高温换热器电磁超声SV波斜入射检测的试验研究与应用

钱盛杰[1] 汪 磊[1*] 吕 圣[1] 张 亮[2] 李斌彬[1] 熊晨凯[1] 周 鑫[1]
沈正祥[1] 阮星翔[1]
1.宁波市特种设备检验研究院,宁波,315048
2.宁波恒信工程检测有限公司,宁波,315200

摘要:针对高温设备埋藏缺陷缺乏高效无损检测方法的问题,采用电磁超声SV波斜入射成像技术开展了试验研究与工程应用。提出了电磁超声SV波缺陷的定位方法,制作了含缺陷平板刻槽试块与对接焊缝试块,并完成缺陷定位和定量的检测验证。最后,将该技术用于高温换热器检测工程实践。试验与工程实践结果表明,该技术可实现高温设备内部典型缺陷的定位与定量检测。

关键词:电磁超声SV波;检测试验;高温换热器;工程应用
中图分类号:TG115.28
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Experimental Investigation and Application of Electromagnetic Acoustic SV-wave Testing with Oblique Incidence on High-temperature Heat Exchangers

QIAN Shengjie[1] WANG Lei[1*] LYU Sheng[1] ZHANG Liang[2] LI Binbin[1] XIONG Chenkai[1]
ZHOU Xin[1] SHEN Zhengxiang[1] RUAN Xingxiang[1]
1.Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo, Zhejiang, 315048
2.Ningbo Hengxin Engineering Testing Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200

Abstract: To address the lack of efficient nondestructive testing solutions for buried defects in high-temperature equipment, this paper presents an experimental investigation and engineering application of electromagnetic ultrasonic SV-wave oblique-incidence imaging technology. A defect localization method was derived based on the operating principle of the electromagnetic ultrasonic SV-wave. Verification of defect localization and quantification was carried out using fabricated grooved and butt-weld blocks. The proposed method was then applied to the practical inspection of high-temperature heat exchangers. Results from both laboratory tests and field applications demonstrate that the method enables accurate localization and quantitative detection of typical internal defects in high-temperature equipment.

Key words: electromagnetic ultrasonic SV-wave; testing experiment; high-temperature heat exchanger; engineering application

0 引言

锅炉、压力容器、管道等高温承压设备的焊接接头是结构的薄弱环节,其内部埋藏缺陷的检测是设备安全运维的关键问题。现阶段,磁粉、涡流等方法仅适用于高温焊缝表面/近表面的缺陷检测[1-2],针对埋藏缺陷的常规检测方案存在明显局限:①高温压电超声检测需耦合剂、预处理打磨,且耦合剂在高温下易固化,检测效率极低;②数字射线检测受设备直径、壁厚限制,且保温层厚度会降低成像质量。因此,亟需开发克服上述不足的高温埋藏缺陷高效检测方法。

电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer,EMAT)检测依靠电磁耦合激发超声波,无需耦合剂,可实现非接触检测,适配高温、表面粗糙等复杂工况。斜入射电磁超声垂直剪切(shear-vertical,SV)波可将声束传入焊缝深部,使高温设备不打磨在线检测成为可能[3-5]。文献[6-8]明确了曲折线圈结构与SV波偏转角度的关系,实现了线聚焦斜入射SV波的激励。TAKISHITA等[9]提出的点聚焦方法提高了SV波的检测精度与信号分辨率。WANG等[10]、CHEN等[11]通过双线圈相位差设计实现了SV波的单向线聚焦,将回波幅值增大10%。张金等[12]、付悦等[13]明确了曲率、线圈参数对SV波声场与检测

收稿日期:2025-07-30
基金项目:浙江省市场监督管理局科研计划(QN2023437,ZC2023062);宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z165)

性能的影响规律。上述研究解决了斜入射SV波的激励优化问题，但研究成果多聚焦于常温下的基础特性，针对高温承压设备埋藏缺陷的试验验证与工程应用仍是空白。

针对上述问题，笔者开展了电磁超声SV波斜入射成像技术的研究，并通过人工缺陷试块试验验证了所提方法的有效性，高温换热器工程检测验证了所提方法的技术实用性。

1 电磁超声SV波检测的基本原理

EMAT主要由曲折线圈、永磁体、待测工件组成。铁磁性材料的EMAT检测中，洛伦兹力和磁致伸缩力起主要作用。非铁磁性材料的EMAT检测中，洛伦兹力起主要作用。图1为电磁超声斜入射SV波检测的基本原理图，曲折线圈通以交变电流J_c时，交变电流会在线圈周围产生交变磁场B_d，被测工件的表面产生同频率、反相位的电涡流J_e。电涡流在交变磁场B_d和永磁铁磁场B_S的共同作用下产生的洛伦兹力为[14]

$$F=J_e(B_s+B_d) \tag{1}$$

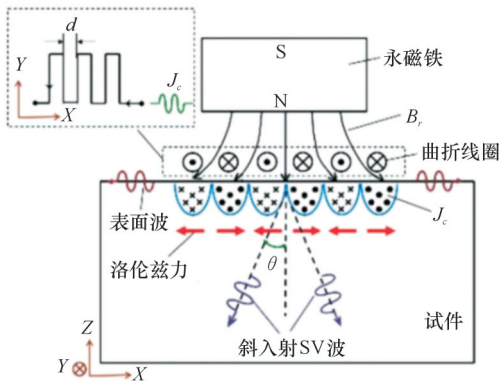


图1 电磁超声斜入射SV波的检测原理

Fig.1 Principle of electromagnetic ultrasonic SV waves oblique incidence testing

根据惠更斯原理，洛伦兹力引起的质点振动会在工件产生超声波。通过调整曲折线圈各匝导线的间距，可在试件内部产生表面波和斜入射SV波。SV波入射角θ的数学关系式为[6]

$$\sin\theta=\frac{\lambda}{2d}=\frac{c}{2df} \tag{2}$$

式中：λ为超声波波长；d为曲折线圈的匝间距；c为SV波声速；f为激励频率。

由式(2)可得，超声波波长λ一定时，通过调整曲折线圈各匝导线的间距d，可改变斜入射SV波的入射角θ；曲折线圈各匝导线间距d一定时，调整激励频率f可改变斜入射SV波的入射角θ。

2 SV波的缺陷定位计算方法

电磁超声SV波最佳检测灵敏度对应的入射角较小。检测小壁厚工件时，超声波往往需经过多次的底面反射和表面反射才能到达缺陷，给缺陷定位造成一定困难。缺陷定位不准影响对缺陷性质的判断，因此EMAT检测缺陷的同时，有必要定位缺陷。

电磁超声探头在工件表面激励的超声波经过多次底面反射和表面反射，最终到达缺陷位置。最后一次反射的位置可能在底面或面，因此本文给出缺陷定位的两种方法：①最后一次反射经底面到达缺陷的定位计算方法，简称模式1；②最后一次反射经表面到达缺陷的定位计算方法，简称模式2。

如图2所示，假设超声波从工件表面激励起点到缺陷位置经历的总声程为S，超声波从起点到缺陷位置、再按同路径返回并被探头接收的时间为t，若超声波声速为c，则有$S=ct/2$。定义SV波从工件表面斜入射至底面传播的单次声程为l(不考虑反射声程)、l的水平投影为m，则有

$$l=T/\cos\theta \tag{3}$$

$$m=T\tan\theta \tag{4}$$

式中：T为工件厚度。

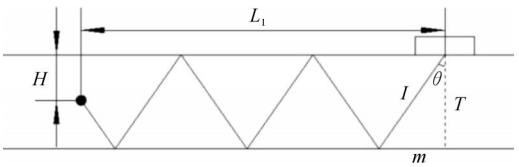


图2 模式1(经底面反射)示意图

Fig.2 Schematic diagram of mode 1(reflected by the bottom surface)

假设缺陷由第n次波发现，其中，n为对S/l向上取整得到的整数。定义n为奇数时，采用模式1进行定位计算，对应的定位计算公式为

$$L_1=(n-1)T\tan\theta+[ct/2-(n-1)T/\cos\theta]\sin\theta \tag{5}$$

$$H_1=T-[ct/2-(n-1)T/\cos\theta]\cos\theta \tag{6}$$

式中：L_1、H_1分别为n为奇数时探头中心与缺陷的水平距离和缺陷深度。

n为偶数时，采用图3所示的模式2进行定位

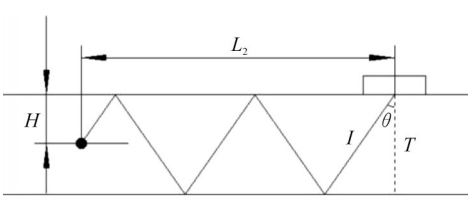


图3 模式2(经表面反射)示意图

Fig.3 Schematic diagram of mode 2(reflected by the upper surface)

计算，此时的水平距离L_2的计算公式与模式1一致，但缺陷深度计算公式改为

$$H_2=[ct/2-(n-1)T/\cos\theta]\cos\theta \tag{7}$$

3　试验研究

在实验室条件下，采用电磁超声SV波检测含人工缺陷的平板刻槽试块（对比试块）和对接焊缝试块（模拟试块），其中，平板刻槽试块用于缺陷定位和定量测试研究，对接焊缝试块用于模拟接近实际检测工况的SV波检测结果。

3.1　平板刻槽试块测试

厚度26 mm的平板刻槽试块中，刻槽1～3的长度均为41 mm，深度分别为3 mm、2 mm和1 mm，如图4所示。为获得SV波检测方法的检测精度，对刻槽缺陷进行定量测试和定位测试。由图5可发现清晰的3个刻槽缺陷，刻槽1～3的长度测量值分别为41.5 mm、41.2 mm和41.8 mm，与实际长度接近。多次测量的长度误差均不超过5.0%。

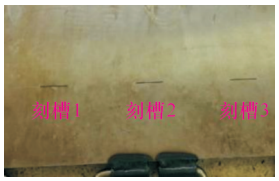


图4　刻槽试块图

Fig.4　Groove test block diagram

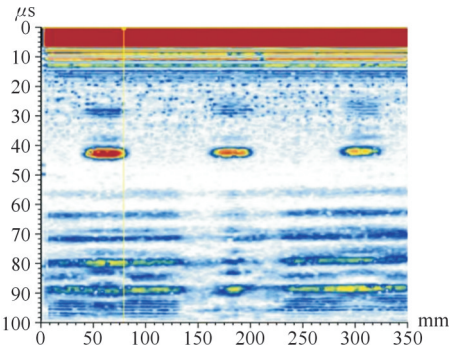


图5　SV波B扫检测图谱

Fig.5　SV wave B-scan detection image

SV波A扫检测图中，用闸门套住缺陷波，分别测量刻槽1～3的回波高度。调节仪器内部的增益至15.0 dB，使刻槽1的回波为100%波高，则刻槽2回波为83%波高，刻槽3回波为58%波高，如图6所示。由此可以看出，电磁超声SV波检测可识别1 mm深度的刻槽缺陷；对于深度1～3 mm的刻槽，刻槽深度越大，回波高度越大。以此增益15 dB为基准检测灵敏度，可以实现对高度为1～3 mm缺陷的定量表征。

采用曲折线圈进行电磁超声SV波检测，各

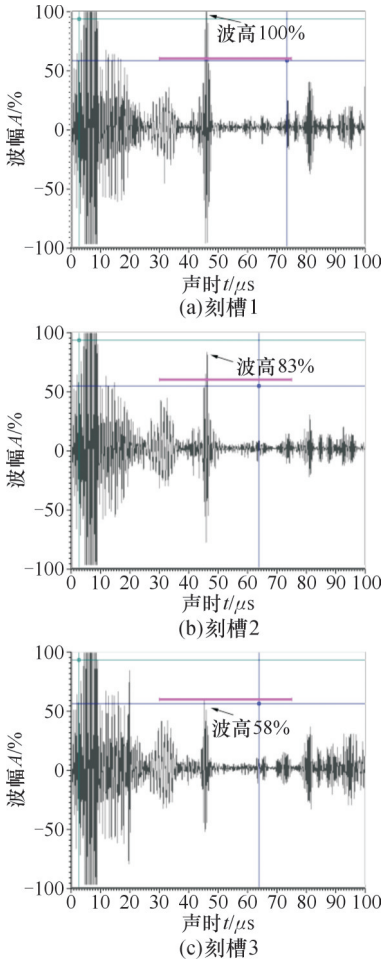


图6　SV波A扫检测图

Fig.6　SV wave A-scan detection image

匝导线的间距d为1.524mm，激励频率f为1889 kHz，超声波声速c为3.22 mm/μs（温度80 ℃），根据式(2)计算可得入射角θ=35°。对于刻槽1，由仪器读取的声时42.0 μs可得总声程S=67.6 mm，单声程l=31.7 mm，刻槽缺陷由三次波发现（n=3）。根据模式(2)的SV波缺陷定位计算方法得到L_2=40.2 mm。实际测量发现刻槽缺陷与探头中心的水平距离为40.0 mm。根据式(7)可得刻槽1的深度H_2=3.1 mm，与真实深度3.0 mm非常接近。

3.2　对接焊缝试块测试

对接焊缝试块的材质为20号钢，厚度为12 mm，其中，缺陷1为长5.0 mm、深10 mm的根部热影响区裂纹，缺陷2为长15.0 mm、深3.0 mm的条形缺陷。为模拟高温工况，将试块置于高温加热台上加热至80 ℃，此时的SV波声速为3.22 mm/μs。检测图谱如图7所示。不同温度下，横通孔试块测试得到的电磁超声SV波声速如表1所示。

根据SV波缺陷定位方法，确定缺陷1位于根部热影响区，缺陷位置与探头中心相距25.2 mm，探测缺陷的长度为15.5 mm（长度误差为

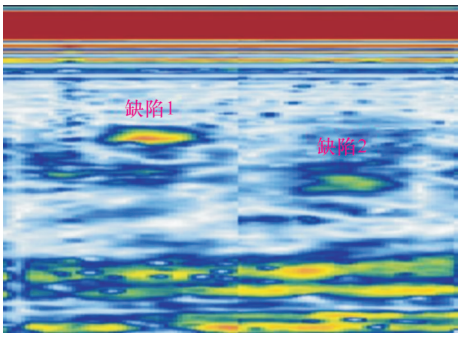


图7 对接焊缝试块检测图谱

Fig.7 Detection image of butt weld test block

表1 电磁超声SV波在不同温度下的声速

Tab.1 Sound velocity of electromagnetic ultrasonic SV wave at different temperatures

温度/℃	20	50	80	100	150	200	250
声速/(mm·μs^{-1})	3.25	3.24	3.22	3.21	3.18	3.15	3.12

0.5 mm)，深度为10.8mm(深度误差为0.8 mm)。缺陷2位于焊缝中心，缺陷位置与探头中心相距33.6 mm，探测缺陷的长度为16.0 mm(长度误差为1.0 mm)，深度为2.6 mm(深度误差为0.4 mm)。对比缺陷的实际尺寸与探测尺寸可知，SV波检测获得的高温对接焊缝缺陷的长度定量误差不超过1.0 mm，深度定位误差不超过0.8 mm，定量和定位的准确性均较高。

4 工程应用

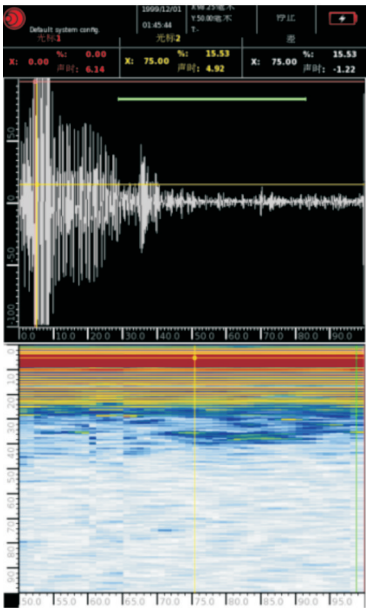
为验证电磁超声SV波检测技术的工程应用有效性和准确性，检测了某化工企业的高温换热器。该换热器的工作温度为80 ℃，高温超声检测的常用耦合剂在设备表面快速凝固、难以检测，且需打磨设备表面。采用电磁超声体波SV检测技术，根据实验室条件确定的焊缝区SV波斜入射扫查工艺，快速检测高温、不打磨焊接接头。3台换热器中，每个换热器均有一条环焊缝、一条纵焊缝。检测共发现3处焊接缺陷。某壁厚10 mm换热器的根部热影响区发现一处缺陷，见图8。

仪器读取的缺陷声时t为37.6 μs，计算可得电磁超声SV波斜入射的单声程l为12.2 mm。全声程S约为单声程的5倍。因此，该缺陷在5次波末端和6次波起点的之间即焊缝根部。最后，计算可得L_1为35.0 mm。现场测量发现，探头中心与焊缝边缘的距离为35.0 mm，与计算结果一致。

电磁超声发现缺陷后，采用相控阵技术对缺陷进行定量和定位检测，如图9所示。相控阵检测发现缺陷深度为9.5 mm，水平位置在焊缝边缘。相控阵和电磁超声SV波的检测结果基本吻



(a)检测现场图



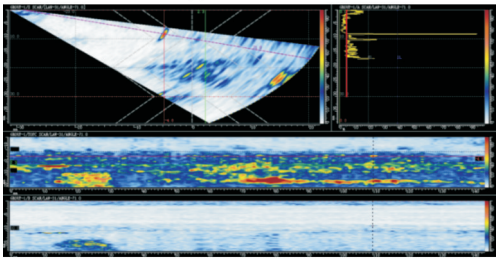
(b)检测图谱

图8 检测现场图和检测图谱

Fig.8 Detection scene diagram and detection image



(a)检测现场图



(b)检测图谱

图9 采用相控阵技术的检测现场图和检测图谱

Fig.9 Detection scene diagram and detection image with phased array technology

合，由此可见，电磁超声SV波检测可较好实现对高温设备对接焊缝缺陷的识别和定位。

5　结论

1)通过理论推导得出电磁超声SV波的缺陷定位计算方法，并推导出缺陷定位计算公式。

2)含缺陷平板刻槽试块和对接焊缝试块的检测结果表明，电磁超声SV波检测技术可检测出上述试块中的典型缺陷，并能实现缺陷位置与尺寸的精确定量表征。

3)电磁超声SV波检测可发现高温换热器的焊接缺陷，为高温不打磨检测提供一种高效方法。

参考文献：

[1] 朱金朝，宋军昌，丁春晓，等. 在役高温蒸汽管道的交流电磁场检测[J]. 无损检测，2022，44(12)：58-61.
ZHU Jinzhao，SONG Junchang，DING Chunxiao，et al. ACFM Detection of In-service High Temperature Steam Pipeline [J]. Nondestructive Testing，2022，44 (12)：58-61.

[2] 刘召东，别磊，杨忠杰. 基于电磁场检测技术(ACFM)在线高温电站阀门检测[J]. 中国标准化，2023(4)：150-155.
LIU Zhaodong，BIE Lei，YANG Zhongjie. Online Detection of Valve in High-temperature Power Plant Based on Alternating Current Field Measurement (ACFM)[J]. China Standardization，2023(4)：150-155.

[3] 李玉倩，曲铭琳，陈桂娟，等. 电磁超声作用下Cf/6061Al表面填缝行为研究[J]. 焊管，2025，48(8)：114-122.
LI Yuqian，QU Minglin，CHEN Guijuan，et al. Research on Filling Behavior of Cf/6061Al Surface under Electromagnetic Ultrasound[J]. Welded Pipe and Tube，2025，48(8)：114-122.

[4] 程偲，姜春，宋旖旎，等. 直缝焊管焊缝质量电磁超声检测方法研究[J]. 焊管，2023，46(1)：19-23.
CHENG Cai|Si)，JIANG Chun，SONG Yini，et al. Electromagnetic Acoustic Transducer Method of Welding Seam Quality of Longitudinal Welded Pipe[J]. Welded Pipe and Tube，2023，46(1)：19-23.

[5] 邱公喆，康宜华，程偲，等. 连续油管分层缺陷磁导率扰动电磁检测方法与检测系统[J]. 焊管，2023，46(5)：36-43.
QIU Gongzhe，KANG Yihua，CHENG Si，et al. Method and System of Magnetic Permeability Perturbation Detection for Delaminations in Coiled Tubing[J]. Welded Pipe and Tube，2023，46(5)：36-43.

[6] OGI H，HIRAO M，OHTANI T. Line-focusing of Ultrasonic SV Wave by Electromagnetic Acoustic Transducer [J]. The Journal of the Acoustical Society of America，1998，103(5)：2411-2415.

[7] OGI H，HIRAO M，OHTANI T. Line-focusing Electromagnetic Acoustic Transducers for the Detection of Slit Defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics，Ferroelectrics and Frequency Control，1999，46(2)：341-346.

[8] 唐琴，石文泽，卢超，等. 曲面构件斜入射SV波EMAT辐射声场特性分析[J]. 仪器仪表学报，2020，41(5)：221-233.
TANG Qin，SHI Wenze，LU Chao，et al. Analysis on the Radiated Sound Field Characteristics of Angled SV Wave EMATs Operated on a Curved Surface Component [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2020，41 (5)：221-233.

[9] TAKISHITA T，ASHIDA K，NAKAMURA N，et al. Development of Shear-vertical-wave Point-focusing Electromagnetic Acoustic Transducer[J]. Japanese Journal of Applied Physics，2015，54(7S1)：07HC04.

[10] WANG Shujuan，SU Riliang，CHEN Xiaoyang，et al. Numerical and Experimental Analysis of Unidirectional Meander-line Coil Electromagnetic Acoustic Transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics，Ferroelectrics，and Frequency Control，2013，60(12)：2657-2664.

[11] CHEN Xiaoyang，SU Riliang，ZHANG Heng，et al. Influence of Coil Parameters on Transduction Performance of Unidirectional EMATs for Rayleigh Wave[C]//2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing：New Technology and Application. IEEE，2013：150-154.

[12] 张金，董子华，石文泽，等. 厚壁管道线聚焦斜入射SV波EMAT辐射声场分析[J]. 仪器仪表学报，2020，41(6)：150-160.
ZHANG Jin，DONG Zihua，SHI Wenze，et al. Radiation Sound Field Analysis of Line-focusing Angled SV Wave EMATin Thick-walled Pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2020，41(6)：150-160.

[13] 付悦，李素军，陈果，等. 高温铝合金电磁超声SV波检测方法研究[J]. 传感技术学报，2023，36(3)：380-388.
FU Yue，LI Sujun，CHEN Guo，et al. Study on Detecting Method of SV Wave Electromagnetic Ultrasonic in High-temperature Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2023，36(3)：380-388.

[14] ISLA J，CEGLA F. Optimization of the Bias Magnetic Field of Shear Wave EMATs[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics，Ferroelectrics，and Frequency Control，2016，63(8)：1148-1160.

（编辑　张　洋）

作者简介：钱盛杰，男，1988年生，高级工程师。研究方向为承压类特种设备检验检测。发表论文30余篇。E-mail：939679156@qq.com。**汪　磊***（通信作者），男，1988年生，高级工程师。研究方向为承压类特种设备检验检测。发表论文10余篇。E-mail：376928157@qq.com。

本文引用格式：

钱盛杰，汪磊，吕圣，等. 高温换热器电磁超声SV波斜入射检测的试验研究与应用[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1651-1655.

QIAN Shengjie，WANG Lei，LYU Sheng，et al. Experimental Investigation and Application of Electromagnetic Acoustic SV-wave Testing with Oblique Incidence on High-temperature Heat Exchangers[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1651-1655.