

# 空气耦合式超声检测在航空无损检测中的应用

崔 治<sup>1,2</sup>, 彭楚武<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410079; 2. 湖南城市学院 物理与电信工程系, 益阳 413000)

**摘 要:**针对复合材料的无损检测问题, 探讨了一种基于穿透式异侧检测模式的空气耦合式超声波检测技术, 阐述了该技术的基本原理。参照传统的液浸式超声波检测技术, 以航空工业中重要的  $\gamma$ -TiAl 基合金为研究对象, 对检测过程中信号的衰减与损耗进行了详细的理论分析与数值计算。结果表明, 超声波在介质交界面处的反射损耗和在空气中的传输衰减是目前空气耦合式超声检测技术应用遇到的主要难题, 而研制新型超声波换能器是解决问题的关键。

**关键词:**空气耦合; 超声波检测; 反射损耗; 传输衰减

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)06-0463-04

## The Application of Air-Coupled Ultrasonic Technique in Aviation Non-destructive Testing

CUI Zhi<sup>1,2</sup>, PENG Chu-Wu<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410079, China;

2. Department of Physics and Electronic Information Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of non-destructive testing in composite materials, the air-coupled ultrasonic testing based on the penetrative opposite side detection mode was discussed. The principle of the technique was described. Compared with the traditional water-coupled ultrasonic testing, the aviation important composite material  $\gamma$ -TiAl alloys were researched, the detection signal losses and attenuation of the technique were analyzed and calculated. It was concluded that the reflection loss at the medium interface and the transmission attenuation of ultrasonic in air was the main difficulties for the application of air-coupled ultrasonic testing technique. However, the key problem was the development of new ultrasonic transducer.

**Keywords:** Air-coupled; Ultrasonic testing; Reflection loss; Transmission attenuation

20 世纪 70 年代以来, 随着世界军用及民用航空技术的飞速发展, 复合材料在航空工业中的地位越来越重要。到目前为止, 我国军用飞机使用的复合材料占所用材料总量的 30%~40%<sup>[1]</sup>, 复合材料在航空工业中的广泛应用对无损检测提出了新的要求。经过近二十年的发展, 超声波检测成为最主要的航空无损检测方法, 尤其是近年来兴起的空气耦合式超声波检测技术<sup>[2]</sup>, 成为了超声波无损检测的主要发展方向。

空气耦合式超声波检测的理论最早在 20 世纪 60 年代就被提出, 但由于超声波换能器技术的限

制, 使其进展缓慢。1995 年, Grandia 等<sup>[3]</sup>的研究使空气耦合式超声波换能器技术出现了重大突破, 空气耦合式超声波检测技术进入了快速发展期。

$\gamma$ -TiAl 基合金具有优良的比强度、比刚度、高温力学性能和抗氧化性, 极限使用温度达到 980 °C 以上, 比重为 3.8 g/cm<sup>3</sup>, 远低于目前航空工业使用的镍基超合金(8.3 g/cm<sup>3</sup>), 因此, 当其作为军用或民用飞机发动机的涡轮材料使用时, 将会显著减轻发动机重量, 提高发动机性能, 延长发动机的使用寿命, 既具有重要的军事意义, 也将带来极为可观的经济效益。笔者以  $\gamma$ -TiAl 基合金为研究对象, 参考目前常用的液浸式超声检测, 对空气耦合式超声波无损检测过程中信号的传输特性进行了理论分析和计算, 并探讨了可能解决该项技术制约因素的方法。

收稿日期: 2009-08-27

作者简介: 崔 治(1982—), 男, 硕士研究生, 助教, 主要从事测试计量技术及自动化方向的研究工作。

## 1 基本原理

空气耦合式超声波检测有穿透式和反射式两种,发射传感器和接收传感器可放置在被检验物的同侧或异侧。以穿透式异侧检测方式为例,该方式使用空气作为耦合剂,超声波检测信号从发射端传播到接收端,根据接收信号的衰减程度来判断被测物内部的缺陷情况,如图1所示。

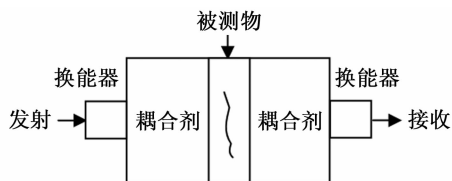


图1 空气耦合式超声波检测原理图

在图1所示的超声波检测过程中,从发射端到接收端共有四个介质分界面,这意味着超声波检测信号在传播过程中将产生四次反射/透射现象,出现四次信号衰减<sup>[4]</sup>,因此,空气耦合式超声波检测技术主要受以下因素制约:介质分界面处的反射和透射影响、空气吸收影响以及信号处理技术。下文着重分析前两点。

## 2 制约因素

由斯涅耳定律<sup>[5]</sup>可知,当超声波垂直入射到足够大的光滑平面时,产生的反射波与透射波的声压按一定的比例分配,这个比例由声压反射系数 $r$ 和声压透射系数 $t$ 表示:

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

式中 $Z_1, Z_2$ 为介质的声阻抗; $p_r$ 为反射波声压; $p_t$ 为透射波声压; $p_0$ 为入射波声压。声强反射系数 $R$ 和声强透射系数 $T$ 为:

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (3)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4)$$

式中 $I_r$ 为反射波声强; $I_t$ 为透射波声强; $I_0$ 为入射波声强。由式(4)可知声强透射系数与超声波的传播方向无关。

### 2.1 介质分界面处的反射和透射影响

#### 2.1.1 单一界面

在传统的超声波检测技术中,换能器主要由压

电晶片组成。由图1可知,检测过程中信号需两次穿过压电晶片和耦合剂的分界面,在每个分界面处超声波都会产生反射和透射现象。为了便于比较,以液浸式超声波检测技术为参考。Lomme等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,室温下PZT压电晶片的声阻抗约为 $3 \times 10^7$  Rayl,空气的声阻抗约为 $4.2 \times 10^2$  Rayl,水的声阻抗为 $1.5 \times 10^6$  Rayl,据此计算出具体声强反射/透射系数如表1所示。

表1 超声波在不同介质交界面处的反射/透射系数

系数	压电晶片-水	压电晶片-空气
$r$	-0.904 762	-0.999 972
$t$	0.095 238	0.000 028
$R$	0.818 594	0.999 944
$T$	0.181 406	0.000 056

由表1可知,当检测信号由压电晶片传输到水中时,透射波的声压和声强分别为入射波的9.523 8%和18.140 6%;当信号由压电晶片传输到空气中时,透射波的声压和声强仅占入射波的0.002 8%和0.005 6%。换言之,液浸式超声波检测过程中信号衰减为14.8 dB,而空气耦合式超声波检测导致的信号衰减为85 dB。这表明在空气耦合剂和介质的交界面处大部分超声波被反射回来,能够穿透交界面进入被测物内部的超声能量非常微弱,难以实现检测功能。因此,液浸式检测所用压电晶片换能器不适应以空气为耦合剂的超声波检测。

如图1,超声波检测信号除需通过换能器-耦合剂交界面外,还必须两次穿透耦合剂-被测物交界面。选取黄铜、锰钢、铝及 $\gamma$ -TiAl基合金作为被测物,分别计算出采用空气耦合式检测和液浸式检测时介质交界面处的声强透射系数及衰减量,见表2。

表2 不同介质的声阻抗和声强透射系数

介质 II	声阻抗/ MRayl	介质 I	透射系数 $T$	衰减/ dB
黄铜	51	水	0.111 020	19
		空气	0.000 033	89
锰钢	47	水	0.119 885	18
		空气	0.000 036	89
铝	17	水	0.298 028	11
		空气	0.000 099	80
$\gamma$ -TiAl	22	水	0.239 022	12
		空气	0.000 076	82

表2清晰地表明,对金属材料采用空气耦合式检测导致的超声波能量衰减范围为80~89 dB,比液浸式检测高出70 dB。

### 2.1.2 薄层界面

航空工业中的被测物通常为板状材料,对这些材料进行检测可归纳为超声波在薄层界面的反射和透射问题。此时超声波由声阻抗为 $Z_1$ 的介质Ⅰ入射到介质Ⅰ和介质Ⅱ的交界处,然后通过声阻抗为 $Z_2$ 的薄层介质Ⅱ入射到介质Ⅱ和介质Ⅲ的界面,最后进入声阻抗为 $Z_3$ 的介质Ⅲ。一般情况下介质Ⅰ和介质Ⅲ为同一种介质(空气或其它耦合剂)。整个薄层被检物的声强反射和透射系数为:

$$r = \sqrt{\frac{\frac{1}{4}(k - \frac{1}{k})^2 \sin^2(\frac{2\pi d}{\lambda})}{1 + \frac{1}{4}(k - \frac{1}{k})^2 \sin^2(\frac{2\pi d}{\lambda})}} \quad (5)$$

$$t = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4}(k - \frac{1}{k})^2 \sin^2(\frac{2\pi d}{\lambda})}} \quad (6)$$

式中 $d$ 为薄层被测物的厚度; $\lambda$ 为薄层被测物的波长; $k$ 为两种介质的声阻抗之比, $k = Z_1/Z_2$ 。由式(5)和(6)计算可得:

当 $d = n \cdot \lambda/2$ 且 $n$ 为正整数时,反射系数 $r \approx 0$ ,透射系数 $t \approx 1$ ,为最大值,此时超声波的透射能量最大。

当 $d = (2n-1) \cdot \lambda/4$ 且 $n$ 为正整数时,反射系数 $r$ 最高,透射系数 $t \rightarrow 0$ ,此时超声波透射能量极小,检测难度很大。

当 $d \rightarrow 0$ ,即 $d < \lambda/4$ 时,被检物厚度越小,超声波声强透射系数越大,反射系数越小。

采用频率为120 kHz的超声波作为检测信号,对材质为 $\gamma$ -TiAl基合金、厚度为10 mm的板状被测物进行测试,得到透射系数与被测物厚度的关系如图2和3所示。

分析图2和3可知,采用液浸式检测法,声强透

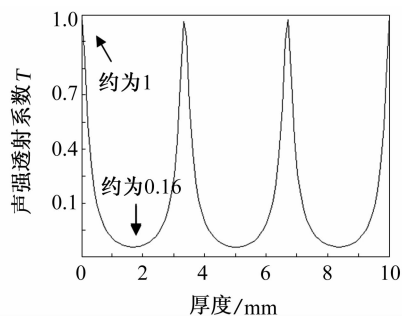


图2  $\gamma$ -TiAl基合金液浸式检测的声强透射系数

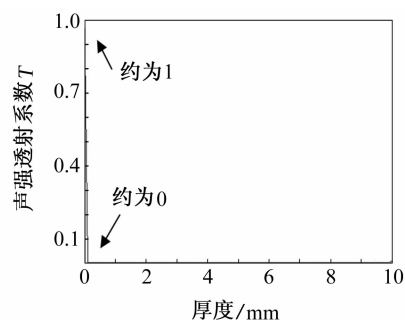


图3  $\gamma$ -TiAl基合金空气耦合式检测的声强透射系数

射系数最大约为1,最低约为0.16,这表示当透射系数取最小时,超声波检测信号仍有16%能穿透被检物;采用空气耦合式检测法,声强透射系数曲线类似于冲激函数,最大声强透射系数与液浸式检测相近,但最小透射系数近似为0,表明此时能穿透被检物的超声波能量近乎为0,检测工作难以为继。

综上所述,对 $\gamma$ -TiAl基合金采用压电晶片换能器进行空气耦合式检测与液浸式检测相比信号衰减达到167 dB,使得这种检测方式效率低,难以提高灵敏度和分辨率。

### 2.2 超声波在空气中的传输衰减

由上文可知,以空气为耦合剂进行超声波检测时,耦合剂与被测物之间巨大的声阻抗差是检测的一个主要难点,同时,超声波在空气中的传输衰减也不容忽视。超声波的频率越高,它在空气中传输时的损耗就越严重。Bass等<sup>[7]</sup>提出了室温下超声波在空气中传输时的衰减近似计算式:

$$A_L \approx 1.64df^2 \times 10^{10} \text{ dB} \quad (10)$$

式中 $A_L$ 为超声波的衰减损耗; $f$ 为超声波频率; $d$ 为传播距离。

罗元国等<sup>[8]</sup>研究表明,空气对高频超声波的吸收率可用衰竭距离来表示,与频率成近似反比关系。当超声波频率为1 MHz时,衰竭距离约为5 cm,当频率为4 MHz时,衰竭距离锐减为3 mm左右。

### 3 解决问题的主要办法

空气耦合式超声波检测过程中,超声波在介质分界面处的反射损耗和在空气中的传输衰减是自然现象,无法从根本上予以改变,因此,要得到高质量的检测结果,就要从研究新型换能器方面入手。目前的研究成果主要集中在以下两个方面:①在传统压电晶片式换能器的外壳上增加阻抗匹配层,使之适应以空气为耦合剂的检测方式。GOMEZ等<sup>[9]</sup>的研究解决了匹配材料的选择问题。②研制新型静

电换能器<sup>[10]</sup>来提高超声波能量的传递效率。

除此之外,改进信号处理技术也是一种行之有效的办法。可采用低噪声前置信号放大器,处理算法有短时傅里叶变换、小波变换<sup>[11]</sup>和自适应滤波等。

#### 4 结语

阐述了空气耦合式超声波检测技术的基本原理,对该项技术中检测信号的衰减成因进行了理论分析与数值计算,并探讨了解决当前技术难题的可能方法。

虽然空气耦合式超声波检测技术离大规模应用还有一段距离,但由于它具有非接触、无污染、完全无损等特点,使其有着良好的应用前景。开展这方面的研究,对提高我国航空工业的无损检测水平具有重要的工程价值。

#### 参考文献:

- [1] 周正干,向上,魏东,等. 复合材料的超声检测技术[J]. 航空制造技术,2009(08):70—73.
- [2] 周正干,魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报,2004,44(6):10—14.
- [3] Grandia W A, Fortunko C M. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers[J]. IEEE Ultrasonics Symposium,1995(1):697—709.
- [4] 董正宏,王元钦,李静. 非接触空气耦合超声检测技术

研究及应用[J]. 无损探伤,2007,31(2):1—6.

- [5] 夏利利,杨文革,董正宏. 非接触超声检测技术在航天无损检测中的研究与应用[J]. 装备指挥技术学院学报,2007,18(4):58—62.
- [6] Lomme E B, Bulcaen D, Declercq F. Air-coupled ultrasonic NDE: experiments in the frequency range 750 KHz~2 MHz[J]. NDT & E International,2002(35):417—426.
- [7] Bass H E, Sunderland L C, Percy J. Atmospheric absorption of sound: further developments[J]. JASA, 1995,97(1):680—683.
- [8] 罗元国,王保良,黄志尧,等. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展与展望[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):742—744.
- [9] Gomez T E. Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air[J]. IEEE Trans, Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004,51(5):624—633.
- [10] Wang Z, Zhu W, Miao J, et al. Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array[J]. Sensors and Actuators A Physical,2006(130/131):485—490.
- [11] Berriman J R, Hutchins D A, Neild A, et al. The application of time-frequency analysis to the air-coupled ultrasonic testing of concrete[J]. IEEE Ultrasonics, Ferro-electrics, and Frequency Control,2006,53(4):768—776.



(上接第 456 页)

粗细为 0.320 mm。⑫ 推荐增感屏前屏材料为铅,厚度 0.02~0.2 mm 或者不用,后屏同前屏,但稍厚于前屏。

#### 4 结论

就常规射线检测工艺而言,计算机程序所提供的参数基本上能满足透照工艺所需。实际工作中,大量的透照工艺采用了程序提供的透照参数进行编制,按工艺进行实际透照过程中,未发现工艺参数错误,对不同的透照类型统计见表 1,实践证实了该程序的正确性和实用性;且工艺编制的效率有了很大的提升,节约了大量的人力物力。

#### 参考文献:

- [1] 强天鹏. 射线检测[M]. 昆明:云南科技出版社出版,

表 1 透照情况统计

工件 类型	环缝透 照方式	理论最 少透照次 数 N/次	实际 次数 /次	备注
小径管	倾斜椭圆成像	3	3	—
容器	环缝单壁外透	16	16	—
容器	环缝偏心内透 $F < R$	1	12	用定向曝光机
容器	环缝偏心内透 $F > R$	1	9	用定向曝光机
容器	环缝中心透照	1	1	$\gamma$ 源周向曝光
容器	环缝双壁单影	5	7	胶片长度受限
管道	环缝中心透照	1	1	$\gamma$ 源周向曝光

注:1) 工艺数量为 1 份。

2001.

- [2] JB/T 4730. 2—2005 《承压设备无损检测》射线检测[S].