电磁超声波组合探伤在无缝钢管中的应用*

张玉海,雷 鸣,马 超

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了电磁超声波的工作原理以及无缝钢管电磁超声波探伤、电磁超声钢管检测的测厚原理,从多种形式波形和非接触式检测等多角度阐述了无缝钢管电磁超声波探伤的应用特点。结合目前包钢钢管公司Φ460 mm机组使用的基于电磁超声原理探伤检测设备NORDINKRAFT的实际应用情况进行分析,验证了电磁超声波探伤在钢管生产企业产品在线质量控制的应用效果。

关键词: 电磁超声波; 无缝钢管; 探伤

中图分类号: TG115.28^{+5} **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)06-0074-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.06.005

Application of Electromagnetic Ultrasonic Combination Nondestructive Detection for Seamless Steel Pipe

Zhang Yu-hai, Lei Ming, Ma Chao

(*Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is introduced the working principle of electromagnetic ultrasonic, thickness measure principle of electromagnetic ultrasonic detection and electromagnetic ultrasonic steel pipe testing as well as elaborated the application characteristics of electromagnetic ultrasonic detection process for seamless steel pipe from such aspects as multiform waveform and non-contact detection. The application effects of electromagnetic ultrasonic detection process for on-line quality control of product in steel pipe manufacturer are verified by the analysis combining with practical application situations of flaw detection equipment NORDINKRAFT based on the principle of electromagnetic ultrasonic used in Φ460 mm unit in Steel Tube Co. of Baotou Steel.

Key words: electromagnetic ultrasonic; seamless steel pipe; flaw detection

无损检测作为一种重要的质量保证手段,在无缝钢管的质量控制中,其重要性日益突出。压电式超声波探伤技术使用耦合剂来确保与待检验样品的良好耦合,这就对钢管的表面质量提出了较高的要求,限制超声测量技术的应用范围和测量的自动化程度。电磁超声测量技术不需要声耦合介质,可以达到比压电超声检测手段更高的缺陷识别灵敏度。目前主流的电磁超声设备均为探头贴合无缝钢管表面的形式,同样可以实时检测无缝钢管的局部缺陷,从而进行定位、定量,同时电磁超声波能在高温环境下运行,因此电磁超声波满足无缝钢管的在线无损检测。

电磁超声波(EMTA)与压电超声检测技术相比,具有较高的精度,非接触不需要耦合剂,适用于

* 收稿日期:2021-03-01

作者简介:张玉海(1980-),男,内蒙古包头市人,技师,现从事无损检测技术管理工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高温环境检测并且能够激发出更多的超声波形。其原理是利用电磁耦合方法接收和激发超声波。本文从技术原理出发，总结了电磁超声波技术在无缝钢管中的应用及特点。

1　电磁超声波的工作原理介绍

电磁超声波的工作原理是将金属导体置于交变磁场中，金属导体内部产生涡流的同时受到外部磁场产生的洛伦兹力的作用，在此类交变应力的作用下产生的应力波的频率在超声波的频率范围内，产生超声波。金属质点在返回声压的作用下振动，同时受到磁场的作用导致了涡流线圈两端的电压改变，通过固定的装置接收并放大显示。这种不需要耦合介质、直接发生在探头与金属表面之间的激发和接收的超声波的方法就称为电磁超声[1]。

由上所述，电磁超声检测装置主要是由内置的高频线圈和外加磁场以及金属导体试样三部分组成，电磁超声装置的基本结构如图 1 所示。

换能器的换能转换过程由内置的涡流线圈产生的交变电流以及外部磁场的作用下在金属表面共同完成。也就是说，电磁超声波技术适用于金属导电材料。

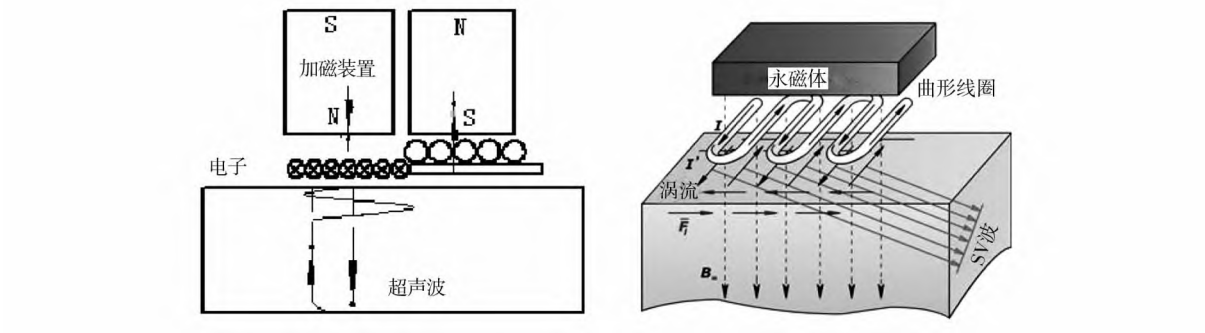


图 1　电磁超声装置结构

电磁超声波有两种效应，洛伦兹力效应和磁致伸缩效应。如图 1 所示，电磁超声装置中的高频线圈在接通高频激励电流以后，就会在金属试件表面上形成感应涡流，这种感应涡流在外部磁场的洛伦兹力的作用下会产生电磁超声波；同时，在强大的脉冲电流形成的脉冲磁场与外加磁场的共同作用下，金属导体发生磁致伸缩产生的磁致伸缩力也会生成不同波形的电磁超声波。外部磁场的强度、激励电流的实际频率决定了洛伦兹力和磁致伸缩效应的强弱。

2　电磁超声波探伤的工作原理

2.1　电磁超声波探伤的工作原理

超声波能以不同折射角向工件内部倾斜入射，电磁超声换能器（EMAT）在无缝钢管检测中能实现纯横波检测。在不更换换能器的情况下，实现波型模式的自由选择。在其他条件都不变的前提下，只需要改变电信号频率，就能够改变声波的反射弧度。

根据生产试验结果，通过改变工作频率改变初始脉冲谱，可以使发射和接收的 SV 剪切波（质点振动方向与传播面相垂直的面内的波为 SV 波）角度的切换范围为 35°～45°（对于 4 mm 的线圈，角度为 32°时，此频率大约是 1.5 MHz）。波型与波束角度不随探头角度、钢管规格及钢管曲度变化而改变，角度 30°～45°发散波束检测缺陷概念图如图 2 所示。探头的倾斜角不会对超声波束产生任何影响，可以检测出 A 点和 B 点之间区域以及 A′点和 B′点之间至少 30～40 mm（6 dB 的区域）的内部缺陷，外部缺陷检测的原理与内部相同。

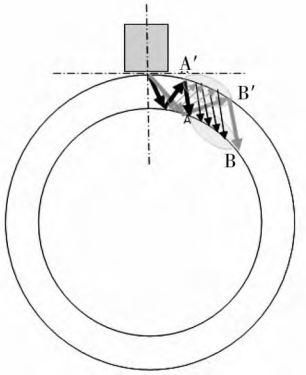


图 2　角度 30°～45°发散波束检测缺陷概念图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

与压电探头相比，EMAT 探头在发射和接收 SV 波时具有高度稳定的灵敏度，SV 波可以与侧面纵向超声波双向转换，其工作状态见图 3，利用 SV 波和侧面纵向超声波的双向转换进行缺陷检测。

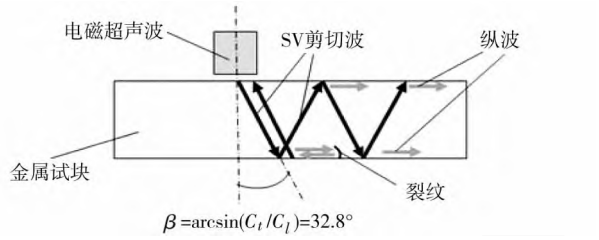


图 3 利用 SV 波和侧面纵向超声波的双向转换进行缺陷检测

压电超声波探头受探头角度、钢管规格及钢管曲度变化影响较大，因为超声波波束的微小倾斜或者钢管形状的变化（这些变化在所难免）都会立即影响到波束角度。EMAT 探头能使 β 角保持稳定，不需要考虑这些情况。

金属导体的第三临界角数值为 32°～33°，SV 波的传播角度 $\beta = \arcsin(C_t/C_l)$，其中 C_t 指电磁超声波在空气中声速，C_l 指电磁超声波在金属中的声速。纵向波在被测物体的表面传播过程中被物体表面的缺陷反射后重新形成 SV 波。这种 SV 波和纵向超声波之间转换的物理现象是大部分超声波应用技术的基础，例如用于检测焊缝的德尔塔超声波检测技术。

超声波设备可以扩大管壁两边缺陷的检测范围，这属于 EMAT 探头的重要特性，因而提高了工业检测的内缺陷检出率，并提高了可靠性，这也是超声波检测技术的重要优点。检测钢管缺陷时，利用 EMAT 探头是最为有效的方法，对于内部缺陷和外部缺陷的检测都非常有用。斜向缺陷检测原理如图 4 所示。

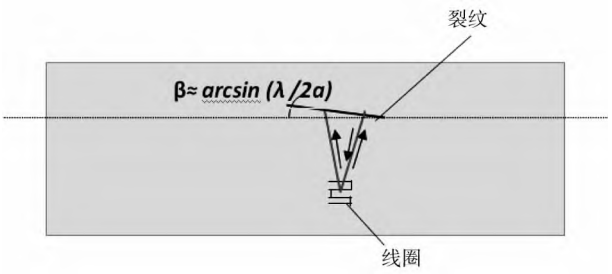


图 4 斜向缺陷检测的原理

图 5 为使用 SV 波和瑞利波检测纵向缺陷的物理原理。图 6 为使用 SV 波和瑞利波检测横向缺陷的物理原理。

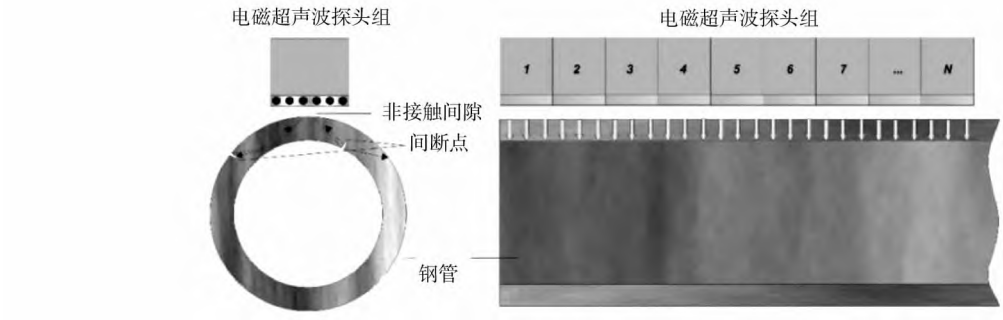


图 5 使用 SV 波和瑞利波检测纵向缺陷的物理原理

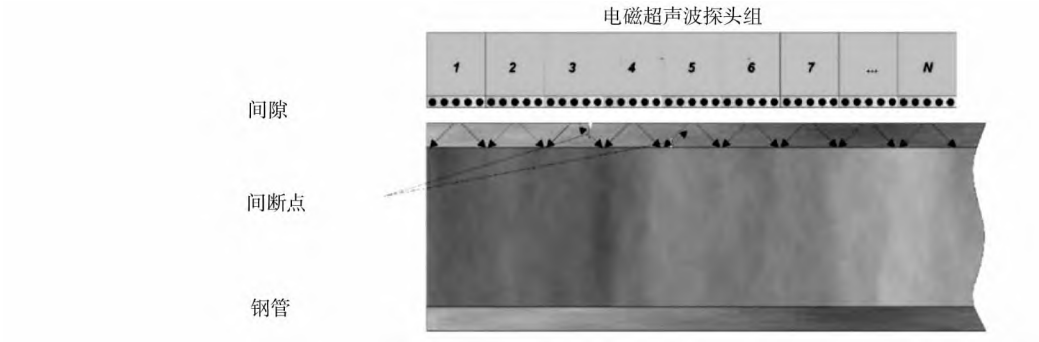


图 6 使用 SV 波和瑞利波检测横向缺陷的物理原理

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　电磁超声波钢管检测的测厚原理

利用 EMAT 测量厚度的关键是采用纯波模、窄声束和窄脉冲，但是要保证足够的幅度，同时要消除工件电、磁、声的性能变化对测量过程的影响。由于 EMAT 技术采用的是垂直入射方向的横波，故声波的纵向分辨力要高出压电换能器一倍。采用传统压电探头的方法来测厚，精度容易受到耦合介质的影响，电磁超声中的超声波有体波和 SV 波可用来测厚，检测过程中通过测量超声波在金属导体中的传播延时就可以计算出来被检测试件的厚度，这就是 EMAT 检测技术的独特优点。

铁磁材料表面上的电磁声波透射率相对较低，电磁超声波在被测物体内部来回多次反射，超声波在检测物体之间往返的传播时间即收集到两个回波信号之间的时间间隔即为 T，通过公式 $T = 2d/C$（C 为声速，d 为待测距离）计算出钢管的壁厚值，用 EMAT 换能器产生剪切波的工作原理见图 7。采用 EMAT 探头实现测量管壁厚度，电磁能量通过 EMAT 换能器转换成为弹性波能量，与缺陷相互作用后完成逆转换。这种双向转换保证了厚度测量可靠性和内部缺陷检测的有效性[2]。

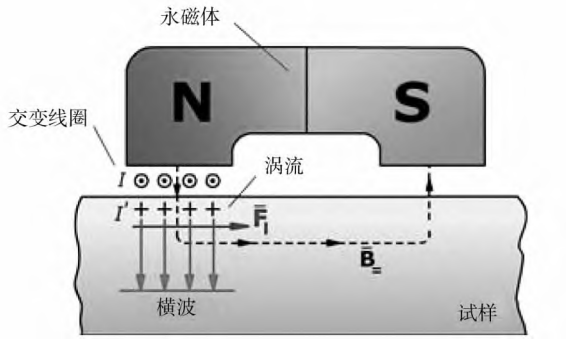


图 7　用 EMAT 换能器产生剪切波的工作原理

3　电磁超声波探伤的应用特点

（1）多种形式波形完成检测。改变激励电信号的频率，声波就可以按照任意辐射角 θ 向金属导体内部倾斜辐射。EMAT 适合做表面缺陷检测，当达到固定的激发条件时，会产生表面波、SH 波和 Lamb 波。

（2）去除耦合剂影响，实现非接触式检测。EMAT 在钢管表面的趋肤层完成能量转换，因而可将趋肤层即检测物体的表层看成是压电晶片，EMAT 技术采用的超声波不需要任何耦合介质[3]。在我国北方大部分地区，传统压电超声波使用水做耦合剂，冬季受低温影响，会有冰冻现象，增加维护成本，影响生产效率。使用电磁超声波检测能避免类似现象发生，其检测过程中不需要耦合剂，可透过包覆层等且检测结果不受温度变化影响。

（3）可实现高温检测。与常规超声相比，非接触性是电磁超声最大的优点。在空间辐射的温度场内，随着探头与被检测试件表面的距离增加，探头的环境温度开始出现明显的下降，因而电磁超声技术可以用于高温管道的检测[3]。

（4）电磁超声波检测中被检测物体的表面质量要求不高。根据 EMAT 检测原理，其检测过程中发射和接收返回的超声波的方式为可实现的非接触方式，即使被检测物体表面较为粗糙，也不需要进行清理，可以直接检测。对于有涂层的钢管以及热处理正火后带有较厚氧化皮的钢管检测，电磁超声具有明显优势。

（5）检测速率快。实际生产中压电超声的检测速度在 20 ~ 40 m/min 的范围内，而 EMAT 最高可达到 60 ~ 80 m/min。传统的压电超声中压电晶片需要完成发射超声波信号和接收超声波信号两个过程，在接收超声波信号过程中压电晶片短暂停顿接收超声波信号进而再次振动激发下一轮次的超声波信号，而 EMAT 检测具备独立的发射端和接收端，可以不间断地进行检测。

（6）EMAT 声波传播距离远。EMAT 在检测钢管或钢棒的纵向缺陷过程中，探头与工件都不需要进行旋转。在钢管中被激发的超声波可以绕工件传播几周。

（7）检测灵敏度高。EMAT 可准确检测到其它方式难以检测出来的钢管表面缺陷，例如重皮、折叠和孔洞等缺陷。从工作原理角度出发，EMAT 也存在两个主要作业控制难点。与传统的压电换能器相比，EMAT 的换能效率低 20 ~ 40 dB 左右。这个缺点可以通过电子发射机与接收机、换能器的设计与制造来弥补。高频线圈与被检测物体之间的间隙不能过大。线圈从被检测物体表面每抬高一个绕线波长的距离，声信号的下降幅度为 107 dB 和96 dB[4]。

4　实际应用

目前包钢钢管公司 Φ460 mm 机组使用的 NORDINKRAFT设备，是一套基于电磁超声原理的探伤检测设备，用于钢管出厂前管体缺陷的最终检

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测，年可利用生产时间为5 600 h，可检测15万t圆截面无缝钢管。该设备包括纵向检测系统(14通道电磁超声探头)、横向检测系统(8通道电磁超声探头)、测厚和分层缺陷检测系统(16通道电磁超声探头)三套独立检测系统。

该设备基于电磁超声波原理，具有电磁超声的特性，不需要耦合剂(无水对检测材料和设备没有腐蚀)，同时能够高精度的对壁厚进行测量，精度可达±0.03 mm，即使是距离表面非常近的分层缺陷也可以被检测出来。横向检测、纵向检测和壁厚检测三套独立检测系统均具有优越的抗干扰能力及抗噪音能力，同时检测不受地区极端天气影响。

以石油套管规格Φ244.48 mm×8.94 mm钢管为例，钢级为P110，验收等级为L2，设备在动态校准过程中，信噪比为13 dB，周向灵敏度差为1 dB，稳定性不大于1 dB，设备漏误报率为零，整体性能测试指标全面优于YB/T 4082—2011钢管自动超声探伤系统综合性能测试方法。对比压电超声，避免了水层厚度、挡水圈磨损、极端天气对设备稳定性及性能指标的影响。

5 结束语

电磁超声波技术已应用于各类无缝钢管缺陷检测。针对高温及承压环境用的低中高压锅炉管、石油裂化管、高压化肥管、液压支架管等产品，基于电磁超声技术的工业化应用特点和质量检测控制优势，在保证产品质量的同时，降低了产品使用风险。对比传统压电类超声波检测设备，电磁超声具有相对稳定的检测可靠性，不受外力影响。对于应用电磁超声原理的设备，同样避免了极端天气影响，特别是北方极寒天气对水耦合的影响。电磁超声设备在实际应用中，可连续、稳定、可靠工作，同规格同验收等级的钢管在间隔四小时校样的过程中其缺陷波幅高度吻合。因此，电磁超声技术不仅获得了无缝钢管产品应用单位的认可，也成为了钢管生产企业产品在线质量控制的重要手段。

参 考 文 献

[1] 张广纯. 电磁声(EMA)检测技术的研究、开发与工程化[J]. 应用声学，1995，(2)：1－6.
[2] 张晓春，刘春生，李海宝. 电磁超声无损检测技术及其应用[J]. 煤矿机械，2002，(2)：69－70.
[3] 李振才. 电磁超声(EMA)技术的发展与应用[J]. 无损探伤，2006，(6)：13－14.
[4] 夏志敏，康宜华，武新军. 电磁超声检测技术初探[D]. 武汉：华中科技大学，2007.

(上接第50页)

3 结论

(1) 通过调整热轧后的冷却模式，冷轧成品屈服强度与抗拉强度同时提高。

(2) 采用调整冷却模式、退火温度与平整机延伸率的综合措施，可有效降低产品屈强比。

(3) 屈强比降低后，不仅保证钢带拉伸变形时更容易产生塑性变形而不产生冲压开裂，改善了产品的变形能力，同时在变形时材料起皱的趋势减小，提高极限变形能力。

参 考 文 献

[1] 康海军，刘明辉，高洪刚. 热轧工艺对超深冲IF钢冷轧板力学性能影响研究[J]. 工艺装备，2010，(1)：37－37.
[2] 潘竟忠，王艳东. IF钢热轧生产工艺分析[J]. 河北冶金，2009，(3)：11－12.
[3] 李锋，吕家舜，敖列哥，等. 连续退火工艺对Nb－Ti－IF钢性能及再结晶织构的影响[J]. 钢铁，2008，(1)：64－65.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net