

引文格式: 张鹏飞, 张林嘉, 周瑜, 等. 钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展[J]. 航空制造技术, 2025, 68(7): 22-36.

ZHANG Pengfei, ZHANG Linjia, ZHOU Yu, et al. Application progress of titanium alloys investment casting in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(7): 22-36.

# 钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展\*

张鹏飞<sup>1,2</sup>, 张林嘉<sup>1,3</sup>, 周瑜<sup>4</sup>, 孙峰<sup>4</sup>, 王军<sup>1,4</sup>, 李金山<sup>1,4</sup>

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航发贵州黎阳航空发动机有限公司, 贵阳 550014;

3. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室, 贵阳 550081;

4. 西北工业大学重庆科创中心, 重庆 401135)

[摘要] 钛合金精密铸件具有高比强度、耐腐蚀和耐热等性能, 同时兼具高尺寸精度、低生产成本的优势, 已广泛应用于航空航天领域的关键结构件。为推动我国钛合金精密铸造技术的持续完善进步和钛合金精密铸件产品的进一步推广应用, 本文综述了近年来钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用和发展, 重点介绍了钛合金精密铸造工艺、耐高温铸造钛合金材料以及钛合金精密铸件产品研制进展。最后, 总结了国内钛合金精密铸造技术, 以及应用方面存在的重点问题, 提出了建立材料数据库、降低生产成本和发展铸造模拟软件等未来发展方向。

关键词: 钛合金; TiAl 合金; 精密铸造; 精确成形; Ti<sub>2</sub>AlNb 合金

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.07.022



张鹏飞

研究员, 主要从事航空航天材料先进制造技术研究。

为满足航空航天飞行器升级换代对高性能金属结构件的需求, 零部件生产技术和材料不断进步革新<sup>[1]</sup>。钛合金具备密度低、比强度高、耐腐蚀和耐高温性等特性, 被广泛应用于航空航天领域的关键承力结构件, 且使用量不断增长<sup>[2-3]</sup>。然而, 钛合金零件生产过程中存在切削力大、易磨损等问题, 导致加工效率低、成本高<sup>[4]</sup>, 限制了钛合金零部件在低空飞行器、兵器船舶领域的推广应用。熔模精密铸造技术是解决大尺寸、薄壁、复杂结构钛合金构件一体化成型难题、降低制造成本的有效手段<sup>[5]</sup>。熔模精密铸造技术从我国传统的失蜡法发展而来, 从 20 世纪 60 年代开始, 美国最早开展了钛合金熔模精密铸造技术开发和优化工作, 首先将钛合金熔模精铸件应用于低承力的

非关键静止结构件上, 如发动机罩、隔板、油路导管等; 随着精密铸造技术的不断进步, 钛合金精铸件性能不断提高, 逐步应用于发动机机匣等关键承力结构件。经过数十年的发展, 当前航空航天工业中 90% 以上的钛合金铸件生产均采用熔模精密铸造技术。

在钛合金熔模精密铸件质量控制中, 主要难点在于形状尺寸和缺陷控制, 钛金属在高温下化学活性极高, 容易与坩埚、型壳发生反应, 大量放气或欠铸, 导致产品报废。铸件形状和尺寸控制涉及到蜡模变形、型壳变形破裂、铸件凝固变形、热处理/热等静压变形、焊接变形等, 铸件缺陷控制涉及到材料特性、浇注系统设计、模壳材料及工艺、浇注工艺和后处理工艺等。在高性能钛合金材料

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3702600)。

开发方面,主要难点在于如何同时兼顾合金的高铸造性能和高使用性能。随着航空发动机压气机使用温度升高,ZTC4钛合金已无法满足航空航天零部件日益提高的耐高温力学性能需求,因此需要开发550~650℃高温铸造钛合金,同时解决合金焊接开裂的工艺难题,提高热强性和热稳定性<sup>[6]</sup>。钛合金的铸造性能和力学性能很大程度上受合金成分影响,通过成分优化可实现高铸造性能和高力学性能的钛基合金材料,从而满足精密铸件需求<sup>[7]</sup>。

目前,航空航天飞行器结构件逐渐向大型化、整体化、薄壁化发展,我国已突破航空发动机中介机匣、圆转子机匣、油箱骨架等钛合金精密铸件,具备生产 $\Phi 1500$  mm以上大尺寸、薄壁、复杂结构钛合金精铸件的能力,随着冶金质量和尺寸控制能力提升,未来钛合金精密铸件应用前景广阔。但是,我国的钛合金精密铸造技术起步较晚,与美英等西方国家航空航天业几十年来积累的先进技术相比,在生产能力、成本控制和交付周期等方面均有很大差距,这也导致我国钛合金精密铸件在国际航空航天供应链中占比较小,钛合金精密铸件市场被美国PCC等企业长期垄断。航空航天是精密铸造最核心的市场,占据了约39%的市场份额,拉动了50%的增量需求,未来的市场竞争也将更加激烈。

当前,我国航空航天产业处于快速发展阶段,国产化在近年错综复杂的国际局势下加速推进,预计未来国内航空航天产业精密铸造市场总需求量将突破千亿,其中钛合金精密铸造市场将超过100亿元,而目前国内各家钛合金精密铸件产值不超过25亿元,未来我国钛合金精密铸造还有很大的发展空间。本文综述了近年来钛合金精密铸造在航空航天领域的应用现状,介绍了国内外钛合金精密铸造工艺发展、材料开发和产品应

用,总结了目前存在的问题并提出了展望,本文可为提高国产钛合金精密铸件质量和市场竞争力提供一定的指导。

## 1 钛合金精密铸造工艺发展

近年来,随铸件质量需求提高和精密铸造设备升级,钛合金精密铸造已向结构一体化、成形精确化与过程控制智能化发展。如图1所示<sup>[8]</sup>,钛合金熔模精铸件的生产流程主要有蜡模制作—模壳制作—熔炼浇注—后处理。首先,将计算机辅助设计软件设计的铸件模型用模具(或增材制造设备)制作出蜡模,在其表面包裹多层耐火材料形成模壳,加热模壳使蜡融化流出;然后,通过高温使模壳烧结陶瓷化后,将熔化的钛合金液体浇注到模壳内,待金属液凝固并冷却后破坏模壳,取出铸件及浇注系统;最后,对铸件及浇注系统进行切割浇冒系统、吹砂打磨、检测、酸洗、修补等后处理工艺后,获得最终铸件

产品。对于大型复杂异构件的熔模精密铸造技术研发,工艺流程则更为复杂,对前期浇注系统及铸造工艺设计、制模设备、模壳工艺、熔炼设备的要求也更高。如表1所示,与其他精密成形技术相比,钛合金精密铸造技术具有短流程、低成本、高精度、一体化的特点。

### 1.1 制模工艺发展

制模工序作为精密铸造最前端的环节,蜡模质量对后续工艺流程和最终铸件质量有根本性的影响。蜡模尺寸超差对铸件尺寸超差的影响显著,压型—蜡料、蜡模—陶瓷铸型、陶瓷铸型—合金三类变形系统的尺寸变化规律如图2所示<sup>[9]</sup>。随着石油化工、数控技术和计算机辅助设计的发展,蜡模材料及其模型生产工艺在近年来不断改进创新。在蜡模料方面目前主要有蜡模料石蜡系和树脂系两种,为提升其环境抗力、强度和尺寸精度等性能,需要加入一些添加剂形成混合物。在模型生产工

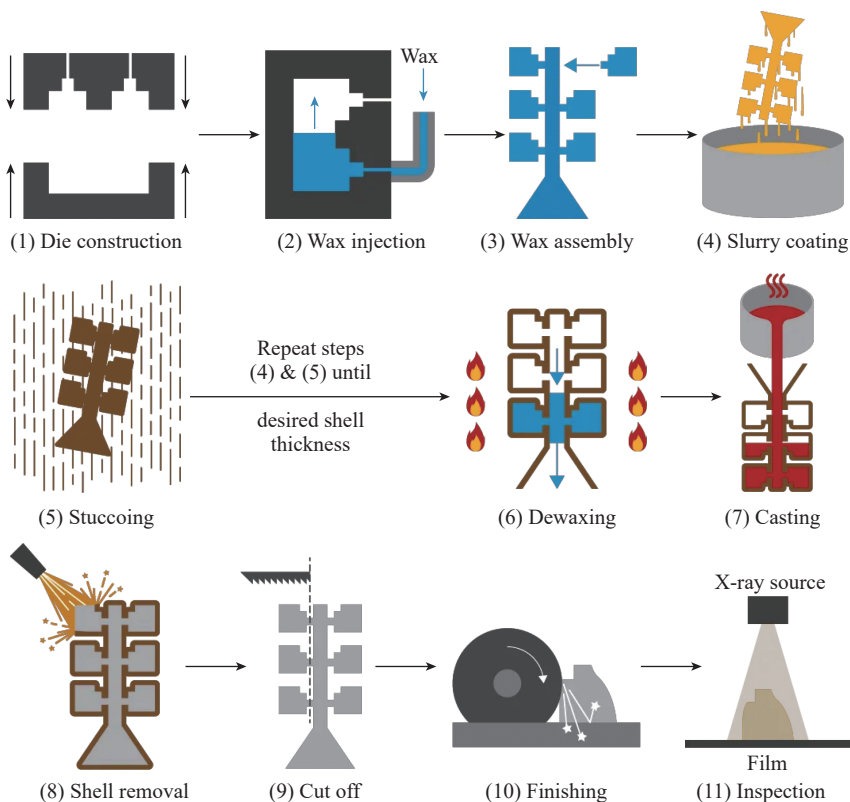


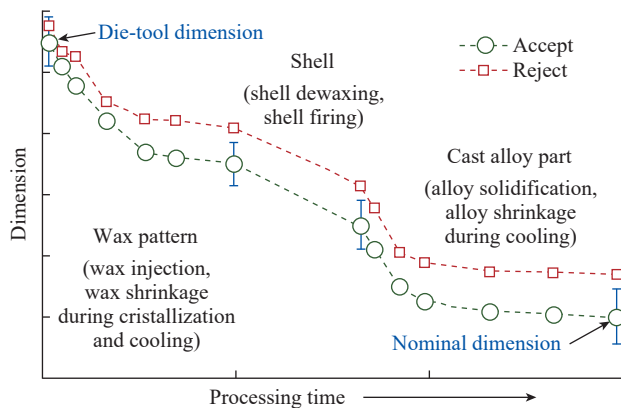
图1 钛合金熔模精密铸造流程图<sup>[8]</sup>

Fig.1 Flow chart of titanium alloy investment casting<sup>[8]</sup>

表 1 精密铸造与其他精确成形工艺的特性对比

Table 1 Comparison of the characteristics of investment casting with other precision forming processes

成形工艺	产品质量/g	尺寸公差/%	致密度/%	强度/MPa	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	壁厚/mm	复杂性	设计灵活性	产能	成本
精密铸造	>1	0.1~1.0	95~99	>900	1.6~6.3	>2	高	高	低	中等
机加工	>1	<0.1	100	>1000	0.2~4	>1	中等	低	低	高
增材制造	>1	0.1~0.3	>98	>1000	>50	>0.5	高	高	低	高
粉末注射成形	0.01~1000	<0.3	98~99	>900	>1	0.2~10	高	高	高	中等
粉末冶金	5~1000	<0.1	85~92	>900	1~5	>2	低	中等	高	低

图 2 压型-蜡料、蜡模-陶瓷铸型、陶瓷铸型-合金三类变形系统中的型面尺寸变化规律<sup>[9]</sup>Fig.2 Variation law of profile size in three types of deformation systems: mold-wax, wax mold-ceramic mold, and ceramic mold-alloy<sup>[9]</sup>

艺方面,为提升新产品研发效率,蜡模生产已从传统的冲压成型发展到3D打印与模具冲压成型相结合。

许多学者对蜡模料配方进行了研究,改良蜡模料的性能。尤畅等<sup>[10]</sup>研究了不同添加剂改性松香和PE1000对石蜡-硬脂酸二元蜡模料性能的影响,随改性松香含量上升,固态蜡料抗弯强度及熔点下降,石蜡-硬脂酸中改性松香和聚乙烯质量分数都为5%时,获得综合性能最佳,抗弯强度、针入度、体系均质性、软化温度区间得到极大改善。程姣姣<sup>[11]</sup>研究了光敏树脂、聚苯乙烯及蜡类熔模粗糙度、变形度和水性涂料的涂覆性能,发现光敏树脂蜡模表面粗糙度最小、尺寸变形度也最小;聚苯乙烯蜡模表面润湿效果最优,光敏树脂蜡模最差,光敏树脂经表面活化处理后可达到30~45 mg/cm<sup>2</sup>涂层厚度。

目前,制蜡模技术已从模具冲压成型转变为增材制造与模具冲压成型相结合的局面。传统的制蜡模方法是将熔融蜡料注入金属模具中成形,这需要定制金属模具,单一产品对应专门模具,模具生产周期长、适应性差、容错率低、成本高。随着铸件产品型号迭代速度加快,开发金属模具的模式无法适应大量新产品的研发。为满足新铸件产品的快速开发需求,近年来兴起了快速铸造技术,该技术将快速成形技术与传统铸造技术相融合。快速成形技术主要应用于蜡模、型芯和模壳制备,其中,快速成形蜡模主要是利用增材制造技术使特殊的蜡料相互粘接或直接固化,然后再使用传统的制壳、浇注和后处理工艺生产出钛合金精密铸件<sup>[12]</sup>。计算机辅助设计的增材制造技术极大地缩短了新产品蜡模设计、制造周期,

从而有效地缩短了新产品交付周期。目前,针对制蜡模的增材制造技术有激光立体光固化(Stereo lithography appearance, SLA)、选区激光烧结(Selective laser sintering, SLS)、三维打印(Three dimensional printing, 3DP)和分层实体制造(Laminated object manufacturing, LOM)等,图3所示为4种常用的蜡模增材制造技术示意图<sup>[13]</sup>。如表2所示<sup>[14]</sup>,不同的增材制造技术优缺点各不相同,实际生产过程中往往会结合产品需求进行选择。目前,航空航天复杂结构件研发已大量采用激光立体光固化和树脂微滴喷射技术生产蜡模,树脂微滴喷射技术面层扫描速度较快、精度高,适配中小型铸件的蜡模制备;激光立体光固化技术生产的蜡模表面光洁度高、强度高、制壳难度低<sup>[15]</sup>,适配大型铸件的蜡模制备。

## 1.2 制壳工艺发展

决定熔模铸件质量的关键在于型壳的制备,面层模壳与金属液直接接触,其性能高低决定了铸件质量的好坏。这是因为钛合金的浇注温度在1600℃以上,金属液与模壳温度差可达1000℃,即使将浇注速度控制得足够慢,浇注时金属液仍会对面层型壳产生很大的热冲击。然而,模壳总体强度不能过大,一般要求模壳能够在金属液凝固过程中逐渐破裂、溃散,减少对铸件的约束,降低铸件内应力、抑制开裂等问题。此外,若型壳面层粗糙度控制不佳,会传导至

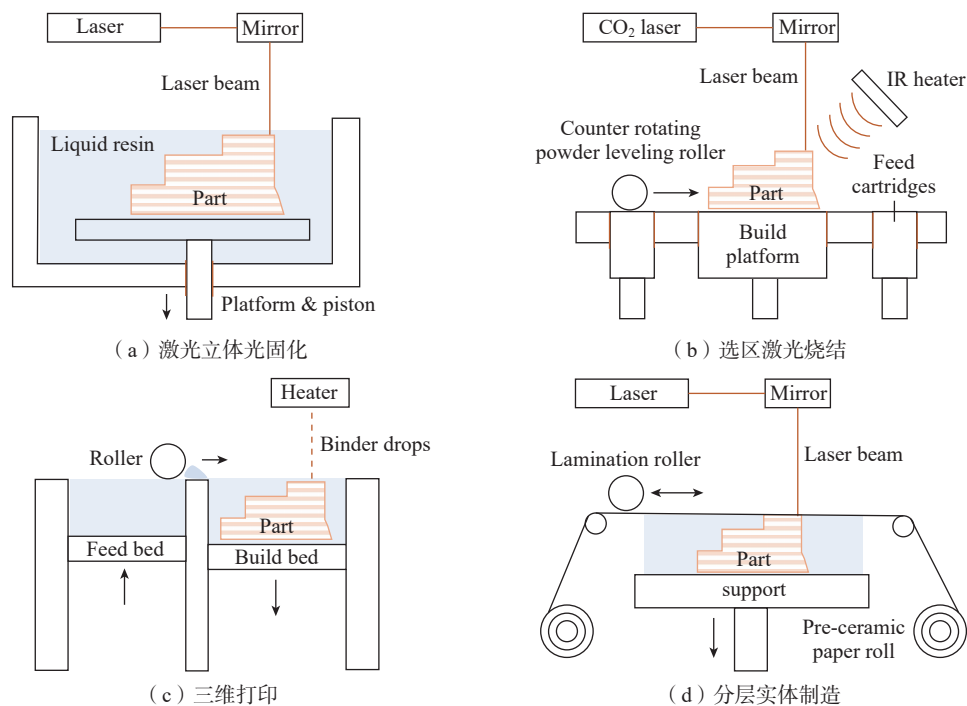
图3 蜡模快速成形技术示意图<sup>[13]</sup>Fig.3 Schematic diagram of wax mold rapid prototyping technologies<sup>[13]</sup>

表2 用于蜡模制备的不同增材制造技术优缺点对比

Table 2 Comparison of the advantages and disadvantages of different additive manufacturing technologies for wax mold preparation

蜡模增材制造技术	技术优势	技术缺点
激光立体光固化	(1) 较好的表面光洁度,能与数控铣削相媲美; (2) 成形速度快和效率高,可在树脂桶内同时打印几个零件	(1) 材料昂贵,有毒,保存温度、避光条件要求较高; (2) 可选树脂种类少,需设计支撑
选区激光烧结	(1) 可选材料种类多,原材料价格不高; (2) 可生产复杂零件,且不需要支撑结构; (3) 材料利用率高,精度高,变形小	(1) 设备昂贵,需要辅助设备,维护成本较高; (2) 加工时间长,制造效率低; (3) 表面质量低
树脂微滴喷射	(1) 工艺简单,成本低; (2) 不需要外部平台或支撑	(1) 粉末之间的填充率较低,零件有较大的孔隙率; (2) 产品尺寸以及移动速度有限; (3) 新打印的零件易碎,表面质量差,需浸蜡处理; (4) 核心器件阵列喷头寿命较短,更换成本高
分层实体制造	(1) 成形速度快,成本低,可建造较大的零件尺寸; (2) 无相变,不会发生由于相变产生的变形; (3) 无需设计支撑结构	(1) 需手动去除多余材料,费时费力; (2) 难用于有空腔的零件,零件的复杂程度受限; (3) 零件容易吸潮膨胀

铸件表面质量,增加后处理工序,严重降低生产效率。因此,面层不仅要有良好的抗热震性防止开裂,同时需要有一定的溃散性,此外还要保证面层粗糙度能够匹配产品表面粗糙度需求。通过模壳材料配方优化及其制壳工艺,开发可实现高性能模壳制备。

表3所示为不同型壳面层材料

的优缺点对比<sup>[16-22]</sup>。目前,钛合金熔模精铸件的模壳主要是可溶性金属氧化物烧结而成的耐火陶瓷型壳,其中 $ZrO_2$ 和 $Y_2O_3$ 应用最为广泛,航空航天熔模精密铸件生产大多采用这两种金属氧化物作为耐火材料。与石墨耐火材料和难熔金属材料相比,耐火陶瓷型壳的传热效率更低,浇注过程中金属液不易产生激冷效应,从

而更好地抑制铸件表面形成微裂纹、冷隔、流痕、裂纹等缺陷。此外,通过模壳控温冷却和浇注工艺参数优化,控制铸件冷却速率,可以避免开裂问题。通过优选耐火陶瓷面层配方和制备工艺,能够保证铸件的表面粗糙度和尺寸精度要求。另外,有学者开展了耐火陶瓷和金属复合铸型研究。沈阳铸造研究所陈晓明等<sup>[22]</sup>采用等

离子喷涂法将氧化钇粉末涂覆至模具钢铸型表面,制备了陶瓷/金属复合铸型,用于浇注 ZTA15 合金舵轴铸件,表面质量优于同类石墨型铸件,铸件内部缺陷、表面质量、化学成分、力学性能均符合技术要求。常化强等<sup>[23]</sup>对比研究了氧化钇涂覆石墨铸型复合铸型和石墨铸型浇注的 ZTC4 和 ZTA2 铸件,复合铸型的

铸件内部缺陷好于石墨铸型,而表面扩散层厚度相当。

### 1.3 熔炼浇注工艺发展

近几十年来真空冶炼和浇注设备迭代升级,钛合金熔炼浇注工艺也不断创新,数字化、自动化和可视化浇注得以实现,铸件冶金质量不断提升。钛合金的真空熔炼技术已发展完善,目前熔炼和铸造钛及钛合金的

设备主要有真空自耗电极电弧凝壳炉、等离子电弧炉、电子束凝壳炉和感应悬浮熔炼炉等,熔炼炉的熔炼方法如图 4 所示<sup>[24-25]</sup>。凝壳炉的基本原理是,在真空环境中,借助直流电弧的电流把钛合金自耗电极进行高温加热,形成熔池重新熔炼。目前,绝大部分航空航天钛合金精密铸件生产均采用真空自耗凝壳炉熔炼浇

表 3 钛合金精密铸造用不同型壳材料的优缺点对比

Table 3 Comparison of the advantages and disadvantages of different shell materials for titanium alloy investment casting

模壳类型	面层材料	优点	缺点
金属型	钨粉	(1) 熔点高, 惰性好; (2) 可重复使用	(1) 需使用溶剂脱模, 伤害人体健康, 污染环境; (2) 热导率高, 无透气性, 铸件表面易形成气孔
	球墨铸铁	(1) 价格低, 可重复使用; (2) 工艺简单	(1) 导热系数高, 线膨胀系数低; (2) 退让性差
石墨型	石墨	(1) 耐火度高, 热膨胀系数小; (2) 价格低	(1) 表面渗碳脆性层, 易开裂; (2) 化学惰性差; (3) 型壳收缩率高; (4) 铸件壁厚大
熔模型	ZrO <sub>2</sub>	(1) 线膨胀系数小; (2) 工艺简单, 成本低廉	(1) 表面沾污层厚; (2) 表面气孔倾向大
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(1) 耐热温度高, 强度高; (2) 惰性好, 界面反应微弱	(1) 工艺复杂; (2) 粉料价格高; (3) 抗热震性差
	ThO <sub>2</sub>	耐火温度高, 强度高	有放射性, 危害人体安全
	CaO	生成自由能高, 稳定性好	与空气中的水分反应, 制壳困难
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(1) 抗热振性好; (2) 熔点高; (3) 价格低	表面反应层较厚
	MgO	表面污染物少	易形成表层气孔
	BaZrO <sub>3</sub>	惰性好	成形性差, 常用于坩埚

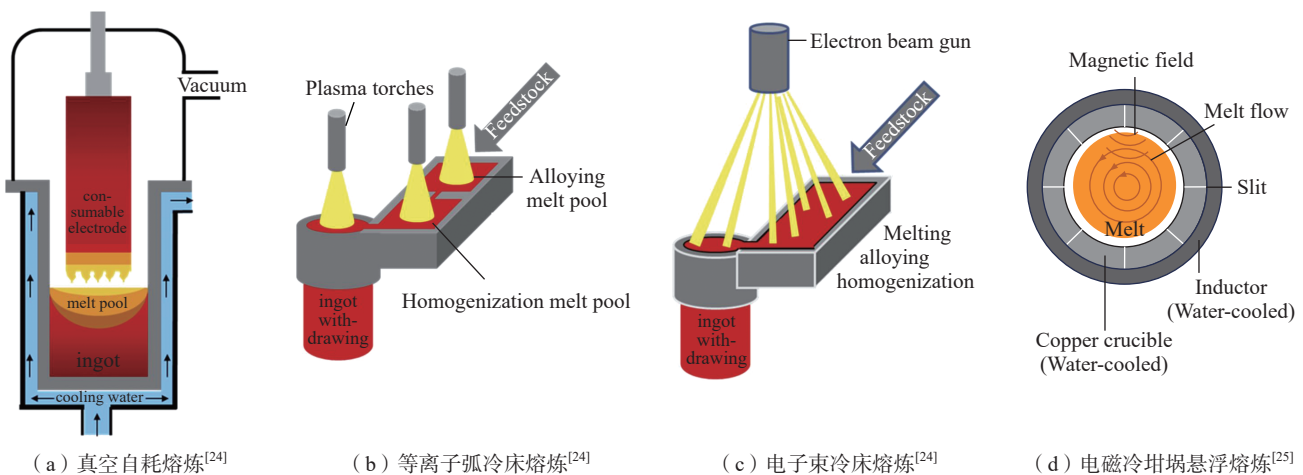


图 4 用于钛合金铸造的熔炼方法示意图

Fig.4 Schematic diagram of the melting method used for titanium alloy casting

铸,凝壳炉与浇注装置集成,完成母合金重熔后立即开始铸件浇注。

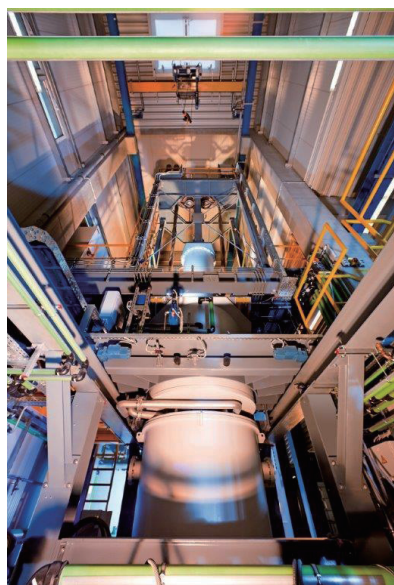
从20世纪30年代开始,各国开始对真空感应水冷铜坩埚凝壳炉、悬浮熔炼炉及其熔铸工艺进行研究及应用。图5所示为几种典型的大型钛合金真空熔铸设备。水冷铜坩埚凝壳炉原理为利用电磁感应在金属内产生涡流加热炉料来进行熔炼,已被证明是一种有发展前途的钛合金铸造熔铸设备及工艺。与真空自耗电极电弧凝壳炉相比,其具有原材料形状要求低、无需制作电极、合金成分和熔池温度均匀、高纯净无夹杂、可在熔炼过程中添加合金元素、熔池保温时间长等优点。感应悬浮熔炼炉在凝壳炉的基础上,还增加了磁场对金属液的强烈搅拌作用,有助于进一步提高炉料的均匀性,近年来随着高质量合金需求不断增长,感应悬浮熔炼技术应用更加广泛<sup>[26]</sup>。目前,感应悬浮熔炼炉可浇注的金属量有0.5 kg、5 kg、20 kg和50 kg级4种,使用最多的是20 kg级感应悬浮熔炼炉,可用于小尺寸钛合金精密铸件的批量化生产。国内中国科学院金属研究所、北

京航材院、沈阳铸造所和重庆两航等单位已具备50 kg级大型感应悬浮熔炼铸造能力,可开展最大尺寸为 $\Phi 600$  mm的钛合金铸件研发及批产。

在铸造工艺方面,重力铸造和离心铸造是航空航天领域最常用的钛合金熔模铸造技术,已大量应用于制造叶轮、舱体、机匣等关键结构件<sup>[27-30]</sup>。一般重力铸造结构件的平均硬度大于离心铸造,且重力铸造机匣强度高,本体组织更为细小,但对于低流动性合金和复杂型腔铸件的浇注,需要更高的浇注温度和更大的辅助浇注系统,容易导致浇注跑火风险升高、铸件表面质量下降、晶粒粗大、出品率低。离心铸造可以提高低流动性钛合金填充复杂型腔的能力,实现低过热温度浇注,获得性能优异、完整充型的复杂薄壁钛合金铸件。但是,离心浇注对离心工装、模壳强度要求较高,还有较大的成分偏析风险。目前,采用重力铸造和离心铸造的钛合金铸件尺寸不断增大,从最大轮廓尺寸 $\Phi 900$  mm以下的发动机机匣,发展到离心铸造生产最大轮廓尺寸1600 mm以上、最小壁厚1.5 mm

以下的钛合金异形结构件;重力铸造可生产最大轮廓尺寸2500 mm以上的整体钛合金机匣。

模拟仿真是提升铸造工艺水平的有效手段。在钛合金熔模精铸件产品研发和改良阶段,由于单次熔炼浇注的时间和材料成本高,为获得最佳工艺参数、提升浇注成功率,在实际浇注前会利用Procast、MagmaSoft、AnyCasting、华铸CAE等软件对浇注过程进行模拟仿真,获得欠铸、缩孔、气孔等缺陷在铸件中的分布情况。根据模拟结果,对浇注系统结构设计和熔炼浇注工艺进行优化迭代。刘云超等<sup>[18]</sup>采用模拟仿真软件优化了ZTi60钛合金大型构件熔模精铸工艺,获得了完整成形铸件,无欠注跑火、表面质量好、性能满足要求。贾国成等<sup>[29]</sup>通过模拟仿真设计并优化了倾斜式离心铸造工艺,减少了铸件内部的缩孔缺陷和表面流痕缺陷。模拟仿真工艺设计+实际浇注验证已成为钛合金精密铸造行业的重要技术开发方法,有效降低了大型钛合金精密铸件的研发成本。但是,目前存在钛合金物性参数



(a) 500 kg自耗电极电弧凝壳炉



(b) 300 kg自耗电极电弧凝壳炉



(c) 冷坩埚感应熔炼炉



(d) 冷坩埚感应悬浮熔炼炉

图5 钛合金真空熔炼铸造设备

Fig.5 Titanium alloy vacuum melting and casting equipment

不足、工艺参数测量难和控制难等问题,国内精密铸造模拟仿真结果与实际浇注结果的吻合度不高,尤其是对于采用新型钛合金的新型铸件产品,仍主要依靠实际浇注验证模型设计和铸造工艺。

#### 1.4 铸造后处理工艺发展

##### (1) 热处理工艺。

虽然采用陶瓷型壳浇注的钛合金铸件内应力较小,但为了提高强度/塑性,保证铸件安装和使用时不发生变形或开裂等问题,往往还需要进行热处理。与锻件热处理类似,固溶加热温度和冷却速度是影响钛合金铸件性能的关键参数。针对 $\alpha+\beta$ 型钛合金铸件,一般选用两相区下部温度退火,减少铸件内应力,可为热等静压和焊接做前处理;加热温度不宜超过 $\beta$ 单相区,否则会引起 $\beta$ 相晶粒急剧长大,晶界 $\alpha$ 粗化,严重降低强塑性。ZTC4钛合金去应力退火温度在500~600℃,退火温度为700~800℃<sup>[31]</sup>。一般的钛合金铸件不进行固溶时效处理,进行固溶处理的铸件固溶温度也在 $\alpha+\beta$ 两相区,固溶处理后的时效温度一般在500~600℃之间。赵红霞等<sup>[32]</sup>对ZTC4合金经过固溶时效处理之后,发现粗大的连续晶界 $\alpha$ 可被细化和分割开,片状 $\alpha$ 区域能够得到细化,从而使强度大幅度提高,同时保持较好的塑性。刘小花等<sup>[33]</sup>对铸造Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-2Nb钛合金进行固溶时效处理,发现室温及高温强度随固溶温度的升高而增加,室温塑性随固溶温度升高而下降。

(2) 热等静压工艺(HIP, Hot isostatic pressing)。

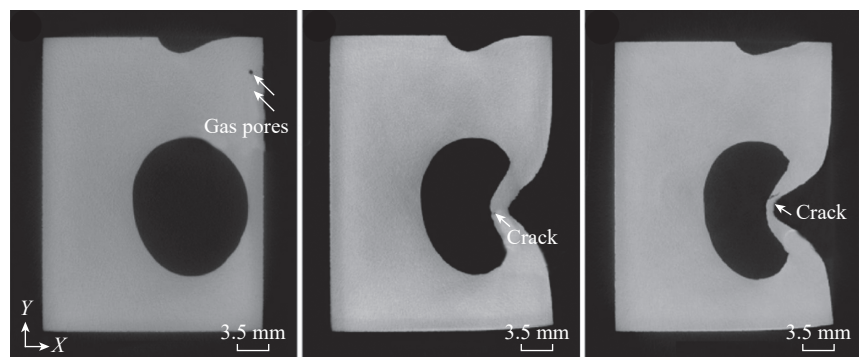
由于模壳吸附气体、合金凝固收缩特性等铸造固有特性,铸造过程中的熔炼浇注阶段往往会在铸件内部引入气孔、缩孔、缩松等缺陷。这些缺陷肉眼不可见,通过X射线成像后可被观察到。热等静压处理时,内部孔洞与疏松被挤压至闭合,合金组织

随之开始演变。热等静压工艺规范取决于合金在不同温度下的屈服极限,工艺温度一般要比相变点低30℃左右,保压压力在120 MPa左右。以ZTC4合金为例,其规范的HIP温度、压强、保温保压时间分别为920℃、110 MPa和2 h,采用的介质通常用纯度为99.90%的氩气。一般热等静压后铸件强度会出现一定下降,但塑性会得到较大改善<sup>[34]</sup>。图6所示为典型的热等静压对TC4合金铸件气孔及强塑性的影响<sup>[35]</sup>。

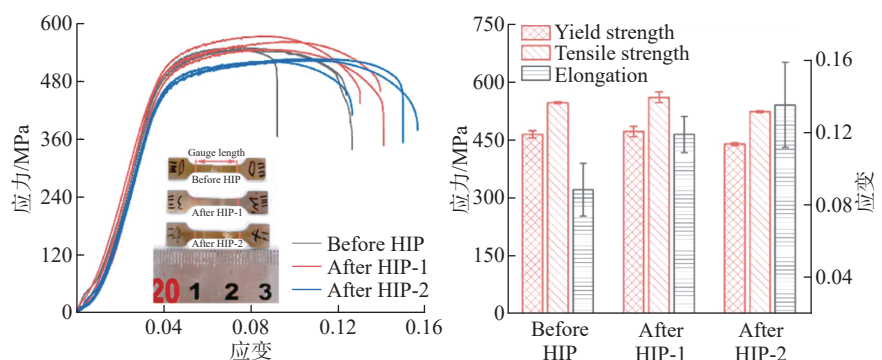
##### (3) 焊接修补工艺。

热等静压可以消除铸件内部缺陷,但是无法消除铸件表面缺陷,甚至还会将内部孔隙转移至铸件表面。所以,在热等静压处理后,往往需要对钛铸件表面和内部进行检测,若表面存在凹坑缺陷,内部存在夹杂等,需要采用焊接进行修补。惰性气体钨弧焊是钛合金焊接常用的工艺,此外还有激光焊接、等离子焊和电子

束焊接等工艺也被用于钛合金精铸件的焊接。大部分的钛合金具有较好的可焊性,焊接修补后的钛合金铸件仍具有优良的强塑性和疲劳性能。但是,焊接过程中还需注意焊前准备,保证焊缝质量和抑制焊接变形开裂。焊缝质量主要通过控制保护气体氛围和提高焊接区域表面清洁度实现。典型合金元素对钛合金焊接性能的影响如表4所示<sup>[36]</sup>。焊接过程中熔化的钛合金可能与铸件表面或气体氛围中的C、O、N、H发生反应,导致焊区脆性增强、韧性下降或开裂等问题。同时,钛合金自身成分和铸件结构也会对焊接质量产生很大影响。高温钛合金中添加的Al、Sn、Si等元素在焊接过程中发生非平衡态凝固,析出脆性有序相会降低铸件焊接接头的塑韧性<sup>[37-39]</sup>。此外,由于铸件不同位置结构不同、厚薄不均匀,温度场变化不均匀时产生的热应力导致不同位置塑性应变不同,从而造



(a) 热等静压对气孔的影响



(b) 热等静压对铸件力学性能的影响

图6 热等静压对铸造TC4合金的影响<sup>[35]</sup>

Fig.6 Effect of HIP on casting TC4 alloy<sup>[35]</sup>

成了焊接区或焊接区周围出现裂纹。

## 2 精密铸造钛合金材料发展

钛合金精密铸造技术的发展与铸造钛合金材料的发展是相辅相成的。为充分发挥钛合金材料的特性,适配合金材料的较差铸造性能,需要开发针对性的铸造技术并不断改进。此外,为降低铸造难度、控制成本,需要调整钛合金成分,在最大程度保证使用性能不下降的前提下,使合金成分更有利于铸造成形和后处理。在这种螺旋上升的态势下,钛合金精密铸造技术和铸造钛合金材料都获得了很大的进步,常规铸造钛合金的铸造技术不断完善,新型、高性能铸造钛合金材料也不断被开发出来。

### 2.1 常规铸造钛合金

目前,在航空航天领域应用的铸造钛合金主要是 $\alpha+\beta$ 型钛合金和近 $\alpha$ 钛合金,常规的铸造钛合金及其力学性能见表5。国内外应用范围最广、使用量最大的 $\alpha+\beta$ 型钛合金是ZTC4,ZTC4与TC4的合金成分基本相同。近 $\alpha$ 钛合金中,ZTA15合金的使用量最多,但明显低于ZTC4钛合金,ZTA15合金成分与TA15相近,来源于俄罗斯BT20钛合金。目前,我国研制和生产的航空航天用钛合金精密铸件中,ZTC4和ZTA15合金的总使用量超过了80%。

国内外科研院所和高校研究团队开展了大量铸造钛合金的成分调控研究,钛合金中典型合金元素添加对铸造性能和使用性能的影响如表6所示<sup>[39-45]</sup>。在ZTC4研究方面,除主元素Al外,主要针对间隙元素进行调控,间隙元素C、O、N、H等对ZTC4性能有较大影响,图7所示为氧、氮、氢三种气体元素对ZTC4力学性能的影响规律,研究发现氢0.010%~0.012%、氮0.01%~0.02%、氧0.10%~0.15% (质量分数)有利于同时提高ZTC4铸件的强塑性<sup>[46]</sup>。针对高损伤容性需求的铸件,一般会采用低间隙ZTC4合

金(ZTC4ELI)。研究表明,微量Fe(<0.24%)对低间隙TC4具有较好的固溶强化作用,可在断裂韧性不变的前提下提高抗拉强度<sup>[47]</sup>。

近几十年来,为满足航空发动机

机匣和叶片等铸件对高温蠕变及高温强度等需求,多种铸造高温钛合金被开发出来。表7所示为典型的高温高强钛合金牌号及力学性能。耐高温550℃高温钛合金较多,国内外合金

表4 典型合金元素对钛合金焊接性能的影响

Table 4 Influence of typical alloying elements on the welding properties of titanium alloys

合金元素	来源	对焊接性能的影响
C	气氛、铸件表面污染、石墨	补焊区裂纹
O	气氛、铸件表面污染、模壳	补焊区塑性下降
N	气氛	气孔和裂纹
H	气氛	氢脆
Sn/Zr	合金组元	提升焊接性能
Nb/Ta/W	合金组元	易引发焊接开裂

表5 常规铸造钛合金及其室温力学性能

Table 5 Conventional casting titanium alloy and its mechanical properties at room temperature

合金牌号	合金类型	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%	工作温度/℃
ZTC3	$\alpha+\beta$	930	835	4	350
ZTC4	$\alpha+\beta$	890	820	5	400
ZTC6	Near $\alpha$	860	795	5	450
ZTA15	Near $\alpha$	882	784	5	500

表6 典型合金元素对铸造钛合金使用性能和铸造性能的影响

Table 6 Influence of typical alloying elements on the performance and casting performance of casting titanium alloy

典型合金元素	对使用性能的影响	对铸造性能的影响
Al	固溶强化/析出强化,提高高温强度和耐蚀性	降低熔点,增大流动性、收缩率
Sn	提高热强性,抑制室温脆性和氢脆	提高焊接性能
Zr	提高热强性、耐腐蚀和抗氧化性能	提高焊接性能
Mo	提高抗冲击和热稳定性	降低流动性、收缩率
Si	提高蠕变抗力,细晶强化,析出强化	提高流动性和填充性
Nb	提高焊接性能和抗氧化性能	产生高熔点夹杂,降低流动性
Ta	固溶强化,提高抗氧化、腐蚀、蠕变和持久性能	产生高熔点夹杂
W	细晶强化,提高高温抗氧化性和热稳定性	降低流动性,产生高熔点夹杂
Nd	细晶强化,析出强化,提高抗氧化能力和热稳定性	降低流动性
Y	细晶强化,轻微提高强度,提高抗氧化性能	降低流动性
C	强度、韧性、蠕变和疲劳性能的最佳匹配	成分过冷作用
B	细化晶粒,改善力学性能	提高流动性

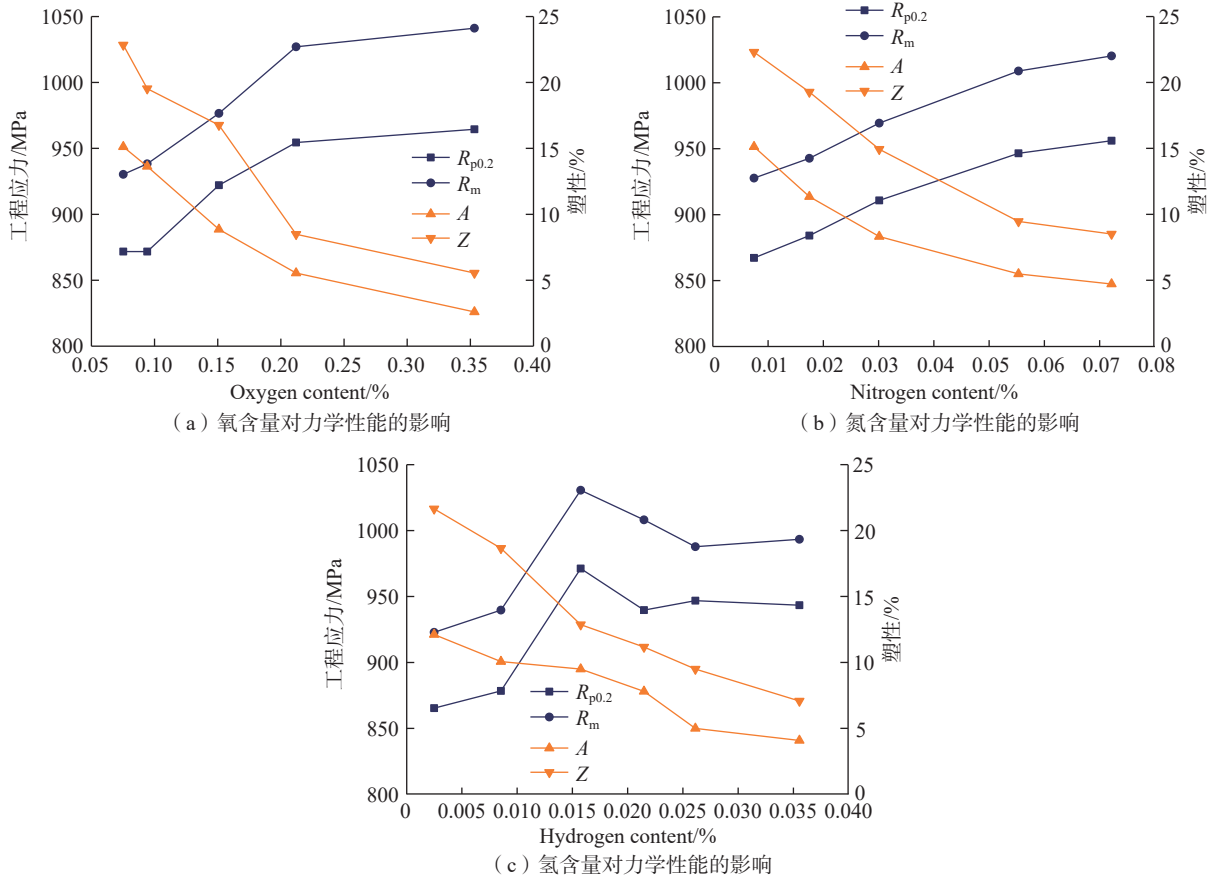
图7 氧、氮、氢含量对ZTC4钛合金力学性能的影响<sup>[46]</sup>Fig.7 Effect of oxygen, nitrogen and hydrogen content on the mechanical properties of ZTC4 titanium alloy<sup>[46]</sup>

表7 典型铸造高温钛合金牌号及室温力学性能

Table 7 Typical high-temperature casting titanium alloy grades and mechanical properties at room temperature

合金牌号	合金类型	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	工作温度/℃
Ti1100	Near $\alpha$	938	848	11	600
Ti6242	Near $\alpha$	1006	910	10	550
IMI834	Near $\alpha$	1069	952	5	600
Ti153	Near $\beta$	1275	1200	6	540
BT35	Near $\beta$	1100	1020	8	>500
ZTi55	Near $\alpha$	950	930	8	550
ZTi60	Near $\alpha$	1000	905	10	600

牌号主要有 Ti1100、IMI834、Ti6242、ZTi55 和 ZTi60 等。其中,高温钛合金大多是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 体系合金,其中 Ti1100、IMI834 和 ZTi60 使用温度可达 600 ℃。北京钢研院和西北工业大学等开展了 ZTi55 和 ZTi60

油箱骨架的熔模铸造工艺和后处理工艺研究,通过浇注系统优化,实现了高速飞行器油箱骨架件的完整充型,并解决了焊接易开裂问题,附铸试棒和铸件本体力学性能满足指标要求。中国科学院金属所在 ZTi55 和

ZTi60 合金铸造工艺及铸件性能调控方面进行了系统研究<sup>[48]</sup>,结果表明,ZTi55 和 ZTi60 合金的铸态组织明显较 Ti-6Al-4V 细小,铸态  $\beta$  晶粒尺寸与其母合金锻造后  $\beta$  热处理组织的晶粒尺寸相当。ZTi55 合金的拉伸性能明显优于 ZTC4 和 ZTA15 合金,600 ℃/400 MPa/30 min 下蠕变残余变形仅为 0.2%; ZTi60 合金铸态组织塑性较好,但强度偏低。铸造  $\beta$  钛合金有 Ti153、 $\beta$ -21S、BT35 等,虽然使用温度达不到 500 ℃,但其室温屈服强度可超过 1000 MPa,高温强度和抗蠕变性能也较好<sup>[49]</sup>。相较于近  $\alpha$  钛合金,近年来铸造  $\beta$  钛合金的研究和应用极少。铸造近  $\alpha$  高温钛合金有轻质、耐高温、高强塑性及低成本优势,在航空航天大型复杂结构件上有广阔的应用前景,是耐高温钛基合金的重要发展方向之一。

## 2.2 耐 600 °C 以上铸造钛基合金

随着航空航天领域对飞行器飞行速度和距离需求的不断提高,对零部件耐高温和轻量化的要求也不断提升。飞行器超音速飞行使零部件气动升温,对耐高温要求已超过钛合金热障温度 600 °C,常规钛合金无法满足如此高温性能要求。当前,绝大部分耐 600 °C 以上高温零部件一般采用耐热温度高于 700 °C 的镍基高温合金材料,但其密度达到 8.4 g/cm<sup>3</sup>,比钛合金的密度高 86%,但比强度不及钛合金<sup>[50]</sup>。近年来,耐 600 °C 以上高温的近  $\alpha$  钛合金、钛铝合金和 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金取得了长足发展,新牌号、新成分不断被开发出来。表 8<sup>[51-58]</sup> 所示为不同高温钛基合金的高温力学性能。

目前,耐 600 °C 以上铸造钛合金较少,目前只有中国科学院金属所开发的耐 650 °C 高温 ZTi65 钛合金。ZTi65 合金是从锻造 Ti65 合金成分改良而来,与锻造 Ti65 合金相比,ZTi65 合金的 Ta 和 W 含量减半,其他合金元素基本不变,虽然牺牲了一定的高温强度,但较大地提升了铸造性能,目前可浇注最大轮廓已超过 1200 mm 的发动机机匣和油箱骨架等产品。然而,ZTi65 合金焊接性能较差,大型薄壁异构件的焊接开裂倾向严重,焊接工艺不成熟,热处理和热等静压等后处理工艺还未形成标准化。

TiAl 合金密度比常规钛合金更小(约 4 g/cm<sup>3</sup>),具有优异的高温抗蠕变和抗氧化性能<sup>[59]</sup>,可替代镍基高温合金在航空发动机 600~1000 °C 高

温区服役。但是,钛铝合金比一般钛合金的热加工难度更大,热变形开裂倾向大,机械加工更加困难,这些问题使得精密铸造技术成为 TiAl 合金精密成形的更优选择。目前工业化应用中主要是二代 TiAl 合金,集中于 Ti-4822 合金(Ti-48Al-2Cr-2Nb)、45XD 合金(Ti-45Al-2Mn-2Nb-1B)、RNT650 合金、JG1101 合金,其中,Ti-4822、45XD 合金使用量最大。Howmet 公司和 PCC 公司采用 Ti-4822 合金和熔模铸造工艺生产航空发动机叶片和机匣类部件<sup>[28]</sup>。国内也具备生产中小尺寸 TiAl 合金铸件能力,如中国科学院金属所生产的 45XD 合金低压涡轮叶片和西北工业大学采用熔模铸造工艺研发的 TNM 合金航天飞行器格栅。由于 TiAl 合金铸造工艺不成熟,目前尚未见  $\Phi$ 1000 mm 尺寸 TiAl 合金精铸件应用的公开报道。

TiAl 合金精密铸件的研制及批量化生产需要解决许多问题。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,这些特性为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,对于基础尺寸为 10~80 mm 的铸件,Ti-4822 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<sup>[60]</sup>,收缩率大导致 TiAl 合金铸件尺寸难以控制、残余应力大、易开裂报废。此外,若 TiAl 合金沿用常规钛合金铸型用硅溶胶作为面层型壳的粘结剂,浇注过程中熔融 TiAl 合金容易与面层

型壳中的 SiO<sub>2</sub> 反应<sup>[61]</sup>,再加上为提高流动性的高型壳预热温度<sup>[62]</sup>,型壳面层极易剥落。因此,TiAl 合金需要采用惰性极佳的钎溶胶作为粘结剂以及 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为耐火材料。总之,提升 TiAl 合金熔模铸造质量需要同时控制好凝固收缩与表面质量,优选耐火材料、优化粘结剂并定制烧结工艺,同时提高陶瓷型壳的退让性,并且降低陶瓷型壳的化学活性。

Ti<sub>2</sub>AlNb 合金比大多数 TiAl 合金高温强塑性和抗蠕变性能更好,其使用温度高达 800 °C,具有很大的替代铸造镍基高温合金的潜力。由于 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金熔点高、流动性差等问题,目前仅有少数科研单位,如北京钢研院和北京航材院等开展了中小型 Ti<sub>2</sub>AlNb 精铸件产品研发,尚无 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金铸件的工程化应用。目前只有 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的锻件应用于一些低风险的航空航天部件中,如导弹发动机喷嘴、导弹轨控发动机喷管连接件、卫星发动机构件、航空发动机机匣试验件等。研究发现,采用常规铸造法制备的 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金铸件,存在组织粗大、塑性变形能力差,难以进一步机械加工等问题。黄东等<sup>[63]</sup>对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的铸造工艺存在缩孔和缩松等缺陷的问题开展了热等静压试验,有效消除了铸造缺陷,并提高铸件致密度,改善铸件性能。但是,针对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金铸造性能及工艺研究的公开报道鲜见,尚无 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金大型熔模精铸件工程化应用的实例。

表 8 耐 600 °C 以上高温钛基合金及其高温力学性能

Table 8 Titanium-based alloys resistant to above 600 °C and their high-temperature mechanical properties

高温钛基合金	抗拉强度/MPa			延伸率/%		持久时间/h	
	650 °C	750 °C	800 °C	650 °C	750 °C	650 °C	750 °C
ZTi65	~600	~450	—	~8	~12	100 (240 MPa)	—
铸造 TiAl 合金	700~800	480~680	460~750	2~10	~2	—	—
Ti <sub>2</sub> AlNb	>880	~600	~400	~10	~15	~100 (360 MPa)	~100 (160 MPa)

### 3 钛合金精铸件在航空航天飞行器上的应用现状

经过几十年的发展,钛合金精铸件已经广泛应用于航空航天飞行器的关键结构件,尤其是整体精铸件的使用为飞行器结构稳定性提升、延长机体寿命、整体减重、减少装配难度、降低制造成本都做出了重要贡献。常规钛合金精密铸件在航空航天飞行器上的应用最为突出。1972年起,铸造钛合金开始正式应用于飞机上,首先被用于受力不大的非关键静止结构件上,如发动机罩、隔板、油路导管等。随着铸件性能的提升,钛合金精密铸件也开始用于一些关键的承力部位,美国 PCC、Howmet 等公司采用 Ti6Al4V 钛合金及精密铸造技术生产了 CF6-80 发动机安装吊架精密铸件、GE90 发动机风扇轮毂、F117 发动机燃烧室前部铸件、波音 777 发动机后安装框架、A380 客机刹车扭力管、Bell-Boeing V-22 倾转式旋翼机上的转接座、F-22 战斗机机翼上的侧机身接头垂尾方向舵作动筒支座等。美国 F-22 战斗机上使用的钛合金铸件大约有 76 件左右,包括倾斜隔板、辅助动力装置入口框、座舱面板、主机翼组件、方向舵铰链副等。我国歼 20 也大量采用了钛合金精密铸件,其中尾翼垂尾即采用钛合金整体精密铸件。北京航材院已成为空客 CFM 56-7 发动机支板的主要供应商,并成为 LEAP-1A、1B、1C 发动机的钛合金铸件供应商。钛合金精密铸件的大量使用减少了航空发动机螺栓机械连接的数量,降低了制造成本和工艺难度,提升了机体寿命。

除了常规钛合金精密铸件外, TiAl 合金精密铸件在航空飞行器上的应用也有较大突破。早在 20 世纪 90 年代, NASA 民用超音速飞机的发动机排气喷嘴翼板和支撑梁便采用熔模铸造 TiAl 合金打造。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-4822 应用到 GE 公司最新一代发动机 GEnx 低压涡轮的最后 2 级叶片上,并陆续装配波音 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 kg。中国科学院金属所、北京航材院、西北工业大学、哈尔滨工业大学研制了 TiAl 合金扩压器、叶片和增压器涡轮等铸件<sup>[64]</sup>。中国科学院金属所生产的 45XD 合金低压涡轮叶片已完成英国罗·罗公司的 Trent XWB 大推力、大涵道比发动机考核验证,未来还将用于国产大飞机 C919 的长江发动机上。沈阳铸造研究所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<sup>[65]</sup>。

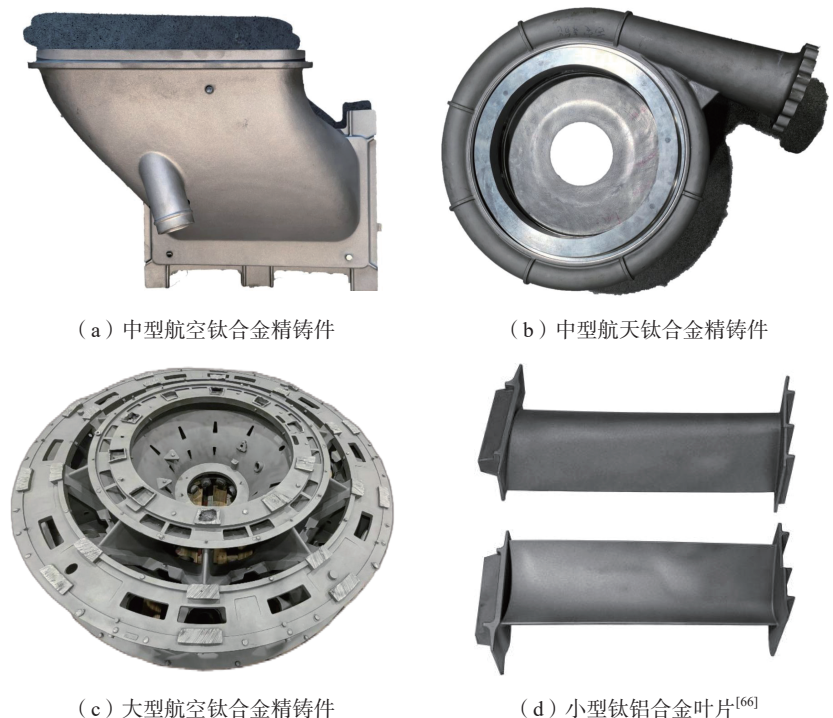
钛合金在低温条件下保持了较高的强度、韧性,其耐疲劳、无磁性等特性满足宇宙空间极端服役环境要

求,因此在航天飞行器上也有较多应用。钛合金铸件在导弹上使用比较普遍,有尾翼、弹头壳体、火箭壳体及连接座等。航天飞行器和人造卫星使用的钛合金铸件主要是一些支座、板架与接头等结构件和人造卫星上照相机框架等。图 8 所示为几种典型的航空航天飞行器用钛合金精密铸件<sup>[66]</sup>。

### 4 结论与展望

本文综述了近年来钛合金精密铸造技术、材料和产品在航空航天领域的应用进展。我国在铸造钛合金材料开发上已走在世界前列,钛合金精密铸造技术基本实现国产化,并大批量应用于航空航天飞行器关键结构件上;但是我国钛合金精密铸造技术企业与美国先进精密铸造企业相比仍有一定差距,钛合金精铸件应用方面也存在一些亟待解决的难题。

(1) 新型铸造钛合金推广应用迟缓。目前航空航天领域应用最广泛的铸造钛合金仍为 ZTC4 和 ZTA15



(a) 中型航空钛合金精铸件

(b) 中型航天钛合金精铸件

(c) 大型航空钛合金精铸件

(d) 小型钛铝合金叶片<sup>[66]</sup>

图 8 航空航天飞行器用典型钛合金精密铸件

Fig.8 Typical titanium alloy investment castings for aerospace aircraft

两种,新型铸造钛合金如 ZTi65、TiAl 合金等的应用仍未取得突破性进展。新型铸造钛合金一般从锻造钛合金成分改良而来,锻造工艺性能和力学性能数据无法适用于铸造,开发新型铸造钛合金精密铸件的周期长、成本高、应用范围较窄,这些因素都制约了新型铸造钛合金的推广应用。

(2) 钛合金精密铸造生产成本下降难。精密铸造原材料、技术和市场共同作用导致成本难以下降,钛合金型壳材料价格昂贵且为一次性使用,真空熔炼环节对设备要求高,且生产效率较低,铸件结构日趋复杂化、多流程工艺控制难,导致铸件良品率低。企业获得国家重大项目订单存在较高的技术壁垒和资质壁垒,研发成本居高不下,投入产出回报周期长。

(3) 钛合金精密铸造模拟仿真技术落后。目前钛合金精密铸造的模拟仿真技术还存在国产软件使用率低,国外模拟仿真软件垄断等问题。此外,大量铸造生产过程参数无法直接测量,或测量准确性差,模拟仿真工艺参数与实际生产的工艺参数不匹配,材料基础数据库更新与新材料开发进展严重脱节,铸造模拟仿真人才匮乏,仿真软件使用和二次开发等进展缓慢。

(4) 钛合金增材制造崛起的强力竞争。与精密铸造类似,钛合金增材制造也是近净成形技术,而且成形精度高、生产周期短、强度高,目前已经在航空航天领域得到了一定应用。虽然很长时间内受粉体价格高、产能不足等问题所限,增材制造的价格比精密铸造更高,市场推广应用受阻,但随粉体价格的不断下探、设备供给日益充足,增材制造钛合金零部件的市场竞争力逐渐显现。

为解决我国钛合金精密铸造发展中存在的难题,提升钛合金精密铸造的应用水平,可以从如下几个方面进行改进。

(1) 建立新型铸造钛合金成分-铸造性能-力学性能数据库。通过对影响合金流动性的热物理参数进行热力学计算、数值模拟试验,结合流动性验证试验,获得有利于提高流动性的成分。通过高通量第一性原理计算,建立合金基本物性及电子特征参量数据库,结合数据挖掘与机器学习技术,获得不同力学性能梯度的合金成分并开展浇注验证。耦合提高铸造性能和力学性能的影响机制,从成分设计到试验验证,再到综合优化,逐步建立合金成分-铸造性能-力学性能数据库。

(2) 利用数字孪生技术降低生产成本。对现有设备进行数字化改造,量化蜡模、模壳和铸件质量,开展工艺数据统计、精细化成本计算。在大批量铸件产品工艺、质量数据基础上,研究铸造全流程关键工艺参数对铸件表面质量、尺寸精度、力学性能的影响规律,利用数字孪生技术进行关键工艺参数的智能决策,辅助新产品铸造工艺开发,从而缩短新产品研发周期、降低废品率,进而降低生产成本。

(3) 大力发展国产铸造模拟软件。铸造模拟软件是铸造行业的底层基础,目前铸造模拟软件被法国 Procast、韩国 Anycasting 等长期垄断,国产软件由于数据库不足、功能缺失、预测准确度差,市场渗透率较低。我国应大力发展国产铸造模拟软件,通过软件公司-铸造企业-高等院校联合攻关,开发及优化核心算法,完善铸造材料数据库,培养专业人才队伍,合力提升国产铸造模拟软件的技术水平。

## 参考文献

- [1] 陆子川,张绪虎,微石,等. 航天用钛合金及其精密成形技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(4): 1-7.
- LU Zichuan, ZHANG Xuhu, WEI Shi, et al. Research progresses of titanium alloys and relevant

precision forming technology for the aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(4): 1-7.

[2] NAJAFIZADEH M, YAZDI S, BOZORG M, et al. Classification and applications of titanium and its alloys: A review[J]. Journal of Alloys and Compounds Communications, 2024, 3: 100019.

[3] 王前,秦翔阳,刘晓宇,等. 热积累对不同特征尺寸TA15钛合金选区激光熔化组织的影响[J]. 铸造技术, 2022, 43(11): 964-969.

WANG Qian, QIN Xiangyang, LIU Xiaoyu, et al. Effect of heat accumulation during selective laser melting on the microstructure of TA15 titanium alloy with different geometry characteristics[J]. Foundry Technology, 2022, 43(11): 964-969.

[4] 沈昀,郑功,冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 54-62.

SHEN Yun, ZHENG Gong, FENG Chenming. Research progress of investment casting technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(1): 54-62.

[5] 吕维洁,张荻,韩远飞,等. 耐热钛基复合材料制备加工及应用综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(4): 38-47, 71.

LÜ Weijie, ZHANG Di, HAN Yuanfei, et al. A review of fabrication, processing and application of heat-resistant titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(4): 38-47, 71.

[6] 王冰,相志磊,周宗熠,等. 耐600℃及以上高温钛合金研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(2): 42-50, 71.

WANG Bing, XIANG Zhilei, ZHOU Zongyi, et al. Research status and prospect of titanium alloys resistant to high temperature of 600 °C and above[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(2): 42-50, 71.

[7] RAJI SA, POPOOLA A P I, PITAYANA S L, et al. Characteristic effects of alloying elements on  $\beta$  solidifying titanium aluminides: A review[J]. Heliyon, 2020, 6(7): e04463.

[8] American Casting Company. Investment casting process steps (lost wax)[EB/OL]. [2024-11-20]. <https://americancastingco.com/investment-casting-process/>.

[9] CANNELL N, SABAU A S. Predicting pattern tooling and casting dimensions for investment casting, phase II[R]. United States: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2005.

[10] 尤畅,程姣姣,史昆,等. 两种添加

剂对石蜡-硬脂酸蜡料性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 566-571.

YOU Chang, CHENG Jiaojiao, SHI Kun, et al. Effects of two additives on properties of paraffin-stearic acid pattern[J]. Materials Reports, 2024, 38(S1): 566-571.

[11] 程姣姣. 模料特性对钛合金铸造质量的影响及配方优化[D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2022.

CHENG Jiaojiao. Influence of mold material characteristics on casting quality of titanium alloy and formula optimization[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2022.

[12] 孙旋. 增材制造技术在精密铸造熔模制备中的应用[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2781-2783, 2786.

SUN Xuan. Application of additive manufacturing technology in the application of precision casting investment preparation[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2781-2783, 2786.

[13] BANDYOPADHYAY A, BOSE S. Additive manufacturing[M]. Ohio: CRC Press, 2015.

[14] 樊自田, 杨力, 唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用[J]. 铸造, 2022, 71(1): 1-16.

FAN Zitian, YANG Li, TANG Shiyan. Additive manufacturing technology and its application to casting[J]. Foundry, 2022, 71(1): 1-16.

[15] 胡可辉, 赵鹏程, 吕志刚. 光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用[J]. 铸造, 2021, 70(2): 155-159.

HU Kehui, ZHAO Pengcheng, LÜ Zhigang. Application of stereolithography technology to investment casting[J]. Foundry, 2021, 70(2): 155-159.

[16] 李婷. 钛合金熔模铸造用氧化物陶瓷型壳的制备工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

LI Ting. Study on preparation technology of oxide ceramic shell for titanium alloy investment casting[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[17] 王迪, 李九霄, 董安平, 等. 熔模铸造型壳用材料研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 205-216.

WANG Di, LI Jiuxiao, DONG Anping, et al. Research progress of materials for investment casting molding shells[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 205-216.

[18] 刘云超, 李弘, 刘珍君, 等. ZTi60钛合金大型构件熔模精铸工艺及组织性能研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 994-1003.

LIU Yunchao, LI Hong, LIU Zhenjun, et al. Study on the investment casting process, microstructure and mechanical properties of large-sized structural components in ZTi60 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 994-1003.

[19] FASHU S, LOTOTSKYY M, DAVIDS M W, et al. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108295.

[20] DUAN B H, MAO L, LÜ M R, et al. Interface interaction during the preparation of TiAl-(Nb,V) quaternary intermetallic single crystals by directional solidification based on Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped BaZrO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramic mold[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(11): 5032-5043.

[21] CHEN G Y, GAO P Y, KANG J Y, et al. Improved stability of BaZrO<sub>3</sub> refractory with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive and its interaction with titanium melts[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 403-409.

[22] 陈晓明, 张爱博, 侯斌, 等. 钛合金铸造用金属铸型研究[J]. 铸造, 2022, 71(10): 1289-1294.

CHEN Xiaoming, ZHANG Aibo, HOU Bin, et al. Research on metal mold technology for titanium alloy casting[J]. Foundry, 2022, 71(10): 1289-1294.

[23] 常化强, 孙冰, 孙宏喆, 等. 涂层在钛合金金属型铸造中的应用研究[J]. 铸造工程, 2023, 47(4): 1-4.

CHANG Huaqiang, SUN Bing, SUN Hongzhe, et al. Application of coating technology on metal mold casting of titanium alloy[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(4): 1-4.

[24] GÜTHER V, ALLEN M, KLOSE J, et al. Metallurgical processing of titanium aluminides on industrial scale[J]. Intermetallics, 2018, 103: 12-22.

[25] CHAMORRO X, HERRERO-DORCA N, BERNAL D, et al. Induction skull melting of Ti-6Al-4V: Process control and efficiency optimization[J]. Metals, 2019, 9(5): 539.

[26] 严建强, 白志宇, 张志勇, 等. 真空感应悬浮熔炼技术在高纯材料制备中的应用[J]. 铸造, 2024, 73(2): 253-256.

YAN Jianqiang, BAI Zhiyu, ZHANG Zhiyong, et al. Application of vacuum induction suspension melting technology in the preparation of high-purity materials[J]. Foundry, 2024, 73(2): 253-256.

[27] 王晨旭, 丁鑫, 王新秀, 等. 立式离心浇注精密铸造技术研究进展[J]. 铸造技术,

2024, 45(10): 932-944.

WANG Chenxu, DING Xin, WANG Xinxiu, et al. Research progress in vertical centrifugal casting precision casting technology[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 932-944.

[28] 樊洪智, 董红瑞, 赵天闻, 等. TiAl合金叶片类构件成形工艺研究进展[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(8): 1-13.

FAN Hongzhi, DONG Hongrui, ZHAO Tianwen, et al. Research progress on forming process of TiAl alloy blade components[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(8): 1-13.

[29] 贾国成, 麻毅, 常化强, 等. 倾斜式离心铸造对钛合金铸件质量的优化[J]. 铸造技术, 2022, 43(5): 385-388.

JIA Guocheng, MA Yi, CHANG Huaqiang, et al. Quality optimization of titanium alloy castings by inclined centrifugal casting[J]. Foundry Technology, 2022, 43(5): 385-388.

[30] 朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.

ZHU Xiaoping. Study on integral casting technology of large weight and high precision complex titanium alloy casing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[31] 陈凯, 田雪勇, 石鹏. 不同热处理状态ZTC4的铸件组织演变与性能研究[J]. 铸造工程, 2023, 47(S1): 13-17.

CHEN Kai, TIAN Xueyong, SHI Peng. Study on the microstructure evolution and properties of ZTC4 castings in different heat treatment states[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(S1): 13-17.

[32] 赵红霞, 南海, 沙爱学. 铸造钛合金BT22与ZTC4的组织性能对比分析[J]. 铸造工程, 2022, 46(5): 1-5.

ZHAO Hongxia, NAN Hai, SHA Aixue. Comparisons of structures and properties between cast titanium alloy BT22 and ZTC4[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(5): 1-5.

[33] 刘小花, 范李鹏, 张利军, 等. 固溶时效对铸造Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-2Nb钛合金组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 328-331.

LIU Xiaohua, FAN Lipeng, ZHANG Lijun, et al. Effects of solution-aging heat treatment on microstructures and properties of cast Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-2Nb titanium alloy[J]. Materials Reports, 2022, 36(S2): 328-331.

[34] 王红红, 刘振军, 王红. 钛合金铸件的应用及发展[J]. 新材料产业, 2009(11): 25-30.

WANG Honghong, LIU Zhenjun, WANG Hong. Application and development of titanium

alloy castings[J]. *Advanced Materials Industry*, 2009(11): 25–30.

[35] XU Q, LI W, YIN Y J, et al. Effect of hot isostatic pressing on the cast Ti6Al4V alloy with shrinkage cavities inside: Healing behavior, microstructure evolution and tensile property[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142496.

[36] 李广东, 石岳良. 铸造钛合金补焊技术研究进展[J]. *精密成形工程*, 2018, 10(3): 105–109.

LI Guangdong, SHI Yueliang. Progress in research on cast titanium alloy welding repair[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2018, 10(3): 105–109.

[37] 闫飞昊, 王岗, 范金伟, 等. 高温钛合金焊接研究现状及展望[J]. *材料开发与应用*, 2021, 36(6): 97–102.

YAN Feihao, WANG Gang, FAN Jinwei, et al. Review and prospect of high temperature titanium alloy welding[J]. *Development and Application of Materials*, 2021, 36(6): 97–102.

[38] 汪欣朝, 杜坤, 王毅, 等. 基于机器视觉的钛合金焊接过程非平衡凝固组织性能智能控制[J]. *铸造技术*, 2023, 44(2): 169–184.

WANG Xinzhaoh, DU Kun, WANG Yi, et al. Graphic learning enabled intelligent optimizations of the non-equilibrium solidified microstructure and properties of welded titanium alloy[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(2): 169–184.

[39] ZHAO E T, SUN S C, ZHANG Y. Recent advances in silicon containing high temperature titanium alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 3029–3042.

[40] DAI J J, ZHU J Y, CHEN C Z, et al. High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 685: 784–798.

[41] ZHANG J, ZHANG X W, WANG H W, et al. Study on improving the fluidity of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy[J]. *Calphad*, 2023, 83: 102621.

[42] 袁璐恺, 王理林, 丁汉林, 等. 激光直接能量沉积Ti6242S–0.75Ni–1.65Fe–0.05B合金的组织及力学性能各向异性研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(3): 233–239.

YUAN Lukai, WANG Lilin, DING Hanlin, et al. Study on the microstructure and mechanical property anisotropy of Ti6242S–0.75Ni–1.65Fe–0.05B alloy by laser direct energy deposition[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(3): 233–239.

[43] 戚运莲, 曾立英, 侯智敏, 等. 微量元素对ZTC4显微组织与力学性能影响[J]. 铸

造, 2014, 63(11): 1102–1105.

QI Yunlian, ZENG Liying, HOU Zhimin, et al. Effect of trace element on the microstructure and mechanical properties of as-cast ZTC4[J]. *Foundry*, 2014, 63(11): 1102–1105.

[44] ZHANG L B, WANG K Z, XU L J, et al. Effect of Nb addition on microstructure, mechanical properties and castability of  $\beta$ -type Ti-Mo alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(7): 2214–2220.

[45] LI J, JEFFS S, WHITTAKER M, et al. Boride formation behaviour and their effect on tensile ductility in cast TiAl-based alloys[J]. *Materials & Design*, 2020, 195: 109064.

[46] 刘宏宇, 赵军, 谢华生, 等. 气体元素对ZTC4铸造钛合金力学性能的影响[J]. *铸造*, 2012, 61(9): 1006–1008, 1014.

LIU Hongyu, ZHAO Jun, XIE Huasheng, et al. Effect of gas elements on mechanical properties of ZTC4 cast titanium alloy[J]. *Foundry*, 2012, 61(9): 1006–1008, 1014.

[47] 梁恩泉, 黄森森, 马英杰, 等. Fe对Ti–6Al–4V ELI合金力学性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(4): 299–306.

LIANG Enquan, HUANG Sensen, MA Yingjie, et al. The influence of Fe on the mechanical properties of Ti–6Al–4V ELI alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(4): 299–306.

[48] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 1–26.

WANG Qingjiang, LIU Jianrong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(4): 1–26.

[49] 闫平, 王利, 赵军, 等. 高强度铸造钛合金的应用及发展[J]. *铸造*, 2007, 56(5): 451–454.

YAN Ping, WANG Li, ZHAO Jun, et al. Development and applications of the high-strength cast titanium alloy[J]. *Foundry*, 2007, 56(5): 451–454.

[50] PERRUT M, CARON P, THOMAS M, et al. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2018, 19(8): 657–671.

[51] ZHANG H Y, YAN N, LIANG H Y, et al. Phase transformation and microstructure control of Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloys: A review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 80: 203–216.

[52] SUI X C, LIN J, CHENG S, et

al. Controlling the tensile properties of a high-strength-ductility Ti<sub>2</sub>AlNb alloy by hot rolling[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 1846–1859.

[53] WANG W, ZENG W D, LI D, et al. Microstructural evolution and tensile behavior of Ti<sub>2</sub>AlNb alloys based  $\alpha_2$ -phase decomposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 662: 120–128.

[54] XIA Z Z, CUI Y Y, SHEN Y Y, et al. Tensile properties of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy having similarly oriented lamellae with fine lamellar spacing facilitated by suction casting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830: 142303.

[55] GAO Z T, YANG J R, WU Y L, et al. A newly generated nearly lamellar microstructure in cast Ti–48Al–2Nb–2Cr alloy for high-temperature strengthening[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(12): 5839–5852.

[56] SCHWAIGHOFER E, CLEMENS H, MAYER S, et al. Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. *Intermetallics*, 2014, 44: 128–140.

[57] CHLUPOVÁ A, HECZKO M, OBRTLÍK K, et al. Mechanical properties of high niobium TiAl alloys doped with Mo and C[J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 284–292.

[58] BURTSCHER M, KLEIN T, LINDEMANN J, et al. An advanced TiAl alloy for high-performance racing applications[J]. *Materials*, 2020, 13(21): 4720.

[59] GENCO, UNAL R. Development of gamma titanium aluminide ( $\gamma$ -TiAl) alloys: A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 929: 167262.

[60] 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): 18–21.

WEI Zhanlei, REN Guijuan, LI Jianchong, et al. Contraction characteristics of Ti–48Al–2Nb–2Cr casting alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2018, 10(3): 18–21.

[61] 樊江磊, 梁柳博, 李莹, 等. TiAl合金熔体与铸型界面反应研究进展[J]. *轻工学报*, 2020, 35(6): 68–83.

FAN Jianglei, LIANG Liubo, LI Ying, et al. Research status of interfacial reaction between TiAl alloy melt and mold materials[J]. *Journal of Light Industry*, 2020, 35(6): 68–83.

[62] 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(3): 4129–4139.

[63] 黄东, 魏战雷, 朱郎平, 等. 热等静压对Ti<sub>2</sub>AlNb合金组织和力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38(8): 835–837.

HUANG Dong, WEI Zhanlei, ZHU Langping, et al. Influence of HIP process on mechanical properties of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy castings[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(8): 835–837.

[64] 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.

[65] 谢华生, 刘时兵, 赵军, 等. TiAl合金精密成形技术发展现状及展望[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(1): 44–54.

XIE Huasheng, LIU Shibing, ZHAO Jun, et al. Development status and prospect of precision forming technology for TiAl alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(1): 44–54.

[66] HARDING R A, WICKINS M, WANG H, et al. Development of a turbulence-free casting technique for titanium aluminides[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(6): 805–813.

通信作者: 李金山, 教授, 博士, 主要从事航空航天高性能金属结构材料及其精确热成形技术的研究。

## Application Progress of Titanium Alloys Investment Casting in Aerospace Industry

ZHANG Pengfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Linjia<sup>1,3</sup>, ZHOU Yu<sup>4</sup>, SUN Feng<sup>4</sup>, WANG Jun<sup>1,4</sup>, LI Jinshan<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC Guizhou Liyang Aero Engine Co., Ltd., Guiyang 550014, China;

3. Military Representative Office of Guangzhou Bureau of Naval Equipment Department in Guiyang, Guiyang 550081, China;

4. Chongqing Innovation Center, Northwestern Polytechnical University, Chongqing 401135, China)

**[ABSTRACT]** Titanium alloy investment castings have the advantages of high specific strength, corrosion resistance and heat resistance, as well as the advantages of high dimensional accuracy and low production cost. They have been widely used in key structural parts in the aerospace field. In order to promote the continuous improvement of domestic titanium alloy investment casting technology and the further application of titanium alloy investment casting products, this paper reviewed the application and development of titanium alloy investment casting technology in the aerospace field in recent years. Meanwhile, the titanium alloy investment casting process, high-temperature casting titanium alloys and the development progress of titanium alloy investment casting products are highlighted. The review for investment casting process focused on the key procedures of wax mold making, shell making, casting and post treatments. The review for high-temperature casting titanium alloys highlighted TC4, high-temperature near- $\alpha$  titanium alloys and intermetallic titanium aluminide alloys. The review for titanium alloy investment casting products mainly referred to structural parts of aerospace vehicle engines. Finally, the key issues existing in the domestic titanium alloy investment casting technology and application are summarized. Subsequently, the prospects of establishing a material database, reducing production costs, and developing casting simulation software are proposed.

**Keywords:** Titanium alloys; TiAl alloy; Investment casting; Precision forming; Ti<sub>2</sub>AlNb alloy

(责编 大漠)