

熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势

樊振中^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;
2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095)

[摘要] 介绍了熔模精密铸造技术在航空航天军工装备、民用航空以及商业航天领域的应用, 详细介绍了国内外高温合金、钛合金、铝合金与镁合金熔模精密技术的研究现状与发展情况, 侧重介绍了北京航空材料研究院近年来在该领域取得的研究成果, 对比阐述了熔模精密铸造技术与增材制造、半固态成形、注射成形等新型工艺技术, 展望了熔模精密铸造技术的未来研究方向与热点。

关键词: 熔模精密铸造; 航空航天; 高温合金; 钛合金; 铝合金; 镁合金

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.038



樊振中

博士, 高级工程师, 研究方向为新型轻质合金材料研制与大型复杂构件一体化精密成形制造。参与了某发动机型号攻关项目-发动机粒子分离器主机匣、前机匣铸件研制, 某型号攻关项目-大型整体铝合金铸件研制等多项科研课题; 负责主持了铝合金铸造工艺专家系统开发、高铁齿轮箱铸件研制等多项生产研发课题; 申请技术秘密 12 项、国家发明专利 10 项、发表学术论文 50 余篇, 其中 SCI、EI 录用 10 余篇。

一体化轻量设计、低成本批量制造、结构特性日趋复杂已成为国内外航空航天军工装备发展的统一趋势^[1-2]。传统的砂型铸造无法实现复杂构件的精准成形; 金属型铸造、V 法铸造当前只适宜于结构简单部件(环状结构、锥状结构、框架类结构等)的批量化制造; 压力铸造(高压)虽在轨道交通领域应用广泛, 但其内部组织较之其他成形工艺。疏松、气孔缺陷严重; 石膏型铸造由于铸型导热系数偏低, 产品整体机械力学性能不高; 综合批量制造成本、产品生产周期、结构精准化成形, 对比各种凝固成形制造工艺, 熔模精密铸造是最优化匹配的成形工艺, 同时可通过材料体系选择, 实现结构部件的材料减重与结构减重双向轻量化设计^[3-4]。

熔模精密铸造工艺路线如图 1 所示。产品的组织性能与外观尺寸等受控于制造工艺与精密成形过程。在传统理论与工艺方法的基础上, 当

前熔模精密铸造技术与数值仿真计算分析、可溶性型芯材料、设备自动化控制、激光增材制造等先进技术相结合, 向“温度-组织-应力应变”理论指导、生产过程自动化控制和一体化整体制造精确成形方向不断发展。

高温合金、钛合金、铝合金与镁合金是航空航天军工装备领域复杂服役环境与轻量化制造的首选金属材料体系, 起主要承载作用。所制造产品的组织性能、结构尺寸和服役寿命直接决定了武器装备的服役寿命、制造成本、结构可靠性、重量设计系数等多项性能指标。因此, 熔模精密铸造技术是先进航空航天武器装备、商业航天、民用航空等领域产品长寿命、低成本、轻量化、精密化成形发展方向的技术基础支撑^[5-7]。

在我国, 当前熔模精密铸造技术的发展对于“两机专项(航空发动机和燃气轮机)”工程的建设具有重要的战略意义。我国已明确提出了大

涵道比大型涡扇航空发动机、F级及G/H级重型燃气轮机等重点型号的研制路线图,对应的高温涡轮叶片、大型整体铸造机匣等高难度熔模精密铸件的研制将是型号成功的重要前提^[8]。

熔模精密铸造技术的研究应用

近年来,欧美日等工业发达国家对熔模精密铸造工艺不断开展了新工艺、新材料与新技术的研究,对成形基础理论不断进行完善,并在此基础上开发出了新的工艺制造技术^[9-11]。采用熔模精密铸造技术研制出了大量结构复杂、组织性能优异、一体化整体成形的精密部件,广泛应用于航空武器与航天装备中,提高了服役部件的整体结构刚度、服役可靠性,产品制造周期明显缩短,结构总重与制造周期显著降低,满足了大量型号武器装备的生产研制与批量化列装。

目前,国外导弹武器型号中的转轮、喷气罩、悬挂拨叉,航天零部件中的转轮、增压泵、增压泵护圈等广泛选用了高温合金与钛合金精密熔模铸件^[7]。图2为航空用高温合金典型结构件示意图。图3为美国PCC公司采用熔模精密铸造生产的波音737-FAD舱门铸件,最薄处壁厚仅为1.6mm。图4为应用于普拉特·惠特尼公司PW800航空发动机的镁合金机匣精密铸件,总重仅为22kg。精密铸造技术在国外的航空航天领域已得到广泛推广与应用。

金属合金的精密铸造

1 高温合金

高温合金可以在超出600℃高温下以一定的应力长期服役,主要分为Fe基、Ni基、Co基。高温合金通常具备良好的高温强度、抗氧化性、疲劳性能、断裂韧性、塑韧性,还具有优异的组织稳定性与可靠性等综合

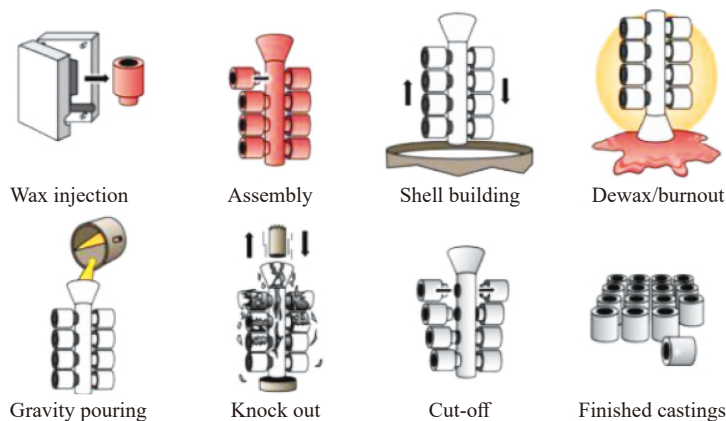


图1 熔模精密铸造工艺路线示意图
Fig.1 Process diagram of investment casting



图2 高温合金典型结构件示意图
Fig.2 Schematic of typical superalloy structural parts



图3 波音737-FAD舱门铸件
Fig.3 Boeing 737-FAD door casting



图4 航空发动机用镁合金铸件
Fig.4 Magnesium alloy castings for aero-engines

性能,国外一般称之为超合金^[12]。自20世纪40年代初期全球第1台航空喷气发动机采用高温合金涡轮工作叶片开始,高温合金材料的发展就与航空发动机结下了不解之缘。高温合金的熔模精密铸造是航空发动机和重型燃气轮机用涡轮叶片的核心制造工艺,是推进“两机专项”工程的关键技术之一。航空发动机领域高温合金的应用主要为“一盘两片”,即涡轮盘(见图5)、涡轮导向器上的导向器叶片和涡轮盘上连接的工作叶片,其中涡轮盘目前主要采用粉末冶金工艺进行研制生产,而导向叶片和工作叶片关键热端部件则主要采用熔模精密铸造进行生产。1958年,我国用于WP-6型发动机导向叶片研制所采用的K401合金是我国的第一个铸造高温合金,由北京航空材料研究院研制;20世纪60年代初通过台架试车考核,由沈阳黎明采用K406合金研制的WP-26S发动机一级涡轮叶片是我国第一个采用精密铸造技术生产的涡轮工作叶片;中科院金属所于20世纪70年代末研制的K417精密铸造镍基高温合金是我国第一个成功批量服役于航线的WP-7型发动机涡轮叶片的高温合金材料^[13]。

英国航空发动机巨头Rolls·Royce公司一直专注于高推重比发动机热端部件壁冷和层板单晶叶片的设计与制造技术,20世纪90年代相继完成了高效气冷叶片冷却系统的设计、材料和制造技术,通过了发动机的全寿命考核评价。美国Howmet公司联合Rolls·Royce公司在双性能整体叶盘材料体系与工艺技术上开展了大量的研究工作,于20世纪末研发了成熟完善的配套精密铸造技术与相关工艺设备,成功制造出了定向柱晶叶片和等轴晶轮盘相匹配的整体叶盘,与之配装的发动机服役寿命提高了2~3倍,输出功率提升了7.3%~9.2%^[14]。Allision公司

在20世纪90年代末期生产出了高冷效单晶层板合金涡轮叶片,借助于铸冷技术一次性精确成形制造了超气冷单晶叶片。俄罗斯土星科研生产联合体借助可溶性型芯技术,采用熔模精密铸造工艺实现了高效气冷单晶空心叶片的批量化生产,成功应用于AL-31FN发动机上(见图6)。Carret与PCC公司在20世纪末突破了大型薄壁复杂高温合金精密铸件的“冶金-晶粒-组织”原位复合控制技术,采用该技术精确成形制造的发动机机匣精密铸件,最大成形尺寸为1027mm,壁厚可达0.8~1.2mm,晶粒度可控制在1.0~5.0mm,材料利用率提高了50%以上。目前,国外已形成了多孔层板合金件、多孔层板合金铸造的单晶叶片、超气冷空心叶片、微叠层复合材料叶片以及相应的发散冷却(Lamilloy)、铸冷(Cast Cool)、超气冷(Super Cooling)等用于超级气冷空心叶片制造的新技术^[12]。

高温合金熔模精密铸造的核心技术在于型芯型壳材料体系的优化与制备工艺。我国高温合金熔模精密铸造起始于20世纪50年代从苏联引进的石蜡-硬脂酸模料和水玻璃-石英型壳加矾土水泥的湿法造型工艺。1965年,北京航空材料研究院采用该工艺成功浇铸出了WP-6发动机高温合金涡轮叶片,随后北京航空材料研究院连续开发出

了石英砂-水玻璃系、氧化铝-硅酸乙酯系、氧化铝-硅溶胶系、铝矾土-硅溶胶系以及高岭土熟料-硅溶胶系型壳,于1966年采用K147铸造高温合金、多层壳型和石英玻璃管型芯工艺浇铸出带冠9小孔空心涡轮叶片(见图7),用于WP-7发动机,从此揭开我国熔模精密铸造空心涡轮叶片的历史^[12]。1975年,我国从英国引进了斯贝航空发动机的制造技术,在消化吸收过程中实现了熔模精密铸造工艺材料的国产化,并于20世纪70年代末期成功浇铸出了低压一级空心导向叶片,实现了航空发动机涡轮叶片从实心到空心,再到复杂内腔一次性精准成形制造^[15-16]。在定向、单晶叶片方面,北京航空材料研究院采用Al-Si-Ca与Al-Si-Mg作矿化剂,成功研制出了811A、811B、811C系列陶瓷型壳,可在1550~1600℃下稳定工作1~2h,可



图5 粉末涡轮盘结构示意图
Fig.5 Structure diagram of powder turbine disk



图6 俄罗斯AL-31FN航空发动机
Fig.6 Russian AL-31FN aero-engine

用于成形制造 150mm×600mm 的大型复杂等轴晶叶片,最小成形壁厚达 0.3~0.6mm,精密铸件表面粗糙度 R_a 可达到 1.6 μ m,型面轮廓精度为 ± 0.13 mm,保证了各种叶片精密铸造生产的工艺技术要求,满足了定向空心无余量涡轮叶片、单晶叶片、等轴晶叶片的成功研制(见图 8)。沈阳铸造研究所以 ASM-Cr 作矿化剂,以低钠硅溶胶作黏结剂,电熔刚玉作耐火粉料,制备出了耐高温且强度更高的莫来石-刚玉型壳,可用于高熔点单晶高温合金叶片的精密成形制造^[17]。北京航空材料研究院与中科院金属所在大尺寸叶片细晶整体制备技术方面近年来也不断取得突破,成功制造了 ϕ 380mm 细晶整体叶盘(见图 9~10),轮毂部位晶粒度为 ASTM 2~3 级,叶片部位晶粒度为 ASTM 3~5 级,实现了起动机叶轮因发动机叶盘叶片断裂而失效的技术瓶颈的突破,细晶整体叶盘的服役寿命得到了显著提高^[18-19]。型芯方面国内用于高温合金熔模精密铸造的型芯主要为 XD 系锆英-石英玻璃陶瓷型芯、AC 系氧化铝陶瓷型芯、BRA 系氧化铝基陶瓷型芯。北京航空材料研究院通过添加新型超细纳米矿化剂实现了耐 1500~1620℃ 陶瓷型芯的一次性完整烧结成形,收缩率控制在 0.4% 左右,结合以莫来石为主强化相的 $Al_2O_3-SiO_2-Na_2O$ 系耐高温陶瓷型壳,制备了双层壁结构的陶瓷型芯/型壳,成功实现了双层壁结构单晶叶片的精密铸造成形,如

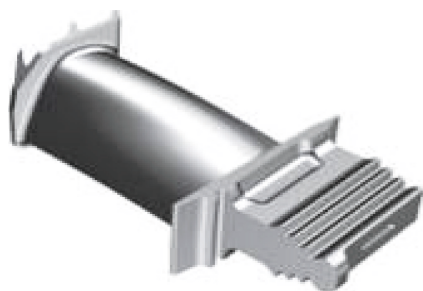


图7 空心涡轮叶片
Fig.7 Hollow turbine blade

图 11 所示。近年来,北京航空材料研究院在单晶叶片工艺方面形成了自主特色的双取向控制法。

2 钛合金

美国于 20 世纪 60 年代开始研究钛合金熔模精密铸造技术,相继完

成了熔模陶瓷型壳、石墨型铸型机械加工与 HIP 热等静压等技术,并得到了广泛应用。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

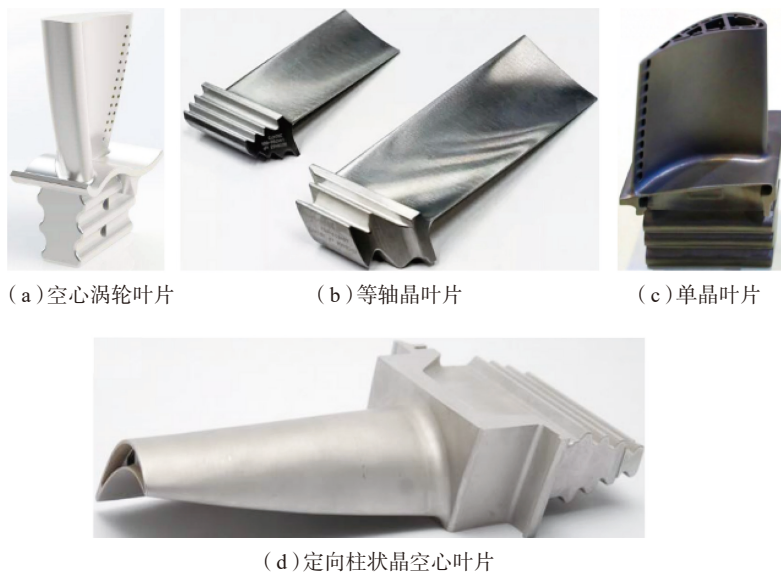


图8 典型叶片结构示意图

Fig.8 Typical structure diagram of blades



图9 细晶整体叶盘

Fig.9 Leaf disk with fine grain

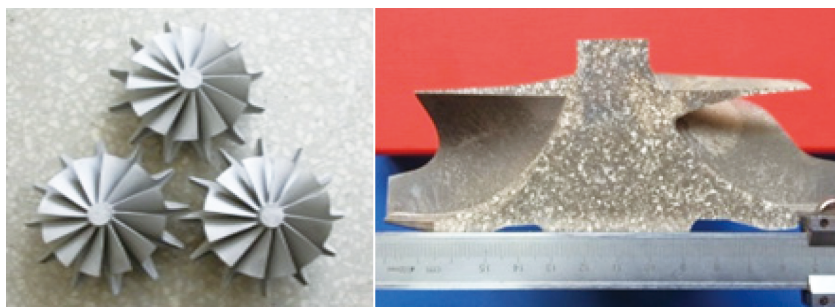


图10 细晶整体叶盘剖分组织

Fig.10 Split organization of leaf disk with fine grain

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,如采用 Ti-6Al-4V 钛合金研制的 CF6-80 发动机安装吊架精密铸件,经受了长期服役考核,运行情况一直较为良好^[20]。美国 CF6-80C2 发动机整体钛合金中介机匣采用熔模精密铸造生产,整体轮廓尺寸达 $\phi 1300\text{mm} \times 368\text{mm}$ 。美国 PCC 公司制造的 GE90 发动机风扇轮毂,直径达 2000mm,最小壁厚为 1.0~2.0mm,尺寸公差为 $\pm 0.13\text{mm}$ 。PCC 公司还采用熔模精密铸造制备了 C-17 飞机的燃烧室前部铸件,长度为 760mm,宽度为 1.25mm,代替了 17 个部件,节约成本超过 40%(见图 12)。图 13 为一个典型的钛合金铸造机匣,直径为 782mm,质量为 82kg。目前全球最大的双引擎宽体客机波音 777 发动机后安装框架采用了钛合金精密铸件,实现了钛合金精密铸件在民机使用上的零突破,鉴于客机较高安全可靠性的使用要求,因此,具有十分重要的意义。英国

Doncasters 公司采用离心熔模铸造技术制造的钛合金刹车扭力管用于 A380 客机,这是欧洲首次采用钛合金刹车扭力管精铸件取代以往的锻件^[21-22]。目前国内从事钛合金精密铸造研究的科研单位主要有中国航发北京航空材料研究院、中国科学研究院沈阳金属研究所、中国机械科学院沈阳铸造研究所、西北工业大学、华中科技大学、北京航空航天大学、中国航天科工三院、哈尔滨工业大学等单位^[23]。图 14 为北京航空材料研究院采用熔模精密铸造生产的复杂框架结构钛合金铸件,结构尺寸为 $630\text{mm} \times 300\text{mm} \times 130\text{mm}$ 。北京航空材料研究院的王红红在 2012 年成功制备出了钛合金机匣精密铸件,直径为 1200mm,是当今亚洲最大的钛合金精密铸件。美军四代战机 F-22 也大量采用了钛合金精密铸件,机体内部使用的钛合金精密铸件总数量约为 54 个,其中总重最大的两个钛合金精密铸件分别为机翼前、后侧位铸件,总重分别约为 87kg 与 58kg^[6]。

我国歼 20 也大量采用了钛合金精密铸件,其中尾翼垂尾采用钛合金整体精密铸造制成。

我国钛合金熔模精密铸造技术起始于 20 世纪 60 年代,1967 年,北京航空材料研究院研究出了钛合金熔模精密铸造石墨型壳系统,相继浇铸出了航空涡扇发动机 0 级风扇空心叶片和飞机用空调增压器叶轮。1981~1984 年期间,我国从德国 TiAl 公司引进了全套的钛合金熔模精密铸造面层陶瓷型壳的制造技术,并于 1987 年实现了材料体系与工艺设备的全面国产化,国内引进成立的贵州安吉航空精密铸造有限公司还形成了专业化大型钛合金熔模精密铸造生产能力。面层型壳是钛合金熔模精密铸造的技术关键之一,主要包括耐火材料与黏结剂的选择,以及涂料和制壳工艺。钛合金在高温下化学性质极其活泼,几乎可与一切材料发生反应。因此,寻求性能稳定的型芯材料是钛合金熔模精密铸造首要解决的问题。迄今为止,在铸钛工业上使用过的和目前正在使用的钛合金铸造型壳材料主要有:人造石墨、难熔金属(W、Mo、Ta、Nb 等)、特种耐火氧化物(氧化铝、氧化硅基陶瓷型芯)、耐高温碳化物(TiC、ZrC、NbC、SiC、硼化物等);稀土氧化物(ZrO_2 、 Y_2O_3 、CaO)等;而这些材料也是型芯材料研究中的首选材料^[24-25]。

目前,钛合金主要使用惰性氧化物作为面层型壳材料,各种氧化物材料按其对于熔融钛合金的化学稳定性由低到高排列的顺序为: SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、CaO、 ZrO_2 、 Y_2O_3 、 ThO_2 ,目前多采用经过稳定化处理的电熔氧化钇或氧化锆做面层粉料,也可采用氮化硼和氧化钇混合粉料、氧化钙粉料作面层涂料^[25]。用作钛合金熔模铸造用型壳面层和邻面层的材料主要是 ZrO_2 、 Y_2O_3 、 ThO_2 ,少数厂家也选择 CaO、 Al_2O_3 。背层型壳常选用水



图 11 双层壁结构单晶叶片结构剖切示意图
Fig.11 Schematic of double-wall structure of single crystal blade



图 13 钛合金机匣铸件
Fig.13 Titanium receiver casting

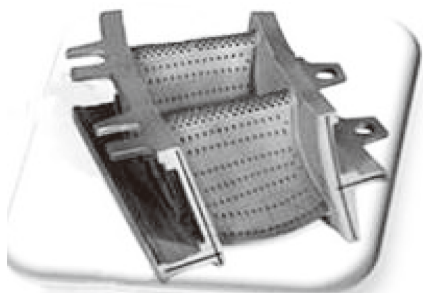


图 12 飞机燃烧室部件
Fig.12 Aircraft combustion chamber components

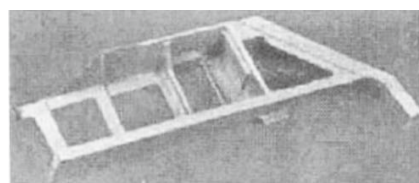


图 14 框架结构钛合金铸件
Fig.14 Frame structural member of titanium alloy as-cast

玻璃、硅酸乙酯等常用熔模铸造黏结剂,面层黏结剂主要使用胶体氧化物类(如胶体氧化锆、胶体氧化钇等)和金属有机化合物类(如醋酸锆、硝酸锆等),北京航空材料研究院研制出了Gu-1、Gu-3型黏结剂,哈尔滨工业大学1997年开发出了LJ-8型黏结剂,已在国内多种钛合金精密铸件上得到了成功应用。钛合金熔模精密铸造熔炼设备目前主要为真空自耗电级电弧凝壳炉,我国在1962年由北京航空材料研究院首先自行设计制造了全国第一台真空自耗电级电弧凝壳炉,之后又发展出了真空感应组合式水冷铜坩埚凝壳炉。哈尔滨工业大学郭景杰等针对钛合金过热度低、流动性差等问题,对钛合金离心铸造开展了系统的理论与试验验证,目前离心铸造已成为钛合金薄壁复杂构件的熔模精密铸造主流成形制造工艺。

与常规钛合金相比,TiAl基合金密度低,且在服役使用过程中兼有金属材料与陶瓷材料的综合性能,高温比刚度/比刚度高、且具有较佳的抗蠕变与抗氧化能力,近年来已成为钛合金领域的国际研究热点。TiAl基合金主要分为高温TiAl基金属间化合物(高Nb-TiAl合金)和普

通TiAl基金属间化合物,表1为几种典型TiAl基合金的力学性能^[25]。TiAl合金的熔炼主要为凝壳感应熔炼(Induction Skull Melting, ISM)、真空电弧熔炼(Vacuum Arc Melting, VAM)和等离子束熔炼(Plasma Melting, PM)3种方式,日本大同特钢公司与法国TARAMM公司开发的LEVICAST技术有效地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,可实现最小壁厚为0.5mm的钛合金熔模精密铸件的完整成形。国内TiAl合金的制备目前多采用电弧炉与电子束炉,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,具有较为先进的水平^[26-27]。

国外的美国Pratt-Whitney实验室、GE公司、Howmet公司、德国GKSS研究所、汉堡大学、亚琛工大、英国伯明翰大学、欧洲ABB公司、日本IHI公司、东北大学和川崎重工株式会社等多家单位开展了TiAl基合金的研究,并成功地得到了广泛应用。1993年,美国GE公司成功地进行了Ti-47Al-2Cr-2Nb铸造低压涡轮叶片(LPTBs)的模拟飞行试验,将98片TiAl基合金叶片装配到CF6-80C2型商业用途运输航空

器发动机上,经过1000次循环后,叶片没有任何损坏;然后再将7片其他成分的TiAl基合金叶片装上去再经过500次循环,叶片依然完好无损(见图15),这次试验成功是TiAl基合金研究历史上的一个里程碑,此后TiAl基合金精密铸件在航空发动机领域得到了广泛应用^[26]。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就大量选用了Ti-4822的TiAl合金精密铸件^[28]。日本川崎重工株式会社与日本大同特钢联合采用熔模精密铸造方法生产TiAl基合金叶轮,与耐热合金叶轮相比,110000r/min转速可缩短16%,170000r/min转速总耗时可减至原来的74%,证实了TiAl合金的应用优势^[29-33]。北京航空材料研究院联合北京钢铁研究总院、中科院沈阳金属研究所、哈尔滨工业大学、清华大学等国内研究院所与高校针对TiAl金属间化合物的熔模精密铸造也开展了大量研究。北京航空材料研究院与哈尔滨工业大学陈玉勇联合研制的TiAl合金隔栅精密铸件,目前已在航天科工某型导弹上实现了批量生产交付。

3 铝合金

铝合金熔模精密铸件已广泛应用于航空航天发动机、机体结构与机载设备中,力学性能可达350~500MPa,与中强变形铝合金性能相当,采用一体化成形制造,可取

表1 几种典型TiAl合金的性能

Table 1 Properties of several typical TiAl alloys

合金(x%)	屈服强度 /MPa	断裂强度 /MPa	延伸率 /%
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



图15 GE公司TiAl合金涡轮铸件

Fig.15 GE TiAl alloy turbine castings

代部分锻铆组合件与钣金机加工组合件,实现结构设计减重,同时降低制造成本,缩短生产周期^[6,34]。美军F-16、F-18、F-22、F-35型战斗机上采用了大量的铝合金精密铸件,鹰眼E-2C预警机的舱门、襟翼、电子仪器舱壳等部件也广泛选用了F357铝合金精密铸件。民用客机领域也广泛采用了铝合金熔模精密铸件,波音公司7X7民机系列中的精铸梁、驾驶室电子仪器骨架、发动机燃油泵壳体、登机舱门等,空客公司民机系列的货运舱门框梁、驾驶室仪表骨架、襟翼滑轨等均选用了大型铝合金熔

模精密铸件^[35]。

国内铝合金熔模精密铸造主要分为陶瓷型壳与石膏铸型两类。目前国内铝合金精密铸造仍以陶瓷型壳为主流制造工艺。图16为应用于神舟飞船系列的蜗壳铝合金精密铸件,采用陶瓷型壳制造,外形尺寸为 $\phi 320\text{mm} \times 250\text{mm}$,平均壁厚为3mm。图17为海军用某型导弹引信电子壳体铝合金精密铸件,外形尺寸为 $\phi 98\text{mm} \times 160\text{mm}$,平均壁厚为5mm。铝合金石膏型熔模精密铸造是20世纪70年代在国际上发展起来的新方法,1982年由原三机部牵头组织了“铝合金石膏型熔模精铸技术”联合攻关,初步完成了石膏混合料的研制。20世纪80年代我国从美国泰克(TEC)公司引进了石膏型熔模铸造生产线,促进了我国石膏型铝合金熔模技术的工业化应用^[35-36]。20世纪90年代,我国从美国全线引进了石膏型SOPHIA工艺,完成了石膏混合料配方与整体制造工艺的消化吸收,借此成立的

平原光电厂是国内目前铝合金石膏型熔模精密铸造工业化批量生产的支撑单位,可开展大尺寸高精度航空航天用铝合金构件的石膏型精密铸造。北京航空材料研究院的熊艳才采用熔模精密铸造与金属型复合铸型成功实现了叶片厚度仅为1.5mm、流道和叶片无余量设计的某型发动机铝合金叶轮铸件的一次性完整成形;采用熔模精密铸造与树脂砂复合铸型成功浇铸了GE某型燃气轮机用叶轮铸件,实现了壁厚为1.2mm叶轮轮尖部位的整体成形,如图18所示^[36]。图19为某型电子仪表壳体熔模精密铸件结构示意图,直径为390mm,高440mm,两侧散热片长275mm,宽3mm,间距为6mm,沿壳体外侧均匀分布,总数量为26,为典型的结构功能一体化复杂铝合金精密件,为了实现整体结构成形并确保内部冶金质量,熊艳才采用树脂砂型与熔模精密壳型的复合铸型,既保证了铸件整体成形,又确保了铸件内部冶金质量^[35]。



(a) 等轴视图



(b) 仰视图

图16 蜗壳铝合金精密铸件

Fig.16 Aluminum volute investment casting

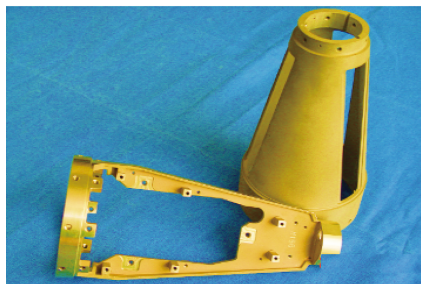


图17 电子壳体铝合金精密铸件

Fig.17 Aluminum electronic housing investment casting

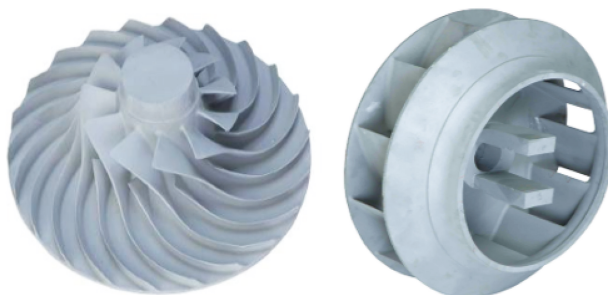
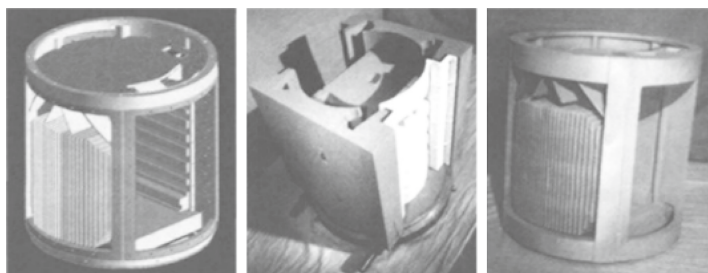


图18 叶轮铝合金精密铸件

Fig.18 Aluminum impeller investment casting



(a) 结构示意图

(b) 复合铸型

(c) 产品实物图

图19 电子仪表壳体铸件

Fig.19 Electronic instrument housing casting

4 镁合金

作为金属结构材料,镁合金密度仅为 $1.74\text{g}/\text{cm}^3$,约为铝的 $2/3$,钛的 $2/5$,且具有高强度、铸造成形性好、阻尼减振(减振性能比铝高 30 倍)、吸能降噪、电磁屏蔽能力强等特点^[37],近年来,在航天卫星与商用航天领域迎来了爆发式发展。航空领域镁合金精密铸件主要应用于座舱骨架、座椅骨架、涡轴航空发动机机匣、飞机机翼蒙皮等,航天领域主要应用于吸气管、导弹舱段、内壁板、电子仪器仪表骨架等^[38]。Eurocopter 公司某些机型中的齿轮箱壳体和盖子均采用了镁合金熔模精密铸件。我国目前已形成 10 余种成熟牌号的商用稀土镁合金,在航空航天领域已得到诸多应用,其中添加 Nd 元素的 ZM6 镁合金精密铸件已应用于我国歼击机系列的翼肋、滑轨等结构部位^[38-39]。

镁合金按组元成分通常可分为二元系、三元系与多元系。常用的二元系镁合金主要为 Mg-Al、Mg-Zn、Mg-Mn 与 Mg-Zr 等,三元系镁合金多选用 Mg-Al-Mn 与 Mg-Al-Si,多元系镁合金常见的有 Mg-Th-Zn-Zr 与 Mg-Ag-Th-RE-Zr 等。镁合金多添加 Zr 元素进行晶粒细化,按其是否添加 Zr 元素又可区分为含 Zr 系镁合金,如 Mg-Zn-Zr、Mg-RE-Zr、Mg-Th-Zr 与 Mg-Ag-Zr 等,不含 Zr 的镁合金则多为 Mg-Al、Mg-Mn 与 Mg-Zn 系等,常用的铸造镁合金化学成分如表 2 所示^[39]。压铸是当前镁合金铸件的常用生产工艺,采用压铸制造形状复杂镁合金构件时,模具投入成本高、周期长,对设备与工装的要求较高,且型腔结构复杂部位易出现缩孔与浇不足等缺陷。相比之下,镁合金采用熔模精密铸造工艺灵活,成形尺寸精度高,表面光洁度高,结构成形尺寸可从几毫米达几米,图 20 为几种典型镁合金精密铸件。目前国内镁合金熔模精密铸造工艺主要采用干砂造型工艺和石膏

型工艺,镁合金收缩率高,约是铝的 1.2 倍,易热裂,选用退让性较好的干砂铸型,可降低镁合金浇铸过程的开裂倾向。石膏铸型导热系数低、耐高温,在镁合金浇铸过程可起到良好的

阻燃效果。国内镁合金石膏型熔模精密铸造工艺常选用石蜡-硬脂酸低温蜡料,脱蜡焙烧后在气体氛围保护下进行浇铸^[39-41]。

国内镁合金精密铸造未来的发

表2 几种典型Mg合金的化学成分

Table 2 Chemical composition of several typical Mg alloys

合金种类	Al	Zn	Mn	RE ^③	Y	Zr
AM100A	6.0	—	0.1(最低值)	—	—	—
AZ63A	8.0	3.0	0.15	—	—	—
AZ81A	9.0	0.7	0.13	—	—	—
AZ91C	9.0	0.7	0.10	—	—	—
AZ91E	9.0	2.0	0.10	—	—	—
AZ92A	—	2.0	—	—	—	—
EQ21A ^{①、②}	—	—	—	2.0	—	0.6
EZ33A	—	2.7	—	3.3	—	0.6
QE22A ^①	—	—	—	2.0	—	0.6
WE43A	—	—	—	3.4	4.00	0.7
WE54A	—	—	—	3.5 ^④	5.25	0.5
ZE41A	—	4.2	—	1.2	—	—
ZE63A	—	5.7	—	2.5	—	0.7
ZK51A	—	4.6	—	—	—	0.7
ZK61A	—	6.0	—	—	—	0.7

注:①合金含银, QE22A中为2.5%, EQ21A中为1.5%;②EQ21A含0.1%Cu;③由(2.0%~2.5%)Nd和低于1.9%的其他稀土元素组成;④由1.75%其他重稀土元素和1.75%Nd组成。



图20 镁合金精密熔模铸件

Fig.20 Typical magnesium investment casting

展方向主要包括:(1)开发适用于镁合金熔模精密铸造用的型壳、型芯材料;(2)充分研究型壳性能对镁合金表面质量和充型的影响,型壳材料与制备工艺对镁合金浇铸成形、铸件/铸型界面反应和凝固末期型壳开箱清理的机理影响研究;(3)镁合金熔模铸件的组织、性能全寿命服役性能考核研究,尤其是长久耐蚀性评价;(4)开发适用于熔模铸造用阻燃镁合金的新型材料研制和特种成形工艺。

增材制造技术

近年来,涌现了不少的新工艺、新技术,在材料制备、产品快速响应、低成本批量化制造、结构功能梯度一体化制造等方面对熔模精密铸造工艺形成了强有力的竞争,但新工艺与旧工艺总是相辅相成,互相促进,无法完全取代,如何借助新工艺、新技术促进旧工艺的技术变革,是摆在科研人员面前的机遇与挑战。

熔模精密铸造在零件复杂性和材料适应性方面具有较大的优势,但其柔性较差,铸型的制备往往需要一定的周期,铸件结构和尺寸的改变往往直接影响到铸型(包括铸模)的设计、制造、装配等较长和较复杂的工艺过程。增材制造是具有高柔性的先进制造技术,通过产品设计的数学模型对材料进行叠层累积完成零件生产,借助于数学模型的编程输入,采用金属粉末、丝材、塑料颗粒等流动性或可黏合材料,通过逐层堆积的方式构造实体,除打印增材制造设备外,不需要其他工装和工具,材料利用率极高,有效缩短了加工周期,将增材制造技术与熔模精密铸造技术结合起来,采用增材制造技术制造铸型或零件,可极大提高熔模精密铸造的柔性,加速铸件的生产研制,满足新产品试制和小批量生产任务,与熔模精密铸造相辅相成,互相促进^[42-43]。目前可用于直接制

造金属结构部件的增材制造技术主要有:选区激光熔化 SLM、电子束选区熔化 EBSM、激光近净成形 LENS 3 种^[44]。

增材制造技术当前已成为提升航空航天领域技术水平的关键支撑之一,目前主要集中应用在结构轮廓验证、产品成形制造与熔模精密原型制造 3 个方面。Boeing 公司结合增材制造技术已完成 300 余种不同结构的 7X7 系列民机用零部件的生产,通过了适航认证。同时 Boeing 公司与 Honeywell 公司联合研究,拟采用增材制造技术生产整体机翼、环状框架、侧壁板等大型产品^[43,45]。国内从事增材制造的高校与科研院所主要包括北京航空航天大学、清华大学、西安交通大学、华中科技大学、西北工业大学、华南理工大学、北京隆源公司、中航重机激光等^[44,46]。清华大学颜永年团队主要侧重于 EBM 与激光熔敷沉积成形(LCD)增材制造技术的研究,北京航空航天大学的王华明团队与华中科技大学的史玉升团队主要研究领域集中在选区激光烧结技术。2005 年王华明团队成功实现了 3 种激光快速成型钛合金结构

件在两种飞机上的装机应用,使我国成为了世界上第 2 个掌握飞机钛合金结构件激光快速成型装机应用技术的国家。史玉升团队近年来研究重点集中于选择性激光烧结快速成形、选择性激光熔化快速成形、激光/等静压复合近净成形技术。西安交通大学卢秉恒团队近年来开发出了国际首创紫外光快速成型机及机、光、电一体化快速增材制造设备与专用材料体系。西北工业大学黄卫东团队近年来深入地研究了 LENS 增材制造生产工艺,与中航商飞合作解决了 C919 飞机关键钛合金结构部件的精密制造难题,形成了具有自主知识产权的特色增材制造新工艺。

图 21 为西安庆安集团有限公司在铝合金精密铸件研制过程中采用 SLA 激光增材制造技术实现了型壳与零件的快速制造,与熔模精密铸造型壳相比,周期缩短了 86%;与熔模精密铸造零件相比,周期缩短了 78%,具有显著的经济效益。西安交通大学宗学文采用 FEM 分析了光固化树脂原型与型壳高温焙烧过程的热变形机理,建立了原型-型壳温热形变数学模型与开裂判据,成功解决

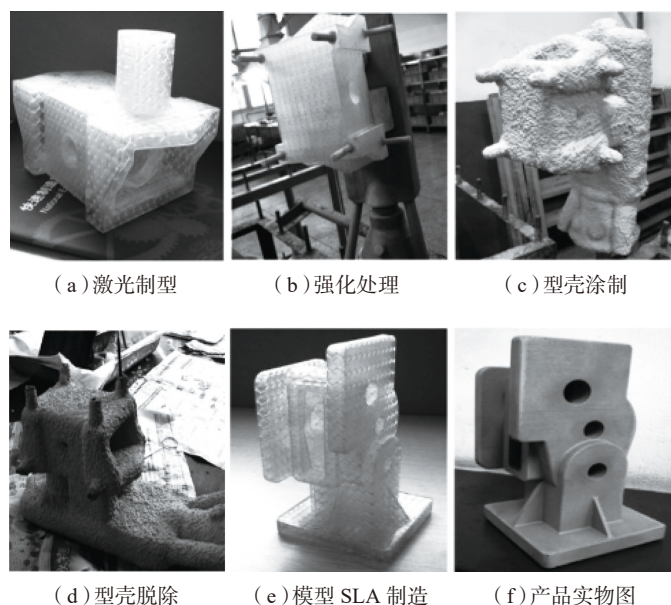


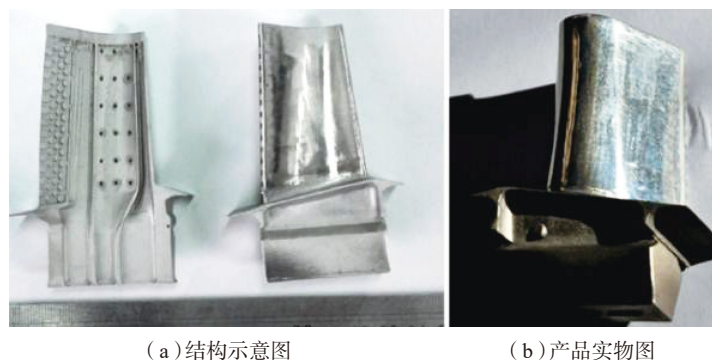
图 21 型壳与部件SLA激光增材制造示意图

Fig.21 Schematic of SLA laser additive manufacturing for shell and component

了新型燃气涡轮导向器增材制造快速成形过程中的型壳开裂难题^[45,47]。浙江机电设计研究院姜耀林借助ProCast分析结果完成了对叶轮浇注系统的结构优化,采用增材制造实现了叶轮型腔与其浇注系统整体树脂砂铸型的一体化成形,采用精密熔模铸造工艺成功制备了闭式离心泵叶轮铸件^[45]。图22为北京航空航天大学王华明院士团队采用激光增材制造工艺制备的高温合金涡轮叶片试验件,获得的凝固组织一次枝晶间距较铸造合金细化两个数量级,无共晶、无疏松。基于烧结材料塑料粉燃烧裂解工艺特点分析,采用选择性激光烧结塑料粉作为工艺原型,在其表面制备陶瓷型壳,高温焙烧后可实现熔模精密铸造,华中科技大学孙海霄采用此工艺成功浇铸了锌合金金属铸件。中北大学崔建芳借助激光烧结成型工艺,采用PS粉末烧结成型与浸蜡处理工艺,可批量化制造用于精密熔模铸造用的可溶性树脂型模具^[45]。图23为中国商飞北京民用飞机技术研究中心丛晶洁等采用液体增材制造成型技术研制的民机副翼结构件^[47]。图24为美国波音采用液态成型增材制造技术制造的RAH-66科曼奇直升机底板梁和接头部件,CH-46直升机发动机整流罩增材制造如图25所示^[48-50]。

半固态成形技术

半固态成形工艺(Semisolid Forming, SF)由美国麻省理工学院弗莱明斯教授及其科研团队于20世纪70年代提出和创立,指对处于液固糊状区的半固态金属坯料成形制造。通过在金属凝固过程进行强烈搅拌或控制凝固进程,有效抑制树枝状枝晶的形核长大,并对已成形的树枝状枝晶不断破碎,在液相中制备出等轴、细小、均匀初生相的悬浮状半固态金属浆料。此种半固态金属浆料即使受外力作用,固相率超



(a) 结构示意图

(b) 产品实物图

图22 激光增材制造涡轮叶片

Fig.22 Turbine blades by additive manufacturing



图23 增材制造民机副翼结构件

Fig.23 Civil aircraft aileron structural parts by additive manufacturing

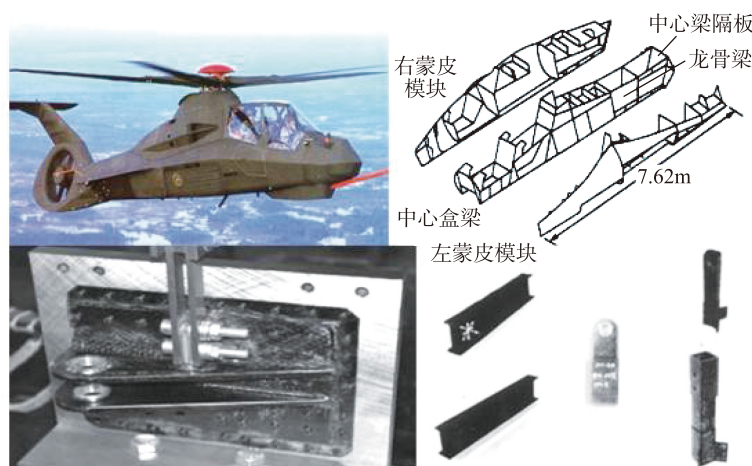


图24 增材制造RAH-66直升机底板梁和接头

Fig.24 Additive manufacturing RAH-66 helicopter floor beams and connectors



图25 增材制造CH-46直升机发动机整流罩

Fig.25 Additive manufacturing CH-46 helicopter engine fairing

出 60%，仍具有优异的触变流动性，可实现复杂结构部件的精密成形制造^[51]。半固态成形主要由触变成形、流变成形、半固态轧制、半固态挤压、半固态锻压成形^[52]。

细小、均匀的等轴晶坯料或浆料制备是半固态成形技术的关键，目前半固态坯料与浆料常用的制备工艺主要包括以下 3 种方法^[51,53-54]：(1)液相法。包括机械搅拌法与电磁搅拌法，典型制备方法主要包括美铝的 MHD 制备方法、法国 PECHINEY 公司的行波电磁搅拌法、英国 BRUNEL 大学 RDC 双螺旋桨搅拌法、美国 MIT 的 SSR 集冷棒机械搅拌法、北京有研院的复合电磁搅拌法、北京科技大学的 MSB 转筒搅拌法与 LSPWES 低过热度弱电磁搅拌法、清华大学的双向电磁搅拌法等^[51]。(2)凝固控制法。通过控制凝固过程树枝状枝晶的形核生长，或添加形核催化剂或抑制剂，实现晶粒的细化，促进二次固溶过程晶粒组织的球化。典型制备方法主要包括东北大学的近液相线半连续铸造法、挪威 NORSK HYDRO 公司的化学晶粒细化法、日本 URE 公司的 NRC 冷却斜坡法与美国 WPI 的 CRP 液流混合法等^[51]。(3)固相法。如喷射沉积法、RAP 再结晶重熔法、SIMA 应变诱导熔化激活法和粉末冶金法等。

与熔模精密铸造相比，半固态成

形技术可以获取更高的综合力学性能，且产品工艺生产周期极短，批量化制造成本更为低廉，图 26 为 A356 铝合金熔模精密铸造与半固态成形微观组织对比照片，可以看出半固态成形条件下晶粒得到了明显的细化与球化^[55]。目前制约半固态成形技术的关键是其无法制造形状复杂或空腔管路产品，模具制造费用较高且对操作人员的技能要求较高，但半固态成形技术正在日臻完善和成熟，未来将会在简单结构部件的批量化制造上对熔模精密铸造技术构成强有力的竞争。

注射成形技术

金属注射成形技术(Metal Injection Molding, MIM)是在塑料注射成形基础上发展起来的一种新型粉末冶金成形技术，由美国加州 Parmatech 公司的 Wiech 博士于 1973 年所发明，是结合模具注射成型与快速烧结技术制造高精度形状复杂结构制件的技术。MIM 制造工艺是一门多学科交叉复合的技术，包括高分子化学、粉末冶金、塑料成型制造与金属材料学等，该工艺以金属粉末作原材料，可结合产品性能技术指标进行多层次成分优化设计，采用注塑机注射成型制造复杂结构的精密部件，较为适宜批量化生产制造^[56]。其工艺过程主要包括：金属

粉末与树脂黏结剂的混料和注射成形、消融脱脂、高温烧结^[57]。MIM 制造工艺的主要优点包括：产品组织性能优异、批量化制造成本低、生产周期短、可实现复杂型腔结构的整体成形制造。黏结剂是 MIM 制造工艺的核心技术，决定了整个工艺过程的优劣，可增加粉末的流动性以提高注射能力和构造复杂产品的整体形状，目前 MIM 制造工艺用黏结剂主要包括以下几个体系：石蜡基体系、油基体系、聚醛基体系、水溶性体系、凝胶水基体系、丙烯酸基体系和热固性树脂体系等，其中石蜡基(PW)体系是应用最广泛的黏结剂^[56-57]。MIM 制造工艺与熔模精密铸造工艺类似，均较为适合薄壁结构件的成形制造，实现近净成形，零件尺寸公差可达 $\pm 0.1\% \sim \pm 0.3\%$ ，材料利用率可高达 92% 以上，由于金属粉末具有较高的流动性，较适合成形制造形状复杂、尺寸精度要求高的零部件^[56-58]。与传统熔模精密铸造和机械加工相比，MIM 制造工艺的批量化制造成本更低、且生产制造周期更短，市场竞争力较为明显，在航空航天领域已广泛用于制造导弹尾翼、弹头、型罩、电路控制引信等零件。在小型复杂精密构件的批量化制造方面，较熔模精密铸造更具有成本优势和较快的产品制造反应速度^[59]。

熔模精密铸造技术的发展趋势

随着航空航天军工装备、民用航空、商业航天产品的换代升级和持续发展，对熔模精密铸造工艺的制造精度、成形工艺、生产装备、模具工装和设备自动化与智能程度均提出了更高要求，熔模精密铸造需在智能化、可靠性、精确性、模块化等方面持续改进提高，结合我国当前的研究现状，熔模精密铸造技术未来需在以下 5 个方面着重开展研究^[6]。

(1) 材料制备体系的可靠性控

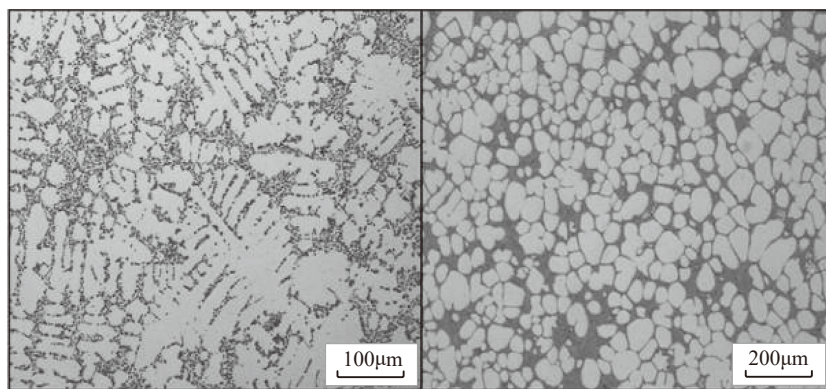


图26 熔模铸造与半固态成形微观组织对比

Fig.26 Microstructure comparison between investment casting and semi-solid forming

制。追根溯源,任何关键技术的根基和核心都是材料技术,材料技术不发展、不突破,制造技术就难以实现质的飞跃。对熔模精密铸造工艺而言,材料技术的重要性更是不言而喻的。从合金材料、铸型材料、型芯材料、黏结剂材料、界面材料来看,国内的材料体系不如国外丰富,尤其在特种成型工艺的关键材料控制技术细节方面更是差距很大。国外的材料设计目前已经从以往传统中简单的配比优化向热力学计算优化、分子模拟优化、材料基因工程设计优化层面发展,建立了庞大而完善的材料数据库,新型材料从设计到完成综合优化的时间也从以往的十几年缩短至1~2年,多种新型材料不断应用于国防军工装备中。国内近年来对工业制造技术的发展不断重视,而对其背后的材料研究投入则不够深入,仿制只会不断受制于人。关键材料与商用材料设计软件中材料数据库技术的封锁也使得我国材料研究人员需从材料设计源头开始,完善对材料制备体系的系统化研究,建立完善可靠的材料数据库,只有材料制备过程得到了较高的可靠性控制,对应制造产品的批量化生产质量才能真正地得到有效控制,结构部件的服役全周期寿命才能得到最根本的保障。

(2) 熔模精密铸造成形-成性双向控制。随着航空航天服役部件结构设计要求的日益提高,熔模精密铸造工艺不断呈现出结构一体化、精确成形化与过程控制精确化的发展趋势。选用精密熔模铸造工艺成形制造复杂构件时,在保证部件结构尺寸精确成形外,还需对结构部件的内部组织构造进行精确控制,提高部件的服役寿命,即同时实现“完整控形”与“精确控性”^[6]。航空航天服役部件的成形-成性过程是一个多学科交叉和各种先进技术综合应用的过程,在多场耦合下实现材料的充填、成形、组织构造、结构演变,尤其是

“温-热-力”的动态演变。目前现有的成形理论基础多基于理想状态下温度场、重力场与外力场的单独或简单复合下的热力学与动力学机理研究,与复杂构件的实际特种工艺成形过程相差较大,特种工艺成形过程受多场耦合控制、受多因素相互制约影响,但这些因素的耦合作用机理及相互影响作用,目前尚未完全清楚。因此开展多场耦合作用下精确成形过程中的组织演变、尺寸变化、界面反应、应力动态分布规律、缺陷形成与长大机理等研究,对指导复杂构件成形-成性双向控制具有十分关键的作用^[5]。

(3) 凝固-组织-应力计算机仿真计算。凝固过程中的温度场梯度分布和充型场流态分布直接决定了产品的内部冶金质量与组织形态分布。凝固组织中晶粒组织的控制十分重要,尤其是高温合金熔模精密铸造中的晶粒组织会直接影响其高温力学性能和耐蚀性。过去几十年,凝固过程组织控制研究得到了国内外大量研究学者的青睐,多种数学模型与计算方法被引入到凝固过程控制研究中,对凝固过程的传热与传质进行精准预测。尤其是近年来随着超大型计算服务器技术的不断进步,计算机数值仿真计算可将复杂的传热、传质过程转化为简单的线性代数方程进行精确化求解,对复杂问题进行精确定量描述,不但实现了凝固组织动态形成过程的可视化,还可对凝固过程中的“温-热-力”动态演变规律与作用机理进行定量描述分析,实现材料制备工艺参数的最优化控制,大幅提高产品结构与制造过程的合格率^[19]。

(4) 功能组织结构一体化制造。为了实现对产品服役功效的精确化控制,微观层面需对材料的组织状态进行精确化控制,同时从宏观层面对制造过程实现可控化,将产品的结构尺寸设计与材料组织状态控制纳入

到同一设计层面,从微观与宏观两个层面实现同步制造,完成结构部件的“功能-结构-制造”一体化设计,实现功能性部件的整体精确成形制造^[50]。未来服役于航空航天的装备部件除了承力以外,还要满足智能化与功能化设计的需要,材料的制备将不再是单一金属材料的简单堆积,为了实现功能梯度,材料的设计将是不同成分设计组元的匹配组合,新的成形技术和工艺将不断涌现,与之相匹配的铸型、型芯材料也将迎来革命性的设计创新。

(5) 产品制造全寿命数字化设计。航空发动机领域单晶、涡轮叶片等的制造需要从产品设计源头就开始进行数字化设计,在产品整个研制与服役过程中对产品的性能检测进行数字化建档,在产品使用过程中对服役疲劳寿命、不同工况下的承载能力与耐用周期进行准确预估,同时产品生产过程中的每个工艺参数都会录入数字化系统中,在大数据分析帮助下,建立生产工艺参数与产品综合性能的数学关系模型,对产品的性能设计不断进行迭代分析,对生产工艺不断进行优化完善,智能化制造必将是未来我国提升高精密熔模制品的必走之路。

参考文献

- [1] LEI T, ALEXANDERSEN J, LAZARO B S, et al. Investment casting and experimental testing of heat sinks designed by topology optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 396-412.
- [2] PATNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process-A review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212: 2332-2348.
- [3] SINGH D, SINGH R, BOPARAI K S. Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of atr review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 80-95.
- [4] LUO A A. Magnesium casting

technology for structural applications[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1: 2-22.

[5] 熊艳才. 航空复杂构件精确成形技术基础研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 54-57.

XIONG Yancai. Basic research on aviation precise forming technology of complex components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 54-57.

[6] 熊艳才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展[J]. 航空制造技术, 2008, 51(22): 32-35.

XIONG Yancai. Application and development of precision casting technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(22): 32-35.

[7] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造, 2012, 61(4): 347-356.

LÜ Zhigang. Historical review and development prospect of investment casting in China[J]. Foundry, 2012, 61(4): 347-356.

[8] 潘雄, 翟步英. 无余量熔模精密铸造的技术特点及其应用领域的拓展[J]. 重庆工学院学报, 2005, 19(11): 25-30.

PAN Xiong, ZHAI Buying. The characteristics of the marginless melted module precise casting technology and its expansion in applied fields[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2005, 19(11): 25-30.

[9] 吕志刚. 铸造技术路线图: 熔模铸造[J]. 铸造, 2017, 66(4): 317-321.

LÜ Zhigang. Roadmap of casting technology: Investment casting[J]. Foundry, 2017, 66(4): 317-321.

[10] 樊振中, 徐秀利, 王玉灵, 等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 285-289.

FAN Zhenzhong, XU Xiuli, WANG Yuling, et al. Investment casting technology application and development in the aviation industry[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(3): 285-289.

[11] 宫兴键. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(8): 4373-4373.

GONG Xingjian. Investment casting technology application and development in the aviation industry[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2017(8): 4373-4373.

[12] 曹腊梅, 汤鑫, 张勇, 等. 先进高温合金近净形熔模精密铸造技术进展[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 238-243.

CAO Lamei, TANG Xin, ZHANG Yong, et al. Process of advanced near net-shape investment casting technology of superalloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 238-243.

[13] 郝志强. 镍基高温合金凝固过程组织模拟与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

HAO Zhiqiang. Microstructure simulation and simulation of solidification process of nickel base superalloy[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[14] 孙黎, 张凯. 我国高温合金熔模铸造的发展及生产工艺[J]. 科学时代, 2015(8): 53.

SUN Li, ZHANG Kai. Development and production process of superalloy investment casting in China[J]. Scientific Time, 2015(8): 53.

[15] 严卫东, 刘汉武, 熊玉华, 等. 非定向熔模铸造过程中高温合金叶片组织结构的计算机模拟[J]. 材料工程, 2002(4): 43-47.

YAN Weidong, LIU Hanwu, XIONG Yuhua, et al. Computer simulation on the formation of grain structure of superalloy turbine blade in NDS investment casting processes[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(4): 43-47.

[16] 来兴显, 王乐仪, 张立同. 高温合金定向凝固工艺用熔模铸造型壳的研究[J]. 铸造技术, 1983(4): 47-52.

LAI Xingxian, WANG Leyi, ZHANG Litong. Study on investment casting shell for superalloy directional solidification process[J]. Foundry Technology, 1983(4): 47-52.

[17] 何波, 周泓江, 李建辉, 等. 镍基高温合金叶轮熔模铸造过程的数值模拟[J]. 稀有金属, 2016, 40(3): 227-235.

HE Bo, ZHOU Hongjiang, LI Jianhui, et al. Numerical simulation of investment casting process of nickel base superalloy impeller[J]. Rare Materials, 2016, 40(3): 227-235.

[18] 王倩, 吴亚夫, 孔胜国, 等. 高温合金复杂空腔结构导向器的精铸工艺研究[J]. 铸造, 2018, 67(10): 867-870.

WANG Qian, WU Yafu, KONG Shengguo, et al. Investment casting process of superalloy turbine guide vane with complex hollow

structures[J]. Foundry, 2018, 67(10): 867-870.

[19] 郭勇冠, 李双明, 刘林, 等. DZ125高温合金定向凝固微观组织的 CA 法模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 365-370.

GUO Yongguan, LI Shuangming, LIU Lin, et al. CA simulation of microstructure of directionally solidified DZ125 superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(3): 365-370.

[20] 陈玉勇, 陈艳飞, 田竞, 等. TiAl 基金熔模精密铸造技术的发展现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 554-558.

CHEN Yuyong, CHEN Yanfei, TIAN Jing, et al. Development and research status of investment casting TiAl-based alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 554-558.

[21] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳, 等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模铸造研究现状及发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 678-681.

XIAO Shulong, CHEN Yuyong, ZHU Hongyan, et al. Recent advances on precision casting of large thin wall complex castings of titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5): 678-681.

[22] 李飞, 王飞, 陈光, 等. 熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合物研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(2): 24-30.

LI Fei, WANG Fei, CHEN Guang, et al. Review of the investment casting of TiAl based intermetallic alloys[J]. Materials China, 2010, 29(2): 24-30.

[23] 范李鹏, 王宝兵, 余国康, 等. 钛合金复杂薄壁结构件精密铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1079-1081.

FAN Lipeng, WANG Baobing, YU Guokang, et al. Research on precision casting process of titanium alloy complex thin wall structure parts[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2016, 36(10): 1079-1081.

[24] 吕冬兰. 钛合金在民用飞机上的应用及发展趋势[J]. 世界有色金属, 2018(3): 230-231.

LÜ Donglan. Application and development trend of titanium alloy in civil aircraft[J]. World Nonferrous Metals, 2018(3): 230-231.

[25] 董和泉, 国子明, 毛协民, 等. 低能耗节约型钛及钛合金熔炼技术的发展趋势[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 68-73.

DONG Hequan, GUO Ziming, MAO

- Xiemin, et al. Prospect of development trend of melting technology of titanium and/or its alloys with high efficiency and low energy consumption[J]. *Materials Review*, 2008, 22(5): 68–73.
- [26] 陈玉勇, 陈艳飞, 田竞, 等. TiAl 基金熔模精密铸造技术的发展现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(3): 554–558.
- CHEN Yuyong, CHEN Yanfei, TIAN Jing, et al. Development and research status of investment casting TiAl-based alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(3): 554–558.
- [27] 刘小花, 薛祥义, 刘娣, 等. 钛合金精密铸造技术的发展现状[C] // 钛科学与工程—第十六届全国钛及钛合金学术交流会论文集, 西安, 2017.
- LIU Xiaohua, XUE Xiangyi, LIU Di, et al. Developments of titanium alloy precision casting technology[C]//Proceedings of the 16th National Titanium and Titanium Alloy Academic Exchange Conference, Xi'an, 2017.
- [28] 赵广州, 贾祥亚, 朱乐乐, 等. 熔模精密铸造钛合金用型芯的研究现状[C] // 钛科学与工程—第十六届全国钛及钛合金学术交流会论文集, 西安, 2016.
- ZHAO Guangzhou, JIA Xiangya, ZHU Lele, et al. Situation of research of core in titanium precision casting[C]//Proceedings of the 16th National Titanium and Titanium Alloy Academic Exchange Conference, Xi'an, 2016.
- [29] YANG L, CHAI L H, LIANG Y F, et al. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy[J]. *Intermetallics*, 2015, 66: 149–155.
- [30] 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.
- [31] TAO P, SHAO H, JI Z J, et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casting[J]. *Process in Natural Science: Materials International*, 2018, 28: 520–528.
- [32] LIANG Z, MIAO J S, BROWN T, et al. A low-cost and high-strength Ti-Al-Fe-based cast titanium alloy for structural applications[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 157: 124–128.
- [33] 张建平, 高飞, 王玲玲. 快速成型技术在熔模精密铸造中的应用[J]. *新技术新工艺*, 2014(3): 5–8.
- ZHANG Jianping, GAO Fei, WANG Lingling. Application of rapid prototyping technology in investment casting process[J]. *New Technology and New Process*, 2014(3): 5–8.
- [34] 熊艳才. 铝合金复合精密铸造工艺研究与应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28(7): 469–470.
- XIONG Yancai. Study and application on composite mode of cast aluminium alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2008, 28(7): 469–470.
- [35] 熊艳才. 铝合金复合型精密铸造工艺研究与应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(2): 156–157.
- XIONG Yancai. Study and application on composite mode of cast aluminium alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2009, 29(2): 156–157.
- [36] 熊艳才. 铝合金精密铸造技术在航空工业中的应用和发展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(2): 278–281.
- XIONG Yancai. Application and development of aluminum casting technology of aeronautical industry[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2011, 31(2): 278–281.
- [37] 杨媛, 李加强, 宋宏宝, 等. 镁合金的应用及其成形技术研究现状[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(8): 24–27.
- YANG Yuan, LI Jiaqiang, SONG Hongbao, et al. Research situation on application of magnesium alloys and its forming technology[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(8): 24–27.
- [38] 刘智勇. 包铝镁板复合轧制及界面特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- LIU Zhiyong. Study on clad-rolling of aluminum-coated magnesium composite plates and the properties of interface[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [39] 陈咏华. 镁合金熔模精密铸造技术研究现状[J]. *铸造设备与工艺*, 2010(6): 47–50.
- CHEN Yonghua. Research status on magnesium alloy investment casting techniques[J]. *Foundry Equipment and Technology*, 2010(6): 47–50.
- [40] 王狂飞, 许广涛, 张锦志, 等. 镁合金薄壁件的石膏型精密铸造[J]. *特种铸造及有色合金*, 2014, 34(6): 626–628.
- WANG Kuangfei, XU Guangtao, ZHANG Jinzhi, et al. Gypsum precision casting of magnesium alloy in thin-walled parts[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2014, 34(6): 626–628.
- [41] 陈广森, 吴国华, 王迎新, 等. 镁合金陶瓷型精密铸造工艺及界面反应的研究[J]. *铸造*, 2009, 58(1): 60–63.
- CHEN Guangsen, WU Guohua, WANG Yingxin, et al. Ceramic mould precision casting technology of magnesium alloy and interface reaction[J]. *Foundry*, 2009, 58(1): 60–63.
- [42] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, MANSORI M E. 3D printing for rapid sand casting-A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211–220.
- [43] 杨恩泉. 3D 打印技术对航空制造业发展的影响[J]. *航空科学技术*, 2013(1): 13–17.
- YANG Enquan. The influence of 3D printing to the development of aviation manufacturing[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2013(1): 13–17.
- [44] 程卫琴. 双金属交织结构等离子弧增材制造技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- CHENG Weiqin. Research on manufacturing technology of plasma arc with double metal interwoven structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [45] 姜耀林, 邵中魁. 3D 打印在快速熔模精密铸造技术中的应用[J]. *机电工程*, 2017, 34(1): 48–51.
- JIANG Yaolin, SHAO Zhongkui. Analysis of the application of 3D printing technology in the rapid investment casting process[J]. *Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, 2017, 34(1): 48–51.
- [46] 杨永强, 刘洋, 宋长辉. 金属零件 3D 打印技术现状及研究进展[J]. *机电工程技术*, 2013, 42(4): 1–7.
- YANG Yongqiang, LIU Yang, SONG Changhui. The status and progress of manufacturing of metal parts by 3D printing technology[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(4): 1–7.
- [47] 田象军. 高性能涡轮叶片激光成

形技术[J]. 科技纵横, 2017, 5: 74-76.

TIAN Xiangjun. The high performance turbine blade laser forming technology[J]. IEEE Spectrum, 2017, 5: 74-76.

[48] 从晶洁, 陈志平, 刘强. 新型液体成型技术在民机副翼结构的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 2018, 2: 91-94.

CONG Jingjie, CHEN Zhiping, LIU Qiang. Application Research of new liquid molding technology for civil flap[J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 2: 91-94.

[49] 赵秀芬, 刘刚, 李伟东. 液态成型复合材料在直升机上的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(17): 60-64.

ZHAO Xiufen, LIU Gang, LI Weidong. Application of liquid molding composites in helicopter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(17): 60-64.

[50] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.

LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D Printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.

[51] 孟毅. 半固态成形工艺特点及发展现状[J]. 精密成形工程, 2016, 8(4): 21-27.

MENG Yi. Features and development of

semisolid metal forming technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(4): 21-27.

[52] KANG C G, JIN C K, BOLOURI A. Semisolid forming of thin plates with microscale features[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 63-73.

[53] SHEYKHJABER F, COCKCROFT C S L, MAIJER D M, et al. Comparison of the semi-solid constitutive behavior of A356 and B206 aluminum foundry alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 37-45.

[54] JORSTAD J L, PAN Q Y, APELIAN D. Solidification microstructure affecting ductility in semi-solid-cast products[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413-414: 186-191.

[55] HU X G, ZHU Q, ATKINSON H V, et al. A time-dependent power law viscosity model and its application in modelling semi-solid die casting of 319s alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 410-420.

[56] 夏玉海, 谭志强, 叶健, 等. 金属注射成型技术(MIM)及产业化探讨[J]. 山东机械, 2003(6): 9-26.

XIA Yuhai, TAN Zhiqiang, YE Jian, et al. Study on metal injection molding technology (MIM) and industrialization[J]. Shandong

Machinery, 2003(6): 9-26.

[57] 邓剑如, 赵志刚, 王建华, 等. 金属注射成形石蜡基粘结剂主体聚合物的研究[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(3): 154-157.

DENG Jianru, ZHAO Zhigang, WANG Jianhua, et al. Investigation on the main polymer in paraffin-based binders used for metal injection molding[J]. Powder Metallurgy Technology, 2002, 20(3): 154-157.

[58] 曹树坤, 惠继恒. MIM零件连续烧结设备的现状及发展目标[J]. GM通用机械, 2006(2): 53-55.

CAO Shukun, HUI Jiheng. Current status and development goals of continuous sintering equipment for MIM parts[J]. GM General Machinery, 2006(2): 53-55.

[59] 张晨铭, 卢仁伟, 杨忠臣, 等. EPDM改性金属注射成形用油蜡基粘结剂体系[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(6): 619-623.

ZHANG Chenming, LU Renwei, YANG Zhongchen, et al. Modification of oil-wax-polypropylene based binder by EPDM for MIM[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2018, 23(6): 619-623.

通讯作者: 樊振中, E-mail: fanzhenzhong2010@163.com。

Application Status and Development Trend of Investment Casting in Aerospace Industry

FAN Zhenzhong^{1,2}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Aluminum Alloys and Applications, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Investment casting has been used in the aerospace military equipment, civil aviation and commercial aerospace area during the industrial development. In this paper, its research and development status in superalloy, titanium alloy, aluminum alloy and magnesium alloy were discussed in detail, and the research results of BIAM in recent years were mainly introduced. Different process characteristics among the investment technology and additive manufacturing, semi-solid forming, injection molding and other new process technologies were analyzed, meanwhile the development direction and research hotspots in the future were expected.

Keywords: Investment casting; Aerospace; Superalloy; Titanium alloy; Aluminum alloy; Magnesium alloy

(责编 古系)