

# 钢/橡胶胶接结构中脱粘缺陷的 Lamb 波定量检测

李 剑<sup>1</sup>, 刘松平<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

**摘要:** 针对胶接结构中脱粘缺陷的定量检测问题, 探讨了一种基于 Lamb 波幅值的-3 dB 法。对钢/橡胶结构中圆形脱粘缺陷进行了检测试验。结果表明, Lamb 波信号在粘好区幅值较小, 在脱粘区幅值较大。采用-3 dB 法可以较好地对试样中的脱粘缺陷进行定量和定位。

**关键词:** 超声波检测; Lamb 波; 胶接结构; 脱粘; 定量检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2009)07-0525-03

## Quantitative Evaluation of Disbonding in Steel/Rubber Adhesive Bonding Structures by Using Lamb Waves

LI Jian<sup>1</sup>, LIU Song-Ping<sup>2</sup>

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;

2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of quantitative evaluation of disbonding in adhesive bonding structures, the -3 dB method based on Lamb waves was discussed. The experiments were carried out on steel/rubber adhesive bonding structures with circular disbonding. The results showed that the amplitude of Lamb wave in disbonding area was higher than that in bond area, and the disbonding in the sample could be quantitatively estimated effectively by the -3 dB method.

**Keywords:** Ultrasonic testing; Lamb wave; Adhesive bonding structure; Disbonding; Quantitative evaluation

## 1 问题的提出

胶接结构是一种常见的结构连接形式, 广泛地应用于航空、航天等工业领域。胶接结构粘结质量的无损检测一直受到人们的关注。脱粘是此类结构中最常见的危害性缺陷。目前常见的脱粘无损检测方法有谐振法、超声法、声发射和电子剪切成像法等<sup>[1-2]</sup>。和上述方法相比, Lamb 波检测是一种特别适合薄壁结构且效率较高的检测技术<sup>[3-4]</sup>, 因此对于大面积薄板胶接结构, 可考虑用 Lamb 波进行检测。笔者利用 Lamb 波对钢/橡胶胶接结构的脱粘缺陷进行了检测试验, 并尝试用-3 dB 法对脱粘缺

陷的大小和位置进行定量分析。

## 2 Lamb 波检测方法

### 2.1 试样

检测试样为钢板/橡胶两层粘接结构(图 1)。钢板厚度为 1.5 mm, 大小为 380 mm×290 mm。橡胶层厚度为 1.2 mm。粘接时在试样中部位置预制了两个直径分别为 24 和 10 mm 的圆形脱粘缺陷。

### 2.2 试验设备

试验设备采用北京航空制造工程研究所研发的 MUT-1 型数字式超声检测仪, 采样频率 50 MHz。

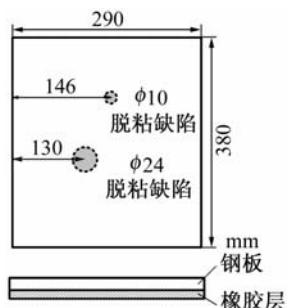


图 1 钢/橡胶胶接结构试样及缺陷分布

收稿日期: 2008-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572099, 60727001)

作者简介: 李 剑(1979—), 男, 工学博士, 主要从事复合材料超声无损检测研究。

探头为可变角探头,中心频率 2.5 MHz,可变角范围 0°~75°。试验耦合剂为机油。

### 2.3 试验方法

试验采用一发一收双探头法,发射探头和接收探头角度相同,并由式(1)确定<sup>[5]</sup>:

$$\sin \alpha = \frac{c_L}{c_P} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为声波入射角度;  $c_L$  为探头有机玻璃楔块纵波波速;  $c_P$  为钢板中 Lamb 波相速度。可通过计算求出<sup>[6]</sup>。

试验过程中保持发射和接收探头之间的距离不变(此距离需大于缺陷在  $y$  方向尺寸),且声束轴线与  $y$  轴平行(图 2)。以 2 mm 步距,沿  $x$  方向,从粘好区向脱粘区移动探头,使扫查移动距离覆盖整个缺陷在  $x$  方向的尺寸。在扫查过程中,记录每一扫查位置对应的时域波形,并求出波形最大幅值。最后,以扫查声束轴线位置为横坐标,以相应位置处波形幅值为纵坐标,将各点用直线连接起来,得到幅值随扫查位置的变化图。

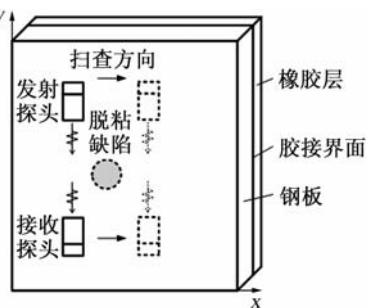


图 2 扫查检测方法

距,沿  $x$  方向,从粘好区向脱粘区移动探头,使扫查移动距离覆盖整个缺陷在  $x$  方向的尺寸。在扫查过程中,记录每一扫查位置对应的时域波形,并求出波形最大幅值。最后,以扫查声束轴线位置为横坐标,以相应位置处波形幅值为纵坐标,将各点用直线连接起来,得到幅值随扫查位置的变化图。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

试验采用 S0 和 A0 两种模式的 Lamb 波,分别对  $\phi 24$  mm 和  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷进行了检测。

#### 3.1.1 S0 模式检测结果

试验中保持发射探头与接收探头之间的距离为 50 mm。根据式(1)确定探头角度为 60°,此时在钢板中激发出 S0 模式 Lamb 波。对于  $\phi 24$  mm 脱粘缺陷,粘好区和脱粘区典型的时域波形如图 3 所示。对  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷,时域波形与图 3 类似。

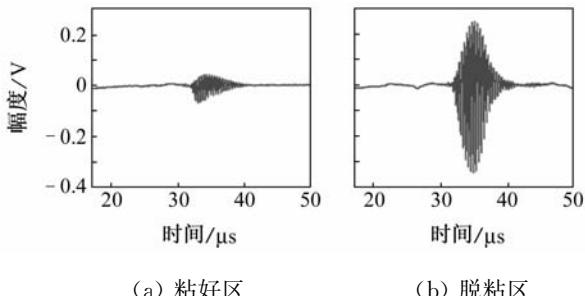


图 3 S0 模式检测  $\phi 24$  mm 脱粘缺陷的典型时域波形

图 4 为用 S0 模式检测  $\phi 24$  mm 和  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷时,时域波形幅值随扫查位置的变化。图中对幅值作了归一化处理,使最大幅值为 80%。

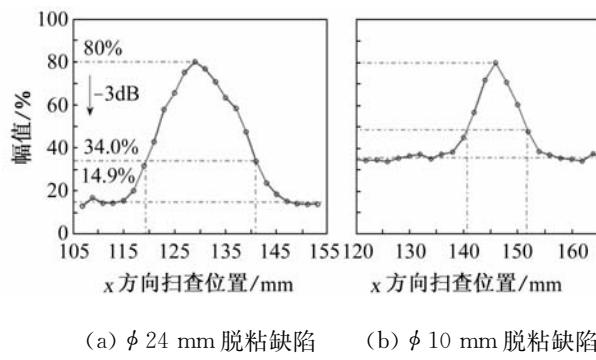


图 4 S0 模式检测时信号幅值随扫查位置变化图

### 3.1.2 A0 模式检测结果

保持发射和接收探头之间距离 50 mm 不变。根据式(1)调整探头角度至 69°,此时在钢板内激发出 A0 模式 Lamb 波。对于  $\phi 24$  mm 脱粘缺陷,粘好区和脱粘区典型的时域波形如图 5 所示。对  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷,时域波形与图 5 类似。

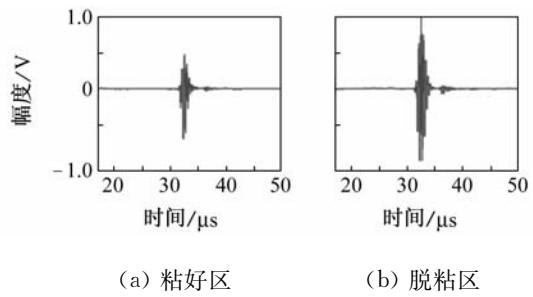


图 5 A0 模式检测  $\phi 24$  mm 脱粘缺陷的典型时域波形

同样,也可作出用 A0 模式检测  $\phi 24$  mm 和  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷时,时域波形幅值随扫查位置的变化图(图 6)。

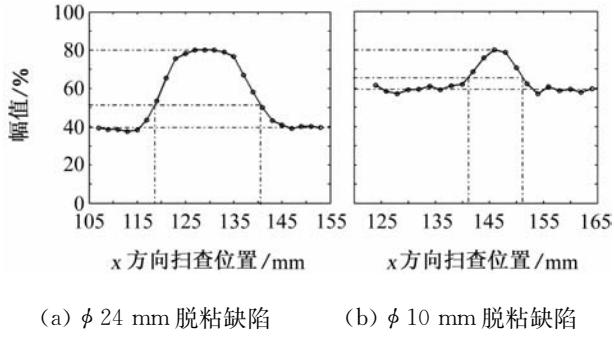


图 6 A0 模式检测时,幅值随扫查位置变化图

### 3.2 试验结果与误差分析

#### 3.2.1 试验结果分析

从图 3 和图 5 可以看出,无论是用 S0 模式还是

A0 模式检测,时域波形幅值在脱粘区都比在粘好区高。其原因是,对于钢板/橡胶粘接结构,在完全粘好的情况下,钢板中传播的 Lamb 波会有一部分泄漏到橡胶层中,从而引起钢板内 Lamb 波的衰减,表现在时域波形上就是幅值降低。若在 Lamb 波传播途径上有脱粘区域存在,那么在同样的传播距离上,泄漏到橡胶层中的 Lamb 波要少一些,即钢板中 Lamb 波会衰减得少些,因此时域波形幅值在脱粘区要比在粘好区高。当 Lamb 波以相同的传播距离,依次扫过粘好区、脱粘区、粘好区时,时域波形的幅值会随扫查位置的不同发生起伏变化(图 4)。由于试样中圆形脱粘缺陷是关于圆心对称的,因此“幅值-位置”变化曲线关于圆心基本上也是对称的。

从图 4 的幅值位置图还可以看出,波形幅值在粘好区最低,在脱粘区边缘处升高,脱粘区域中心处幅值最高,因此可以通过幅值高度来判断脱粘区域边缘的位置,进而可以确定脱粘区域的大小。通过反复试验,结果表明:当最大幅值相对于粘好区幅值下降-3 dB 时,该处幅值对应的横坐标与脱粘区边缘位置对应较好,称该方法为-3 dB 法。以图 4a 为例,脱粘区最大幅值为 80%,粘好区幅值的平均值为 14.9%,最大幅值相对其降低-3 dB 的高度为 34.0%,用-3 dB 法测得的缺陷位置结果见表 1。

表 1 Lamb 波检测脱粘缺陷试验结果

缺陷 /mm	模 式	缺陷直径			缺陷位置/mm	
		实际值/mm	测量值/mm	误差/%	实际值	测量值
$\phi 24$	S0	24.0	21.6	10%	130.0	130.2
	A0	24.0	22.1	8%	130.0	129.7
$\phi 10$	S0	10.0	10.3	3%	146.0	146.7
	A0	10.0	11.0	10%	146.0	146.3

由表 1 可见,用-3 dB 法对试样中的脱粘缺陷定量检测,其径向尺寸误差 $\leq 10\%$ ,对圆形脱粘缺陷的中心定位也具有较高准确性。

### 3.2.2 误差分析

从-3 dB 法的原理可知,检测结果的定量是否准确,依赖于时域波形波幅值高度测量的准确性。由于在检测过程中,时域波形的幅值往往会受到耦合情况、探头压力等因素的影响,因此在检测过程中应该尽量保证耦合剂、探头压力等均匀,这样可以在

一定程度上减小误差。

另外从图 4 可见,对于粘好区,不同的位置处,波形幅值也不完全相同,这可能是由于涂胶不均造成的,因此对于粘好区需多测一些点,然后取波幅的平均值,这样也可减小最终的误差。

扫查步距对结果也有一定的影响。步距越小,得到的“位置-波幅”曲线越光滑,由此得到的结果越准确。因此,对于小的脱粘缺陷应该用小的步距进行检测,对大的缺陷可使用较大的步距进行检测。

## 4 结论

采用一发一收双探头法,用 S0 和 A0 两种模式 Lamb 波对钢/橡胶粘接结构中的脱粘缺陷进行了检测试验研究,结果表明:

(1) 两种模式的 Lamb 波均可检测出钢/橡胶粘接结构中  $\phi 24$  mm 和  $\phi 10$  mm 脱粘缺陷。且在粘好区接收到的时域波形幅值较小,在脱粘区接收到的时域波形幅值较大。

(2) 采用-3 dB 法可以有效地对试样中的脱粘缺陷进行定量和定位,缺陷直径定量误差不大于 10%,缺陷定位也有较高的精度。

需要说明的是,文中只是对 Lamb 波定量检测钢/橡胶胶接结构中的脱粘缺陷做了一些尝试,至于其它检测参数(如探头之间的距离、探头频率等)以及胶接强度等对结果的影响还有待进一步研究。对于其它材料的胶接结构,文中所采用的方法也具有一定的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 陈积懋,余南廷,译.超声检测新技术[M].北京:科学出版社,1995:251—274,471—524.
- [2] 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2002:648—660.
- [3] 徐可北.金属薄板兰姆波检验技术[J].无损检测,1999,21(10):461—465.
- [4] 王 杜,郑祥明,唐正连,等.兰姆波在薄钢板无损检测中的应用研究[J].无损检测,2007,29(4):193—199.
- [5] 《超声波探伤》编写组.超声波探伤[M].北京:水利电力出版社,1980:239.
- [6] 艾春安,李 剑.兰姆波频率方程的数值解法[J].无损检测,2005,27(6):294—296.