

# 火箭发动机界面回波信号增强的兰姆波技术研究

罗 婕 路宏年

(北京航空航天大学,北京 100083)

**文 摘** 针对火箭发动机界面胶接质量检测中的回波信号微弱问题,通过利用兰姆波在单层各项同性介质中的位移分布公式,讨论了  $S_0$ 、 $A_0$ 、 $S_1$ 和  $A_1$ 这四种模式兰姆波在发动机钢壳中传播时的能量分布情况,并从理论上和实验中证明了  $S_0$ 和  $A_0$ 模式的声波能量集中于钢壳表面,且横波分量占主要成分,能够将声能最大限度地传入内部包覆层中。因此选择  $S_0$ 和  $A_0$ 模式兰姆波进行检测,能够增强深层回波信号能量,为胶接质量分析提供更有效的信息。

**关键词** 固体火箭发动机,胶接结构,兰姆波模式,能量分布

## Lamb Waves Investigation for Interface Echo Signal Enhancement of Rocket Motor

Luo Jie Lu Hongnian

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** Aiming at weak echo signal problem in testing the interface bond quality of rocket motor, the energy distributions of four Lamb Waves modes ( $S_0$ ,  $A_0$ ,  $S_1$ ,  $A_1$ ) are discussed while propagating in the steel shell by using displacement distribution expressions in single-layer isotropic medium. It is proved theoretically and experimentally that wave energy can be furthest transmitted into the liner under  $S_0$  or  $A_0$  mode whose energy centralizes on the steel shell's surface and transverse wave energy is the main component. As a result, deep-interface echo signal energy can be strengthened and effective bond quality information can be obtained when  $S_0$  or  $A_0$  mode for testing is chosen.

**Key words** Solid propellant rocket motors, Bonding structure, Lamb Waves modes, Energy distribution

### 1 引言

固体火箭发动机的金属外壳、包覆层和内部推进剂结构是一种典型的金属-非金属胶接结构复合材料。在制造和存储过程中,发动机各胶接界面会出现脱粘现象,因此迫切需要一种有效无损检测技术,对其界面胶接质量做出可靠评价。

兰姆波是一种共振驻波,在板中形成的声波能量较大,且含有较强的剪切分量,对界面的胶接状态敏感,广泛用于薄壁工件和复合材料的胶接质量检测<sup>[1]</sup>;对于固体火箭发动机的特殊胶接结构,兰姆波检测也取得了一定的成效<sup>[2-3]</sup>。由于兰姆波在传播过程中存在多种模态,因此选择哪种检测模式才能获得较大信号幅值非常关键,它有利于提取深层界面胶接质量的特征信息,从而提高检测精度。

### 2 超声兰姆波检测原理

图 1所示是固体火箭发动机胶接质量的超声兰姆波检测原理。选择合适的探头入射角  $\alpha_i$ ,使声波在钢壳中激发出特定模式的兰姆波(波 I)。波 I在钢壳内向前传播,若第一界面粘合,则兰姆波中的横波分量会将部分声波以纵波形式透射到包覆层中去,称之为诱发纵波<sup>[3]</sup>。

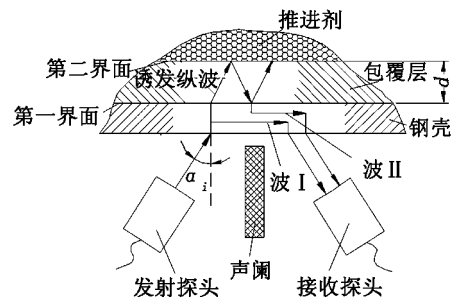


图 1 兰姆波检测原理

Fig 1 Lamb wave testing principle

收稿日期:2006-05-11

作者简介:罗婕,1981年出生,博士研究生,主要从事复合材料胶接结构的超声无损检测工作

诱发纵波在包覆层中传播,在第二界面发生反射,反射后的纵波再次进入钢壳,形成模式与波 I 相同的兰姆波(波 II)。接收探头先后接收到波 I 与波 II,它们携带了各界面的胶接信息,通过分析和提取各种信号特征,便可判断发动机内部各个界面的胶接情况,并可测量包覆层厚度<sup>[3]</sup>。

### 3 兰姆波模式选择

#### 3.1 位移分布计算公式

在检测固体火箭发动机时,由于其金属外壳的高声阻抗和包覆层(橡胶基材料)的低声阻抗间存在很大的错配度,声波难以向内部传播,再加上橡胶材料的高声衰减,使得第二界面的反射回波信号十分微弱,造成信号特征提取困难。为了有效分析深层界面的胶接情况,需要获得较强的回波信号,而通过分析兰姆波在钢壳中的能量分布情况,可以对其模式做出选择,使激发出的声波能量最大限度地透射入包覆层中,提高回波信号幅值,从而有效完成缺陷检测和厚度测量。

由于兰姆波在板内传播时的能量分布与其沿板厚方向的振动位移分布有着一定的对应关系,因此可以通过计算位移分布曲线来分析其能量分布情况。本文对兰姆波在板内的位移分布公式不作详细的推导,这里直接给出它的表达式如式(1)、式(2)所示<sup>[4]</sup>。

对称型:

$$U_s = Ak_s \left[ \frac{\text{ch}(q_s z)}{\text{sh}(q_s d)} - \frac{2q_s s_s}{k_s^2 + s_s^2} \cdot \frac{\text{ch}(s_s z)}{\text{sh}(s_s d)} \right] e^{i(k_s x - t - \frac{\pi}{2})}$$

$$W_s = -Aq_s \left[ \frac{\text{sh}(q_s z)}{\text{sh}(q_s d)} - \frac{2k_s^2}{k_s^2 + s_s^2} \cdot \frac{\text{sh}(s_s z)}{\text{sh}(s_s d)} \right] e^{i(k_s x - t)}$$
(1)

反对称型:

$$U_a = Bk_a \left[ \frac{\text{sh}(q_a z)}{\text{ch}(q_a d)} - \frac{2q_a s_a}{k_a^2 + s_a^2} \cdot \frac{\text{sh}(s_a z)}{\text{ch}(s_a d)} \right] e^{i(k_a x - t - \frac{\pi}{2})}$$

$$W_a = -Bq_a \left[ \frac{\text{ch}(q_a z)}{\text{ch}(q_a d)} - \frac{2k_a^2}{k_a^2 + s_a^2} \cdot \frac{\text{ch}(s_a z)}{\text{ch}(s_a d)} \right] e^{i(k_a x - t)}$$
(2)

式中,  $U$ 、 $W$  分别代表水平位移(纵波位移)和垂直位移(横波位移),  $\text{sh}$ 和  $\text{ch}$ 分别代表双曲正弦和双曲余弦函数,  $A$ 、 $B$  是任意常数,  $q_{s,a} = \sqrt{k_{s,a}^2 - k_l^2}$ ,  $s_{s,a} = \sqrt{k_{s,a}^2 - k_t^2}$ ,  $k_s$ 、 $k_a$  分别为对称和反对称兰姆波的波数,  $k_l$ 、 $k_t$  分别为纵波和横波的波数,  $d$  为板厚,  $z$  为粒子距板中心面的距离。

利用上述公式计算得到的位移曲线来分析不同模式兰姆波在板内的能量分布情况。根据所检对象

的特点,选择位移振幅在钢壳表面最大(即声波能量集中于钢壳表面)且横波分量占主要成分的兰姆波模式。

#### 3.2 计算位移分布曲线

根据得到的公式,可以计算和分析兰姆波在不同厚度薄板中的位移分布情况。由于检测薄壁试样时,频厚积较小,因此本文主要考虑四种低阶模式的兰姆波:  $S_0$ 、 $A_0$ 、 $S_1$ 、 $A_1$ 。为使问题简化,取定超声波频率  $f$  为 2.5 MHz,取板厚为 1、1.5、2、3、4、5 mm。根据这 6 组频厚积及其对应的不同模式相速度值,根据公式(1)、(2)分别画出这四种模式兰姆波的位移分布曲线(只考虑位移振幅,如图 2~图 5 所示),以此来研究它们在不同频厚积下的能量分布变化。

从图 2~图 5 可以看到,随着频厚积的增加,  $S_0$  和  $A_0$  模式的位移振幅始终是在板表面最大,且横波位移比纵波位移大,说明声波的能量始终集中于板表面,且横波分量占主要成分;而对于  $S_1$  和  $A_1$  模式,随着频厚积增加,声波能量由板表面向中心转移。因此,对于检测不同壁厚的火箭发动机,选择  $S_0$  或者  $A_0$  模式,有利于声波能量传入内部包覆层,从而获得较强的回波信号。

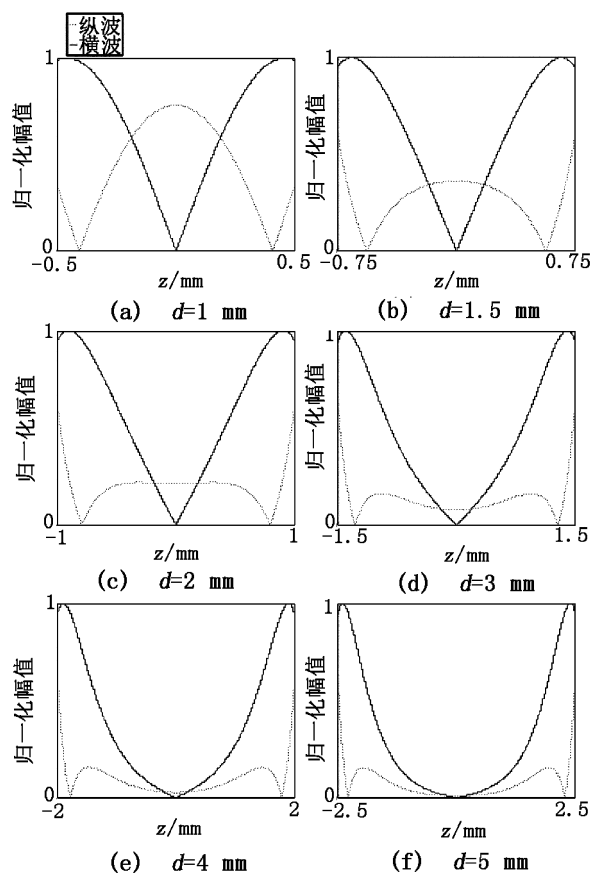


图 2  $S_0$  模式的位移分布曲线

Fig 2 Displacement distribution curves of  $S_0$  mode

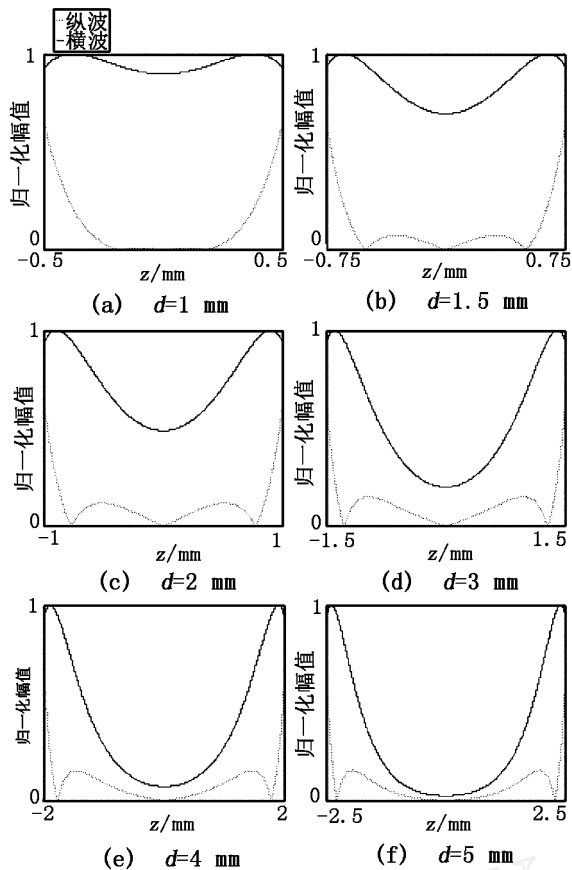


图 3 A0模式的位移分布曲线

Fig 3 Displacement distribution curves of A0 mode

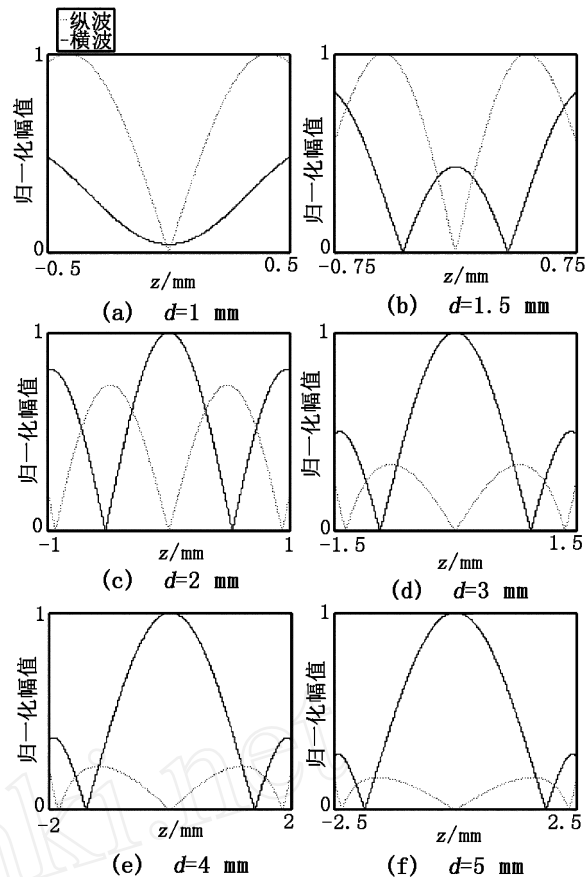


图 5 A1模式的位移分布曲线

Fig 5 Displacement distribution curves of A1 mode

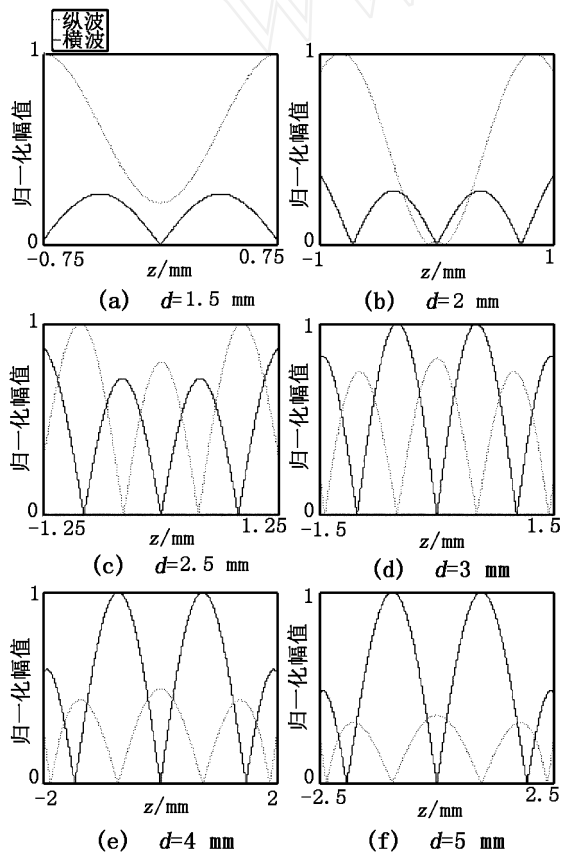


图 4 S1模式的位移分布曲线

Fig 4 Displacement distribution curves of S1 mode

### 3.3 实验数据分析

对实际的固体火箭发动机装药试件(内部胶接情况已知)进行检测,其钢壳厚 1.6 mm,包覆层厚 2 mm,选用一对称频率为 2.5 MHz的探头进行检测。根据该频厚积计算出四种模式兰姆波的相速度和声波入射角度如表 1所示。

表 1 四种模式兰姆波的相速度和入射角度

Tab 1 Phase velocities and incidence angles of four modes

| 兰姆波模式 | 相速度 / $m \cdot s^{-1}$ | 入射角度 / ( $^{\circ}$ ) |
|-------|------------------------|-----------------------|
| S0    | 3070.0                 | 29.2                  |
| A0    | 2901.7                 | 31.1                  |
| S1    | 5748.4                 | 15.1                  |
| A1    | 5076.1                 | 17.2                  |

根据表 1调整合适的探头角度,在发动机钢壳中分别激发出相应模式的兰姆波,在每种模式下,随机在不同的粘合部位采集 100个回波信号,采样频率为 15 MHz。图 6所示是典型的时域信号,图中的第一、第二回波分别反映了钢壳/包覆层、包覆层/推进剂之间的胶接情况。可以看出,在 S0或 A0模式下,信号

幅值较大。根据 3.2 节的分析可知,正是因为在这两种模式下,板表面的横波能量大,因此声波能量“泄漏”得更多,从而能够接收到更强的界面回波信号。

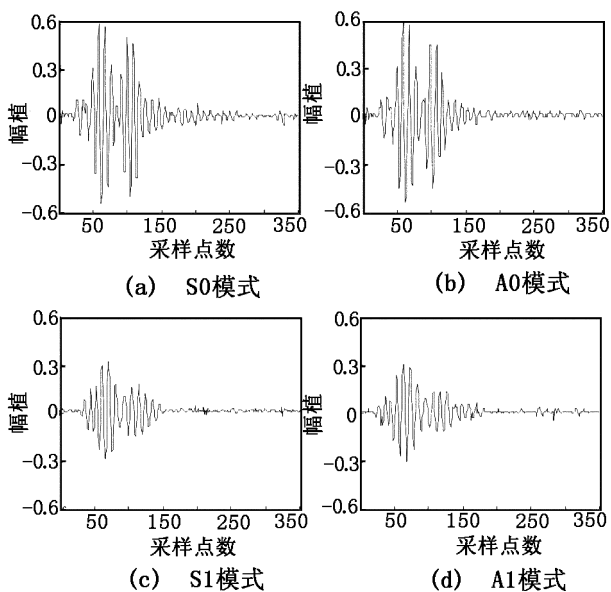


图 6 四种模式下采集的典型时域信号

Fig 6 Typical testing signals obtained under four modes

以第二回波的峰值作为特征值,将每种模式下采集的 100 个信号中的该特征值记录下来,并做出曲线,如图 7 所示。

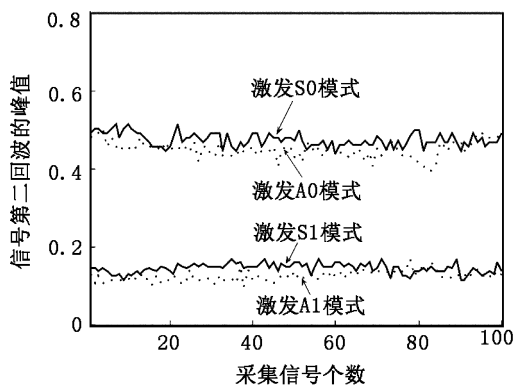


图 7 将第二回波峰值作为特征值做出的曲线

Fig 7 Characteristic curves obtained from second echo peak value

由图 7 可以看到,在激发 S0 或 A0 模式时,来自第二界面的回波能量明显大于激发 S1 或 A1 模式时的回波能量,这再次验证了 3.2 节中理论分析的正确性:根据兰姆波的横波及纵波能量分布可以准确预测

声波的透射能力,并根据实际需要来选择合适的检测模式<sup>[5]</sup>。由于钢壳与包覆层材料的声阻抗相差较大,加之橡胶的高声衰减,因此采用 S0 或 A0 模式对于提高检测信号的能量是非常有利的,它能提供更多、更准确的深层界面胶接信息,并减小后续信号处理的难度。事实上,由于 S0 和 A0 模式兰姆波的相速度比较接近,因此这两种模式常常在板中会同时被激发<sup>[6]</sup>。

#### 4 结论

研究表明,在对固体火箭发动机的界面胶接质量进行检测时,通过分析兰姆波在金属外壳中的能量分布情况,能正确预测不同模式的声波穿透能力,并以此为依据选择 S0 和 A0 模式兰姆波进行检测,较好地解决了深层回波信号微弱的问题,为胶接质量分析提供更有效的信息。对于本文研究的检测对象,由于兰姆波只存在于其金属外壳中(包覆层中只能传播纵波),因此文中仅讨论了兰姆波在单层各项同性金属介质中的能量分布情况,即对于金属-橡胶胶接结构类的材料该方法均可适用,而对于各项异性层压板结构的材料或粗晶材料的讨论尚未涉及。

文中的分析思路和方法同样可以用于层压板复合材料的检测研究,通过分析兰姆波在多层板中的能量分布(其计算公式与单层板有所不同),可以根据检测不同界面缺陷的要求来选择合适的检测模式。因此本文工作对于其他结构复合材料的质量检测也具有实际的指导意义。

#### 参考文献

- 1 Krauss G G Inspection of bonded composites using selectively excited ultrasonic modes Doctor Dissertation, Boston University, 1999
- 2 王召巴,杨风暴,陈军. 火箭发动机装药包覆质量诊断的超声新技术. 测试技术学报, 2001; 15(3): 149 ~ 153
- 3 王召巴,路宏年. 固体火箭发动机包覆层厚度超声测量新技术. 兵工学报, 1999; 20(1): 87 ~ 89
- 4 Viktorov IA. Rayleigh and Lamb waves Plenum Press, New York, 1967
- 5 Ghosh T, Kundu T, Kapur P. Efficient use of lamb modes for detecting defects in large plates Ultrasonics, 1998; 36: 791 ~ 801
- 6 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波. 无损检测, 1999; 21(9): 409 ~ 413

(编辑 任涛)