

聚乙烯电熔接头中金属丝成像规律的理论分析与试验研究

郭伟灿^{1,2}, 郑津洋¹, 丁守宝², 施建峰¹, 石平², 秦永泉¹, 王非¹

(1. 浙江大学 化工机械研究所, 杭州 310027; 2. 浙江省特种设备检验研究院, 杭州 310020)

摘要: 电熔接头中金属丝信号会对传统超声检测产生干扰, 采用超声相控阵技术及 B 扫描实时成像技术, 对嵌入式电阻丝电熔接头进行超声检测试验。在试验过程中发现几种金属丝成像的规律, 并根据超声检测的理论解释金属丝成像的规律。通过试验研究得出: 根据超声图像中金属丝的排列情况、金属丝的错位和金属丝与特征线的距离, 可间接反映电熔接头的焊接情况, 判断接头是否存在冷焊、过焊等缺陷。

关键词: 超声检测; 聚乙烯管道; 电熔接头; 金属丝; 相控阵技术

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)11-0880-04

Investigation on the Imaging Law of Metal wire in Electrofusion Joint by Phased Array Ultrasonic Technique

GUO Wei-Can^{1,2}, ZHENG Jin-Yang¹, DING Shou-Bao², SHI Jian-Feng¹, SHI Ping², QIN Yong-Quan¹, WANG Fei¹

(1. Institute of Chemical Machinery and Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Inspection Center of Special Equipment, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The metal wires in electrofusion (EF) joint of polyethylene (PE) pipes will interfere the ultrasonic wave, which makes it difficult to detect the EF joint with traditional ultrasonic testing method. The phased array ultrasonic focusing technique as well as B-scan real image technology is used for testing the discontinuities of Electro-fusion joint with the metal wires. the imaging law of the metal wires is explored in the testing, and analyzed in terms of ultrasonic theory. The result shows: the arrangement, dislocation of the metal wire in the ultrasonic image can be used to detect the cold welding and over welding in EF joints.

Keywords: Polyethylene pipe; Electrofusion joint; Metal wire; Ultrasonic testing; Phased array

聚乙烯管道电熔接头连接时一般将电热丝嵌入管件的内表面, 施工时将管子与管件配合后用专用的加热控制电源将管件中的电热丝通电加热, 使管件与管材的接触表面熔化结合, 冷却后使管件与管材牢固、密封地结合在一起^[1]。电熔接头中金属丝信号会对超声检测产生干扰, 当熔合区存在缺陷时, 由于熔合区在金属丝的下方, 不仅部分入射超声波被金属丝挡住, 而且熔合区缺陷的声程与金属丝的

反射回波的声程很相近, 极易受金属丝聚乙烯界面的多次反射回波的干扰而不能有效检出, 使得传统的超声检测方法很难对聚乙烯电熔接头进行检测^[2], 因此必须采用声能集中的超声聚焦技术和特殊信号处理技术。笔者采用超声相控阵技术及 B 扫描实时成像技术, 对该接头进行超声检测试验研究。从试验过程中发现几种金属丝成像的规律, 并以超声检测的理论来解释金属丝成像的规律。另外, 通过金属丝成像, 包括其排列情况、错位和金属丝与特征线的距离, 可间接反映电熔接头的焊接情况, 判断接头是否存在冷焊、过焊等缺陷。

收稿日期: 2009-04-30

基金项目: 国家公益基金资助项目(200810538)

作者简介: 郭伟灿(1968—), 男, 高级工程师, 院首席研究员, 研究方向为承压设备检验与无损检测等。

1 金属丝对超声检测的影响分析

采用常规的单直探头检测聚乙烯电熔接头时,由于聚乙烯材料的衰减系数较大,检测区应在未扩散区内。可将探头未扩散区内传播的超声波看作平面波。电熔接头中的金属丝,可将其看作是具有一定反射率的长横孔,长横孔的反射面为柱面,平面波入射到柱面时,其反射波可视为从焦轴发出的柱面波,传播至探头,形成第一处金属丝影像,其回波声压 P_{rl} 为:

$$P_{rl} = rP_0 \sqrt{\frac{d}{(4a - d)}} \quad (1)$$

式中 r —声压反射率;

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1};$$

Z_1 —聚乙烯的声阻抗, $\text{g/cm}^2 \text{s}$;

Z_2 —金属丝的声阻抗, $\text{g/cm}^2 \text{s}$;

P_0 —入射超声波在界面处声压, Pa ;

d —金属丝直径, mm ;

a —金属丝与探头距离, mm 。

对如图 1 所示密集排布的金属丝,其回波声压可看作在声场作用区内各金属丝回波的迭加,因此当探头沿金属丝排布方向移动时,其接收到的金属丝阵列的超声回波高度基本不变,因此导致采用常规的单直探头检测聚乙烯电熔接头时,其横向分辨力很低,不能有效地判断金属丝在排列方向上的具体位置^[2]。因此必须采用超声聚焦技术和特殊的信号处理技术。超声聚焦技术有液浸聚焦、接触式聚焦和超声相控阵聚焦技术,液浸聚焦、接触式聚焦需要专门的扫描装置,对电熔接头全方位检测操作不方便;而超声相控阵技术及 B 扫描实时成像技术,通过足够数量的探头排列和触发时间控制,并选用不同频率范围,可以较方便地实现嵌入式电阻丝电熔连接接头的检测^[3]。



图 1 金属丝

2 几种金属丝成像规律的理论解释

笔者采用超声相控阵技术及 B 扫描实时成像

技术,对嵌入式电阻丝电熔连接接头进行超声检测试验研究。从试验过程中发现金属丝成像的几种规律,并从超声检测的理论解释金属丝成像的规律性。

2.1 正常焊接

正常焊接条件下,电熔接头中电阻丝排布规整,没有明显错位现象;电熔套筒内壁与管材外壁熔融为一体,熔合面没有间隙和孔洞。超声图能够较好反映接头内部的实际情况,除电阻丝外,还显示出清晰的内、外冷焊区界面及管材内壁面的成像信号,在 B 扫描实时成像时,一根金属丝并不只形成一处影像,而是自上而下带强度逐渐减弱的一串影像,如图 2 所示。从超声波理论可以分析上述现象,电熔接

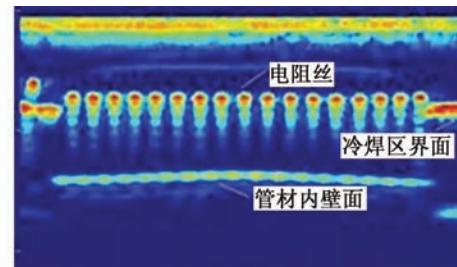


图 2 正常焊接超声图像

头中的金属丝,可将其看作是具有一定反射率的长横孔,如图 3 所示,长横孔的反射面为柱面,超声波入射到柱面时,其反射波可视为从焦轴发出的柱面波,传播至探头,形成第一处金属丝影像,超声波穿过聚乙烯金属丝界面后,形成透射波 P_{rl} ,透射波在 P_{rl} 下界面产生透射和反射,反射的超声波又返回金属丝中,在上界面上又一次形成透射和反射,透射波传播至探头,形成第二处金属丝影像,不考虑界面的聚焦与发散效应,第二处金属丝影像的回波声压 P_{r2} 与与第一处回波声压 P_{rl} 比值为:

$$\frac{P_{r2}}{P_{rl}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2)$$

如此多次往返,形成多次金属丝聚乙烯界面的反射回波,传播至探头,形成第三、第四等一连串金属丝影像,直至回波声压太弱而无法形成影像。相邻两处影像的声程差(折算成聚乙烯中声程) Δx 为:

$$\Delta x = \frac{dC_1}{C_2} \quad (3)$$

式中 C_1 —聚乙烯的声速, m/s ;

C_2 —金属丝的声速, m/s ;

聚乙烯的声速约为2200 m/s,金属丝的声速约为4700 m/s,金属丝直径为0.8 mm,按公式计算其相邻两处影像的声程差为0.37 mm,用软件测得图2中的相邻影像的距离为0.4 mm,与式(3)的计算结果基本相符。

2.2 金属丝上表面存在气隙

当金属丝上表面存在气隙,相当于非均匀介质中的薄层,其声强透射率为^[4]:

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2 \cos^2 \frac{2\pi d_0}{\lambda_0} + (Z_0 + \frac{Z_1Z_2}{Z_0})^2 \sin^2 \frac{2\pi d_0}{\lambda_0}} \quad (4)$$

式中 d_0 —气隙厚度,mm;

Z_0 —空气的声阻抗,g/cm²·s;

λ_0 —超声波在空气中的波长,mm。

由于空气的声阻抗为40 g/cm²·s,金属丝为 4.18×10^6 g/cm²·s,聚乙烯为 2.1×10^5 g/cm²·s,对频率为5 MHz的超声波,其在空气中的波长为0.068 mm,其当气隙厚度 $\geq 4 \times 10^{-5}$ mm时,其声强透射率接近于0,超声波全部反射,其回波声压 P_{rl} 为:

$$P_{rl} = P_0 \sqrt{\frac{d}{(4a-d)}} \quad (5)$$

由于超声波在聚乙烯金属丝界面没有形成透射波,从而金属丝只有一处影像,对比式(5)和式(1),金属丝上表面存在气隙时第一次反射形成的信号强度大于界面无气隙时的信号强度(以颜色表示),见图4所示。

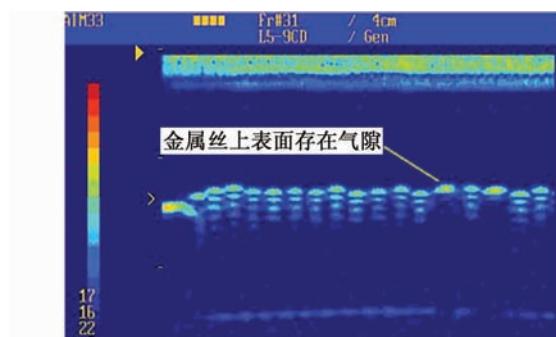


图4 金属丝上表面存在气隙时超声图像

2.3 金属丝下表面存在气隙

当金属丝下表面存在气隙,上表面的反射与透射与本文2.1节一样,形成第一处金属丝影像的回波声压 P_{rl} ,超声波穿过聚乙烯金属丝界面后,形成透射波,透射波传播至下界面,由于下界面存在气隙,相当于非均匀介质中的薄层,其声强透射率见式

(4),其当气隙厚度 $\geq 4 \times 10^{-5}$ mm时,其声强透射率接近于0,超声波全部反射,反射的超声波又返回金属丝中,在上界面上又一次形成透射和反射,透射波传播至探头,形成第二处金属丝影像,其回波声压为 P_{r2} ,不考虑界面的聚焦与发散效应, P_{r2} 与第一处回波声压 P_{rl} 比值为:

$$\frac{P_{r2}}{P_{rl}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)(Z_2-Z_1)} \quad (6)$$

对比式(2),在此种情况下 P_{r2} 与 P_{rl} 比值较式(2)的结果要大,因此多次往返传播至探头的回波也较本文2.1节要大,导致一连串金属丝影像的个数多于本文2.1节的影像个数,如图5所示。

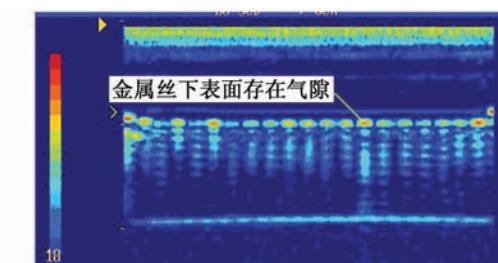


图5 金属丝下表面存在气隙时超声图像

3 金属丝影像在判断电熔接头质量中的作用

3.1 调节灵敏度

排列整齐的金属丝可作为规则反射体,可以用于调节聚乙烯电熔接头相控阵B扫描成像的检测灵敏度。具体方法为,将相控阵探头放置在与测试件同厚度的合格的电熔接头外表面,调节仪器,判断获得的图像是否有足够的分辨率和灵敏度可以鉴别每一根电阻丝,如图6所示。

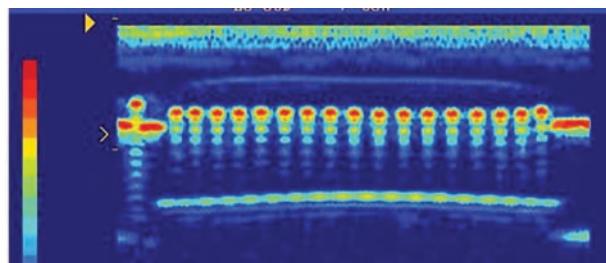


图6 金属丝调节灵敏度

3.2 冷焊检测

冷焊是聚乙烯管道接头最危险的缺陷之一,也是现有无损检测方法难以发现的一类缺陷。笔者在电熔焊接接头检测中首次发现聚乙烯电熔接头内部存在一条由微小气泡造成的特征线,特征线与电阻丝之间的距离与冷焊程度有明确的对应关系。在此

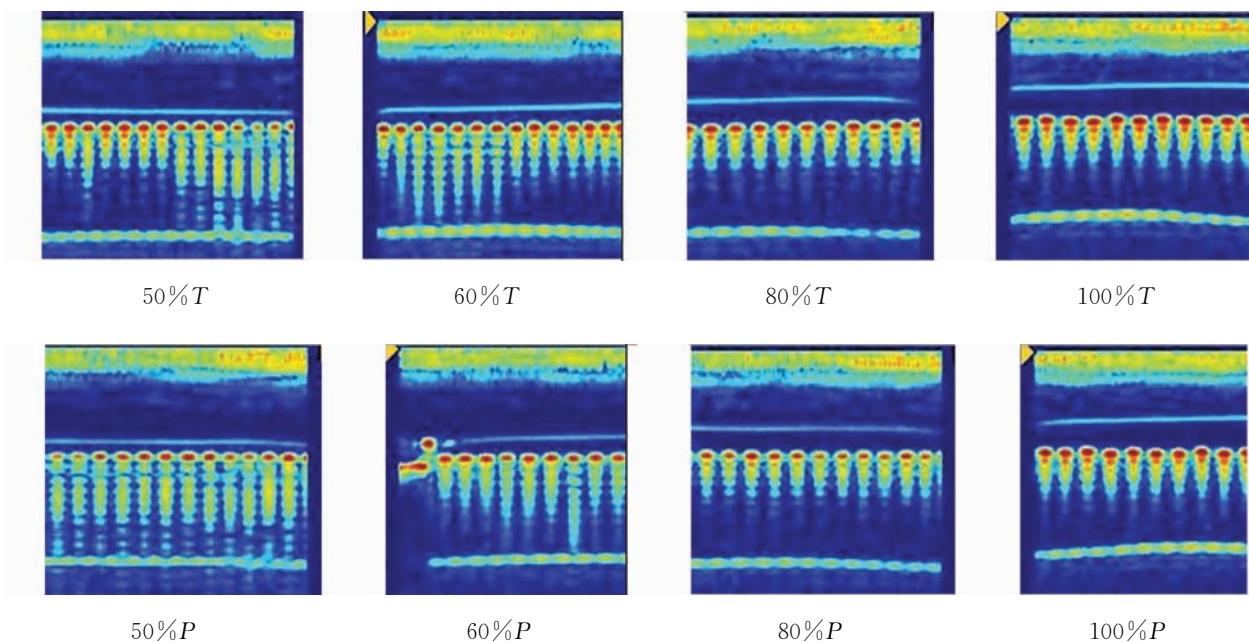


图 7 不同焊接热量特征线与金属丝的距离对比

基础上,提出一种全新的冷焊缺陷超声检测方法,即先利用研制的相控阵超声检测系统测量特征线和电阻丝间的距离,再利用经验公式评估冷焊程度。试验表明:所提方法判断冷焊具有足够的精度,可以应用于聚乙烯管道焊接工艺研究和接头质量检测^[5]。

通过以 PE80 材料 DN90 电熔接头为例,不同焊接热量(焊接时间 T 、焊接功率 P)情况下特征线与金属丝的距离对比见图 7。通过软件可测得的特征线与金属丝的距离,测得的特征线与金属丝的距离与输入的焊接热量(焊接时间和焊接功率的乘积)有着近似的线性关系,以经验公式所表征的冷焊程度与实际数值的偏差小于 5%,精度能够满足工程应用要求。

3.3 过焊检测

电熔接头如果输入热量过长就会造成过焊,与虚焊一样,过焊并不能从熔合面上反映缺陷信息,但过焊时由于熔接区受热过多以致熔接区的大部分聚乙烯在高温下呈熔体状,聚乙烯熔体流动,加上熔区内压力的不统一,使电阻丝随之发生位置偏移,因此通过金属丝错位情况可以间接判断电熔接头的过焊情况。另外,与冷焊一样,过焊也可以用特征线与金属丝距离进行表征。图 8 为正常功率 P 情况下与 $140\%P$ 情况下特征线与金属丝距离对比图,从图中可以看出,在 $140\%P$ 时电熔接头特征线与金属丝距离明显比正常功率时要大,同时,前者金属丝存在明显的错位现象,这也是过焊的特征之一。

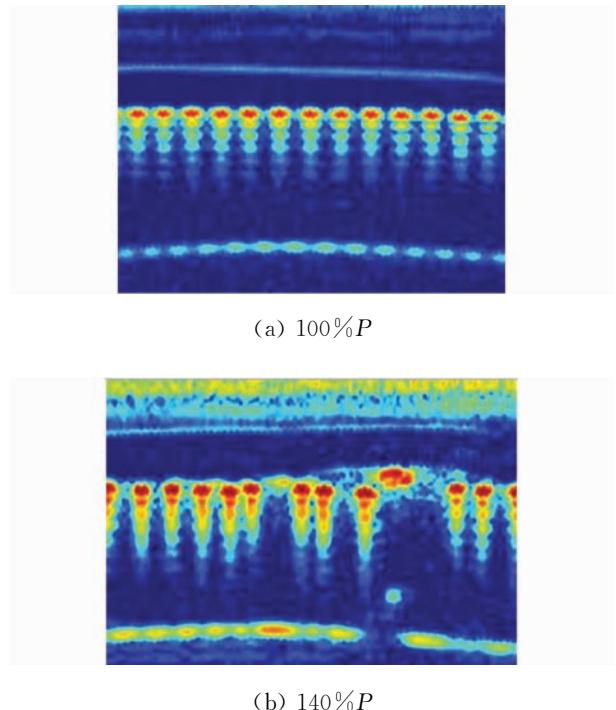


图 8 正常焊接与过焊特征线与金属丝距离对比图

4 结论

(1) 电熔接头中金属丝信号会对超声检测产生干扰,应采用超声聚焦技术和特殊信号处理技术。

(2) 正常焊接条件下,电熔接头中金属丝在 B 扫描实时成像时形成一串影像,这是由于超声波在聚乙烯金属丝界面多次反射与透射造成的。

(下转第 889 页)

3 原因分析

图5是对工件进行DR检测的原理图。可见,射线源射出的射线呈锥形束,射线经过工件后所成图像不是1:1投影图,而是经过放大之后的图像。当这种放大被无限细分到每个像素点之后,就会出现每个极小部分的放大系数是不一致的情况,如图6。

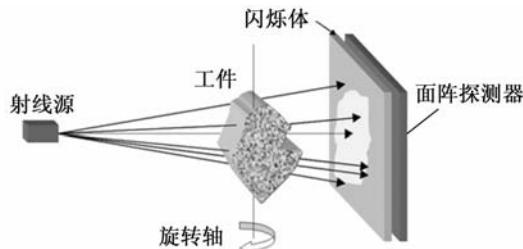


图5 DR检测原理图

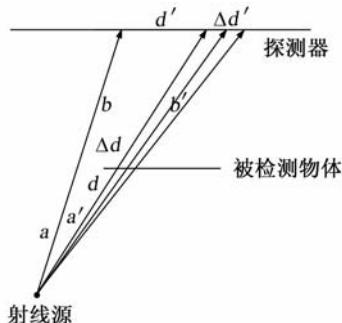


图6 DR成像投影图

图6中某极小段 Δd 在经过射线投射之后在面板上成像的放大倍数为:

$$\frac{\Delta d}{\Delta d'} = \frac{a'}{a' + b'} = \frac{a}{a + b}$$

即

$$\Delta d' = \frac{\Delta d(a + b)}{a}$$

~~~~~

(上接第883页)

(3) 当金属丝上表面存在气隙,金属丝只有一处影像,当金属丝下表面存在气隙,金属丝影像数多于正常焊接条件下的影像个数,这主要是薄层气隙造成超声波全反射引起的。

(4) 埋在电熔接头中的金属丝可以用于调节相控阵B扫描成像的检测灵敏度,间接反映电熔接头的焊接情况,判断接头是否存在冷焊、过焊等缺陷。

#### 参考文献:

- [1] Bowman J. A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe System[J]. Polymer

因为 $a$ 与 $b$ 都是固定的,所以极小段的放大倍数是固定的。但是该公式的前提是 $d$ 是一个与接收面板平行并与中心射束垂直的平面。

如图7所示,由于工件上各个部分与射线源和接收面板的距离不一样,因此造成工件的图像在整个投影场上呈放大倍数的不规则渐变。

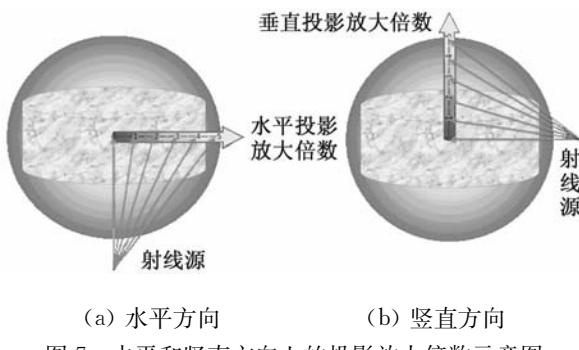


图7 水平和竖直方向上的投影放大倍数示意图

水平方向上的图像拼接是由面板探测器移动来实现的。同一高度上图像的放大倍数一致,因此可以使水平方向上的图像拼接很平滑。

在垂直方向上,不同高度上所得图像的放大倍数不一致,导致了上下图像不能拼接的现象发生。

由以上分析可见,如果要实现大工件的拼接DR成像检测,水平方向和垂直方向移动的都应该是面板探测器,而不是转台。希望这个结论能够对设计者更好地设计工业DR系统有所启发。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 19293—2003 对接焊缝X射线实时成像检测法[S].
- [2] 曾祥照. X射线实时成像系统分辨率及其影响因素[J]. 无损探伤, 2003, 27(6): 002.
- [3] 郭伟灿, 陈勇, 丁守宝, 等. 超声相控阵技术在聚乙烯管道电熔接头检验上的应用[J]. 中国特种设备安全, 2008, 24(3): 35—39.
- [4] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤[M]. 北京: 劳动部中国锅炉压力容器安全杂志社, 1997: 28.
- [5] 郑津洋, 郭伟灿, 施建峰. 聚乙烯电熔接头冷焊缺陷的超声检测方法试验研究[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 1—4.
- Engineering and Science, 1997, 37(4): 674—691.
- [2] 丁守宝, 郭伟灿, 郑津洋. 聚乙烯管道电熔接头超声检测[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 267—270.
- [3] 郭伟灿, 陈勇, 丁守宝, 等. 超声相控阵技术在聚乙烯管道电熔接头检验上的应用[J]. 中国特种设备安全, 2008, 24(3): 35—39.
- [4] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤[M]. 北京: 劳动部中国锅炉压力容器安全杂志社, 1997: 28.
- [5] 郑津洋, 郭伟灿, 施建峰. 聚乙烯电熔接头冷焊缺陷的超声检测方法试验研究[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 1—4.