

# 激光超声方法研究固-固界面波传播特性\*

韩庆邦<sup>1,2)</sup> 钱梦<sup>2)</sup> 朱昌平<sup>1)</sup>

1) 河海大学计算机与信息工程学院常州校区, 常州 213022)

2) 同济大学声学研究所, 上海 200092)

(2006 年 4 月 27 日收到, 2006 年 6 月 19 日收到修改稿)

对界面波的传播特性进行了理论及实验研究. 首先探讨了界面波的求根问题, 基于黎曼面分析, 给出了求解界面波特征方程所有根的一般方法. 理论上对三种常见的界面波——Stoneley 波, Leaky Rayleigh 及 Leaky Interface 波传播机理进行了分析, 描述了三种界面波的波矢及位移势在两种介质中的状态. 最后基于光弹效应原理, 利用全光学的激光超声手段对界面波进行了实验测量, 实测结果与理论符合很好.

关键词: 界面波, 激光超声, 光弹效应

PACC: 4320, 4390, 9420B

## 1. 引言

界面波是指能沿介质间界面传播的波, 其能量主要集中在离界面一个波长之内的波. 理论上而言, 这种界面波应该带有较多的界面特性信息, 比较适合粘接界面粘接特性的检测. 但这种波的激发和检测都比较困难.

Stoneley 波是一种典型的界面波, 它沿垂直两种介质界面方向指数衰减, 能量主要集中在界面一个波长范围内, 是一种非均匀波. 但 Stoneley 波只能存在于很少一部分材料组合的界面上, 尽管“滑移”界面使界面波存在的范围扩大, 但存在范围仍然有限, 只有当一种介质变为液体时, 这种液-固界面上的界面波才始终存在, 也常称为 Schottle 波<sup>[1-5]</sup>. 如果固-固界面不能达到所谓的完全“焊接”连接, 则界面波还有可能出现频散或衰减现象<sup>[6,7]</sup>.

对于界面波的激发与检测, 目前常用的方法是利用表面波转换方法<sup>[8]</sup>. 即首先激发 Rayleigh 波, 再将其一部分转化为界面波, 然后再将界面波转化为 Rayleigh 波用于检测. 但是这种方法的效率很低. 激光超声方法是一种无损检测新技术<sup>[9,10]</sup>. 激光超声的全光学手段的激发与检测具有非接触、宽带、高灵敏度、理想的高重复率  $\delta(t)$  源以及同时激发多种模式的波等优点, 特别是当一种材料为透明介质时, 利

用光弹效应原理就可以直接激发或检测界面波<sup>[11,12]</sup>. 这样就使激光超声技术在激发与检测界面波方面较传统的压电换能器技术更具有优越性.

目前对界面波的研究并不多, 既有理论上复杂的问题, 更有实验难以检测问题. 本文将理论上探讨界面波频率方程的求根问题, 研究几种常见界面波的传播特性, 并基于光弹效应原理, 利用激光超声全光学手段对界面波进行检测.

## 2. 界面波频率方程

选取坐标系如图 1. 其中  $z = 0$  表示两个半无限介质的界面, 界面波沿  $+x$  方向传播.



图 1 两半无限介质及相应的坐标系

则关于两介质中位移势函数的解可表示为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= A_1 e^{-\alpha_1 z} e^{i(kx - \omega t)}, \psi_1 = B_1 e^{-\beta_1 z} e^{i(kx - \omega t)}, \\ \phi_2 &= A_2 e^{\alpha_2 z} e^{i(kx - \omega t)}, \psi_2 = B_2 e^{\beta_2 z} e^{i(kx - \omega t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

\* 国家自然科学基金(批准号: 10234060, 10374070 和 10574038)资助的课题.

$k = \frac{\omega}{c}$ ,  $\omega$  为角频率;  $\alpha_1 = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega^2}{c_{11}^2}}$ ,  $\beta_1 = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega^2}{c_{12}^2}}$ ,  $\alpha_2 = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega^2}{c_{12}^2}}$ ,  $\beta_2 = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega^2}{c_{12}^2}}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$  分别为介质 1, 2 的纵波及横波波速(下标分别代表 1, 2 两种介质对应的参量, 下同),  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  为待定系数.

介质中的位移及应力用位移势函数表示

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

$$\det \begin{vmatrix} k & \beta_1 & -k & \beta_2 \\ \alpha_1 & k & \alpha_2 & -k \\ 2\alpha_1 \mu_1 k & \mu_1(\beta_1^2 + k^2) & 2\mu_2 \alpha_2 k & -\mu_2(\beta_2^2 + k^2) \\ (\beta_1^2 + k^2)\mu_1 & 2\beta_1 k \mu_1 & -\mu_2(\beta_2^2 + k^2) & 2\mu_2 \beta_2 k \end{vmatrix} = 0. \quad (3a)$$

当为“滑移 (slip) 连接时,  $z = 0$  处法向位移应力连续, 切向应力为 0, 得特征方程为

$$\det \begin{vmatrix} 2\alpha_1 k & \beta_1^2 + k^2 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & k & \alpha_2 & -k \\ 0 & 0 & 2\alpha_2 k & -(\beta_2^2 + k^2) \\ (\beta_1^2 + k^2)\mu_1 & 2\beta_1 k \mu_1 & -\mu_2(\beta_2^2 + k^2) & 2\mu_2 \beta_2 k \end{vmatrix} = 0. \quad (3b)$$

将以上两方程展开并有理化后将得到一个关于  $(c^2)^6$  的方程, 即有关于  $c^2$  的 16 个根, Stoneley 波(如果存在的话)对应其中一个实根. 关于该方程的求根是一个复杂的问题, 一是多根问题, 二是复根问题. 关于这方面的研究只在很早的一些文献中见到<sup>[13, 5]</sup>, 近期的有关界面波的研究(流-固界面居多)很少提及关于该方程各个根的求解方法. 因此, 以下首先对此问题进行一些探讨.

### 3. 界面波频率方程的求根

由 (3) 式可以看出, 方程中  $\alpha, \beta$  为平方根项, 当  $c < \min(c_{12}, c_{21})$  时, 根号内为正实数, 这时方程的根在实数范围内, 这个实根只能在很少一些材料组合中得到, 对应的就是 Stoneley 波. 但当  $c$  大于  $c_{11}, c_{21}, c_{12}, c_{22}$  中任何一项时, 方程中根号内就有可能为负数, 相应地出现复根. 由于复数开方时, 其复角主值范围的值域区间为

$$-\frac{\pi}{2} \leq \arg[\alpha, \beta] \leq \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

即开方后复数的实部为正, 复根处于复平面的 1, 4 象限. 考虑到 2, 3 象限的复根, 则关于  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  及

$$\begin{aligned} \tau_{zx} &= \mu \left( 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right), \\ \tau_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \\ &\quad - 2\mu \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\lambda, \mu$  为材料的 Lamé 常数.

当两种介质为“焊接 (welded) 连接时, 由  $z = 0$  处法向及切向位移、应力连续条件可得界面波的特征方程为

$\beta_2$  的黎曼 (Riemann) 面就有 16 个, 理论上讲就会有 16 个根. 但实际的根没有这么多, 这是因为这 16 个根中有许多是重根(由于 Riemann 面的对称性), 也有一些根不符合物理规律(如沿传播方向波的能量不能增加).

表 1 给出了界面波关于  $\alpha, \beta$  的 8 个 Riemann 面, 表中“+”, “-”表示  $\alpha, \beta$  根号前所取的符号. 考虑到 (3) 式的对称性, 关于  $\alpha, \beta$  的 16 个 Riemann 面中只有 8 个是独立的, 另外 8 个与之对称, 如(++++)与(----)Riemann 面的根一致, (+---)与(-+++ )Riemann 面的根一致等.

表 1 界面波关于  $\alpha, \beta$  的 8 个 Riemann 面

类别 \ 名称	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
A	+	+	+	+
B	-	+	+	+
C	+	-	+	+
D	+	+	-	+
E	+	+	+	-
F	-	-	+	+
G	+	-	-	+
H	+	-	+	-

表 2 几种材料的参数

参 数 材 料	$c_T$ (横波波速) (m/s)	$c_L$ (纵波波速) (m/s)	$c_R$ (Rayleigh波 波速)(m/s)	$\rho$ 密度 (kg/m <sup>3</sup> )
硬铝	3130	6320	2921	2700
4340# 钢	3200	5830	2961	7800
石英玻璃	3750	5980	3402	2200
环氧	1300	2700	1215	1400
有机玻璃	1280	2620	1214	1140
钨	2890	5200	2671	19300

用表 2 提供的参数,对铝-石英玻璃、铝-环氧组合“焊接”及“滑移”连接情况下界面波的根进行求解,结果如表 3。A. 经计算可以发现:

1) Stoneley 波是否存在的条件与两种材料的密度比、横波波速比有关。在表 2 所列材料中,以下一些材料组合理论上会出现 Stoneley 波。对于石英玻璃-钢的焊接和滑移界面都存在 Stoneley 波,波速分别为 3284.5 m/s(焊接)及 3112.4 m/s(滑移);石英玻璃-铝组合,只有滑移界面存在 Stoneley 波,波速 3060.2 m/s,而石英玻璃-钨的焊接和滑移界面上也都存在 Stoneley 波,波速分别为 2823.3 m/s 和 2719.5 m/s。

2) 由以上计算可以看出,Stoneley 波速对应(++++)Riemann 上唯一的一个实根,波速  $c < \min(c_{T2}, c_{T1})$ ,且是在两材料的最低横波波速与高密度材料的 Rayleigh 波速之间<sup>[5]</sup>。“滑移”界面 Stoneley 波出现的机会比“焊接”界面大(如石英玻璃-铝组合,焊接连接是不存在 Stoneley,但滑移连接时存在)。

3) 8 个 Riemann 面上的根分布很复杂,每个 Riemann 面上出现几个根也没有必然的规律。上述计算结果只是特定参数情况下的一些结论,其他材料的组合应具体问题具体分析。虽然如此,我们可以通过这种方法求出所有可能存在的界面波根,然后由实验来验证哪些波能存在。

表 3 铝-环氧界面波的根

Riemann 面	铝-环氧(焊接)(m/s)	铝-环氧(滑移)(m/s)
A	No Stoneley 波	No Stoneley 波
B	4148.4 - 303.1i	2910.6 - 283.8i
C	2621.8 - 153.4i	2661.6 - 29.5i
D	5957.5 - 1316.2i	6440.7 - 943.9i
E	6151.4 - 473.5i	5620.8 - 702.9i
F	2966.6 - 265.4i	3012.8 - 210.8i
G	3155.7 - 338.4i	2729.2 - 502.5
H	3898.1 - 1176.5i	5616.5 - 747.7i

表 4 铝-石英玻璃界面波的根

Riemann 面	铝-石英玻璃(焊接)(m/s)	铝-石英玻璃(滑移)(m/s)
A	No Stoneley 波	3060.3(Stoneley 波)
B	5751.3 - 79.39i	6001.3 - 2.43i
C	6338.9 - 5.29e - 006i	5222.5 - 593.04i
D	No roots	6537.8 + 2.47e - 006i
E	4015.4 - 295.27i	4564.1 - 360.88i
F	2252.5 - 2.59i	4762.9 - 310.88i
G	3764.3 - 3367i	5990.9 - 3.95i
H	No roots	4762.9 - 310.89i

### 4. 几种界面波传播特性分析

虽然理论上界面波模式很多,但实际所能激发或探测到的却很少。就目前而言,人们从实验中探测到过 3 个类型的界面波,即 Stoneley 波,Leaky Interface 波及 Leaky Rayleigh 波<sup>[14]</sup>。这里将从理论上对这三种模式的传播特性进行分析。

界面波复根的虚部含义为衰减,对应为“漏波”。假定介质 1 的横波波速  $c_{T1}$  及纵波波速  $c_{L1}$  均小于介质 2 横波波速  $c_{T2}$ (当然也小于介质 2 的纵波波速),第一个“漏波”是在  $c > c_{T1}$  时出现,第二个在  $c > c_{L1}$  时产生。Pilat<sup>[5]</sup>在数值研究这两种模式的波时发现,当介质 1 的切变模量趋于(流-固界面)时,波速较小的一个逐渐过渡到 Scholte 波,而另一个在趋近于介质 2 的 Rayleigh 波速,他把这两种波分别称为“界面波”(Interface wave)和“表面波”(Rayleigh wave),但实际上是两种“漏波”。为了与实际的界面波和表面波区分,这里我们称之为“漏界面波”(Leaky Interface wave)及“漏表面波”(Leaky Rayleigh wave)。

为便于讨论,取位移势如下形式:

$$\begin{aligned} \phi &= A \exp(k_{Lx}x + k_{Lz}z - \omega t), \\ \psi &= B \exp(k_{Tx}x + k_{Tz}z - \omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $k_{Lx}$ ,  $k_{Lz}$  及  $k_{Tx}$ ,  $k_{Tz}$  分别表示纵波及横波波矢在  $x, z$  方向上的分量,取  $\alpha = \pm ik_{Lz}$ ,  $\beta = \pm ik_{Tz}$ ,即可得到(1)式的表述。取波矢的复数形式为

$$k = k' + ik'', \quad (6)$$

其中,实部  $k'$  表示实际传播波矢,虚部  $k''$  表示衰减,因而在  $z, x$  方向上有

$$\begin{aligned} k_{Tz} &= k'_{Tz} + ik''_{Tz}, \quad k_{Lz} = k'_{Lz} + ik''_{Lz}, \\ k_{Tx} &= k'_{Tx} + ik''_{Tx}, \quad k_{Lx} = k'_{Lx} + ik''_{Lx}. \end{aligned}$$

### 4.1. Stoneley 波

对应的 Riemann 面为表 1 中的状况 A ,图 2 为 Stoneley 的传播状态示意图 ,图 2(a)描述了 Stoneley 波波矢在两种介质中的波矢状态 (b)为两种介质中位移势随离开界面距离的变化趋势 .

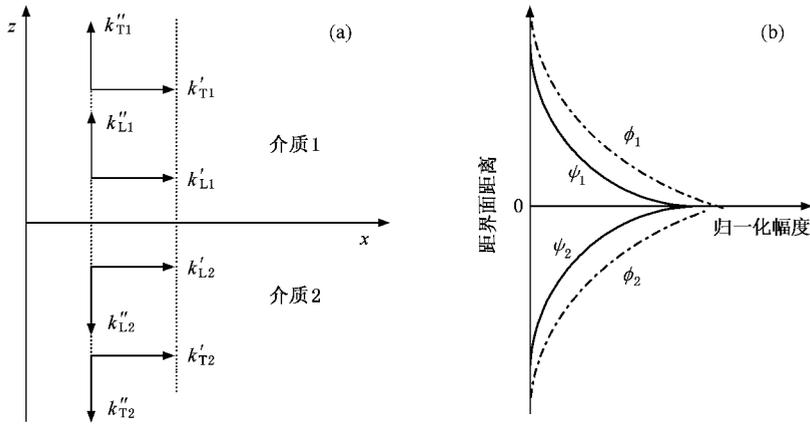


图 2 Stoneley 波传播状态示意图 (a)波矢 (b)位移势

### 4.2. Leaky Rayleigh 波

对应的 Riemann 面为表 1 中的状况 F ,这时  $\alpha_1$  ,

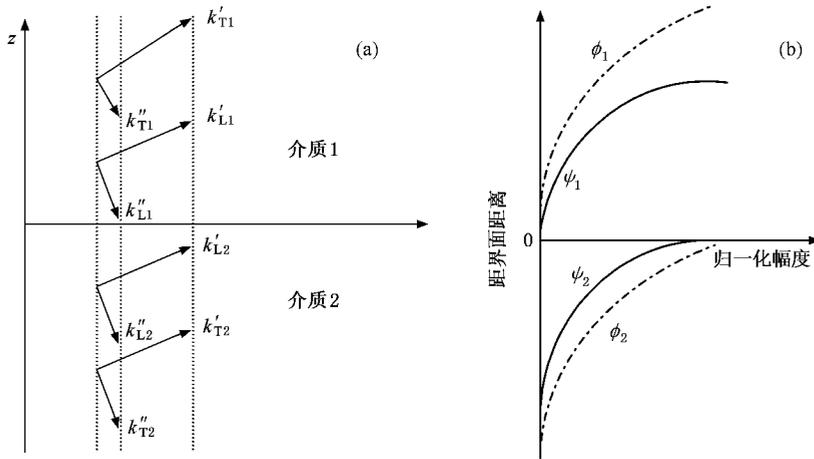


图 3 Leaky Rayleigh 波传播状态示意图 (a)波矢 (b)位移势

由上述分析可知 ,在介质 1 中的漏波 ,是一种在介质内部传播的一种非均匀波 ,这种波是由于介质 2 的 Rayleigh 波沿 x 方向传播时不断向介质 1 泄漏能量的结果(假定源在左侧) ,泄漏角由介质 2 的 Rayleigh 波速及介质 1 的体波波速决定 .由于各向同性弹性介质的非均匀波传播等相位面总是和衰减的等幅面垂直<sup>[15]</sup> ,可以判断出介质 1 横波及纵波波矢传播方向斜向上 ,表示上层介质中有能量从界面流

可以看出 Stoneley 波沿平行于界面方向(x 方向)传播 ,沿传播方向没有衰减 ;波沿垂直于界面方向(z 方向)指数衰减 .Stoneley 波沿两种介质界面传播 ,能量主要集中在距离界面一个波长之内 ; Stoneley 波的位移势也随离开界面的距离增大而指数减小 .

$\beta_1$  前均取负号 ,此时媒质 1 中的纵波及横波位移势沿 +z 方向增强 ,Leaky Rayleigh 波波矢方向及位移势变化趋势如图 3 .

入 ,而下层介质中应有流向界面的能量 ,Leaky Rayleigh 波的主要能量集中在介质 2 中 .

值得注意的是 ,声速低的介质 1 中检测的漏波幅度沿 +z 方向(远离界面方向)不是衰减而是增强的 ,数学上是由于 Riemann 面中的  $-\alpha_1$  ,  $-\beta_1$  前的负号引起的 .物理上表明在传播方向某点上侧的振幅比下侧的大 ,这并不违背物理事实 .这是因为在离开界面越远的那些点 ,波场决定于越靠近左面的那部

分界面辐射,而左边各点上的振幅是大于右边各点的振幅的(因为波是向右传播且衰减的)。但上述结论只是针对波传播的本征特性,如果考虑到激发源的影响,离界面越远波幅还是越来越小的。

### 4.3. Leaky Interface 波

对应的 Riemann 面为表 1 中的状况 C,这时只

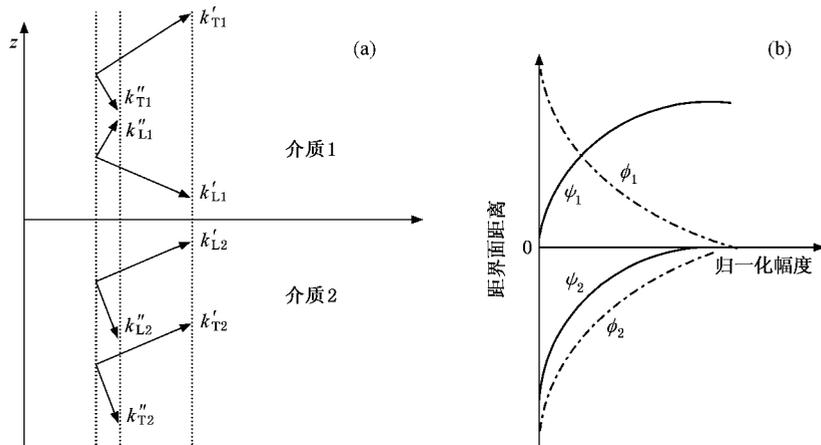


图 4 Leaky Interface 波传播状态示意图 (a)波矢 (b)位移势

有  $\beta_1$  前取负号,横波位移势沿  $+z$  方向不是衰减,而是增强的。Leaky Interface 波的波矢方向及位移势变化趋势如图 4。虽然图中也画出了介质 2 中的波状态,但实际上 Leaky Interface 波的主要能量集中于介质 1,其波速很接近于介质 1 的纵波波速。当介质 1 的横波波矢为 0 时(变为液体),该波即过渡为 Scholte 波。

## 5. 界面波的激光超声测量

我们采用全光学激光超声方法对界面波进行激发及检测。检测主要根据介质的光弹效应(压光效应或 Mirage 效应)如图 5 所示。当检测光垂直穿过透明介质时,介质中的声应力将使介质的折射率或光极化状态发生变化,从而引起光的附加相位差或能量密度改变。这样反射回来的光与入射的光将发生干涉,可以通过干涉仪检测到介质中的声信号。

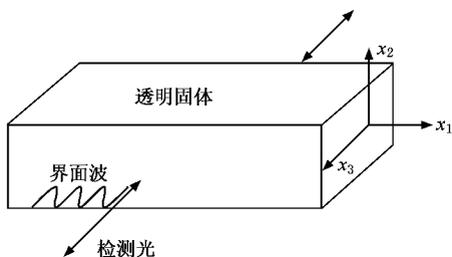


图 5 界面波与检测光相互作用示意图

### 5.1. 测量装置及过程

流-固界面波的实验原理及装置见图 6。脉冲激光光源 (Quantel, Brilliant Q-switch Nd:YAG laser, 300

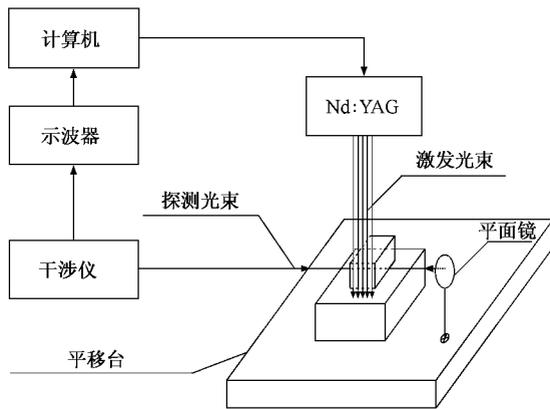


图 6 固-固界面波激光超声原理图

mJ) 发射出的激光脉冲(532 nm 4 ns)经柱透镜聚焦成线源后照射在金属表面上激发出表面波,表面波在两种介质的结合处发生转化,其中一部分转化为固-固界面波。干涉仪(TEMPO-FS200, 532 nm)发出的探测光平行于固-固界面穿过透明固体,光束离固-固界面的距离  $\leq 1$  mm。在透明介质背后放置一平面镜以便检测光束反射回干涉仪。实验中激发源及试样的移动通过计算机控制的平移台(Newport, M-ILSS100cc, min step 0.5  $\mu$ m)来实现。从干涉仪输出的信号由数字示波器(Tektronix, TDS3032 two channel

color digital phosphor oscilloscope)采集,并存入计算机.为了提高信噪比,实验时每个采样点信号平均64次,平移台沿一个方向连续移动,移动的步长为0.5 mm或1 mm.

### 5.2 测量结果及讨论

实验中选取的材料及其参数见表2(声速由脉冲回波法进行了测量,最大标准误差小于20 m/s).

首先检测的是石英玻璃-钢界面波,理论上在这两种介质界面的“焊接连接”或“滑移连接”时都存在Stoneley波.实验中,“滑移连接”是用一层水(膜)置于两介质之间来实现;“焊接连接”由环氧粘接来实现,水膜及环氧膜的厚度远远小于声波波长,可忽略

膜厚度的影响.

图7(a)是实验中得到的石英玻璃-钢“滑移连接”界面波信号,图7(b)为不同源-接收点信号的幅度偏移组合图,两个采样点之间的间距1 mm.

从图中可以清晰地发现一个幅度很大的波形信号,理论上Stoneley波速为3024 m/s,对实验数据线性拟合得到速度为 $(3019 \pm 9)$  m/s,借助于小波分析还可发现这个波是非频散的,因而可以断定这是Stoneley波.实验得到的两个支点波(Lateral波)速为别为 $(5992 \pm 20)$  m/s ( $3756 \pm 8$ ) m/s,根据数值可以判定是石英玻璃纵波和横波波速对应的支点波.

实测的石英玻璃-铝滑移界面上Stoneley波速为 $(3041 \pm 18)$  m/s,见图8,理论值为3053 m/s,两者也较符合.

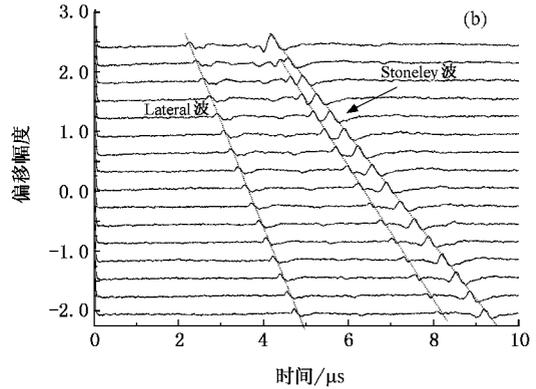
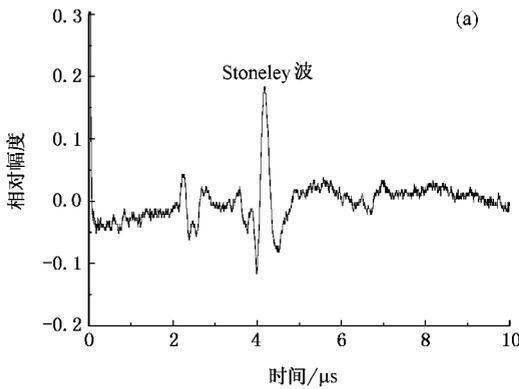


图7 石英玻璃-钢“滑”移界面波实验波形 (a)典型信号 (b)不同源-接收点信号的幅度偏移组合图

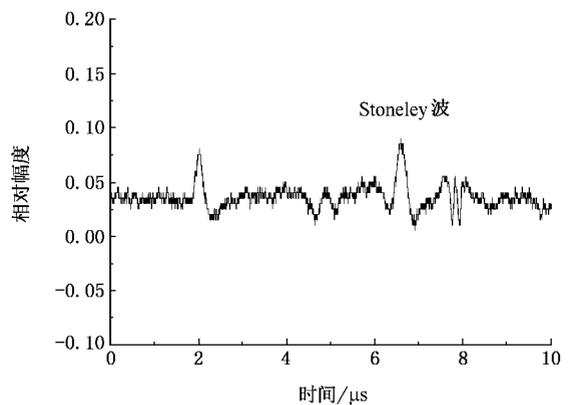
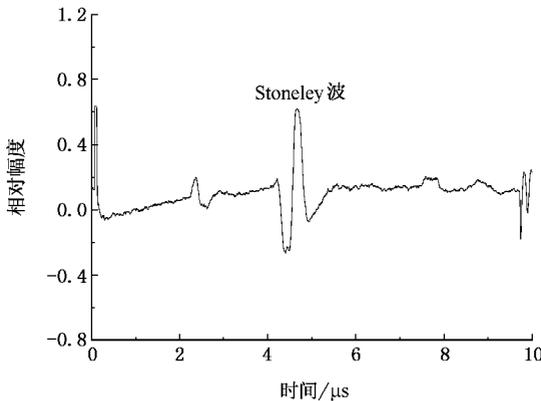


图8 石英玻璃-铝“滑移”界面波实验波形

图9 石英玻璃-钢“焊接”界面波实验波形

对石英玻璃-钢“焊接连接”也进行了测量.界面由环氧粘接并固化24 h后形成,实测波形见图9.虽然信号的幅度及信噪比不如滑移连接界面,但Stoneley波形仍清晰可见,而且实测波速 $(3236 \pm 10)$  m/s,与理论计算的波速3229 m/s符合也很好.

对有机玻璃-铝滑移界面进行测量,得到如图

10(a)所示的信号.图10(b)显示的是不同的激发源—接收距离上的信号组合图.图中一个清晰的、幅度很大的波形就是Leaky Rayleigh波,实测波速是 $(2986 \pm 8)$  m/s,与理论上Leaky Rayleigh波波速 $(2973 - 169i)$  m/s(实速度大小2983 m/s)非常接近.

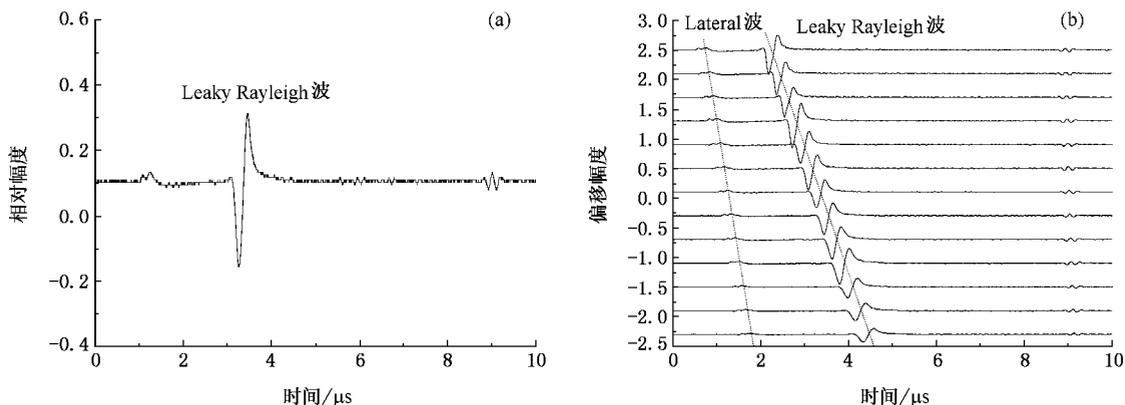


图 10 有机玻璃-铝“滑移”界面波实验波形 (a)典型波形 (b)不同源-接收点距离上的波形

## 6. 结 论

本文较系统地研究了两种介质间界面波的传播特性. 探讨了一般界面波频率方程的求根问题, 考虑到复变函数的 Riemann 面问题, 关于界面波所有根都可数值求解. 通过分析 Stoneley 波, Leaky Interface 波及 Leaky Rayleigh 波在两种介质界面附近波矢及位移势变化情况, 说明了这些波传播状态的差异. Stoneley 波沿传播方向不衰减, 沿界面法向指数衰

减. 当界面波传播速度  $c$  处于  $c_{T1} < c < c_{L1} < c_{T2} < c_{L2}$  范围时, 为 Leaky Interface 波, 它沿界面传播方向衰减, 能量主要集中于介质 1. 当界面波的传播速度  $c$  处于  $c_{T1} < c_{L1} < c < c_{T2} < c_{L2}$  范围, 它为 Leaky Rayleigh 波, 也沿界面传播方向衰减. 能量主要集中在介质 2 中, 且有能量不断向介质 1 泄漏. 基于压光效应, 利用激光超声技术对界面波进行了测量, 实测的几种材料组合的 Stoneley 波、Leaky Rayleigh 波波速与理论符合很好.

- [ 1 ] Luppé F, Doucet J 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **84** 1276  
 [ 2 ] Nasrs D J, Ledue M J 1990 *Acoust. Soc. Am.* **87** 509  
 [ 3 ] Desmet C, Gusev V, Laurisks W *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2941  
 [ 4 ] Gusev V, Desmet C, Laurisks W *et al* 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **100** 1514  
 [ 5 ] Pilant W L 1972 *Bull. Seismol. Soc. Am.* **62** 285  
 [ 6 ] Richard O C 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 8066  
 [ 7 ] Pyrak-Nolte L J, Mullenbach B L 1996 *J. Appl. Geophys* **35** 79  
 [ 8 ] Liviu Shinger Y SI, Emanuel S 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 2497  
 [ 9 ] Scruby C B, Drain L E 1990 *Laser ultrasonics techniques and*

*applications*( New York : Adam Hilger )

- [ 10 ] Gao W M, Glorieux C, Laurisks W *et al* 2002 *Chin. Phys. Soc.* **11** 132  
 [ 11 ] Jia X, Mattei C, Quentin G 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 5528  
 [ 12 ] Han Q B, Wang H, Qian M L 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 3105  
 [ 13 ] Ginzburg A S, Strick E 1958 *Bull. Seism. Soc. Am.* **48** 51  
 [ 14 ] Mattei Ch Jia X, Quentin G 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 1532  
 [ 15 ] He D J 1988 *Theory of seismic* ( Beijing : Seismic in Chinese ) [ 何登地震波理论 ]

# Study on solid-solid interface waves with laser ultrasonics<sup>\*</sup>

Han Qing-Bang<sup>1,2)</sup> Qian Meng-Lu<sup>2)</sup> Zhu Chang-Ping<sup>1)</sup>

1) *Department of Computer and Information Engineering, Hehai University, Changzhou 213022, China*

2) *Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China*

(Received 27 April 2006; revised manuscript received 19 June 2006)

## Abstract

The propagation characteristics of interface waves are studied theoretically and experimentally. The problem of solving for roots of characterization equation of interface waves are discussed. It is shown that all roots can be found by means of Riemann sheet analysis. The propagation mechanism of Stoneley wave, Leaky Rayleigh and Leaky interface waves are explored, the wave vector and displacement behaviors of these waves are illustrated to show their differences. At last, the interface waves are measured with laser ultrasonic technique based on photo-elastic effect, and the experimental results are in good agreement with theoretical predictions.

**Keywords:** interface wave, laser ultrasonics, photo-elastic effect

**PACC:** 4320, 4390, 9420B

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10234060, 10374070 and 10574038).