

叶片深根裂纹的原位超声波检测

董瑞琴, 何 喜, 刘永安

(西安航空动力股份有限公司 无损检测中心, 西安 710021)

摘 要: 航空发动机叶片在工作中要承受较高的离心负荷、气动负荷、高温和大气温差负荷以及振动的交变负荷, 同时还要受风沙、潮湿的侵蚀, 这些因素使叶片容易产生疲劳裂纹, 疲劳裂纹扩展会引起叶片断裂并影响发动机的安全。发动机叶片在发动机的服役期间需要定期进行无损检测, 但在叶片常规大修检测中经常需要对发动机进行拆卸、分解、检测和安装, 所需检测周期长, 费用高。通过超声波检测试验, 解决了低压一级转子原位超声检测叶片深根部位裂纹的技术难题, 为发动机叶片大修时的定期原位无损检测提供了方便、可靠的方法。

关键词: 转子叶片; 深根裂纹; 原位检验; 超声波

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)01-0038-03

The In-situ Ultrasonic Inspection of Cracks in Deep Blade Root

DONG Rui-qin, HE Xi, LIU Yong-an

(The NDT Center, Xi'an Aero-Engine PLC., Xi'an 710021, China)

Abstract: The aero-engine blade is often subjected with high centrifugal force, air dynamic force, thermal loading due to high temperature and temperature differences between surrounding, and vibration loading, and in addition it is also subjected with erosion by wind, sand and wet medium. All the above-mentioned factors shall cause the blade to develop fatigue cracks, which will threaten the safety of the engine. Therefore, during the service of the engine, the blade shall be under periodic maintenance and inspection for which the disassembling of the engine is needed and extra cost is required for this periodic inspection. The paper introduces an ultrasonic testing means for the non-destructive inspection of the cracks in deep blade root, providing an effective method for the in-situ testing of the engine blade.

Key words: Rotor blade; Deep root crack; In-situ inspection; Ultrasonic wave

叶片所处的工作环境十分恶劣, 需要承受较高的离心负荷、气动负荷、高温和大气温差负荷以及振动的交变负荷, 同时受风沙、潮湿的侵蚀, 容易造成叶片产生缺陷, 如疲劳裂纹, 而疲劳裂纹扩展引起叶片断裂后会危及发动机的使用安全。原位超声波检测技术可以避免装备和结构的拆卸、分解和安装, 节省检测费用和时间, 在航空发动机的检修中具有十分重要的意义。由于航空发动机结构的特殊性, 以及常规无损检测技术(如磁粉、射线等)的局限性, 发动机叶片的原位检测常受到

限制。针对某发动机在外场试飞中低压一级转子叶片深根部位出现完全断裂的质量事故, 在外场采用超声检测的方法使发动机在不分解状态下有效发现缺陷。因为缺陷部位和缺陷的特殊性, 笔者在叶片上加工了具有能够代表缺陷特征的深度为 2 mm 的人工缺陷。且为解决叶片在装机状态下, 叶片之间空间有限的难题, 特别设计制作了探头的夹具, 解决了原位超声波检测叶片深根部位的裂纹难题^[1]。

1 超声波检测试验

从叶身部位检测处于叶片深根部位垂直于叶片表面的裂纹, 检测原理类似于超声检测中的端角反

收稿日期: 2015-04-20

作者简介: 董瑞琴(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事航空发动机零件超声检测工作。

射。因此当横波入射角度合适,将探头放置在叶片的合适部位,探头就可接收来自深根部位缺陷的反射波,因此在叶身部位去检测发现叶片深根部位的缺陷在超声检测理论上是可行的。

1.1 端角反射原理

在超声检测中,常遇到声波在两个相互垂直平面构成的直角内的反射,超声声束入射到直角内,若未发生波形转换,则声波被两个平面反射后仍平行于入射声束反射后回来,如图 1 所示。如此,反射声波应非常强烈,然而,对超声波来说,不可避免地会出现波形转换,在两次反射时均可能分离出其他波型,这些转换后的波反射角不等于入射角,经过两个面反射后不能沿原方向回到探头,从而带来能量的损失;将回波声压与入射声压之比做为端角反射率,通过研究得知,横波入射时,在 30° 和 60° 附近,存在两个反射率低谷,而在中间一段角度范围(为 $35^\circ \sim 55^\circ$),反射率非常强。因此,在检测垂直于表面的裂纹时,应选用折射角为 $35^\circ \sim 55^\circ$ 的横波探头。

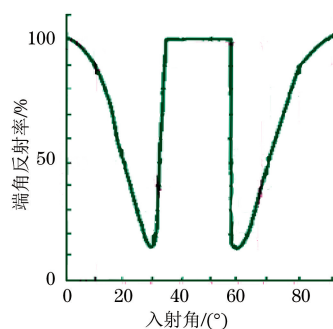
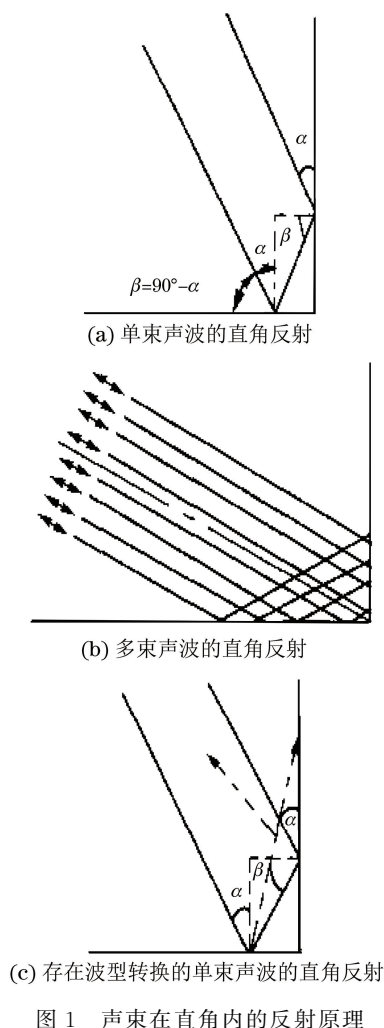


图 2 横波的端角反射率曲线

1.2 对比试块制作

试验开始时,在正常叶片的深根部位加工直径为 0.8 mm 的短横孔来模拟缺陷,短横孔的优点是可方便地区分正常部位和缺陷部位的反射波,但短横孔为柱面反射。经过试验发现,在叶片部位不易获得叶片深根部位短横孔的反射情况,探头无法识别来自孔的柱面反射。

随后在叶片的深根部位加工三个刻槽(叶片进气边一个、排气边一个、叶背中间一个),刻槽的槽长 5 mm。共加工 4 个对比试块,槽深分别为 5, 3, 2, 1 mm。

在试验中,通过采用合适的探头,除深度 1 mm 的刻槽不能被发现外,其他刻槽都能被发现。

1.3 探头的选择

探头在选择时要考虑包括晶片尺寸、频率和 K 值等参数。因为叶身存在一定的曲率和扭度,对探头尺寸的选择,要求晶片尺寸尽量小以获得探头和叶身部位的良好耦合。采用 6 mm × 6 mm 的小晶片横波探头,探头频率的选择则要根据缺陷的位置以及缺陷的大小通过试验来确定。不同探头对不同深度刻槽的响应如表 1 所示。

表 1 不同探头对不同深度刻槽的响应结果

刻槽深度 /mm	探头尺寸 /mm	探头频率 /MHz	探头 K 值	缺陷能否发现
1	6 × 6	5	2	否
			2.5	否
2	6 × 6	5	2	不明显
			2.5	缺陷明显
3	6 × 6	5	2	缺陷明显
			2.5	缺陷明显
5	6 × 6	5	2	缺陷明显
			2.5	缺陷明显

试验发现,因为叶片结构的影响,无论采用多大 K 值的探头都不能发现深度为 1 mm 的刻槽,而采用 $K2$ 的探头可发现处在不同位置的 5 mm 和

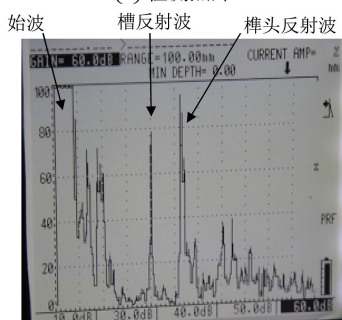
3 mm 的刻槽,但对 2 mm 刻槽的发现效果不是很明显。而 K2.5 的探头对处在叶片不同位置的深度为 2,3,5 mm 的刻槽都能很好地发现。因此,试验确定采用 5 MHz, K2.5, 晶片尺寸为 6 mm×6 mm 的横波探头。

1.4 试验结果对比

对叶片不同部位、深度为 2 mm 刻槽的检测效果与相同部位完好叶片的波形图进行了对比,可知试验检测效果良好,对叶片不同部位的刻槽有很好的分辨率。图 3 为叶盆排气边刻槽的 A 扫描照片及反射回波,图 4 为正常叶片同一部位的 A 扫描照片及反射回波。



(a) 检测照片



(b) 反射回波

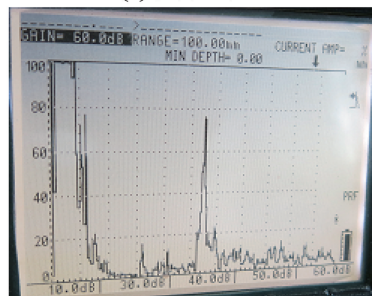
图 3 叶盆排气边刻槽超声波检测示意及结果

2 叶片原位超声波检测的可行性

通过上面试验结果的对比,可以看出在分解状态下采用超声检测的方法能够从叶身部位发现叶片深根部位的缺陷,但是因为在分解状态对叶片的检测不同于外场装机状态对叶片的检测,最明显的区别就是叶片和叶片之间的空间有限,检验人员在检验时,手不能完全进入到叶片之间的空隙中,如对探头不进行改装就不能在装机状态下对叶片进行检测,为此在试验中通过与探头制作商合作,对分解状态下所用探头制作了工装(如图 5 所示),通过在探头上安装工装后,检验人员不用将手伸到叶片之间的空间,而是通过加长杆就可实现对叶身的检测,检测照片如图 6 所示。



(a) 检测照片



(b) 反射回波

图 4 正常叶片叶盆排气检测示意及结果



图 5 装机状态下检测叶片所用探头夹具外观照片



图 6 装机状态下对比试块叶盆刻槽检测照片

3 结语

通过设计制作具有与外场发现的叶片深根部位裂纹可比较的对比试块,选择合适的探头参数,制作合适的探头工装,可以实现对叶片深根部位裂纹的原位超声波检测,可避免常规发动机叶片定期无损检验所带来的人力、物力的浪费。

参考文献:

- [1] 史亦伟. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 27-28.