

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.018

PE管道热熔接头超声相控阵检测的阵元参数优化与缺陷响应

方毅¹, 余道丞¹, 许勇¹, 杨明越¹, 牟婕¹, 郑宇航², 高振宇², 张毅², 唐建峰²

[1. 中石化天然气分公司山东实华天然气有限公司, 山东青岛 266061; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580]

摘要: 聚乙烯(PE)管道因耐腐蚀性、施工便利等优势被广泛应用于燃气输送领域,其热熔焊接接头的质量至关重要。PE管在焊接过程中产生的焊接缺陷会降低接头力学性能和密封性能等,目前超声相控阵技术是检测该类缺陷的主要手段。因此,超声相控阵中的阵元参数对超声波检测的影响至关重要。基于COMSOL Multiphysics软件,构建了含热熔焊缝的PE管道有限元模型,通过仿真研究了阵元频率、宽度、间距及数量等参数对超声波传播特性的影响,并分析了焊接工艺缺陷以拉伸弹性模量差异为代表对超声信号的影响。结果表明,随阵元频率升高,PE材料对超声波的衰减逐渐增强,当阵元频率为4 MHz时,超声波在能量衰减与检测分辨率之间实现了较优平衡;增大阵元宽度可提升声压,当阵元宽度为0.5 mm时,聚焦点声压可达3.501 5 MPa;阵元间距过大会降低声压相干性,间距为0.6 mm时聚焦效果最佳;增加阵元数量能增强声压叠加效应,阵元数量为16时可兼顾检测效率与效果;焊缝区域的拉伸弹性模量差异显著影响声压反射率,当拉伸弹性模量从600 MPa增至1 000 MPa时,声压反射率从-0.3降至0,信号幅值随拉伸弹性模量差异的增大而增强。

关键词: 聚乙烯管;热熔焊接;超声相控阵;焊接接头;有限元模拟

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0138-10

Array element parameter optimizations and defect responses for ultrasonic phased array testing of hotmelt joints for PE pipe

FANG Yi¹, YU Daocheng¹, XU Yong¹, YANG Mingyue¹, MOU Jie¹, ZHENG Yuhang², GAO Zhenyu², ZHANG Yi², TANG Jianfeng²

[1. Shandong Shihua Natural Gas Company Limited, Qingdao 266061, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract : Polyethylene (PE) pipes are widely used in gas transportation due to their corrosion resistance and construction convenience, while the quality of hot-melt welded joints is crucial. The welding defects generated during the welding process of polyethylene pipes will reduce the mechanical properties, sealing performance and other properties of the joints. At present, ultrasonic phased array technology is the main means to detect such defects. Using COMSOL Multiphysics, a finite element model of PE pipes with hot-melt welds was developed to simulate the effects of element parameters such as frequency, width, spacing, quantity on ultrasonic wave propagation and analyze the impact of welding defects, represented by tensile elastic modulus variations, on ultrasonic signals. The results show that ultrasonic attenuation in PE materials increases with the increase of array element frequency, which achieves a good balance between energy attenuation and detection resolution with 4 MHz. Increasing array element width can improve sound pressure, reaching 3.501 5 MPa of the focal point when the width is 0.5 mm. Excessively large array element spacing will reduce sound pressure coherence, and the optimal focusing effect is obtained at 0.6 mm. Increasing the number of array elements can enhance sound pressure superposition, balancing detection efficiency and effect with 16 elements. The difference in tensile elastic modulus in the weld area significantly affects sound pressure reflectivity, as the tensile elastic modulus increases from 600 MPa to 1 000 MPa, the reflectivity decreases from -0.3 to 0, increasing signal amplitude with the increase of the modulus difference.

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), 中央高校基本科研业务费专项(24CX03017A)

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: 2025-06-20

引用格式: 方毅, 余道丞, 许勇, 等. PE管道热熔接头超声相控阵检测的阵元参数优化与缺陷响应[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 138-147.

FANG Yi, YU Daocheng, XU Yong, et al. Array element parameter optimizations and defect responses for ultrasonic phased array testing of hotmelt joints for PE pipe[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 138-147.

Keywords : polyethylene pipe ; hot-melt welding ; ultrasonic phased array ; welded joint ; finite element simul

聚乙烯(PE)管道焊接接头作为管道系统的力学薄弱区,是最容易发生泄漏的环节域^[1]。PE管道的连接主要采用电熔焊接和热熔焊接两种工艺^[2-3]。其中,热熔焊接作为PE管道主要连接方式,其焊接质量将会影响管道系统的使用寿命和安全性。

研究表明,管材融合端面处理不干净或者焊接工艺使用不恰当会导致接头处形成宏观和工艺缺陷^[4-5]。焊接缺陷的存在将显著降低接头的力学性能、密封性能、抗腐蚀性能等^[6-7],所以亟需无损检测技术对其进行质量把控^[8]。目前在燃气输配系统中,PE管道焊接接头中使用较多的检测手段有超声相控阵技术^[9-12]、微波技术^[13-15]、射线技术^[16-17]等,其中超声相控阵技术由于具有高分辨率与准确性、适用于复杂结构的多角度检测等特点,已成为该领域研究的热点。

通过仿真优化相控阵的阵元参数可以提高设备检测夹杂、孔洞、裂纹等缺陷的灵敏度与分辨力,吴军等^[18]利用模拟软件建立PE管道的几何模型,根据声场的模拟结果,优化了相控阵的阵元数量、阵元频率、阵元间距,并且在管道内设置夹杂缺陷,根据缺陷的最大回波幅值优化了相控阵楔块的材料。甘文军等^[19]使用仿真软件优化了相控阵的阵元尺寸、阵元频率、阵元数量,根据优化的结果,对处于不同深度的9个横通孔缺陷进行检测,结果发现优化的检测工艺可检测全部缺陷。张晓宝^[20]利用Wave 3000设置了热熔焊接中的孔洞、夹渣缺陷,研究了相控阵的阵元宽度、阵元个数、阵元频率等对于缺陷检测效果的影响,通过观察回波信号的幅值,选取最佳的相控阵参数。郭伟灿等^[21]对超声相控阵的声场进行模拟,优化了探头的阵元间距、阵元频率与阵元数量,并根据优化结果研制了专用的探头,结果发现此探头能够有效检测出焊缝处的孔洞、金属丝错位等缺陷。甘文军等^[22]对两种不同型号的PE管道进行了声场的模拟,以声场分布和缺陷成像质量为指标,优化了相控阵探头的参数,结果发现优化后的相控阵探头可将预先设置不同深度的气孔与裂纹缺陷全部检出,且检测结果较理想。

此外,模拟实验也可以提高缺陷的检测效果与成像质量。方海清等^[23]在模拟软件中建立PE有限元几何模型,设置了孔洞缺陷,利用建立的复合频

率超声信号传播模型对孔洞缺陷进行检测,结果发现,模拟与实验的结果更为接近,偏差仅为11.77%。伏喜斌^[24]为了降低相控阵图像的获取成本,利用COMSOL Multiphysics对相控阵成像进行模拟,利用Richardson-Lucy反卷积算法对PE管壁的孔洞缺陷进行模拟成像,取得了较好的效果。

现有超声相控阵数值模拟研究主要集中于孔洞、夹杂及裂纹等宏观缺陷,研究主要目标在于提升设备检测灵敏度、分辨力以及成像质量。然而,对于焊接完成后本身工艺缺陷的声学特征研究仍存在明显不足。基于此,需通过有限元仿真方法,构建工艺缺陷模型,研究工艺缺陷对于超声波传播规律的影响。笔者基于COMSOL Mutiphysics有限元仿真分析方法^[25]能够实现对含缺陷的热熔PE焊缝精确的仿真分析。该方法不但能够在实验前优化检测方案、提高检测的精度与效率、节约检测成本^[26],还可以观测超声波在管道与焊缝中的传播路径。主要研究阵元频率、阵元宽度、阵元间距及阵元数量等关键参数对声场分布特征的影响规律,优化阵元参数;其次,在优化参数基础上,通过构建焊接缺陷模型,研究材料本身属性对超声波传播特性的影响规律。

1 有限元模型的建立与验证

1.1 模型建立

1.1.1 几何模型

首先选取管径110 mm、标准尺寸比(SDR)为11的PE管壁模型为研究对象,其高度为10 mm,宽度为20 mm,如图1a所示。在该PE管道上壁面放置超声相控阵的阵元,此外为了简化模型、提高运算速度,去掉了将机械能转换成电信号的方法,利用固体力学物理场中的指定速度来实现对各单元的延时激发,在每个阵元下面设置边界探针用来接收超声信号,并在主声轴线处设置点探针用来收集主声轴处的超声信号^[27]。随后在模型一的基础上设置了模型二,其与模型一最大的区别在于中间加入了一条热熔焊缝。焊缝左右母材长12 mm,高10 mm,其余设置均与模型一相同,如图1b所示。模型一与模型二中材料属性见表1与表2。

1.1.2 网格划分

Comsol是基于有限元方法的软件,需要把连续的求解域离散化,从而能够利用数值方法求解。但

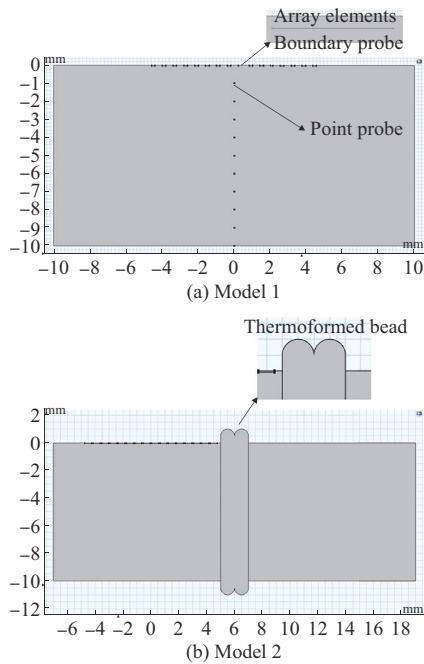


图1 超声相控阵检测模型

Fig. 1 Ultrasonic phased array detection model

表1 模型一的材料属性设置

Tab. 1 Model 1 material attribute setting

Material	Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	Longitudinal wave velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
PE-HD	970	1.0	0.4	1 486

表2 模型二的材料属性设置

Tab. 2 Model 2 material attribute setting

Materials	Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	Longitudinal wave velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Base Material	970	1.0	0.4	1 486
		0.6		1 152
		0.7		1 243
Weld	970	0.8	0.4	1 330
		0.9		1 410
		1.0		1 486

是网格数量过大则会导致计算机运行与储存负担增大;而过少的网格数量会导致求解的精度降低、收敛性差,最终导致不能准确地描述物理现象^[28]。然而在超声的仿真中,为了能够准确模拟传播过程,网格尺寸应设置为波长的1/15~1/6,笔者选取最大网格尺寸为波长的1/6,最大网格尺寸可由式(1)计算得到。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

式中: c 为超声声速; λ 为超声波长; f 为阵元频率。

由于阵元的尺寸通常比较小,排布比较紧凑,

为了准确模拟声波传播及声场分布,对阵元处进行网格细化,如图2c所示。

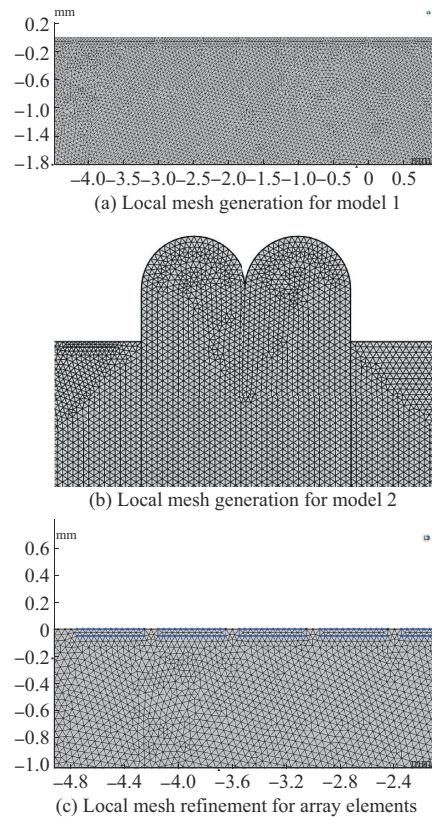


图2 模型网格划分

Fig. 2 Model grid division

1.1.3 激励信号设置

超声相控阵与常规超声最大的区别在于相控阵具有多个压电晶片,根据惠更斯-菲涅尔原理,相对于相控阵探头,各个晶片都是发射超声波的子声源,根据延迟聚焦法则控制各子声源发射的延迟时间,实现波束的聚焦与偏转^[29]。模型中需要将超声入射到焊缝内,所以需要一定的偏转角度。为了提高效率,模型还设置了不同角度的参数化扫描。

由于汉宁窗调制的正弦信号可以降低频谱泄漏及旁瓣干扰、提高信号的方向性及能量效率,所以在Comsol模拟中使用其作为超声相控阵激励信号,信号表达式见式(2)。

$$F(t) = 0.5 \times [1 - \cos(2\pi \times f_0 \times t/N)] \times \sin(2\pi \times f_0 \times t) \quad (t \leq N/f_0) \quad (2)$$

式中: $F(t)$ 为阵元发射的指定速度; f_0 为阵元中心频率; N 为周期数; t 为传播时间。

因为阵元信号的发射有延迟,所以将 $F(t)$ 进行分段处理,起始为0,结束为 N/f_0 。处理完的信号作

为阵元的指定速度。

1.2 模型验证

针对模型二,将相控阵的阵元个数设置为16个,阵元宽度设为0.5 mm,阵元间距设为0.6 mm,阵元频率设为4 MHz,聚焦深度为10 mm,向右偏转 38° ,在其焊缝内部距离上壁面7.5 mm处设置孔洞缺陷,缺陷半径为0.5 mm,模拟运行可以看到超声的传播路径,如图3所示。

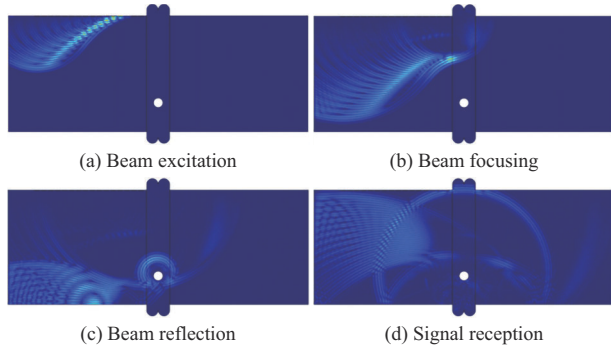


图3 超声的传播路径图

Fig. 3 Propagation path diagram of ultrasound

图4为缺陷回波信号。由图4可见,信号1为发射信号,而信号2是被阵元16捕捉到的缺陷信号,经过计算声束传播的路程为14.32 mm,传播时间为 $9.75 \mu\text{s}$,所以在模拟中计算的超声传播速度为1468 m/s。经过计算,理论上超声在PE材料上的传播速度为1486 m/s。两者误差为1.25%,故模拟是较准确的。由于模型一与模型二为同样的设置,所以针对模型一的模拟也是较准确的。

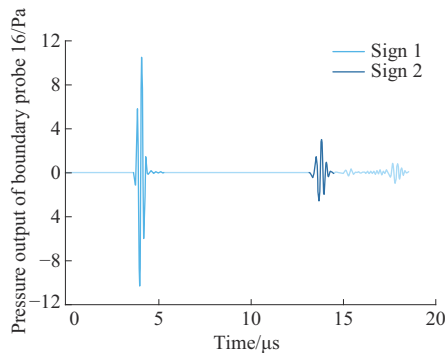


图4 缺陷回波信号图

Fig. 4 Echo signal diagram of defect

2 阵元参数对超声信号的影响及优化分析

2.1 阵元频率的影响

针对模型一,设定其阵元宽度 a 为0.5 mm、阵元间距 d 为0.6 mm、阵元数量 N 为16、焦距 F 为6 mm。得到阵元频率分别为2, 4, 6, 8 MHz时二维平面上的PE管壁的瞬态声场分布、主声轴最大声压分布曲

线,如图5和图6所示。

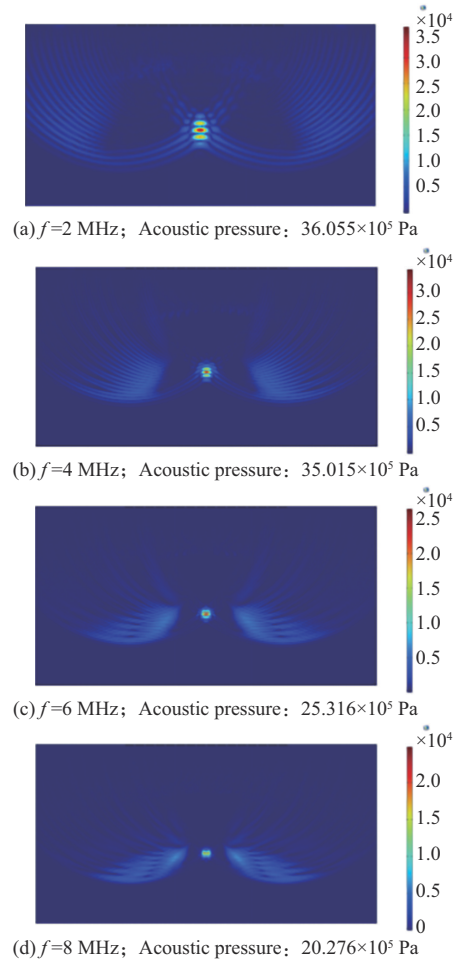


图5 不同阵元频率下的瞬态声场分布图

Fig. 5 Transient sound field distribution at different array element frequencies

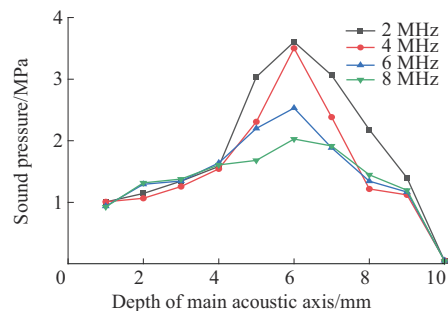


图6 不同阵元频率下主声轴最大声压分布曲线

Fig. 6 Maximum sound pressure distribution curve of main acoustic axis at different array element frequencies

从理论上来说,随着检测频率的增加,聚焦点的能量会越大,即声压越大,聚焦点会缩小,这样就可以提高检测分辨率、灵敏度及信噪比。但是从图5来看,随着检测频率的增加,不仅聚焦点在变小,而且聚焦点的声压也在减小,并且在8 MHz下聚焦

点的声压仅为2 MHz下的0.56倍,这主要是因为超声波在PE管中传播时存在能量的衰减。具体原因主要分为两部分:吸收效应与散射效应。吸收效应是指由于PE是高分子化合物,由相控阵发射的超声波在穿过PE时会引起PE分子的振动、分子内部的摩擦,将一部分的超声能量转化为热量,从而引起能量的衰减;散射效应指的是PE材料内部结构分布不均匀导致声波能量传播分散,从而使得超声能量衰减。而这种现象在高频声波下更为明显,因为其波长更短,“绕不过”这些结构。所以从图6来看,随着超声传播深度的增大,主声轴声压先变大后减小,但是在8 MHz下其聚焦点能量最小。虽然在实际检测PE管道时应根据不同的管壁厚度选择不同的超声频率,但是应尽量使用低频超声,以尽量减少超声能量的衰减。

2.2 阵元宽度的影响

针对模型一,设定其阵元频率 f 为4 MHz、阵元间距 d 为0.6 mm、阵元数量 N 为16、焦距 F 为6 mm。得到阵元宽度分别为0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mm时二维平面上的PE管壁的瞬态声场分布、主声轴最大声压分布曲线,如图7和图8所示。

从图7可以看到,阵元宽度越大,聚焦点处的声压越大,从 21.012×10^5 Pa一直上增加到 35.015×10^5 Pa,但是聚焦点的大小基本不变,从成像应用方面而言,阵元宽度的改变对成像的分辨率并不会会有太大的影响。从图8也可以看出,随着检测深度增加,主声轴声压逐渐增大,在聚焦点处为最大值,且0.5 mm宽的阵元声压一直要大于其他阵元。主要原因在于,在相控阵系统中,阵元宽度与能量密切相关。阵元宽度越大,意味着其物理尺寸相对较大,超声换能器有效辐射的面积也随着增加。超声波是利用压电介质将电信号转化为声波,而当换能器辐射面积增大,那么每隔一段时间到达声场的能量就会增加。其次,当阵元宽度增大,其接收反射回来超声信号的面积也增加,捕捉的能量也就越大。所以在实际情况下,可以选择尽可能宽的阵元,提高相控阵检测能力。然后,更大的阵元宽度同时也意味着能够容纳更多的电子元件,其在能量的传输过程中发挥重要作用。最后,随着阵元宽度增大,能量分布更为均匀,提高了能量利用效率。

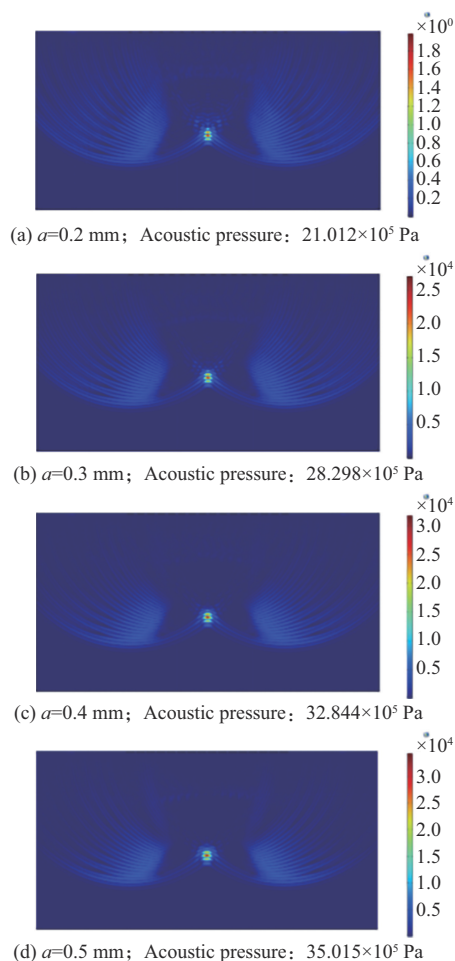


图7 不同阵元宽度下的瞬态声场分布图

Fig. 7 Transient sound field distribution under different array element widths

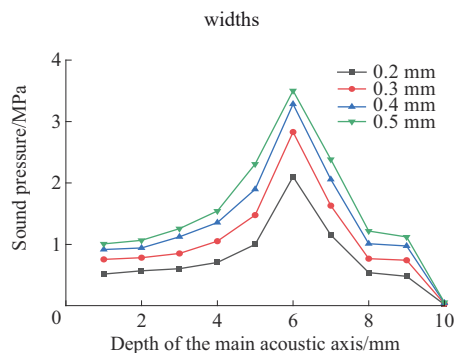


图8 不同阵元宽度下主声轴最大声压分布曲线

Fig. 8 Maximum sound pressure distribution curve of main acoustic axis under different array element widths

2.3 阵元间距的影响

针对模型一,设定其阵元频率 f 为4 MHz、阵元宽度 a 为0.5 mm、阵元数量 N 为16、焦距 F 为6 mm。得到阵元间距分别为0.6, 0.7, 0.8, 0.9 mm时二维平面上的PE管壁的瞬态声场分布、主声轴最大声压分布曲线,如图9和图10所示。

由图9可以看出,聚焦点处的最大声压在逐渐

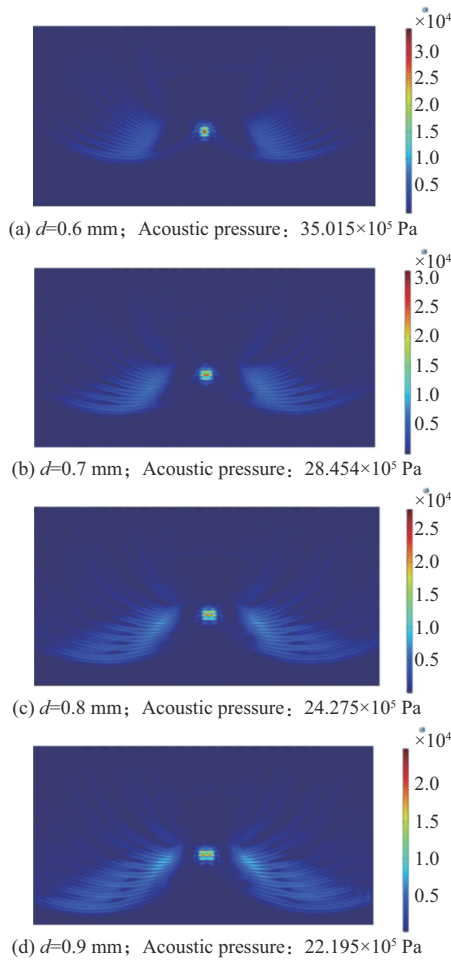


图9 不同阵元间距下的瞬态声场分布图

Fig. 9 Transient sound field distribution under different array element

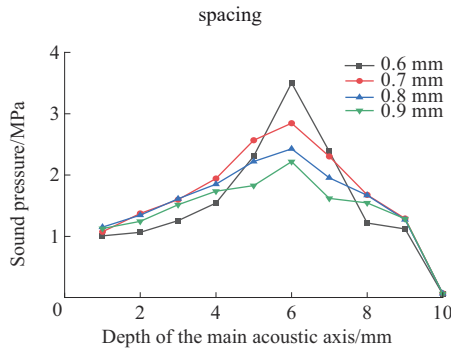


图10 不同阵元间距下主声轴最大声压分布曲线

Fig. 10 Maximum sound pressure distribution curve of main acoustic axis under different array element spacings

减小,从 35.015×10^5 Pa 一直减小到 22.195×10^5 Pa,且焦点的宽度也在逐渐增大,这意味空间分辨率在降低、旁瓣效应可能会增强。深度 6 mm 处聚焦点的声场是由相控阵 16 个阵元发射的声波在该点相互干涉形成的,当每个阵元的间隔比较小的时候,阵元发出的声波能够比较容易在焦点处相互干涉,形成较大的声压。而当阵元间距增大时,每个阵元

发出的超声在聚焦点处的相位差越大,相干性越小,声压也就越低,而声压降低会导致回波信号的幅值降低,进而降低信噪比,增大了噪声对相控阵成像的影响。在声场中,聚焦点的宽度与相控阵的孔径有关联,当阵元间距过大时,那么阵列分布就会变得比较稀疏,导致焦点宽度变宽,进而会导致聚焦点的横向分辨率降低,影响成像质量。由图 10 可以看到,虽然随着阵元间距增大,聚焦点处的声压在减小,但是在图 9 中聚焦点两侧,0.7,0.8,0.9 mm 阵元间距的幅值都要比 0.6 mm 的大,这说明阵元间距大,其焦柱长度也大,能够覆盖更长的目标。综上,阵元间距过大或者过小都会对检测效果有影响,应该依据实际要求确定阵元间距的长度。

2.4 阵元数量的影响

针对模型一,设定其阵元频率 f 为 4 MHz、阵元宽度 a 为 0.5 mm、阵元间距 d 为 0.6 mm、焦距 F 为 6 mm。得到阵元数量分别为 8, 16, 32 时二维平面上的 PE 管壁的瞬态声场分布、主声轴最大声压分布曲线,如图 11 和图 12 所示。

由图 11 可以看出,聚焦点处的最大声压在逐渐增大,从 28.307×10^5 Pa 一直增大到 38.838×10^5 Pa,且焦点的宽度也在逐渐减小。这是因为每个阵元

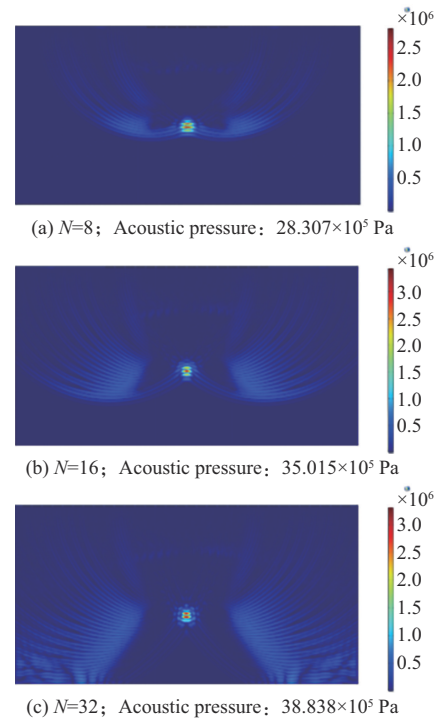


图11 不同阵元数量下的瞬态声场分布图

Fig. 11 Transient sound field distribution under different number of array elements

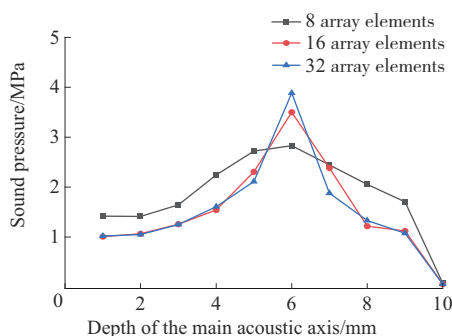


图12 不同阵元数量下主声轴最大声压分布曲线

Fig. 12 Maximum sound pressure distribution curve of main acoustic axis under different number of array elements

发射的超声信号都经过延迟法则控制,当信号在聚焦点处相遇时,声波的幅值会叠加在一起,而这种叠加效应是与阵元的数量成正比的,阵元数量越多,聚焦点处的声压就越大;其次,当阵元数量增大时,相控阵的孔径就会增大,而大孔径能使相控阵产生更窄的主瓣,能量更加集中,分辨率越高,成像质量越好。从图12也可以看到,当阵元数量为8时,聚焦效果也不是很理想。综上,从以上分析来看当阵元数目越多,检测效果越好,所以当实际条件允许的话,可以选择多阵元的探头,目前相控阵探头一般有16,32,64等阵元数量。

经过对阵元参数的优化分析,考虑到超声能量的衰减、聚焦点的声压大小、聚焦点的宽度等因素,最终选择阵元频率 f 为4 MHz、阵元宽度 a 为0.5 mm、阵元间距 d 为0.6 mm,同时在保证检测效果的前提下,为了提高软件模拟的效率,选择阵元数量 $N=16$ 作为后续研究的阵元参数。

在PE管道热熔焊接过程中,如果焊接参数使用不合适,焊缝内会出现工艺缺陷,如冷焊/过焊、欠压/过压等^[30-32]。因此还需探究材料属性对超声相控阵信号传播规律的影响。

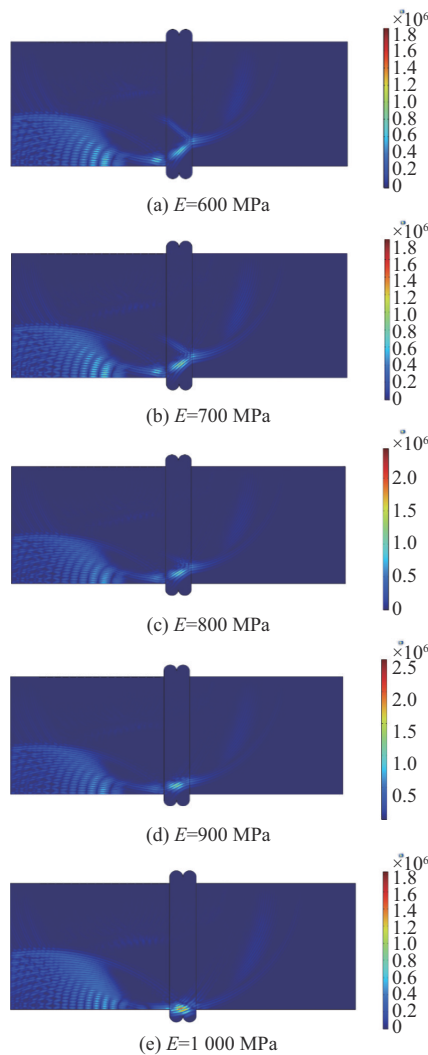
2.5 材料属性的影响

在PE管道焊接过程中,焊接参数对材料弹性模量、密度和泊松比的影响程度存在较大差异。PE的密度主要由排列的分子链与结晶度决定,而加热会使PE受热熔融,分子链重新排列,致使结晶度发生改变,密度在一定程度上有变化,但在总体上分子组成并没有明显的改变,所以密度受到的影响较小。拉伸弹性模量 E 主要与分子链的取向和结晶度有关,而由于焊接过程PE受到的加热量不同,冷却环境不同,在冷焊时,材料的拉伸弹性模量加热温度不足,导致分子链未充分扩散,材料拉伸弹性模量会明显下降,

在过焊时,材料的拉伸弹性模量加热温度过高,引发分子链断裂,材料拉伸弹性模量会明显上升。拉伸弹性模量的差异在PE管道热熔焊接中能明确表征工艺缺陷(冷焊、过焊),具有代表性意义。泊松比 ν 用来描述物质某一方向受力时,横向与轴向形变的比值,更多反映的是受力时的反馈。综上所述,拉伸弹性模量最容易受到影响,其次是密度,最后是泊松比。所以针对模型二,只改变焊缝的拉伸弹性模量。

图13为焊缝在不同拉伸弹性模量下超声信号的反射情况。使超声相控阵声束向右偏转 32° ,以入射角度 58° 、聚焦深度为10 mm入射到焊缝中去,最后信号传播至下卷边进行反射。

焊缝及母材的材料属性见表2。当拉伸弹性模量为600 MPa时,由于焊缝与其周围母材材料属性差异比较大,很大一部分超声信号被反射到下壁面

图13 不同拉伸弹性模量 E 下超声信号的反射Fig. 13 Reflection of ultrasonic signal under different tensile elastic modulus E

处,只有小部分能量的超声进入到焊缝中去;而当拉伸弹性模量逐渐增大至 900 MPa 时,由于焊缝与其周围母材材料属性差异比较小,很少一部分超声信号被反射到下壁面处,大部分能量的超声进入到焊缝中去;最后,当拉伸弹性模量增大到 1 000 MPa,与管壁一致时,没有超声被反射到下管壁处,所有的超声信号都入射到焊缝中。上述所描述的现象可由式(3)~式(6)所解释。

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

式中: c_L 为超声在固体中的纵波传播速度; E 为拉伸弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度。

$$Z = \rho c \quad (4)$$

式中: Z 为声阻抗; ρ 为密度; c 为超声在固体中的传播速度。

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} \quad (5)$$

式中: θ_i 为超声入射角,即超声波在第一种介质中与两介质交界面的法线形成的夹角; θ_t 为超声折射角,即超声波在第二种介质中与两介质交界面的法线形成的夹角; c_1, c_2 分别为超声在第一种介质和第二种介质中的声速。此公式为斯涅尔定律(Snell's law),可用来描述声波在不同物质界面处,入射角及折射角和超声在两种介质中声波的关系。

$$r_{LL} = \frac{Z_{L2} \cos \theta_i - Z_{L1} \cos \theta_t}{Z_{L2} \cos \theta_i + Z_{L1} \cos \theta_t} \quad (6)$$

式中: r_{LL} 为反射纵波声压反射系数; Z_{L1}, Z_{L2} 为两种介质中的声阻抗; θ_i 为超声入射角; θ_t 为超声折射角。

例如,当管壁的焊缝的密度取 970 kg/m³,拉伸弹性模量取 1 000 MPa,泊松比取 0.4,焊缝的密度取 970 kg/m³,拉伸弹性模量取 600 MPa,可分别计算出 c_{L1} 等于 1 486 m/s(超声在管壁中的传播速度), c_{L2} 为 1 151 m/s(超声在焊缝中的传播速度),带入到式(4)可得 Z_{L1} 约为 1.441×10^6 kg/(m²·s), Z_{L2} 约为 1.112×10^6 kg/(m²·s),再将声速带入到式(5)中,结合超声入射角 58°,可计算得到 θ_t 折射角为 40.5°,最后将两种介质的声阻抗及入射角和折射角带入到式(6)中可计算出反射系数约为 -0.3,负号代表反射波与入射波有 180°的相位差。表 3 为焊缝在不同拉伸弹性模量下,管壁与焊缝交界面处的声反射率。

图 14 为不同拉伸弹性模量下接收信号的信号幅值,由图 14 可见,在同一阵元下,随着焊缝的拉伸

表 3 不同焊缝材料属性下的声压反射率

Tab. 3 Acoustic pressure reflectivity under different weld material properties

Tensile modulus/MPa	Sound pressure reflectivity
600	-0.3
700	-0.23
800	-0.15
900	-0.12
1 000	0

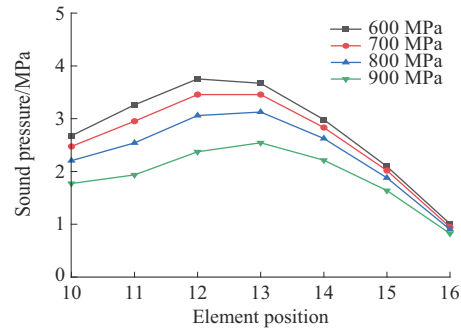


图 14 不同拉伸弹性模量下接收信号的信号幅值

Fig. 14 Signal amplitude of received signal under different tensile modulus

弹性模量与管壁的拉伸弹性模量差距增大,探针接收到的信号幅值越来越大,说明有更多的信号被反射,模拟计算结果与理论计算结果有相同的趋势,并且在探针 12, 13 处能够接收到最大的信号幅值。

综上所述,当 PE 管壁的材料属性与焊缝的材料属性有差异时,会对超声的信号有影响,当二者差别越大,反射的信号越强烈,接收到的信号幅值越大,其会对图像的亮度、对比度等会有影响。信号幅值越大,图像上对应的像素点相对就越明亮。所以从 A 扫描信号上来看,超声相控阵是可以发现由材料属性带来的变化,利于辅助检测人员判断是否存在焊接缺陷。

3 结论

基于 COMSOL Mutiphsysics 超声相控阵检测模型,首先对超声相控阵探头参数进行优化,在此基础上,采用优化后的探头参数,研究阵元频率、阵元宽度、阵元间距及阵元数量等参数对超声波传播特性的影响规律,主要结论如下。

(1) PE 材料对超声有着严重的衰减影响,阵元频率越高,衰减越大,所以在使用超声相控阵检测 PE 材料时,应尽量使用低频的超声,使衰减更少,传播得更远,可以检测相对更厚的 PE 材料。

(2) 阵元宽度越大,超声换能器有效辐射的面积及接收反射信号的面积随之增加,所以激发的声束

能量越高,质量越好,所以可以根据实际情况选择较大的阵元宽度。

(3)随着阵元间距的增大,每个阵元发出的超声在聚焦点处的相位差越大,相干性越小,声压越低;阵列分布变得比较稀疏,导致焦点宽度变宽,进而会导致聚焦点的横向分辨率降低,影响成像质量。但是阵元间距的增大会导致焦柱长度变长,能够覆盖更长的目标。所以在检测中应根据实际情况选择合适的阵元间距。

(4)由于声波幅值在聚焦点处具有叠加效应,并且与阵元数量成正比,所以阵元数量越多,激发的声束能量越高,质量越好,但是检测成本也会相应的增大,可以根据实际条件选择尽量多的阵元数量。

(5)热熔焊接参数使用不合适对焊缝材料属性中的拉伸弹性模量影响相对较大。当焊缝与母材的拉伸弹性模量差异增大时,声压反射率越高,进而使阵元接收到的信号幅值增大。

目前所采取的优化参数只适用于管径 110 mm, SDR 为 11 的高密度 PE 管材,并不适用于所有的 PE 管材,但是可以根据研究规律对不同管材的阵元参数进行动态调整。

参考文献

- [1] 方学锋,周楠,张伯君,等.聚乙烯管道热熔接头无损检测技术研究进展[J]. 炼油与化工, 2023, 34(3):11-14.
FANG Xuefeng, ZHOU Nan, ZHANG Bojun, et al. Research progress in non-destructive testing technology for polyethylene pipeline hot melt joints[J]. Refining and Chemical Industry, 2023, 34(3): 11-14.
- [2] TUTUNCHI A, ESKANDARZADE M, AGHAMOHAMMADI R, et al. Risk assessment of electrofusion joints in commissioning of polyethylene natural gas networks[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 196. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104627.
- [3] NIE H L, MU K, ZHANG Z B, et al. Preliminary study on terahertz non-destructive testing for defect detection in hot melt joints of polyethylene pipes[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 139. DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105300.
- [4] 施建峰,陶杨吉,安成名,等.聚乙烯燃气管道超声相控阵检测工程应用案例分析[J]. 压力容器, 2020, 37(12):54-62.
SHI Jianfeng, TAO Yangji, AN Chengming, et al. On-site phased array ultrasonic testing of polyethylene gas pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(12):54-62.
- [5] 陈宝龙,李宝超.高密度聚乙烯热熔焊缝的 PAUT 和 TOFD 检测[J]. 无损检测, 2019, 41(6):60-63.
CHEN Baolong, LI Baochao. Detection of high density polyethylene hot melt weld by PAUT and TOFD[J]. Nondestructive Testing Technology, 2019, 41(6):60-63.
- [6] LAI H S, FAN D S, LIU K L. The effect of welding defects on the long-term performance of HDPE pipes[J]. Polymers, 2022, 14(19). DOI: 10.3390/polym14193936.
- [7] LAI H S, TUN N N, KIL S H, et al. Effect of defects on the burst failure of butt fusion welded polyethylene pipes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(5):1 973-1 981.
- [8] 梁雪莲,李曼曼,陈庆玺,等.聚乙烯燃气管道焊接接头无损检测及质量评价[J]. 劳动保护, 2021(8):107-110.
LIANG Xuelian, LI Manman, CHEN Qingxi, et al. Nondestructive testing and quality evaluation of welded joints of polyethylene gas pipeline[J]. Labour Protection, 2021(8):107-110.
- [9] 王少军,裘爱东,宋盼,等.埋地聚乙烯管道热熔接头的超声相控阵检测[J]. 无损检测, 2017, 39(5):21-23, 69.
WANG Shaojun, QIU Aidong, SONG Pan, et al. The ultrasonic phased array testing of buried polyethylene pipeline butt fusion joint[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(5):21-23, 69.
- [10] 燕集中,沈利民,吴胜平,等.埋地聚乙烯管道缺陷无损检测技术研究进展[J]. 无损检测, 2025, 47(1):73-78.
YAN Jizhong, SHEN Limin, WU Shengping, et al. Research progress of nondestructive testing technologies for defects of buried polyethylene pipeline[J]. Nondestructive Testing, 2025, 47(1): 73-78.
- [11] RAO J, ZENG L, LIU M L, et al. Ultrasonic defect detection of high-density polyethylene pipe materials using FIR filtering and block-wise singular value decomposition[J]. Ultrasonics, 2023, 134. DOI: 10.1016/j.ultras.2023.107088.
- [12] ZHANG H W, WANG Q, ZHOU J, et al. High-density polyethylene pipe butt-fusion joint detection via total focusing method and spatiotemporal singular value decomposition[J]. Processes, 2024, 12(6). DOI: 10.3390/pr12061267.
- [13] 邵泽龙,左延田.聚乙烯管道的微波无损检测技术研究[J]. 化工装备技术, 2024, 45(6):1-5.
SHAO Zelong, ZUO Yantian. Research on microwave non-destructive testing technology for polyethylene pipes[J]. Chemical Equipment Technology, 2024, 45(6):1-5.
- [14] RAMYEA R, KANDASAMY S K, KASTHURI N. Computer simulations of a four-element array antenna using polyethylene (PE) substrate and parameter analysis for compact, flexible wireless applications[J]. Journal of Computational Electronics, 2025, 24(2). DOI: 10.1007/s10825-024-02272-4.
- [15] CARRIGAN T D, FORREST B E, ANDEM H N, et al. Nondestructive testing of nonmetallic pipelines using microwave reflectometry on an in-line inspection robot[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(2):586-594.
- [16] 金世贵. DR 技术在聚乙烯管道缺陷识别与评估中的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2024(12):117-119.
JIN Shigui. Study on the application of DR technology in defect

- identification and evaluation of polyethylene pipeline[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2024(12):117–119.
- [17] GOGOLINSKI K V, VINOGRADOVA A A, KOPYLOVA T N, et al. Study of physicochemical properties of polyethylene gas pipelines material with a prolonged service life[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 200. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104825.
- [18] 吴军, 吴胜平, 郑凯, 等. 聚乙烯管焊接接头相控阵超声检测的优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3):50–56.
WU Jun, WU Shengping, ZHENG Kai, et al. Optimized design of phased array ultrasonic testing for polyethylene pipe welding joints[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(3):50–56.
- [19] 甘文军, 蔡家藩, 祁攀. HDPE管道热熔接头相控阵超声 CIVA 仿真[J]. 科技视界, 2024(10):68–71.
GAN Wenjun, CAI Jiafan, QI Pan. Simulation of phased array ultrasonic CIVA for HDPE pipeline hot welding joint[J]. Science & Technology Vision, 2024(10):68–71.
- [20] 张晓宝. 聚乙烯管道焊接接头超声相控阵检测研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
ZHANG Xiaobao. Research on ultrasonic phased array testing of polyethylene pipe welded joints[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [21] 郭伟灿, 施建峰, 侯东圣. 聚乙烯管道电熔焊接头的超声相控阵检测工艺优化[J]. 无损检测, 2015, 37(8):30–34.
GUO Weican, SHI Jianfeng, HOU Dongsheng. Phased array ultrasonic technology optimization for electro-fusion joint of polyethylene pipe[J]. Nondestructive Testing Technologizing, 2015, 37(8):30–34.
- [22] 甘文军, 蔡家藩, 姚晓园. 核级高密度聚乙烯管道热熔接头的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2023, 45(6):43–48.
GAN Wenjun, CAI Jiafan, YAO Xiaoyuan. Phased array ultrasonic inspection for butt fusion joint of high density polyethylene pipe in nuclear power plant[J]. Nondestructive Testing Technologizing, 2023, 45(6):43–48.
- [23] 方海清, 施建峰, 郑津洋. 考虑声衰减和声频散的聚乙烯超声相控阵缺陷检测仿真模型[J]. 压力容器, 2022, 39(2):67–74, 82.
FANG Haiqing, SHI Jianfeng, ZHENG Jinyang. Simulation model of polyethylene defect detection by ultrasonic phased array based on acoustic attenuation and dispersion[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(2):67–74, 82.
- [24] 伏喜斌. 聚乙烯管道电熔接头缺陷超声相控阵成像模拟和实验研究[J]. 机电工程, 2018, 35(1):106–109, 114.
FU Xibin. Simulation and experimental verification of ultrasonic phased array imaging technology for electrofusion joint defect detection in polyethylene pipes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(1):106–109, 114.
- [25] 李野. 重燃轮机涂层缺陷电磁超声探测相控阵研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
LI Ye. Research on electromagnetic ultrasonic phased array detection of coating defects in heavy-duty gas turbines[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [26] 杨宸旭. 基于超声相控阵的钛合金扩散焊内部缺陷检测研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
YANG Chenxu. Research on internal defect detection in titanium alloy diffusion bonding using ultrasonic phased array[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [27] 张宏辉. 法兰紧固状态的超声相控阵检测方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
ZHANG Honghui. Research on ultrasonic phased array testing method for flange fastening state[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [28] 周令. 基于电阻率测试的土石混合体渗透性研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024.
ZHOU Ling. Permeability study of soil-rock mixtures based on resistivity testing[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024.
- [29] 陈鹏, 徐希军, 梁宁, 等. 相控阵超声技术在PE管电熔焊接检测的应用[J]. 煤气与热力, 2021, 41(3):24–27, 30, 96.
CHEN Peng, XU Xijun, LIANG Ning, et al. Application of phased array ultrasonic technology in PE pipe electrofusion welding inspection[J]. Gas & Heat, 2021, 41(3):24–27, 30, 96.
- [30] 李陈, 曹彬彬, 王维. 燃气聚乙烯管道热熔接头无损检测技术综述[J]. 上海化工, 2022, 47(4):76–78.
LI Chen, CAO Binbin, WANG Wei. Summary of nondestructive testing technology for hot melt joints of gas polyethylene pipelines[J]. Shanghai Chemical Industry, 2022, 47(4):76–78.
- [31] 蔡勤, 戚政武, 韩佩城, 等. 聚乙烯燃气管道热熔接头冷焊缺陷的X射线检测[J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(6):33–35, 40.
CAI Qin, QI Zhengwu, HAN Peicheng, et al. X-ray detection for cold weld defects in butt fusion joint of polyethylene gas pipelines[J]. China Special Equipment Safety, 2021, 37(6):33–35, 40.
- [32] 郭涛, 石洁, 蔡勤, 等. 燃气用聚乙烯管道热熔接头冷焊缺陷检测[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(4):19–24.
GUO Tao, SHI Jie, CAI Qin, et al. Detection of cold welding defects in hot melt joints of polyethylene pipes for gas[J]. Total Corrosion Control, 2023, 37(4):19–24.