

钢/橡胶胶接结构脱粘缺陷 Lamb 波检测的模式选择*

Mode Selection for Detecting Disbonding in Steel/Rubber Adhesive Bonding Structure by Using Lamb Wave

第二炮兵工程学院 李 剑
北京航空制造工程研究所 刘松平

[摘要] 针对 Lamb 波检测胶接结构脱粘缺陷时如何选择恰当的模式这一问题,研究了板内质点振动位移与检测灵敏度之间的关系。以钢板/橡胶胶接结构为例,用不同模式的 Lamb 波进行了检测试验研究。结果表明,不同模式的波有不同的检测灵敏度,选择在板表面具有较大位移而在板内具有较小位移的 Lamb 波模式,可以提高胶接结构脱粘缺陷检测灵敏度。

关键词: 胶接结构 Lamb 波 无损检测 模式选择

[ABSTRACT] According to the problem of mode selection for detecting disbonding in adhesive bonding structure by using Lamb waves, the relationship between vibration displacement of points in plate and sensitivity of disbonding testing is studied. The experiments are carried out on the steel/rubber adhesive bonding structure by using Lamb waves of different modes. The results show that testing sensitivity of different Lamb waves are different, and a high sensitivity of disbonding testing can be reached by selecting the Lamb modes of which the vibration displacement is larger on plate surfaces than that inside the plate.

Keywords: Adhesive bonding structure Lamb wave Nondestructive testing Mode selection

随着胶接结构在航空、航天等工业领域的广泛应用,胶接质量的无损检测越来越引起人们的关注^[1]。目前常用的检测方法有共振法、超声法、声-超声法、电子剪切成像法等^[2-4]。与上述方法相比,Lamb 波检测是一种适用于薄壁结构、远距离、高效率的检测技术^[5],近年来在胶接结构脱粘检测中多有应用^[6-8]。由于 Lamb 波有多种模式,不同的模式对缺陷的检测能力和敏感程度不同^[9],选择正确的 Lamb 波模式有助于

提高缺陷检测灵敏度。本课题以钢板/橡胶胶接结构为例,研究了 Lamb 波质点振动位移与脱粘缺陷检测灵敏度之间的关系,提出了 Lamb 波检测敏感模式的选择方法。

1 Lamb 波频散特性及其质点振动

Lamb 波具有频散特性,即波速与频率有关。如图 1 是钢板中 Lamb 波相速度与频厚积 fd (频率 $f \times$ 板厚 d) 关系曲线。从图中可以看出,在同一频厚积下,Lamb 波有多种模式,例如当 $fd=5\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时,对应应有 S_0 、 A_0 、 S_1 和 A_1 4 种模式;同一模式下,不同的频厚积对应不同的相速度,例如对于 S_1 模式,当 fd 分别为 $5\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 和 $10\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时,其对应的相速度分别为 5.62km/s 和 3.62km/s 。

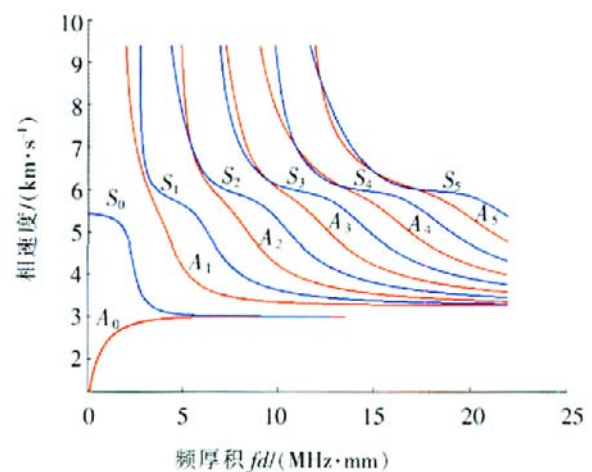


图 1 钢板中 Lamb 波相速度频散曲线
Fig.1 Phase velocity dispersion curves for steel plate

板中传播的 Lamb 波可以看成是纵波与横波的合成。在沿板厚方向的横截面内,Lamb 波质点振动的位移轨迹是一个椭圆,如图 2 所示,质点沿水平方向的振动位移为 U ,垂直于板面方向的振动位移为 V 。

* 国家自然科学基金(60727001)资助项目。

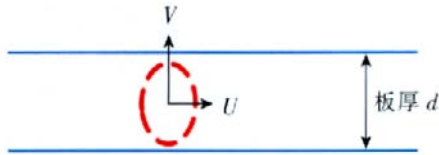


图2 Lamb波质点的振动

Fig.2 Particle movement of Lamb wave

距板表面不同深度处的质点有不同的 U 、 V 分量,即位移分布是不同的,这种分布一定程度上反映了 Lamb 波在板横截面内的能量分布。不同的 Lamb 波模式,有不同的质点位移分布。

2 Lamb波检测原理及灵敏度分析

2.1 Lamb波检测原理

利用 Lamb 波检测胶接结构脱粘缺陷的原理如图 3 所示,发射探头和接收探头放置在介质 1 上表面,介质 1 下表面与介质 2 胶接形成胶接界面。Lamb 波在介质 1 中传播,其边界条件不再是自由边界,而是受胶接界面的约束,因此胶接界面的状态将对介质 1 中的 Lamb 波产生影响。Lamb 波传播路径上,在完全粘好区,一部分声波能量会通过胶接界面泄漏到介质 2 中,从而引起介质 1 中 Lamb 波的衰减,反映在时域上就是接收到的 Lamb 波幅值会降低。若传播路径上有脱粘缺陷存在,那么在相同的传播距离上,泄漏到介质 2 中的能量会少一些,接收到的时域信号波幅相对较高。

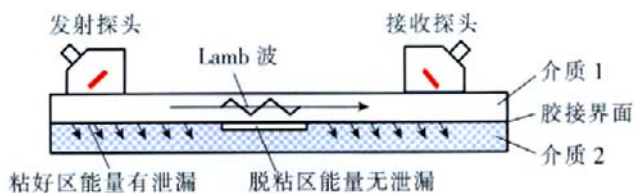


图3 Lamb波检测原理

Fig.3 Principle of Lamb wave testing

2.2 检测灵敏度分析

有研究表明,Lamb 波检测灵敏度与质点位移分量 U 、 V 的分布有关,但尚无统一的结论^[10-13]。文献[10]认为分层缺陷的检测灵敏度与质点垂直位移分量 V 有良好的对应关系,文献[11]认为 Lamb 波对水平分层缺陷所产生的回波能量大小与其质点振动的 U 分量有较好的对应关系。文献[12]认为不同粘接界面的

检测灵敏度与不同的 U 、 V 分布有关。文献[13]研究了板中 Lamb 波能流密度,认为对于体积性缺陷的回波大小与板中能流密度大小有直接的对应关系。本文认为,质点振动的位移分布与 Lamb 波检测灵敏度之间存在某种直接的或间接的关系,但这种关系不能一概而论,而应针对不同类型的缺陷(如分层、脱粘、孔洞等),根据检测原理进行分析和判断。

从 Lamb 波检测胶接结构脱粘缺陷的原理可知,它是基于 Lamb 波能量在粘好区有泄漏,而在脱粘区无泄漏,从而引起时域信号幅值的差异。由于声波能量的泄漏是通过介质 1 下表面质点的振动实现的,表面质点振动的 U 分量和 V 分量分别以横波和纵波方式将部分能量传递到介质 2 中^[14],即振动分量 U 和 V 对声波的泄漏都有一定影响,因此可以设想,质点振动分量 U 和 V 都会对脱粘检测的灵敏度产生影响,并且表面处质点位移越大,一定程度上说明 Lamb 波能量越集中在表面处,向介质 2 中泄漏的能量就越多,那么在粘好区和脱粘区,时域信号的波幅差异就越大,也即具有较高的检测灵敏度。

3 试验方法及结果

针对 Lamb 波模式对检测灵敏度的影响,这里以钢板/橡胶胶接结构为例,用多种 Lamb 波模式对结构中的脱粘缺陷进行了检测试验。

3.1 试验方法

试样大小为 280mm×390mm,钢板厚 1.5mm,橡胶厚 1.2mm。在试样中部钢板和橡胶之间预制了直径为 10mm 的圆形脱粘缺陷。试验采用图 3 所示的一发一收双探头检测方法。为激发出不同模式的 Lamb 波,选用了中心频率分别为 1MHz 和 2.5MHz 两组可变角探头。检测设备采用北京航空制造工程研究所无损检测技术研发中心试验室研发的 MUT-1 型数字式超声检测仪,采样频率 50MHz。检测时保持发射探头和接收探头间距离不变,以 2mm 步距,依次扫查过粘好区、脱粘区、粘好区,如图 4 示。试验记录每一扫查位置处时域波形幅值,做出幅值随扫查位置变化曲线。

3.2 试验结果及分析

用 1MHz 探头检测,频厚积 $fd=1\text{MHz}\times 1.5\text{mm}=1.5\text{MHz}\cdot\text{mm}$,在钢板中激发出 S_0 模式 Lamb 波。用 2.5MHz 探头检测,频厚积 $fd=2.5\text{MHz}\times 1.5\text{mm}=3.75\text{MHz}\cdot\text{mm}$,在钢板中激发出 A_0 和 S_0 模式 Lamb 波,各模式检测的时域信号幅值随扫查位置变化曲线如图 5 所示,图中横坐标是声束轴线在 x 方向的扫查

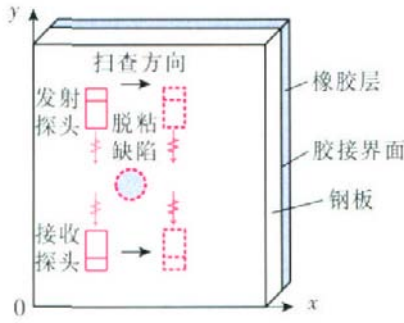


图4 扫查检测方法

Fig.4 Illustration of the testing method

位置。

预制缺陷中心横坐标位置在 $x=146\text{mm}$ 处,从图 5 可以看出,在脱粘缺陷中心处波幅最大,而在两边的粘好区波幅较小。粘好区和脱粘区幅值相差越大,说明检测灵敏度越高。从图中可以看出,不同频厚积下,不同的 Lamb 波模式波幅差异不同,即灵敏度不相

同;同一频厚积下,不同模式的灵敏度也不相同。在频厚积为 $1.5\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时, S_0 模式在粘好区和脱粘区波幅相差不大,几乎检测不出脱粘缺陷,说明灵敏度很低;频厚积为 $3.75\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时,两种模式均能检测出脱粘缺陷,并且 S_0 模式在粘好区和脱粘区波幅相差更大些,说明灵敏度更高。

为了证明灵敏度与质点振动位移之间的关系,综合考虑位移分量 U 和 V 的影响,对以上各 Lamb 波模式的质点振动位移进行了理论计算,如图 6 所示,给出了质点振动合成位移 $\sqrt{U^2+V^2}$ 沿板厚度方向的分布。图中纵坐标原点选在钢板中间的对称面上, $\pm 0.75\text{mm}$ 分别对应钢板的上下表面,中间对称面上的质点位移进行了归一化处理。从图 6 (a) 可见,当频厚积为 $1.5\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时, S_0 模式质点在整个板厚方向上位移比较均匀,且在表面处位移最小。从图 6(b)、(c)可见,当频厚积为 $3.75\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时, A_0 模式和 S_0 模式质点越靠近板表面,其位移越大,在表面处位移最大,并且

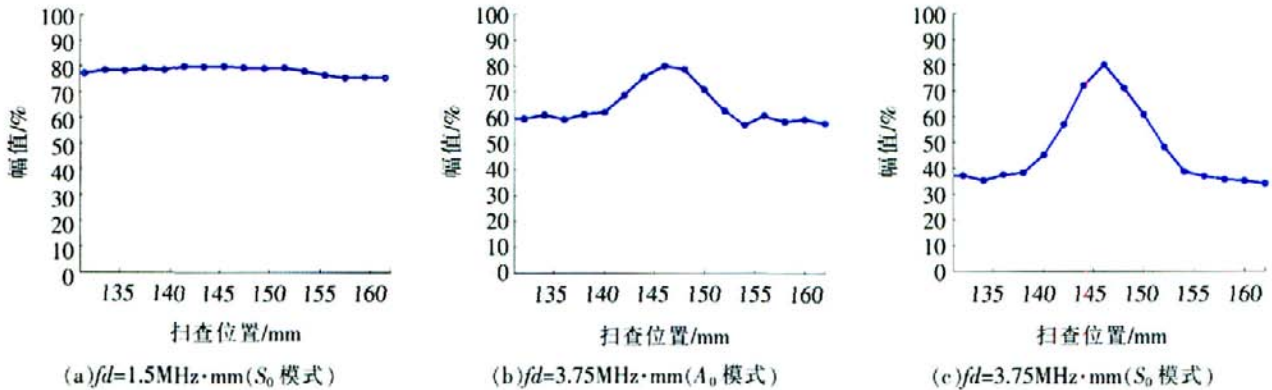


图5 不同 Lamb 波模式检测结果

Fig.5 Testing results of different Lamb wave modes

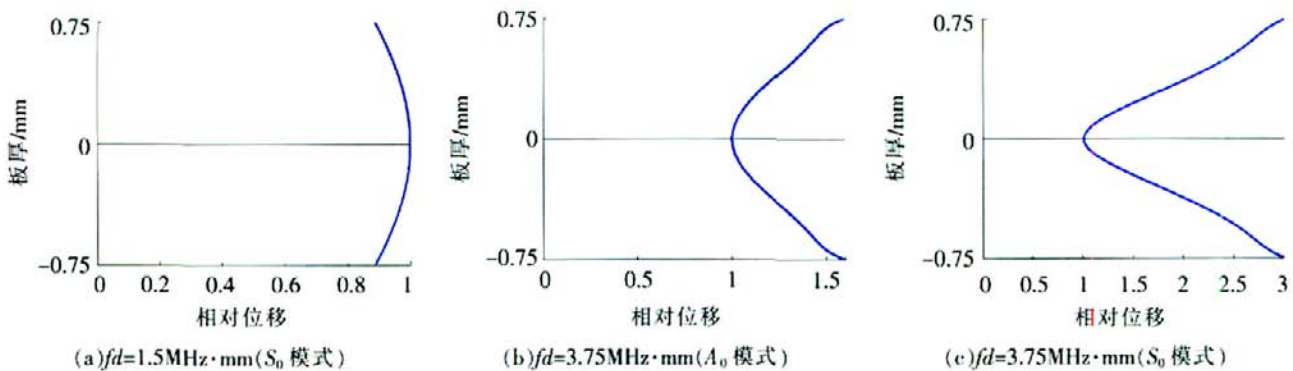


图6 质点振动位移分布

Fig.6 Distribution of particle vibration displacement

与 A_0 模式相比, S_0 模式在板表面具有更大的位移。

表 1 给出了表面质点位移与接收到的时域信号在脱粘区与粘好区的最大波幅差值及灵敏度之间的相应关系。可以清楚地看到,板表面质点的相对位移越大,则时域信号幅值差越大,灵敏度越高。由此验证了本文开始提出的设想。需要注意的是,表 1 中所说的表面质点相对位移是相对于板中间对称面上的质点而言的,这是因为本试验中位移分布曲线比较简单,只有一个极大(或极小)值。若位移分布曲线有多个极大(极小)值,那么要综合考虑这些点,但总的原则是一样的,即板内部质点的位移要尽可能小,而表面质点位移相对于内部质点要尽可能的大。

表 1 表面质点相对位移与信号幅值差值及灵敏度的对应关系

频厚积 fd (MHz·mm)	模式	表面质点归一化相对位移	幅值最大差值/dB	灵敏度
1.5	S_0	0.89	0.37	低
3.75	A_0	1.59	2.63	中
3.75	S_0	2.97	7.04	高

4 结论

Lamb 波是一种有效的脱粘检测方法,不同模式的 Lamb 波对不同缺陷的敏感程度不一样。对于钢/橡胶胶接结构脱粘缺陷,研究结果表明:

(1)不同模式的 Lamb 波对脱粘缺陷的检测能力是不同的。在 $fd=3.75\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 时,对于 $\phi 10\text{mm}$ 脱粘缺陷, S_0 模式检测灵敏度最高。

(2)板中 Lamb 波质点振动的位移分布,对脱粘检测灵敏度有一定的影响。选择灵敏度高的 Lamb 波模式应使得质点振动在板的表面具有尽可能大的位移,而在板内具有尽可能小的位移。

(3)根据质点振动位移分布选择适当的 Lamb 波检测模式,有利于提高胶接结构脱粘缺陷检测灵敏度。

参 考 文 献

- [1] 郑祥明,王维斌,史耀武. 胶接接头的无损检测. 无损检测, 2003, 25(4): 184-188.
- [2] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册. 北京:机械工业出版社, 2002: 648-660.
- [3] 刘松平. 胶接结构阻抗法检测与智能化. 无损检测, 1992, 14(10): 276-278.

- [4] 刘松平,曹正华,谢凯文,等. 先进的电子剪切成像检测技术. 第八届全国无损检测大会会议论文集, 2003: 347-350.
- [5] Drinkwater B W, Castaings M, Hosten B. The interaction of lamb waves with solid-solid interfaces. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2003, 22: 1 064-1 073.
- [6] Kundu T, Maji A, Ghosh T, et al. Detection of kissing bonds by Lamb waves. Ultrasonics, 1998, 35 (8): 573-580.
- [7] Heller K, Jacobs LJ, Qu J. Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves. NDT & E International, 2000, 33(8): 555-563.
- [8] Bork U, Challis RE. Nondestructive evaluation of the adhesive fillet size in a T-peel joint using ultrasonic Lamb waves and a linear network for data discrimination. Meas Sci Technol, 1995, (6): 72-84.
- [9] Maslov K, Kundu T. Selection of Lamb modes for detecting internal defects in composite laminates. Ultrasonics, 1997, 35(2): 141-150.
- [10] 徐可北. 金属薄板兰姆波检验技术. 无损检测, 1999, 21(10): 461-465.
- [11] 杨齐,郑祥明,郝国法,等. 兰姆波质点振动位移对检测灵敏度的影响. 无损检测, 2007, 29(12): 694-711.
- [12] 罗婕,路宏年. 火箭发动机胶接质量检测的兰姆波能量分布研究. 固体火箭技术, 2006, 29(5): 387-390.
- [13] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波. 无损检测, 1999, 21(9): 409-413.
- [14] 罗斯 J L. 固体中的超声波. 何丰富,吴斌,王秀彦译. 北京:科学技术出版社, 2004: 92-100. (责编 晓霏)

嫦娥一号环月飞行 482 天后成功撞月

北京时间 3 月 1 日 16 时 13 分 10 秒,嫦娥一号卫星在北京航天飞行控制中心科技人员的精确控制下,准确落于月球东经 52.36 度、南纬 1.50 度的月球丰富海区域。在撞击过程中,嫦娥一号卫星携带的 CCD 相机传回实时图像,图像清晰。中国探月一期工程宣布完美落幕。

为了保证嫦娥一号卫星成功“受控撞月”,嫦娥一号任务飞行控制组选择在青岛和喀什两个测控站同时能够进行测控的时间段内进行撞月控制。从 2007 年 10 月 24 日发射升空开始,嫦娥一号卫星累计飞行 494 天,其中环月 482 天,期间经历三次月食,5 次正/侧飞姿态转换,共传回 1.37TB 的有效科学探测数据,获取了全月球影像图、月表部分化学元素分布、月表土壤厚度等一系列科学研究成果,圆满实现工程目标和科学目标,为我国月球探测后续工程和深空探测奠定了坚实的基础。(本刊记者 侧卫)