

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.020

# 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\*

伏喜斌

(厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361004)

**摘要:** 为了快速获得电熔接头超声成像图以便研究聚乙烯管道电熔接头无损评估算法研究, 运用了多物理场耦合有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对聚乙烯管道电熔接头金属电热丝的超声响应特性进行了有限元分析, 并对聚乙烯管材内壁钻孔缺陷及含孔洞缺陷聚乙烯管道电熔接头进行了超声相控阵检测成像实验, 验证了超声相控阵检测成像有限元模拟分析结果的正确性。采用 Richardson-Lucy 反卷积算法对聚乙烯管材内壁钻孔缺陷超声相控阵成像图进行了图像复原处理。实验结果表明: 基于超声傅里叶成像的相控阵成像仿真方法具有可行性, 有限元模型为聚乙烯管道电熔接头缺陷超声相控阵成像提供了数值模型。

**关键词:** 聚乙烯管道电熔接头; 缺陷; 超声相控阵成像; 有限元分析

中图分类号: TP27; TH878

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)01-0106-05

## Simulation and experimental verification of ultrasonic phased array imaging technology for electrofusion joint defect detection in polyethylene pipes

Fu Xi-bin

(Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361004, China)

**Abstract:** In order to quickly achieve the ultrasonic images for algorithm development of Polyethylene pipe nondestructive evaluation, a finite element (FE) model was built to simulate ultrasonic response of heating wire in PE pipe electrofusion joints by using multi-physics coupling finite element analysis software COMSOL Multiphysics, the defected PE pipe with drilling hole and electrofusion joints with pore were tested by an ultrasonic phased array (UPA) imaging system for the verification of the FE model. The UPA images of defected PE pipe with drilling hole were processed by Richardson-Lucy deconvolution algorithm. The results indicate that the feasibility of simulation of UPA imaging based on Fourier transform. The FE model could provide the numerical model for UPA imaging of electrofusion joint defect in polyethylene pipes.

**Key words:** electrofusion joints in polyethylene pipes; defect; ultrasonic phased array imaging; finite element analysis

## 0 引言

高密度聚乙烯管道具有优异的化学稳定性和耐候性, 其主要特点表现为抗压能力强、摩擦系数小、施工便捷、使用寿命长、适当的柔性、绿色环保, 聚乙烯管道

以其可靠的性能在燃气系统、给水系统、化工管道、通讯管道等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。聚乙烯管道的焊接方式主要有热熔焊接和电熔焊接<sup>[2-4]</sup>两种。聚乙烯管道电熔接头由电熔套筒以及两侧的聚乙烯管材组成, 管材与套筒通过过渡配合装配, 电熔套筒内部嵌有

收稿日期: 2017-11-08

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51675103); 国家质检总局科技计划资助项目 (2011QK216); 福建省杰出青年基金滚动项目 (2014J07007); 福建省质量技术监督局科技项目 (FJQI2013095, FJQI2012024)

**作者简介:** 伏喜斌 (1977-), 男, 吉林长白人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事特种设备焊接无损检测方面的研究。E-mail: xibinfu@163.com

金属电热丝。电熔焊接过程的原理是在金属电热丝的两端施加恒定电压,利用金属电热丝的焦耳热效应将套筒内壁与管材外壁附近的聚乙烯材料熔合在一起<sup>[5]</sup>。

聚乙烯管道电熔接头的超声相控阵成像检测通常采用一维线性阵列换能器进行B型扫描成像,在电熔接头超声成像图中根据缺陷的形貌、位置和产生机理,聚乙烯管道电熔接头的焊接缺陷可以分为熔合面缺陷、孔洞、电热丝错位、冷焊等4类缺陷,这些缺陷主要出现在熔合区域内。

在正常焊接的情况下,聚乙烯管道电熔接头超声相控阵检测成像图中的金属电热丝排列整齐,不会出现严重的错位,电熔接头套筒的内壁与管材的外壁紧密熔合在一起,熔合界面附近没有产生间隙和孔洞。除了金属电热丝,接头的超声成像图中还将显示出明显的内外冷焊区界面及管材内壁面的回波信号<sup>[6]</sup>。

熔合面缺陷是指出现在熔合界面上的缺陷。熔合面缺陷主要包括夹杂和未熔合等<sup>[7]</sup>。熔合面夹杂是面积型的缺陷,一般出现在电热丝下端一定距离处,其位置基本与内、外冷焊区界面反射的信号线平行。在聚乙烯电熔接头的超声相控阵成像图中,熔合面上的缺陷信号因为受到金属电热丝信号的干扰,导致熔合面缺陷在成像图中不连续,其信号将显现在相邻两个金属电热丝信号的中间。

孔洞的形成原因主要是因为电熔接头在焊接过程中的热量不足<sup>[8]</sup>,在焊接冷却时聚乙烯收缩使得电熔布丝切割槽没有完全熔合而产生的小气隙,在超声相控阵成像图中其通常显现在金属电热丝上端或临近电热丝处,较大规格的电熔接头焊接时间较长会出现在两个电热丝信号之间。

电热丝错位是指本来整齐排列的金属电热丝在焊接完成之后产生了水平或垂直方向的移位<sup>[9]</sup>。电熔接头中电热丝在超声相控阵检测成像图上显示为形成一串影像,这是因为超声波在聚乙烯与电热丝的界面处多次反射和透射而形成的伪像。

冷焊是指电熔接头因为焊接过程中热量不足而形成的缺陷<sup>[10]</sup>。在聚乙烯管道电熔接头的超声相控阵检测成像图中,电热丝信号的上方将产生有一条沿水平方向分布的冷焊特征线,特征线贯穿整个焊接区域。在恒定功率条件下,冷焊特征线与电热丝的距离和加热时间成近似的线性关系,因此可以采用冷焊特征线与电热丝间的距离来间接表征冷焊的严重程度<sup>[11]</sup>。

为了快速获得大量的电熔接头超声成像图用于研究聚乙烯管道电熔接头无损评估算法研究,本研究运用多物理场耦合有限元分析软件COMSOL Multiphysics对聚乙烯管道电熔接头金属电热丝的超声响应特性进行有限元分析,并对聚乙烯管材内壁钻孔缺陷及含孔洞缺陷聚乙烯管道电熔接头进行了超声相控阵检测成像实验,以验证有限元模拟分析结果的正确性。

## 1 电熔接头超声响应有限元分析

在聚乙烯管道电熔接头的超声相控阵检测中,金属电热丝在成像图上显现为一串影像,即在电热丝信号的下方出现了一系列的垂直等间距分布并且信号强度逐渐递减的斑点。这些斑点是由于阵列换能器发射的超声波在金属电热丝内部不断振荡造成的,即超声波在金属电热丝与聚乙烯材料的界面上发生多次的反射与透射,最终形成了一系列斑点型的伪像。本研究基于多物理场耦合有限元分析软件COMSOL Multiphysics的声学模块设计了有限元简化模型,对超声相控阵换能器发射的聚焦声束在金属电热丝内部的振荡现象进行有限元分析。

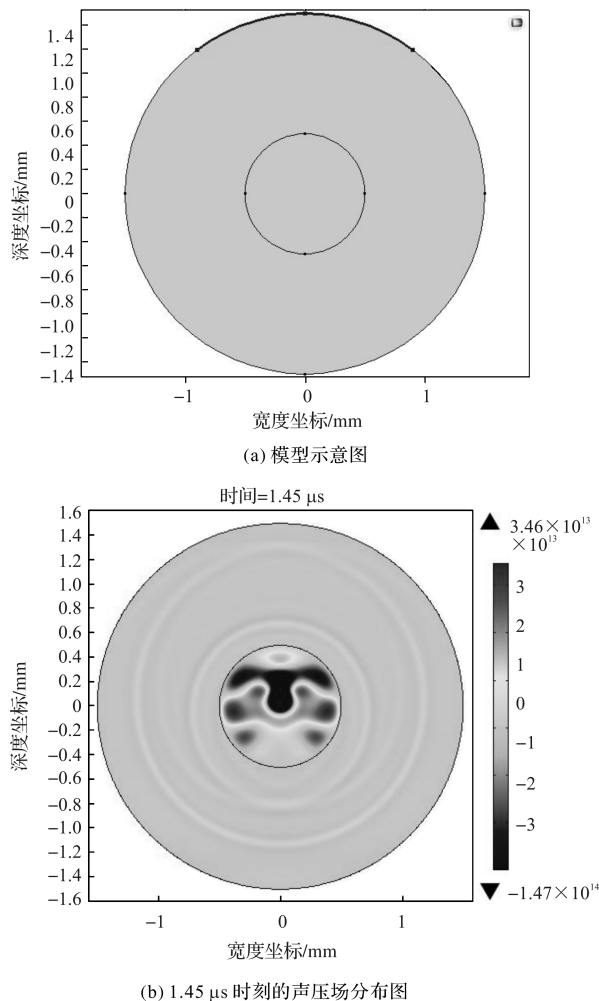
COMSOL Multiphysics以其多物理耦合场计算功能和开放的软件构架被许多研究人员所接受,并以人性化的图形用户界面建模方式广受欢迎,它适用于模拟科学和工程领域的多种物理过程。COMSOL Multiphysics的声学模块由一系列的物理场接口组成,用于模拟流体和固体中的声波传播。在声学模块中,可用的物理场接口包括压力声学接口、声-固耦合接口、气动声学接口、热声接口和几何声学接口。本模型采用声学模块的瞬态压力声学接口求解金属电热丝内部及其邻域的声场分布。

模型简图如图1(a)所示,模型的中心位置上有一个直径为1 mm的金属电热丝截面,求解电热丝及其周围半径1.5 mm范围内的声场分布。金属电热丝的材料为铁铬铝合金,材料纵波声速设定为5 700 m/s,材料声阻抗设定为7 100 kg/m<sup>3</sup>;电热丝周围的聚乙烯材料为PE80,其材料纵波声速设定为2 400 m/s,声阻抗为965 kg/m<sup>3</sup>。为简化模型,不对复杂的超声相控阵阵列换能器及其聚焦波束进行仿真,而直接在模型边界上施加高斯窄脉冲激励,发射声场将聚焦至金属电热丝的中心位置上。高斯窄脉冲表达式如下所示:

$$p = e^{(-\pi^2 \beta^2 (t-t_0)^2 / 0.5^2)} \quad (1)$$

式中: $f_0$ —超声探头发射声波的中心频率, $t_0 = 1/f_0$ ,将其设置为 5 MHz。

在图 1 所示边界上添加法向加速度边界条件,其向内加速度为公式(1)的二阶导数,同时设定模型边界不反射声波。在该边界条件下,发射超声波脉冲在 1.45  $\mu\text{s}$  时刻由于金属电热丝而形成的声压场分布图如图 1(b) 所示。



(b) 1.45  $\mu\text{s}$  时刻的声压场分布图

图 1 有限元模型

## 2 超声成像图反卷积

超声重建图像  $f_{bl}(x, y, z)$  为被测物体内部散射点的反射系数函数与函数  $f(x, y, z)$  的卷积。函数  $p(x, y, z)$  为该超声成像系统的点传播函数,点传播函数由激励信号频谱和阵列换能器频率响应决定。在实际超声成像系统中,激励信号的频谱和阵列换能器的频率响应均为有限带宽,因此超声检测成像图只能得到被测工件内部结构的部分信息。在一维线性阵列的 B 型扫描成像图中,如果将二维反射系数函数  $f(x, y)$  视为原始图像,则该卷积运算可以视为图像退化过程,此时点

传播函数即为综合所有退化因素得到的成像系统的退化算子,如下所示:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ —原始图像; $h(x, y)$ —退化算子; $n$ —噪声; $g(x, y)$ —退化图像。

本研究根据超声成像系统的点传播函数,运用图像复原算法(比如 Richardson-Lucy 算法<sup>[12]</sup>)对成像图进行反卷积运算即可实现对退化图像的复原。

### 2.1 Richardson-Lucy 算法

Richardson-Lucy 反卷积算法是由 Richardson 和 Lucy 提出的一种非线性迭代算法,是目前应用最为广泛的图像复原算法之一。其源于贝叶斯概率公式:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(Y|X)P(X)dX} \quad (3)$$

式中: $P(X)$  和  $P(Y)$ —事件  $X$  和  $Y$  发生的概率; $P(X|Y)$ —事件  $Y$  发生情况下事件  $X$  发生的条件概率。

同时又因为:

$$P(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(X|Y)P(Y)dY \quad (4)$$

由公式(3)和公式(4)可以得到:

$$P(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P(Y|X)P(Y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(Y|X)P(X)dX} dY P(X) \quad (5)$$

将  $X$  视为原始图像,  $Y$  视为退化图像,  $P(X)$  和  $P(Y)$  分别表示原始图像和退化图像的灰度分布函数  $f(x, y)$  和  $g(x^s, y^s)$ ,  $P(Y|X)$  表示点传播函数,则公式(5)可以表示为卷积形式:

$$f(x, y) = \iint \frac{h(x^s - x, y^s - y)g(x^s, y^s)}{\iint h(x^s - x, y^s - y)f(x, y)dx dy} dx^s dy^s f(x, y) =$$

$$\left\{ \left[ \frac{g(x, y)}{f(x, y) \otimes h(x, y)} \right] \otimes h(-x, -y) \right\} f(x, y) \quad (6)$$

公式(6)显示了原始图像与退化图像和点传播函数之间的卷积运算关系,使用迭代计算的方式求解原始图像如下所示:

$$f_{k+1}(x, y) = \left\{ \left[ \frac{g(x, y)}{g_k(x, y) \otimes h(x, y)} \right] \otimes h(-x, -y) \right\} f_k(x, y) \quad (7)$$

式中: $k$ —迭代计算的次数,随着迭代次数的增加,复原图像依概率收敛于原始图像。

### 2.2 超声成像图复原结果与分析

运用反卷积算法进行图像复原的基本原理是使用可以精确描述成像系统图像退化因素的点传播函数对退化图像进行反卷积运算,即卷积运算的逆运



算。图像复原的效果主要取决于用于反卷积运算的点传播函数与成像系统真实的退化算子的近似程度,当两者完全相同时可以实现对原始图像的精确复原。据此,本研究运用基于超声傅里叶成像的相控阵成像仿真方法设计超声相控阵成像系统的点传播函数,将其用于 Richardson-Lucy 反卷积算法,对的聚乙烯管材内壁钻孔缺陷超声相控阵成像图进行图像复原。

聚乙烯管材内壁钻孔缺陷超声相控阵成像图如图 2(a) 所示。(对其进行坐标变换并灰度化)。对该结果采用点传播函数进行基于 Richardson-Lucy 反卷积算法的图像复原处理,其结果如图 2(b) 所示,迭代次数均为 50。

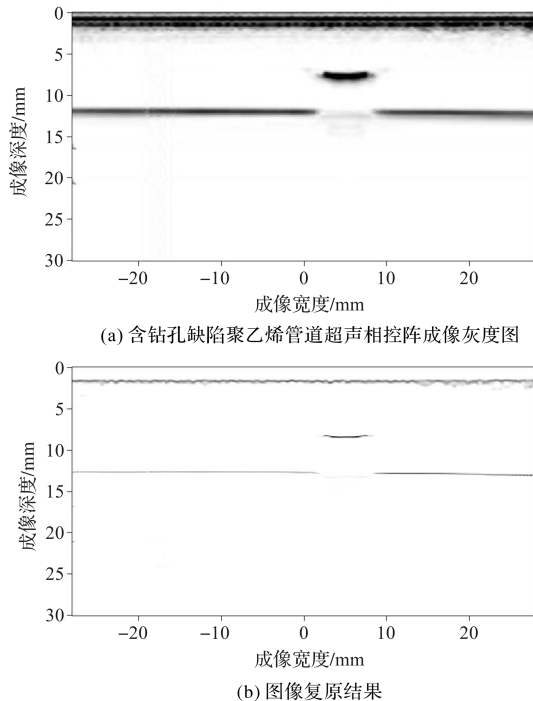


图2 超声相控阵成像灰度图及复原结果图

从图 2(a) 可以看出,根据超声傅里叶成像算法设计的点传播函数,对超声成像图的进行图像复原的结果完整保留了主要的轮廓边缘,包括外壁、内壁及钻孔底面,没有出现明显的失真和噪声。对比图 2(a) 和图 2(b) 可以看出,图 2(a) 的图像复原效果明显好于图 2(b)。该结果间接表明基于超声傅里叶成像算法的相控阵成像仿真方法具有一定的可行性,能够对聚乙烯管道及电熔接头进行有效的仿真。

### 3 电熔接头超声相控阵成像模拟和实验及结果分析

由于超声相控阵检测设备价格昂贵,聚乙烯管道电熔接头超声相控阵检测成像图的获取成本较高,为快速得到大量的电熔接头超声成像图有必要对其进行超声成像仿真研究。本研究采用基于超声傅里叶成像的相控阵成像仿真方法设计超声成像系统的点传播函数,依据聚乙烯管道电熔接头内部缺陷及结构的超声相控阵成像信号特征设计电熔接头内部结构的反射系数函数,对公称直径为 160 mm,标准尺寸比 SDR 值为 11 的聚乙烯管道电熔接头进行超声相控阵线性 B 型扫描成像仿真,仿真结果如图 3(a) 所示。

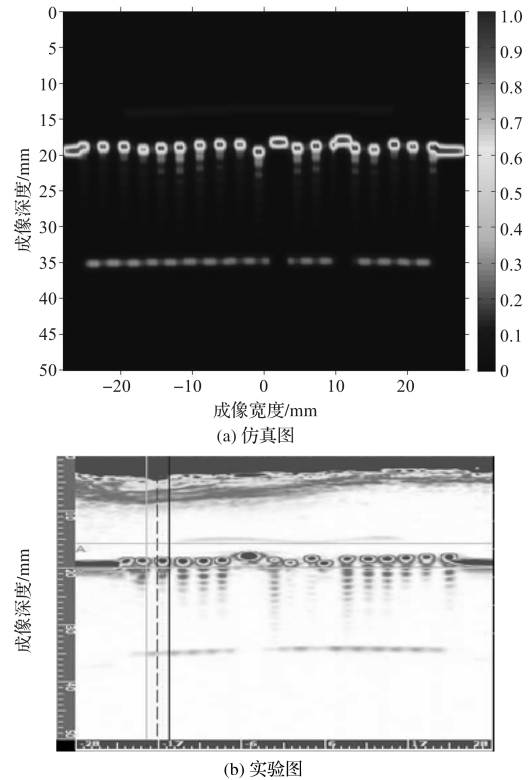


图3 聚乙烯管道电熔接头(含孔洞缺陷)超声相控阵成像图

图 3(a) 中,超声线性阵列换能器的参数为:发射声波中心频率 5 MHz,偏转角度  $0^\circ$ ,聚焦深度 20 mm,材料声速 2 400 m/s,采用线性 B 型扫描成像方式,子孔径阵元数目为 16,阵元间距 0.5 mm。

(下转第 114 页)

#### 本文引用格式:

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, 2017, 35(1): 106-109, 114.

Fu Xi-bin. Simulation and experimental verification of ultrasonic phased array imaging technology for electrofusion joint defect detection in polyethylene pipes [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(1): 106-109, 114.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>