

# 铝合金铸件与大飞机制造

## Aluminum Alloy Casting and Aircraft Manufacturing

沈阳铸造研究所 冯志军 闫卫平 申泽骥



冯志军

沈阳铸造研究所研究员, 铝合金技术产业部主任, 主要从事铝合金材料和铸件成形工艺研究开发工作, 组织领导军品铝合金铸件的生产。

飞机制造离不开铝合金铸件。1903年, 莱特兄弟试飞成功的第一架机械动力飞机的发动机机体和曲轴箱就是用铝合金铸造的。早期飞机应用的铝合金铸件主要是不重要的二级构件, 例如把手、托盘、内舱门和支架等。20世纪80年代以来铝合金铸件已经逐步被用于机身关键承力构件。例如波音757的D357铝合金整体铸造电子设备检修门, 这是飞机上的关键件, 如果此门损坏会导致灾难性后果。再如F-16战机

铝合金铸造不但制造成本低, 周期短, 而且成形工艺性好, 适合制成各种复杂形状, 为结构件设计提供了极大的灵活性。国外现代铸造成形工艺、先进生产过程控制和检测技术保证了铝合金铸造零件的可靠性, 使飞机用铸造铝合金零件设计的铸件系数CF采用了“1”, 充分发挥了铝合金铸件在飞机减重和降低制造成本方面的优势。

的进气道唇口铝合金铸件, 尺寸为1448mm×533mm×356mm, 这是波音公司首次采用铸造系数CF为“1”设计的铝合金铸件。

制造成本低、生产周期短是铸件在现代飞机制造中被广泛采用的重要原因。为了降低制造成本, 提高市场竞争力, 世界两大飞机制造巨头空客和波音在飞机构件设计中都积极采用铸件。在飞机铸件应用方面空客更为领先, 20世纪90年代, 空客的飞机机身使用铸件的比例就已经达到30%~40%, 这也是近年空客能以低成本优势终于坐上了世界头号民用飞机制造商交椅的重要原因之一。

现代的近净形铸造技术需要的机械加工很少, 是短流程的低成本先进工件成形技术, 该技术为铸件在飞机制造中的大量应用创造了条件。

铸造技术已经成为航空制造技术中的六大关键技术其中之一。

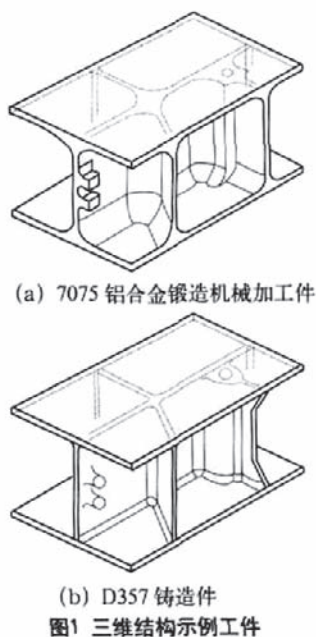
### 飞机结构采用铸件的优越性

飞机零件采用铸件不但可以降低制造成本, 缩短制造周期, 而且还可以减少工件结构重量。

(1) 铸件成形工艺性好, 适合制成各种复杂形状, 不受加工方法限制, 为设计提供了极大的灵活性, 可以从满足使用性能和尽量减重的角度, 设计出最理想的工件结构。

图1是三维结构的示例工件, (a)为7075铝合金锻造机械加工件, (b)为承担同样工作负荷的D357铸造件。D357铸件的总体积比7075锻造加工件减少11%, D357密度比7075低5%, 铸件总计减重16%。

(2) 可以利用铸件良好的成形



工艺性,很方便地在工件应力低处减小壁厚,在应力高的部位增加壁厚,使应力分布得更均匀合理。尽管同种合金的铸造材料强度低于锻材,却仍然可以减少工件的重量。

静态弯曲负荷情况下,7075 板材加工的“丁”字形梁和改进断面的“工”字 A357 T6 态铸造梁对比,2 种梁的试验受力和材料力学性能数据见表 1。在承受相同静态弯曲负荷情况下,铸件比板材减重 7%。

动态负荷条件下,7075 板材加工的“丁”字形梁和改进断面的“工”字 A357 T6 态铸造梁(见图 2)对比,2 种梁的试验受力和材料力学性能数据见表 2。在动态负荷条件下,铸件比板材减重 30%。

(3) 用整体铸件代替多个锻造加工件的紧固连接组合,大幅减少工件数量,省去紧固件、垫片,减少机械加工工时并省掉组装工时,也减少了大量设计、制图工作量及紧固件采购和库存等,节省材料,减重、降低成本和缩短制造周期的效果非常明显。

以简单的板料连接为例,用 D357 整体铸造板代替 2024 轧制板材铆钉铆接结构,计算在承受同样拉伸负荷的条件下,用整体铸造板代替

2024 轧制板铆接结构所需要的铸造板厚度,再比较接头部分轧制板铆接结构和铸材重量,计算用铸造结构代替铆接结构所节省的重量,计算结果列于表 3。在设计计算中把 D357 板的铸件系数 CF 取为 1.25。可见用 1.0 ~ 2.4mm 的整体铸造结构代替 1.4 ~ 3.1mm 的锻造板材铆接结构,接头部分节省构件重量都超过 60%。

波音和空客使用铝合金铸件代替锻造加工组合件的例子很多。例如波音 757 的电子设备检修门,用 D357 整体铸造代替原来 113 个零件的组合,消除了 940 个紧固件,制造成本降低 35%。再例如机翼下飞机轮收起后的锁紧装置箱体,波音 767 的这一箱体是 D357 铝合金铸造的,重 15.4kg,代替原来 35 个件的组合体,节省了 25 个垫和 2 套夹具,成本降低 50%。波音 767 驾驶员座舱的主仪表盘由 11 个 A357 铸

造零件代替原来 296 零件的组件,节省了 600 个紧固件,减少装配工时 160h,减少加工时间 90%,降低成本 50%。

### 铸造技术和无损检测技术的进步保证了铸件可靠性

飞机构件设计采用铸件的主要障碍是传统观念对铸件质量可靠性的不信任。美国联邦航空条例 FAR 25 中对铸件设计规定了铸件系数 CF,类似于设计中采用的安全系数,取值范围 1.0 ~ 2.0,比如屈服强度为 315MPa 的铸造铝合金,取铸件系数为 1.5,设计时的屈服强度就变成

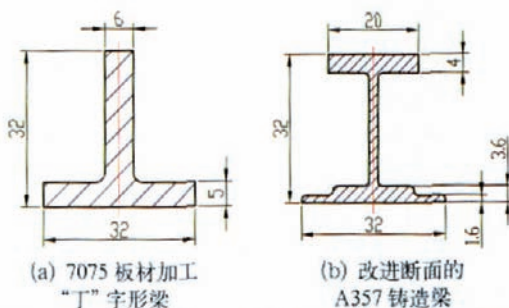


图2 动负荷试验用板材加工“丁”字形梁和改进断面的铸造梁

表1 静弯曲试验板材加工梁与铸造梁试验受力和材料性能数据

项目名称	板材加工梁	铸造梁
最大弯矩 / N·mm	259.186	263.120
梁横截面高度 / mm	32	32
材料牌号和热处理状态	7075	A357 T6
抗拉强度 / (N·mm <sup>-2</sup> )	470	310
许用应力和算法 / (N·mm <sup>-2</sup> )	470/1.5 = 313	310/1.5/1.25=165

注:表中 1.25 为选取的铸件系数 CF

表2 动负荷试验板材加工梁与铸造梁试验受力和材料性能数据

项目名称	板材加工梁	铸造梁
最大弯矩 / N·mm	259.186	279.510
梁横截面高度 / mm	32	32
材料牌号和热处理状态	7075	A357 T6
许用应力 / (N·mm <sup>-2</sup> )	200	140

了210MPa。在此条件下使用铸件很难达到减轻构件重量的目的。

条例 FAR 25 是 20 世纪 60 年代制定的,当时的铸造工艺技术还很落后,不能很好地控制铸件的内部质量和性能,铸件检测技术和设备能力有限,难以准确判断铸件质量水平。经 20 多年的发展,到了 20 世纪 80 年代,铸造技术和铸件无损检测技术都有了巨大进步,先进的优质铸件生产技术保证了铸件内部质量的完善性和铸件力学性能的良好重复性;铸件的无损检测设备和 技术可以充分揭示铸件内部存在的可影响性能的任何微小缺陷。美国军标 MIL-STD-2175 和波音公司的 BAC5652 都是建立在先进检测技术基础上的严格而完善的铸件质量检验标准。

图 3 统计了不同年代生产的美国 A357 (D357 是 A357 的进一步提高牌号) 铝合金铸件试样拉伸强度值的分布,1975 年的数据是一个铸造项目统计的生产数据,可见当时的试样拉伸强度值是很分散的;1985 年的数据是生产空射巡航导弹铝铸

件统计的数据,经过 10 年的技术进步, A357 铸件的拉伸强度数据已经很稳定;1995 年的数据是波音公司编制 D357 材料标准统计的来自 3 个不同项目的生产数据,可见 D357 铸件的生产控制技术更好,性能数据已经很稳定并且有普遍性。

先进铸造工艺过程控制、检测技术和最终产品质量可预见性保证了铸造零件的可靠性。空客公司和波音公司设计的许多重要铸造铝合金飞机零件的铸件系数 CF 都采用了“1”,充分发挥了铸件减重和降低成本的优势,进一步促进了铝合金铸件在飞机上的广泛应用。

### 铸件在机身结构上的应用实例

铝合金铸造不但制造成本低,周期短,而且成形工艺性好,适合制成各种复杂形状,为结构件设计提供了极大的灵活性。国外现代铸造成形工艺、先进生产过程控制和检测技术保证了铝合金铸造零件的可靠性,使飞机用铸造铝合金零件设计的铸件系数 CF 采用了“1”,充分发挥了铝合金铸件在飞机减重和降低制造成本方面的优势。

表 4 列出一些铝合金铸件在飞机上应用实例。目前为空客和波音

表3 板状铸造结构代替板状铆接连接结构节省的接头结构重量

2024 板厚度 /mm	铆钉直径 /mm	断面负荷 /kg	等效的铸板厚度 /mm	节省的重量 /%
1.4	3.9	7194	1.0	64.3
1.6	4.7	8347	1.2	61.9
2.2	6.2	11953	1.7	61.7
2.8	7.8	15494	2.1	61.6
3.1	9.4	16596	2.4	62.0

表4 铝合金铸件在飞机上的典型应用实例

飞机类型	零件名称	材料牌号及热处理	零件外形尺寸 /mm	零件重量 /kg	铸件制造商
波音 737	前缘襟翼	A357 - T6	2134×457×203	25	Teledyne Cast
F-16	垂直稳定翼	A357 - T6	3505×1067×127	22	ALCOA 和 Teledyne Cast
T-38	座舱罩支撑架	A356 - T6	356×305×203		数家公司都生产
C-17	装卸机构零件	A201 - T7	940×380×50	3.3	Magnesium Alloy Products
FJ-44 型发动机	气体涡轮机中间壳体	A357 T7	533×203		MICROCAST
战机	外挂架	D357	2413	30	ALCOA
波音 777	电子舱入口门	A357-T6	482×711×152	3.6	Teledyne Cast
空客飞机	货舱门	A357.0	1300×1000×120	18	Titan Aluminium Feinguß GmbH
空客 A330/340-500-600	着陆襟翼	A357	600×500×250	9.5	Titan Aluminium Feinguß GmbH
F-5	挂架	A357-T6	2490		ALCOA
V-22	主齿轮箱	A357-T6	1143×914×559		Fansteel Wellman Dynamics

供应铝合金铸件的制造商都是具有超强实力的大公司。

### 我国铝合金铸件在飞机上的应用前景

我国要发展具有国际市场竞争力的大型飞机制造业,同样离不开铝合金铸件。我国直升机主要部件的国产化对关键铝合金铸件的需求也很大。波音、空客等国外知名飞机制造商也在探索在我国采购重要铝合金铸件的可能性。飞机用铝合金铸件的市场前景是广阔的,但我国铸造业在飞机用铝合金铸件的铸造技术、生产条件和企业管理水平上与世界主要的航空铸件制造商有明显差距,生产飞机用高要求大型铝合金铸件还有困难。原中国一航科学技术委员会副主任周家骐先生在接受金属加工杂志记者采访时,把大型飞机用大型构件的铸造技术列入需重点发展的6项内容之中。为满足国内外

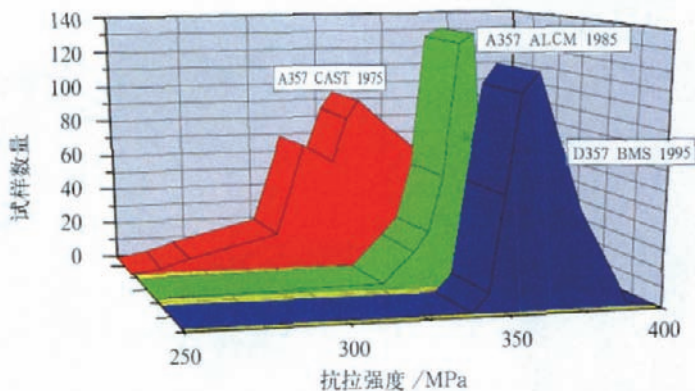


图3 不同年代生产的美国A357型合金试样拉伸强度值的分布

市场对航空用大型铝合金铸件的需求,应当加强大型铝合金铸件成形技术的开发投入,提高我国大型高端铝合金铸件的生产水平。

我国在高要求大型铝合金铸件生产能力方面已经有一定的基础。沈阳铸造研究所生产的对铸件本体力学性能和内在缺陷有严格要求的导弹壳体 and 油箱等大型复杂铝合金铸件,其质量已达到国外同类产品先进水平,满足了军品配套需要;最近

攻克了直升机机匣类高强度铝合金铸件的国产化技术难关,使生产的机匣铸件质量达到设计要求。目前,沈阳铸造研究所又试制出具有复杂内部冷却油道的直升机附件机匣,还受委托正在试制某大型客机的舱门,试制初样的主要验收指标已达到用户标准要求。这些铝合金铸件的研制经验和生产技术可以为我国大型飞机用铝合金铸件制造技术的开发提供宝贵经验。(责编 淡蓝)

HAMMOND AND COMPANY  
英国哈曼公司

**深孔钻系统**

我公司为国内用户成功改造了近5000多台机床,解决了许多大型件和复杂件的深孔加工。

**具有多项功能:**

- 钻孔直径:  $\varnothing 3\text{mm} \sim \varnothing 52\text{mm}$
- 钻孔深度: 可达钻头直径的30-210倍,无需中途退屑,最深可达3000mm
- 高精度: 公差通常在H8~H9之间
- 直线度: 固定工件孔深的1/1000, 旋转工件孔深的1/2000
- 粗糙度: 通常为0.5~3.0  $\mu\text{m}$  RMS.

英国哈曼深孔钻、枪钻、快速钻

**WDF系列三坐标深孔钻机床**

WDF系列深孔钻机床,是哈曼公司最新开发的柔性组合深孔钻机床系列,采用组合式、模块化设计,可根据客户的不同需要进行组合,灵活组合成单坐标、二坐标或三坐标深孔钻机床,从而满足轴类、板类排孔和模具类坐标孔系的加工要求。

**WDS/BQ 1200-CNC 大型落地式深孔钻床**

枪钻  $\varnothing 8 \sim \varnothing 32$   
BTA  $\varnothing 16 \sim \varnothing 50$

**WOT 系列深孔钻床**

**WT-32U 台式工具磨**

增速器

重磨夹具

**北京哈曼深孔技术有限公司**

北京 Beijing Office  
北京市顺义区南彩乡东大街12号(哈曼工业园)  
电话: 010-6165 7833 (多线) 8947 7458  
传真: 010-6165 7833  
电子信箱: info@haman.cn

上海 Shanghai Office  
上海市江宁路1076号玉佛城5楼B座  
电话: 021-6299 1453  
传真: 021-6299 1452  
电子信箱: shanghai@haman.cn

www.haman.cn

广告索引号 09-072