

DOI: 10.11973/wsje201509014

# 大客发动机涡轮后机匣射线检测工艺及工装试验

庄志强<sup>1</sup>, 陈琛<sup>2</sup>, 李玉龙<sup>2</sup>, 王森<sup>1</sup>, 姜炜<sup>1</sup>, 钱月林<sup>1</sup>

(1. 上海材料研究所, 上海 200437; 2. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 200240)

**摘要:** 针对某大客发动机涡轮后机匣镍基合金整体精铸、变壁厚、多转角等结构特点, 特制了在其射线检测时的专用检测工装, 保证了射线检测工艺参数的一致性; 通过试验优选了各项射线检测工艺参数; 保证了机匣所有高应力区域及转接区域的 100% 检测; 达到了机匣的质量检测要求, 保证了机匣使用的可靠性。

**关键词:** 涡轮后机匣; 射线检测; 机匣专用检测工装

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2015)09-0055-04

## The Technology and Tooling Experiment of the X-Ray Detection of the Turbine Rear Casing of the Engine of Large Passenger Plane

ZHUANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, LI Yu-long<sup>2</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>, QIAN Yue-lin<sup>1</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

2. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For the overall casting, variable wall thickness, multi angle structure characteristics for turbine rear casing of nickel based alloy casting of the large passenger plane engine, a special inspection tooling is designed and manufactured, ensuring the consistency of ray detection process parameters. Optimizing the parameters of the ray detection technology, all the high stress area and 100% transfer area can be detected by radiographic testing, the inspection quality for the turbine rear casing and the usage reliability of the turbine rear casing can be assured.

**Keywords:** Turbine rear casing; Radiographic testing; Special inspection tooling for casing

国外航空发动机大型机匣铸件的 X 射线检测, 具备完善的检测标准、成熟的检测技术和检测经验<sup>[1-4]</sup>。

我国研制的航空发动机涡轮后机匣(图 1)由镍基合金浇注而成。从结构上来看, 机匣结构复杂, 具有外形尺寸大、最小壁厚小、变壁厚、多转折、空心等特点; 在浇注凝固过程中, 铸件内部容易产生气孔、夹杂、缩孔、疏松、裂纹等缺陷; 表面容易产生浇注不足、冷隔、留痕等缺陷。

为了保证机匣铸件的内部和表面质量, 笔者用

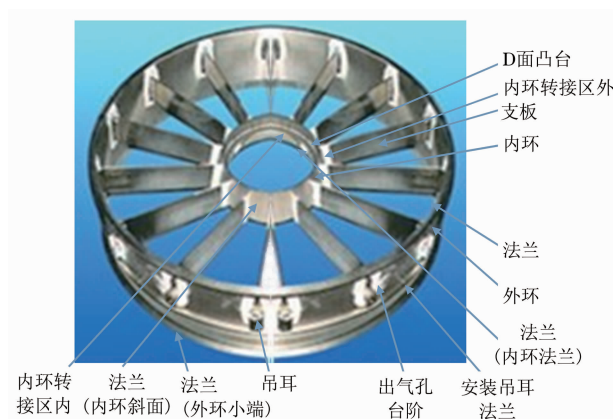


图 1 涡轮后机匣示意

X 射线检测方法进行检测试验, 设计了专用的检测工装, 实现多角度照射, 排除检测盲区; 分析了包括透照区域划分、透照方式、透照布置、透照参数及胶

收稿日期: 2015-08-06

基金项目: 上海市科委应用技术开发资助项目(2013-101)

作者简介: 庄志强(1973—), 男, 工程师, 主要从事无损检测工艺研究及无损检测培训等工作。

片选择等在内的各项射线检测工艺。提出的针对机匣的专用X射线检测方法,可提供评估机匣铸件的冶金质量、缺陷尺寸、缺陷位置等原始数据;并对缺陷进行评定,保证机匣的长寿命及高可靠性意义重大。

## 1 机匣的质量要求

(1) 100%检测,不允许存在检测盲区。

(2) 在任何情况下,最厚和最薄截面处的射线照相灵敏度水平至少要达到2%。

(3) 像质计的材料成分与被检机匣相同或与机匣具有相同的吸收特性。当现场使用的射线检测像质计不可用或材料厚度低于像质计的厚度范围时,也可采用不同类型的像质计,这时应使用等效因子(可在相关资料上查得)进行换算。换算方法如下:用镍基合金相对于其他金属或合金的等效因子乘以X射线检测部位厚度得到镍基合金相当于其他合金的等效厚度,再用看到的最细像质计丝径除以等效厚度再乘以百分之一百就得到射线检测灵敏度。

## 2 机匣射线检测的难点

(1) 结构复杂。机匣由整体精密铸造而成,具有截面多变,转角多的特点。

(2) 厚度多变。机匣壁厚最薄处为2.5 mm,最厚处为30 mm。

(3) 轮廓外形尺寸大。

根据以上机匣外形结构的特点,射线检测存在的难点主要是:透照区域的划分、透照方式、透照布置(贴片、透照角度、散射线屏蔽)、透照参数(电压、焦距)的选择等。

## 3 机匣透照区域的划分

机匣外形结构复杂,正确划分透照区域非常关键。因为正确划分透照区域不仅可以保证射线底片质量及100%检测,还可以通过减少透照次数来提高检测效率。

此机匣由空心支板(14个)、内环、外环分流环、法兰、吊耳、安装吊耳、出气孔等组成,将这些部位按照结构和厚度进行分区,共分为11个区(A~H区、J~L区),再将每个分区划分为若干小区(一次透照的有效范围),然后根据各区自身结构特点,确定透照参数及布片,该铸件共需透照约498次。

## 4 胶片的选择

此机匣部分部位截面多变,厚度多变。由于不可能分别针对不同厚度进行多次透照,试验使用双胶片技术,选用感光度不同的胶片(AgfaD4、D7)同时进行透照;为了保证影像质量,试验选用细颗粒胶片(AgfaD4)。这样既得到了较高的影像对比度,又具有适当的宽容度,提高了检测效率。

## 5 透照方式

### 5.1 单壁透照

① 外环(A区)。② 法兰(外环大端B区)。③ 内环转接区外(C区)。④ 内环(D区)。⑤ 内环转接区内(D区)。⑥ 法兰(内环斜面E区)。⑦ D面凸台(F区)。⑧ 法兰(外环小端G区)。⑨ 吊耳(H区)。⑩ 出气孔台阶(J区)。⑪ 安装吊耳法兰(K区)。⑫ 法兰(内环法兰L区)。

### 5.2 双壁透照

支板(C区):由于机匣支板的结构特点,在透照时需进行双壁透照,相对来说双壁透照的底片质量较差,但最主要的问题在于缺陷定位困难,此次试验通过改变射线源、被检部位和底片的相对位置,来确定缺陷所在的位置,以便返修和工艺改进。即,主要通过检测工装改变机匣的空间位置,从而改变射线源的透照角度,使缺陷投影发生变化,再结合前面拍摄的底片对比,判断出缺陷位于双壁的上壁还是下壁。

## 6 散射线的防护

在射线检测中,散射线的屏蔽是重要的,特别是结构复杂、厚度变化大的工件,如不屏蔽或屏蔽不好,到达胶片的散射线过多,会造成底片的有效评定区减小、对比度降低,使灵敏度严重下降。

散射线主要来自于透照工件本身及靠近工件背面与周围的物体,分为前散射、背散射、边蚀散射。由于机匣属于复杂构件、厚度变化大,射线透照时产生的这些散射线很强,因此在每次透照过程中,都必须注意散射线的防护问题,解决措施为:① 机匣非透照区域,用铅板进行屏蔽。特别是透照部位有厚度差的边缘或有内孔,要用多层薄铅板、铅泥塞紧或包紧,以防止边蚀现象造成有效检测范围的缩小和灵敏度的降低。② 胶片暗袋背面加铅板屏蔽,以防止透照部位背面及周围部位产生的散射线造成对比

度和灵敏度的降低。③ 每个分区进行第一次透照时,背散射利用“B”铅字标记进行验证。

由于散射线主要来自于透照工件本身及靠近胶片的工件结构,采取①和②措施,可以使机匣本身非透照部位不与一次射线作用,从而不产生低能量的散射线;机匣中的较薄部位的射线也不会向较厚部位散射,因此可以极大地降低射线散射比及边蚀现象,保证胶片的灵敏度,并采取③措施验证①和②措施的实际效果,若底片上出现铅字“B”的较亮影像,此底片作废;若此铅字“B”影像较暗或不可见,表明背散射线屏蔽良好,则底片合格。

## 7 机匣的检测工装

鉴于机匣外廓大且结构复杂,人工对透照焦距和透照角度,不能保证参数的一致性,对 X 射线透照灵敏度和缺陷的有效检测有较大影响。为了保证能重复实现机匣、胶片、X 射线管之间的相对位置和透照角度,需要采用一定的机械手段去控制。此次试验为机匣特制了专门的检测工装,如图 2 所示,使用特制工装使试验操作更为便捷、省力、高效,在对不同部位检测时,可准确控制所检部位的位置,大大提高了试验的重复性和一致性,检测工装使用结构如图 3 所示。

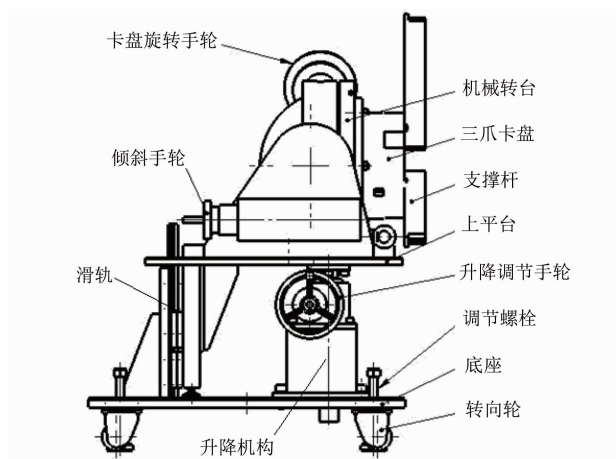
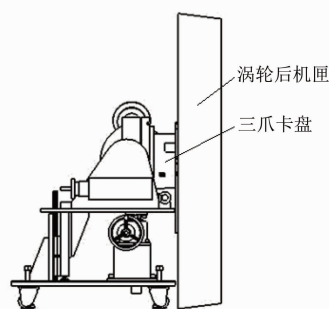
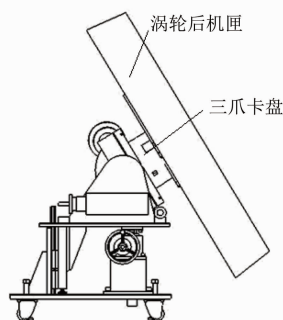


图2 特制检测工装

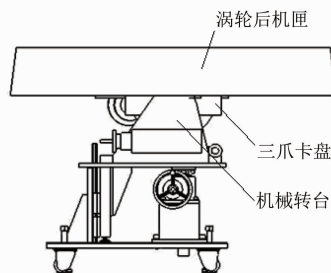
机械转台上的三爪卡盘为被检机匣的夹持部位,三爪卡盘通过两组蜗轮蜗杆结构而设置在机械转台上,通过旋转倾斜手轮带动蜗轮蜗杆,使固定在蜗轮上的转轴旋转,从而使三爪卡盘绕转轴旋转,实现三爪卡盘绕转轴在水平和垂直方向之间转动,即实现三爪卡盘的倾斜;通过旋转手轮带动另一组蜗轮蜗杆,使固定在该蜗轮上的转轴旋转,从而使三爪卡盘绕该转轴 360° 旋转,实现三爪卡盘的 360° 旋



(a) 机匣垂直放置



(b) 机匣倾斜放置



(c) 机匣水平放置

图3 检测工装使用垂直、倾斜、水平放置图

转,通过三爪卡盘倾斜及 360° 旋转来调整被检机匣的最佳检测工位;升降机构可以调节上平台的高度,进而调节被检机匣的曝光距离和透照角度,找到射线检测的最佳透照工艺。通过转向轮来移动装置,调整光源与被检机匣之间的距离,确保透照部位与光源之间的距离为标准焦距,完美匹射线透照工艺。

## 8 机匣最佳透照参数试验

下面仅以 A 区(壁厚 3.5 mm)为例,说明优选射线检测工艺参数的试验。

由于 A 区面大、壁厚均匀,但较薄,考虑几何不清晰度、透照厚度比  $K \leq 1.1$  (一次透照有效范围) 和黑度在 1.5~4.0 范围(最佳黑度 2.0),焦距选择 700 mm,几何不清晰度远小于规定要求,则:

$$U_g = \frac{dF}{f-d} = \frac{3.5 \times 1}{700 - 3.5} = 0.005 \quad (1)$$

式中： $F$  为焦点尺寸； $f$  为焦距； $d$  为壁厚。

同时，机匣 A 区外径 1 400 mm、壁厚 3.5 mm，在焦距 700 mm 时，也可以使一次透照有效范围较大，提高照相效率；根据射线检测仪 GE160 曝光曲线图，曝光量选择 25 mA·min（电流 10 mA、时间 2.5 min），电压选择 85、95、105 kV，胶片选择 Agfa D2、D4、D7，对以下不同射线检测透照工艺进行比较。透照后，经相同的暗室条件下处理，分别测量得到各底片的黑度和灵敏度如表 1 所示。

表 1 A 区不同射线检测透照工艺和结果

| 胶片 | 显影/min | 定影/min | 黑度   | 像质指数<br>(铝) | 灵敏度/% |
|----|--------|--------|------|-------------|-------|
| D2 | 5      | 15     | 0.55 | 13 #        | 0.39  |
| D4 | 5      | 15     | 1.27 | 14 #        | 0.32  |
| D7 | 5      | 15     | 1.34 | 14 #        | 0.32  |
| D2 | 5      | 15     | 1.81 | 13 #        | 0.39  |
| D4 | 5      | 15     | 2.10 | 14 #        | 0.32  |
| D7 | 5      | 15     | 2.71 | 14 #        | 0.32  |
| D2 | 5      | 15     | 2.82 | 14 #        | 0.32  |
| D4 | 5      | 15     | 3.51 | 14 #        | 0.32  |
| D7 | 5      | 15     | >4.0 | 14 #        | 0.32  |

由测得结果知：

(1) 电压取 85 kV 时，D2、D4、D7 胶片虽然灵敏度都达到要求（ $\leq 2\%$ ），但黑度都低于 1.5，不满足最低黑度要求，可以增加曝光量，但会降低效率。

(2) 电压取 95 kV 时，D2、D4、D7 胶片灵敏度都达到要求（ $\leq 2\%$ ），黑度都高于 1.5，D2 黑度最低，低于最佳黑度（2.0），D7 黑度最高，高于最佳黑度，

（上接第 29 页）

## 4 结语

(1) 漏磁检测仪采用标准试板可以对各独立通道能否正常工作进行直观的判断，如仪器 B 通道 1 是损坏的。

(2) 明确了通道不一致性确实能对检测结果造成影响，能够直接地影响对缺陷尺寸的判断。

(3) 提出了两个可以表征通道一致性的参数，包括信号偏离度和线性偏差率。并且也提出了相应的计算方法。

(4) 当信号偏离度越小且线性偏差率也越小时，独立通道之间才具有较好的一致性。

笔者提出了常见的两类漏磁检测扫查器通道一致性的评价方法，在今后的研究中可将之运用到更多

D5 黑度居中，在最佳黑度附近。

(3) 电压取 105 kV 时，D2、D4、D7 胶片虽然灵敏度都达到要求（ $\leq 2\%$ ），但黑度都偏大（2.5 以上），远大于最佳黑度。

比较以上结果，依据在保证穿透情况下，电压越低越好（有利于提高底片的对比度）的原则，再综合考虑照相效率、灵敏度、成本，要求曝光时间较短，成本低，黑度适中，灵敏度满足要求，最终选择了最佳射线检测透照工艺，工艺参数为：壁厚 3.5 mm，焦距 700 mm，电压 95 kV，电流 10 mA，时间 2.5 min，胶片 D4，显影 5 min，定影 15 min，黑度不小于 2.0，像质数（铝）14 #，灵敏度 0.32%。

## 9 结语

通过试验，最终确定了涡轮后机匣 X 射线检测的最佳检测工艺。在工艺确定后按照工艺对整个涡轮后机匣进行了 100% 检测，检测的 498 张底片都达到了机匣的质量要求，能够准确识别机匣铸件的内部缺陷，保证机匣使用的可靠性，为机匣后续检测的研究提供基础。

## 参考文献：

- [1] ASTM E747 用于射线照相的丝型透度计的设计、制造和材料、组类标准[S].
- [2] ASTM E2104 先进航空和涡轮材料及部件射线照相检验规程[S].
- [3] ASTM E999 工业射线照相胶片处理质量指南[S].
- [4] ASTM E1254 射线底片和射线胶片的保存指南[S].

的不同种类的多通道漏磁检测仪中，得到更加全面而系统的论述。且仪器的性能指标中并不包括通道一致性，各类漏磁检测标准中也未对此作出规定，但是通道的不一致性确实对检测结果造成一定的影响。

## 参考文献：

- [1] 田利，郭妍琼，侍吉清，等. 大型常压储罐底板腐蚀的漏磁检测与安全评定[J]. 无损检测，2013，35(6)：49-52.
- [2] 康宜华，武新军. 数字化磁性无损检测技术[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
- [3] 任吉林，林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京：科学出版社，2009.
- [4] 王亚东，王翔，徐彦廷，等. 常压储罐底板漏磁检测的信号分析[J]. 无损检测，2014，36(4)：23-25.
- [5] 吴志明. 储罐底板漏磁检测器研制[D]. 湖北：华中科技大学，2012.
- [6] JB/T 10765—2007 无损检测 常压金属储罐漏磁检测方法[S].