

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.023

聚乙烯燃气管道热熔接头无损检测研究进展

高振宇¹, 方毅², 余道丞², 姜泉涛², 牟婕², 秦传程¹, 张毅¹, 唐建峰¹

[1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)山东省油气储运安全省级重点实验室, 山东青岛 266580]

摘要: 介绍了聚乙烯(PE)燃气管道热熔焊接缺陷的种类及形成原因, 指出焊接缺陷对 PE 管道的性能和使用寿命有重要影响, 同时指出了无损检测(NDT)技术对于确保 PE 管道接头连接质量的重要性。简述了 NDT 技术中的外观检测, 着重分析了超声相控阵和微波 NDT 技术(主要包括检测缺陷能力、提高检测性能等方面)的研究进展, 并对两种技术的规范标准进行总结。分析表明, 微波技术对结构性和工艺性缺陷都有较好的检测效果, 而超声相控阵对冷焊、过焊等工艺性缺陷检测效果目前存在争议。最后指出超声相控阵和微波技术目前存在的挑战及未来发展趋势。

关键词: 聚乙烯; 热熔焊接; 无损检测; 超声相控阵; 微波

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0159-08

Research progress on non-destructive testing of hot-melt joints of polyethylene gas pipelines

GAO Zhenyu¹, FANG Yi², YU Daocheng², JIANG Quantao², MOU Jie², QIN Chuancheng¹, ZHANG Yi¹, TANG Jianfeng¹

[1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Safety, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract : The types of fusion welding defects in polyethylene (PE) gas pipelines and their causes were introduced. It was pointed out that welding defects had a significant impact on the performance and service life of PE pipelines. The importance of non-destructive testing (NDT) technology in ensuring the connection quality of PE pipeline joints was also highlighted. The appearance inspection in NDT technology was briefly described, with a focus on the analysis of ultrasonic phased array and microwave NDT technology, including research progress on defect detection capabilities and improving detection performance. The standards for the two technologies were summarized. The analysis show that microwave technology has good detection effects for both structural and process defects, while ultrasonic phased array is not effective in detecting process defects such as cold welding and overwelding. Finally, the challenges and future development trends in the current research of ultrasonic phased array and microwave technology were pointed out.

Keywords : polyethylene ; heat fusion welding ; non-destructive inspection ; ultrasonic phased array ; microwave

金属管道在输送燃气时由于存在耐腐蚀性差、成本高、运输安装不便、刚性高的缺点, 使人们逐渐将目光转移至非金属管道。相比于传统的金属管道, 聚乙烯(PE)燃气输送管道具有更好的性能, 如耐腐蚀性、施工便利性、抗疲劳性、维护成本低等。从 21 世纪起, 我国开始大规模地使用燃气 PE 管道, 目前新建中低压城镇燃气管道 90% 以上使用的是 PE 管^[1]。由于燃气管道往往处于高压、高温或者低温环境中, 加上地质运动及化学物质侵蚀等影响, 会降低其性能和可靠性。而焊接接头相对于管材来说是更为薄弱的环节, 也是最

容易发生泄漏的环节^[2]。

按照焊接方式分类, 可将燃气管道接头分为热熔与电熔焊接。GB/T 51455-2023《城镇燃气输配工程施工及验收标准》规定, 热熔对接焊接时, 两管对准偏差不能超过管径的 10%, 而小口径(DN≤90)热熔焊接难以掌握, 大口径(DN>90)的电熔管件造价较高, 所以目前市场上小口径多用电熔连接, 大口径多用热熔连接。相对于电熔焊接无损检测(NDT)技术而言, 热熔焊接的 NDT 技术发展研究得相对较晚、不成熟, 还需进一步通过技术研究、标准化、人员培训和智能化等

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802343), 山东实华天然气有限公司项目(HX20240943)

通信作者: 唐建峰, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为城镇燃气管网完整性管理、甲烷监测及减排

收稿日期: 2024-11-29

引用格式: 高振宇, 方毅, 余道丞, 等. 聚乙烯燃气管道热熔接头无损检测研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 159-166.

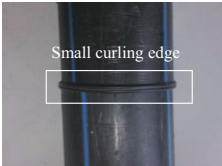
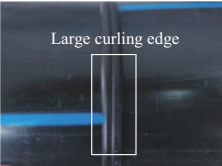
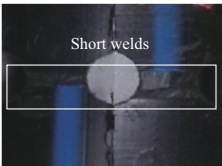
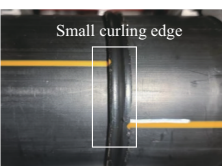
GAO Zhenyu, FANG Yi, YU Daocheng, et al. Research progress on non-destructive testing of hot-melt joints of polyethylene gas pipelines [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 159-166.

方面的努力,不断完善 PE 管道的 NDT 技术,提高管道的安全性和可靠性。笔者主要介绍了超声相控阵与微波两种 NDT 技术的研究现状及未来发展趋势。

1 热熔接头缺陷形式

目前关于热熔焊接接头内的缺陷形式,行业内并没有统一的标准,通过查阅资料,根据缺陷的形成原因,可将热熔焊接缺陷分为工艺与结构缺陷两类。工艺缺陷是由于焊接过程中工艺参数选取不当而引起焊接接头材料性能本质上的—种削弱,主要缺陷类型为冷焊、未熔合、过焊、焊缝过短等,工艺缺陷的形成原因及示意图见表 1;结构缺陷主要是由于操作者操作不当,焊接设备的质量和工况、管材质量与环境等因素引起的,主要缺陷类型为孔洞、夹杂、不对称等^[3],结构缺陷的形成原因及示意图见表 2。

表 1 工艺缺陷的形成原因及示意图^[4-5]

Defect	Causes	Defect diagram
Cold welding	Because the temperature of the heating plate during welding is lower than the standard or the heating time is too short, the welded joint absorbs too little heat.	
Over welding	During welding, if the temperature of the heating plate exceeds the standard specifications or the heating time is too long, the weld joint absorbs too much heat.	
Short welds	Due to the excessive pressure applied during welding, many materials in the molten zone are pressed out, and the thickness of the molten layer is reduced.	
Lack of fusion	The pressure applied in the initial crimping pressure stage and the holding pressure cooling stage is insufficient, and the entanglement of local PE molecules is not strong, so that an effective welded joint cannot be formed.	

2 热熔接头 NDT 方法

2.1 热熔连接的外观检测

热熔焊接缺陷是 PE 管道性能好坏和使用寿命长短的重要影响因素,在焊接部位存在缺陷时,PE 管道力学性能下降、密封性降低、受腐蚀概率增加及管道系统安全可靠性下降。所以对热熔焊接接头进行 NDT 及时发现缺陷是非常重要的,以确保 PE 管道系统的安全、可靠运行。最简单的 NDT 方式是对管道进行外观检查:TSG D2002-2006《燃气用 PE 管道焊接技术规则》、CJJ 63-2018《PE 燃气管道工程技术标准》中对于外观的检查都是围绕焊接区域卷边展开的,包括卷边外观检测:几何形状、中心高度;卷边切除检查:外观检

表 2 结构缺陷的形成原因及示意图^[5-6]

Tab. 2 Causes and schematic diagram of structural defects^[5-6]

Defect	Causes	Defect diagram
Cavern	During welding, cavities within the joint can form due to impurities in the base material, moisture, or shrinkage cavities during welding. This results in a discontinuous and non-dense weld structure, leading to reduced joint performance	
Entrainment	Due to foreign inclusions appearing on the fusion surface of the PE pipe during hot-melt butt welding, defects form that cause the entire fusion surface to bond poorly, leading to a significant reduction in joint performance	
Misalignment	Due to the misalignment of the pipe fixation during the hot melt butt welding process, the final result leads to joint displacement or excessive angle deviation of the edges	

查、背弯试验。JBT 12530.2-2015《塑料焊缝 NDT 方法第 2 部分:目视检测》对目视缺陷进行分级:I—最高要求、II—较高要求、III—一般要求。

2.2 热熔连接的其他 NDT 技术

对于燃气 PE 管道焊接接头,仅进行外观检查是不够的,无法实现对接头内部缺陷进行定性和定量分析,而内部缺陷往往会有较大的危害^[7]。外观检查仅起到了初步筛查的作用,虽然是必要的,但是不能作为唯一手段,所以为了确保管道的安全运行,应该结合外观检查和内部检测方法。

国内外的专家学者对于焊接接头内部检测已经开展了大量的研究工作,其中在金属管道上应用的较为成熟,并且拥有较为完善的检测与评价技术,而 PE 材料与金属材料特性与结构不同,很多技术及研究成果并不能直接用在 PE 材料中,如 PE 材料具有明显高分子特征,相比于金属材料而言,其声阻抗、声波衰减系数和声波散射要严重的多^[8]。目前在燃气 PE 焊接接头中使用较多的检测手段有超声相控阵技术、微波技术、射线技术、太赫兹检测技术等。下面主要介绍超声相控阵及微波 NDT 技术,见表 3。

2.2.1 超声相控阵技术

超声相控阵是一种先进的超声成像技术,其声束的激发和接收由激发和接收模块、延时器、探头阵元三个模块组成,如图 1 所示。其中探头阵元由多个超声传感器单元组成,这些单元排列成一个阵列。每个传感器单元可以独立控制发射和接收超声波信号。利用延时器对每个通道的收发进行延时控制,使声束发生聚焦及偏转,从而扫查管道的热熔接头,接收来自于结构内部的回波信号并进行成像,使缺陷可视化^[9]。

国外从 20 世纪 70 年代开始就应用传统超声检测 PE 焊

表3 NDT技术及其优缺点
Tab. 3 NDT techniques and its advantages and disadvantages

Detecting technique	Advantages	Disadvantages	Related Work	References
Ultrasonic phased array technology	● High-resolution image. ● The delay focus rule can detect defects in different directions. ● Obtain images in real time to improve detection efficiency.	● Acoustic attenuation, acoustic dispersion ● It is easily affected by electrical signal interference when the signal-to-noise ratio is low.	- Detect structural defects - Detect process-related defects - Enhance detection performance	[16-19] [20-28] [29-37]
Microwave technology	● It has a strong ability to penetrate dielectric materials and can reach deep into the dielectric region. ● No coupling agent is needed, and the operation is simple.	● Variations in different materials need to be considered during detection. ● External electric and magnetic fields can significantly affect the accuracy of the results.	- Detect structural defects - Detect process-related defects - Enhance detection performance	[42-44], [49], [50-51], [53-54], [7], [42-44], [45-52], [55-59]

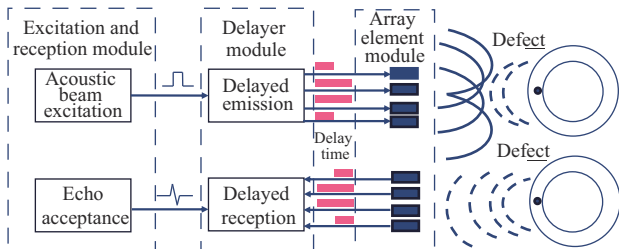


图1 超声脉冲发射和缺陷回波接收示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic pulse emission and defect echo reception

接头^[10]。20世纪80年代初,美国燃气研究学会是第一家将超声相控阵技术检测技术应用于PE管道热熔接头的公司,通过实验验证发现相控阵技术对壁厚不超过12 mm、管径小于100 mm的热熔接头有较好的检测效果^[11]。英国焊接研究所通过研究表明,该方法对25 mm壁厚的PE热熔接头检测效果不好^[12]。从20世纪80年代末开始,超声相控阵推出商业化产品。1989年,加拿大研发技术公司R/D Tech参考模拟电路研发出超声相控阵检测装置^[13];1998年法国原子能机构研发出可自动改变聚焦参数的超声波检测系统^[14]。此后,为了适应不同场合的要求,外国公司致力于研发便携式超声相控阵检测仪器。

国内对PE管道接头NDT技术的研究于21世纪初刚起步,而热熔焊接的研究相对于电熔起步晚一些。下面从三个角度对研究现状进行总结归纳。

(1)识别缺陷的能力。

超声相控阵技术应用于热熔焊接接头的主要目的就是发现其中的缺陷,并对缺陷进行定性和定量分析,最终达到确保焊接质量,提高管道的安全性和可靠性,降低管道运行中损失风险的目的。通过整理发现相控阵技术对孔洞、夹杂等结构性缺陷检测效果较好。朱翔宇等^[15]发现使用超声相控阵技术可以发现由于端面污染物导致的孔洞缺陷、灰尘及金属碎片导致的熔合面夹杂缺陷。刘向薇等^[16]发现超声相控阵可实现对热熔夹杂、孔洞缺陷的识别。施建峰等^[17]对深圳市10个PE燃气管道工程的54个热熔接头进行不停气检测,结果显示热熔接头缺陷概率为18.5%,其中最为常见的

缺陷为孔洞和夹杂;公称直径越大,接头出现缺陷概率越高;孔洞与熔合面夹杂缺陷为常见缺陷。陈宝龙等^[18]自制试块缺陷进行超声相控阵检测,实验发现相控阵技术对于孔洞、夹杂缺陷可以实现定量及定性。周路生等^[19]采用自制相控阵探头及楔块发现了试块内的所以横孔,并且指出了热熔接头结构反射信号。

目前学者们对于相控阵能否检测冷焊、未熔合等工艺性缺陷存在争议。王胜辉等^[20]使用超声相控阵直探头检测热熔冷焊缺陷,结果发现与普通焊缝相比,冷焊缺陷的熔接面线信号较强,差异较大。通过对含有冷焊缺陷的焊缝进行力学性能实验,结果表明如果出现冷焊,那么焊缝处的力学性能会明显下降。而缪玮等^[21]通过软件仿真和对比实验对超声相控阵仪器性能进行优化,经验证该工艺可发现过焊、夹杂、气孔等缺陷,而对冷焊缺陷则无法准确判断。赵兴波等^[22]将热熔焊接缺陷分为夹杂和未熔合,并指出现有规范中标准试块的制作(不具备透声性能)与实际检测不符,通过自制PE试块(具备透声性能)并改进楔块,成功检测出夹杂和未熔合缺陷,与射线检测结果相吻合。Wei等^[23]利用超声相控阵技术成功识别出热熔接头中的孔洞与未熔合缺陷,并且利用射线技术加以验证。而韩光明等^[24]指出PE管道热熔接头中不存在所谓的气孔、夹杂等缺陷,但具有危险性的缺陷为“未充分熔合”,由于其具有较强的声学透射特性,导致其不能得到原始的A扫信号,因此超声相控阵不能很好地实现对该缺陷的探测。Tao等^[25]对外径315 mm的高密度PE管道进行了热熔焊接过程的测试,利用超声相控阵的视频记录功能对焊接过程进行成像分析,结果发现冷却结束后焊缝处存在两条冷焊特征线及焊接界面信号。Guo等^[26]对正常热熔焊接接头及冷焊接头(焊接温度及时间不足)进行了相控阵检测,结果发现相比于正常焊接,冷焊处的两条特征线的距离要小,并以此为依据创建评判冷焊程度的公式。Xia等^[27]通过实验制作了加热温度、时间、压力均相对较低的热熔PE试块,通过使用超声检测发现其三者的波形与正常焊接不同,由此得出结论:焊接参数与超声波的波形和评估之间存在关系。Frederick等^[28]通过低频超声检测到了热熔焊缝的冷熔合缺陷。

(2)提高检测性能研究。

由于 PE 材料表面的不规则性、孔洞和颗粒等不均匀性会导致超声波的散射和多次反射,增加了信号的衰减和噪声的干扰,降低了信噪比。此外,PE 材料对超声波的吸收特性较强,尤其是在高频范围内,使得超声波的能量被吸收,进一步削弱了信号强度,从而影响了信号的接收和质量,最终影响成像的质量。

为了解决此问题,有很多学者从不同的维度展开了研究。谢长生等^[29]对相控阵检测系统中的动态滤波器进行了设计,其可以对不同频率的衰减进行补偿,最终可提高超声相控阵 PE 探伤的缺陷检出能力(提高图像空间分辨率、超声波探测深度)。竺哲明等^[30]在前期研究基础上自主研发了超声相控阵检测装置,并与液体楔块技术有机融合在一起,解决了由于 PE 材料声衰减大、检测界面声能量损耗大而导致的超声波探测难题,最后通过实验验证发现该装置可以可靠地发现气孔、融合面夹杂缺陷。吴军等^[31]基于 CIVA 仿真软件对 PE 材料声衰减特性进行研究。研究发现,在测试深度不变的情况下,声衰减随探测距离的增加而逐渐增大。经分析表明,壁厚在 20 mm 以内的情况下,可选用中频探头。对于壁厚超过 20 mm 的情况,可以选用低频探头。谢世杰等^[32]和肖权旌^[33]等利用全聚焦超声成像算法(TFM)对含缺陷的试块进行检测,此方法可提高成像的信噪比。结果表明,TFM 可对缺陷实现定位,检测深度达到 50 mm,并且在检测精度上有了很大的提高,这在缺陷的定量描述上更有优势。此外 TFM 还可降低缺陷的最大幅值标准差,这表明 TFM 在缺陷的相控阵超声检测上有较好的应用前景。针对超声在 PE 内传播具有声衰减和声频散的问题,方海清等^[34]基于理想波动声学方程,构建了复合频率超声信号传播模型,使仿真与实

测结果更相近,并对延时聚焦法则进行改进,将其应用于大壁厚 PE 管材的相控阵探测中,结果发现聚焦区内壁的回波强度提高 5.1%,未聚焦区的回波强度提高 6.1%。甘文军等^[35]针对高密度聚乙烯(PE-HD)管道热熔接头超声检测声衰减大、检测信噪比低等问题,通过软件仿真优化了探头参数(频率、晶片尺寸、阵元排列)及检测工艺,结果表明对各缺陷检测效果均较好。郑凯等^[36]针对 PE 管道热熔接头超声检测声衰减大、检测信噪比低等问题,提出了缺陷信号处理的办法。首先采用超完备字典学习的图像稀疏表示方法对单个缺陷信号进行压缩重建,再利用合成法获得关于缺陷扇扫的全部图像,在此基础上调节字典元素个数与迭代次数,提高重建信号的信噪比,降低重建误差,并以峰值信噪比为指标,精确地评估重建后的图像处理效果。最终改善了信号质量与成像结果,提高了缺陷检出率,降低漏检率。秦胤康^[37]针对 PE-HD 中超声衰减、频散特点,基于通用延迟法则设计并建立了 PE-HD 的专用延迟法则。通过数值模拟与实验验证发现,其可使聚焦声场中的声压提升 5.3%,从而改善缺陷的回波强度,并扩大了探测范围。

综上,通过采用信号处理技术、仪器设计、检测系统参数优化、改变延迟法则、选用不同楔块改善声耦合效果等方法可以提高信号强度,降低噪声干扰,提高信噪比,进而改善 PE 材料的超声检测效果。

(3)超声相控阵 NDT 规范标准。

21 世纪开始,国内专家学者就开始了针对 PE 电熔焊接相控阵 NDT 的研究,并在 2012 年形成了国家标准,以后陆续形成行业、地方标准,评价体系逐步完善。但是热熔标准形成时间较晚,且国内目前仅有团体和地方标准。PE 管道热熔接头超声相控阵检测相关标准见表 4。

表 4 PE 管道热熔接头超声相控阵检测相关标准

Tab. 4 Relevant standards for ultrasonic phased array testing of PE pipe heat fusion joints

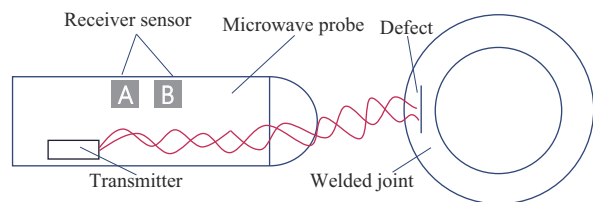
Standard Number	Name
DB31/T 1058-2017	《Phased array ultrasonic testing of weld joints in PE pipelines for gas》
DB15/T 1819.3-2020	《Technical specification for phased array ultrasonic testing of weld joints in buried PE pipelines for gas, part 3: Heat fusion joint testing》
T/ZJASE 008-2021	《Phased array ultrasonic testing of heat fusion butt joints in PE pipelines》
ISO/TS 22499:2024	《Phased array ultrasonic testing for PE butt fusion joints in thermoplastic pipes used for fluid transport》
ASTM E3044/E3044M-22	《Standard implementation procedure for ultrasonic testing of PE butt fusion joints》

2. 2. 2 微波技术

微波是一种电磁波,具有穿透非金属材料特性,其探测原理建立在微波与介质的相互作用基础上,而介电材料的母体与缺陷处介电特性不同,所以可以借助微波为载体,通过分析软件将两者之间的差别换成可读出的电量值,并通过算法可反演出材料内部缺陷及结构图像^[38]。在利用微波技术对非金属管道进行 NDT 时,按照检测方法分可分为开口法、谐振法和聚焦法^[39]。开口法使用圆波导、矩形波导、同轴线等微波器对物体进行检测;谐振法主要使用平面谐振器对试件进行检测;聚焦法主要使用合成聚焦技术,如合成孔径雷达技术、微波全息技术等。该方法是利用微波探头内的信

号发射器向试块发射信号,传播过程中遇到介电常数变化的地方时(缺陷处),其回波幅值及相位等会发生变化,还可利用不同的回波幅值及相位区分不同缺陷。在接收传感器接收回波后,会与发射波发生干涉形成干涉波,将其转换为电信号输入到计算机,处理后就形成微波图像^[40],如图 2 所示。

微波 NDT 技术始于 20 世纪 50 年代初^[41]。随着电介质材料需求的增加,微波 NDT 技术的需求也在增加。2011 年德国 NDT 协会成立了微波和太赫兹工艺技术委员会。2014 年,美国 NDT 协会(ASNT)成立了微波测试委员会,微波测试标准化工作已经开始。2016 年该检测方法被美国 ASNT 手

图2 微波检测原理示意图^[40]Fig. 2 Schematic diagram of microwave detection principle^[40]

册所认可。2018年被美国材料与试验协会(ASTM)标准采纳^[42]。从2010年以后国内陆续开展微波NDT技术的研究,2020年之后开始进行系统研究。

(1)识别缺陷能力。

为了验证微波技术对燃气PE管道热熔焊接接头NDT的适用性,众多学者对热熔接头的缺陷进行了检测,并通过破坏性实验及其他NDT方法进行验证。发现微波技术对于结构性缺陷及工艺性缺陷均有较好的检测效果。

祝新伟等^[43-44]利用微波技术对含有不同缺陷(减少焊接温度、减少焊接压力、增大切换时间、裂纹、过压)的PE管道接头进行检测,与正常焊接接头相比,含缺陷接头的微波检测图像具有明显的不同特征。并且利用真密度测试含不同缺陷的接头,验证了微波检测方法的可靠性。梁雪莲等^[7]在微波检测图像中发现合格的热熔焊接接头会出现一条均匀且不间断的蓝色线条,而含有冷焊及未熔合缺陷处蓝色线条会间断甚至消失。经力学实验验证,与微波检测结果一致。车飞等^[45]解释了微波NDT技术的原理,并在某城区安装现场PE管热熔接头进行微波检测,检测发现3处不正常现象。通过对试件进行拉伸试验发现,异常处基本上都出现了脆性断裂,两者一致性较高。李曼曼等^[42]模仿燃气管道安装现场可能导致缺陷产生的情况,制作了含有缺陷(冷焊、未熔合、夹杂)的热熔接头试件,通过比较微波检测结果和拉伸实验结果,证明了微波技术对PE管道热熔焊缝内部缺陷检测的可行性。郭涛等^[46]通过微波技术对冷焊缺陷进行表征和分析,并利用射线技术进行验证了两种检测技术的有效性。牛小驰等^[47-48]认为冷焊产生的机理为分子链结构的缺失,微波检测结果显示冷焊区域焊缝宽度发生变化,拉伸结果显示合格焊口韧性断裂,冷焊缺口为脆性断裂,韧性断口电镜扫描呈现大量细长的分子链结构,而脆性断口电镜扫描呈现出分子链的圆形断面,既切割后的分子链断面。Stakenborgh等^[49-51]使用微波技术中的开口法检测热熔焊接存在的冷融合(焊接压力过大、延长加热结束至融合的时间),融合面夹杂(超细粉末)、未熔合等缺陷,并且通过破坏性实验进行验证。Pan等^[52]利用矢量网络分析仪和自行设计的微波测量系统对不同程度的冷焊缺陷进行检测,并通过密度实验和扫描电子显微镜观察验证了微波测试方法可靠性。Murphy等^[53]使用微波检测中的开口法检测PE 100,直径250 mm,SDR11的PE管道。通过检测与破坏性实验发现,微波技术能够准确发现夹杂缺陷(油脂、细颗粒污染)。Ghasr等^[54]使用便携

式、相对成本低的宽带Ka波段波导及合成孔径雷达算法对PE-HD管道上的裂纹缺陷进行检测,结果表明,该技术在横向上达到1.6 mm分辨率,深度方向达到7 mm分辨率。

通过总结整理发现,热熔焊缝区域经过加热与冷却过程,分子结构发生变化,然而其对传统超声方法的信号源不产生反馈,但是分子结构变化会导致PE材料介电性能的变化,进而被微波检测到,所以微波技术对工艺性缺陷(冷焊、过焊、过压、欠压)检测效果较好。除了工艺性缺陷之外,微波技术对于结构性缺陷(裂纹、夹杂、孔洞)也是可以做到准确识别。

(2)提高检测性能研究。

为了提升微波技术缺陷检出能力、成像质量,降低检测成本等,许多专家学者从不同维度进行了研究。笔者除了讨论PE管道之外,还探讨了其他非金属管道的相关研究。Carrigan等^[55]利用管内爬行机器人,并采用微波技术开口法中的K波段检测9.8 mm壁厚管道外表面的孔洞、裂纹缺陷(孔洞最小直径2.8 mm,裂纹最小宽度1 mm)。同时,为了提高缺陷的检出能力,研究了频率与间隔范围的最佳组合,但是每种组合都特定于某个管壁厚度,外部环境。为了证明微波成像系统的有效性,Rahman等^[56]使用工作在K和Ka波段的矩形波导探头和一个在K波段的圆形波导探头来检测直径160 mm,厚度16 mm的PE-HD管道。通过用信噪比值作为评价标准,结果发现矩形波导的检测效果比圆形波导要好,检测能力更强。Wu等^[57]利用全息微波成像方法检测聚氯乙烯(PVC)同心管道的孔洞缺陷,采用标准化的最小范数对传统的最小范数求解过程进行扩充,提高了微波技术对非金属PVC同心管道的缺陷成像质量(提高成像分辨率),尤其是远离测量装置的管道。雒明世等^[58]为了有效对PE管道内部缺陷进行检测,提出了一种基于主成分分析(PCA)杂波抑制成像增强方法,并对已增强图像,使用阈值分割技术提取缺陷特征,结果表明所提方法其成像质量优于未进行杂波抑制的图像,缺陷定位及缺陷面积相对误差均较小。Amineh等^[59]利用全息微波成像检测PVC同心管道,采用波束空间变换的方法,提高了微波技术对非金属PVC同心管道的缺陷成像质量(提高成像分辨率),尤其是远离测量装置的管道。但是此方法要求管道之间和外部的介质是均匀的,否则全息图像会出现伪影。

通过总结整理发现,在提升缺陷的检测能力方面,学者们研究了微波频率与间隔(探头与管壁)的组合、不同探头之间的性能对比。在提升成像质量方面,研究了标准化最小范数、波束空间变换及PCA杂波抑制方法。

(3)微波NDT规范标准。

在2018年,美国材料与试验协会发布了关于微波检测的相关标准,国内发布得相对较晚,2023年北京市市场监督管理局首次提出了针对PE管道热熔接头的微波NDT质量控制规范。PE管道热熔接头微波检测相关标准见表5。

表5 PE管道热熔接头微波检测相关标准

Tab. 5 Relevant standards for microwave testing of heat fusion joints in PE pipelines

Standard number	Name
DB11/T 2140-2023	《Quality control requirements for microwave testing of heat fusion butt joints in PE pipelines》
ASTM E3101-18	《Standard implementation procedure for microwave inspection of PE Heat Fusion Butt Joints》

3 总结与展望

运用NDT技术对PE热熔焊接接头进行检测可提高PE管道系统的安全性、延长管道使用寿命。主要介绍超声相控阵和微波技术目前的研究进展,主要从检测缺陷能力、提高检测性能、标准规范三个方面进行总结。

(1)超声相控阵技术。

超声相控阵技术对于热熔结构性缺陷识别效果较好,而对于工艺性缺陷(冷焊、过焊、未熔合等)识别能力存在争议。未来可加强此方面的研究,区分工艺性缺陷与正常焊接信号的不同,不断积累缺陷图谱,形成数据库,完善相关检测、评价标准体系,形成行业、国家层面的检测标准。为了减少人为因素带来的误差,已有学者^[60]在研究利用计算机技术实现电熔焊接缺陷的自动识别和评级,而热熔焊接缺陷目前仅有少部分学者^[61]进行研究。所以在完善现有热熔规范的基础之上,实现超声相控阵图谱计算机自动识别能够提高识别的效率、准确性和一致性,具有较强的现场应用价值和广泛的应用前景。

(2)微波技术。

微波检测技术对工艺性和结构性缺陷检测效果均较好,但是其开口法使用的频率范围较宽,微波器件种类也较多,需要对各频率范围,微波器件进行实验研究,评价其性能,对此已有部分学者进行了比较研究,但是目前研究还不足,未来可结合仿真模拟的手段,进行系统研究。目前国内仅有北京市出台地方标准,未来应继续出台行业、国家层面的检测标准,保障现场的应用。为了提高检测效率、精确性,减少主观因素带来的误差,在继续完善规范的基础上,利用机器学习实现缺陷的计算机自动识别。

参考文献

- [1] 李陈,等.上海化工,2022,47(4):76-78.
LI Chen, et al. Shanghai Chemical Industry, 2022, 47(4):76-78.
- [2] 方学锋,等.炼油与化工,2023,34(3):11-14.
FANG Xuefeng, et al. Refining and Chemical Industry, 2023, 34(3): 11-14.
- [3] 郭黎群,等.化工管理,2024(7):144-147.
GUO Liquan, et al. Chemical Engineering Management, 2024(7): 144-147.
- [4] 崔海涛. PE管焊接质量检测技术的应用研究[D].北京:北京建筑大学,2019.
CUI Haitao. Application research on welding quality inspection technology for PE pipes[D]. Beijing : Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [5] 闵文.含工艺缺陷PE管道热熔焊接接头失效机理分析[D].哈尔

滨:哈尔滨理工大学,2015.

MIN Wen. Analysis of failure mechanism in heat fusion welded joints of PE pipes with process defects[D]. Harbin :Harbin University of Science and Technology, 2015.

- [6] 郭伟灿.聚乙烯管道热熔接头超声检测技术研究及设备研制[D].杭州:浙江大学,2014.
GUO Weicao. Research and development of ultrasonic testing technology and equipment for heat fusion joints in polyethylene pipelines[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2014.
- [7] 梁雪莲,等.劳动保护,2021(8):107-110.
LIANG Xuelian, et al. Labour Protection, 2021(8):107-110.
- [8] 王少军,等.无损检测,2017,39(5):21-23,69.
WANG Shaojun, et al. Nondestructive Testing, 2017, 39(5): 21 - 23, 69.
- [9] 陈鹏,等.煤气与热力,2021,41(3):24-27,30,96.
CHEN Peng, et al. Gas & Heat, 2021, 41(3):24-27, 30, 96.
- [10] LYNN G, et al. Pipeline & Gas Journal, 1997, 224(4):88-90.
- [11] 彭伊娟. HDPE管道接头熔接质量检测与评定技术研究[D].无锡:江南大学,2023.
PENG Yijuan. Research on quality inspection and evaluation techniques for fusion joints in HDPE pipes[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2023.
- [12] MUNNS I J, et al. Insight-non-destructivetesting and condition monitoring, 1999, 41(5):291-303.
- [13] GROUP M W, et al. Materials World, 2004, 12(2):17.
- [14] CHEN H, et al. Science of Advanced Materials, 2020, 12(5): 665-675.
- [15] 朱翔宇,等.上海煤气,2020(2):27-31.
ZHU Xiangyu, et al. Shanghai Gas, 2020(2):27-31.
- [16] 刘向薇,等.焊接技术,2019,48(11):24-27.
LIU Xiangwei, et al. Welding Technology, 2019, 48(11):24-27.
- [17] 施建峰,等.压力容器,2020,37(12):54-62.
SHI Jianfeng, et al. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(12): 54-62.
- [18] 陈宝龙,等.无损检测,2019,41(6):60-63.
CHEN Baolong, et al. Nondestructive Testing, 2019, 41(6):60-63.
- [19] 周路生,等.无损检测,2022,44(1):10-15.
ZHOU Lusheng, et al. Nondestructive Testing, 2022, 44(1):10-15.
- [20] 王胜辉,等. HDPE管热熔接头冷焊缺陷的检测与评估[C]//北京:2015年全国失效分析学术会议论文集, 2015. DOI:ConferenceArticle/5af15829c095d71bc8befcaa.
WANG Shenghui, et al. Detection and evaluation of cold welding defects in hot-melt joints of HDPE pipes[C]//Beijing: 2015

- National academic conference on failure analysis, 2015. DOI: ConferenceArticle/5af15829c095d71bc8befcaa.
- [21] 缪玮,等.化工装备技术,2023,44(1):29–32.
MIAO Wei, et al. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(1): 29–32.
- [22] 赵星波,等.全面腐蚀控制,2023,37(8):14–20.
ZHAO Xingbo, et al. Total Corrosion Control, 2023, 37(8):14–20.
- [23] WEI D, et al. Study on ultrasonic phased array detection of hot meltbutt joint of polyethylene pipe[C]//2022 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML). IEEE, 2022:65–68.
- [24] 韩光明,等.全面腐蚀控制,2021,35(5):103–108.
HAN Guangming, et al. Total Corrosion Control, 2021, 35(5): 103–108.
- [25] TAO Y, et al. Study on molten zone of butt fusion welding process with phased array ultrasonic technology for polyethylene pipe[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2023. DOI:10.1115/PVP2023-1.
- [26] GUO W, et al. Ultrasonic technique for testing cold welding of butt-fusion joints in polyethylene Pipe[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2013. DOI:10.1115/PVP2013-97205.
- [27] XIA F Y, et al. Applied Mechanics and Materials, 2013, 331: 170–175.
- [28] FREDERICK C, et al. High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2009. DOI:10.1115/PVP2009-77783.
- [29] 谢长生,等.无损检测,2014,36(10):32–35.
XIE Changsheng, et al. Nondestructive Testing, 2014, 36(10): 32–35.
- [30] 竺哲明,等.无损检测,2017,39(1):38–41, 65.
ZHU Zheming, et al. Nondestructive Testing, 2017, 39(1): 38–41, 65.
- [31] 吴军,等.计算机测量与控制,2024,32(3):50–56.
WU Jun, et al. Computer Measurement & Control, 2024, 32(3): 50–56.
- [32] 谢世杰,等.河南科技大学学报(自然科学版),2022,43(1):46–51, 57.
XIE Shijie, et al. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(1):46–51, 57.
- [33] 肖权旌,等.压力容器,2022,39(12):62–70.
XIAO Quanjing, et al. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(12): 62–70.
- [34] 方海清,等.压力容器,2022,39(2):67–74, 82.
FANG Haiqing, et al. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(2):67–74, 82.
- [35] 甘文军,等.无损检测,2023,45(6):43–48.
GAN Wenjun, et al. Nondestructive Testing, 2023, 45(6):43–48.
- [36] 郑凯,等.计算机测量与控制,2023,31(9):247–252.
ZHENG Kai, et al. Computer Measurement & Control, 2023, 31(9):247–252.
- [37] 秦胤康.核电站高密度聚乙烯管道热熔接头的超声相控阵检测研究[D].杭州:浙江大学,2019.
QIN Yinkang. Research on ultrasonic phased array testing of heat fusion joints in high-density polyethylene pipelines for nuclear power plants[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [38] 邵泽龙,等.石油化工设备,2024,53(6):15–19.
SHAO Zelong, et al. Petro-Chemical Equipment, 2024, 53(6): 15–19.
- [39] 于昊言,等.测控技术,2023,42(5):12–27.
YU Haoyan, et al. Measurement & Control Technology, 2023, 42(5):12–27.
- [40] 赵番,等.石油化工设备,2024,53(5):7–12.
ZHAO Fan, et al. Petro-Chemical Equipment, 2024, 53(5):7–12.
- [41] ZOUGHI R, et al. Springer Science & Business Media, 2000. DOI:10.1007/978-94-015-1303-6.
- [42] 李曼曼,等.煤气与热力,2023,43(5):18–23.
LI Manman, et al. Gas & Heat, 2023, 43(5):18–23.
- [43] 祝新伟,等.压力容器,2013,30(2):73–76, 21.
ZHU Xinwei, et al. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(2):73–76, 21.
- [44] 祝新伟,等.压力容器,2013,30(9):54–59.
ZHU Xinwei, et al. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(9): 54–59.
- [45] 车飞,等.管道技术与设备,2022(3):41–44.
CHE Fei, et al. Pipeline Technique and Equipment, 2022(3): 41–44.
- [46] 郭涛,等.全面腐蚀控制,2023,37(4):19–24.
GUO Tao, et al. Total Corrosion Control, 2023, 37(4):19–24.
- [47] 牛小驰,等.中国特种设备安全,2023,3908:58–62.
NIU Xiaochi, et al. China Special Equipment Safety, 2023, 39(8): 58–62.
- [48] 牛小驰,等.石油化工设计,2024,41(1):30–31, 36, 74.
NIU Xiaochi, et al. Petrochemical Design, 2024, 41(1):30–31, 36, 74.
- [49] STAKENBORGHS R J, et al. Innovative technique for inspection of polyethylene piping base material and welds and non-metallic pipe repair[C]//ASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2006, 4 756:245–255.
- [50] STAKENBORGHS R J, et al. Mechanical test correlation for microwave based NDE inspection of HDPE thermal and electrofusion pipe joints[C]//International Conference on Nuclear Engineering. 2010, 49 347:469–477.
- [51] STAKENBORGHS R J, et al. International Conference on Nuclear Engineering. 2009, 43 543:185–193.

- [52] PAN J, et al. Identifying lack of fusion defects in high-density polyethylene piping welds[C]//2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). IEEE, 2016:58–61.
- [53] MURPHY K, et al. Evaluation of a novel microwave based NDT inspection method for polyethylene joints[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2011, 44 557:321–327.
- [54] GHASR M T, et al. 3D millimeter wave imaging of vertical cracks and its application for the inspection of HDPE pipes[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2014, 1 581(1):1 531–1 536.
- [55] CARRIGAN T D, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(2):586–594.
- [56] RAHMAN M S U, et al. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(1). DOI:10.1007/s10921-020-00669-2.
- [57] WU H, et al. Non-Destructive Testing of Non-Metallic Concentric Pipes Using Microwave Measurements[C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2020:369–372.
- [58] 雒明世,等.通信学报,2023,44(9):139–148.
- LUO Mingshi, et al. Journal on Communications, 2023, 44(9): 139–148.
- [59] AMINEH R K, et al. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5):1 763–1 772.
- [60] 李学斌,等.相控阵超声检测技术在非金属燃气管道检测中的应用[C]//上海:2023年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨燃气安全运营和智慧建设研讨会论文集,2023:127–132.
- LI Xuebin, et al. Application of phased array ultrasonic testing technology in non-metallic gas pipeline detection[C]//Shanghai: 2023 Annual Meeting of Standard Working Committee of China City Gas Association & Seminar on Gas Safety Operation and Intelligent Construction. 2023:127–132.
- [61] 彭伊娟,等.应用声学,2023,42(5):984–992.
- PENG Yijuan, et al. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(5): 984–992.