

波音 737 飞机 D357 高强薄壁舱门铸铝件开发

闫卫平 李桂成 修继 郭如意 王志 刘阳 李兴颺 刘帅  
(沈阳创新合金有限公司)

**摘要** 针对波音 737 飞机 2 mm 壁厚舱门铸铝件的技术要求,研究了其对铸造铝合金材料和本体的力学性能指标、铸件的内部和表面品质要求、铸件的尺寸精度以及表面粗糙度的要求,并且对比了 HB963 和 HB5480 两种铸铝材料和铸件的各项指标要求。从对比数据来看,波音飞机采用的材料力学性能比目前我国相似材料高约 17%,铸件品质要求更高。

**关键词** 飞机;铸造舱门;铸铝;高强;D357

**中图分类号** TG249.2;TG146.21;V25 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.05.025 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Technical Requirement Analysis of D357 Cast Aluminum for High Strength Thin-wall Hatch Doors in Boeing 737 Airplane

Yan Weiping, Li Guicheng, Xiu Ji, Guo Ruyi, Wang Zhi, Liu Yang, Li Xingchang, Liu Shuai  
(Shenyang Chuangxin Alloy Co., Ltd.)

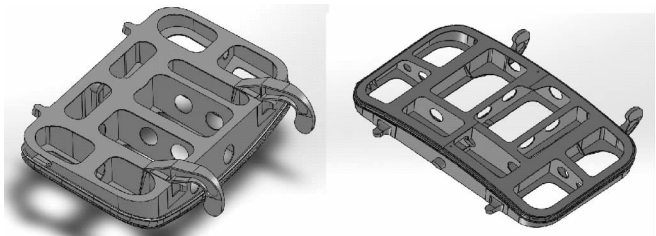
**Abstract:** In view of the technical requirement of aluminum cast door in Boeing 737 airplane with thickness of 2 mm, the requirements of mechanical properties, inner quality and surface quality, dimensional tolerance and roughness of cast aluminum alloy on boeing doors were described, and index requirements of HB963 and HB5480 similar aluminum alloy were analyzed comparatively. The results indicate that the mechanical properties of Boeing cast alloy is about 17% higher than the domestic similar cast alloy, with higher quality requirement.

**Key Words:** Airplane, Cast Door, Cast Aluminum, High Strength, D357

国际上大飞机结构件材质以变形铝合金为主,在舱门、仪器仪表面板等一些中强载荷服役工况下使用的结构部件,可选用铝合金铸件,实现复杂结构的一体化轻量制造<sup>[1]</sup>,平均壁厚在 2~5 mm。目前国内对大飞机铸铝结构件的设计应用研究较少,主要问题是热处理变形难以得到有效解决,目前以 7xxx 系铝合金厚板铣削加工为主。本研究结合波音 737 飞机用 2 mm 壁厚舱门铸铝件技术指标要求,从结构要求、冶金控制、力学性能、表面品质等方面进行分析。目前,国内大飞机高强韧结构铸件制造领域还处于技术探索阶段,与国外还存在较大差距,对轻量化复杂高强韧铝合金铸件的研究,有助于推动国内大飞机技术的发展。

1 2 mm 壁厚舱门铸铝件的描述

图 1 为波音 737 飞机舱门铸铝件三维结构模型<sup>[1]</sup>,舱门铸件为框架结构,平均壁厚为 2 mm。舱门铸件轮廓尺寸为 650 mm×350 mm×100 mm,质量为 3.82 kg,其内置多处减重孔,材质为 D357.0-T6,冶金质量控制按波音标准 BMS 7-330<sup>[2]</sup>一类铸件进行设计制造。



(a) 正面 (b) 反面  
图 1 波音 737 飞机舱门铸铝件三维模型  
Fig.1 Cast aluminum alloy door of B737 airplane

波音 737 飞机舱门铸铝件各项技术指标均要求较高,本研究将从合金材料、铸件本体力学性能、表面品质、内部品质、尺寸精度和表面粗糙度等方面对其技术指标进行全面分析,并与 HB963<sup>[3]</sup>和 HB5480<sup>[4]</sup>一类铸件技术指标进行比对分析。

2 舱门铸铝件技术指标比对分析

2.1 舱门铸铝件合金材料与本体力学性能

波音 737 飞机前检修舱门合金材质为 D357 铸造

收稿日期:2022-08-12;修改稿收到日期:2022-09-09  
第一作者简介:闫卫平,男,1982 年出生,工程师,沈阳(110141),E-mail:13704038369@163.com  
引用格式:闫卫平,李桂成,修继,等. 波音 737 飞机 D357 高强薄壁舱门铸铝件开发[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):712-716.  
YAN W P, LI G C, XIU J, et al. Technical requirement analysis of D357 cast aluminum for high strength thin-wall hatch doors in boeing 737 airplane[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):712-716.

铝合金<sup>[5]</sup>,其成分与 HB962 ZL114A<sup>[6]</sup>相近,见表 1。

表 1 飞机舱门的铸铝材料成分对比

| 材料     | wB      |           |           |           |       |       |       |       | Al |
|--------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|----|
|        | Si      | Mg        | Ti        | Be        | Fe    | Mn    | 其他单项  | 其他总计  |    |
| D357   | 6.5~7.5 | 0.55~0.60 | 0.10~0.20 | 0.04~0.07 | <0.12 | <0.10 | <0.05 | <0.15 | 余量 |
| ZL114A | 6.5~7.5 | 0.45~0.75 | 0.10~0.25 | <0.07     | <0.20 | <0.10 | <0.05 | <0.15 | 余量 |

D357-T6 材料力学性能与 ZL114A-T6(一类铸件)数据对比见表 2。可以看出,波音飞机舱门铸件抗拉强度( $\sigma_b$ )指标要求高出 HB962 同类材料 17.33%,屈服强度( $\sigma_{0.2}$ )高出 31.82%。

表 2 D357 T6 与 HB962 ZL114A T6 的力学性能对比

| Tab.2 Mechanical property comparison of D357 T6 with ZL114A HB962 |                 |                     |             |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------|
| 材料                                                                | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\delta$ /% |
| D357                                                              | $\geq 352$      | 290~324             | —           |
| ZL114A                                                            | $\geq 300$      | $\geq 220$          | $\geq 4$    |

表 3 为 BMS 7-330 铸铝舱门本体指定部位力学性能与 HB963 I、HB5480 中 ZL114A 本体力学性能 2 级数据对比结果。可以看出,BMS 7-330 抗拉强度比航标 HB963 与 HB5480 分别高出 64.04%和 7.73%,屈服强度比 HB5480 高出 2.15%(HB963 没有要求屈服强度)。

表 3 舱门铸铝件本体指定部位的力学性能与 ZL114A T6 的数据对比

| Tab.3 Comparison of mechanical property from designed area between cast door and ZL114A T6 casting |                 |                     |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------|
| 材料                                                                                                 | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\delta$ /% |
| D357                                                                                               | $\geq 344.75$   | $\geq 275.8$        | $\geq 5$    |
| ZL114A(HB963)                                                                                      | $\geq 210$      | —                   | $\geq 1.6$  |
| ZL114A(HB5480)                                                                                     | $\geq 320$      | $\geq 270$          | $\geq 5$    |

BMS 7-330 铸铝舱门本体非指定部位的力学性能与 HB963 I 类铸件和 HB5480 ZL114A 的本体力学性能 12 级要求的数据对比见表 4,可见波音飞机舱门铸铝件的本体力学抗拉强度比航标 HB963 和 HB5480 的高出了 59.12%和 3.43%,屈服强度比 HB5480 的高出了 3.43%(HB963 没有要求屈服强度)。

表 4 铸铝舱门本体非指定部位的力学性能与 HB963 和 HB5480 ZL114A T6 的数据对比

| Tab.4 Comparison of mechanical property from non-designed area between cast door and ZL114A T6 casting |                 |                     |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------|
| 材料                                                                                                     | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\delta$ /% |
| D357                                                                                                   | $\geq 310.28$   | $\geq 248.22$       | $\geq 3$    |
| ZL114A(HB963)                                                                                          | $\geq 195$      | —                   | $\geq 1.6$  |
| ZL114A(HB5480)                                                                                         | $\geq 300$      | $\geq 240$          | $\geq 3$    |

2.2 舱门铸铝件表面品质的要求与对比

2.2.1 表面粗糙度

舱门铸铝件整体表面粗糙度要求不低于 C30,参照 D6-10970<sup>[7]</sup>对比样块,其中,C20 表面共有 4 个,见图 2。

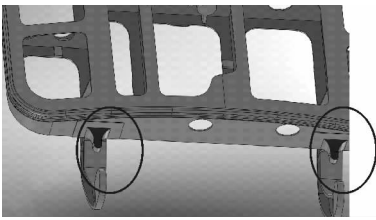


图 2 舱门铸铝件表面粗糙度要求 C20 的区域  
Fig.2 C20 roughness area of cast door

舱门铸铝件表面粗糙度要求为 C40(见图 3):①4 个耳朵的内壁;②所有的内表面和倒角、圆角等。

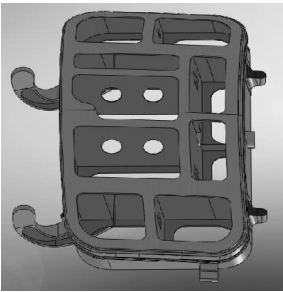
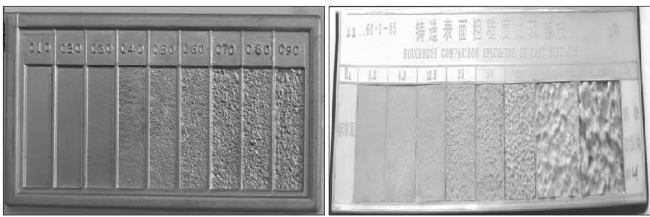


图 3 铸铝舱门表面粗糙度要求 C40 的区域  
Fig.3 C40 roughness area of cast door

除 C20、C40 表面位置外,其他表面均要求至少达到 C30 水平。可以看出,波音飞机对铸铝件的表面粗糙度提出了明确的要求,但在 HB963 和 HB5480 中无明确要求。该薄壁件采用树脂砂铸造,国内一般可以达到 12.5  $\mu\text{m}$  或 6.3  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。图 4 为粗糙度对比。可以看出,波音飞机砂型铸铝件表面粗糙度要高于 6.3  $\mu\text{m}$ 。



(a) 波音 (b) 国标  
图 4 粗糙度标准对比  
Fig.4 Surface roughness comparator

2.2.2 表面质量渗透检验

根据 BMS 7-330 要求,铸件均不允许有裂纹、冷隔、热裂。除下列情况外,裂纹、冷隔、热裂以外的其他线性缺陷也不允许:显微缩松和海绵状缩松按表 5 评

定。主体尺寸小于等于 0.015 英寸(0.38 mm)的单个缺陷不需评为线性缺陷。贯穿性的缺陷不允许。指定部位按 B 级要求,非指定部位按 C 级要求。

表 5 铸件加工和非加工表面渗透检验验收标准 FPL1

Tab.5 Penetration acceptance requirement of machined and non-machined surface

| 缺陷类型<br>FPL2,3                                   |                    | 等级                          |                             |
|--------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                  |                    | B                           | C                           |
| 单个非线性缺陷的尺寸<br>气孔<br>缩孔<br>夹渣 FPL 4,6             | 表面                 | 0.06<br>(1.52 mm)<br>或 1/3t | 0.09<br>(2.29 mm)<br>或 1/3t |
|                                                  |                    |                             | 0.12<br>(3.01 mm)           |
|                                                  |                    |                             |                             |
| 缺陷区域的最大尺寸<br>海绵状缩松<br>显微缩松<br>FPL 6              | 线性                 | 0                           |                             |
|                                                  |                    |                             | 0.12<br>(3.01 mm)           |
|                                                  |                    |                             |                             |
| 在 50.8×50.8 mm 范围<br>内可接受的缺陷的最<br>大数目 FL 5,FPL 5 | 非线性的分离的相近<br>的缺陷群  | 3                           | 4                           |
|                                                  |                    |                             |                             |
|                                                  |                    |                             |                             |
| 在 50.8×50.8 mm 范围<br>内可接受的缺陷群的<br>最大尺寸 FPL 7     | 海绵状缩松<br>显微缩松      | 1                           | 1                           |
|                                                  |                    |                             |                             |
|                                                  |                    |                             |                             |
|                                                  | 多个非线性的相近<br>的缺陷群区域 | 0.12<br>(3.01 mm)           | 0.25<br>(6.35 mm)           |
|                                                  |                    |                             |                             |
|                                                  |                    |                             |                             |

注:FPL1 尺寸极限针对实际缺陷的尺寸而不是渗透区域的尺寸;FPL2 如果缺陷与所有其他缺陷都能清晰的分开而不是团簇在一起的话,非线性缺陷的尺寸是允许尺寸的 1/2 或 0.38 mm 时,无论哪个都是可接受的;FPL3 非线性缺陷表现出过度渗透(由一个小表面渗出大的表层的空隙)时,或有不明确的显示时,其评定可参考该区域的射线探伤指标。此区域的探伤应在图纸要求的探伤之外另外检验;FL5 如果单个缺陷之间的距离符合 FL3 中的规定,当缺陷小于指定的最大尺寸的 1.5 倍时,单个缺陷级别的限制不适用;FPL 6 邻近的缺陷之间的距离在其中最大缺陷尺寸的 3 倍之内时应评为一个;FPL 7 团簇不论尺寸怎样,之间的距离在其中最大团簇尺寸的 3 倍之内时应评为一个团簇。

HB963 对飞机砂型铸件的表面品质要求为:①不允许有冷隔、裂纹、缩孔和穿透性缩松。待加工面上允许有经加工可去除的缺陷,但裂纹应彻底清除;②在非加工表面上,单个孔洞的最大直径应≤3 mm,深度不超过壁厚的 1/3;在安装边上不应超过壁厚的 1/4,且≤1.5 mm;③在上述缺陷的同一截面的反面,不应有类似缺陷。成组孔洞,对于 I、II 类铸件,最大直径≤1.5 mm,深度不应超过壁厚的 1/3,且≤1.5 mm;④在加工后的表面上,单个孔洞的最大直径≤1.5 mm,深度≤1 mm。

上述缺陷的数量、边距等应符合表 6 的规定。  
在加工表面上,一般按表 7 中的 2 级针孔验收<sup>[9]</sup>。  
局部允许 3 级针孔,但不应超过受检面积的 25%。

在 HB5480 中只规定了铸件不允许有冷隔、裂纹和穿透性缺陷,其他缺陷未作规定。从 3 个标准的规定描述中,波音标准 BMS 7-330 对渗透检测的要求更为严格。

表 6 铸件中孔洞数量、边距的规定

Tab.6 Requirement of holes quantities and distance in casting

| 铸件种类    | 铸件<br>表面积<br>S/cm <sup>2</sup> | 单个孔洞                                    |                 | 成组孔洞                      |                                           | 孔洞边<br>缘距铸<br>件边缘<br>的距<br>离/mm  |
|---------|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
|         |                                | 在 10 cm×<br>10 cm 面<br>积上孔<br>洞总<br>数/个 | 孔洞<br>边距/<br>mm | 1 个铸<br>件上的<br>孔洞总<br>数/个 | 以 3 cm×<br>3 cm 面<br>积为 1 组<br>其孔洞<br>数/个 | 在 1 个<br>铸件上<br>孔洞组<br>的数<br>量/组 |
| 小型<br>件 | S<<br>1 000                    | ≤3                                      | ≤10             | ≤4                        | ≤3                                        | ≤2                               |
| 中型<br>件 | 1 000≤<br>S≤3 000              | ≤3                                      | ≤10             | ≤6                        | ≤3                                        | ≤2                               |
|         | 3 000<<br>S≤6 000              | ≤3                                      | ≤10             | 10                        | ≤3                                        | ≤2                               |
|         | 6 000<<br>S≤8 000              | ≤3                                      | ≤10             | ≤15                       | ≤3                                        | ≤2                               |
| 大型<br>件 | 8 000<<br>S≤30 000             | ≤3                                      | ≤10             | ≤18                       | ≤3                                        | ≤2                               |
|         | 30 000<<br>S≤100 000           | ≤3                                      | ≤10             | ≤20                       | ≤3                                        | ≤2                               |

注:非加工表面上最大直径小于 1 mm,加工后表面上最大直径小于 0.5 mm 的单个孔洞不予计算。

表 7 铸件针孔等级

Tab.7 Pinhole class of casting

| 严重程度 | 参考图像 | 在 1 cm <sup>2</sup> 范围内孔洞<br>的数量和尺寸            |
|------|------|------------------------------------------------|
| 01   | —    | 无可见孔洞                                          |
| 1    |      | 不超过 5 个,其中<br>4 个不超过 0.1 mm<br>1 个不超过 0.2 mm   |
| 2    |      | 不超过 10 个,其中<br>8 个不超过 0.1 mm<br>2 个不超过 0.2 mm  |
| 3    |      | 不超过 15 个,其中<br>12 个不超过 0.1 mm<br>3 个不超过 0.2 mm |
| 4    |      | 不超过 20 个,其中<br>14 个不超过 0.1 mm<br>6 个不超过 0.2 mm |

2.3 内部品质 X 射线检验

舱门铸件内部探伤要求见表 8。当气孔和夹渣距离铸件边缘大于缺陷最大尺寸的 2 倍时,铸件将被拒

表 8 内部射线探伤要求

Tab.8 Internal inspection requirement

| 缺陷      | 参考底片 | 指定区域 | 非指定区域 |
|---------|------|------|-------|
| 气孔      | 1.1  | 1    | 2     |
| 圆形针孔    | 1.21 | 1    | 3     |
| 长形针孔    | 1.22 | 1    | 3     |
| 缩孔      | 2.1  | 1    | 2     |
| 缩松      | 2.2  | 1    | 2     |
| 夹渣(低密度) | 3.11 | 1    | 2     |
| 夹渣(高密度) | 3.12 | 1    | 2     |
| 偏析      | —    | 不允许  | 不允许   |
| 裂纹      | —    | 不允许  | 不允许   |
| 冷隔      | —    | 不允许  | 不允许   |

注:参照 ASTM E 155<sup>[10]</sup> 评片

收。附铸试片和剖切试片的内部品质应达到指定区域的要求。

HB963 对铸铝件的 X 射线检测要求见表 9。

表 9 HB963 对铸件内部 X 射线探伤要求

| Tab.9 Internal inspection requirement of casting in HB963 |                                                                                              |            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 缺陷名称                                                      | 技术要求                                                                                         | 标准编号       |
| 圆形针孔                                                      | I 类铸件指定部位按 2 级验收                                                                             | GB/T 11346 |
|                                                           | I 类铸件非指定部位和 II 类铸件按 4 级验收,对于液压和气压附件按 2 级验收,局部允许 4 级针孔,但不应超过受检面积的 25%,当气密性试验满足设计要求时,允许按 4 级验收 |            |
| 长形针孔                                                      | I 类铸件<br>I 类铸件                                                                               | HB5395     |
| 海绵状疏松                                                     | I 类铸件<br>I 类铸件                                                                               | HB5396     |
| 分散疏松                                                      | I 类铸件<br>I 类铸件                                                                               | HB5397     |

此外,铸件内部不允许有裂纹,内部偏析按专用的技术文件验收。

HB5480 对铸铝件的内部品质检测按表 10 和表 11 要求来执行。

表 10 铸件类别相应的 X 射线检验等级

| Tab.10 X-ray inspection class of casting |          |       |
|------------------------------------------|----------|-------|
| 铸件类别                                     | X 射线检验等级 |       |
|                                          | 指定区域     | 非指定区域 |
| I                                        | B 或 A    | C 或 B |
| II                                       | C 或 B    | C     |
| III                                      | C        | D     |
| III                                      | D        |       |

表 11 铝铸件中最大允许缺陷

| Tab.11 Max allowance for defect in casting |          |       |   |     |                |     |                |     |                |   |  |    |  |
|--------------------------------------------|----------|-------|---|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|---|--|----|--|
| 缺陷                                         | 标准射线底片编号 | 厚度 mm |   |     |                |     |                |     |                |   |  |    |  |
|                                            |          | 6     |   | 20  |                | 6   |                | 20  |                | 6 |  | 20 |  |
|                                            |          | A 级   |   | B 级 |                | C 级 |                | D 级 |                |   |  |    |  |
| 气孔                                         | 1.1      | 无     | 无 | 1   | 1              | 2   | 2              | 5   | 5              |   |  |    |  |
| 针孔(圆形)                                     | 1.21     | 无     | 无 | 1   | 1              | 3   | 3              | 7   | 7              |   |  |    |  |
| 针孔(长条形)                                    | 1.22     | 无     | 无 | 1   | 2              | 3   | 4              | 5   | 5              |   |  |    |  |
| 缩孔                                         | 2.1      | 无     | 无 | 1   | 1 <sup>1</sup> | 3   | 2 <sup>1</sup> | 3   | 3 <sup>1</sup> |   |  |    |  |
| 疏松(海绵状)                                    | 2.2      | 无     | 无 | 1   | 1              | 2   | 2              | 4   | 3              |   |  |    |  |
| 夹杂物(较低密度)                                  | 3.11     | 无     | 无 | 1   | 1              | 2   | 2              | 4   | 4              |   |  |    |  |
| 夹杂物(较高密度)                                  | 3.12     | 无     | 无 | 1   | 1              | 2   | 1              | 4   | 3              |   |  |    |  |
| 偏析                                         | 2        | 无     | 无 | 无   | 无              | 无   | 无              | 无   | 无              |   |  |    |  |
| 裂纹                                         | 2        | 无     | 无 | 无   | 无              | 无   | 无              | 无   | 无              |   |  |    |  |
| 冷隔                                         | 2        | 无     | 无 | 无   | 无              | 无   | 无              | 无   | 无              |   |  |    |  |

注:1.没有线程标准底片,各种壁厚铸件可采用厚度为 6 mm 的标准射线底片;2.没有现成标准底片

从以上 3 个标准的对比来看,波音标准 BMS 7-330 基本和 HB5480 的要求相当,且都高于 HB963 的要求。

2.4 尺寸精度要求

舱门铸铝件尺寸为 650 mm×350 mm×100 mm,尺寸公差要求为 1.5 mm 之内,壁厚为 2 mm,壁厚公差要求在 1.746~2.762 mm 之间。

HB963 和 HB5480 均按 HB6103<sup>[11]</sup>来执行尺寸精度要求。根据 HB6103 的描述,铸铝砂型铸造最高的尺寸精度为 CT7,国内部分企业可以达到 CT6 级。针对舱门铸铝件,可参考的尺寸公差要求为 CT6 级 1.4 mm 之内,CT7 级 2 mm 之内。对于壁厚公差,标准中没有规定。从上述描述对比中,可以看出波音飞机的舱门铸铝件尺寸精度与我国航标的最高等级基本一致。

综上所述,经过全面对比,波音飞机舱门铸铝件的验收技术要求整体上高于国内航空航天标准。

3 舱门铸铝件的研制

该铸件采用了砂型低压铸造的工艺方案,浇注系统见图 5。可以看出,为了降低铝液在砂型中的热量损失,横浇道设计成一个块大厚板,内浇道的距离也需要充分考虑铝合金液的流动距离。为了保证铸件指定部位力学性能,在指定部位设置了冷铁,见图 6。

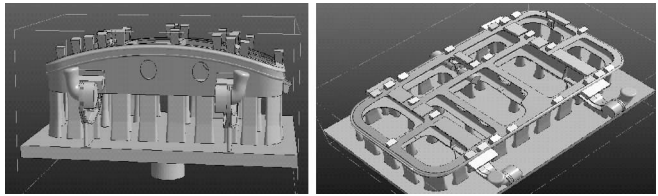


图 5 波音 737 飞机舱门铸铝件浇注系统  
Fig.5 Gating system of cast door of B737 airplane

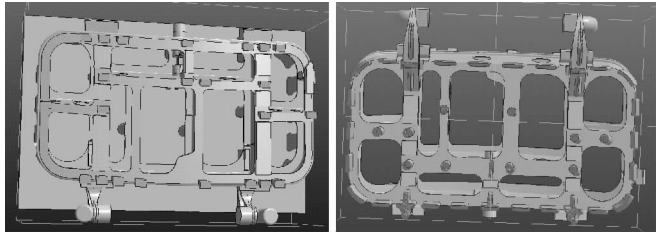


图 6 波音 737 飞机舱门铸铝件冷铁布局  
Fig.6 Chillers design of cast door of B737 airplane

采用自制的 D357 合金液,为了保证其纯净度,采用质量分数为 99.99%的高纯铝锭配料。采用旋转喷吹除气机除气,合金密度要求大于 2.66 g/cm<sup>3</sup>。测量密度后在 30 min 之内完成浇注。

浇注工艺参数:浇注温度为 740~760 ℃,充型速度为 80 mm/s,保压时间为 600~660 s。

铸件经外观检查、尺寸检查、X 光探伤检查、荧光检查合格后,进行热处理。

固溶(T4 处理),初始温度小于 150 ℃,升温速度小于 150 ℃/h,淬火温度为 543 ℃,保温时间为 8~16 h,淬火转移时间为 15 s 以内。时效(T6 处理),初始温度小于 100 ℃,升温速度小于 150 ℃/h,时效温度为 160 ℃,保温时间这 6~12 h,出炉空冷。热处理过程中,为

防止产品变形,设计了专门的淬火工装,见图 7。



图 7 波音 737 飞机舱门铸铝件淬火工装

Fig.7 Quenching fixture for cast door of B737 airplane

经过研制,成功开发出了 2 mm 厚舱门铸铝件,见图 8。



图 8 2 mm 壁厚舱门铸铝件

Fig.8 Cast door with 2 mm thickness

铸件外形尺寸为 650 mm×350 mm×100 mm,壁厚为 2 mm,材质为 D357 合金,T6 处理。指定部位 X 射线探伤达到了 AMS-21180 I 级标准。材料和本体解剖力学性能数据见表 12。可以看出,均满足要求。图 9 为铸件拉伸断口的显微组织。可以看出,断口处晶粒细化,分布均匀,有利于得到较高的力学性能。

表 12 D357 材料力学性能和产品力学性能测试值

| Tab.12 Tensile test strength of D357 alloy and its product |                     |                         |                 |          |                     |                         |                 |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|----------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| T6                                                         | $\sigma_b$ /<br>MPa | $\sigma_{0.2}$ /<br>MPa | $\delta$ /<br>% | T6       | $\sigma_b$ /<br>MPa | $\sigma_{0.2}$ /<br>MPa | $\delta$ /<br>% |
| 材料要求                                                       | 344.75              | 275.80                  | 5               | 本体指定部位要求 | 344.75              | 275.80                  | 5               |
| 单铸试棒 1                                                     | 364.75              | 319.93                  | 9               | 取样 1     | 354.95              | 294.97                  | 12              |
| 单铸试棒 2                                                     | 364.75              | 324.75                  | 7.5             | 取样 2     | 349.99              | 294.97                  | 7.5             |
| 非指定区域要求                                                    | 310.28              | 248.22                  | 3               | 取样 3     | 349.99              | 329.99                  | 5.5             |
| 取样 1                                                       | 369.99              | 320.00                  | 10.5            | 取样 4     | 379.98              | 339.99                  | 12              |
| 取样 2                                                       | 364.95              | 304.97                  | 7.5             | 取样 5     | 359.99              | 304.97                  | 8.5             |
| 取样 3                                                       | 369.99              | 294.97                  | 8.5             | 取样 6     | 354.95              | 299.93                  | 7               |
| 取样 4                                                       | 369.99              | 320.00                  | 10              | 取样 7     | 354.95              | 275.94                  | 11.5            |
| 取样 5                                                       | 349.99              | 339.99                  | 5               | 取样 8     | 364.95              | 339.99                  | 15              |
| 取样 6                                                       | 369.99              | 266.45                  | 11.5            | 取样 9     | 364.95              | 264.97                  | 12.5            |
| 取样 7                                                       | 354.95              | 274.97                  | 8.5             | 取样 10    | 369.99              | 329.99                  | 11              |
| 取样 8                                                       | 364.95              | 254.98                  | 11.5            | 取样 11    | 359.99              | 304.97                  | 8.5             |
|                                                            |                     |                         |                 | 取样 12    | 364.95              | 264.97                  | 12.5            |
|                                                            |                     |                         |                 | 取样 13    | 364.95              | 310.00                  | 12              |

4 舱门铸铝件优势分析

针对舱门铸铝件,波音公司同时采用了锻铝手工铆接和整体铸造的两种生产模式,相比锻铝手工铆接工艺,生产周期可从 6 h/件降至 50 min/件,整体铸造可

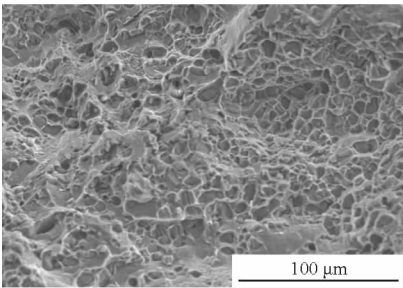


图 9 试样拉伸断口的显微组织

Fig.9 Fracture morphology of specimen

缩短生产周期,质量减轻约 40%,同时还能提高产品的整体刚度。

所以在波音、空客等国际大飞机制造商的舱门等零部件制造中,采用高强薄壁的铸铝件是最为经济和可靠的方案<sup>[5,12]</sup>。

5 结 语

经过对比,波音飞机舱门铸铝件在材料性能、表面质量、内部质量和尺寸精度上均高于国标。

通过在高纯净铝合金熔炼、铸造工艺设计、热处理工艺和防变形工装等方面的工作,成功研制出了飞机舱门铸铝件。

参 考 文 献

[1] HOSEY N. Frame detail-Forward Access Door[M]. Seattle: Boeing Corporate Offices, 2000.

[2] BMS 7-330C——2005. Aluminum Alloy Casting for Aircraft Structural Applications[S].

[3] HB963-2005——2005. 铝合金铸件规范[S].

[4] HB5480-1991——1991. 高强度铝合金优质铸件[S].

[5] AMS4241C——2007. Aluminum Alloy Castings 7.0Si-0.58Mg-0.15Ti-0.06Be(D357.0-T6) Solution and Precipitation Heat Treated Dendrite Arm Spacing (DAS) Controlled[S].

[6] HB962-2001——2001. 铸造铝合金[S].

[7] D6-10970C——2002. Cast Surface Roughness Comparator[S].

[8] GB/T 6060-2018——2018. 铸造粗糙度对比样块,第一部分 铸造表面[S].

[9] ISO 10049: 1992——1992. 铝合金针孔目视评定法第 1 版[S].

[10] AMTS E155-05——2005. Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings[S].

[11] HB6103-86——1986. 铸件尺寸公差[S].

[12] 冯志军,闫卫平,申泽骥. 铸铝件与大飞机制造[J]. 航空制造技术, 2009(5): 27-30.

(编辑:栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 [www.special-cast.com](http://www.special-cast.com)

离合器壳体压铸工艺分析及缺陷改善

周海军 吴玉婷 赵郁臻 刘后尧 张 森  
(广东鸿图南通压铸有限公司)

**摘 要** 国产新一代 CVT 变速箱燃油经济性、动力性、舒适性好,成本低,但是集成结构的复杂化和功能的多样化给离合器壳体的制造带来了极大的挑战。通过应用并完善高压点冷型芯针设计,可提高热节的冷却效果,延长型芯针的使用寿命;通过改进毛坯形状设计,增大挤压销的直径,可解决厚大位置内部缩松、缩孔缺陷,保证产品的内部品质和气密性。

**关键词** 镶件;模具设计;高压点冷型芯针;挤压销

**中图分类号** TG249.2;U261.24<sup>+</sup>1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.026 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Die Casting Process Analysis and Defect Improvement of Clutch Housing

Zhou Haijun, Wu Yuting, Zhao Yuliu, Liu Houyao, Zhang Sen  
[Guangdong Hongtu (Nantong) Die-casting Co., Ltd.]

**Abstract:** The new generation of domestic CVT transmission has desirable fuel economy, power performance, comfort and low cost, however the complexity of integrated structure and diversity of functions bring great challenges to the manufacturing of clutch housing. By applying and perfecting the design of high pressure point cooling core pin, the cooling effect of hot spot can be improved effectively and the service life of pin can be prolonged. By improving the shape design of blank and increasing diameter of squeezing pin, shrinkages and porosities in the thick position can be effectively eliminated, and the internal quality and gas tightness of the product can be guaranteed.

**Key Words:** Insert, Mold Design, High Pressure Point Cooling Core Pin, Squeezing Pin

国产新一代 CVT 变速箱可获得传动系统与发动机工况的最佳匹配,但是变速箱结构复杂、壁厚变化大,内部和表面品质、加工尺寸精度以及气密性要求高,导致产品制造困难,废品率高,需要对其压铸工艺进行研究和改进。

该离合器壳体材质为 ADC12 合金,轮廓尺寸为 545 mm×430 mm×230 mm,一般壁厚为 3.5 mm,产品质量为 10.47 kg,峰值年产量为 20 万件,内部品质要求优于 ASTM E 505 2 级标准,外观品质要求装配及密封位置加工后气孔直径小于 0.4 mm,间隔大于 8 mm,数量小于 3 个;并且要求毛坯表面不允许有铸点、冷隔、裂纹、飞边、毛刺等缺陷;气密性要求在 300 kPa 的压力下,高压油道泄漏量小于 3 mL/min。

通过对离合器壳体的压铸工艺设计、压铸缺陷的原因分析和工艺改进,提出同类产品的典型压铸缺陷解决方法,为其应用提供参考。

1 压铸工艺设计

1.1 压铸机型选择

压铸时,为了保证铸件尺寸精度和内部品质,防止压铸过程飞料,必须锁紧分型面。

铸造总投影面积( $S_{总}$ ):

$$S_{总} = S_{产品} + S_{浇道} + S_{溢流槽} = 3\,229\text{ cm}^2 \tag{1}$$
$$F_{锁} \geq k p S_{总} \tag{2}$$

式中, $k$  为安全系数,取 1.1; $p$  为压射比压,为 75 MPa,计算得  $F_{锁}$  最小值为 26 650 kN。

根据锁模力计算结果和实际情况,选择 IDRA 的 27 000 kN 压铸机。

1.2 压铸模具设计

内浇口设计应使铝液的充型距离尽量短,以减少铝液温度的降低;浇口位置应使铝液到达型腔各处位置距

收稿日期:2022-04-18;修改稿收到日期:2022-06-15

第一作者简介:周海军,男,1975 年出生,工程师,江苏南通(226300),E-mail: hai\_jun\_zhou@163.com

引用格式:周海军,吴玉婷,赵郁臻,等. 离合器壳体压铸工艺分析及缺陷改善[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):717-720.  
ZHOU H J, WU Y T, ZHAO Y L, et al. Die casting process analysis and defect improvement of clutch housing[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2023, 43(5):717-720.