

飞机方向舵复合材料无损辐射检测的研究

郭文锋¹ 余锦飞¹ 赵满盈² 范栋³

(1 中国人民解放军 95510 部队 贵州 贵阳 550025; 2 中国人民解放军 94136 部队 宁夏 银川 750001; 3 中国人民解放军 95703 部队 云南 曲靖 655000)

摘要: 方向舵是飞机不可缺少的部件,其质量的好坏在一定程度上决定了飞机的安全性能,因此其质量检查尤为重要。方向舵由碳纤维复合材料采用手糊叠层成型方法制成。根据复合材料的特点和成型工艺,经常采用的无损检测方法是射线检查和超声波检查。本文主要阐述了飞机对方向舵的射线检查方法,检查采用的标准为 GJB 1187A-2001。

关键词: 方向舵; 复合材料; 无损检测

1 工件检测背景

方向舵质量的好坏直接影响飞机的安全性能,因此必须进行质量检测以保证质量要求,而无创伤检测是最有效的方法。

1.1 工件背景

迄今为止,除了极少数特殊形式的飞机之外,大多数飞机需要方向舵。其作用是修正飞机航向和小角度转向。它位于垂尾翼后侧,属于飞机垂尾翼中可操纵的翼面部分,毛坯外观如图 1 所示。



图 1 方向舵毛坯图

1.1.1 方向舵的材质

方向舵需要承受机动载荷、突风载荷等多种载荷,对材质要求很高,以复合材料制成,广泛用于航空领域。本次方向舵材质为碳纤维复合材料。

1.1.2 方向舵损伤对飞机的影响

每架飞机的方向舵都有最大载荷,超过限制值可能导致操作失败或方向舵损坏。行驶中方向舵损坏,可能导致飞机失衡、机体颠簸或无法正确偏转方向,严重时可能导致飞机坠毁。东风航空 517 航班事故、联合航空 585 航班事故等都造成了较大伤亡,事故原因均由方向

舵造成。

1.2 非破坏性检测方法的选择

1.2.1 辐射检测

辐射检测是使用放射线束透过材料或试样,检查部件内部的缺陷。在目前的辐射检测方法中,薄膜辐射照相技术已经成熟,应用最为广泛。许多国家已经建立了薄膜辐射照相技术检测复合材料的规范和标准。

辐射检测用于复合材料的优缺点。辐射检测对于复合材料来说,仍然是最直接且有效的非破坏检测方法之一,尤其是复合材料中蜂窝芯本身类型的缺陷,如芯裂纹、芯接缝粘结缺陷等,适合于检测夹杂物等缺陷,但工件中的层状、脱粘缺陷比较难以检测。

1.2.2 超声波检测

超声波检测是一种常用的无损检测方法。其中,最常见的脉冲回波法可根据缺陷反射波的位置和振幅测量缺陷的位置和大致尺寸^[1]。除了回波法以外,还有探针在工件的相反侧接收信号的透射法。

超声波检测复合材料的优缺点。超声波检测主要针对工件中可能存在的分层、脱粘缺陷,对于蜂窝芯本身的缺陷检测困难。航空领域应用的复合材料多为薄型结构,信噪比低,分辨能力非常低,因此在选择合适的检查方法时应作周密的考量^[2]。

在以上两种无损检测方法中,辐射检测与超声波检测有互补作用,因此在选择检测方法时,应选择最合适的方法,本次研究选择辐射检测。

2 辐射检测

2.1 射线检测的基本原理

从 X 射线机发出来的 X 射线透过工件时,透过缺陷部位的放射线强度与周围部位不同。将底片放置在工件的适当位置,有缺陷的部位受到不同的辐射曝光。将

经过暗室处理得到的底片放在照明灯上,可以明显观察到缺陷部位和完好部位具有不同的黑度,由此判断缺陷的情况。

2.2 透照布置

2.2.1 放射线中心光束的方向

根据 GJB 1187A-2001 4.7.2 的规定,光束一般指被透射部位的中心,在该点上必须垂直于被透射区域的平面或曲面的切线平面。在不能从该方向透过的情况下,或者检测出不利于从该方向透过的缺陷时,也可以从其他适当的方向透过。根据 GJB 1187A-2001 5.5.1 的规定,在选择透射配置时,只有在单壁透射困难或无法实现的情况下才能采用双壁透射方式。

复合材料工件的射线辐射照相检测在制造工艺或成型后进行。确定具体方法前,必须考虑缺陷的性质和特征,特别是其与制品成型工艺的关系。根据碳纤维复合材料制品的成型工艺、形状、铺装结构等,常用的透射方法可分为垂直透射法、切线透射法、平行透射法和斜线透射法。

2.2.2 有效透照区域

有效透照区域主要是控制一次透照中厚度变化在一定的限度之内,即透照厚度之比(K)。

2.3 暗室处理

暗室处理是要步骤,底片影像结果的好坏与暗室作业的操作及人员水平密切相关。其工艺包括显影、显影停止、定影、水洗和干燥。暗室处理方法有手工处理和自动处理两种。

2.3.1 显影

显影是整个底片处理中的重要步骤,底片的质量指标,例如黑色、对比度和颗粒度会受到显影的影响。即使是相同的底片,在不同的显影配方或操作条件下,底片的感光性也不同。

2.3.2 停显

停显是利用停显液使显影液失去显影能力,防止显影过度。

2.3.3 定影

在显影后的底片乳液层中,卤化银未被还原为金属银的层占到 70%,只有除去这些卤化银才能使显影的图像定影,此过程称为定影。

2.3.4 水洗和干燥

(1) 水洗。定影后,应用 16 ~ 24℃ 的流动清水清洗 20 ~ 30min,除去胶片表面和乳剂膜内吸收的硫代硫酸钠和银盐络合物。

(2) 干燥。干燥的目的是去除乳剂层中的水分。分自然干燥和烘箱干燥。自然干燥是将悬挂胶片通风晾干;烘箱干燥一般用温度不超过 40℃ 的热风烘干。

2.3.5 胶片自动处理

胶片自动处理是采用专用自动洗片机从显影到干燥

进行全过程的自动处理。胶片从进片口送入自动洗片机内,然后按顺序通过显影、定影、水洗、干燥,从出片口送出一张处理质量良好的底片。完成上述全过程的处理时间约为 7 ~ 14min 或更短些。与手工处理相比,胶片自动处理的工艺严格且规范化,处理质量稳定、可靠,适于大批量工件的射线照相检测。

3 射线照相检测设备与器材

3.1 射线机

工业上常用射线机分为便携式、固定式和移动式。固定式 X 射线机采用结构完整、功能较强的分立射线发生器、冷却系统、高压发生器和控制系统,是检验/实验室优先选用的 X 射线机。射线发生器与高压发生器之间采用高压电缆连接,系统完善,工作效率高。

射线机主要由射线发生器(X 射线管)、高压发生器、冷却系统、控制和保护系统四部分组成。此次所使用的射线机型号为 XSD-160KV。

3.2 胶片

当强度均匀的射线束透射物体时,如果物体局部区域存在缺陷或结构差异,则改变物体对辐射的衰减,使得不同部位射线强度不同。如果使用检测器(例如在射线照相中采用胶片)来检测透射射线的强度,可以判断物体内部缺陷和物质分布等。

3.3 增感屏

当射线入射到胶片时,由于射线的穿过力很强,大部分可通过胶片。胶片只吸收入射射线很少的能量。为了更多地吸收射线的能量,缩短曝光时间,在射线照相检测中,将前、后增感屏贴附在胶片两侧,与胶片一起进行射线照相,利用增感屏吸收部分辐射能量,达到缩短曝光时间的目的。

增感屏包括金属增感屏、荧光增感屏和金属荧光增感屏。一般技术和较高技术都应采用金属增感屏,只有在特殊的情况下,采用荧光增感屏或金属荧光增感屏也能达到检测质量要求时,才能使用荧光增感屏或金属荧光增感屏。对于 X 射线,当管电压在 100kV 以下时,因为其铅箔增感系数不大于 1,即无增感作用,可以不用增感屏。

3.4 像质计

像质计(像质指示器、透过度计)是测定放射线照片灵敏度的装置,能够根据显示在底片上像质计的影像判断底片影像的质量,能够评价透过技术、薄膜暗室处理状况、缺陷检查能力等。目前使用最广泛的像质计主要有丝型像质计、平板孔型像质计、阶梯孔型像质计,以及槽型像质计和双线像质计等。像质计使用与被检查工件相同或与放射线吸收性能类似的材料制作。不同的像质计设计了各自特定的结构和形式,规定了不同的测

量辐射照片灵敏度方法。

3.5 其他辅助设备及器材

在射线检测的流程中,除了以上器材外,黑度计、观片灯等辅助设备也必不可少。

4 底片评定与工艺卡编制

4.1 底片评定

对底片质量的要求可分为四个方面:

- (1) 黑度应在规定范围内;
- (2) 射线照相灵敏度应达到规定要求;
- (3) 标记系应符合有关规定;
- (4) 外观质量应满足规定要求。

评片条件和对评片条件的要求是根据眼睛的视觉特性提出的,主要可归纳为三个方面。

(1) 暗适应要求。评片者在进入评片室开始工作前,从日光下转移到评片室的适应时间不小于 5 ~ 10min;从室内转移到评片室适应时间不能少于 30s。

(2) 观片灯。观片灯光的颜色必须是日光色,光源应具有足够的亮度并可调。一般情况下,光源最大亮度应达到适合底片黑度的值。必须保证透过底片的亮度不小于或等于条件允许达到的值。另外,对观片灯的要求是光源的照明应采用扩散方式,照明的区域可调整大小,控制在评片者的观察范围内。另外,为了使底片与观察屏幕接触 10min 不发生变形或损伤,观片灯需要具备良好的散热条件。

(3) 评片室。照明亮度应较低,以确保评价的底片表面不会产生强反射光线^[3,4]。当存在不规则的反射光线时,观察缺陷时的亮度对比度降低,影响详细图像的识别。此外,评片室应具有适当的温度和新鲜的空气。

4.2 工艺卡编制

射线照相检测工艺卡是简要规定具体产品射线照相检测的具体技术和要求的图表,用于控制具体产品射线照相检测的技术和指导操作。

射线照相检测工艺卡一般应包括产品编号、产品的有关资料、检测设备及器材、检测技术标准、检测方法与技术参数、检测部位示意图、检测质量主要控制指标等方面内容。

5 飞机方向舵射线检测工艺流程

此次对飞机方向舵的射线检测具体流程为工艺准备—基本透照参数—透照布置—编制工艺卡—暗室处理—评片。

5.1 工艺准备

在进行射线照相检测之前,必须做好相关工艺准备。

首先检查被检工件是否符合检测要求,如被检工件应经表面检查合格,送检前应去除妨碍检查和影响底片

上缺陷图像识别的多余物。

工艺准备包括对被检工件的尺寸、材料、透照部位、结构、制造工艺或使用情况及质量要求等方面的了解,辐射源或设备型号的选择,胶片、增感屏的选择,像质计、标记、暗盒、屏蔽板、对焦准直器及密度计、标准密度片等的准备。参照有关说明书、验收标准,对被检工件的部位编制射线照相检测工艺图表,确定所采用的透照方法、工艺参数和必须满足的要求。

5.2 基本透照参数

5.2.1 焦距

已知本次采用的是 A 级射线照相技术,已知 $b=10\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$, 根据公式

$$f/d \geq 7.5b^{2/3} \quad (1)$$

可得:

$$f \geq 7.5T^{2/3} \cdot d = 7.5 \times 10^{2/3} \approx 23\text{mm}$$

本次实际焦距的选择,综合考虑了曝光量和几何不清晰度,最终焦距选择 1200mm,符合标准规定。

5.2.2 透照电压及曝光量

本次飞机方向舵的透照厚度为 10mm,根据曝光曲线获得透照电压为 49kV,实际采用透照电压为 49kV。

GJB 1187A-2001 规定,透照复合材料采用的焦距一般不小于 900mm,曝光量一般不小于 20mA。

当焦距改变时可参考平方反比定律对曝光量进行修正,即

$$\frac{E_1}{F_1^2} = \frac{E_2}{F_2^2} \quad (2)$$

此次焦距为 1200mm,计算 A 级检测技术曝光量为:

$$E_2 = \frac{E_1}{F_1^2} \cdot F_2^2 = \frac{20}{900^2} \times 1200^2 \approx 35\text{mA} \cdot \text{min}$$

此次射线检测管电流为 8mA,由计算可得曝光时间为: $35 \div 8 \approx 4\text{min}$

5.3 透照方法及一次透照区域

5.3.1 透照方法

结合被检工件的形状、成型工艺、铺层结构和 4 种透照方法的特点,本次实际使用的透照方法为垂直透照法。垂直透照方法如图 2 所示。

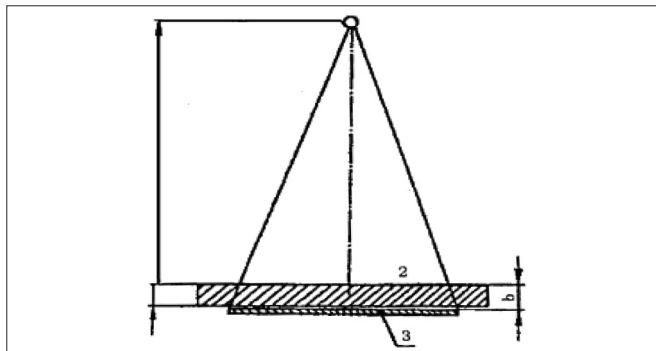


图 2 垂直透照方式示意图

5.3.2 一次透照区

根据 GJB 1187A-2001 中 5.7.1 的规定：一次透照的最大有效区取决于允许透照比 K ，平板状的非金属构件的 K 值不大于 1.03。本次的工件的透照厚度为 10mm，由 ≤ 1.03 ，可计算出 $L \leq 293\text{mm}$ 。由于此次采用的柯达 AA400 胶片的规格为 430mm×350mm，工件规格为 800mm×350mm×10mm，因此能够计算出透照次数为 3 次。

6 飞机方向舵射线检测报告

本次飞机方向舵射线检测报告如表所示。

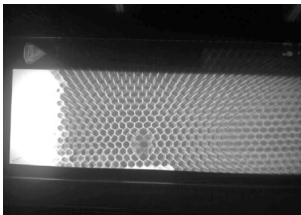
7 结语

蜂窝塌陷是复合材料类工件在加工过程中或成品使用中造成的芯格沿芯格壁方向受压变形，格壁影像变得不清楚的情况。根据本次采用的 GJB 5106-2016 验收标准，夹层板内部 A 级、B 级、C 级区域类零件都不允许存在蜂窝塌陷。所以，判定此工件不合格。

参考文献：

[1] 李家伟. 无损检测手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2001.

表 飞机方向舵射线检测报告

工件名称		飞机方向舵				
铸造形式		手糊压层	工件材质	碳纤维	工件规格	10mm
工艺条件	设备型号	XSD-160	胶片类型	柯达 AA400	增感方式	—
	管电压	49kV	管电流	8mA	焦距	1.2m
	曝光时间	4min	底片黑度	1.86	透照方式	垂直单壁透照
评定结果	评定标准	GJB5106-2016		验收等级	A 级	
	缺陷数量	1		缺陷性质	蜂窝塌陷	
暗室处理底片： 						
检测结果： 此次飞机方向舵在射线检测过程中，发现一处蜂窝塌陷，根据 GJB 5106-2016 规定，不允许存在此类缺陷，因此判定此工件不合格。						
检测人\资格：			审核人\资格：		批准人\资格：	
年 月 日			年 月 日		年 月 日	

[2] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册：渗透卷 [M]. 上海：世界图书出版社，1994.

[3] 胡天明. 表面探伤 [M]. 武汉：武汉测绘科技出版社，2000.

[4] 姜兆华，孙德智，邵光杰. 应用表面化学与技术 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2000.

(上接第 83 页)

重新分配的充电时间段。22:00-24:00 这个时间段车辆充完后，只能试验 2h，无法进行完整的整车耐久试验，但是，可以提供这三个时间段给 3 台性能试验车辆进行充电，使得每把枪能满足 3 台耐久车和 3 台性能车的充电需求（共计 6 台车，数量是最初的 6 倍），从而使得充电桩的充电效率在试验场满负荷运行的时候达到 100%。

因此，试验的充电车辆数及容量（耐久试验车辆 + 性能试验车辆）从 6X 提升至 36X，是原来的 6 倍。此方案的设计与实施，极大地节约了直流充电桩的新投资，按每台 4 万元的投资成本算，节约 24X 万元人民币的投资成本，完全达到某公司节本增效的最初设计预期。

3 结语

根据实际摸底情况和方案试运行，司机错峰上班、车辆错峰充电的方法可行且有效，可显著提升直流快充

充电桩的使用率。根据实际试验样车数量，直流充电桩通过 1 枪 2 车 3 班方案 -2 以及 1 枪 3 车 3 班方案 -1 的穿插使用，对试验场快充充电新能源试验车辆的容量提升具有重要意义。

参考文献：

[1] 刘兵，王玉磊，刘策. 某国产汽车强化腐蚀试验分析 [J]. 北京汽车，2020(01):43-46.

[2] 李洁，赵峥. 光伏储能式电动汽车直流充电桩的研究与设计 [J]. 绿色科技，2019(18):192-193.

[3] 韩杰. 新能源电动汽车充电技术开发应用研究 [J]. 时代汽车，2022(17):118-120.

作者简介：龙春林（1980.03-），男，汉族，广西柳州人，本科，工程师，研究方向：整车试验。