

薄壁钛合金结构铸件研制

冶金处 吴文学 翻译 资料情报处 王庆云 校对

【内容摘要】 1999年,美国空军研究试验室为了宇航应用,降低制造金属构件的成本,创建了 MAI (Metals Affordability Initiative) 机构,开始进行薄壁钛合金铸件的研制。在研制薄壁铸件的项目中,实施了并行工程,开展了凝固成型技术和铸件设计试验。本文介绍了薄壁钛合金结构件的研究成果以及应用该项工艺所进行的工作。在过去几年里,MAI 为了实现降低军用飞机和保障系统的成本,已经为先进工艺提供了保障。在 Howmet 和 Boeing 公司,MAI 的主要工作就是以用薄壁钛合金熔模铸件替代机加件或钣金件为目标。

关键词 飞机构件 薄壁钛合金构件 熔模铸造

MAI 概述

1999年,美国空军研究试验室的材料和制造管理局创建了 MAI 机构。它的主攻方向是以材料和制造工艺的低成本,高效的设计水平和科学地借用工装,缩短研制和生产周期来促进工艺的发展。代表整个宇航金属构件供应的十五个公司已经组成了一个机构并且编辑出版技术刊物。

Howmet 铸件公司和 Boeing-St. Louis 公司带着制造薄壁钛合金飞机发动机零件和飞机结构件的特殊任务,在 MAI 的早期就介入该项目进行研究。最基本的目的就是降低目前用钣金成型或坯料加工一些复杂结构件的成本,更确切地说,就是系统地解决阻碍薄壁(0.89~1.27mm)铸件的难题。这个厚度范围意味着在现有工艺状况下,壁厚再减小 30%~50%。现有工艺状况的壁厚已非常薄,壁厚为 1.5~2.0mm。此外,成本降低超过 20%就需依据材料清单(BOM)进行论证。如果这两个基本的条件满足,那么项目的最终目标将集中在把该工艺应用到生产中去。

MAI 工作程序

Howmet, Boeing-St. Louis 公司和美国空军研究试验室组成了一个联合工作队(AIPT)。AIPT 选择合

适的结构件进行薄壁铸件的研制。他们是根据可能降低铸件成本和铸件复杂因素来选择构件的。

AIPT 对选择的构件实施并行工程,并通过联合设计来解决工艺上的难点,通过凝固成型确定构件的最佳浇注系统。

随后,通过试验,评估关键工艺变量,最终优选出最佳方案。从鉴定试验中选取一定数量的铸件并结合原始统计和机械性能试验进行质量评估。对每一种可能生产的方案,Howmet 和 Boeing 公司都进行了成本分析,评估成本的降低是否满足了目标。这种分析包括评估该技术是否能够满足军机和民用产品。

预冷压力通风器

在这个项目中,评估了几个薄壁构件。开始的可行性工作是测试了 C-17 军用运输机上的几个构件。选择的试验件是发动机吊挂上的预冷压力通风器(如图1)。该构件是由多个 Ti-64 合金钣金件焊接而成的。最早的成本分析是用一个铸件进行的,评估结果,成本可降低 35%。该零件的标称壁厚范围为 1.0~1.5mm。



图1 预冷压力通风器,上为钣金成形件,下为精铸件

生产用的铸模是金属模具 (SLA)。采用真空重熔 VAR 技术成功地生产了几个铸件。通过确定浇注系统和凝固模拟, 没有出现任何可能的填充问题或缩松现象。随后这些结论通过生产铸件被证实。在化铣和补焊工序完成后, 铸件的壁厚为 1.0~1.5mm。

虽然铸件研制成功了, 但成本分析显示, 预冷压力通风器没有满足项目所要求的目标。随后, 项目组又开始了第二项研究。研究选取了更小的零件 (如图 2)。该零件为波音公司研制的 JSF 水平舵机上的 U 型安装座。该构件是用板材加工的, 但也满足了波音的铸件设计标准。

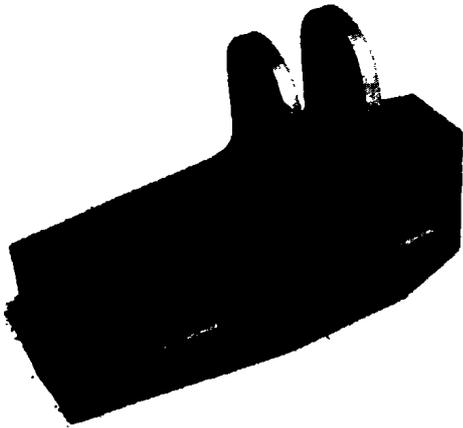


图 2 水平尾翼舵机 U 型安装座铸件

尾翼舵机构件

尾翼舵机构件 U 型安装座模拟数据显示, 在腹板部位的铸件厚度为 0.10 英寸 (2.54mm) 时, 腹板的充填是可控制的。模拟也预测到了个别区域可能出现的热等压缺陷, 特别在内壁的圆角处和 U 型的圆角处。

用 1×3 铸模代表每种试验情况进行了 L-16 DOE 铸造试验, 根据正常的成形原理, 设计了浇注系统。

DOE 试验检验了腹板厚度、预热温度、铸模保温条件、表面涂层和合金。由于波音公司对具有较高强度的 Ti-6242 合金感兴趣, 因而添加了合金的变量。但是, Ti-6242 相对合金 Ti-42 铸造性能有所降低。试验对该构件中的三个铸件进行了 α 层深度、流线、表面质量、热等压缺陷、补焊和尺寸稳定性检查并评估了结果。

铸件的性能

Howmet 铸件公司所有的出自 DOE 的构件都是精铸件, 并进行了 HIP 处理: 1650° F/15ksi/2h。在最初的铸件内值得注意以下两个特点:

●在腹板的截面上, 仅有两个铸件 (为 Ti-6242) 没有完全充满。

●在腹板和侧壁上的筋, 流线显示不理想。

另外, 在 HIP 处理之后几乎所有的铸件在内圆角处和 U 型环的圆角处都产生了 HIP 缺陷。很明显, 四个面交汇的这些方面出现了缺陷。按凝固成形惯例, HIP 凹坑有时在 U 型件的连杆或冒口处出现。

对由三个铸件组成一批中的一个铸件进行了 α 层检测。其余两个铸件化铣后进行了外观分析和尺寸检查。化铣后腹板的目标厚度是 0.060 英寸 (1.5mm), 面层的 α 层数据、铸模预热和铸模外壳都是需控制 α 层形成的基本因素。

预热温度过高和铸模外壳会导致浇注后铸模缓慢冷却, 并促使 α 层的形成。另一方面, 零件的材料和腹板厚度对构件外观质量影响很大。Ti-6242 合金一般易产生更多的气体缺陷并且类似于 Ti-64 合金不易充满。薄腹板零件外观质量差主要是由该类零件高的凝固速率导致潜在的气体缺陷。

Boeing 和 Howmet 公司研制出了一种用于 HIP 处理和热处理铸件的机械性能试验模型, 并且用 DOE 试验模型热处理铸件。Ti-64 合金构件应进行: 1550° F / 2h 退火, 而 Ti-6242 合金构件应进行 1750° F / 1h / GFC+1150° F / 2h 双重热处理。所有的铸件应进行拉力和冲击试验。但是冲击试验只限于 Ti-64 合金, 并且包括疲劳试验 (S/N)、断裂韧性和疲劳裂纹扩展 (FCG) 试验。

拉力试验按 ASTM E-8 进行, 疲劳试验按 ASTM E-466 进行, 断裂韧性试验和疲劳裂纹扩展试验 (FCG) 分别按 ASTM E-399 和 ASTM E-647 进行。这些试样均取自铸件的 U 型区域, 试验结果如表 1 所示。

技术应用

生产薄壁钛合金铸件的工艺按照验收标准已成功地被验证。项目的最终阶段是将该工艺应用于生产。作为项目的需要, 选择了 C-17 飞机发动机吊挂上的鼻型帽和 C-17 飞机发动机吊挂上的防火密封垫, 因为这两个铸件的成本分析结果比按 BOM 制造的装配件的成本节约 40%~70%。

C-17 飞机鼻型帽支架零件的装配件由 17 个不同的 Ti-64 零件组成如图 4 (a), 而改用铸件制造的零件如图 4 (b) 所示, 鼻型帽是发动机吊挂的外壳, 主要是为保证支架周围的空气流动流线。St. Louis 波音公司的研究人员和 Howmet 公司的铸件研究人员起初实施并行工程制造了这两个铸件。

用金属模具制造的铸件经过化铣和补焊后的标称厚度为 0.050 英寸 (1.27mm), 并且铸件贴合波音的工

装。用 Ti-64 合金单独铸成管子然后焊到一起，由于

表 1 拉力和断裂韧性试验结果

合金	取样位置	σ_b Mpa(ksi)	$\sigma_{0.2}$ MPa(ksi)	δ_5 %	K_{IC} Mpa. \sqrt{m} (ksi. \sqrt{in})
Ti-6Al-4V	腹板(0.1in;2.5mm)	134(19.4)	120(17.4)	8.0	---
Ti-6Al-4V	U型座(0.5in;12.7mm)	133(19.3)	120(17.4)	10.6	108.3;110.7(97.5;99.7)
Ti-6Al-4V	Mil-5(0.75in;19mm)	132(19.1)	120(17.4)	8.9	典型:100—122(90—110)
Ti-6242	腹板(0.1in;2.5mm)	151(21.9)	127(18.4)	9.0	---
Ti-6242	U型座(0.5in;12.7mm)	146(21.2)	129(18.7)	8.7	---
Ti-6242	典型铸件	152(22.0)	132(19.1)	12.6	---

采用铸造工艺，使成本和重量都降低了，因而波音公司采用铸件替代了钣金件。

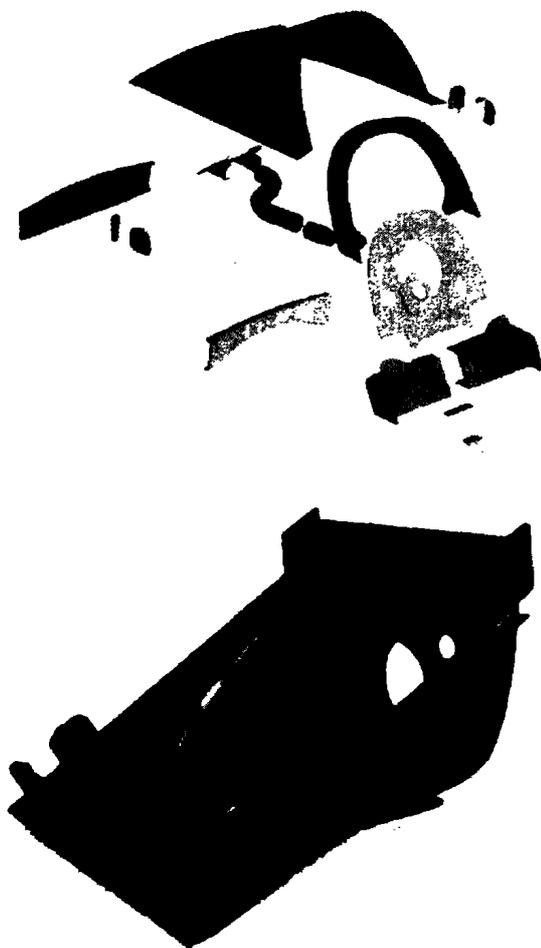


图 4 飞机鼻型帽支架装配图(上)，精铸件(下)

由于工艺的应用需要一系列重要的过程，包括铸件设计，应力分析和空军的最终批准。针对这个项目，Boeing 和 Howmet 公司联合编制了该铸件的材料和工艺规范，其中包括射线、荧光、渗透检查。

一项生产 60 件铸件的合同已开始实施并且已经制造了一个生产蜡模的模具。在整个项目周期内，新技术将节约成本 3200 万美元，Howmet 公司正在按计划生产用于 2003 年春季评估的鉴定标样铸件，并且计

划在 2003 年的秋季将该铸件应用到新的飞机上。

C-17 飞机的防火密封垫是一个由多个装配件和紧固件组成的复杂结构。该构件起到密封结构的作用以防止吊挂着火。每架飞机有 4 个这样的密封结构件。推荐的 Ti-64 薄壁铸件同装配件相比估计降低成本 70%，图 5 所示的是波音公司根据电子资料用金属模具制造的最初的 C-17 飞机的防火铸件。



图 5 精铸成形的 C-17 飞机的防火密封垫

该构件正在进行重新设计以便减重，同时为了满足联接器的安装要求正在修订外形，项目组也正在制定鉴定计划以便保证构件满足材料工艺和满足 Boeing 的精铸件的规范和机械性能的试验要求，计划在 2003 年秋季实施到飞机生产中去。

这些试验成果为降低成本，实现薄壁钛合金结构件代替钣金件和机加件创造了很多机会。但是，实践证明，降低成本的产品仅限于那些结构相当复杂的构件和装配件。制造薄壁钛合金结构件的工艺是非常先进的，并且将这种工艺应用到实际生产中的前景是非常广阔的。

译自 Advanced Materials & processes May 2003.

(编辑：王孔巨)