

精密铸造技术在航空工业中的应用和发展

Development and Application of Precision Casting Technology
in Aviation Industry

北京航空材料研究院 熊艳才



熊艳才

博士,北京航空材料研究院研究员,博士生导师。发表论文 30 余篇,获 7 项国防发明专利;获国防科工委科技成果二等奖 1 项,三等奖 1 项;中国一航科技成果一等奖 1 项、二等奖 1 项;国防 511 人才学术技术带头人;第八届中国航空学会青年科技奖;航空报国优秀贡献奖;荣立航空个人一等功 1 次,二等功 1 次,三等功 3 次。

铸造技术是一门古老的、传统的工艺技术。在航空工业中,各类高温合金、钛合金、铝合金复杂薄壁整体构件的精密铸造技术应用广泛,是航空工业中的关键制造技术之一。

铸造的鲜明特点是成形构件的尺寸、组织和性能等受控于铸造工艺

先进精密铸造技术在传统理论和方法的基础上,与自动控制、计算机仿真等先进技术相结合,向理论指导、过程控制和整体近净成形的方向发展。铸造是金属成形最古老的方法,但还有令人鼓舞的新技术发展。

方法和成形过程。先进精密铸造技术传统理论和方法的基础上,与自动控制、计算机仿真等先进技术相结合,向理论指导、过程控制和整体近净成形的方向发展。

在航空工业中,复杂薄壁的高温合金、钛合金、铝合金整体精密铸件是飞机发动机和机体中的关键构件,这些构件形状尺寸、组织结构和性能直接影响飞机和发动机的性能、结构重量系数、寿命和制造成本等各种重要指标。因此,精密铸造技术是先进航空装备和民用航空产品向轻量化、精确化、长寿命、低成本方向发展的重要技术基础。

精密铸造技术在国外航空工业中的研究应用情况

欧美等工业发达国家综合应用现代新材料、新技术,在丰富成形基础理论的基础上,不断研究和开发新

工艺技术,对精密铸造这一难以控制的成形工艺过程进行控制,研制了大量优质、复杂、整体精密构件,广泛应用于航空装备中,以提高部件整体结构性能和可靠性,减轻结构重量,降低制造成本,缩短制造周期,满足航空装备的研制生产和发展的需要。

1 高温合金精密铸造技术

高温合金精密铸造技术主要应用于航空发动机关键热端部件制造,如航空发动机叶片、整体涡轮盘、整体机匣等。20 世纪 70 年代,美、英、苏等发达国家率先成功研究高温合金近净形熔模精密铸造技术,并应用于工业化生产。随着后来的热等静压技术、高温合金过滤净化技术的发展,高温合金熔模铸件的冶金缺陷大大减少,性能显著提高。近年来计算机技术的应用,更提高了熔模铸件生产的成品率和可靠性,定向空心叶片生产合格率达到 90% 以上,单晶空

心叶片生产合格率达到80%。而随着发动机推重比的不断升级换代,其关键热端部件的结构和材料发生了巨大的变化,结构向整体、薄壁空心方向发展,要求使用的材料具有更高承温能力的同时必须具有更好的抗腐蚀性能、更长的持久寿命以及更低的成本。

(1) 在航空发动机叶片方面。自20世纪80年代以来,国外对发动机的关键热端部件——涡轮工作叶片和导向叶片的结构、材料及制造技术进行了深入的研究,已相继研制出具有高效气冷效果的叶片冷却系统、材料和制造技术,制造的部件已经通过了发动机的全面考核。罗·罗公司一直在致力于研究高推重比发动机的关键热端部件——Lamilloy和壁冷单晶叶片的结构与制造技术,并已将真实的铸造叶片用于发动机的试验。20世纪90年代中后期,Allison公司研究出了集合多孔层板冷却孔制造技术、精密铸造技术以及材料技术,铸造出了具有高冷效的单晶Lamilloy合金涡轮叶片。最新技术为采用Cast Cool铸造技术将超气冷单晶叶片一次铸成。俄罗斯在现有发动机的高压涡轮叶片壁上添加冷却通道,研究出了高效气冷单晶空心叶片的精密铸造技术。

(2) 在航空发动机叶盘精密铸造方面。先进航空发动机中叶盘需整体铸造,其叶片为定向结晶组织,而轮盘组织为细晶组织,这种双性能整体叶盘(DS/GX)是新一代航空发动机涡轮的发展趋势。Howmet、罗·罗等于20世纪80年代开始了双性能整体叶盘材料与精密铸造技术研究,并于20世纪末成功开发了与之相关的成套铸造技术及熔铸设备技术,成功整铸出了叶片为定向柱晶、轮盘为等轴细晶的整体叶盘,将现有燃气涡轮发动机的使用寿命提高2~3倍,发动机功率增加7.3%~9.2%。

(3) 在高温合金整体结构件方面。20世纪末期由Carret、PCC公司等研究出最新的大件整铸技术(第三代整铸技术),即热控凝固工艺技术,它是通过将铸件合金凝固结晶前沿的温度梯度和冷却速率控制在等轴晶区域内实现了对大型复杂薄壁构件内部致密度—晶粒度—组织的原位复合控制的技术突破和创新,整铸出最大尺寸达1027mm、最小壁厚为0.8~1.2mm、晶粒度控制在1~5mm的发动机机匣类结构件。该技术的突出点是整铸过程中实现了致密充填与晶粒度细化复合控制,同时合金材料的利用率提高了50%以上。

2 钛合金精密铸造技术

美国于20世纪60年代开始研究应用钛合金精密铸造技术,经过几十年的发展,目前处于世界领先水平,开发出了熔模陶瓷铸型技术、机加石墨铸型技术和热等静压技术等。美国CF6-80C2发动机的整体钛合金中介机匣的外形尺寸为 $\phi 1300\text{mm} \times 368\text{mm}$,是目前世界上最大的钛合金精密铸件,代表着领先的钛合金精密铸造水平。

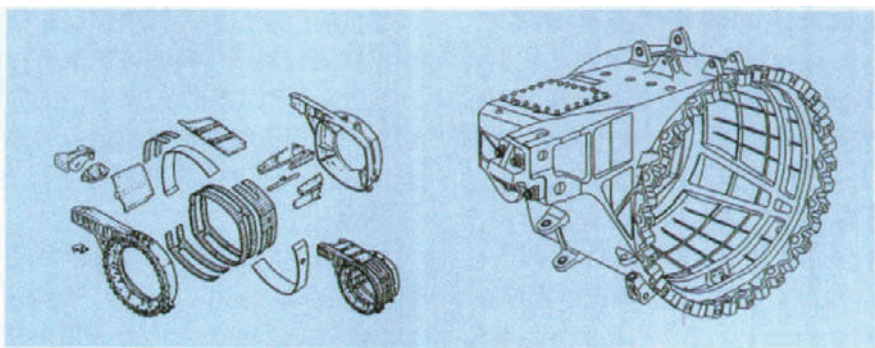
针对航空用热等静压钛合金铸件研究,经过多年研究将钛合金铸件应用到军机上并经应用证明钛合金铸件作为飞机机体构件是安全可靠的,其性能和可靠性可与塑性变形构件相媲美,而制造成本、生产周期都明显优于塑性变形构件。铸造结构件与组合结构件相比,其优点是

消除了机械紧固连结,减少了组合件的数量,这样就可减轻结构件的重量,提高结构的整体性,缩短研制周期,降低制造成本。在Bell-Boeing V-22直升机传动系统中,Howmet和Bell-Helicopter用3个钛合金整体精铸件和32个紧固件代替了过去由43个铝合金锻件和536个紧固件制成的组件,大幅度降低了结构重量,降低制造成本30%,缩短制造周期62%。

随着钛合金铸件热处理和过程控制技术的突破,铸造钛合金的性能已达到了部分锻件性能,可替代部分锻件。通过部件组合,采用近净形铸造技术使得整体结构性能提高,成本降低,并广泛用在先进航空装备的关键部位。美国F-22第4代战斗机的机体中,钛合金铸件的用量占机体重量7.1%,在机体上大约有54个钛精密铸件,机翼前、后侧位铸件最大,分别为87kg和58kg。通过采用先进的凝固过程控制、检验技术及产品可预测性等保证了铸件质量和性能,并用于机翼与机体连接的“断裂关键部位”。

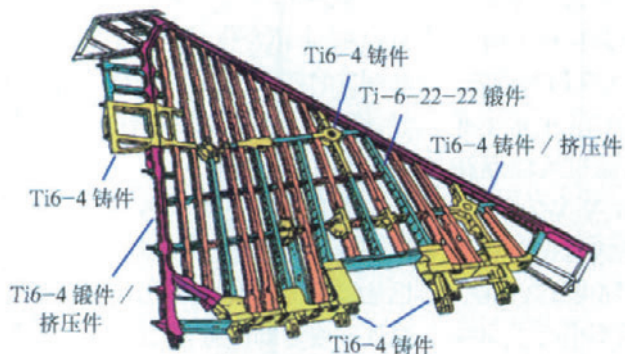
3 铝合金精密铸造技术

航空铝合金精密铸造技术主要包括熔模铸造、石膏型铸造和精密砂型铸造,在发动机、机体、机载设备上应用广泛。熔模铸造、石膏型铸造主要用于中小零件铸造。近年来,大型精密砂型铸造发展迅速,尺寸精度大幅度提高。综合应用上述方法,结合计算机设计和控制、浇注设备改



V-22直升机传动系统转接座(复杂薄壁钛合金铸件)

进,可实现尺寸 1500mm 左右、壁厚 3mm 以下的铸件整体近净成形,铸件性能达到中等变形合金性能水平,替代部分铝合金锻件、钣金件和机加组合件,从而实现了减重、降低制造成本等目的。



F-22机翼承力部位复杂薄壁整体钛合金精铸件应用

在大型运输机和民用航空领域,复杂薄壁整体铝合金精密铸造技术也应用广泛。例如 Boeing 737、747、757、767、777 飞机中的铝合金精铸梁, Boeing 767 驾驶室仪表骨架、燃油泵壳体、整体舱门, A320 飞机货舱门框、襟翼导轨等均为大型薄壁复杂的铝合金精密铸件,这些铝合金精密铸件尺寸均在 500mm 以上,有的达到 1500mm 以上,尺寸精度控制在 $1000 \pm 0.78\text{mm}$,壁厚 3 ~ 4mm,内部组织致密,铸件性能达到材料极限。据 Boeing 公司总裁介绍,在未来的 Boeing 概念机中,将大量采用整体铝合金精密铸造技术,制造各种整体的框、梁等承力构件,以进一步降低成本,缩短制造周期。

航空精密铸造技术发展趋势

航空精密铸造技术随着航空装备和民用航空产品升级换代而不断发展。在成形精度、成形工装、成形方法、成形过程控制到成形设备自动化程度各个方面都随着航空装备换代发展而发展,在精确性、自动化、经济性和可靠性方面不断改进和提高。其总的发展趋势是构件的复杂整体化、成形的精确化、工艺设计和控制

的全程化、检测技术数字化。

1 构件复杂整体化

为提高航空装备性能、整体结构性能和可靠性,减轻结构重量,降低制造成本,缩短制造周期,将原来的几个部件组合于一体,整体铸造成形,其形状结构呈现出整体化、薄壁化和复杂化;此外,为实现某些功能,将结构与功能一体化,这也使得其形状结构复杂;另外,根据构件在装备中的使用特点和需要,有的大型整体结构构件的组织结构要求均匀,有的大型整体结构件不同部位的组织结构要求不一样(如双性能整体叶盘),有的构件对组织结构控制有特殊要求(如定向或单晶叶片),所以组织结构复杂也是先进航空装备构件发展趋势之一。

2 成形精确化

为降低制造成本和缩短制造周期,结构件形状尺寸要求精确,即无或少加工余量。美国 F-35 战斗机要求减少机械加工量 90% 以上,成本降低 66%,这势必要求其零件整体成形且尺寸精确。

3 工艺设计和控制全程化

为满足装备高性能、高可靠性的需求,必须提高铸件自身的性能和可靠性,使其无(少)缺陷并根据构件的使用特点和要求精确设计并控制各部位的组织结构。精确控形和精确控性的复杂整体精密铸件是新一代装备研制和发展的基础,其广泛的研究和应用大幅度提高了装备的性能,对装备的研制和发展起到了十分关键的作用。

在美国空军支持下,涡轮发动机主要公司(Allison、GE、P&W、LMAS、PCC 和 Howmet)利用先进的快速成形技术和计算机模化试验

技术,有效控制局部组织,从而提高了热端部件的使用性能。利用计算机数值模拟实现对热成形过程(温度场、流场、力场和物质场)定量可视分析,预测构件的质量和性能,优化工艺,从而减少工艺试验次数,减少费用和缩短时间,同时使构件合格率提高 30%。

罗·罗公司在发动机叶片精密铸造技术方面已经在世界上处于领先地位,同伯明翰大学合作致力于铸造技术开发和过程建模与控制技术研究。罗·罗公司负责研究和技术的总管说:“现代的制造方法对于罗·罗公司实现产品最优质量并使贵重而稀缺的原材料消耗最少至关重要。铸造是金属成形最古老的方法,但还有令人鼓舞的新技术发展。现代制造技术和计算机组合,利用提供有效的过程建模可实现无与伦比的能力。”

4 检测技术数字化

检测是铸件研制生产中不可缺少的环节,无论是工艺过程检测还是最终产品检测均是实现工艺过程精确控制和降低成本的关键。美国下一代制造技术计划针对航空航天应用的铸造件开展了数字成像检测技术研究。目前国外战斗机成本需要降低,发动机零件成本的 1/3 是铸造件,而在生产铸件时,检测、返工以及废品率占铸件成本的 35%,尤其是发动机涡轮叶片内壁的质量检测,不仅能够降低成本,提高质量,还能缩短周期。

我国研究应用情况和发展建议

1 我国研究应用情况

我国特种合金精密制造技术经过“七五”以来的预研、型号研制和工程应用,取得了较大进步。

(1) 高温合金精密铸造。

研究了系列的高温合金材料(定向与单晶高温合金、金属间化合物

等)、高温陶瓷型芯材料及其制备工艺、近净形熔模材料与制备工艺、高温型壳材料与制壳工艺、定向和单晶结晶工艺和控制技术等,形成了包括叶片材料、铸造工艺设计、凝固结晶过程控制、工艺验证与质量控制等的等轴晶、定向柱晶和单晶叶片近净形熔模精密铸造技术体系,成功应用于航空发动机叶片的生产。探索研究了叶片凝固结晶过程温度梯度与结晶速度等参数对双层壁冷叶片单晶生长的影响,研究了高温陶瓷型芯和陶瓷型壳技术,初步形成了双层壁冷空心叶片精铸技术,在国内首次解决了整体铸造直径 0.50mm 气膜孔、双层壁冷叶片和发散冷却层板的技术难题。目前尽管基本具备高温合金叶片关键和重要的热工艺,但缺乏相关技术研究和工程化研究,工艺稳定性差,产品合格率低。

针对整体叶盘结构特点,通过探索叶盘叶片凝固结晶过程温度场形成定向结晶以及轮盘形成等轴晶的温度梯度的控制途径,实现了整体叶盘叶片以定向柱晶、轮盘为等轴晶的突破,研制出小型航空发动机整体叶盘,显著提高了使用寿命。

在航空发动机大型整体高温合金结构件方面,开展了大尺寸复杂薄壁整体高温合金构件精密铸造技术,整铸出各种航空航天发动机整体导向器、叶轮以及最大尺寸 700mm 的某型号发动机前置扩压器。

(2) 钛合金精密铸造技术。

以钛合金熔模和石墨型精密铸造技术为基础,研究开发了系列铸造钛合金及金属型、捣实型等新型精密铸造方法,突破了稀土氧化物陶瓷型精铸材料和工艺、钛合金铸件固溶时效处理、双重处理、热化学处理(氢处理)工艺以及降低钛合金铸件表面 α -case 厚度等技术,提高了铸件的可靠性,使其主要性能达到甚至超过了锻造钛合金性能,使钛合金铸件开始取代一些钛合金锻件:

- 机加工石墨型铸造技术可以制造出尺寸 1000mm 左右,尺寸精度达到 CT7 ~ CT9,最小壁厚在 4mm 左右的铸件。此技术已经成功应用到航空发动机钛合金铸件上;

- 采用熔模铸造技术,研制出国内航空发动机用最大的复杂薄壁整体钛合金精铸件中介机匣,尺寸 1000mm,平均壁厚 2mm 左右,尺寸精度为 CT7;

- 研制出钛合金精铸件机身前尾梁,初步实现了机体钛合金铸件替代锻件。

(3) 铝合金精密铸造技术。

以熔模铸造、石膏型等传统的精密铸造为基础,研究开发出高强高韧铸造铝合金材料及新型树脂砂精密铸造、复合精密铸造等新型铝合金精密铸造方法,突破了计算机优化设计和模拟技术、精密砂型铸造技术、特种型芯和复杂型腔铸造技术、反重力浇注设备与工艺等系列关键技术,研制出一批高质量、高水平的铝合金精密铸件:

- 研制出结构极为复杂的航空发动机粒子分离器前机匣和主机匣铸件,替代了进口产品,标志着铝合金精密砂型铸造工艺已经达到国际先进水平;

- 研制出某飞机进气道唇口铸件,实现了大尺寸铝合金结构件无余量铸造 ($1316 \pm 0.8\text{mm}$),替代了进口,铸件本体达到中等变形合金构件性能水平。

2 发展建议

尽管我国在特种合金精密制造技术领域取得了较大的进步,但长期以来,由于我国在精密铸造工艺技术和应用方面的不足,构件的研制依然以经验和反复试制为主要模式,研制成本高,周期长。传统铸件形状简单,尺寸精度低,依然依靠机械加工保证精度;而复杂构件性能波动大,质量不稳定,影响了航空装备的先进性和可靠性。与欧美发达国家

相比,我国在技术基础、设备、过程控制、成形改性一体化、工艺仿真和数字化检测等方面存在一定差距。结合我国实际情况,为快速缩短与发达国家差距,精密铸造技术研究、应用和发展应从以下几个方面着手:

(1) 建立完善的研究应用体系,加强已有技术的集成和工程化研究,稳定构件质量和性能,快速提高航空发动机定向空心叶片、单晶叶片等关键产品的合格率,提高工业化水平,满足型号生产需求;

(2) 攻克高推重比航空发动机涡轮叶片、整体叶盘等高温合金核心部件以及尺寸在 1000mm 以上的大型高温合金、钛合金、铝合金整体构件精密铸造关键技术,满足先进航空装备和大型飞机研制的需要;

(3) 加强应用基础理论和新型特种工艺研究,掌握精密铸造过程基本规律,建立系统的精密铸造基础理论和成形方法的框架,寻找成形工艺与组织、尺寸、性能的定量关系,实现铸件尺寸和组织的精确控制,满足我国航空工业未来发展的需要。

结束语

铸造技术是一项传统而又基础的工业技术,也是航空工业中的关键制造技术之一。随着航空装备更新换代,对构件的复杂程度、壁厚、尺寸精度、性能等要求不断提高,促使铸造技术也随之不断发展;精密铸造技术与先进计算机应用技术相结合,实现了过程仿真和精确控制,也使之与时代共发展,并不断扩大应用。

我国航空精密铸造技术亟需建立完善的研究应用体系,开展关键构件关键技术的工程化研究,提高研制能力和工业化水平;同时要加强凝固过程基本规律和过程控制技术的研究,快速缩短与发达国家的差距,满足先进航空装备和民用航空产品研制生产和发展的需求。

(责编 淡蓝)