

金属薄板的兰姆波探伤*

六二一所超声探伤组

一、前言

随着导弹、飞机及宇宙飞行器设计技术的发展,对材料可靠性的要求大大提高了。因此,发展先进的无损检验方法是极为重要的。

在制造导弹、飞机及宇宙飞行器时广泛使用薄板,因此,研究薄板的无损检验方法显然也具有十分重要的意义。

众所周知,直至二十世纪五十年代,金属薄板的无损探伤仍多采用超声穿透法。自从1917年Horce Lamb发表了“弹性板中的应力波”论文以来,通过其他研究者的努力,到六十年代中期,以Horce Lamb命名的波(即兰姆波)已逐渐作为检查金属薄板的重要手段。

人们从兰姆的理论分析可知,在板中可激励起的兰姆波的模式是很多的。不过对探伤来说,选用哪些模式最为合适的问题研究得并不充分,一般均采用从板端反射强度较大的一种供作探伤之用。实践表明,当用一种模式的兰姆波进行薄板的探伤时可以发现一些缺陷,但也出现过用一种模式探伤未发现有缺陷的板材在使用时仍发现有缺陷的现象。

我们进行本工作的目的在于:

1. 希望确定一下,对于金属薄板,当用一种模式的兰姆波进行探伤时,在板中是否存在有缺陷不能被发现的区域。

2. 如果存在有这样的区域,是否可通过模式的适当选用予以解决。

工作主要是在牌号为Pt-Ir25的贵金属薄板上进行的。

二、兰姆波方程、相速度曲线及粒子的位移方程

兰姆利用虎克定律、牛顿第二定律得出了

频率与相速度的方程。可以表明,兰姆波可分为两个独立的方程,一个相对于板中心平面对称型运动,另一个作反对称型运动,两者的频率方程分别为:

$$\text{对称型: } \tanh \beta \frac{d}{2} = \frac{4\varepsilon^2 \alpha \beta}{(\varepsilon^2 + \beta^2)^2} \quad (1)$$

$$\text{反对称型: } \tanh \beta \frac{d}{2} = \frac{(\varepsilon^2 + \beta^2)^2}{4\varepsilon^2 \alpha \beta} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \alpha = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{V}{V_L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \varepsilon R_L$$

$$\beta = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{V}{V_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \varepsilon R_s$$

$$f: \text{频率}; d: \text{板厚}; V: \text{相速度}; \varepsilon = \frac{2\pi f}{V};$$

V_L : 纵波传播速度; V_s : 横波传播速度。

显然,上列方程式表达了波的相速度 V 与板厚、频率相乘积 fd 间的关系。如将频率、板厚相乘积作为一个因子来考虑,这些方程是很容易进行数学处理的。

利用电子计算机,我们算出了航空工业最常用的一些薄板的相速度与频率、板厚相乘积的关系曲线(图1、2、3、4、5)。

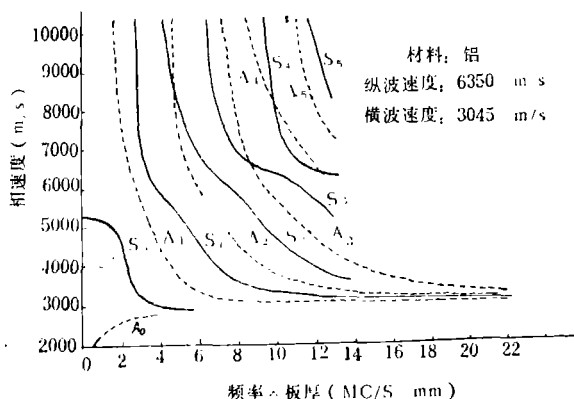


图1 铝板的相速度曲线

* 本项工作是在1972年进行的。

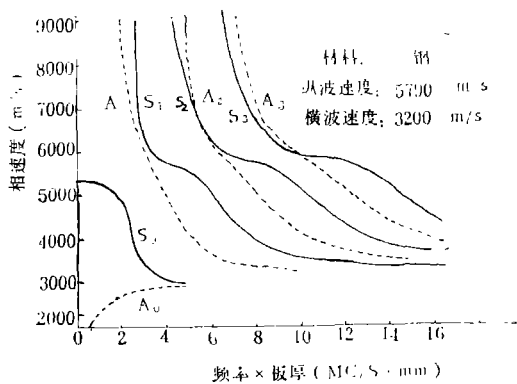


图 2 钢板的相速度曲线

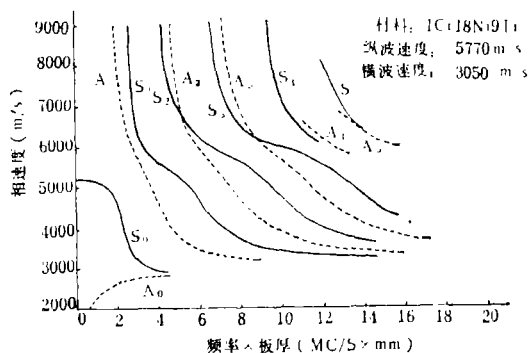


图 3 1Cr18Ni9Ti钢板的相速度曲线

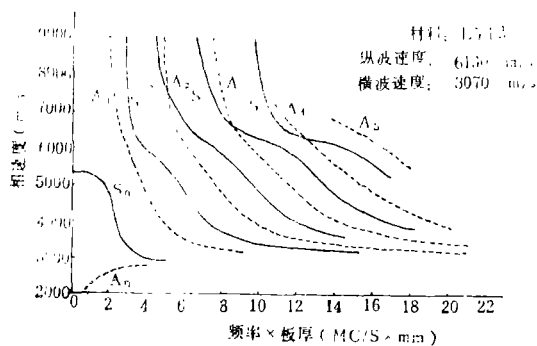


图 4 LY12铝板的相速度曲线

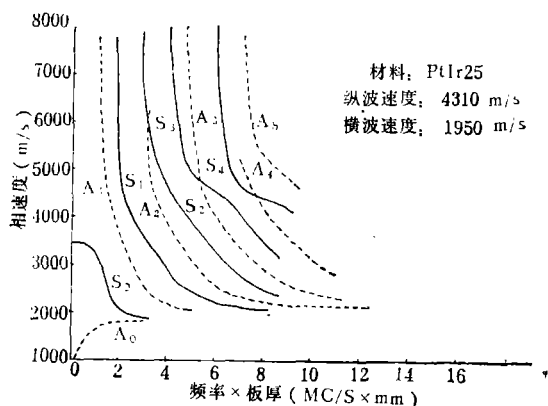


图 5 Pt-Ir25板材的相速度曲线

兰姆波在板中传播时，粒子的位移（水平分量U与垂直分量V）可用如下方程表示：

对称型：

$$\left. \begin{aligned} U_s &= -B \frac{\omega}{V} R_s \left[\frac{(1+R_s^2)}{2RLR_s} \cdot \frac{\text{Sh} \pi f d}{\text{Sh} \pi f d} \frac{R_s}{V} - \text{Ch} RL \frac{\omega}{V} y - \text{Ch} R_s \frac{\omega}{V} y \right] e^{iex} \\ V_s &= B \frac{\omega}{V} i \left[\frac{(1+R_s^2)}{2} \cdot \frac{\text{Sh} \pi f d}{\text{Sh} \pi f d} \frac{R_s}{V} - \text{Sh} RL \frac{\omega}{V} y - \text{Sh} R_s \frac{\omega}{V} y \right] e^{iex} \end{aligned} \right\} (3)$$

反对称型：

$$\left. \begin{aligned} U_a &= -D \frac{\omega}{V} R_s \left[\frac{(1+R_s^2)}{2RLR_s} \cdot \frac{\text{Ch} \pi f d}{\text{Ch} \pi f d} \frac{R_s}{V} - \text{Sh} RL \frac{\omega}{V} y - \text{Sh} R_s \frac{\omega}{V} y \right] e^{iex} \\ V_a &= D \frac{\omega}{V} i \left[\frac{(1+R_s^2)}{2} \cdot \frac{\text{Ch} \pi f d}{\text{Ch} \pi f d} \frac{R_s}{V} - \text{Ch} RL \frac{\omega}{V} y - \text{Ch} R_s \frac{\omega}{V} y \right] e^{iex} \end{aligned} \right\} (4)$$

三、兰姆波的激励

当超声波束以角度 θ 自介质I向板入射而能在板中激励起兰姆波(图6)时,入射角 θ 、纵波在介质中I中的传播速度 V_1 和在介质II(薄板)中相应兰姆波的相速度 V 之间的相互关系为:

$$\sin \theta = \frac{V_1}{V} \quad (5)$$

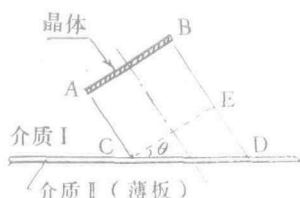


图6 兰姆波在板中的激励

显然,给出纵波在介质I中的传播速度 V_1 ,即可从相速度曲线算出对于各该模式的兰姆波的频率、板厚相乘积 fd 与入射角 θ 的关系曲线。对于铝,此曲线如图7所示。

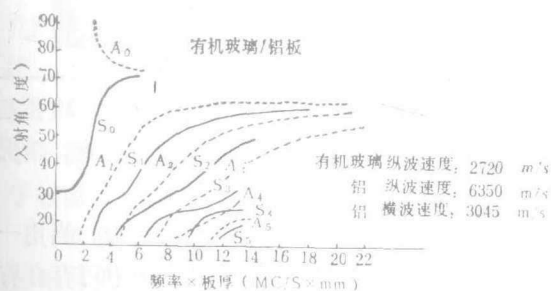


图7 铝板中频率、板厚相乘积 fd 与入射角的关系曲线

对于Pt-Ir25薄板,当厚度为0.89mm,所用换能器频率为4.5mc/s时,测得的入射角与板端回波高度的关系曲线如图8所示。峰值处的角度值与按(5)式计算所得是一致的。

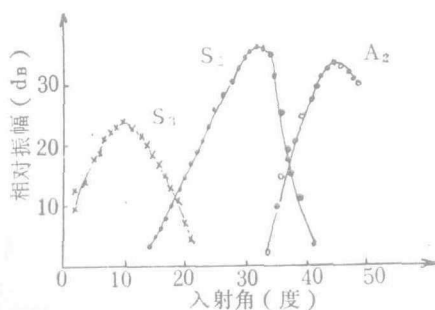


图8 Pt-Ir25板材入射角与板端反射回波振幅的关系曲线 $f=4.54\text{mc/s}$ $d=0.89\text{mm}$
有机玻璃纵波速度 2650m/s

四、用兰姆波进行薄板探伤的情况

在对厚度为0.9mm的Pt-Ir25薄板用兰姆波进行探伤时,我们原先所用的有机玻璃斜楔的入射角为 $32^\circ 40'$,所用换能器频率为4.54mc/s,从图5可知其模式为 S_2 。此模从板端反射的回波上升尖锐、宽度窄、振幅高而速度快。利用这种模式的兰姆波,我们探出了一些板中的缺陷,图9为其中两个的金相分析图片。



图9 Pt-Ir25板材缺陷的金相图片

在对一大批厚度为0.9mm的Pt-Ir25薄板用频率为4.54mc/s的换能器进行兰姆波探伤时,我们除采用入射角为 $32^\circ 40'$ 的探头(S_2 模)外,根据图5及图8,又选用了入射角为 45° 的探头(A_2 模)。

在一个炉批的板材中,我们找出了三个用 $32^\circ 40'$ 探头(S_2 模)容易发现而用 45° 探头(A_2 模)难以发现的缺陷。在另一炉批中毕竟被我们找出一个用 45° 探头(A_2 模)容易发现但用 $32^\circ 40'$ 探头(S_2 模)却难以发现的缺陷。检查是用MK-1B型超声波探伤仪进行的,缺陷的显现情况如表1所示。

表 1 用MK-IB型探伤仪检查Pt-Ir25板材时缺陷显现情况

缺陷编号	入射角 $32^{\circ}40'$ (S_2 模)		入射角 45° (A_2 模)	
	波高 (db)	波 形 图	波高 (db)	波 形 图
№ 1	45		0	
№ 2	0		5	
№ 3	15		1.5	
№ 4	11.5		2	

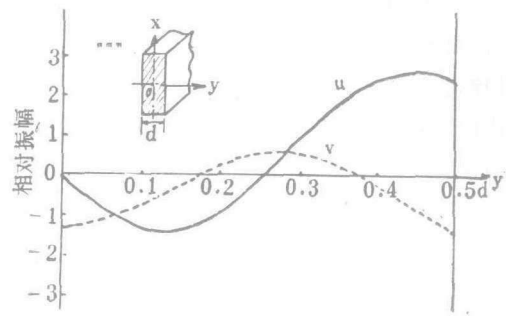


图 10 Pt-Ir25板材 S_2 模U、V分量曲线
 $fd=4\times 10^6 c/s\times mm$
 $V=4600m/s$
 $V_1=4310m/s$
 $V_s=1950m/s$

为了进一步证实,用 Sonovisor2M 型超声波探伤仪对上述四个缺陷进行了复查,情况与表 1一致。

这样,可以认为:对于金属薄板,当用一种模式的兰姆波进行探伤时,在板中可存在有缺陷不能被发现的区域。

五、薄板探伤时兰姆波模式的选择

为了进一步比较上述两模式间的差异,我们在 一块 0.9mm 厚的 Pt-Ir25 板上钻了一个 $\phi 0.3mm$ 的穿透小孔和一个 $\phi 1.5mm$ 深 0.1mm 的平底浅孔,当用 $32^{\circ}40'$ 探头 (S_2 模)及用 45° 探头 (A_2 模)进行检查时,结果如表 2 所示。

表 2 不同模式兰姆波对穿孔及平底浅孔的反射情况

入射角	模式	对平底浅孔 ($\phi 1.5\text{mm}$, 深 0.1mm) 的反射波高 db	对 $\phi 0.3\text{mm}$ 穿孔的反射 波高db
$32^\circ 40'$	S_2	2	14
45°	A_2	10.5	10.5

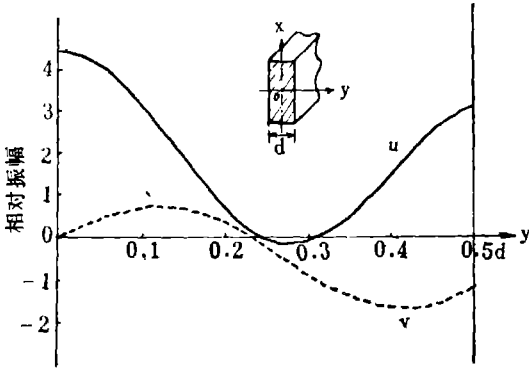


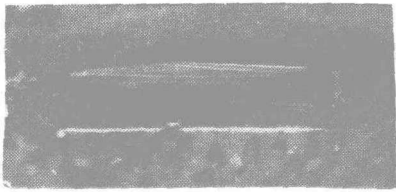
图 11 Pt-Ir25 板材 A_2 模 U、V 分量曲线
 $fd = 4 \times 10^6 \text{ c/s} \times \text{mm}$
 $V = 3800 \text{ m/s}$
 $V_1 = 4310 \text{ m/s}$
 $V_s = 1950 \text{ m/s}$

值得注意的是，对于 S_2 模平底浅孔与穿孔的反射波高相差达 12 分贝之多，而对于 A_2 模，两者的反射波高却几乎没有差别。据此，我们设想，是否对于 $32^\circ 40'$ (S_2 模) 能流多集中于板中心部位而对于 45° (A_2 模) 则多集中于板面部分。

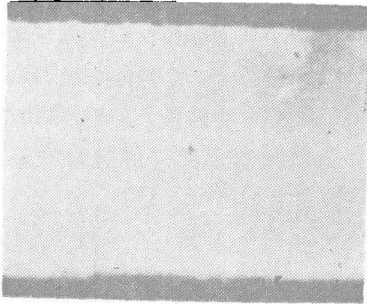
考虑到兰姆波传播时粒子的位移与能流的分布有关，我们根据方程 (3)、(4) 分别计算了两者的粒子振动 U、V 分量曲线如图 10、11 所示。由于两方程的常数项不同，两模 U、V 分量的大小不能从图上直接比较。

从曲线可见， A_2 模能流的水平分量在板的表面部分较大，而 S_2 模则在板的中心部分较大，这与当初的设想比较一致。我们据此作出这样的推测，即缺陷 №3、№4 可能位于板的中心部位而缺陷 №2 则可能处于板的表面部位。

对缺陷 №2、№3 进行了解剖，结果如图 12 所示。



a 缺陷 №2 的解剖分析图片



b 缺陷 №3 的解剖分析图片

图 12

可以看出，分析结果证实了上述推测。

仔细分析两种模的 U 分量曲线 (图 10、11)，我们注意到在距板面 $1/4$ 板厚处，不论是 A_2 模还是 S_2 模，U 分量都是比较小的。有理由设想，即使采用这两种模式的兰姆波进行探伤在板中仍可能存在缺陷不能被发现的区域。

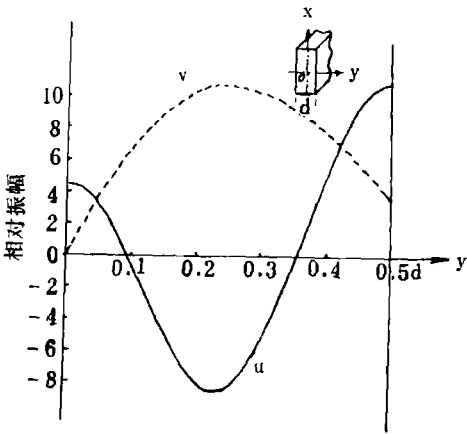


图 13 Pt-Ir25 板材 S_3 模的 U、V 分量曲线
 $fd = 4 \times 10^6 \text{ c/s} \times \text{mm}$
 $V = 15230 \text{ m/s}$
 $V_1 = 4310 \text{ m/s}$
 $V_s = 1930 \text{ m/s}$

对于频率 4.54mc/s 、厚度 $d=0.89\text{mm}$ 的Pt-Ir25板材,从图8可知尚可激励并接收到 S_3 模的兰姆波。这种波的U、V分量曲线如图13所示。

从曲线可以看出,这种模式的粒子振动U分量在板表面及板厚 $\frac{1}{4}$ 部位都比较大,似可补上述两模之不足,可惜在板端面反射波之前存在有由于在反射时模式的分解变换所形成的附加讯号,这在辨别缺陷讯号时将会造成困难。

利用频率为 2.5mc/s 的换能器在此板中尚可得到 A_1 模式的兰姆波,入射角为 48° ,相速度为 $v=3600\text{m/s}$,其U、V分量关系曲线如图14所示。

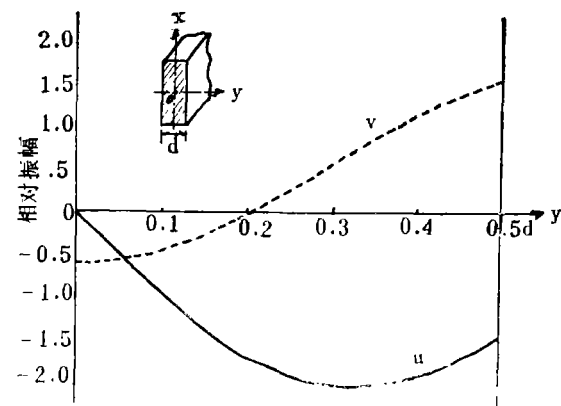


图 14 Pt-Ir25板材 A_1 模的U、V分量曲线
 $fd=2.0 \times 10^6 \text{ c/s} \times \text{mm}$
 $V=3600\text{m/s}$
 $V_1=4310\text{m/s}$
 $V_2=1950\text{m/s}$
 $f=2.5\text{mc/s}$

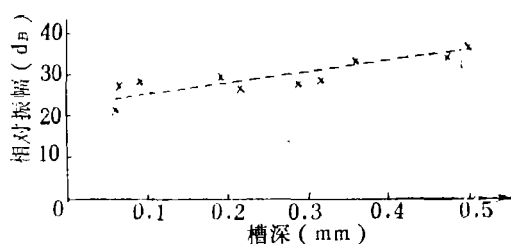
显然,这种模式(A_1)配以上述之 S_2 模式将较理想。

据此,我们初步认为,为了用兰姆波发现在板中应能予发现的全部缺陷,按方程式(3)和(4)计算出各模的U分量曲线,通过试验对比以选择适当的模式较为可靠。

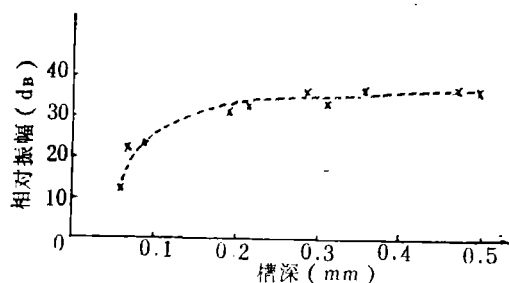
六、切槽试验及板材表面 裂纹深度的测量问题

为了进一步了解粒子振动的U分量大小与

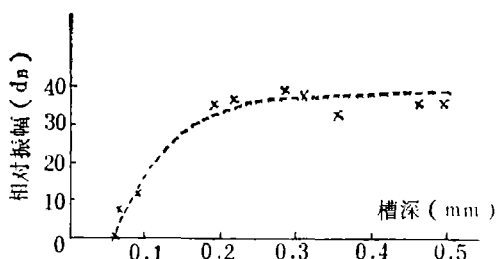
缺陷显现情况的关系,我们在厚度为 1mm 的钢板上切出了宽度为 1mm 、深度各不相同的槽,经实测,槽深平均值分别为 $0.016, 0.067, 0.09, 0.189, 0.216, 0.284, 0.311, 0.355, 0.468$ 及 0.496mm 。用有机玻璃(纵波速度为 2720m/s)制成入射角为 $20^\circ, 30^\circ$ 及 $39^\circ 30'$ 的斜楔,对于频率 $f=4.54\text{mc/s}$,所得兰姆波模式在 1mm 钢板中分别相应为 S_2S_1 及 A_1 。所得槽深与反射回波振幅之间的关系曲线如图15所示。



a) 入射角: 20° , S_2 模



b) 入射角: 30° , S_1 模



c) 入射角: $39^\circ 30'$, A_1 模

图 15 1mm 钢板上槽深与回波高度的关系曲线

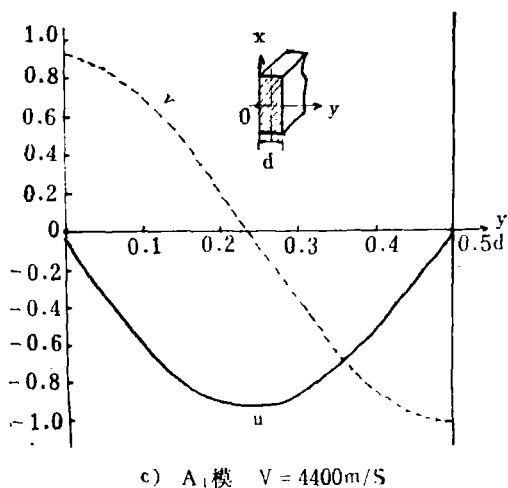
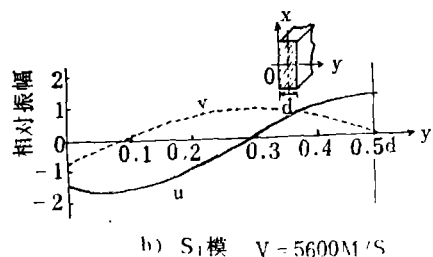
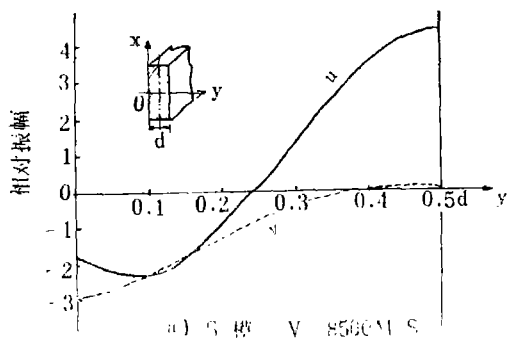


图 16 1mm钢板不同模式的 U、V 分量曲线

$$fd = 4.5 mc / s \times mm$$

$$V_l = 5790 m/s$$

$$V_s = 3200 m/s$$

三条曲线的形状很不相同, 曲线a)表明对很浅的切槽即可获得甚强的反射回波, 而曲线c)则相反。随着槽深的增大, 曲线a)上升平缓, 曲线c)在槽深至0.2mm以前上升是比较陡峭的, 而曲线b)则介于两者之间。

根据方程式(2)、(4), 计算出上述三种模式的粒子振动 U、V 分量曲线如图16所示。

将此组计算出的曲线中的U分量曲线与试验得出的图15中的一组曲线加以对比, 可以看出, 似尚一致。

可以认为, 薄板表面裂纹的深度有可能用兰姆波进行测量, 但须选择适当的模式, 对于1mm的钢板, 选用 A₁ 模似较合适。

七、薄板探伤中的杂波问题

用兰姆波检查 Pt-1r25 板材, 我们发现, 当波束方向与轧制方向平行时波形干净, 而当波束垂直轧制方向时有甚多的杂乱讯号出现, 在仪器灵敏度调整较高时, 此现象甚为显著, 两种情况的波形如图17所示。



1) 波束沿轧制方向

2) 波束垂直轧制方向

图 17 Pt-1r25 板材兰姆波探伤时杂波的出现情况
槽深0.05mm f: 4.54 mc/s 模式: A₂

在检查过程中, 我们还发现过沿轧制方向与垂直轧制方向传播速度的差异, 如表3所示。

此外, 对某些材料, 我们发现在测量入射角与板端反射回波振幅的关系曲线时, 垂直轧制方向与顺轧制方向结果并不一样。

上述情况可能与板材的弹性各向异性有关。

表 3 Pt-Ir25 板材垂直轧制方向与沿轧制方向兰姆波传播速度的差异

入射角	模式	板端回波在萤光屏上的位置 (相对)					
		沿轧制方向			垂直轧制方向		
		入射点距板端距离 mm		每 mm 板长的位置差	入射点距板端距离 mm		每 mm 板长的位置差
		100	50		40	20	
32°40'	S ₂	60	34	$\frac{60-34}{100-50}=0.52$	28	19	$\frac{28-19}{40-20}=0.45$
45°	A ₂	78	43	$\frac{78-43}{100-50}=0.7$	31.5	21	$\frac{31.5-21}{40-20}=0.53$

八、小 结

根据试验结果，初步小结如下：

- 1. 对于金属薄板，当用一种模式的兰姆波进行探伤时，在板中可存在有缺陷不能被发现的区域。
- 2. 根据板的端面反射或穿透小孔的反射来选用兰姆波的模式是不全面的。为了用兰姆波发现板中应能予发现的全部缺陷，按方程式(3)、(4)计算出U分量曲线，通过试验对比

以选用适当模式似较可靠。

- 3. 用兰姆波有可能测量薄板表面裂纹的深度，但须慎重选择其模式。
- 4. 薄板弹性的各向异性情况有可能用兰姆波进行试验。
- 5. 兰姆波在板中的传播及其在缺陷处的反射机理有待探讨，这对提高检验质量是至关重要的。

致 读 者

我们遵照毛主席洋为中用的教导，自1970年出版《国外航空材料》及其“专题参考资料”以来，对科研生产工作起到了一定作用，不断受到读者的鼓励和帮助。对此深表感谢。当前，在深入开展工业学大庆的群众运动中，为加速我国航空工业的发展和赶超世界先进水平，经上级决定，从1977年起正式出版《航空材料》杂志，原《国外航空材料》决定停刊，其“专题参考资料”仍将继续出版。

《国外航空材料》编辑组
一九七七年六月