

温度对电磁超声 Lamb 波检测信号的影响

何慧敏, 李松松, 高明阳, 王子君, 李虎, 郭中会

(大连海洋大学 信息工程学院, 大连 116023)

摘要:首先通过理论计算出温度与电磁超声换能器和待测件结构物理参数的关系,分析了温度对 Lamb 波在板内传播时的衰减和波速的影响,并总结出了数学模型。其次,通过有限元仿真定量分析了电磁超声换能器接收的 Lamb 波信号随温度的变化情况,为缺陷的准确定位和定量提供了参考依据。

关键词:电磁超声换能器; 温度; 物理参数; 有限元仿真

中图分类号: TG115.28; TP212

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)05-0023-05

The influence of temperature on electromagnetic ultrasonic Lamb wave detection signal

HE Huimin, LI Songsong, GAO Mingyang, WANG Zijun, LI Hu , GUO Zhonghui

(School of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Firstly, the relationship between temperature and the physical parameters of the electromagnetic acoustic transducer and the tested component structure was theoretically calculated. The influence of temperature on the attenuation and velocity of Lamb waves propagating in the plate was analyzed, and the mathematical model was summarized. Secondly, the variation of Lamb wave signals received by electromagnetic acoustic transducers with temperature was quantitatively analyzed through finite element simulation, providing a reference basis for accurate localization and quantification of defects.

Key words: electromagnetic acoustic transducer; temperature; physical parameter; finite element simulation

超声检测技术是利用超声波对金属构件内部缺陷进行检测的一种无损检测方法。相对于射线、涡流、渗透和磁粉等无损检测方法,超声检测具有灵敏度高、穿透力强、检测速度快等优点,越来越广泛地应用在各种复杂的无损检测场景中^[1-2]。

目前较成熟的压电超声检测技术只适用于10~60 °C下的检测^[3],对于50~450 °C高温状态下的检测,由于耦合剂无法承受高温,该技术则不适用。相比于压电超声检测技术,电磁超声检测技术作为无损检测领域的新技术,工作时无需对试件表

面进行预处理和添加耦合剂,而被广泛应用于不同温度下的测厚、探伤、材料晶格结构检测、材料应力检测等领域^[4-5]。

高温会影响永磁铁的磁性和曲折线圈的电导率,进而影响待测件内形成的涡流和洛伦兹力大小;高温还会影响待测件的声速、声压、密度、杨氏模量等参数,使得超声波的传播速度和单位长度的能量衰减量等发生改变^[6]。

国内外学者对于高温状态下电磁超声检测技术主要做了以下研究。LEE 等^[7]在800 °C范围内研究了铝、不锈钢和钢的超声波速和振幅的变化规律,并得出在铝、钢等非磁性材料中,超声波幅值和波速随温度升高呈单调下降的结论。LUNN 等^[8]分别对铝板和包裹有磁性铁矿石的钢板进行超声检测试验(450 °C内),结果表明温度升高时铝板的超声信号波幅呈稳定下降的趋势,而被磁铁矿包裹钢板的超声信号则呈非线性变化的特征。李铮^[9],甘文军

收稿日期:2023-02-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778104);辽宁省教育厅科学研究项目(DL202005);辽宁省渔业厅资助项目(201723)

作者简介:何慧敏(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为超声无损检测技术

通信作者:李松松(1973—),女,博士,教授,主要研究方向为超声无损检测技术及信号处理技术,lisongsong@dlou.edu.cn

等^[10]在高温下利用电磁超声换能器对铝、钢等金属材料进行研究, 总结了超声幅值和声速随温度的变化规律, 得出幅值和声速随温度升高呈非线性衰减的结论。李继承^[11]在 30~300 ℃ 条件下对碳钢试样进行厚度测试, 发现随温度升高, 碳钢材料的声速呈单调减小的趋势。

上述研究主要通过试验的方式观察接收的 Lamb 波信号与温度的关系, 进而推断温度对电磁超声无损检测的影响, 并没有给出完整的计算依据。因此, 笔者根据理论计算得到温度对电磁超声换能器及待测构件结构参数的影响, 分析温度对电磁超声 Lamb 波传播特性的影响, 并进一步通过有限元仿真来分析 Lamb 波的传播特性随温度变化的情况, 为后续缺陷的准确定位和定量提供参考依据。

1 电磁超声换能器检测机理

电磁超声换能器(EMAT)主要由金属线圈、永磁体组成。永磁铁提供垂直方向的静磁场, 通高频交流电的线圈提供交变磁场, 在磁场与电流相互作用下, 被测试件中产生超声 Lamb 波, EMAT 工作原理如图 1 所示。

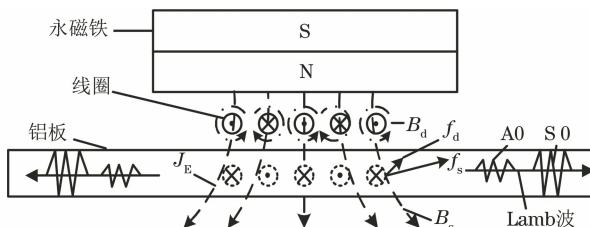


图 1 EMAT 工作原理示意

根据麦克斯韦方程数学模型^[12-13]将 EMAT 在铝板中激发电磁超声兰姆波的过程表示为

$$\nabla \times \mathbf{H}_d = \mathbf{J}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_d = \mu_m \mathbf{H}_d \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_E = G \mathbf{E} \quad (4)$$

$$f_L = f_s + f_d = \mathbf{J}_E \times \mathbf{B}_s + \mathbf{J}_E \times \mathbf{B}_d \quad (5)$$

$$F_L = \int f_L dV \quad (6)$$

式中: \mathbf{H}_d 为交变磁场的磁场强度; \mathbf{J}_0 为激励线圈电流密度; \mathbf{B}_d 为交变磁场磁感应强度; μ_m 为铝板的相对磁导率; \mathbf{E} 为涡流产生的电场强度; f_s 为静磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力; f_d 为交变磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力; \mathbf{J}_E 为感应涡流密度; \mathbf{B}_s 为静态偏置磁场

磁感应强度; f_L 为总磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力; F_L 为总磁场与涡流产生的洛伦兹力; t 为时间; G 为电导率; V 为洛伦兹力作用区域的体积。

2 温度对电磁超声换能器结构参数的影响

2.1 温度对永磁铁结构参数的影响

根据麦克斯韦方程数学模型公式(5)可知, 永磁铁形成的偏置磁场为洛伦兹力的形成提供了主要的磁场环境, 然而随着温度升高, 永磁铁的磁性会逐渐减弱, 当温度升至居里温度($T_{居里}$)以上时, 永磁铁磁性将消失。根据文献[14], 剩余磁通密度(B_r)与温度(T)之间的关系近似为

$$B_r = B_{最大} \sqrt{1 - \frac{T}{T_{居里}}} \quad (7)$$

式中: $B_{最大}$ 为最大剩余磁通密度。

相比于其他永磁铁材料, 铝镍钴永磁铁具有居里温度高(860 ℃)、矫顽性高、剩磁高(1.35 T)和温度系数低等优点, 被广泛用于高温环境。根据公式(7), 可得铝镍钴永磁铁剩磁随温度的变化关系为

$$B_r = \begin{cases} 1.35 \sqrt{\frac{1 - 133.15 - T}{1 - 133.15}}, & 0 \leqslant T \leqslant 133.15 \text{ K} \\ 0, & T > 133.15 \text{ K} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 温度对曲折线圈参数的影响

根据电流形成的微观原理, 温度的增加会增大电子无规则运动的速度, 使电阻率增加。金属的电阻率与温度基本为线性关系^[15], 可表示为

$$\rho_T = \rho_{293.15} \times [1 + \alpha(T - 293.15)] \quad (9)$$

式中: $\rho_{293.15}$ 为开氏温度为 293.15 时的电阻率; α 为电阻率温度系数; ρ_T 为开氏温度为 T 时的电阻率。

曲折线圈一般采用铜金属制成, 常温下(20 ℃)铜金属的电阻率 $\rho_{293.15}$ 与电阻率温度系数 α 分别为 $1.678 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 0.00393 。因此, 根据电阻率与电导率的关系, 温度 T 下铜的电导率 $G_{铜T}$ 为

$$G_{铜T} = \frac{5.959 \times 10^7}{1 + 0.00393 \cdot (T - 293.15)} \quad (10)$$

3 温度对待测件主要参数的影响

从微观角度分析, 随着温度的变化, 金属内部原子的无规则运动速度、原子之间的吸引力及原子形成结构的稳定性都将发生变化。从宏观角度分析, 随着温度的变化, 金属的密度、电导率、热导率等材

料性能都将发生变化。

金属材料的纵波波速 v_1 、弹性模量 E_T 、密度 ρ_T 与温度 T 的关系分别为^[16]

$$v_1 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} (1 - 11\alpha T) \quad (11)$$

$$E_T = E_0 (1 - 25\alpha T) \quad (12)$$

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{m}{V_0(1 + 3\alpha T)} = \frac{\rho_0}{(1 + 3\alpha T)} \quad (13)$$

式中: E_0 为材料绝对零度时的弹性模量; ρ_0 为材料绝对零度时的密度; α 为线膨胀系数; V_T 为金属材料温度为 T 且质量为 m 时的体积。

铝薄板测件的各项参数对温度比较敏感, 从而有利于观察温度对超声 Lamb 波传播特性的影响。因此以铝薄板作为待测件进行研究。已知温度为 293.15 K(20 °C)时, 铝板的杨氏模量为 70×10^9 Pa, 密度为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 线膨胀系数为 $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。因此, 根据式(12), (13)可知绝对零度时, 铝板的弹性模量 E_0 为 8.419×10^{10} Pa, 密度 ρ_0 为 $2754.614 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

进一步, 由式(11)~(13)可得到铝板的纵波波速 v_1 、弹性模量 E_T 和密度 ρ_T 与温度的关系

$$v_1 = 5528.405(1 - 253 \times 10^{-6} T) \quad (14)$$

$$E_T = 8.419 \times 10^{10}(1 - 575 \times 10^{-6} T) \quad (15)$$

$$\rho_T = \frac{2754.614}{1 + 6.9 \times 10^{-5} T} \quad (16)$$

金属材料的泊松比约为 0.33, 且在达到熔点之前泊松比几乎不随温度变化。泊松比 σ 与横波波速 v_s 、纵波波速 v_1 的关系^[17]为

$$\sigma = \frac{0.5(v_1/v_s)^2 - 1}{(v_1/v_s)^2 - 1} \quad (17)$$

由式(14), (17)可得横波波速为

$$v_s = 2784.754474(1 - 253 \times 10^{-6} T) \quad (18)$$

待测件的电导率影响待测件内部形成的涡流大小, 常温下(20 °C)铝金属的电阻率为 $2.6548 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 电阻率温度系数为 0.00429。

根据式(9)及电阻率与电导率的关系, 可得铝金属的电导率 $G_{\text{铝}T}$ 为

$$G_{\text{铝}T} = \frac{3.766 \times 10^7}{1 + 0.00429 \cdot (T - 293.15)} \quad (19)$$

4 温度对超声 Lamb 波传播特性的影响

4.1 温度对超声 Lamb 波传播速度的影响

根据 Lamb 波波动特征方程表达式并结合式(14), (18), 得到超声 Lamb 波频散特性为

$$\tan \frac{fd \sqrt{c_p^2 - v_s^2(T)}}{c_p v_s(T)} \left| \tan \frac{fd \sqrt{c_p^2 - v_1^2(T)}}{c_p v_1(T)} \right| = \left\{ \frac{4v_s^3 \sqrt{[c_p^2 - v_1^2(T)][c_p^2 - v_s^2(T)]}}{v_1(T)[2v_s^2(T) - c_p^2]} \right\}^{\pm 1} \quad (20)$$

式中: d 为板厚; f 为激发频率; c_p 为相速度; $+1$ 表示对称模式, -1 表示反对称模式。

根据相速度和群速度的定义, 使用 MATLAB 软件对铝板频散特性进行求解, 得到频散曲线群速度和相速度曲线如图 2 所示。

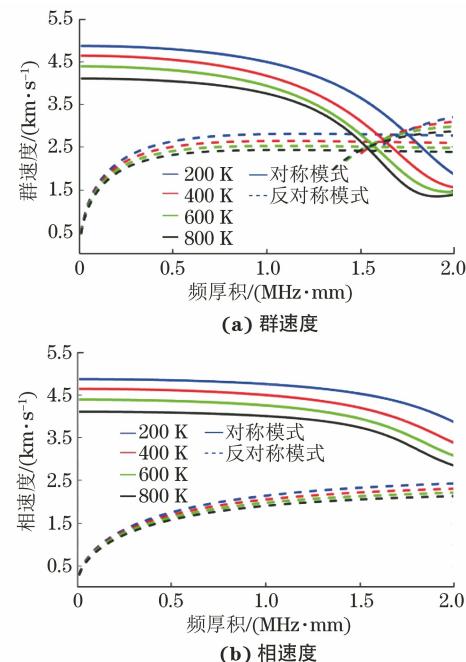


图 2 铝板群速度和相速度频散曲线

根据图 2 的频散曲线可以得出以下结论: ① 在频厚积确定的情况下, A0 模态和 S0 模态的群速度和相速度都随着温度的升高而降低; ② 在超声波波长(2 个导线间距)和频率确定的情况下, A0 模态和 S0 模态最佳激发的频厚积随温度升高而减小。

4.2 温度对超声 Lamb 波传播能量衰减的影响

声波在介质中传播时, 随着传播距离的增加, 能量会逐渐衰减, 其衰减程度与扩散、吸收、散射等因素有关。声压和声强的衰减规律为^[18]

$$P_x = P_0 e^{-\beta x} \quad (21)$$

$$I_x = I_0 e^{-2\beta x} \quad (22)$$

式中: P_x 为距声源 x 处的声压; I_x 为距声源 x 处的声强; x 为声波与声源之间的距离; β 为衰减系数。 P_0 为声源处声压, I_0 为声源处声强。

随着温度升高, 一方面介质内质点的运动速度增大, 导致质点间的内摩擦增大, 吸收衰减增大; 另一方面介质的密度减小, 质点之间的空隙变大, 散射

衰减增大。因此,衰减系数与温度呈正相关,声压和声强衰减程度随着温度升高而加剧,声能随温度升高而衰减。

5 仿真与分析

根据电磁超声换能器的结构和工作特点,建立了二维多物理场(电场、声场、结构场)有限元仿真模型,其主要参数如表 1 所示。

表 1 电磁超声换能器模型相关参数

参数	数值
试件(铝)厚度/mm	1
试件(铝)泊松比	0.33
发射接收距离/mm	500
永磁铁剩余磁通密度/T	1.35
永磁铁尺寸(长×宽)/mm	50×50
提离距离/mm	1
激发频率/kHz	500

5.1 信号发射

在线圈上施加的脉冲激励电压信号 $V(t)$ (波形见图 3)为

$$V(t)=1\,000 \exp \left[-\left(\frac{f_0 t - 4}{2} \right)^2 \right] \sin (2\pi f_0 t) \quad (23)$$

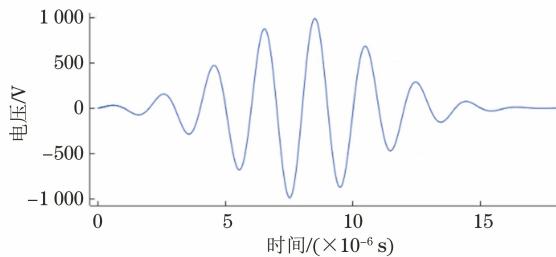


图 3 脉冲激励电压信号波形

表 2 温度对 Lamb 波检测信号的影响

不同温度下 Lamb 波波速			不同温度下 Lamb 波能量		
温度/K	A0 模态波速/(m·s⁻¹)	S0 模态波速/(m·s⁻¹)	温度/K	A0 模态幅值/(mN·m⁻³)	S0 模态幅值/(mN·m⁻³)
200	2 821.671	4 901.961	200	1.032 897	2.280 899
400	2 732.240	4 545.454	400	0.293 261	0.721 510
600	2 577.320	4 251.701	600	0.110 102	0.319 232
800	2 436.647	3 906.250	800	0.051 936	0.154 633

Lamb 波传播速度随着温度升高而减小的主要原因是 A0 模态和 S0 模态的群速度减小。

Lamb 波幅值随温度升高而降低的主要原因为:(1)曲折线圈的电导率和铝板的电导率降低导致铝板内部形成的涡流变弱;(2)永磁铁磁性下降,导致形成洛伦兹力需要的偏置磁场强度减小;(3)声

5.2 信号接收与对比

在距离超声换能器激励端 500 mm 处接收铝板内的超声 Lamb 信号。为了对比温度对超声 Lamb 波的整体影响,分别在温度为 200, 400, 600, 800 K 时进行仿真,仿真结果如图 4 所示。

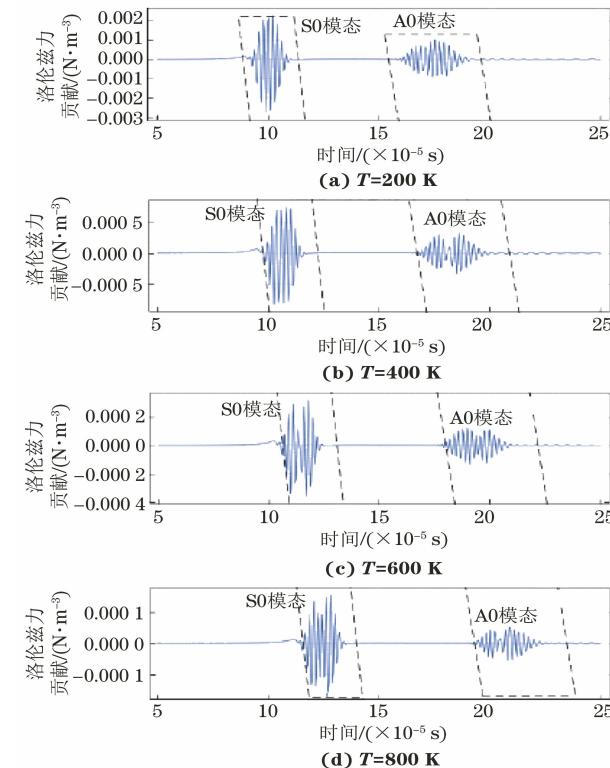


图 4 不同温度下铝板内的 Lamb 波信号

由图 4 可知,温度对超声 Lamb 波信号的影响主要体现为:(1) Lamb 波传播速度随温度升高而减小,导致回波信号的位置发生明显变化;(2) Lamb 波幅值随着温度升高而降低。温度对 Lamb 波检测信号波速和能量的影响如表 2 和图 5 所示。

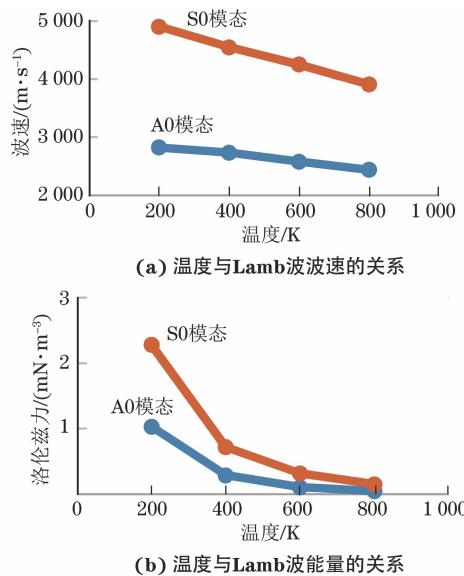


图 5 温度对 Lamb 波检测信号的影响曲线

分析了温度对超声 Lamb 波波速和声能的影响。最后通过有限元仿真分析了 Lamb 波的速度及强弱随温度变化的情况,试验结果和理论分析一致。结果可为后续缺陷检测的准确定位及定量分析提供参考。

参考文献:

- [1] 李孟奇,李勇,苏冰洁,等.金属小径管外壁裂纹的内检式电磁超声导波检测[J].无损检测,2022,44(10):1-5,51.
- [2] 王怡,刘南希,李祚华,等.考虑温度影响的基于超声回波幅度谱的钢构件应力检测[J].无损检测,2022,44(12):12-17.
- [3] 崔佳乐.兰姆波单一模态的激励及与缺陷相互作用的研究[D].大连:大连理工大学,2015.
- [4] 黄焕东,张皓琦,竺国荣,等.大型锅炉系统内高温管道检测技术研究[J].管道技术与设备,2022(6):31-34,48.
- [5] 杨理践,邢燕好,张佳,等.基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J].仪器仪表学报,2018,39(4):150-160.
- [6] 王亚平,霍峰,王海生,等.高温对电磁超声检测的影响及其补偿算法[J].传感器与微系统,2020,39(11):114-117,121.
- [7] LEE S S, AHN B Y. Emat application at high temperature [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 1992, 7(1/2/3/4/5/6): 253-261.
- [8] LUNN N, DIXON S, POTTER M. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel[J]. NDT and E International, 2017, 89: 74-80.
- [9] 李铮.电磁超声换能器特性及高温检测关键技术研究[D].太原:中北大学,2020.
- [10] 甘文军,蔡家藩,李铮,等.高温超声探头的制作及性能试验[J].无损检测,2020,42(10):76-78,84.
- [11] 李继承.电磁超声在高温承压设备壁厚检测中的应用[J].特种设备安全技术,2021(2):52-53,56.
- [12] CUI L, ZHAO Y, ZHAO P, et al. Review of noncontact ultrasonic nondestructive testing for the solid materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(528): 346-352.
- [13] ROSE J L. Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(3): 575-583.
- [14] 陈春天,魏玮.金属电阻-温度线性关系准确度条件[J].大学物理实验,1997,10(1):45-46.
- [15] 陈世涛,徐志东.金属材料中声速随温度变化规律的探讨[C]//数学·力学·物理学·高新技术研究进展——2006(11)卷——中国数学力学物理学高新技术交叉研究会第 11 届学术研讨会论文集.武夷山:中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会,2006:342-344.
- [16] 虞雪芬,叶凌伟,夏立.电磁超声检测中高温对横波声速的影响[J].轻工机械,2015,33(4):54-56.
- [17] 禹化民.Q235 钢板腐蚀缺陷超声 Lamb 波检测研究[D].天津:天津大学,2014.
- [18] 曹广权.温度对超声波探伤灵敏度和缺陷定量定位的影响[J].焊管,2003,26(1):52-55,62.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告