

# 用于 Lamb 波检测的梳状压电换能器的设计与制作

朱颖<sup>1,2</sup>, 彭先科<sup>1</sup>, 刘昊东<sup>1</sup>, 喻星星<sup>1</sup>, 欧阳浩芳<sup>3</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 陆铭慧<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室南昌 330063;

2. 中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室北京 100190;

3. 空军航空维修技术学院长沙 410124)

Email: zhuying@nchu.edu.cn

**摘要:** 梳状压电换能器是通过将压电晶片固定在梳齿状有机玻璃楔块上, 来获得单一模式的 Lamb 波, 且该换能器对 Lamb 波的激励没有相速度限制, 设计性较斜劈压电换能器更强。本文利用有限元仿真的方法, 讨论了指条数对单一模式 Lamb 波激励与接收的影响。结果表明, 指条数在 3-10 时, 梳状楔块对 Lamb 波模式的选择性较好。实验制作了具有外壳、背衬材料以及 Q9 接头的 8 指条梳状压电换能器。利用该换能器测量了铝板中的人工通孔缺陷, 获得了较好的回波信号。由此可知, 梳状压电换能器可以用于 Lamb 波的检测, 且能够得到较为单一的 Lamb 波信号, 利于缺陷的检测与识别。

**关键词:** 超声检测; Lamb 波检测; 超声换能器; 梳状压电换能器

## 1、研究背景

超声波在板中是以 Lamb 波的形式传播的。由于 Lamb 波与板材缺陷的强烈相互作用, 能够传递大量检测所需的信息, 因此特别适合于对板材损伤的检测<sup>[1]</sup>。由于 Lamb 波具有多模式、频散的特性, 对其的激励也有一定的特殊性, 目前有多种激励 Lamb 波的方法<sup>[2]</sup>。压电晶片、激光超声、空气耦合<sup>[3]</sup>等方法难以对 Lamb 波模式进行选择, 因此仅适用于低频 Lamb 波的激励, 以减少多模式特性对检测结果的影响。斜劈压电换能器通过将压电晶片固定在具有一定角度的有机玻璃斜楔上, 可以激励出较为单一的相应模式的 Lamb 波。除上述方法外, 梳状压电换能器通过将压电晶片固定在梳齿状有机玻璃楔块上, 同样可以获得单一模式的 Lamb 波, 且该换能器对 Lamb 波的激励没有相速度限制, 设计性较斜劈压电换能器更强<sup>[4]</sup>。然而, 目前却鲜有对压电梳状换能器设计与制作方法的相关讨论<sup>[5]</sup>。本文通过研究梳状压电换能器指条数对 Lamb 波信号的影响, 获得模式选择性较强的指条数参数范围, 并制作了用于 Lamb 波检测的梳状压电换能器, 从而实现了梳状压电换能器的设计与制作方法的讨论。

## 2、研究内容

### 2.1 梳状楔块的参数确定

梳状压电换能器是将压电晶片固定于梳状楔块上，利用梳状楔块的特殊形状实现 Lamb 波模式的选择。梳状楔块的相关参数如 FIG. 1 所示，其中  $a$  为指条宽度， $b$  为指条间距， $L$  为指条周期， $W$  为指条长度， $h$  为楔块厚度。当梳状楔块指条周期  $L$  与所激励 Lamb 波的波长  $\lambda$  相等时，可以激励出该模式的 Lamb 波。

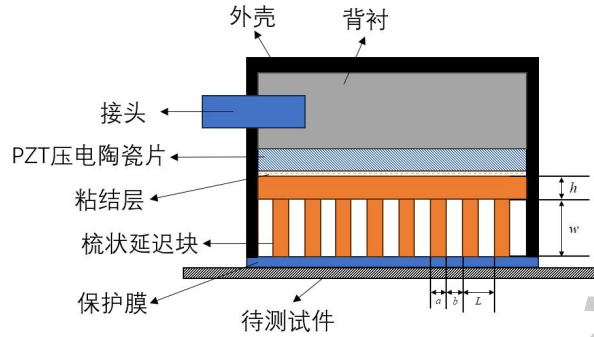


FIG.1 Schematic structure of piezoelectric comb transducer

实验选取了厚度为 1mm 铝板，并计算出其频散曲线。在频散曲线上选用  $S_0$  模式进行激励，其激励频率  $f$  为 1.397MHz，相速度  $c$  为 5147m/s，故波长  $\lambda = 3.7\text{mm}$ 。由此确定梳状楔块指条周期  $L$  为 3.7mm，指条宽度与指条间距分别为  $a=b=L/2=1.85\text{mm}$ 。

## 2.2 指条数对 Lamb 波模式选择的影响

研究利用有限元仿真软件建立铝板二维模型，并在铝板上设置梳齿状排列的 PZT 压电晶片阵列，阵元宽度为 1.85mm，阵元间距为 3.7mm。将中心频率为 1.4MHz、周期为 5 的高斯脉冲加载于压电晶片上，从而在铝板中产生 Lamb 波信号，同时将接收探针设置于压电晶片阵列上用于接收回波信号。

梳齿状排列的 PZT 压电晶片阵列在铝板中产生了  $S_0$  和  $A_0$  两种模式 Lamb 波。研究比较了阵元数目（即指条数）由 1 变化到 10 时，Lamb 波信号的变化特点。当指条数为 1 时，两种模式 Lamb 波均较为明显。随着指条数增加， $A_0$  模式逐渐减弱，使得  $S_0$  模式变得明显且波包更为干净。将  $S_0$  与  $A_0$  模式的幅值作为参数，分析其随指条数的变化规律，如 FIG. 2 所示。结果表明，指条数目增加时，两种模式的幅值比迅速增大，在 6 时达到最大，随后略微下降并保持在同一水平。分析  $S_0$  模式随指条数变化特点发现，随指条数的增加， $S_0$  模式幅值呈略微降低趋势（如 FIG. 2 所示），且其脉冲宽度逐渐变窄。当  $S_0$  模式 Lamb 波的幅值随指条数的增加而降低时，容易造成其对缺陷检测灵敏度的降低。当  $S_0$  模式 Lamb 波的脉冲宽度随指条数的增加而变窄时，使其对缺陷的分辨力增大。由此可知，梳状楔块在激励所需要模式 Lamb 波的同时，降低了该模式 Lamb 波的灵敏度而增加了其分辨力。综上所述，利用梳状楔块可以激励出较为单一的

Lamb 波模式，且指条数目会对单一 Lamb 波的产生造成影响。梳状楔块的存在使得 Lamb 波的检测灵敏度降低而分辨力提高。

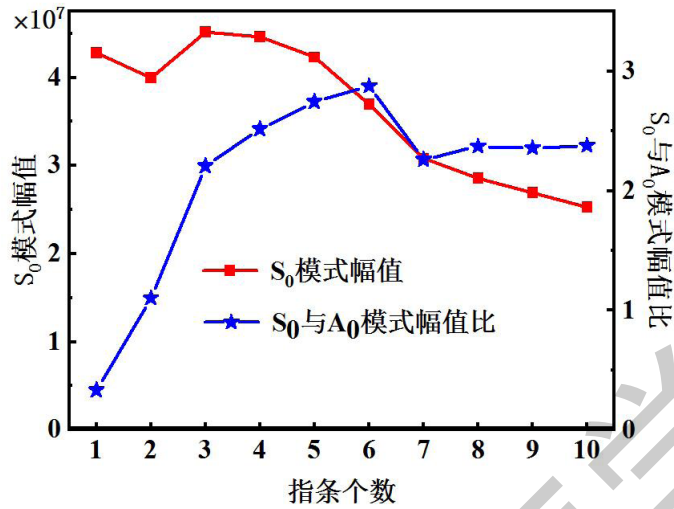


FIG.2 The variation of  $S_0$  mode Lamb wave amplitude and theratio of  $S_0$  with  $A_0$  mode amplitude with finger number

### 2.3 梳状压电换能器的制作

根据指条数对 Lamb 波模式的影响，并考虑现有压电晶片尺寸，设计 8 指条梳状楔块。将压电晶片粘贴于梳状楔块上表面，并利用 3D 打印技术制作换能器外壳。使用环氧树脂、固化剂和铅粉浇注背衬材料。将 Q9 接头固定于换能器外壳作为与导线的连接接口。在换能器底部粘贴一层透明保护膜，以防止耦合剂进入梳状指条之间，影响 Lamb 波信号的激励与接收。梳状压电换能器的结构示意图如 FIG.1 所示。

### 2.4 实验测量

实验利用可变角斜劈压电换能器为激励端、自制梳状压电换能器为接收端，在 1mm 厚且带有人工通孔缺陷的铝板中进行 Lamb 波的激励与接收实验。以频散曲线为依据，分别在 1.4MHz 和 1.9MHz 的频率下激励出较为明显的  $S_0$  和  $A_0$  模式 Lamb 波。实验通过将接收换能器布置在距离较近的发射换能器的前端且二者正对铝板侧端面，从而在示波器上获得了直达波与端面反射波。当两个换能器同时移动到人工通孔缺陷前端时，信号中出现了明显的缺陷回波。

实验的结果表明，根据相关参数设计制作的梳状压电换能器接收到了较为单一的 Lamb 波模式。同时利用该模式 Lamb 波检测到了铝板上预制的人工缺陷。因此，可以认为梳状压电换能器可以用于单一模式 Lamb 波的接收，从而可以将其用于板中缺陷的检测。

### 3、结 论

本文讨论了梳状压电换能器的设计与制作方法。实验利用有限元仿真的方法，讨论了指条数对单一模式 Lamb 波激励与接收的影响。结果表明，指条数在 3-10 时，梳状楔块对 Lamb 波模式的选择性最好。因此，根据仿真研究结果与实际晶片尺寸制作了具有外壳、背衬材料以及 Q9 接头的 8 指条梳状压电换能器。实验利用该换能器测量了铝板中的人工通孔缺陷，获得了较好的回波信号。由此认为，梳状压电换能器可以用于 Lamb 波的检测，且能够得到较为单一的 Lamb 波信号，利于缺陷的检测与识别。

#### 参考文献

- [1] Worlton, D C. ULTRASONIC TESTING WITH LAMB WAVES. United States: N. p., 1956. Web.
- [2] 刘镇清, 黄瑞菊. 薄板声 - 超声检测超声传播模式的实验研究 [J]. 声学学报, 2000, (03): 268-273.
- [3] 王丙泉, 赵勃. 复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(08): 100-108.
- [4] S. P. Pelts, D. Jiao and J. L. Rose, "A comb transducer for guided wave generation and mode selection," 1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings, San Antonio, TX, USA, 1996, pp. 857-860 vol. 2.
- [5] Rose, J.L., Pelts, S.P., Cho, Y. (1999). A Comb Transducer Model for Guided Wave Mode Control. In: Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (eds).