粘接质量超声检测研究

李明轩

(中国科学院声学研究所　北京 100080)

2001 年 10 月 18 日收到

摘要　高波阻抗层下多层低波阻抗层间脱粘的超声检测问题是具有普遍意义又很难解决的检测问题。本文介绍了我们近年来在此方面的一些研究进展。首先从传播特性入手总结出几个有用的特征规律，并结合这些物理特征规律选取相应的信号处理手段，从方法上实现多层界面的脱粘检测，并作了多种技术集成，做出有实际应用价值的检测系统。

关键词　粘接，超声检测，信号处理

Ultrasonic testing of adhesion

LI Mingxuan

(*Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract　The testing of the debonding flaws in the interfaces of the multi-layered media of low acoustic impedances beneath a layer of high acoustic impedance is a typical and difficult non-destructive testing problem. Our study in this research field is presented in this paper. On the basis of acoustic wave propagation, the characteristics of the echo signals is first summarized. Then various signal processing techniques are taken to recognize the flaws. A variety of techniques are integrated to produce a testing system of practical use.

Key words　Adhesion, Ultrasonic testing, Signal processing

1　引言

粘接工艺是现代工业尤其是国防工业越来越广泛采用的工艺技术，其中包括金属 / 金属、金属 / 非金属及非金属 / 非金属等各类粘接结构。如油井水泥胶接固井中钢套管 / 水泥 / 地层各界面、固体火箭发动机中壳体 / 绝热层 / 包覆层 / 药柱各界面、反应堆核元件中包覆层 / 过渡扩散层 / 铀芯各界面、飞机上蒙皮 / 衬层 / 蜂窝各界面以及各种复合材料和制造的部件等等。

但是，由于粘接层间脱粘或粘接强度未达到设计要求或在使用过程中强度降低而引发的各种灾难性事故时有发生，粘接结构的安全和质量问题是人们十分关注的问题。因此，粘接质量的检测与评价，就成为国际上超声检测一个极其重要的研究领域和前沿课题。由于问题的复杂性和困难性，粘接质量的检测多年以来进展缓慢，在一定程度上制约了有关粘接工艺的使用。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粘接质量的检测通常分为两大类：一类是脱粘缺陷的检测，另一类是粘接强度的检测。脱粘缺陷的检测又可分为空气夹层脱粘和机械贴合脱粘检测；粘接强度的检测则分为胶结层内聚强度和介质界面附着强度检测。

不同于一般的材料中的缺陷检测，粘接质量的检测主要关注材料介质的界面部位，因而检测的难度更大些。一般的无损检测方法（如射线、涡流、常规超声等）常常遇到了困难，必须根据检测的特殊性研究相应的检测方法与技术。

在粘接检测中发展比较早应用较为广泛的是声学检测中的振动检测法，声阻法是其中最具有影响的方法之一，它是源于敲击法而发展起来的。其检测原理是：用电声换能器激发样品振动，而反映样品振动特性的力阻抗反作用于换能器，构成换能器的负载，当粘接状态变化时，反映其振动特性变化的力阻抗也随之变化，作为换能器负载的力阻抗变化时，换能器的某些特性也随之变化。这样通过测量换能器某些特性的变化来检测作为负载的力阻抗变化进而识别粘接状态来实现粘接质量的检测。我们在 60 年代初至 70 年代中，结合多项具体检测任务系统地研究了声阻法检测原理 [1]。在国际上我们首次给出完整系统理论并对具体的相关检测方法振幅法、相位法、频率法作出了详细分析，同时我们将国际上广泛应用的福克仪 (Foker) 归为声阻法中的一种单片法 [2]，对其检测原理给出了唯象的理论分析，胶接层物理模型就是后来被国际上广泛采用的弹簧模型。在这期间我们还对声阻法对多层粘接进行了研究 [3]。另外，在此期间国内外针对粘接超声检测从声波的传播特性出发，也开展了许多有关传播检测方法的研究 [4−6]。

尽管如此，在粘接检测中有三大难题，始终进展不大。这就是高波阻抗下多层低波阻抗材料的粘接检测、机械贴合脱粘检测和粘接强度的定量检测问题。在上述三大难题中，第一个难题，近年来，我们结合实际应用开展了较为系统全面的研究工作。本文主要结合具体的检测物理模型简要介绍以下这方面的研究进展情况。另外两个难题，我们将在国家基金委基金支持下开展全面的研究工作。

2 研究的基本物理模型和检测的难度

我们选取的研究基本物理模型如图 1 所示。这是一种有关高波阻抗下多层低波阻抗材料粘接检测经常碰到的一种比较典型的物理模型。对于检测钢层下界面的 1 界面检测，用常规方法是比较容易解决的，而对检测钢层下多层橡胶层之间的粘接检测即 2 、 3 、 4 等界面的粘接检测即通常统称的二界面粘接检测相对就困难得多了。

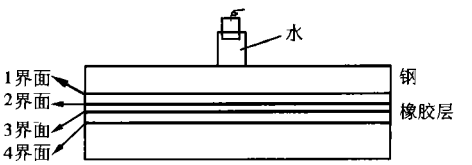


图 1　基本物理模型

主要困难有两点，其一钢层的两个界面都是波阻抗相差较大的界面，换能器检测到的橡胶层间的反射信号相对于入射信号而言，是经过了钢层两个界面四次镜面屏蔽作用之后的，即使不考虑全部传播损耗，其信号也是十分微弱的。我们在实际检测中有时遇到橡胶层的衰减是很大的，最大的可达 10dB/mm。这样检测到的橡胶层反射信号主要是钢层的多次反射信号，橡胶层间的反射弱信号实际上是迭加在这个多次反射强信号之中，通常是难以分辨的，如图 2 所示。正因为如此，所以有关这类二界面粘接检测问题，长期以来颇受人们关注，而又一直未能解决的检测难题。近年来，我们对这一问题的研究，是通过实验和物理计算去总结认识其传播信号特征规律为基础，以信号处理为手段，采取了多项技术聚成建立一个检测系统，对这一困难的检测问题取得了重要突破获得了比较满意的检测结果。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

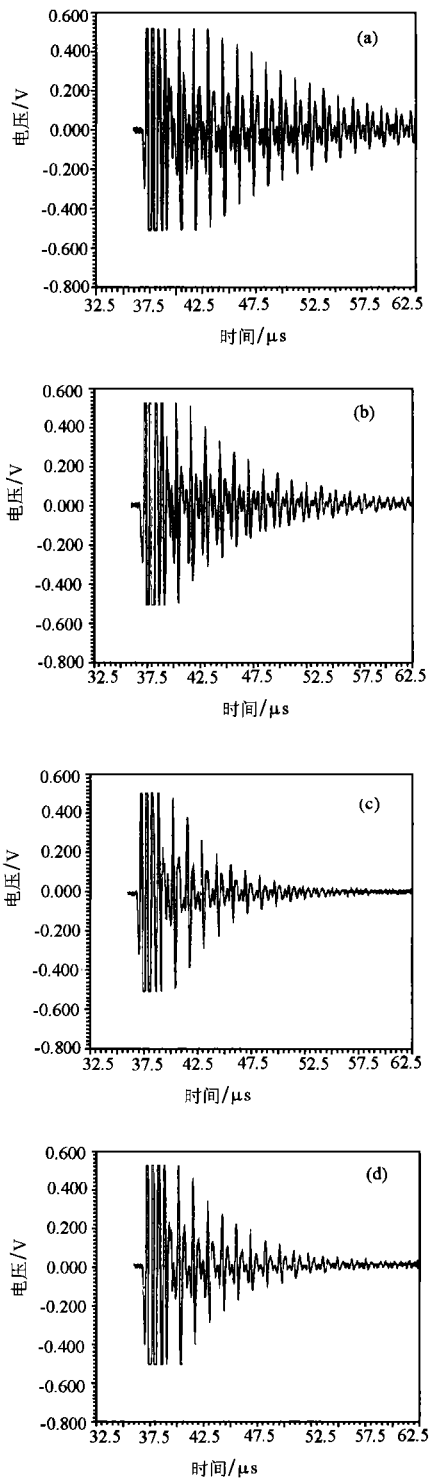


图 2　检测到的反射回波信号

(a) 一界面脱粘 (b) 二界面脱粘 (c) 三界面脱粘 (d) 粘好

3　传播特性和检测信号规律的认识

为了探索传播特性和检测信号特征，我们进行了大量的试验，并与理论计算相结合，总结出与我们检测有关的五个信号特征：

(1) 检测信号存在透声窗 [7]

对于钢层为 4mm 厚橡胶层每层厚为 2mm 的具体实验样品，通过实验可得到如图 3 所示信号谱。从图 3 可见，对于主要以钢层多次反射为主体的系统检测信号存在一个明显的透声频率窗口。此窗的频率恰为钢层厚度共振频率，在这里为 700kHz 。

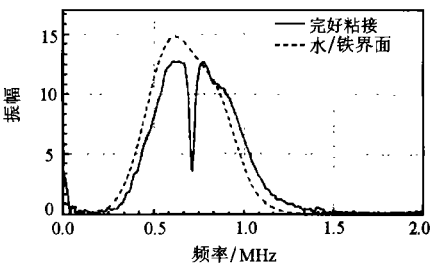


图 3　实验得到的反射信号振幅谱

从理论上对于各界面脱粘检测信号减掉钢层的信号、所得脱粘信号幅度谱如图 4(a) 所示，实际检测结果如图 4(b) 所示。

窗口频率的选取，可以减少钢层多次反射信号干扰，大大提高了橡胶层脱粘回波信号的检测灵敏度，是我们检测信号频率选取的理论依据。

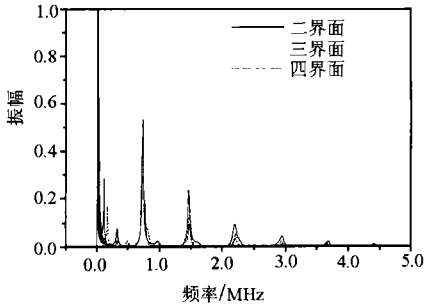
(2) 有无二界面回波检测信号包络不同

纯钢层多次反射 (一界面脱粘或粘好) 检测信号是一个标准的指数衰减包络，如图 5(a) 所示，有橡胶层脱粘反射回波在内的检测信号是凸包状，包络如图 5(b) 所示，此特征对我们来讲也是十分重要的，它是我们信号处理标准波形或参考波形选取的理论依据。

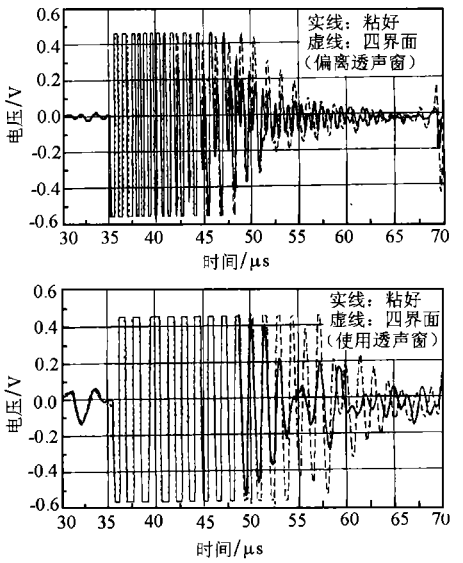
(3) 高灵敏时间窗

在我们研究模型根据具体参数结构，从理论和实验上都发现存在一个高灵敏度的时间窗，大约在 42–55μs ，如图 6 所示，图中 1 ，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 脱粘信号幅度谱



(b) 四界面检测偏离透声窗与使用透声窗的对比

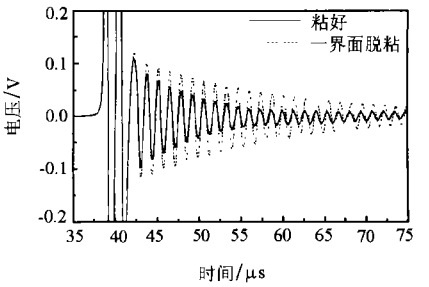
图 4　脱粘信号幅度谱与检测效果

2，3，4，0 分别代表一、二、三、四界面脱粘和粘好等状态结果。之所以出现一个各个界面脱粘检测灵敏的时间窗，这是因为各层界面回波与钢层多次反射回波叠加所造成的。这个窗口是随着检测结构参数改变而会改变的。高灵敏度度时间窗是我们信号处理数据采样选取的依据。

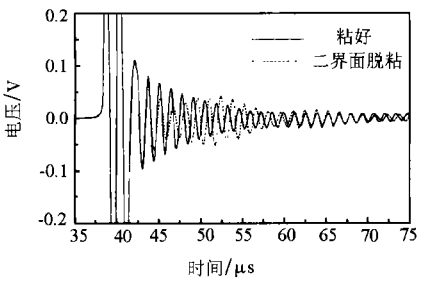
(4) 各界面脱粘幅度包络不是单调变化的

从图 6 可见，一界面脱粘到四界面脱粘再到粘好，它们的幅度包络不是单调下降或增大，而是有交叉。这一点告诉我们用简单包络幅度法区分几个界面脱粘是有困难的，必须用信号处理作模式识别。

(5) 脱粘边缘检测信号发生相位翻转



(a) 纯钢层多次反射检测信号



(b) 橡胶层脱粘反射回波检测信号

图 5　回波信号包络

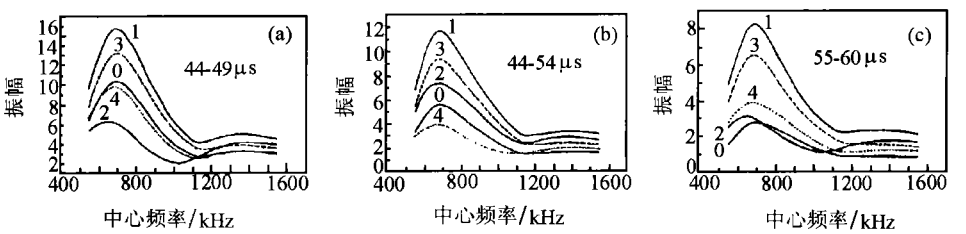


图 6　不同时间窗内不同粘结状态幅度包络

当探头扫描由粘好进入脱粘区，在脱粘边缘处发生检测信号相位翻转，这种现象不管是几界面脱粘均一样。这是我们大量实验中发现的一个规律，我们是简单地用探头照射面积在粘好与脱粘区域叠加作过一些定性的描述，真正严格的还需要用三维理论作精确分析。此现

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

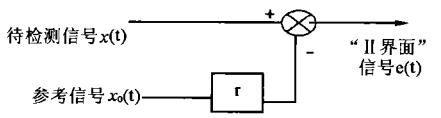


图 7 “II 界面”回波信号提取方法示义图

象最近我们发现国外也有发现，目前还未见理论分析报导。

4 信号处理是解决检测问题的有力武器 [8−17]

对于钢层下多层橡胶脱粘检测的信号处理，近年来，我们进行了大量的研究工作 [10]，主要方法分为二界面脱粘回波信号提取和模式识别两大类。主要方法二界面信号提取有：自适应滤波法、子波反滤波法、同态解卷积法、指数加权消去法、相关加权消去法，维纳滤波匹配消去法及小波包子带滤波法等；主要方法中识别有： DFT 和 DCT 离散变换作特征输入的 BP 神经网络识别 [13]、小波变换提取特征变换进行信号重构定征 [12]、 RBF 神经网络模式识别 [17]、基于最小错误率的贝叶斯判别 [9]、波形匹配模式识别等。

4.1 二界面信号提取方法

二界面回波信号提取信号处理方法基于“II 界面”回波信号提取思想出发所采用的各种方法可利用图 7 来表示，其中利用完全粘好的信号或一界面脱粘信号为参考信号 $x_0(t)$，通过对参考信号进行滤波或加权处理后使其成为校正参考信号，使其与待检测信号 $x(t)$ 中一界面信号接近，通过反向消去，提取“II 界面”信号。

图 7 中的 r 可以是滤波系数也可以是加权系数。根据 r 的不同求法，可分为自适应滤波、同态滤波、子波反滤波及指数加权消去法、相关加权消去法，维纳滤波匹配消去法。

上述这些方法在我们的研究问题中都取得了不同程度的效果，下面作为例子给出部分结果，如图 8–9 所示。图 8 是自适应抵消提取的界面脱粘信号 [8,11]，其中 (a)、(b)、(c)、(d)

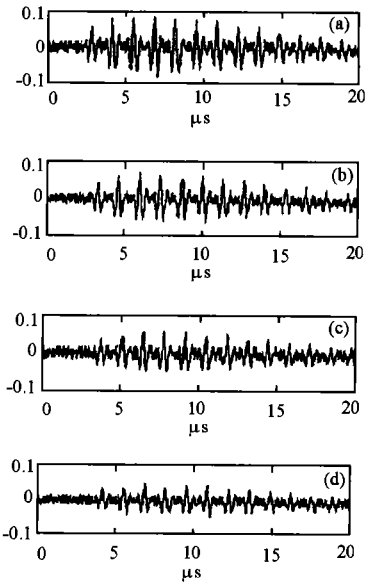


图 8 自适应抵消提取的二界面信号

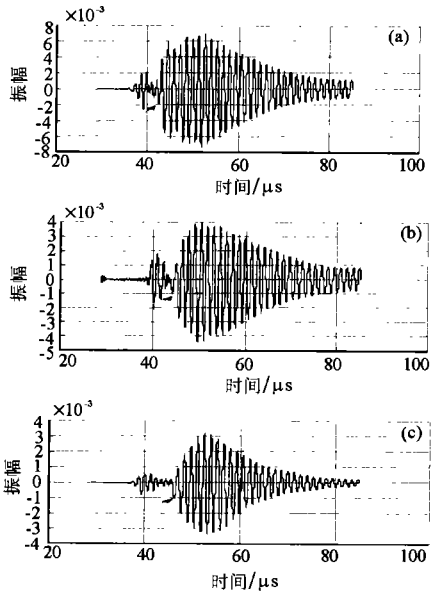


图 9 小波包子带自适应滤波法对二界面信号的提取
(a) 二界面脱粘信号提取 (b) 三界面脱粘信号提取
(c) 四界面脱粘信号提取

对应橡胶层厚度分别为 0.95mm 、 1.45mm 、 1.95mm 和 2.45mm 时的二界面回波。图 9 是小波包子带滤波法所得结果 [14−16]。

4.2 模式识别检测方法

模式识别自 60 年代初迅速发展以来，它所研究的理论和方法被应用在很多技术领域。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于钢 - 橡胶层固定深度脱粘检测来说，不同的界面脱粘可以看作是不同的脱粘模式，不同界面的脱粘识别，也就是模式识别归类问题。模式识别过程原理示意图如图 10 所示。采用信号频谱和 DCT 离散余弦变换作为特征变量，采用三层 BP 神经网络进行训练和识别，取得了较好的效果。我们又尝试了利用小波变换提取特征变量，对检测信号在时域和频域分别进行了重构定征，其研究结果显示了小波变换在特征提取问题上的可行性。

虽然 BP 神经网络是最广泛应用的一种网络，但它存在局部最优、训练速度慢，效率低等问题。其后我们又研究了基于最小错误率的贝叶斯判别和 RBF 神经网络的模式识别方法，前者方法简单，易于实现，后者网络的训练速度也大大快于 BP 网络。下面分别给出采用最小错误率的贝叶斯判别和 RBF 神经网络的模式识别所得结果 [9,17]，如图 11 所示。

图 10　模式识别过程原理示意图

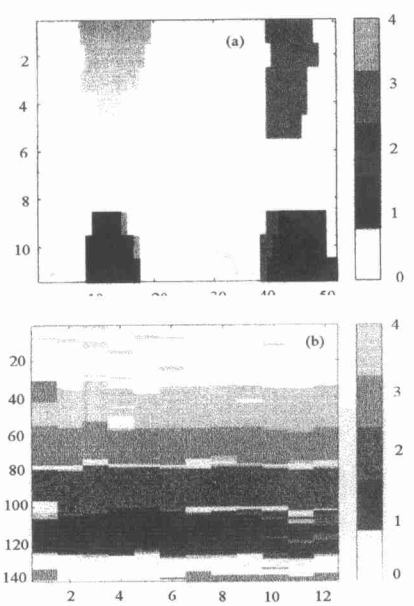


图 11　RBF 网络处理结果
(a) 小样品　(b) 大样品

5　多种技术集成检测系统

在解决高波阻抗下多层低波阻抗粘接检测中，除了从传播角度认识其信号特征作为检测方法和信号处理的基础，采用信号处理作为主要技术手段外，从实际上实现其检测还需要其它一些技术支撑，我们是把延迟技术、宽带窄脉冲技术、轮式探头自动扫描技术、全波列采集信号处理技术、数字成像技术以及共振、匹配技术等集成为一个检测系统，实现了多通道、数字化、智能化、自动扫描、自动判别、实时成像、立体显示等检测功能。

致谢　感谢张海澜、王小民、毛捷、林伟军、廉国选、张澄宇等同志的合作与帮助。

参　考　文　献

1　李明轩. 声阻法检测原理. 科学出版社.　1976.
2　应崇福. 李明轩. 声学学报,　1979, (1): 44–51.
3　Li M X, Ding W Z, Chen J M. *NDT International*, June 1982: 137–142.
4　李剑, 李明轩. 中国声学学会 1997 年青年学术会议论文集. 哈尔滨工程大学出版社,　1997. 11–15.
5　WANG Xiaomin, LIAN Guoxuan, LI Mingxuan. *Chin. J.Acoust.*, 2000, **20**(2): 121–129.
6　WANG Xiaomin, LIAN Guoxuan, LI Mingxuan. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(11): 1483–1486.
7　WANG Xiaomin, LIAN Guoxuan, LI Mingxuan et al. *Progress in Natural Science*, May 2001, Vol.11, suppl.: 165–168.
8　JIAN Xiaoming, LI Mingxuan, ZHANG Jiansheng. *Chin. J. Acoust.*, 1999, **18**(3): 280–288.
9　MAO Jie, LI Mingxuan. *Progress in Natural Science*, May 2001, vol.11, supplement: 181–184.
10　毛捷, 简晓明, 李明轩等. 应用声学,　2000, **19**(3): 45-47.
11　简晓明, 李明轩, 张建生. 声学学报,　2000, **25**(4): 351–356.
12　张建生, 李明轩. 声学学报,　2001, **26**(3): 231–238.
13　张建生, 李明轩. 声学学报,　2001, **26**(4): 349–354.
14　张建生, 李明轩. 应用声学,　2001, **20**(1): 23–29.
15　Mao Jie, Li Mingxuan.　141st Meeting of Acoust. Soc. Am., June 2001: 2318.
16　MAO Jie, Li Mingxuan. *Chin. J. Acoust.*, (Accepted).
17　毛捷, 李明轩. 中国声学学会 2001 年青年学术会议论文集,　(待发表).

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net