

## 实践经验

飞机某型发动机高压压气机转子  
叶片的超声波检测

郭海鸥

(国营四达机械制造公司, 陕西武功 712201)

ULTRASONIC TESTING OF ROTOR BLADES IN THE HIGH PRESSURE  
COMPRESSOR OF AEROPLANE ENGINE

GUO Hai-ou

(State Sida Machine Building Corporation, Wugong Shaanxi 712201, China)

中图分类号: TG115.28

文献标识码: B

文章编号: 1000-6656(2004)07-0367-03

飞机某型发动机高压压气机转子叶片(图1)在发动机高速运行期间,常会在进气边和排气边产生疲劳裂纹,其方向和分布规律如图2所示。这些疲劳裂纹一旦产生便会迅速扩展,导致叶片折断,继而打伤或打断其它叶片及构件,给飞行安全带来很大隐患,为此对叶片实施超声波检测,对保证发动机正常运行是非常重要的。

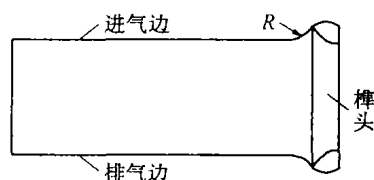


图1 高压压气机转子叶片

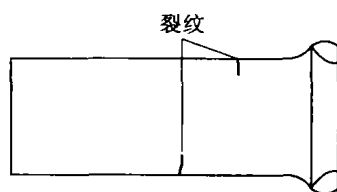


图2 疲劳裂纹的位置

## 1 检测原理

高压压气机转子叶片(以下简称叶片)的材料为钛合金,由图1和2可以看出,该叶片适合用超声瑞利波检测。当瑞利波在叶片上传播遇到表面及近表

面裂纹等缺陷时,部分声波会返回,再用探头接收这种携带缺陷信息的返回声波,经仪器处理后在荧屏上显示,从而实现对叶片的超声瑞利波检测。图3示出了瑞利波在叶片被检区域传播的规律。

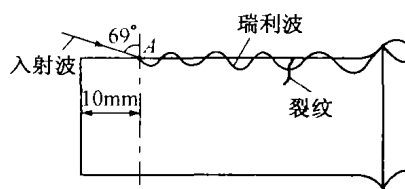


图3 瑞利波检测叶片原理图

## 2 瑞利波的检测深度

瑞利波传播时振幅随深度增加衰减很快,离表面一倍波长的地方振幅已很微弱<sup>[1]</sup>,由于瑞利波在钛合金(如Ti6Al4V)中的传播速度 $C_R$ 约为 $2.96 \times 10^6 \text{ mm/s}$ <sup>[2]</sup>,所用探头工作频率 $f = 2.5 \times 10^6 \text{ Hz}$ ,可得相应波长

$$\lambda_R = \frac{C_R}{f} = \frac{2.96 \times 10^6}{2.5 \times 10^6} \approx 1.18 \text{ mm}$$

由此可知,瑞利波对材料为钛合金(Ti6Al4V)的高压压气机转子叶片的检测深度约为表面下1.18mm,在该深度内检测有效。

## 3 标准缺陷样件制作

首先选出三个没有任何缺陷的标准叶片进行编号,然后用 $\phi 0.05 \text{ mm}$ 的钼丝在2号叶片进、排气边

沿长度方向约二分之一处分别割出一条 0.05mm 宽、0.3mm 长的标准缺陷(图 4);在 3 号叶片进、排气边的榫头前沿 R 处割出同样尺寸的标准缺陷(图 5);1 号叶片作为没有任何缺陷的标准叶片样件。对叶片实施探伤时,先用三个标准缺陷样件叶片调试好仪器后再开始瑞利波检测。

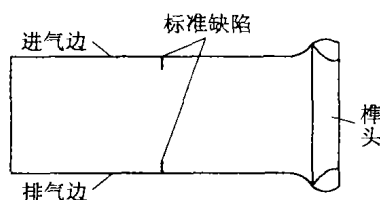


图 4 2 号标准缺陷样件

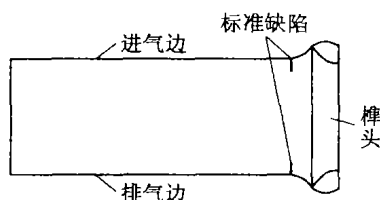


图 5 3 号标准缺陷样件

#### 4 探头及参数

根据叶片疲劳裂纹规律,将探头设计为沟槽式探头(图 6),即在探头的发射-接收面上刻一沟槽,晶片正好放置在沟槽中央。探头上还装有大、小两个限位框,检测时分别用于大、小叶片入射点位置的限定,防止探头发射点移离叶片上的入射点,即图 3 的 A 点。探头晶片尺寸为 5mm×6mm,频率为 2.5MHz,探头的入射角由下式求出

$$\alpha_L = \sin^{-1} \frac{C_L}{C_R} = \sin^{-1} \frac{2.70 \times 10^6}{2.96 \times 10^6} \approx 65.8^\circ$$

式中  $\alpha_L$ ——纵波入射角

$C_L$ ——入射纵波在有机玻璃中的传播速度

$$C_L = 2.70 \times 10^6 \text{ mm/s}^{[2]}$$

经多次现场操作得出,实际探伤中调整到  $\alpha_L = 69^\circ$  为宜(图 3)。探头外壳可用夹布胶木料制作,耐磨且不易损坏。

#### 5 检测方法

##### 5.1 仪器调试及灵敏度设置

选用 CTS-23 型超声波探伤仪,以高压压气机

转子第三级叶片为例进行探伤(每级叶片长度不等)。检测前先将探头与仪器接通后,用三个标准缺陷样件分别调试仪器,具体步骤如下:

(1) 如图 7 所示,将探头“骑”在 1 号样件(无人工割槽)排气边(或进气边)上,探头晶片发射点对准叶片上的 A 点,然后调节仪器,使始波后沿置于荧屏水平时基线 1 格处,底波置于 9.5 格处(图 8)。

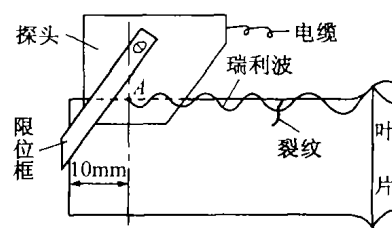


图 7 探头在叶片上的位置

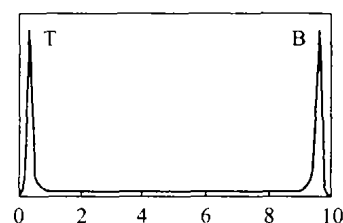


图 8 1 号标准样件的波形显示

(2) 按图 7 将探头“骑”在 2 号标准缺陷样件排气边(或进气边)上,此时始波和底波位置不变,但底波高度降低,标准缺陷(人工割槽)回波前沿出现在荧屏水平时基线的 2.9 格处(图 9)。

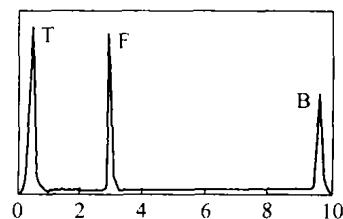


图 9 2 号标准缺陷样件的波形显示

(3) 按同样操作方法用 3 号标准缺陷样件标定仪器时,始波和底波位置不变,而标准缺陷回波前沿出现在荧屏水平时基线的 8.8 格处(图 10)。

(4) 图 9 和 10 中的底波高度与图 8 相比虽然降低了,但底波始终是存在的。然而在实际探伤过

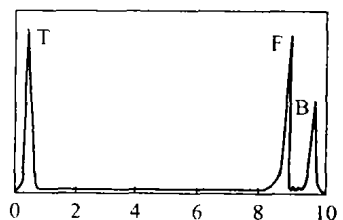


图 10 3 号标准缺陷样件的波形显示

程中,如遇到长度较大的缺陷时,检测波束有可能被全部截断,不再继续向前传播,此时荧屏上的底波则可能全部消失,只剩下始波和缺陷回波。

(5) 进行上述(1)~(3)步骤中调节仪器衰减分贝值、水平位移时及深度粗调和微调,应使始波、底波和标准人工缺陷波的位置确定,标准缺陷波高度达到荧光屏满刻度的80%,且杂波不出现或适度时,仪器调试完毕。而经三个标准缺陷样件调试后仪器的分贝值、抑制位置及深度值,即为检测(灵敏度)所用参数。

## 5.2 检测操作

如图7所示,将探头放置在叶片进气边或排气边上,让进气边或排气边置于探头沟槽内,限位框置于叶片稍端,从而固定了探头在叶片上的位置,使声波定向定位发射与接收。图11和12分别示出了叶片进气边或排气边与探头沟槽正确与错误的耦合状

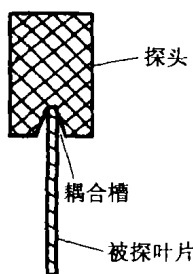


图11 叶片与槽

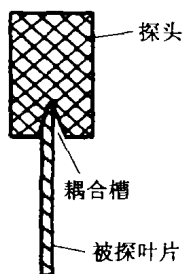


图12 叶片与槽

正确的耦合 错误的耦合

(上接第366页)

ASTM E1961—1998(2003)e1 使用聚焦探头焦柱的环焊缝自动超声检测标准操作规程

ASTM E1962—1998 电磁声换能器(EMAT)技术超声表面标准检测方法

ASTM E2001—1998(2003) 金属与非金属部件缺陷探测的共振超声波谱法标准指南

ASTM E2002—1998(2003)e1 放射学中图像总不清晰度测定的标准操作规程

ASTM E2003—1998e1 中子辐射束纯度计制作的标准操作规程

ASTM E2007—2000 计算机化放射学(光激发光法,PSL)标准指南

ASTM E2023—1999 中子辐射照相灵敏度计制作的标准操作规程

ASTM E2024—1999 热导率检漏仪常压检漏标准检测方法

ASTM E2033—1999 计算机化放射学(光激发光法)标准操作规程

ASTM E2075—2000 用丙烯酸类棒验证AE传感器响应一致性的标准操作规程

态。如耦合良好,则荧光屏上的始波和底波正常出现;反之则只有始波,而无底波。若底波不出现,就要在保持探头晶片发射点不移离叶片上的A点时,轻轻左右、前后摇动探头,使底波在预定位置出现。在检测过程中,要用标准缺陷样件经常校验仪器,遇到波形不稳定,高度和位置有变化时,都要用三个标准缺陷样件重新校验仪器,比对参考,以便每个叶片都能得到良好的检测结果。必须说明的是,在对每个叶片进行检测操作的最后,不改变探头声波入射方向,而使探头向后滑移至叶片稍端进行检测,以消除叶片上A点至叶片稍端间10mm的检测盲区。

## 6 结束语

超声瑞利波检测高压压气机转子叶片疲劳裂纹等缺陷,使用沟槽探头使声波主声束正好对准裂纹易发区域,能准确发现较小裂纹源及已成长为裂纹的缺陷,不仅检测速度快、效果好,且对防止叶片由于产生裂纹而导致断裂,进而造成发动机更大运行故障有重大意义。

## 参考文献:

- [1] 中国机械工程学会无损检测学会. 超声波探伤[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [2] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002. 218.

ASTM E2076—2000 玻璃纤维增强塑料叶片声发射标准检测方法

ASTM E2096—2000 铁磁性热交换器管远场检测的现场检测标准操作规程

ASTM E2104—2001 飞机和涡轮机材料和部件射线照相检测标准操作规程

ASTM E2191—2002 卷绕复合层充气压力容器声发射标准检测方法

ASTM E2192—2002 平面型缺陷高度超声定量的标准指南

ASTM E2223—2002 无缝、充气的钢压力容器超声斜射检测标准操作规程

ASTM E2261—2003 交流电场测量技术的焊缝检测标准操作规程

ASTM E2297—2004 液体渗透和磁粉方法用UV-A和可见光源及强度计的标准使用指南

ASTM E2337—2004 互感电桥应用于锅炉管壁测厚的标准指南

ASTM E2338—2004 用不带标准参考覆盖层的合适的涡流传感器来表征覆盖层特性的标准操作规程

金宇飞译 马铭刚校