

兰姆波探伤中一些问题的探讨

A Discussion of Some Questions about Lamb Waves in Nondestructive Testing

北京材料及工艺研究所 蒋福棠 何双起

中科院声学研究所 沈建中

Jiang Futang He Shuangqi

(Beijing Research Institute of Materials & Technology)

Shen Jianzhong

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

[摘要] 对金属薄板兰姆波探伤中的一些问题进行了探讨,提出了能量沿板厚分布的计算公式。指出不能将质点位移振幅沿板厚的分布当作能量分布,不能将能量分布是否均匀作为选择最佳探伤参数的主要依据。还对薄板中兰姆波的产生、兰姆波与分层作用的机理及如何选择最佳探伤参数等问题提出了初步的看法。

关键词: 薄板 兰姆波 无损检测

[Abstract] Some questions about Lamb waves in nondestructive testing of thin metal sheet were discussed in this paper. The calculation formula of energy distribution along thickness of sheet was advanced. It was shown that amplitude distribution of particle displacement could not be taken as the energy distribution and the uniformity of the energy distribution could not be used as principal criterion for optimum detection parameter. Furthermore, the generation of Lamb waves, the mechanism of the interaction between delamination and Lamb waves, the method of choosing optimum detection parameter were given primarily.

Keywords: sheet Lamb waves nondestructive testing

1 前言

兰姆波用于金属薄板的无损检测已有数十年的历史,虽已取得了不少进展,但还存在着许多尚未解决的问题,如分层对兰姆波的散射机理,如何选择最佳探伤参数,如何克服有时可能发生的分层漏检,如何对缺陷进行定性、定量分析以及人工缺陷的选型等,这些也可能是国外至今尚未制订有关标准的原因。国内虽已先后制订了两项国标和一项专业标准^[1~3],但并不能说明这些问题都已得到妥善解决。本文对其中的一些问题进行了探讨。

2 兰姆波的产生

由于担心在薄板中得到的是横波而不是想要得到的兰姆波,因此提出了一些鉴别方法^[4]。其实这种担心

是多余的,因为按照 J·Krautkramer 的观点^[5]:“当用沿锯齿路径反射的横波检查板材时,如果在板中没有无声波的区域,则一般称为板波”。这个条件很容易达到,只要入射波束的宽度比板的厚度稍大一些即可。但是由于干涉的关系,波会很快消失。为了提高效率,应使入射波的波长和板波的波长以相同的周期激励板材,即符合人们所熟知的公式:

$$\lambda_L = \lambda_p \sin \alpha$$

式中 λ_L 、 λ_p 分别为斜楔中的纵波波长和板材中兰姆波的波长, α 为纵波入射角。

3 质点位移振幅和能量

把质点位移振幅沿板厚方向的分布当作能量(流)分布^[6,7],在概念上是一种混淆。真正的能量分布应按下面推导的公式求出:

$$P_{x(z)} = -U_z^2 \Sigma_{zx} - U_x^2 \Sigma_{xx}$$

$$= i\omega [u_{(z)}]^* \cdot \sigma_{zx}(x) + i\omega [W_{(z)}]^* \cdot \sigma_{zx}(z)$$

式中: $P_{X(z)}$ —功率(能)流的平均值沿板厚方向的分布;

*—表示取复数共轭;

ω —角频率。

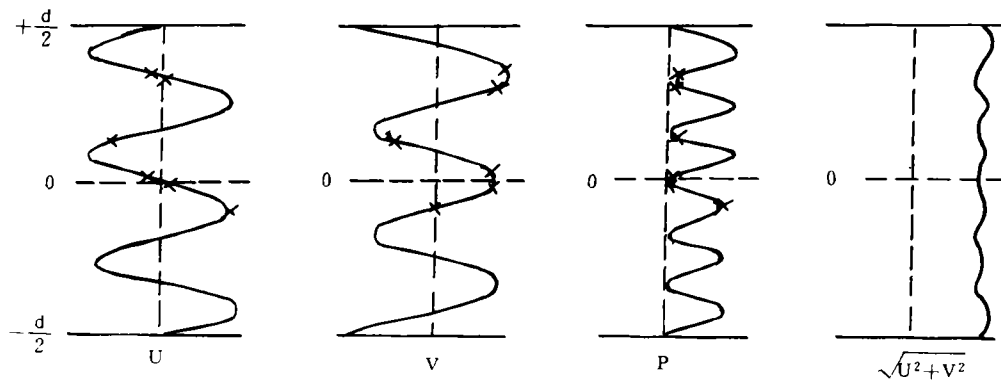


图1 计算结果一例

移振幅分布之间存在着很大的差异。

4 模式(或模数、波模)与探伤参数

将兰姆波探伤时的探伤参数选择称之为“模式”选择^[1,2,6,7],这在概念上也是一种混淆。因为“模式”通常指相速度曲线族中的某一条曲线(如 A_0),但这并不是探伤参数的全部内容。同样的“模式”,但 $f \cdot d$ 不同(即曲线上不同的部位)时探伤效果可能不同,其 U 、 V 和 P 等也可能不同,即使相同的 $f \cdot d$,但 f 不同时其探伤效果也可能不同^[8]。

5 分层对兰姆波散射的机理

有些作者^[6,7]认为,计算质点位移振幅的分布、找到在板厚方向分布均匀并且振幅度大的“模式”,就可以避免分层的漏检。这种观点可能是把分层对兰姆波的散射机理看作相同于缺陷对纵波或横波的散射机理,而在纵波或横波的情况下,对于同样的缺陷,能量起决定性作用。这种观点实际上忽略了兰姆波是“因板面所限而在板材中传播的整体波动”这一特殊性质。

Л. Г. Меркулов等^[9,10]曾计算过平行于板面而处于板中心层的半无限大狭缝的散射,而S. Rokhein等^[11]曾计算过处于板中心层的带状狭缝的散射。他们所提出的计算公式完全不同于纵波和横波。他们的计算结果没有能给出具体而明晰的、可直接用于选择最佳探伤参数的结果。

从实验的角度看,目前还没人能做出真正能模拟自

我们曾对多个参数下质点位移振幅的水平分量(U)、垂直分量(V)、 $\sqrt{U^2 + V^2}$ 以及能量分布(P)进行了计算,图1为其中一例(参数为 A_3 模, $f \cdot d = 12.9 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$)。从图1可以看出,能量分布与质点位

然分层的人工缺陷,无论是从板的端面用线切割方法加工出来的半无限大狭缝还是在板材侧面用电火花方法加工出来的小面积狭缝,都有很大的层厚、而且其边缘较宽,因而具有一定的“端面”反射作用,但自然分层常常压合得很紧密,因而只有很小的层厚,而且其边缘往往更薄,因而常常不具有“端面”反射作用。

美国曾有标准^[12]指出:兰姆波探伤时,在分层的前缘、后缘和分层面上都可能产生反射。我们曾在钢板上检测出5个自然分层(它们具有4种不同的深度),用5种不同的探伤参数进行了试验,发现在大多数情况下分层的后缘反射很强而前缘反射很弱甚至测不出来。将探头调转 180° 从分层的另一侧探测时,也出现了同样的现象。对其中某个分层的解剖结果显示,该分层的边缘厚度只有 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,这么薄的边缘显然难以起到“端面”反射作用,这可能就是前缘反射波很弱或测不出来的原因,这种现象用通常的纵、横波散射理论显然是难以解释的。

经典的波导理论指出:当波动(平面连续波)在管中传播时,如果在主管中间插入一根面积扩张(或收缩)管,便会发生反射,反射波的强度与插入管的长度和声波的波长有关,也与主管和插入管的截面积比有关。兰姆波在薄板中传播时,分层对兰姆波的反射在某种程度上也许可与之类比。从这一类比可以认为:即使分层处于板材中能量为零的位置,仍然有可能产生反射。当然,兰姆波比平面连续纵波复杂得多,遇到缺陷时还可能发生模式转换,其反射机理不可能用这一类比来完善描述,需要更深入的研究。

我们在薄铝板的检测中曾用兰姆波法检查出大量的分层,其中有许多分层都处于板材中或能量、或水平分量 U 、或垂直分量 V 为零或接近于零的深度位置,图 1 是其中的一例,图中 \times 号表示在该深度位置检出了分层。从我们的检验结果可以得出这样的结论:“能量(流)分布是否均匀”或 U 、 V 分布是否均匀不能作为选择最佳探伤参数的主要依据。

6 A_0 模是否最佳探伤参数

有的作者^[7]认为,“用 A_0 模进行单模探伤是可行的”。其主要依据是“能量高、频散小、且在整个板厚上均有一定振动能量的传播”。我们认为,在涉及探伤参数时只提“模式”是不恰当的。此外, A_0 模这条曲线的大部分区段与 S_0 模是重合的。例如,对 1Cr18Ni9Ti 钢,当 $f \cdot d > 4\text{MHz} \cdot \text{mm}$ 时, A_0 模与 S_0 模就难以分开,这意味着要得到单一的 A_0 模必须使用很低频率的入射波,而在低频情况下容易产生杂波,这也许就是该文作者要配用早已停产的 CTS-6 型超声波探伤仪的原因。频散小是 A_0 模的一个优点,但对其他模式也能找到频散小的区段。至于“能量高”在检验中并不是很关键的,关键的应是信噪比高,因为有些分层的反射可能很微弱,只有当信噪比很高时才能“捕捉”到。

我们曾在一张 LF6 铝板上检查出 5 条分层,其中最短的一条长 175mm,最长的一条长 750mm,分层的宽度除长 750mm 的那条约为 10~14mm 外,其余 4 条约为 3~4mm。用我们制作的探头 (A_0 模, $f = 4.6\text{MHz}$, $f \cdot d = 12.9\text{MHzmm}$) 检查出其中的 4 条,另一条只显示出一个小的点状反射波,用该文作者提供的探头,配西德产 USIP11 型仪器,只能检查出其中长 750mm 的那一条,这是长期以来我们首次“捕捉”到的“分层漏检”现象,至于漏检的原因现在还不清楚,有待深入研究。

7 如何选择最佳探伤参数

在兰姆波探伤中如何选择最佳探伤参数是至今仍未得到完善解决的问题。 $J \cdot \text{Krautkramer}$ ^[13]在他的名著“超声检测技术”中也未提出具体的办法,只是指出:“最佳角度与波型往往是用缺陷已知的试件试验时凭经验求出”。对此,我们的初步看法是:

(1) 目前还没有一种有效的理论计算方法, $J \cdot \text{Krautkramer}$ 的说法应是一种基本准则,但要在实践中积累大量已知缺陷的试件是一项十分困难的工作。

(2) 应选取 A 板边回波和人工缺陷回波前沿陡峭、信噪比高的波型。

(3) 入射角应选择相速度曲线上相速度变化不太大的部位,这是由于被检板材的厚度都有一定的公差,探头的入射角也会有误差或因磨损而造成入射角的改变,如果选在曲线很陡的部位,则 $f \cdot d$ 的少量变化或入射角的少量改变就可能破坏正常的相位关系,从而造成灵敏度的急剧下降,但也不宜选择曲线上太平缓的部位,在此部位许多模式的曲线很靠近,容易产生波型混杂。

(4) 应选择群速度曲线上群速度小、且曲线较平缓(频散小)的部位。原因是:①当兰姆波在板材中传播遇到某些缺陷时,可能发生模式转换,如果原模式的群速度大而新模式的群速度小,则缺陷反射波可能落在荧光屏之外或板边回波之后而发生漏检;②如文献[7]所述,频散大的波会使回波幅度低,波型混杂而不易判别。

(5) 使用带阻尼背衬的较宽频带的探头可能比不带阻尼背衬的窄频带探头好,因为:①后者易于受板厚和入射角的少量变化的影响而导致正常相位关系的破坏;②后者的板边育区和探头前沿育区比前者大。

(6) 选择较短波长的兰姆波也许会有利于检测出缺陷,但分层反射波的强度可能与波长和分层的宽度之比有关,也可能与板材的截面积和被分层所隔断的截面积之比有关。

8 结束语

薄板的兰姆波探伤不论在理论上还是实践上都存在着许多尚未解决的问题,并直接影响兰姆波探伤的可靠性,本文对其中的一些问题进行了探讨,希望能有助于兰姆波探伤研究工作的开展。

参考文献

- 1 GB2108-80
- 2 GB8651-88
- 3 QJ1269-87
- 4 范同例等. 无损检测, Vol. 4, No. 6, 1982, 6~10
- 5 $J \cdot \text{Krautkramer}$. 超声检测技术, 1984, P. 222
- 6 孙仲励. 无损探伤, No. 6, 1982, 1~5
- 7 徐克北. 中国机械工程学会无损检测学会第六届年会论文集, 1985, 111~113
- 8 M. noe 等. 6ICNT, Report NO. Kz, Part1, 1970
- 9 Л. Р. Меркулов. ДЕФЕКТОСКОПИЯ, No. 4, 1969, 24~36
- 10 Л. Р. Меркулов. ДЕФЕКТОСКОПИЯ, NO. 3, 1970, 13~22
- 11 S. Rokhlin. Soc. 67 (47), 1980, 1157~1165
- 12 ASTM E587-82
- 13 $J \cdot \text{Krautkramer}$. 超声检测技术, 1984, 277