

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508307

高密度聚乙烯埋地燃气管道热熔接头缺陷 微波成像检测^{*}

华晟晔¹ 王 强¹ 周海婷¹ 金灿华² 蒋诚航²

(1. 中国计量大学能源环境与安全工程学院 杭州 310018; 2. 杭州市特种设备检验科学研究院 杭州 310051)

摘 要:为解决高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, HDPE) 燃气管道热熔接头缺陷检测困难的问题,基于冷焊、过焊缺陷分子链结构特性变化和微波检测原理,提出一种有关微波反射系数幅值的微波成像法,对 HDPE 燃气管道热熔接头试样典型缺陷 (冷焊、过焊) 进行检测成像分析。结果表明,冷焊与过焊缺陷在介电常数上存在差异,且可以较好体现在微波反射系数幅值变化上。无缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-34 dB 左右,含冷焊缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-31 dB 左右,含过焊缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-35 dB 左右;微波反射系数幅值会随着吸热时间、焊接温度与焊接压力的减少而升高;将微波反射系数幅值异常的区域与试样缺陷具体位置进行对应,并与数字射线 (digital radiographic, DR) 检测结果对比,证实该微波成像法对 HDPE 燃气管道热熔接头的冷焊、过焊缺陷具有更好的检出能力。

关键词: HDPE 燃气管道; 热熔接头; 缺陷; 微波检测; 微波反射系数幅值

中图分类号: TE832; TN015 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430. 25

Microwave imaging detection of weld defects in butt fusion piping joints of HDPE buried gas pipelines

Hua Shengye¹ Wang Qiang¹ Zhou Haiting¹ Jin Canhua² Jiang Chenghang²

(1. College of Energy Environment and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Hangzhou Special Equipment Inspection Science Research Institute, Hangzhou 310051, China)

Abstract: To address the difficulty in detecting defects in butt fusion joints of high-density polyethylene (HDPE) gas pipelines, this paper proposes a microwave imaging method based on the molecular chain structure characteristics of cold welding and over-welding defects, as well as microwave detection principles. This method is used to detect and image typical defects (cold welding and over-welding) in HDPE gas pipeline butt fusion samples. The results show that there are differences in dielectric constant between cold welding and over-welding defects, which can be well reflected in the changes of microwave reflection coefficient amplitude. The average microwave reflection coefficient amplitude of the butt fusion joint of a defect-free sample is around -34 dB, while that of the butt fusion joint with a cold welding defect is around -31 dB, and that of the butt fusion joint with an over-welding defect is around -35 dB. The microwave reflection coefficient amplitude increases as the heat absorption time, welding temperature, and welding pressure decrease. By correlating the areas with abnormal microwave reflection coefficient amplitude with the specific locations of sample defects, and comparing the results with digital radiographic (DR) detection, it is confirmed that this microwave imaging method has better detection capability for cold welding and over-welding defects in HDPE gas pipeline butt fusion joints.

Keywords: HDPE gas pipeline; butt fusion; defect; microwave detection; amplitude of microwave reflection coefficient

0 引 言

高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE) 燃

气管道凭借耐腐蚀、柔韧性高、寿命长 (50 年以上) 等特性,逐步替代传统金属管道,成为燃气输配的主流选择^[1-2]。热熔焊接主要用于公称外径在 90 mm 以上的 HDPE 燃气管道,成为 HDPE 燃气管道的主要连接方

法^[3]。HDPE 燃气管道热熔接头缺陷分为工艺缺陷和其他缺陷,工艺缺陷包括过焊、冷焊、卷边焊等,其他缺陷包括夹杂、未熔合等。目前检测 HDPE 燃气管道热熔接头缺陷的主流方法为相控阵超声与微波检测。其中,相控阵超声对宏观缺陷敏感,可以检测出孔洞、夹杂、未熔合缺陷^[4-6],但对由于分子链结构变化产生的冷焊、过焊缺陷难以检出。

微波检测不仅能检出相控阵超声可以检出的缺陷,也能凭借对介电特性变化敏感的特点,对冷焊、过焊缺陷进行检出^[7-9]。微波检测技术具有频率高(0.3 ~ 300 GHz)、频带宽、穿透力强等优点,通过幅值相位等信号特征量构建图像,直观而准确地展示缺陷的大小和深度,对于非金属管道的检测比较有效^[10-12]。

国内外学者针对 HDPE 燃气管道微波成像检测进行了一定的研究,Stakenborgs^[13]最早发现 HDPE 燃气管道热熔接头焊接时加热和冷却过程会产生不同于基材的微观结构差异,从而影响接头局部区域的介电常数,通过微波成像将热熔焊缝与基材区分开来,并创建含有多种缺陷类型的焊缝图像,最后通过力学试验等方法验证微波检测结果。Murphy 等^[14]使用 Evisive 微波装置对外径 250 mm,壁厚 22.7 mm 的 HDPE 燃气管道热熔接头进行检测,其中标准无缺陷、含夹杂缺陷以及盲样的热熔接头微波成像均得到较好结果。Rahman 等^[15]使用 K 波段圆形波导探头和 K、Ka 波段矩形波导探头对外径 160 mm,壁厚 16 mm 的 HDPE 燃气管道的人为孔洞与裂纹进行检测,3 个波导探头产生图像的信噪比分别为 60.9、150.1、199.9 dB。Ghasr 等^[16]基于合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)算法的三维成像,采用 Ka 波段(26.5 ~ 40 GHz)微波反射仪对厚度为 25.4 mm 的 HDPE 平面矩形面板的人为孔洞与裂纹进行检测,得出该反射仪在 HDPE 材料内部横向范围和深度范围的空间分辨率分别为 1.6 和 7 mm。车飞等^[17]对外径 315 mm,壁厚 17.9 mm 的现场 HDPE 燃气管道热熔接头进行微波检测,检测结果显示受检热熔接头有 3 处微波图像显示异常,均为未熔合缺陷,进行破坏性试验的结果与微波检测的结果吻合。祝新伟等^[18-19]用微波检测装置在 21.6 和 24 GHz 频率下检测出 HDPE 燃气管道热熔接头冷焊、未熔合等缺陷,通过拉伸力学测试和真密度测试对微波检测方法的有效性进行验证。国内外学者对 HDPE 燃气管道热熔接头中的冷焊、过焊缺陷研究有限,通过微波成像技术的一种特征量,使量化分析 HDPE 燃气管道热熔接头中的冷焊、过焊缺陷成为可能。

本文针对 HDPE 燃气管道热熔接头中的冷焊、过焊缺陷,基于材料微观特性变化和微波检测原理,在 6 ~ 14 GHz 频率下,根据微波反射系数幅值特征量对检测的数据进微波成像,成像结果与数字射线成像(digital

radiography, DR)结果进行了比对分析。

1 微波检测原理

1.1 HDPE 的介电特性与微波穿透能力

HDPE 作为一种非极性高分子材料,其介电特性表现为相对介电常数 ϵ_r 和损耗角正切 $\tan\theta$ 在微波检测频段(1 ~ 30 GHz)HDPE 的介电常数几乎不随频率变化,近似为线性介质。相对介电常数 ϵ_r 一般情况定义为^[20]:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

式中: ϵ 是绝对介电常数; ϵ_0 是自由空间介电常数; j 是损耗因子。

实部 ϵ_r' 与测量材料储存电场能量的能力有关,虚部 ϵ_r'' 与测量材料耗散外部电场的程度有关,损耗因子 j 受介电损耗和电导率两方面的影响。对材料进行微波检测时,相对介电常数的两个分量都对测量信号有影响。微波在 PE 中的衰减主要由介电损耗引起,穿透深度 δ 计算公式为:

$$\delta = \frac{\lambda_0}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r' \tan\theta}} \quad (2)$$

式中: λ_0 为真空中的波长(如 6 GHz 频率对应 5 cm 波长); $\tan\theta$ 取 0.000 3; ϵ_r' 取 2.2 ~ 2.4。通过计算可得穿透深度 δ 可以达到 30 cm,表明微波可穿透 HDPE 管道进行内部缺陷检测。

1.2 微波反射原理

当微波垂直入射到两种介质界面时,波阻抗 Z 的突变会导致反射和透射,波阻抗 Z 计算公式为:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

式中: E 为电场强度; H 为磁场强度; μ 为介质的磁导率; ϵ 为介质的介电常数。

反射系数 Γ 是反射波电场与入射波电场的比值,其计算公式为:

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

式中: Z_1 为微波在入射介质中的波阻抗; Z_2 为微波在透射介质中的波阻抗。

HDPE 管道内部缺陷的产生或者材料结构的改变,会导致材料不连续结构处出现不同的介电常数 ϵ ,从而引起反射系数 Γ 的明显变化。微波反射系数幅值可表示为入射波振幅与回波振幅的比值,微波反射系数幅值的异常升高(或降低)可指示材料内部存在介电特性突变,即缺陷区域。微波反射原理示意图如图 1 所示。

1.3 冷焊与过焊缺陷对介电常数的影响分析

冷焊缺陷的微观特征是分子链未充分扩散与缠结,

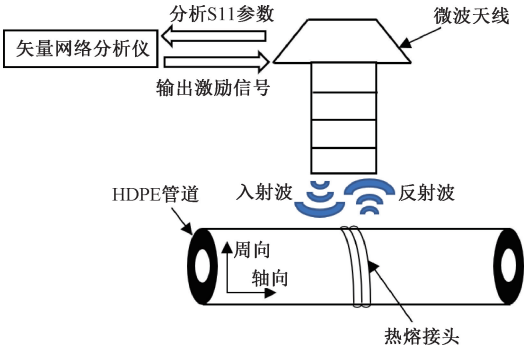


图 1 微波反射原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave reflection principle

存在微空隙或界面,局部密度可能略低于正常焊接区,但整体仍保留较多未熔合的晶区^[21]。由于未充分熔合区域中存在更多界面极化,在微波频率下界面极化贡献增强,导致式(1)中 ε_r' 升高。微空隙和界面增多导致微波能量散射与耗散增加,导致式(1)中 ε_r'' 升高。因此冷焊缺陷的存在会使得介电常数整体略高于正常焊缝。

过焊缺陷的微观特征是分子链因过热而发生断链、氧化或降解,形成低分子量链段或微孔,材料密度下降,可能出现碳化或微气泡^[22]。由于材料疏松、微孔增多,整体极化能力减弱,导致式(1)中 ε_r' 下降。若存在碳化或氧化产物,会导致电导损耗增加;若主要为微孔,则散射损耗为主,导致式(1)中 ε_r'' 变化复杂。因此过焊缺陷的存在会使得介电常数整体略低于正常焊缝,且可能伴随损耗机制变化。

2 微波天线仿真

对微波天线性能进行仿真,重点考虑近场小光斑、低旁瓣设计。为了缩小光斑尺寸,设计了一个带宽 6~14 GHz 小口径的喇叭天线,其结构如图 2 所示。

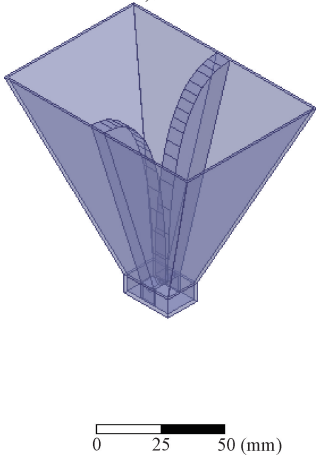


图 2 天线结构

Fig. 2 Antenna structure diagram

不同频点方向图如图 3 所示,6、10、14 GHz 3 个频点的方向图表明,天线在主辐射方向(通常为喇叭开口方向)具有明显的主瓣,旁瓣电平较低。随着频率升高,主

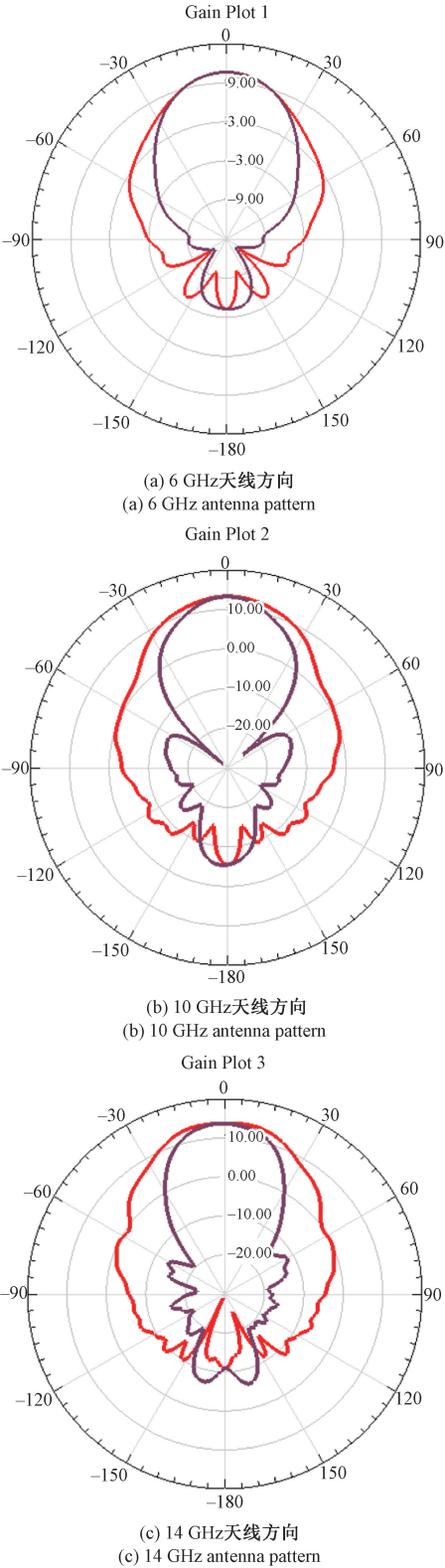


图 3 不同频点方向

Fig. 3 Directional diagram of different frequency points

瓣宽度逐渐变窄,方向性增强,符合喇叭天线频率越高、波束越集中的特性。天线 S11 响应曲线如图 4 所示,S11 响应曲线反映出频段 6 ~ 14 GHz 内的最差 S11 在 -11.2 dB 左右。

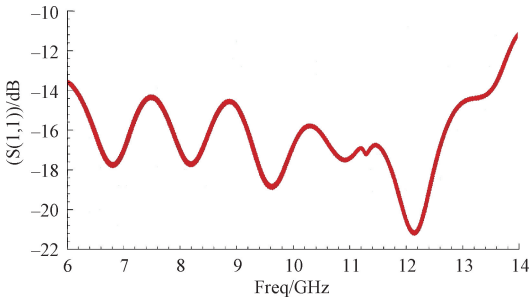


图 4 天线 S11 响应
Fig. 4 Antenna S11 response

3 HDPE 管道缺陷微波检测实验

3.1 实验试样制备

使用规格为 110 mm×10 mm 的 HDPE 管材,按照 TSGD2002—2006《燃气用 PE 管道焊接技术规则》^[23],首先采用该规格管道的正常焊接工艺生产试样 1#。查阅相关文献发现,影响 HDPE 燃气管道热熔接头焊接性能的主要参数为焊接温度 T 、焊接规定压力 P 和吸热时间 t 。通过调整上述 3 个主要参数,来预制冷焊、过焊缺陷,具体调整参数如表 1 所示。

表 1 试样具体调整参数				
Table 1 Sample specific adjustment parameter				
	编号	$T/^{\circ}\text{C}$	P/MPa	t/s
无缺陷试样	1#	225	0.38	100
	2#	225	0.38	80
	3#	225	0.38	60
	4#	200	0.38	100
	5#	200	0.38	80
冷焊试样	6#	200	0.38	60
	7#	175	0.38	100
	8#	175	0.38	80
	9#	175	0.38	60
	10#	225	0.25	100
	11#	225	0.20	100
过焊试样	12#	250	0.38	100
	13#	250	0.38	150
	14#	275	0.38	100
	15#	275	0.38	150

3.2 实验装置设计

微波检测实验装置由扫查架、轴向驱动模块、周向驱动模块、矢量网络分析器和天线传感器组成。根据管径

组装周向扫查架,调节天线传感器的提高距离,设定检测参数(管径 110 mm、轴向距离 160 mm、周向步频 5 mm、轴向步频 5 mm、检测频率 6 ~ 14 GHz),通过轴向和周向交替步进运动进行检测,实验装置如图 5 所示。

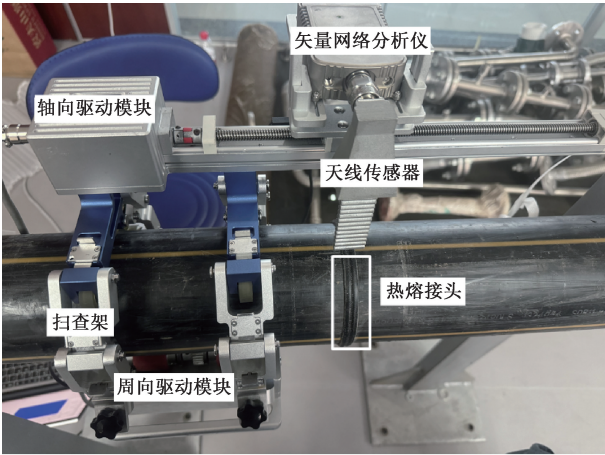


图 5 实验装置
Fig. 5 Experimental setup diagram

3.3 实验结果与分析

微波入射过程中,会依次在热熔接头外卷边、焊缝内部和内卷边发生反射,通过分析微波反射信号的时间延迟,可以准确定位焊缝区域。焊缝处的材料密度和几何特性与管道其他部分存在显著差异,因此在检测成像中会表现出特定的反射特征。利用这些特征,可以识别出焊缝的具体位置。装置具备层析成像功能,可以根据需求选取焊缝内部的检测结果作为分析对象。先抽取任意试样为例,根据微波在 PE 材料中的入射时间与穿透深度原理,找出热熔接头外卷边、焊缝内部和内卷边对应的曲线区域。图 6 所示为外卷边结果,反射信号入射时间为 1.008 ~ 1.357 ns;图 7 所示为焊缝内部结果,反射信号入射时间为 1.357 ~ 1.545 ns;图 8 所示为内卷边结果,反射信号入射时间为 1.545 ~ 1.674 ns。图 7 中的中心色带与边缘色带相较于图 6 与 8 具有明显区分,反映出基材与热熔焊缝处的介电参数差异明显,且理论上与焊缝内部区域吻合,为后续实验选取微波入射时间提供参考。

根据如上焊缝的判断过程,将测得的微波反射系数幅值进行对数计算后输出,并进行色度调整。首先对无缺陷、冷焊、过焊这 3 种缺陷的典型热熔接头试样的幅值大小及分布进行分析。

图 9 所示为试样 1#热熔接头处的检测结果,截取入射时间为 1.365 ~ 1.545 ns 的波峰段。图 10 所示为试样 9#热熔接头处的检测结果,截取入射时间为 1.425 ~ 1.561 ns 的波峰段。图 11 所示为试样 14#热熔接头处的检测结果,截取入射时间为 1.420 ~ 1.548 ns 的波峰段。

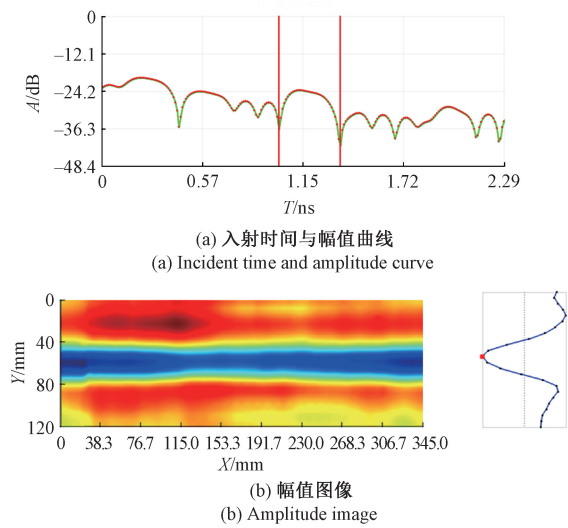


图6 外卷边
Fig. 6 Flanged edge

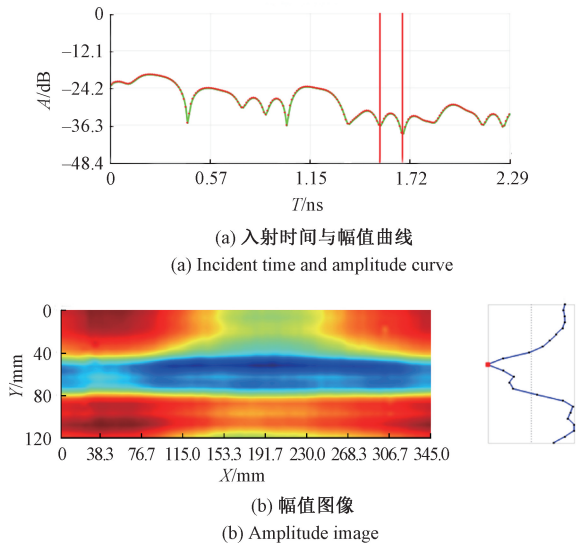


图8 内卷边
Fig. 8 Rolled edge

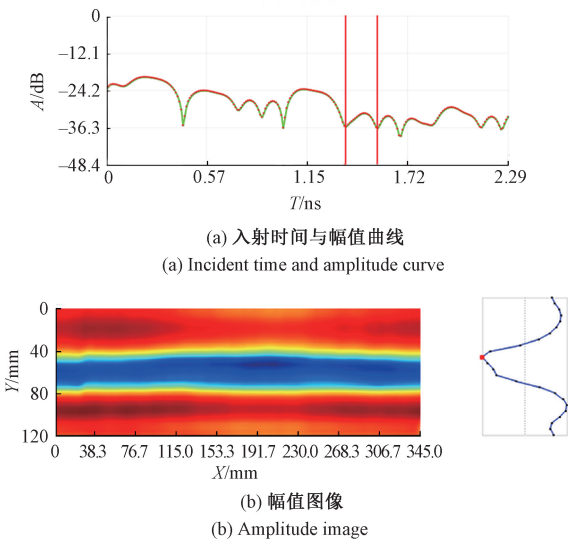


图7 焊缝内部
Fig. 7 Internal weld

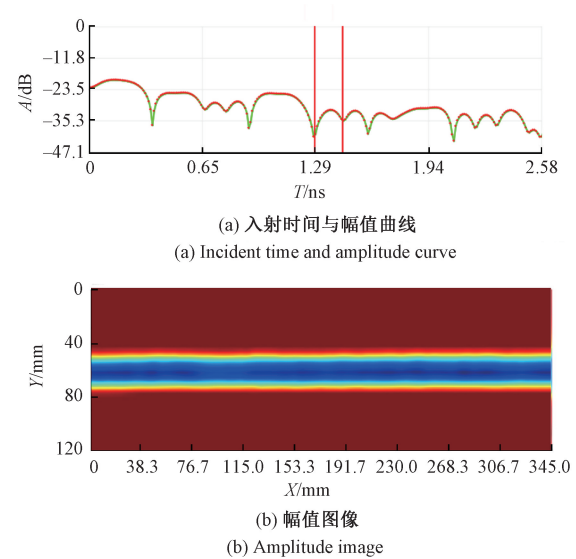


图9 试样1#热熔接头处的检测结果
Fig. 9 Test results at the butt fusions joint of sample 1#

图9(a)~11(a)为入射时间与幅值曲线,图9(b)~11(b)为幅值图像,由于实验设置周向步进为5 mm,则每一行上会产生69个像素点,每个像素点有对应的微波反射系数幅值,需要对每个像素点的微波反射系数幅值数据进行统计。

3个试样热熔接头处的微波反射系数幅值对比如图12所示,试样1#热熔接头处幅值的平均值为-33.99 dB,最大值为-33.61 dB,最小值为-34.27 dB,离散系数为0.004 02。试样9#热熔接头处幅值的平均值为-30.09 dB,最大值为-29.92 dB,最小值为-30.32 dB,离散系数为0.002 89。试样14#热熔接头处幅值的平均值

为-35.33 dB,最大值为-34.69 dB,最小值为-35.95 dB,离散系数为0.007 48。可以直观得出含冷焊缺陷的试样9#热熔接头处的微波反射系数幅值较大,含过焊缺陷的试样14#热熔接头处的微波反射系数幅值较小。这是因为冷焊区域的介电常数相比正常区域更大,导致微波反射系数幅值增大;而过焊区域介电常数相比正常区域更小,导致微波反射系数幅值减小。另外,试样9#的数据波动较小,试样14#的数据波动较大。

全部试样热熔接头处的微波反射系数幅值平均值变化趋势以及离散系数变化趋势如图13所示。其中试样1#~15#热熔接头处的微波反射系数幅值平均值分别为

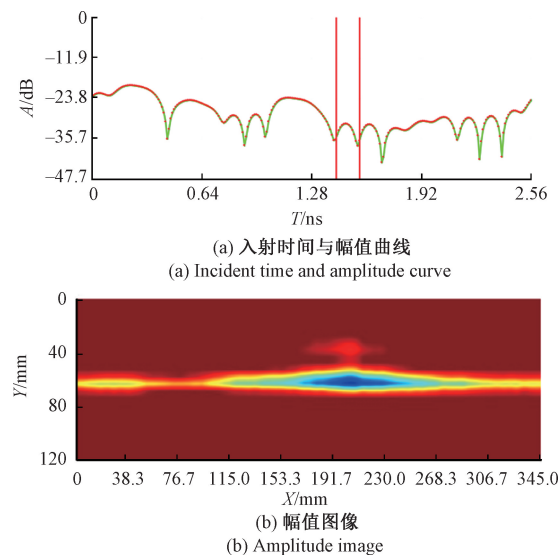


图 10 试样 9#热熔接头处的检测结果
Fig. 10 Test results at the butt fusions joint of sample 9#

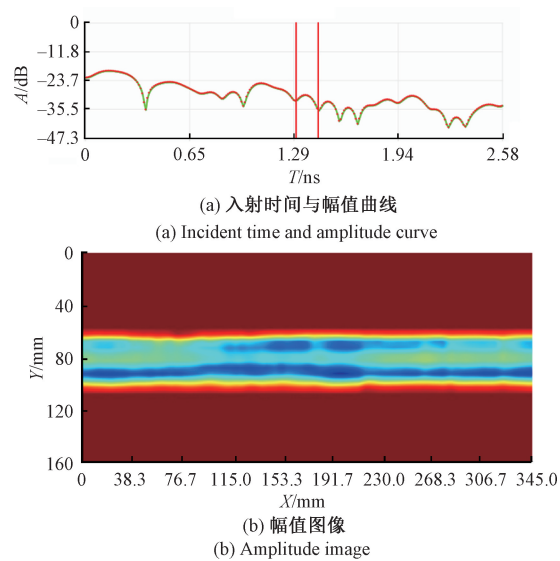


图 11 试样 14#热熔接头处的检测结果
Fig. 11 Test results at the butt fusions joint of sample 14#

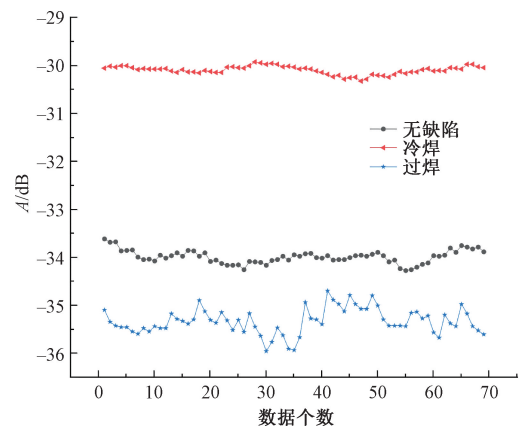


图 12 3 个试样热熔接头处微波反射系数幅值对比
Fig. 12 Comparison of microwave reflection coefficient amplitude values at the hot melt joint of three samples

4#、7#焊接温度 T 分别为 275 ℃、250 ℃、225 ℃、200 ℃、175 ℃。通过对上试样数据比较可得,热熔接头处微波反射系数幅值随着吸热时间 t 、焊接温度 T 与焊接压力 P 的减少而升高。

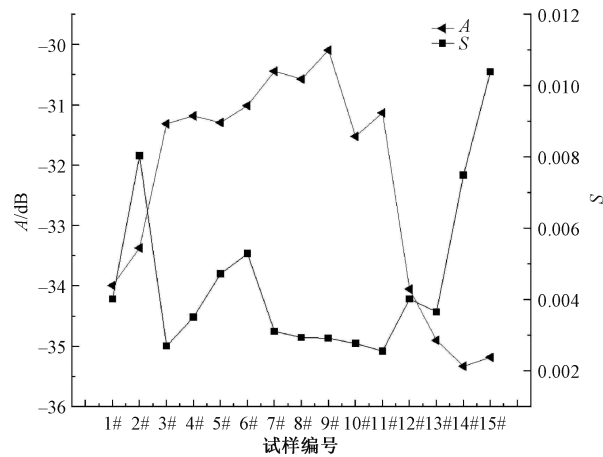


图 13 全部试样反射幅度平均值与离散系数变化曲线
Fig. 13 Curve of average reflection amplitude and variation coefficient of all samples

-33.99、-33.37、-31.31、-31.18、-31.29、-31.01、-30.44、-30.57、-30.09、-31.52、-31.13、-34.05、-34.90、-35.33、-35.18 dB。从图 16 可知,除了试样 2#,剩下含冷焊缺陷试样热熔接头处的微波反射系数幅值在-31 dB 附近,明显高于无缺陷的试样 1#;除了试样 12#,剩下含过焊缺陷试样热熔接头处的微波反射系数幅值在-35 dB 附近,低于无缺陷的试样 1#。试样 4#、5#、6#吸热时间 t 分别为 100、80、60 s。试样 1#、10#、11#焊接压力 P 分别为 0.38、0.25、0.20 MPa。试样 14#、12#、1#、

对试样 8#和 15#进行 DR 成像与微波检测,结果如图 14 和 15 所示。图 14(a) 和 15(a) 为微波成像结果,图中按照起始点位置将管道周向划分成 6 块区域,微波反射系数幅值异常的区域用红框标出。图 14(b) 和 15(b) 为 DR 成像结果,与微波成像对应的区域也用红框标出。可以看出,两个试样中微波反射系数幅值偏差的区域,在 DR 成像中与周围区域差别不大,说明微波成像相较于 DR 成像对 HDPE 燃气管道热熔接头的冷焊、过焊缺陷的检出能力更强。

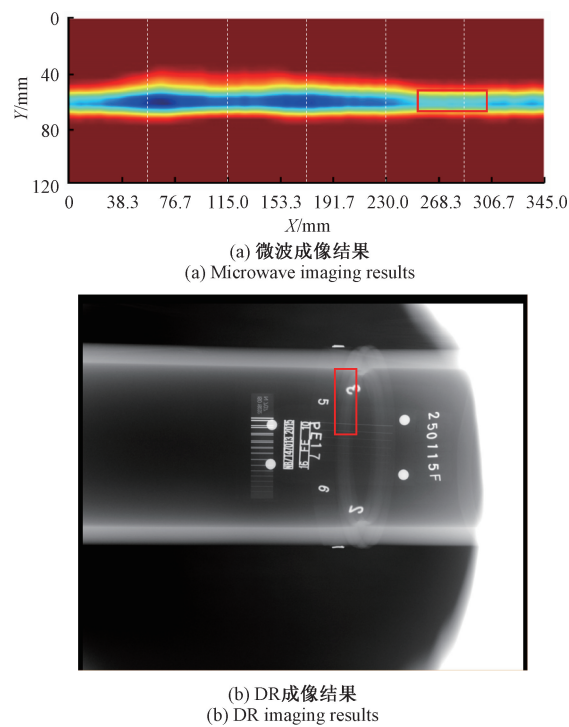


图 14 试样 8#幅值异常区域对比结果
Fig. 14 Comparison results of abnormal amplitude areas in sample 8#

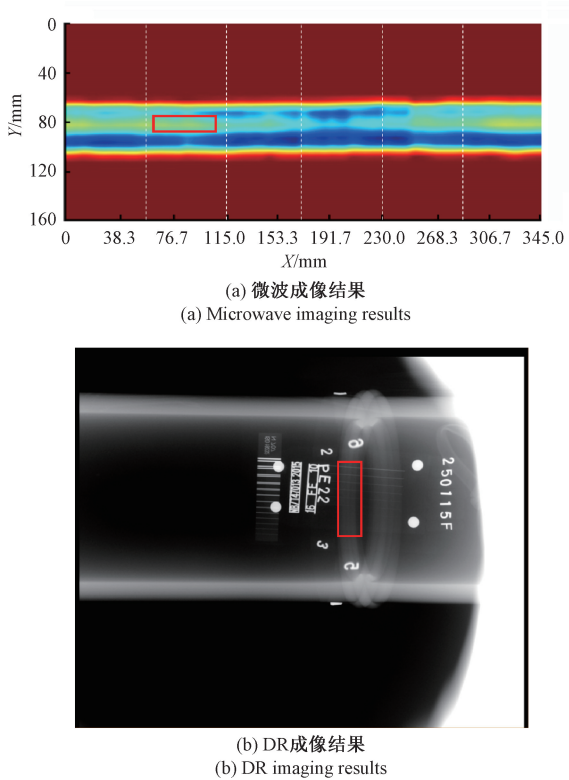


图 15 试样 15#幅值异常区域对比结果
Fig. 15 Comparison results of abnormal amplitude areas in sample 15#

4 结 论

基于微观层面分子链结构特性变化和微波反射与成像原理,进行天线仿真,提出一种微波反射系数幅值的微波成像检测方法。设计搭载频率范围 6~14 GHz 微波检测系统的管道自动扫查装置,使用该装置对制备的 HDPE 燃气管试样热熔接头区域进行扫描实验。实验结果表明,冷焊与过焊缺陷在介电常数上存在差异,二者微波反射系数幅值相差约 4 dB;同时无缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-34 dB 左右,含冷焊缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-31 dB 左右,含过焊缺陷试样热熔接头的微波反射系数幅值平均值在-35 dB 左右;焊接温度 θ 、焊接压力 P 和吸热时间 T 3 种焊接工艺参数的变化与微波反射系数幅值存在正向关系,微波反射系数幅值会随着吸热时间、焊接温度与焊接压力的减少而升高。将微波反射系数幅值异常的区域与试样具体位置进行对应,并与 DR 成像技术对比,说明微波成像方法对 HDPE 燃气管热熔接头冷焊、过焊缺陷具有更好的检出效果。

参考文献

[1] 郭凯,杨凯,凌晓,等. 聚乙烯燃气管道热熔接头缺陷检测系统设计及实现[J]. 压力容器, 2023, 40(10): 83-90.
GUO K, YANG K, LING X, et al. Design and implementation of defect detection system for polyethylene gas pipeline butt fusion joints [J]. Pressure Vessel, 2023, 40(10): 83-90.

[2] 巫宇航,王强,肖瑶,等. 燃气管道巡检四足机器人的改进沙猫群优化 SLAM 算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 128-136.
WU Y H, WANG Q, XIAO Y, et al. Research on improved SLAM algorithm based on sand cat swarm optimization for gas pipeline inspection quad-foot robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 128-136.

[3] 宋剑华,陆扬,郭涛,等. 基于正交试验研究燃气用聚乙烯管道热熔接头的冷焊缺陷[J]. 理化检验-物理分册, 2024, 60(5): 4-7.
SONG J H, LU Y, GUO T, et al. Research on cold welding defects of polyethylene pipeline butt fusion joints for gas use based on orthogonal experiment[J]. Physical and Chemical Testing-Physical Volume, 2024, 60(5): 4-7.

[4] 肖权旌,王强,谷小红,等. 改进 YOLOv5 的高密度聚乙烯管热熔接头 3D 全聚焦成像缺陷识别分析[J].

- 应用声学, 2025, 44(1): 88-96.
- XIAO Q J, WANG Q, GUO X H, et al. Improvement of YOLOv5 high density polyethylene pipe butt fusion joint 3D full focus imaging defect recognition analysis [J]. Applied Acoustics, 2025, 44(1): 88-96.
- [5] 陈天亮, 王强, 许卫荣, 等. 基于改进 YOLOX 算法的 HDPE 管接头 TFM 相控阵超声图谱缺陷识别[J]. 声学技术, 2024, 43(4): 495-502.
- CHEN T L, WANG Q, XU W R, et al. Defect identification of HDPE pipe joint TFM phased array ultrasonic spectrum based on improved YOLOX algorithm [J]. Acoustic Technology, 2024, 43(4): 495-502.
- [6] EL-HAWWAT S, SHAH J K, WANG H, et al. Detection of internal cracks in polyethylene pipes using ultrasonic imaging and deep learning[J]. Measurement, 2025, 253: 117491.
- [7] 李曼曼, 梁雪莲, 马旭卿, 等. 聚乙烯燃气管道热熔接头微波检测[J]. 煤气与热力, 2023, 43(5): 18-23.
- LI M M, LIANG X L, MA X Q, et al. Microwave detection of polyethylene gas pipeline butt fusion joints[J]. Gas and Heat, 2023, 43(5): 18-23.
- [8] 邵泽龙, 左延田. 聚乙烯管道夹杂缺陷的微波检测实验研究[J]. 石油化工设备, 2024, 53(6): 15-19.
- SHAO Z L, ZUO Y T. Experimental study on microwave detection of inclusion defects in polyethylene pipes[J]. Petrochemical Equipment, 2024, 53(6): 15-19.
- [9] 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 ZH Y, FANG Y, YU D CH, et al. Research progress on non-destructive testing of polyethylene gas pipeline butt fusion joints [J]. Engineering Plastic Application, 2025, 53(1): 159-166.
- [10] LITTLE J R. NDE of non-metallic components using microwave based NDE methods and techniques [J]. Journal of Nondestructive Testing and Evaluation, 2023, 20(2): 56-62.
- [11] YU H, JIN Q, MENG Z, et al. Detection of defects in polyethylene pipes using open microwave coaxial line resonator sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 358: 114427.
- [12] AMINEH R K. Microwave nondestructive testing of nonmetallic pipes: An overview of the major developments[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2024, 27(4): 54-66.
- [13] STAKENBORGH S R J. Validation of a microwave based inspection system for HDPE butt fusions[C]. ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, 2014.
- [14] MURPHY K, LOWE D. Evaluation of a novel microwave based NDT inspection method for polyethylene joints[C]. ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference, 2011: 321-327.
- [15] RAHMAN M S, HARVONO A, ABOU-KHOUSA M A. Microwave non-destructive evaluation of glass reinforced epoxy and high density polyethylene pipes[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(1): 26.
- [16] GHASR M T, YING K, ZOUGHI R. 3D millimeter wave imaging of vertical cracks and its application for the inspection of HDPE pipes [C]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1581(1): 1531-1536.
- [17] 车飞, 朱丽丽, 王一帆, 等. 燃气 PE 管道热熔接头的微波无损检测应用[J]. 管道技术与设备, 2022(3): 41-44.
- CHE F, ZHU L L, WANG Y F, et al. Application of microwave non destructive testing for gas PE pipeline butt fusion joints[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2022(3): 41-44.
- [18] 祝新伟, 潘金平, 谭连江. 聚乙烯管道热熔接头冷焊缺陷的微波检测和真密度测试研究[J]. 压力容器, 2013, 30(9): 54-59.
- ZHU X W, PAN J P, TAN L J. Research on microwave detection and true density testing of cold welding defects in polyethylene pipeline butt fusion joints[J]. Pressure Vessel, 2013, 30(9): 54-59.
- [19] 祝新伟, 潘金平, 谭连江, 等. 微波扫描法检测聚乙烯管道热熔接头缺陷初探[J]. 压力容器, 2013, 30(2): 73-76.
- ZHU X W, PAN J P, TAN L J, et al. Preliminary study on microwave scanning method for detecting defects in polyethylene pipeline butt fusion joints [J]. Pressure Vessel, 2013, 30(2): 73-76.
- [20] STAKENBORGH S R J. Microwave based NDE inspection of HDPE pipe welds [C]. Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, 2009.
- [21] 牛小驰, 车飞, 陈斯. 聚乙烯燃气管道热熔接头冷焊缺陷的微波检测技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(8): 58-62.
- NIU X CH, CHE F, CHEN S. Research on microwave detection technology for cold weld defects in butt fusion joints of polyethylene gas pipelines [J]. China Special Equipment Safety, 2023, 39(8): 58-62.
- [22] WANG Z, ZHU C, PAN J, et al. Microwave based non-

destructive testing for detecting cold welding defects in thermal fusion welded high-density polyethylene pipes[J]. Polymers, 2025, 17(15): 2048-2048.

[23] TSG D2002-2006. 燃气用聚乙烯管道焊接技术规则[S]. 2006.
TSG D2002-2006. Welding technical rules for polyethylene pipes for gas use[S]. 2006.

作者简介



华晟晔, 2023 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为聚乙烯管道热熔接头微波无损检测技术。
E-mail: P23060857021@cjl.u.edu.cn

Hua Shengye received his B. Sc. degree from Jiliang University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interests include

microwave non-destructive testing technology for polyethylene pipeline butt fusion joints.



王强 (通信作者), 1998 年于中南工业大学获得学士学位, 2002 年于中南大学获得硕士学位, 2005 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能检测技术、无损检测技术。

E-mail: qiangwang@cjl.u.edu.cn

Wang Qiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Central South University of Technology in 1998, M. Sc. degree from Central South University in 2002, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005, respectively. Now he is a professor in China Jiliang University. His main research interests include intelligent inspection technology and non-destructive testing technology.