

# 铝合金粘接件界面层超声检测的进展

王 耀 俊

(南京大学声学研究所)

1990年11月27日收到



本文简述了检测铝合金粘接件界面层质量的超声反射法中有关理论和实验技术。介绍了粘接件中多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层有效弹性常数的确定方法和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层之间界面的粘弹体模型。对五层媒质组成的粘接件声反射系数的理论值和实验值进行了比较。指出了粘接件界面层超声检测中一些尚待解决的问题。

## 一、引言

铝合金粘接件因其强度高和重量轻等优点,在工业(特别是飞机制造业)中被看作为具有巨大应用潜力的复合材料。在这种材料的实际应用中,关键问题之一是对其粘接界面层的质量评价。

为增加粘接强度,铝合金在粘接之前需对其表面进行阳极化处理以产生多孔的三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),继而敷以有机物涂层以增加与粘接层的粘合力。粘接件的机械强度依赖于:1. 粘接层本身的机械性能(决定于粘接层的硬化程度,含微型汽泡的体积浓度等);2. 粘接层与铝合金之间交界层特性(即  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的力学性能,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层的界面状况等)。目前,检测铝合金的粘接层本身的结构强度的声学技术发展得较为完善<sup>[1-3]</sup>,但对交界层特性的检测的分析较复杂,相对来说进展较缓慢,为此国外对此类粘接件交界层的检测颇为重视<sup>[4-5]</sup>。

超声评价粘接件质量时主要应用超声反射技术。斜入射到界面的声波在界面处产生切向应力,对界面特性的变化较灵敏,测量设备又较为简单。本文将对铝合金粘接件检测所用的超声反射技术的新近进展作一简单介绍。

## 二、粘接件超声反射的理论模型

铝合金粘接件的典型结构如图1所示,它可看作一种平面层状媒质,各层厚度已在图上标明。与中间各层厚度相比,铝合金厚度较大,使用超声脉冲法检测时可视为半无限固体媒质。在粘接件使用过程中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  以及它与有机涂层之间界面的力学特性容易变化。例如,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  因水化或溶解作用而使其强度逐渐变弱,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和有机层之间因受湿导致开裂<sup>[6]</sup>(物理上形成滑移界面)。用超声反射技术评价铝合金粘接件质量时,必须了解各层材料及界面特性对声反射的影响。

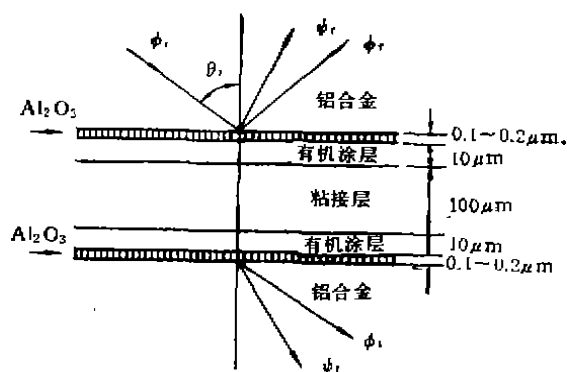


图1 铝合金粘接件典型结构示意图

利用矩阵方法,可找出多层固体媒质声反射系数与各层力学特性及界面状况的关系<sup>[7-9]</sup>。如图1所示,设位移势为 $\phi_i$ 的纵波从最上层的铝合金媒质斜入射到界面层(入射角为 $\theta_i$ ),反射纵波和横波(位移势分别为 $\phi_r$ 和 $\phi_r$ )、透射纵波和横波(位移势分别为 $\phi_t$ 和 $\phi_t$ )将存在于上下两半无限固体中。对于各层之间界面均为刚性联接的情况,纵波反射系数可表示为<sup>[8]</sup>

$$R_{11} = \frac{D_{33}D_{21} - D_{31}D_{23}}{D_{11}D_{33} - D_{13}D_{31}} \quad (1)$$

类似地,横波入射时横波反射系数可表示为

$$R_{11} = \frac{D_{11}D_{43} - D_{13}D_{41}}{D_{11}D_{33} - D_{13}D_{31}} \quad (2)$$

其中 $D_{ij}$ 为 $4 \times 4$ 阶矩阵元。 $D$ 矩阵是联系上下半无限媒质中声场和相应界面上力学量的矩阵和各层传递矩阵的乘积,而这些矩阵分别与相应媒质的力学参量、厚度(上下半无限媒质除外)和声波频率、入射角有关。

对于包含滑移界面的多层媒质,因滑移界面处切向应力等于零而且切向位移不连续,声反射系数不能简单地用(1)和(2)式表示<sup>[9]</sup>。但当界面为非刚性联接而又不是滑移界面或滑移界面在整个界面中占一定比例时,引进法向和切向刚性系数,写出界面的传递矩阵,我们仍可以用(1)、(2)式描述声波反射系数<sup>[10-11]</sup>。

理论上估算声反射系数或者从实验测得的反射系数来确定粘接件界面特性时,需要每一层材料的弹性常数。铝合金、有机涂层和粘接层(环氧树脂)的力学特性可以从现有的资料中查到,但如何确定不同孔隙度的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的有效弹性常数和估计 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层的界面特性,必需分别给予考虑。

### 三、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层的力学特性

经阳极化处理在铝表面产生的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 是一种多孔材料,其圆柱形孔贯穿材料且垂直于界面。按其宏观结构, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄层是横向各向同性体,其对称轴与界面法线 $z$ 轴重合,具有五个

独立的弹性常数。当 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的骨架(即 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的实体)和孔中填充物(水、空气或有机涂层)的弹性常数以及孔隙度分别给定后,可由不同的理论模型来估计此多孔复合材料的弹性常数<sup>[12-13]</sup>。但计算发现,各种模型给出的计算值有一定的差别,特别是当孔隙度比较大时。这样,必须借助于实验来测定多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄层的有效弹性常数,并确定用那种理论模型估计 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的弹性模量更为合适。

实验上可根据多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄层声透射系数最大值和最小值分别对应的入射角来确定杨氏模量 $E_1$ 和切变模量 $G_{13}$ (1代表与薄层平面重合,而3代表与薄层平面垂直)。图2表示浸没在水中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 多孔薄膜(孔隙度为0.61,膜厚为 $47\mu\text{m}$ )声透射系数随声波入射角变化的实验值和理论值<sup>[14]</sup>。通过理论和实验值的最佳拟合,可以求得 $E_1 = 36.7\text{GPa}$ ,  $G_{13} = 17.4\text{GPa}$ ,这些值与应用Nielsen模型<sup>[13]</sup>估计的相应弹性模量非常接近。

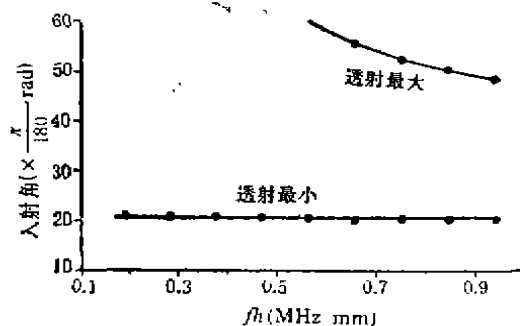


图2 水饱和的多孔媒质 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的超声透射系数随入射角变化的测量值和理论计算值, 声波频率 $f = 16\text{MHz}$ 。

目前还未找到适当的方法由透射系数或反射系数的实验值来求得其它三个独立的弹性常数。下面理论上计算声波从铝合金粘接件反射系数时所需的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 五个有效弹性常数将由Nielsen模型计算得到。

为了恰当地描述 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层之间的界面特性,我们可用一粘弹体薄层来模拟,并用下面两式来表示这种粘弹体的复数体弹性模量和切变模量<sup>[15]</sup>

$$\mu = \mu_{\infty} \left( \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (3)$$

$$K = K_0 + (K_{\infty} - K_0) \left( \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (4)$$

式中  $K_{\infty}$  和  $\mu_{\infty}$  是粘弹体为固体状态下的体弹性模量和切变模量,  $K_0$  为粘弹体处于完全液化状态下的体弹性模量,  $\omega\tau$  为无量纲参数 ( $\omega$  为声波频率,  $\tau$  是反映粘弹体内部结构的弛豫时间). 弹性模量  $K$  和  $\mu$  可以描述界面从液体 ( $\omega\tau$  很小) 到固体状态 ( $\omega\tau$  很大) 的过渡. 当  $\omega\tau$  很小时,  $\mu \rightarrow 0$ ,  $K \rightarrow K_0$ , 界面可看作为滑移界面, 界面上的切向应力等于零;  $\omega\tau$  很大时,

$K \rightarrow K_{\infty}$ ,  $\mu \rightarrow \mu_{\infty}$ , 界面可看作刚性界面, 界面两边应力和位移连续.  $K_{\infty}$ ,  $\mu_{\infty}$  和  $K_0$  可选择为有机涂层分别处于固态和液态时的弹性模量.

为正确模拟  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层之间的刚性联接界面和滑移界面, 粘弹薄层的厚度也必须适当选择, 具体讨论可在参考文献[8]中找到.

## 四、数值计算

为了研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层对铝合金粘接件超声反射系数的影响, 我们计算了不同孔隙度时  $|R_{11}|$  随声波入射角的变化 (见图 3). 计算中假

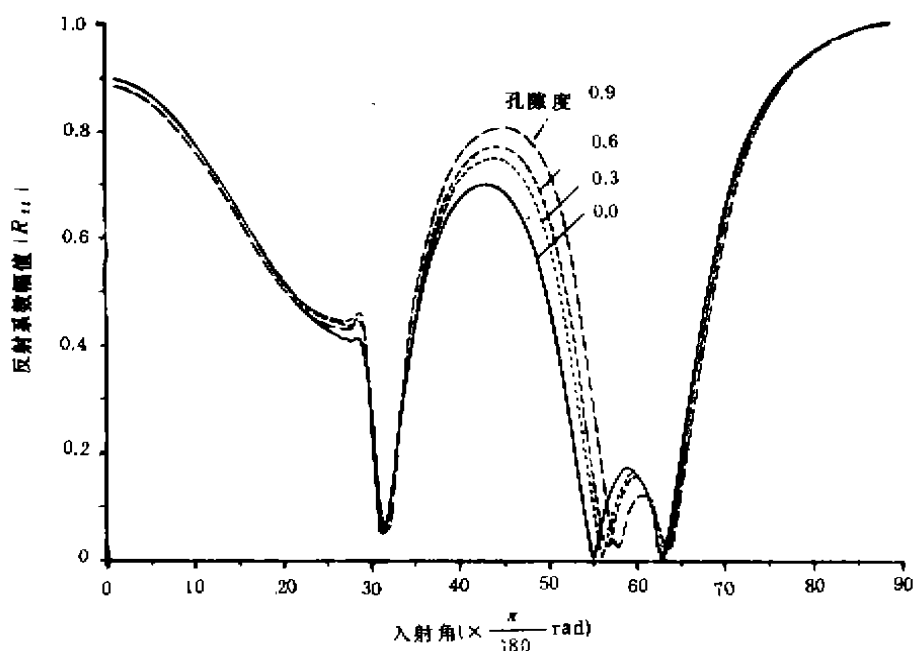


图3  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙度不同时从铝合金粘接件的声反射系数幅值  $|R_{11}|$  随声波入射角的变化. 粘接层与有机涂层总厚度为  $130\mu\text{m}$ .

定有机涂层的弹性常数与粘接层的弹性常数相同,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层厚度为  $0.3\mu\text{m}$ , 孔隙度分别为 0, 0.3, 0.6 和 0.9. 有机涂层/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  界面薄层厚度为  $0.5\mu\text{m}$ , (3) 和 (4) 式中  $\omega\tau = 100$ , 表明界面接近刚性联接. 从图中可以看出, 孔隙度的变化改变了声反射系数最大值和最小值所对应的声波入射角. 最小值对应的声波入射角改变的数

值也随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度增加而增加, 从而测定声反射系数最小值对应的人射角有可能用来预计  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层的厚度和孔隙度.

图 4 的理论计算表明:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与有机涂层之间界面特性的变化将强烈地影响声波反射系数. 计算中取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度为  $0.3\mu\text{m}$ , 孔隙度为 0.6, 粘接层与有机涂层的总厚度为  $130\mu\text{m}$ ,

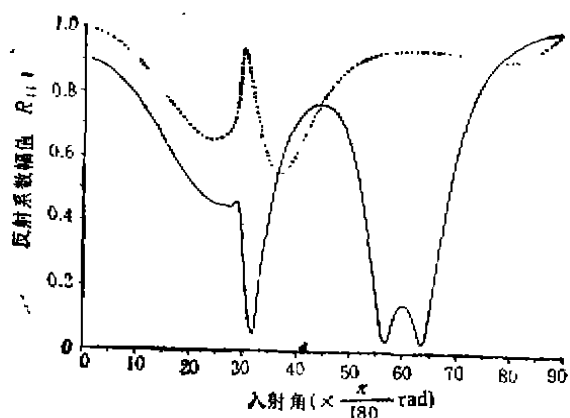


图4 从铝合金粘接件的声反射系数幅值 $|R_r|$ 随入射角的变化。其中实线表示 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层界面良好,虚线表示弱界面。

$\text{Al}_2\text{O}_3$ /有机涂层界面厚度取 $0.5\mu\text{m}$ 。图中实线对应于 $\omega\tau = 100$ ,两虚线对应于 $\omega\tau = 0.01$ (这时界面可看作为接近滑移界面或称为弱界

面)。图4为两种界面情况下 $|R_r|$ 随入射角的变化(声波频率 $f = 20\text{MHz}$ )。从图还可以看出,两种界面情况下声反射系数随入射角的变化是非常不同的。例如: $f = 20\text{MHz}$ 时,入射角在 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 左右具有两种不同界面状态的反射系数差别最大,所以,为提高对弱界面的检测灵敏度,必须适当地选择入射角的超声频率。

## 五、实验测量

用于测定粘接件声反射系数的实验系统如图5所示<sup>[3]</sup>。实验样品置于圆柱形反射器中心。实验中用一宽带换能器同时作为发射和接收声波(声波经界面层的两次反射后到达换能器)。由计算机控制的直流马达可同时控制换能器的旋转和样品的移动(转动分辨率和移动分辨率分别为 $0.01^\circ$ 和 $0.01\text{mm}$ )。于每个旋转

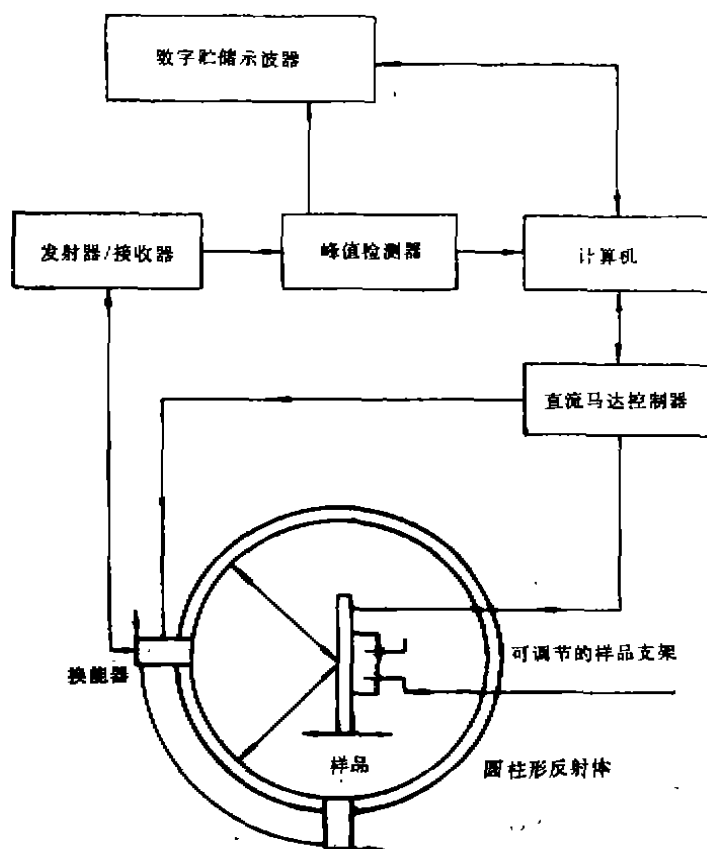


图5 实验系统的方框图

角, 反射信号被自动取样、平均和快速富氏分析, 然后馈送至计算机作图。圆柱形反射器、换能器和样品均浸没在水中, 水温由恒温器控制, 温度起伏小于  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

图 6 说明斜入射声波经铝合金粘接界面层两次反射的原理。换能器可沿圆弧移动而面对圆弧中心(也是圆柱形反射器的中心)。声波在水中沿圆弧半径传播, 在水和铝合金界面折射, 经界面层反射后又遇到铝合金与水界面。只有当样品移动适当距离后, 经界面层两次反射后的声波才能返回换能器。所以在实验中调节样品的位置非常重要。

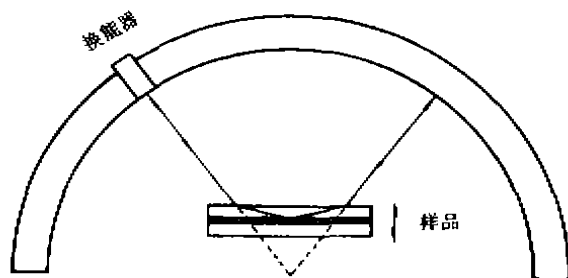


图 6 声波从界面层两次反射的原理图。

如图 1 所描述的铝合金粘接件实验样品正在制备中, 但具有五层结构的粘接件对声横波的反射的实验值和理论已有报导<sup>[7,16]</sup>。五层粘接件结构为: 被粘接件为铝合金, 厚度为 0.127 mm 的有机薄膜模拟粘接层, 铝和有机薄膜之间为环氧树脂胶(其固化过程可以控制), 其厚度约为 0.026 mm。实验的目的方面为了验证上述声从多层媒质上反射的理论模型, 另外为了探讨从声反射系数实验值推算界面层弹性参数的反演技术。当环氧树脂胶为粘性流体时(即尚未固化), 铝和有机薄膜之间界面可看作为滑移界面(弱界面); 当环氧树脂胶呈固体状态(完全固化), 界面被认为刚性联接(良好界面)。

图 7a 为上述五层结构样品中界面良好时横波反射系数  $|R_H|$  随声波频率变化的实验值

应用声学

和理论值(计算中取  $\omega\tau = 100$ )。实验中调节声波从铝合金到界面层的入射角  $\theta_i = 40^{\circ}$ 。理论值与实验值符合得非常好。从图可以看到, 反射系数频谱中有一系列谷点。改变入射角  $\theta_i$ , 可得一系列与最小反射系数  $|R_H|$  相应的频率值。这样可绘出最小反射系数所对应的入射角和频率关系图(见图 7b), 其中实线为理论计算, 圆圈为实验值。

同样, 可作出样品具有弱界面时最小反射系数  $|R_H|$  所对应的入射角和频率关系图, 如图 8 所示。理论计算中取  $\omega\tau = 0.01$ 。由图可见, 包含弱界面时的声反射系数的理论和实验值也吻合得相当好。

## 六、结 语

本文简单综述了超声反射技术检测固体粘接件界面层的一些理论和实验结果, 并对理论和实验值作了比较。但笔者感到, 目前已报道的工作尚属初步, 一些问题需要深入研究。例如, 本文介绍的实验中所使用的试样是一种五层结构, 并没有包含多孔的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层。测定多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的两个弹性常数  $E_1$  和  $G_{13}$  所使用的样品是分离的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 较之粘接层中真实的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度大一个数量级。各向异性薄层晶体的弹性常数的测定目前仍是一个难点。另外, 本文介绍的内容仅涉及“正向”问题, 即知道界面层的特性后估计声反射系数, 并和实验结果相比较; 但从实际应用来讲, 更重要的是“逆向”问题, 即从所测定的声反射系数和界面层的某些已知特性来反演其未知参数, 如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和有机涂层之间界面层的弹性常数和厚度。目前这方面的工作正在进行, 并已得到一些初步的结果<sup>[17]</sup>。

## 致 谢

笔者感谢美国 Ohio 州立大学焊接工程系 Rokhlin 教授所提供的某些参考资料。

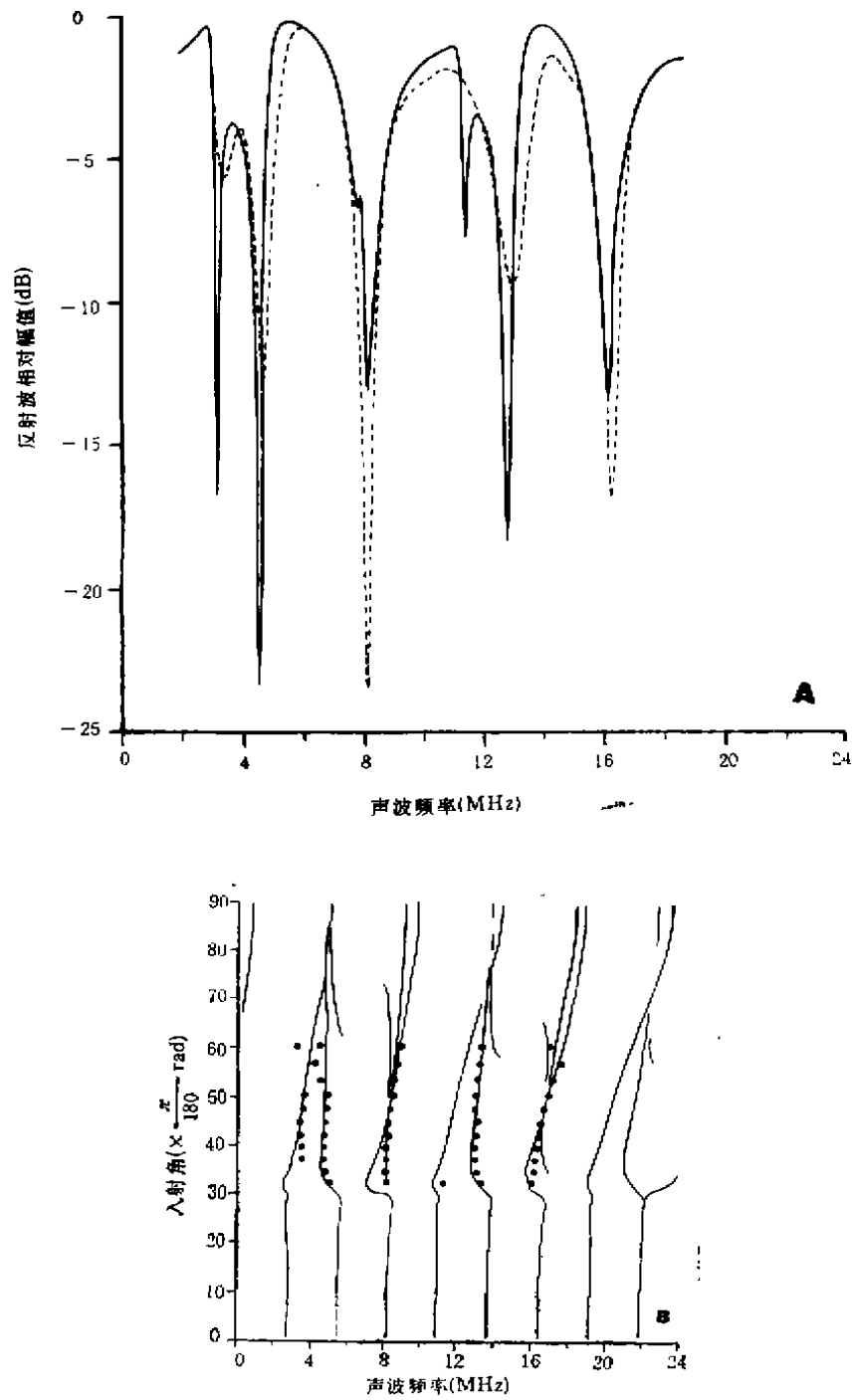


图7 (a) 界面良好时反射系数幅值 $|R_r|$ 随声波频率变化的实验值(虚线)和理论值(实线); (b) 界面良好时反射系数最小值对应的人射角和频率的关系。

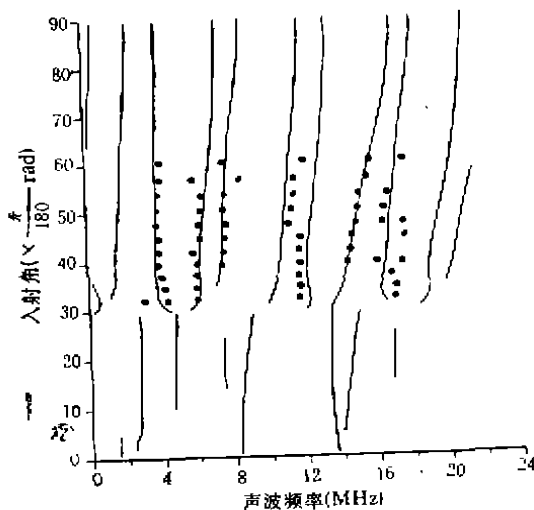
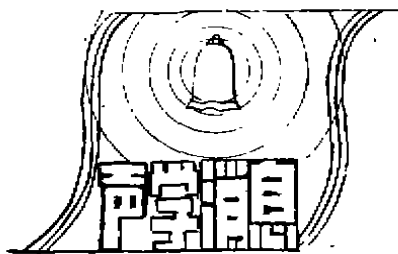


图8 弱界面时反射系数幅值  $|R_{11}|$  最小值对应的人射角和声波频率的关系(实线为理论值,圆圈为实验值)

### 参 考 文 献

- [1] Rokhlin S. I., Proc. Int. Symposium on Adhesive Joints, New York, 1982, 307—345.
- [2] Pickett C. A., Review of Progress in QNDE, 5B (1986), 1309—1314.
- [3] Guyott C. H. and Cawley P., NDT International 21-2(1988), 233—239.
- [4] Pilarski A. and Rose J. L., J. Appl. Phys., 63-2(1987), 300—307.
- [5] Nagy P. B., McGowan P., Review of Progress in QNDE, 9B(1990), 1685—1692.
- [6] Venables J. D., in Adhesive Joints, K. L. Mittal ed., Plenum Press, New York, 1984, 453—467.
- [7] Rokhlin S. I., Wang W. and Wang Y. J., (王耀俊), Review of Progress in QNDE 9B (1990), 1231—1238.
- [8] Rokhlin S. I. and Wang Y. J., J. Acoust. Soc. Am., 89-2 (1991), 503—515.
- [9] 王耀俊, 声学学报(待发表).
- [10] Wang Y. J. (王耀俊) and Rokhlin S. I., J. Acoust. Soc. Am. Suppl. 1, 86(1989), S93.
- [11] Rokhlin S. I. and Wang Y. J. (王耀俊), J. Acoust. Soc. Am. Suppl. 1, 87(1990), S145.
- [12] Kyavlin V. V., Mekhanika Polimerov, 5-4(1970), 812—817.
- [13] Nielsen, L. N. Material Sci. and Eng., 52-1 (1982) 39—52.
- [14] Wang W. and Rokhlin S. I., Review of Progress in QNDE, 9B(1990), 1629—1635.
- [15] Rokhlin S. I., Helets M., and Rosen M., J. Appl. Phys., 51-7 (1980), 3579—3582.
- [16] Rokhlin S. I., Wang W. and Wang Y. J., (王耀俊), Proc. ASNT Fall Conference, 1989 41—50.
- [17] Wang W., Li B., Rokhlin S. I., Review of Progress in QNDE (1991, 待发表).



### 新疆生产建设兵团工会举办 “音响技术岗位培训班”

为了提高新疆生产建设兵团各级工会文化活动中、俱乐部、电影院、舞厅等在岗音响工作人员的素质和技术水平,使兵团系统现有音响设备在开发边疆的两个文明建设中更好地发挥作用,新疆生产建设兵团工会和乌鲁木齐市发展影音技术经营部于1991年6月19日至29日在乌鲁木齐市联合举办了“兵团工会音响技术岗位培训班”。由本地电声高级工程师、无线电通讯高级工程师、电子音响工程师介绍了当今世界上先进的音响发展概况,讲解了声学基础和室内声学、各种电声器材的机理、功能和操作维修技术、如何按使用场合设计购置电声系统,还较详细地讲解了数码音响、

卡拉OK和激光唱机等内容,授课和示范实验相结合。兵团首长亲临培训班作了指导。香港中邦制造有限公司、广东肇庆商贸中心、广东省文体进出口公司、广东开宏飞达公司、广东珠江音响灯光设备厂赞助了培训班,并且提供了150万元的音响设备给学员操作实验和选择。近五十名学员经过十天的学习和实践最后通过了测验,获得了兵团工会颁发的音响技术岗位合格证书。此次活动对提高新疆生产建设兵团各部门,尤其是基层团场的音响技术工作起了很有益的作用。

(陈永春)