

# 射线测量涡轮叶片大曲率处壁厚尺寸的方法

熊瑛, 张孝玲, 董德秀

(黎明航空发动机集团有限责任公司, 沈阳 110043)

**摘要:**采用射线方法测量了某航空发动机涡轮叶片大曲率处的壁厚,制作了专用的叶片定位工装,以保证射线束与叶片被测处的垂直度。对叶片表面曲率半径 $<3$  mm处的壁厚进行了射线测量,经与超声测厚和计量检测结果的分析对比,验证了射线测量结果的准确性和可靠性,证明了涡轮叶片大曲率处壁厚尺寸测量采用射线方法是可行的。

**关键词:**射线检测; 涡轮叶片; 壁厚测量; 大曲率

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2010)06-0424-03

## Wall Thickness Measurement Method for Maximum Curvature of Aero-Engine Turbine Blade Based on X-Ray

XIONG Ying, ZHANG Xiao-Ling, DONG De-Xiu

(Liming Aero-Engine Group Cor, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** In order to prove that X-ray inspection method is effective for wall thickness measurement of aero-engine turbine blade, we make special fixed blade tool to ensure the perpendicularity between X-ray beam and measurement point of turbine blade. Through the wall thickness measurement for the turbine blade surface where curvature radius smaller than 3 mm, and also through the analysis and comparison with ultrasonic measurement or metrology results, the veracity and feasibility of X-ray measurement results were proved, pointing out that wall thickness measurement method for maximum curvature of aero-engine turbine blade based on X-Ray was effective.

**Keywords:** X-ray inspection; Turbine blade; Wall thickness measurement; Maximum curvature

航空发动机在工作时, 涡轮叶片将同时受到离心力、空气与燃气的气动力、热应力、交变力及随机载荷(主要来自于发动机工作时的随机振动)等多种交变载荷的作用, 其工作状态为高温、高压和高转速, 这就要求在制造和修理过程中, 严格监测叶片型面和壁厚尺寸的变化, 尤其是对散热和导流效果好的空心叶片, 以保证叶片在工作中能够满足所需承受的强度。

目前, 对于空心涡轮叶片的壁厚测量, 国内外多采用工业CT层析成像和超声波测厚方法。工业CT层析(或称计算机断层扫描)是获得试件截面图像的一种无损检测技术。采用工业CT技术对涡轮

叶片进行壁厚测量, 设备费用较高, 且检查处理时间长(层析、扫查速度慢), 因此, 在生产检验过程中应用尚不普遍。超声波测厚主要是根据超声波脉冲反射原理进行厚度测量。某航空发动机涡轮叶片的壁厚测量共计5个截面、47个点, 从现有技术看, 通过超声波测厚可以测量叶片大部分点的壁厚尺寸, 但对各截面进气边大曲率处 $\delta7$ 点壁厚尺寸的测量误差较大。在修理过程中, 进气边大曲率处 $\delta7$ 点壁厚尺寸范围为 $0.5 \sim 1.25$  mm, 测量误差要求 $\leq 0.1$  mm(图1)。

因为该空心涡轮叶片进气边 $\delta7$ 点处外表面曲率半径 $<3$  mm, 而空心内表面又非常复杂, 因此造成测厚探头平面与曲面的接触为点接触或线接触, 耦合效果差; 底面波在反射接收过程中的能量损失大, 反射回波低, 甚至无法接收到回波信号。因此, 寻找一种新的检测途径, 实现对叶片进气边大曲率

收稿日期: 2009-09-09

作者简介: 熊瑛(1968—), 女, 研高工, 产品检验检测中心主任, 主要从事无损检测技术的研究与工程应用工作。

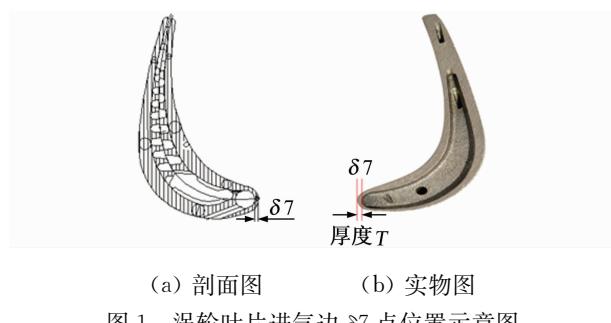


图1 涡轮叶片进气边δ7点位置示意图

处壁厚的测量,使涡轮叶片在制造、修理过程中的最大曲率处壁厚尺寸测量有较好的工艺性和通用性,便成为一个十分迫切的问题。

## 1 叶片大曲率处壁厚尺寸的射线测量

### 1.1 射线测量方法

射线检测技术依据射线与物质相互作用和它的衰减规律,实现对工件中缺陷或其它特性的检测。用射线照相进行壁厚测量的方法可分为两大类:直接法和间接法。直接法是对物体上感兴趣的区域进行射线照相,然后从获得的底片上直接进行厚度测量的一种方法。最适合采用直接测量的物体,是被测部位能与胶片很好贴合的物体,这样可以避免影像的畸变。间接法是以被检材料的厚度与得到的底片黑度之间的关系为基础,绘制底片黑度与厚度的关系曲线(标准曲线),然后根据黑度值,从标准曲线上找到对应的厚度值。这种方法操作虽比较简单,但不确定的影响因素较多,精度较低<sup>[1]</sup>。所以,笔者根据涡轮叶片进气边大曲率处的位置及结构特点,决定采用直接法进行测量。

### 1.2 测量方案

#### 1.2.1 叶片定位专用工装

为了保证对涡轮叶片进气边大曲率处壁厚测量的准确性,在射线透照工艺准备时,主要应考虑影像的不清晰度。因为影像的不清晰度决定了在垂直于射线透照方向上可识别的细节尺寸,即影像边界扩展的程度。对工业射线照相,在胶片固定的情况下,产生影像不清晰度的主要原因是胶片固有不清晰度和几何不清晰度。由于胶片固有不清晰度决定于射线的能量,所以在保证射线能量穿透能力足够的情况下,对于管电压的选择尽可能小;而在采用直接法对涡轮叶片进气边大曲率处壁厚尺寸进行测量时,为保证被检部位与胶片的紧密贴合及射线束与被检部位的垂直,减小工件与胶片的距离(即减小几何不清晰度),提高边界影像的可识别性和透照的可重复

性,笔者设计了专用的叶片定位工装(图2)。同时,为了方便后续测量工作的有效实施,一方面将5个截面上需测量的、大曲率处δ7点的定位标记随叶片共同投影到底片上;另一方面在衬托面上放置了厚约3 mm的铅板,以加强对散射线的防护,避免因透照厚度的急剧变化造成散射状况的急剧改变,使影像的边界区域变得模糊,即产生“边蚀”现象。工装制作完成后,经计量鉴定,叶片的摆放角度及定位标记符合图纸要求。



图2 叶片专用定位工装

#### 1.2.2 标尺放大镜的选择

采用射线照相法对叶片壁厚尺寸进行测量时,如果按常规评片方式,对获得的底片在观片灯下直接用刻度尺读值,不仅精度差,而且效率低。为了确保射线测量结果的准确性,必须选用符合测量系统误差要求的标尺放大镜。经试验证明,日本必佳2037-30X型标尺放大镜的测量精度为0.05 mm,放大倍数为30倍,观察窗有效直径为7 mm,观测视野为20 mm,可相对较方便地对叶片大曲率处壁厚尺寸进行观察和测量,并能满足修理中的测量精度要求。

#### 1.3 基本透照参数的选定

##### 1.3.1 射线能量

射线能量是透照参数中最重要的参数,因为它直接关系到射线的线衰减系数、散射比和射线照相不清晰度等,直接影响射线底片的影像质量。在实际射线照相检验中,选取射线能量的原则是:在保证射线具有一定穿透能力(黑度符合要求)的条件下,选用较低的能量。该叶片采用JCK-6Y镍基铸造高温合金制造,在国内没有可代用牌号,无法制作同种材料阶梯试块,即无法绘制该材料的曝光曲线。因此,按GJB 1187A—2001第5.3条款中的规定,参照其给出的“几种金属材料的允许最高管电压与厚度关系曲线”,并考虑到暗室处理工艺的变动(显、定影液的有效性等),经反复试验,最终确定透照管电压为(115±15%) kV。

### 1.3.2 焦距

焦距,即射线源与胶片之间的距离。焦距直接影响射线照相的几何不清晰度,进而影响总的不清晰度和小细节的射线照相对比度。因此选取焦距时应考虑的是:必须满足射线照相对几何不清晰度的规定;必须给出一定大小的均匀透照区。前者限定了可采用的最小焦距,后者是有效透照区所要求的焦距。目前对钢铁等重金属材料规定焦距如下:

$$A \text{ 级: } \frac{f}{d} \geq 7.5 \cdot b^{2/3} \quad (1)$$

$$B \text{ 级: } \frac{f}{d} \geq 15 \cdot b^{2/3} \quad (2)$$

式中  $f$ —射线源至物体源侧表面的距离,mm;

$d$ —射线源尺寸,mm;

$b$ —物体源侧表面至胶片的距离,mm。

当物体源侧表面与胶片间的距离较小(如小于零件厚度的 20%)时,  $b$  常指零件本身的厚度  $T$ 。涡轮叶片采用的是 B 级射线检测技术,将  $d = 3.0 \text{ mm}$ ,  $T = 3 \text{ mm}$  代入公式(2),求得最小焦距应为 93.6 mm。笔者实际采用的焦距为 1 400 mm,以既考虑 X 光机的性能特点,又兼顾叶片大曲率处  $\delta 7$  点的检验效率。

### 1.3.3 曝光量的确定

曝光量影响射线底片影像的信噪比(即影像的颗粒度),影响射线底片可记录的细节最小尺寸。按 HB/Z 60—1996《X 射线照相检验》第 5.2.2 条规定:编制射线照相检验图表时应尽量采用较大的曝光量和较低的管电压。当焦点至胶片距离不大于 1 500 mm 时, A 级像质的曝光量不宜小于  $20 \text{ mA} \cdot \text{min}$ , B 级像质的曝光量不宜小于  $30 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 。随着焦点至胶片距离的增加,亦应适当增加曝光量。因此,在叶片大曲率处的射线照相检验中,所用焦距  $1 400 \text{ mm} < 1 500 \text{ mm}$ ,按高灵敏度 B 级像质的规定,曝光量至少应选  $30 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 。

综上所述,在暗室处理条件一定的情况下,确定涡轮叶片大曲率处  $\delta 7$  点射线照相检验的基本透照参数为:设备 XYD-3010;电压( $115 \pm 5\%$ ) kV;电流 10 mA;时间 4 min;焦距 1 400 mm;胶片天津 V 型。暗室处理采用 DS-I 型显影套药;显影温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;显影时间 4 min。在初期试验过程中,因只制作了一个叶片定位专用工装,故一次只能透照 5 个叶片。在后期的生产应用中,在有效透照区内可同时摆放至少 4 个工装,即每次最少可透照 20 个叶片。

## 2 评片测量方法

在对底片上叶片大曲率处  $\delta 7$  点进行测量时(每个叶片上有 5 个截面上的  $\delta 7$  点需要测量),应将标尺放大镜中的“+”字花基准线的纵轴与测量部位的内边缘线重合,然后以“+”字花基准线的原点为起点,沿水平方向读取数值(图 3)。

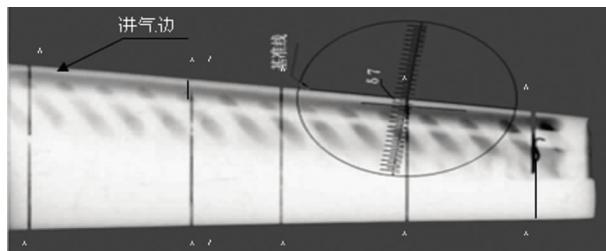


图 3 叶片壁厚测量方法示意图

## 3 射线测量结果的准确性验证

随机抽取 3 件涡轮叶片,分别采用超声测厚和射线测量方法,对进气边每个截面的  $\delta 7$  点处进行厚度测量,然后按标定截面记号位置进行线切割,得到每个叶片 5 个截面上  $\delta 7$  点处的横切面,并送计量检测室对横切面进行精测,得到各点的真实壁厚值。射线测量与超声测厚、计量检定数据的对比结果见表 1。

表 1 不同方法测得的叶片大曲率处壁厚值对照表

编 号	测量 方法	截面编号				
		1	2	3	4	5
1	X 射线	0.50	0.60	0.70	0.65	0.80
	超声	0.60	0.60	0.70	0.65	0.70
	计量	0.47	0.58	0.70	0.66	0.82
2	X 射线	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80
	超声	0.65	0.65	0.65	0.55	0.80
	计量	0.60	0.59	0.60	0.60	0.81
3	X 射线	0.65	0.75	0.80	0.90	1.00
	超声	0.50	0.70	0.85	0.85	0.90
	计量	0.65	0.69	0.80	0.86	0.99

由表 1 可见,射线照相测得的壁厚数据与计量的实测值最接近。

## 4 结论

通过理论分析和试验研究,采用射线照相检测  
(下转第 433 页)

试验条件下,拟合得到的  $\rho$ - $H$  直线方程为:

$$\rho = 1.37027 \times 10^{-4}H + 0.62747 \quad (10)$$

### 2.3 不同方法所得密度的比较

根据式(5)和(6),求出  $\rho_0 = 1.888 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $H_0 = 9200$ 。再根据各样件的 VCT 灰度值,通过式(9)和(10),求出各样件的 CT 法密度值,并与排水法密度值比较,结果见表 1。

表 1 样件的排水法密度和 CT 密度比较

编 号	VCT 灰度值	密度/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})		相对误 差/%
		排水法	CT 法	
1	9 163	1.883	1.8829	0.004
2	9 173	1.885	1.8843	0.037
3	9 200	1.887	1.8880	0.053
4	9 210	1.889	1.8894	0.020
5	9 214	1.891	1.8899	0.057
6	9 242	1.894	1.8938	0.013

由表 1 可以看出,通过 CT 法计算求取的样件密度与排水法测得的密度比较一致,相对误差在 0.1% 以内。

## 3 结论

采用小密度范围内的含能材料作为试验件,以组合成试验样件体系的整体密度作为参照密度,采用局部分割组合的方法,运用微焦点 VCT 技术、

(上接第 415 页)

在回波信号强度相同的情况下,改进的脉冲反射法只需要较小的能量激励,更能满足小扰动的条件,接近理想的波动状态。

## 6 结语

实验室中进行精密声速测量时,在仪器设备可行的情况下,可采用笔者分析的改进后的正弦波双探头脉冲反射法。与常用脉冲反射法比较,在测量声速过程中,探头、信号放大器和示波器等均工作在最佳状态。不仅能够提高超声传播时间的测量精度,而且对仪器设备也没有潜在的损害。

(上接第 426 页)

技术,对某航空发动机涡轮叶片进气边大曲率处  $\delta 7$  点壁厚尺寸进行了测量。采用专用工装对叶片被检处定位,并使用标尺放大镜进行评测,测量精度可达 0.05 mm,能满足修理中对该部位的壁厚检测工艺

VCT 平均灰度值计算方法和同步测试方法,研究含能材料试件体密度与 VCT 平均灰度值之间的对应关系,计算含能材料试件的 CT 密度。结果表明,同步测试方法可以有效减小不同时间段 X 射线能量波动引起的误差,采用相同形状、尺寸样件可以避免 X 射线硬化对试验结果的影响。CT 法计算所得密度值与排水法密度值的相对误差在 0.1% 以内。

### 参考文献:

- Perkins D E, Martz H E, Hester L O, et al. Computed Tomography Experiments of Pantex High Explosives[R]. DE92013517, US: US DOE, 1992.
- 杨文海,何得昌,徐军培,等.  $\gamma$  射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3):33—34, 72.
- 田勇,李高强,温茂萍. 炸药柱径向局部密度的自对照射线透照法[J]. 无损检测, 1999, 21(5):215—217.
- Hadden R J B. Radionuclides for process control and inspection[J]. Isotopenpraxis, 1987, 23(1):1—12.
- Stokes J A, Alvar K R, Coray R L, et al. Some new application of collimated photon scattering for nondestructive examination [J]. Nucl Instrum Methods, 1982, 193(1/2):261—267.
- ASTM E1935—1997 (Reapproved 2003) Standard test method for calibrating and measuring CT density [S].

### 参考文献:

- Edward Schreiber, Orson L. Anderson, Naohiro Soga. Elastic Constants and Their Measurement[M]. New York: McGRAW-Hill Book Company, 1973.
- JB/T 7522—2004 无损检测 材料超声速度测量方法[S].
- 刘艳平,王寅观. 数字实时脉冲回波法声速测量系统的研制[J]. 无损检测, 2008, 30(12):953—954.
- 魏勤,朱金莲,宋广三. 铝合金薄板的超声透射法检测[J]. 无损检测, 2009, 31(8):625—627.
- 周剑平. Origin 实用教程 7.5 版[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

要求。

### 参考文献:

- 中国机械工程学会无损检测分会. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997:22—24.