

# 大型复杂薄壁类钛合金精铸件的研制

## The Study of Large Thin-wall Complex Integrated Titanium Precision Casting

北京航空材料研究院 南海 谢成木

华中理工大学 魏华胜 林汉同

**摘要:**介绍了采用 ZTC4 钛合金、热等静压和熔模精密铸造成型技术研制某飞机钛合金精铸件的过程。铸件外型尺寸为 630mm × 300mm × 130mm,最小壁厚仅为 2.5mm,为复杂的框形结构件。

**关键词:**大型精密铸件 钛合金 热等静压

**Abstract:**Developing process has been introduced of an aeronautical titanium casting of complex constitutional detail of frame with outline dimension of length of 630mm, width of 300mm and height of 130mm with hot isostatic pressing after investment precision casting of Ti alloy ZTC4.

自从 80 年代中期以来,大型、薄壁、复杂、整体、精密铸件制造已经成为国外航空、航天飞行器用的钛合金精铸结构件制造技术的发展趋势,这类铸件整体结构性好,可靠性高,重量轻,加工成本低,在航空航天领域内的应用前景越来越广泛<sup>[1~4]</sup>。然而,由于这类铸件外廓尺寸大,壁薄,结构复杂,实现近净形铸造的难度很大,所以只有少数发达国家拥有这种先进铸造技术。为了提高我国钛合金精密铸造技术,以及迅速提高我国飞机的飞行性能,本项目采用 ZTC4 钛合金、热等静压和熔模精密铸造成型技术,研制了某飞机用钛合金精铸件(图 1)。该铸件外型尺寸为 630mm × 300mm × 130mm,最小壁厚仅为 2.5mm,为复杂的框形结构。

### 1 合金材料选取及蜡模的研制

#### 1.1 合金材料选取

目前,我国的该类飞机构件都是采用锻造铝合金毛坯,利用机加工方法制造出来的,加工成的构件最小壁厚大于 4mm,重量达 5kg 以上。这样的制造过程导致生产周期长,金属利用率低,经济效益低。因此,在结合国外飞机采用钛合金精铸件的研究基础上,决定采用精密铸造技术生产该构件。

由于该构件工作温度一般在 200℃ 以下,受力不大,所以选取 ZTC4 钛合金作为精铸用金属材料。ZTC4 钛合金具有中等强度和良好的综合力学性能,铸造性能优良,焊接性能良好,在退火状态下,可在 350℃ 长期工作。ZTC4 钛合金的具体化学成分和力学性能见表 1、表 2。

表 1 化学成分

合金 牌号	主要合金元素含量(%)					主要杂质不大于(%)				
	Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	
ZTC4	5.5~6.8	3.5~4.5	基体	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	

表 2 力学性能

合金 牌号	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧性 $K_{IC}$ (kJ/m)	硬度 HB
ZTC4	835	765	5	12	295	321

注:在退火或 HIP(热等静压、室温)状态下测量。

#### 1.2 蜡模的研制

蜡料是熔模铸造制备蜡模的主要材料,目前蜡料种类繁多,性能各异<sup>[5~6]</sup>。根据铸件结构不同,采用性能符合要求的蜡料,才能制取合格的蜡模。由于该铸件是框形复杂薄壁件,壁厚最薄处只有 2.5mm,如果采用一般的强度不高、流动性差的蜡,蜡模压型不易充满,而且取出蜡模时,容易断裂,所以决定采用高强度蜡料,并且通过进行蜡料强度性能测试,探索出合适的压蜡工艺参数。



图 1 ZTC4 钛合金精铸件

通过对已有的高强度蜡料(蜡料的抗弯强度  $\sigma_b = 3.9$  MPa,灰分 < 0.05%)和抚顺石化研究院新研制的高强度蜡料(蜡料的抗弯强度  $\sigma_b = 7$  MPa,灰分 < 0.05%)进行压蜡试验比较,发现采用现有的蜡料压制的蜡模容易出现流痕、裂纹和凹陷等缺陷,取模困难,极易出现裂纹,导致蜡模的薄壁处断裂;而采用抚顺石化院研制的高强度蜡料压制的蜡模很少出现裂纹,取模容易,蜡模完整,表面质量好。所以经过实验比较,最后选用抚顺石化院研制的高强度蜡料压制蜡模。

通过试验,对蜡模压制的工艺参数,如射蜡温度  $T$ 、保压时间  $t$ 、射蜡压力  $P$  等进行了选择。在试验中发现,当射蜡温度  $T$ 、保压时间  $t$  保持恒定时,射蜡压力  $P$  从 1380kPa 升到 1725kPa,蜡模产生的披缝增加;当保压时间

$t$  和射蜡压力  $P$  超过一定值之后,导致蜡模收缩应力增大,在热节处以及过渡半径小的地方容易出现裂纹。经过在 75t 压蜡机上的多次试验,最后确定了合适的压蜡工艺参数,获得了合格的蜡模。

由于该铸件属于薄壁长形框架类铸件,再加上钛合金的真空自耗电极电弧炉熔炼的钛液过热度低,所以钛液进入型壳后,凝固速度非常快,充型能力下降,很容易出现浇不足、流痕等铸造缺陷。为了获得形状完整、表面光洁、内部致密的合格铸件,根据铸件结构特点,设计浇冒口系统,并进行蜡模模组组模设计。浇注系统中,横浇道底盘外形设计成与铸件底部形状类似的结构,多处开设内浇口,除直浇道外,又增设了斜浇道,实现开放式的浇注,确保钛液快速和平稳充型,防止浇不足的缺陷。在铸件壁厚和热节处设置冒口,进行补缩。另外由于铸件壁薄,极易出现冷却收缩变形的问题,为此在一些关键部位设置拉筋,既有防止变形的作用,又起到补充浇注的作用。蜡模模组结构如图 2 所示。

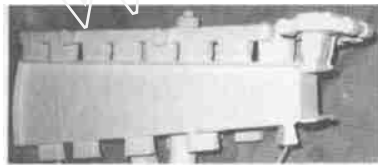


图 2 蜡模模组结构

## 2 型壳的制备

对于钛合金铸造所用的造型材料一般应具有下列特性与要求:

- (1) 高的化学惰性,与熔融钛合金接触不发生物理化学反应;
- (2) 高的耐火度和抗热冲击性能,浇注时在熔融钛的高温、高压作用下不软塌、不碎裂;
- (3) 足够的强度,在造型、搬运和装炉时不变形、不破碎;
- (4) 材料颗粒度合适,保证型腔表面致密、光洁;
- (5) 对水分、气体吸附能力小,浇注时释放气体量少;
- (6) 导热性低,减小因铸件激冷所引起的缺陷;
- (7) 价格低廉,降低钛铸件生产成本;
- (8) 无毒,保证人身健康安全。

现在国际上用于钛合金熔模铸造的型壳材料主要有石墨、难熔金属粉和惰性氧化物。其中采用对钛合金液稳定的惰性氧化物熔模型壳,在很多国家如美国、德国、俄罗斯等都得到了研究与发展。该工艺采用的面层耐火材料为稳定的惰性氧化物,粘结剂为胶体氧化物类和金属有机化合物类。

型壳制备是保证能否获得完整合格的铸件的关键因素,如果制备工艺设计不当,容易出现型壳破裂、浇注跑火等问题。在本研究中,我们选用一种不易与钛合金反应的金属氧化物,作为面层耐火材料,粘结剂选用金属有

机化合物。这种型壳导热性低、强度高,适合于浇注薄壁钛合金精铸件,其表面沾污层仅为 0.02~0.05mm。为了保证涂层有足够的厚度和强度,流杯粘度应选择大些。面层涂挂是影响铸件质量的关键工序,由于面层粘接剂是水溶性的,所以面层的干燥时间必须大于 24h,防止出现回溶现象和润湿不够,而导致型壳面层起皮和脱落。在背层涂挂中,考虑到铸件壁薄,在离心浇注时需要较大的转速,对型壳的强度提出较高的要求,所以涂层数要大。前两层选用硅酸乙酯涂料,加快干燥速度,防止涂料的回溶,干燥时间大于 24h;从第三层开始选用硅溶胶涂料,干燥时间必须大于 24h;在第四层进行特殊的型壳加固处理工艺,进一步加强型壳的强度。

对已经在恒定湿度、温度下干燥透的型壳,通过快速化学脱蜡工艺,迅速脱除型壳内的蜡模,然后进行低温焙烧和高温下的还原气氛焙烧后,获得了强度高、质量良好的型壳。

## 3 铸件的浇注以及热等静压处理

由于该铸件是一大型薄壁件,必须采用离心铸造来提高钛液的充型能力,否则无法获得形状完整的铸件,而且采用离心铸造也有助于铸件内部组织的致密化。所以采用真空自耗电极电弧熔炼炉进行离心浇铸。

由于像这样的大型复杂薄壁精密铸件,国内还未研制过,所以离心浇注工艺参数只有通过计算和试验来设定。离心浇注工艺参数主要包括离心转速、熔炼电流  $I$ 、熔炼电压  $V$ 、熔化重量  $W$ 。其中熔炼电流  $I$  和熔炼电压  $V$ ,主要根据熔炼炉的功率大小确定,这里为了保证钛合金液有足够的过热度,一般电流在 20000A 以上。熔化重量  $W$  可以根据铸件的蜡模重量计算出来。最关键、最重要的离心浇注工艺参数是离心转速。当离心转速太低时,钛合金液充型力不足,会导致浇不足、冷隔等铸造缺陷。相反,当离心转速太高时,型壳受到的离心作用力过大,超过型壳强度,型壳破裂,会导致铸型跑火的严重事故。通过分析计算和试验,确定出了合适的离心浇注工艺参数。

铸型装夹工艺设计是防止铸造失败的关键因素之一。由于该铸件属于特殊形状铸件,没有现成合适的离心浇注夹具,因此根据铸型尺寸和结构,自行设计制作了主挡板、侧挡板和底座等夹具,防止了在高速离心浇注过程中,铸型夹具不合乎要求,使铸型被甩动,导致浇注失败事故。

经过以上的工艺设计和试验之后,成功地浇注出了钛合金精铸件,重量仅为 3.5kg,低于铝锻模机加工成的铝合金同类构件。铸件外形如图 1 所示。

由于钛合金铸件容易产生缩松、气孔等缺陷,采用普通的退火处理工艺,无法消除这些缺陷。所以采用热等静压处理技术,在高温高压下,使铸件内部的封闭气孔、

# 铸造产品异地协同设计与制造系统的探讨

## Research on Collaborative Design and Manufacturing System of Castings

机械科学研究院 楼 羚 康 飞 周玉杰

**摘要:**针对传统铸造生产中存在的问题,提出了采用异地协同设计与制造系统来进行铸件的开发、设计和制造。从应用的角度,具体分析了实现异地协同设计与制造系统的三个关键技术:计算机网络系统、支持并行工程的分布式 CAD/CAM/CAE 系统以及支持“动态联盟”组建、管理的虚拟企业管理系统。

**关键词:**异地协同设计与制造 铸造生产 计算机网络

**Abstract:** According to the problems existing in traditional foundry industry, collaborative design and manufacturing system is presented to develop, design and manufacture castings. Three critical problems such as network, distributed CAD/CAM/CAE system and virtual enterprise management system have been analyzed.

### 1 铸造工业的发展及其存在的问题

铸造工业是制造业的重要分支,对国民经济发展的很多重要行业,如汽车、航空航天、能源等,都起着重要作用。随着市场经济的发展和新技术在工业上的应用,铸件的结构日趋复杂化和大型化,对铸件的外在和内在质

收稿日期:2000—10—17

量要求越来越高。传统的铸造工业面临着越来越激烈的竞争和挑战,需要不断采用先进技术,提高劳动生产率、降低生产成本、节约能源、减少环境污染等。在铸造生产中变得最为突出的问题是<sup>[1]</sup>:

(1) 传统的产品设计过程和制造过程相分离,使得从设计到铸件定型需要大量反复的修改;

(2) 铸造工艺的定型是一个反复修改、试验的过程,

疏松被压实闭合,并扩散结合成致密的组织,使铸件的缺陷得到修复,性能得到改善。该铸件热等静压工艺中的保护气体为氩气,压力为 110MPa,加热温度 920,保持时间 2h。

### 4 试验结果

经过无损检测、化学成分分析、力学性能测试、尺寸检验等,该钛合金 ZTC4 精铸件符合设计要求。其中化学成分分析、力学性能测试的实验结果见表 3、4。

表 3 化学成分

合金 牌号	主要合金元素含量 (%)				主要杂质不大于 (%)				
	Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O
ZTC4	6.33	4.14	基体	0.08	0.03	0.026	0.0096	0.0043	0.16

表 4 力学性能

试验 温度	试样 编号	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)
室温	F1-0	889	818	10.1	19.9
室温	F1-2	884	808	8.0	19.2
室温	F1-3	889	821	5.4	11.1
200	F2-1	667	575	14.6	27.6
200	F2-4	736	620	11.0	17.5
200	F2-6	724	606	13.9	29.7

注:在 HIP(热等静压)状态下测量。

### 5 结束语

本项目采用 ZTC4 钛合金、热等静压和熔模精密铸

造成型技术,成功地研制出了一种钛合金精铸件,攻克了大型复杂薄壁类铸件研制的一些关键技术难题,该项研究填补了国内航空研究在这一领域的空白,使大型复杂薄壁类铸件的单件铸造水平已经接近国外先进水平。在研究中我们也发现,在预防铸件变形,提高尺寸精度,提高铸件成品率等方面,特别是,在大型复杂薄壁类铸件工程化研制和生产体系方面还有待开展深入的研究。所以应该利用已取得的成果与生产企业相结合,重点研究、突破钛合金大型薄壁复杂件精密铸造的工程化生产技术、质量控制技术、技术适应性、快速产量扩展工程模式等,建立完善研制和小批量生产薄壁复杂整体精密铸件的基地,提高该类铸件的研制水平和生产能力,加速该类铸件的国产化进程,并迅速推广应用,从而满足我国航空、航天的发展需求。

### 参 考 文 献

- 1 周彦邦. 钛合金铸造概论. 北京:航空工业出版社,2000.
- 2 McQuillan A D, McQuillan M K. Titanium. London: Butterworths Scientific Pressing, 1956.
- 3 谢成木. 铸造钛合金及其铸造技术的发展和应. 金属学报, 1999, 35 (9): 550 ~ 556
- 4 Boyer R R, et al. Ti '95 Science and Technology. Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium, Oct. 1995: 4150
- 5 佟天夫, 陈冰, 姜不居等. 熔模铸造工艺. 北京:机械工业出版社, 1991.
- 6 陈冰等. 精铸模料显微组织初探. 北京:北京航空航天大学出版社, 1983.