

聚氨酯保温板缺陷检测设备

涂君, 蒋懋旭, 詹鑫鑫, 周扬帆, 王慧珍, 毛轶豪

(湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 由于聚氨酯夹芯板在生产中因发泡不均容易在聚氨酯泡沫层形成空洞型缺陷, 直接影响其保温效果和产品质量且不易检测。为此, 本文提出了一种从金属板外侧实施的电磁超声 SH 导波检测的快速检测方法, 通过多物理场耦合开展了 PPM EMAT 换能器结构优化设计, 通过理论分析、解析推导、仿真计算和试验验证, 建立了聚氨酯夹芯板中的 SH 导波透反射比系数与激励参数之间的关系并基于优化后换能器搭建了检测系统, 实现对聚氨酯夹芯板缺陷的快速检测。在此基础上, 提出了一种可应用于实际检测的缺陷当量大小评价方法。通过评价公式进行修正, 可消除因收、发探头之间距离变化引起的缺陷信号评价波动问题, 这对于后期实现缺陷定位具有较好的指导作用。

关键词: 电磁超声;透反射系数比;聚氨酯夹芯板;SH 导波

Polyurethane insulation board defect detection equipment

Tu Jun, Jiang Maoxu, ZhanXinxin, Zhou Yangfan, Wang Huizhen, Mao Yihao

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068)

Abstract: Due to the uneven foaming of the polyurethane sandwich panel in the production, it is easy to form hollow defects in the polyurethane foam layer, which directly affects its thermal insulation effect and product quality and is difficult to detect. To this end, this paper proposes a fast detection method for electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection implemented from the outside of the metal plate. Through multi-physics coupling, the structure optimization design of the PPM EMAT transducer is carried out. Through theoretical analysis, analytical derivation, and simulation calculation And experimental verification, established the relationship between the SH guided wave transmittance and reflectance coefficient and excitation parameters in the polyurethane sandwich panel, and built a detection system based on the optimized transducer to realize the rapid detection of defects in the polyurethane sandwich panel. On this basis, a defect equivalent size evaluation method that can be applied to actual inspection is proposed. Correction by the evaluation formula can eliminate the fluctuation of defect signal evaluation caused by the

change of the distance between the receiving and transmitting probes, which has a good guiding role for the later realization of defect location. Keywords: periodic permanent magnet electromagnetic ultrasonic transducer; Ratio of transmission-reflection coefficient; Polyurethane sandwich board; Nondestructive testing.

Keywords: Electromagnetic Ultrasound, transmittance ratio, Polyurethane Sandwich Panel, SH guided wave

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景:

随着社会的飞速发展和人民生活水平的日益提高,人们对食品、药品等保鲜易腐货物的品质方面提出了更高地要求。我国作为农业生产大国,每年保鲜易腐食品生产保持持续地增长,但我国幅员辽阔,气候差异较大,受公路、铁路和水运运输能力的限制,每年果蔬一类因冷藏运输不当造成的经济损失就达到 1000 亿元人民币。同时,我国也是药品生产和消耗大国,疫苗、生物医药制品等药品的冷藏运输已经成为制约药品冷链管理的重要瓶颈。

近年来,冷藏集装箱作为一种具有保温隔热性能,适用于冷冻藏类货物(如鲜活品、加工食品、生物医药制品等)储存运输而进行特殊设计的集装箱,以其减少冷冻藏类货物运输损耗,保证货物品质的重要作用,已逐渐成为了冷链运输体系重要的运输工具。冷藏集装箱具有调度灵活、运输温度可控、适用于多种交通运载,运输费用低等诸多优点,使其在国内外冷链运输体系中得到越来越广泛地应用。

现役的集装箱的蒙皮材料主要是冷藏箱的保温作用是依靠箱体四周不锈钢(或铝)板中间的聚氨酯硬质发泡材料来实现的。相比传统的发泡材料,它有着更好的稳定性,适合作为集装箱的保温层材料。然而不锈钢-聚氨酯泡沫板之间的粘连质量决定了集装箱的保温性能和安全性。在冷藏箱装卸和运输过程中,由于粘接问题等各种原因会造成箱体的残损,特别是在一些交通事故中会造成两侧和顶部大面积的破坏。随着国内外对集装箱的需求日益增大,关于利用超声无损检测技术对保温层粘接情况进行维护显得格外重要。

1.2 应用价值:

本课题研究目的为解决冷链运输装备聚氨酯发泡板中存在气孔等缺陷这一问题。在集装箱保温层的生产和使用中,双层板界面的各种缺陷不易被发现,投入使用时可能大大降低保温层的承载能力和保温效果。甚至会出现断裂情况造成重大财产损失。该课题拟采用超声

SH 波对保温层内部缺陷进行检测，根据 SH 波原理得到不同的幅值大小，最后对实验结果进行分析，达到缺陷的定性判断。采用的超声检测方法相比工业射线和红外热成像的检测技术，有着较大的优势。工业 CT 无损检测技术通 X 射线源或 γ 射线源对试样进行辐射，基于不同材料对于射线的吸收率和材料密度的不同，以成像的方式在底片上表征，该方法检测灵敏度和密度分辨率较高，对于裂纹、气孔、脱粘等缺陷检测能力较好，但是不能对贴合类脱粘缺陷进行检测，且其设备较复杂、庞大、价格昂贵，难以用于试样的原位检测和快速检测。红外成像检测技术其具有非接触、检测范围广、精度高等特点，但是该方法对于环境要求较高。超声波检测技术能够对金属板和复合材料都能进行检测，适用范围较广，且穿透性强灵敏度较高。能够准确对缺陷进行精准判断。

课题的实际价值不可忽视，通过超声检测技术对冷链运输装备进行定期的无损检测维护，从而防止了因粘接问题造成的保温效果差、承载能力降低的安全事故，同时也可以提高检测人员的效率，降低工作强度，提高了社会效益。因此，对于聚氨酯泡沫板缺陷检测有着十分重要的意义。

2 创新点与优势

(1) 揭示多层结构的聚氨酯发泡板中电磁超声导波传播的物理机制。

结合频散和声场响应，得出各导波模式传播规律和各模式激发强度特性，识别和区分接收信号中的各导波模式；研究导波在聚氨酯发泡板中的声场分布、透反射规律、衰减特性等，准确地检测出聚氨酯发泡板中的缺陷。

(2) 提出一种聚氨酯发泡板芯层气泡缺陷导波检测传感关键技术。

目前传统检测方法有目测法、锤击法与拉拔法，依赖检测人员的经验判断，检测效率低，准确性低。本设备利用导波方式，探测精度达到 5mm 左右，采用自动化、数字化的设计思想，代替人工判断，提高检测效率。填补市场此类无损检测设备空白，提升冷链装备行业、军工行业等大型发泡件的检测准确性和可靠性。

(3) 超声检测的导波选择。

其中，Lamb 波受到复杂边界条件限制容易发生频散和模态转换，垂直剪切波 (shear vertical wave, SV 波) 适合于检测 2-3 倍以上波长厚度的对象，而水平剪切波 (shear horizontal wave, SH 波) 衰减小、效率高、模态稳定，当板厚与波长接近或者小于波长时有明显的检测优势。SH 导波具有较多模态，其中 SH₀ 模态无频散且速度恒定，通过激励出模态单一的 SH₀ 导波可以对表层板以下的缺陷进行大面积快速探测。

(4) SH 波激励参数和换能器优化。

SH 导波从上层铝板内斜入射时，遇到丙烯酸粘接剂和聚氨酯泡沫板分界面时，均会发生反射和透射现象。如果能够有效地控制 PPM EMAT 激励出的导波在聚氨酯泡沫板中产生更大的透射能量，则更有利于发现其中的气泡缺陷。忽略 SH 导波在传播时的非线性效应与能量衰减，对传播中的位移变化情况进行分析。根据波在均质弹性体中传播特性规律和 Snell 定律可以得到 SH 导波在三层介质复合板中的位移通解，联合上述公式在 MATHCAD15 中进行计算得到最优透射比率下的激励参数，从而优化 SH 波激励参数。并通过 COMSOL 有限元仿真软件，建模设置不同尺寸规格的周期性磁铁，比较添加金属背板是否增大磁通密度，计算不同条件下动态与静态的磁场强度，进一步提高检测探头的换能效率。

(5) 缺陷导波定位方法。

根据上述聚氨酯夹芯板导波检测原理，利用单个超声激励探头和多个超声接收探头，在聚氨酯金属夹芯板外层板内发射超声波，通过扫描整块板 XY 轴的发泡程度，根据电磁超声导波 A 扫接收信号的幅值信号拟合出距离一幅值变化曲线，通过对比检测幅值曲线与拟合幅值曲线的变化率定位缺陷的位置。这种聚氨酯夹芯板缺陷用电磁超声导波检测，可以准确的定位出由于发泡工艺导致的不可视缺陷位置，同时避免对被检测试件抽样造成的不可逆损伤，提升了聚氨酯夹芯板缺陷检测定位的效率和有效性。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

用一组周期排列放置的薄 NdFeB 永磁铁与一个平面跑道线圈组成的 PPM 电磁超声换能器，通以交变电流的线圈会在铝板上表面感应出涡流；而磁铁磁化极性方向垂直于平面线圈，且相邻两个磁铁的极性相反，并在铝板中提供一个方向交替变化的静态磁场。涡流与静态磁场相互作用产生沿 $\pm Z$ 方向周期变化的洛伦兹力，从而在上层铝板内产生沿 $\pm Y$ 方向传播的 SH 导波。

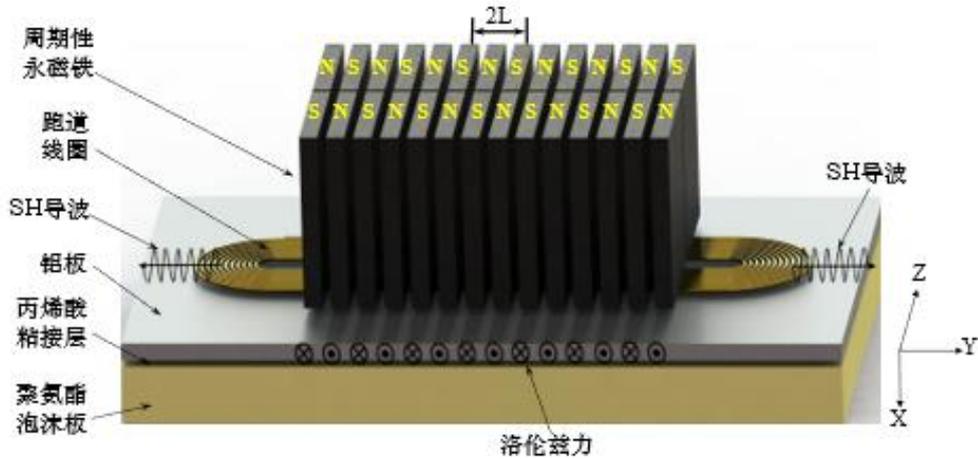


图1 PPM EMAT 洛伦兹力激励斜入射 SH 波工作原理

图2是SH导波在聚氨酯夹芯板中的传播示意图。夹芯板是由铝板、丙烯酸粘接剂和聚氨酯泡沫板三种介质材料组成，SH导波从上层铝板内斜入射时，遇到丙烯酸粘接剂和聚氨酯泡沫板分界面时，均会发生反射和透射现象。首先，PPM EMAT激励出的SH_{i1}导波以入射角 θ 在铝板内传播，遇到第一层界面时，形成SH_{r1}反射波和SH_{i2}透射波。以入射角 α 继续向下传播的SH_{i2}透射波遇到第二层界面时，进一步形成SH_{r2}反射波和SH_{i3}透射波。由于泡沫板衰减较大，以入射角 β 向下传播的SH_{i3}透射波会逐渐衰减直至消失。一旦泡沫板中出现气孔缺陷时，由于巨大的声阻抗差，则SH_{i3}透射波能量减小，而SH_{r2}反射波能量增强，从而在远端设置电磁超声接收探头，其接收到的信号幅值相对于无缺陷时会随之增大。因此，如果能够有效地控制PPM EMAT激励出的导波在聚氨酯泡沫板中产生更大的透射能量，则更有利于发现其中的气泡缺陷。

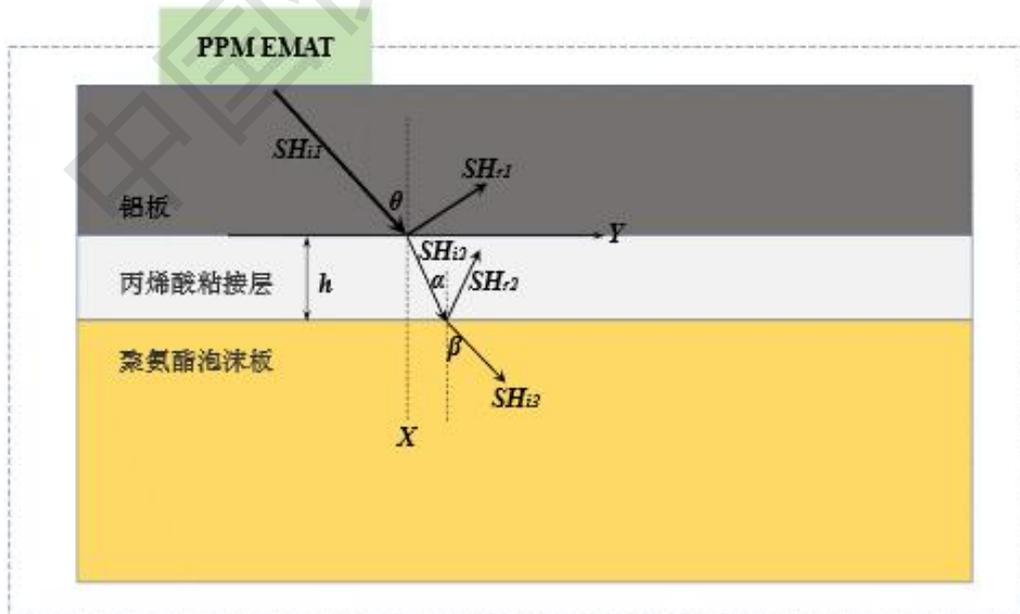


图2 聚氨酯夹芯板中 SH 导波传播示意图

3.2 设计方法

面向电磁超声导波在聚氨酯发泡板中的传播机理、缺陷检测模式导波特性、模态激发控制关键科学问题，将电磁学理论、弹性波理论、电-磁-力-声多场耦合仿真分析等方面的研究成果有机结合，机械、电磁、力、信息、数据处理多学科交叉，多层次地开展本项目所涉及的共性、关键基础技术的研究和创新。

3.3 实验验证过程

检测主机和 PC 机放置在手推车上，两者通过内部局域网互相连接后，进行数据上传和下载。导波探头通过抗干扰同轴电缆连接到检测设备上。待检测的聚氨酯发泡件放置在检测料架上，检测人员将导波探头放置在发泡件表面，开启仪器进行检测。导波探头在发泡件上移动完成整个工件的检测，所有数据记录在电脑中。整个扫描过程可以根据需求选择手动和自动。检测中发现缺陷，仪器可以选择自动报警。

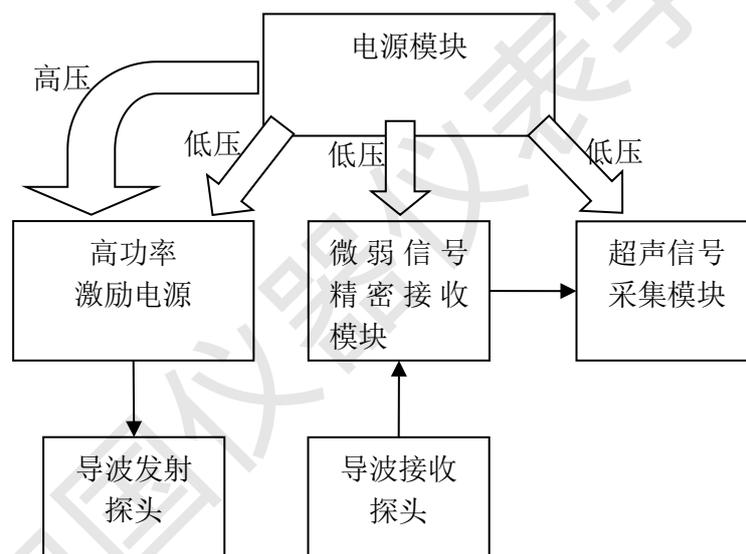


图3 检测主机原理框图

软件系统：根据功能需求和实际使用需求，开发一套与硬件系统配套的软件系统。主要实现以下功能：

- 1、控制检测主机完成工件的检测和数据的采集、分析、存储；
- 2、完成数据的自动统计，形成可供溯源的检测统计报告。

模块化与结构化的聚氨酯发泡电磁超声导波无损检测系统软件设计原则，强调先总后分的系统设计理念，将电磁超声导波无损检测系统分解并整理成相互独立的功能模块。分析该检测仪系统服务器端功能，将其划分整理成五个功能模块：参数设置模块、波形采集模块、导波数据读取模块、数据分析计算、数据存储模块等，智能混凝土超声波无损检测仪软件模

块划分，如图 4。参数设置和波形采集模块采用采集卡进行采集，获取定位信息与波形采集并行运行。波形采集模块主要分为两个模式，单次采集和连续采集，连续采集可以选择采集次数和间隔时间，方便用户根据需求选择，并可以调整波形放大倍数及阈值，具有波形显示、保存数据、实时显示声速值、实时显示波形数据等。

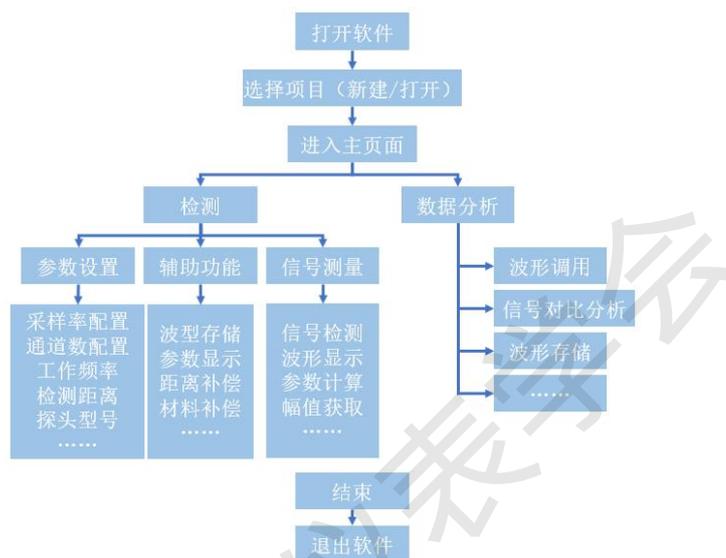


图 4 系统模块化功能图

本方案应用电磁超声导波法对聚氨酯发泡缺陷进行检测，所用到的电磁超声导波检测系统包括信号发生器、功率放大器、发射与接收探头、信号放大器、数据采集卡、电脑及上位机软件，其连接方式如图 5 所示：



图 5 电磁超声导波检测系统组成

参考文献:

- [1] 崔克清. 安全工程大辞典[M]: 化学工业出版社, 1995年: 173.(Cui Keqing. Dictionary of Safety Engineering [M]: Chemical Industry Press, 1995: 173.)
- [2] 曾雪峰, 常俊杰, 万陶磊, 等. 基于空气耦合超声兰姆波技术的固体火箭发动机脱粘检测研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(4): 524-531.(Zeng Xuefeng, Chang Junjie, Wan Taolei, et al. Research on debonding detection of solid rocket motors based on air-coupled ultrasonic Lamb wave technology[J]. Solid Rocket Technology, 2020, 43(4): 524-531.)
- [3] 温银堂, 张松, 张玉燕, 等. 新型复合材料界面粘接缺陷的 CT 检测及表征[J]. 中国测试, 2020,46(1): 12-17.(Wen Yintang, Zhang Song, Zhang Yuyan, et al. CT detection and characterization of bonding defects at the interface of new composite materials[J]. China Test, 2020,46(1): 12-17.)
- [4] 高晓进, 周金帅. 复合材料叶片包边粘接超声检测方法[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2018 (8): 102-105. (Gao Xiaojin, Zhou Jinshuai. Ultrasonic testing method for the edging and bonding of composite blades[J]. FRP/Composite Materials, 2018 (8): 102-105.)
- [5] 李建文, 王增勇, 汤光平. 金属壳体粘接结构件的超声检测[J]. 无损检测, 2010,32 (4): 283-285. (Li Jianwen, Wang Zengyong, Tang Guangping. Ultrasonic testing of metal shell bonding structural parts [J]. Non-destructive testing, 2010, 32(4): 283-285.)
- [6] 闫蓓, 刘孟轲, 马宏林. 超声检测系统设计及回波信号特征分析[J]. 电子测量技术, 2019,42 (2): 123-129. (Yan Bei, Liu Mengke, Ma Honglin. Ultrasonic testing system design and echo signal characteristic analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (2): 123-129.)
- [7] 刘嘉同, 金永, 张浩亚, 等. 基于多层界面脱粘的超声检测方法研究[J]. 理论与方法, 2020, 39 (9): 58-62. (Liu Jiatong, Jin Yong, Zhang Haoya, et al. Research on Ultrasonic Testing Method Based on Debonding of Multilayer Interface[J]. Theory and Method, 2020, 39(9): 58-62.)
- [8] 徐浪, 潘勤学, 王超, 等. 碳纤维—铝多层结构胶接质量的超声检测 [J] . 计测技术, 2015,35 (3): 33-35,69. (Xu Lang, Pan Qinxue, Wang Chao, et al. Ultrasonic testing of the bonding quality of carbon fiber-aluminum multilayer structure [J]. Measurement Technology, 2015,35(3):33-35,69.)
- [9] 陈志强. 基于机械阻抗法的多层复合结构的脱粘缺陷检测[D].电子科技大学, 2017.

- [10] 沙高峰, 蔡桂喜. 周向导波电磁超声探头(EMAT)设计与优化[J]. 仪器仪表学报, 2012, 03: 32-35. (Sha Gaofeng, Cai Guixi. The design and optimization of weekly guided wave electromagnetic ultrasonic probe (EMAT)[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 03: 32-35.)
- [11] Xu Zhang, Sheng Feng, Jun Tu, et al. An improved design of shear horizontal guided wave electromagnetic acoustic transducer, 2020, 62(8): 1-4.
- [12] P. Khalili, F. Cegla. Excitation of Single-Mode Shear-Horizontal Guided Waves and Evaluation of Their Sensitivity to Very Shallow Crack-Like Defects, 2020, 10: 1-11.

中国仪器仪表学会