, WEIMER M, KELLY T, et al. The Science, Technology, and Implementation of TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines[J]. MRS Proceedings, 2014, 1516: 49-58.
- [10] 魏战雷, 黄东, 李建崇, 等. TiAl合金薄壁环形件精密成形工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 748-750. WEI Zhan-lei, HUANG Dong, LI Jian-chong, et al. Investment Casting Process of TiAl Alloy Thin-Walled Circular Component[J]. Special Casting & Nonferrous Alloy, 2018, 38(7): 748-750.
- [11] 苏彦庆, 郭景杰, 贾均, 等. TiAl基合金涡轮熔模型壳离心精密铸造[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(4): 295-298. SU Yan-qing, GUO Jing-jie, JIA Jun, et al. Centrifugal Investment Casting of a TiAl-Based Turbine Blade[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(4): 295-298.
- [12] ZHAO J, ZHANG Z Y, LIU S B, et al. Elimination of Misrun and Gas Hole Defects of Investment Casting TiAl Alloy Turbocharger Based on Numerical Simulation and Experimental Study[J]. China Foundry, 2020, 17(1): 29-34.
- [13] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 129-147. YANG Rui. Advances and Challenges of TiAl Base Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129-147.
- [14] 魏战雷, 任贵娟, 李建崇, 等. Ti-48Al-2Nb-2Cr合金铸造收缩特性研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(3): 18-22. WEI Zhan-lei, REN Gui-juan, LI Jian-chong, et al. Contraction Characteristics of Ti-48Al-2Nb-2Cr Casting Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(3): 18-22.
- [15] LIN X D, XUE X Y, ZHANG H, et al. Interface Reaction between Ceramic Moulds and High Nb-TiAl Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(8): 1568-1571.
- [16] AGUILAR J, SCHIEVENBUSCH A, KATTLITZ O. Investment Casting Technology for Production of TiAl Low Pressure Turbine Blades-Process Engineering and Parameter Analysis[J]. Intermetallics, 2011, 19: 757-761.
- [17] YUAN C, CHENG X, HOLT G S, et al. Investment Casting of Ti-46Al-8Nb-1B Alloy Using Moulds with CaO-Stabilized Zirconia Face-Coat at Various Mould Pre-Heat Temperatures[J]. Ceramics International, 2015, 41: 4129-4138.
- [18] JIA Q, CUI Y Y, YANG R. Intensified Interfacial Reactions between Gamma Titanium Aluminide and CaO Stabilized ZrO₂[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2004, 17(1): 23-28.
- [19] 周浩. 精密铸造 TiAl 基合金薄壁铸件用型壳退让性的研究[J]. 铸造, 2013, 62(8): 781-783. ZHOU Hao. Research on Deformability of Shell for Precision Casting Thin-Wall TiAl Alloy Castings[J]. Foundry, 2013, 62(8): 781-783.
- [20] BAO C L, ZHANG S Q, REN Y Y, et al. Research Progresses on Refractory Composition and Deformability of Mold Shells for TiAl Alloy Castings[J]. China Foundry, 2018, 15(1): 1-10.
- [21] 左家斌, 魏战雷, 冯新, 等. TiAl合金熔模铸造型壳退让性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1347-1349. ZUO Jia-bin, WEI Zhan-lei, FENG Xin, et al. Deformability of Mold Shell for Investment Casting TiAl Alloy[J]. Special Cast and Nonferrous Alloys, 2017, 37(12): 1347-1349.
- [22] 寇宏超, 程亮, 唐斌, 等. 高温 TiAl 合金热成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(12): 24-31. KOU Hong-chao, CHENG Liang, TANG Bin, et al. Progress on Hot-Forming Techniques of High Temperature TiAl Alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(12): 24-31.
- [23] HABEL U, HEUTLING F, HELM D, et al. Forged Intermetallic γ -TiAl Based Alloy Low Pressure Turbine

- Blade in the Geared Turbofan[C]// Proceedings of the 13th World Conference on Titanium, San Diego, 2015: 1223-1227.
- [24] DAS G, KESTLER H, CLEMENS H, et al. Sheet Gamma TiAl: Status and Opportunities[J]. JOM, 2004, 11: 42-45.
- [25] 陈振华. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 120-324.
CHEN Zhen-hua. Titanium and Titanium Alloy[J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 120-324.
- [26] IMAYEV V M, IMAYEV R M, KUZNETSOV A V, et al. Superplastic Properties of Ti-45.2Al-3.5(Nb,Cr,B) Sheet Material Rolled below the Eutectoid Temperature[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 348(1): 15-21.
- [27] SHEN Z Z, LIN J P, LIANG Y F, et al. A Novel Hot Pack Rolling of High Nb-TiAl Sheet from Cast Ingot[J]. Intermetallics, 2015, 67: 19-25.
- [28] 刘咏, 黄伯云, 周科朝, 等. 粉末冶金 γ -TiAl 基合金研究的最新进展[J]. 航空材料学报, 2001, 21(4): 50-55.
LIU Yong, HUANG Bo-yun, ZHOU Ke-chao, et al. Recent Progress in PM γ -TiAl Base Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(4): 50-55.
- [29] 郎泽保, 于峰, 毕建勋, 等. 粉末冶金 γ -TiAl 系合金的性能及成形工艺[J]. 宇航材料工艺, 2011(2): 83-85.
LANG Ze-bao, YU Feng, BI Jian-xun, et al. Properties and Forming Technologies of P/M γ -TiAl Based Alloy[J]. Aerospace Materials and Technology, 2011(2): 83-85.
- [30] HE W W, LIU Y, TANG H P. Microstructural Characteristics and Densification Behavior of High-Nb TiAl Powder Produced by Plasma Rotating Electrode Process[J]. Materials and Design, 2017, 132: 275-282.
- [31] HAMBLE U, MCTIERNAN B J. HIP Temperature and Properties of a Gas-Atomized γ -Titanium Aluminide Alloy[J]. Intermetallics, 2004, 12: 63-68.
- [32] YANG C, HU D W, WU X H, et al. Microstructures and Tensile Properties of Hot Isostatic Pressed Ti4522XD Powders[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534: 268-276.
- [33] LI H Z, CHE Y X, LIANG X P, et al. Microstructure and High-Temperature Mechanical Properties of Near Net Shaped Ti-45Al-7Nb-0.3W Alloy by Hot Isostatic Pressing Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30: 3006-3015.
- [34] 刘咏, 黄伯云, 贺跃辉, 等. 粉末冶金 TiAl 基合金排气阀的制备及性能[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(1): 59-64.
LIU Yong, HUANG Bo-yun, HE Yue-hui, et al. Manufacture and Properties of Powder Metallurgy TiAl-Based Valves[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(1): 59-64.
- [35] VOISIN T, MONCHOUX J P, DURAND L, et al. An Innovative Way to Produce γ -TiAl Blades: Spark Plasma Sintering[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(10): 1408-1413.
- [36] GERLING R, BARTELS A, CLEMENS H, 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.
- [37] 徐磊, 柏春光, 王刚, 等. 包覆热轧制备粉末冶金 TiAl 合金板材及热加工行为研究[J]. 钛工业进展, 2011, 28(5): 17-21.
XU Lei, BAI Chun-guang, WANG Gang, et al. Manufacturing of TiAl Sheet by Hot Packed Rolling of Powder Metallurgy Preform[J]. Titanium, 2011, 28(5): 17-21.
- [38] TANG H P, YANG G Y, JIA W P, et al. Additive Manufacturing of a High Niobium Containing Titanium Aluminide Alloy by Selective Electron Beam Melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015(636): 103-107.
- [39] CHEN W, LI Z Q. Additive Manufacturing of Titanium Aluminides[J]. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, 2019: 235-263.
- [40] KLASSEN A, FORSTER V E, JUECHTER V, et al. Numerical Simulation of Multi-Component Evaporation during Selective Electron Beam Melting of TiAl[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 280-288.
- [41] LI W, YANG Y, ZHOU Y, et al. Effect of Laser Sanning Speed on a Ti-45Al-2Cr-5Nb Alloy Processed by Selective Laser Melting: Microstructure, Phase and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 626-636.
- [42] ZHOU H, ZHANG X Y, ZENG H Z, et al. Lightweight Structure of a Phase-Change Thermal Controller Based on Lattice Cells Manufactured by SLM[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(7): 1727-1732.
- [43] GUSSONE J, GARCES G, HAUBRICH J, et al. Microstructure Stability of γ -TiAl Produced by Selective Laser Melting[J]. Scripta Materialia, 2017, 130: 110-113.
- [44] LIU W, DUPOND J N. Fabrication of Carbide-Particle-Reinforced Titanium Aluminide Matrix Composite by Laser Engineered Net Shaping[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2004, 35(13): 1133-1140.
- [45] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. Characterisation of Titanium Aluminide Components Manufactured by Laser Metal Deposition[J]. Intermetallics, 2018(93): 89-92.
- [46] WEISHEIT A, MORDIKE B L, SMARSLY W, et al. Laser Surface Remelting and Laser Surface Gas Alloying of an Intermetallic TiAl Alloy[J]. Laser in Engineering, 2000(10): 63-81.
- [47] YUE H Y, CHEN Y Y, WANG X P, et al. Effect of Beam Current on Microstructure, Phase, Grain Characteristic and Mechanical Properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb Alloy

- Fabricated by Selective Electron Beam Melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750: 617-625.
- [48] KAMARDEEN O A, ESTHER T A, RASHEEDAT M M, et al. Laser Metal Deposition of Titanium Aluminide Composite: A Review[J]. *Materials Today: Proceeding*, 2018, 5: 19738-19746.
- [49] GUSSONE J, HAGEDORN Y C, GHEREKHLOO H, et al. Microstructure of γ -Titanium Aluminide Processed by Selective Laser Melting at Elevated Temperatures[J]. *Intermetallics*, 2015(66): 133-140.
- [50] CHEN S, PAN Z, YAN M, et al. Fabrication of Iron-Rich Fe-Al Intermetallics Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 7: 20-26.
- [51] MA Y, CUIURI D, LI H, et al. The Effect of Postproduction Heat Treatment on γ -TiAl Alloys Produced by the GTAW-Based Additive Manufacturing Process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 86-95.
- [52] 殷宪铎. TiAl 合金 GTA 增材制造工艺及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 19-30.
- YIN Xian-lai. Microstructure and Mechanical Properties of TiAl Alloy Processed by Wire Arc Additive Manufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 19-30.
- [53] TEBALDO V, FAGA M G. Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of Titanium Aluminides Produced by Electron Beam Melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244: 289-303.