

# 聚乙烯管材焊接接头的相控阵超声检测

## Phased Array Ultrasonic Testing of Welded Joints in Plastic (PE) Pipes

Fredrik HAGGLUND <sup>1</sup>, Malcolm A. SPICER <sup>1</sup>, Mike J. TROUGHTON <sup>1</sup>

<sup>1</sup> TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, CB21 6AL, Cambridge, UK;

Phone: +44 (0) 1223 899000, Fax +44 (0) 1223 890952;

fredrik.hagglund@twi.co.uk, malcolm.spicer@twi.co.uk, mike.troughton@twi.co.uk

### 摘要

对于不同材料等级和管道尺寸的聚乙烯（PE）对接熔接接头的检测，要求使用可靠的无损检测方法。对接熔接接头的性质是熔接区较小，而检测溶液往往受到外部焊珠存在的限制。这个焊道限制了探头的放置，探头需要定位在焊缝检测的非最佳位置。聚乙烯材料等级具有低声速和高频率的衰减，这将使较厚管道的检查复杂化。本文介绍了相控阵超声波技术，并对其功能进行了评估。该技术利用定制的水楔块能够产生前角梁以覆盖聚乙烯管内的焊缝。已经开发了外径在 220-710mm，厚度在 14-45mm 之间的管材技术。探头和楔块参数已针对这一系列管道进行了优化。本文介绍了利用相控阵超声波检测方法检测外径在 220-710mm 的管道上直径在 1.5-8mm 之间的圆形缺陷的能力，以及使用这种材料时所面临的挑战。

关键词：相控阵超声波检测，塑料管道检测，对接熔接

### 1. 介绍

几十年来，聚乙烯（PE）管道一直用于燃气和水管道。由于这种材料不受水腐蚀和高度耐污染的因素，在核电站的安全关键应用中，认为用聚乙烯替代镀碳钢的方式是非常理想的 [1]。但是，监管机构要求对焊接接头进行体积检查，目前这种系统是不可用的。因此，需要一种可靠的无损检测（NDT）方法来检查不同材料等级和管道尺寸的不同聚乙烯（PE）管接头。

尽管塑料管道焊缝的容积检测有欧洲标准，但是缺乏用于检测这些焊缝的商业上可用的系统。目前大口径钢管焊缝检测的最佳实践是采用超声波检测。但是由于其高衰减和低速度的声学特性，导致这种材料能以检测，所以塑料管道行业未对其实施。北美和韩国有塑料管道商用超声波检测系统 [8,9]。但是，这些系统都没有提供检查问题的完整解决方案。美国的系统仅限于热熔对接接头，并且使用的是传统 TOFD 而不是相控阵，不适用于复杂的焊接结构。韩文系统仅限于电熔接头，并且这种系统不会记录数据。

最近进行的几项研究开发了用于检查对接熔合（BF）接头可靠的无损检测的方法，并且已经用几种不同的技术进行了检查传统的超声换能器 [2,3]; 包括脉冲回波，串联，蠕动波，和 TOFD。近年来，工作也延伸到对高炉进行检查使用相控阵超声检测（PAUT） [4-7]。

本文介绍的工作是 TestPEP 项目的一部分，该项目由欧洲资助项目，开发和验证用于测试焊接的聚乙烯管接头的自动无损检测方法。该项目将开发相控阵超声无损检测的程序，技术以及用于聚乙烯管道焊接接头的体积检测设备。在本文中展示了开发不同管径高炉节点检测技术方面取得的进展。为了评估接头，需要应用几种单独的超声波技术完全覆盖焊接熔合区。已经在许多测试样品上评估了这些技术。介绍了管道样品的检测结果和检测技术能力的初步评估。

## 2. 材料和设备

在本节中，将塑料管材中使用的聚乙烯材料的声学特性与本文研究的焊接结构一起描述。试样，如探头，楔块和设计和制造的扫描仪系统等设备在本节展示。

### 2.1 材料和焊接配置

由于其低声速和高衰减，聚乙烯材料是一种复杂的检测材料。在聚乙烯材料中不支持剪切波，因此由于材料特性的关系，纵波成为唯一的检测模式。而纵向速度取决于聚乙烯的等级，但是也取自不同批次的管材。速度可以根据管壁的深度以及通过晶体结构的声音的角度而变化[10]。这意味着对于精确的检测解决方案，需要为每个管道范围确定声学特性。

最初的工作涉及一个通用聚乙烯管材的超声波性能的测定[11]，显示的速度是低频率的依赖性，衰减则是强频率依赖性。这项研究涉及的等级都是 PE80 和 PE100。外径 (OD) 为 355mm 的管材由 PE80 制造，外径 220mm，外径 450mm 的管道来自 PE100。超声波的传导速度取决于管道不同部位的纵波。这中技术用于估计使用互相关测量特殊测试样本中超声波信号的延迟时间。PE80 的整体平均纵波速度为 2349.5m/s，标准差为平均值的 0.75%。整体平均价值 PE100 为 2385.8m/s，标准偏差为 0.75%。聚乙烯中的衰减率非常高并且与频率有关，2MHz 时测量为 0.5dB/mm，4MHz 时测量为 1.1dB/mm。

通过使用加热板来熔化两个管子的端部，然后通过施加一定时间的压力（图 1 (a)）来熔合 r 热熔对接接头。然后在内表面和外表面上形成多余的管材焊道（图 1 (b)）。

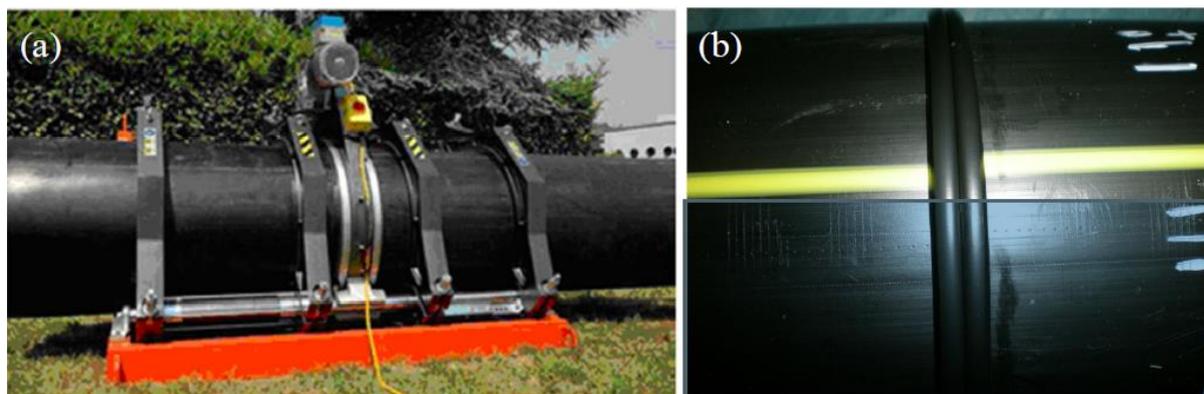


图 1 对接熔接管接头 (a) 现场焊接工具和 (b) 与外表面焊缝完整的焊缝。

可以通过目测检查外部焊道来识别严重不良的焊缝。虽然焊道外表完整的而没有变形，但是焊缝仍然可能包含缺陷。在一些企业和国家，焊接周期完成后，焊缝被移除。但是，在某些情况下，特别是在公用事业行业，焊道仍然需要保持完整。本研究所开发的技术是针对焊缝完好的热熔对接焊缝的检测，这对开发的焊缝有一定的实际意义检测技术以及探头和楔块的选择，特别是因为焊道宽度将根据管道几何形状和焊接程序而变化（图 2）。

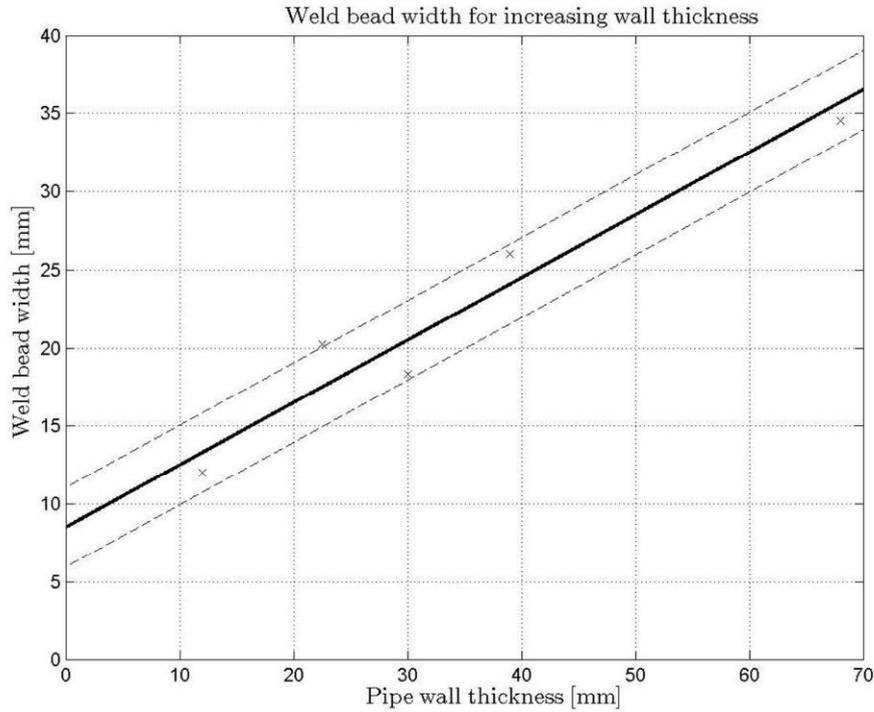


图 2 平均焊缝与管壁厚度的关系 探头楔块的前端与焊接中心线之间的距离需要大于焊道宽度的一半。

## 2.2 试样

在开发热熔对接接头检测技术时，使用了人造缺陷的检测样品，检测范围涵盖了外径在 220mm 和 450mm 之间的管道。平底孔 (FBHs) 被认为足以评估所提出的技术的性能。平底孔用于评估串联和扇区脉冲回波技术，并在管端进行机械加工。图 3 (a) 给出了 220mm 外径管道平底孔 s 的布置情况，表 1 给出了所有管道内平底孔 s 的布置情况。图 3 (b) 中，检测 220mm 外径管道上平底孔的探头位置为所示。平底孔距离管端 40mm，探头距管端 47mm，留出 7mm 模拟焊道的一半。

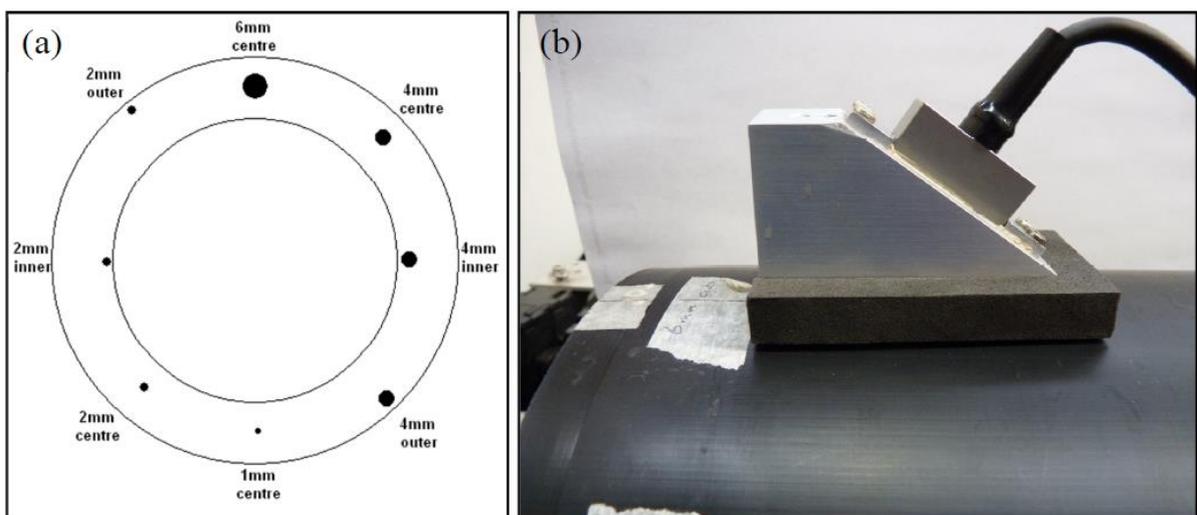


图 3 (a) 平底孔在管端的布置。(b) 探头位置用平底孔检查管道。

表 1 四种不同管道尺寸下所有平底孔的直径和位置

220mm OD 14mm thick	450mm OD 28mm thick	355mm OD 33mm thick	710mm OD 45mm thick
6mm centre	6mm outer	6mm outer	8mm outer
	6mm centre	6mm centre	8mm centre
	6mm inner	6mm inner	8mm inner
4mm centre	8mm outer	8mm outer	6mm outer
4mm inner	8mm centre	8mm centre	6mm centre
4mm outer	8mm inner	8mm inner	6mm inner
1.5mm centre	2mm outer	2mm outer	4mm outer
	2mm half outer	2mm half outer	4mm half outer
	2mm centre	2mm centre	4mm centre
	2mm half inner	2mm half inner	4mm half inner
	2mm inner	2mm inner	4mm inner
2mm centre	4mm outer	4mm outer	2mm outer
	4mm half outer	4mm half outer	2mm half outer
	4mm centre	4mm centre	2mm centre
	4mm half inner	4mm half inner	2mm half inner
	4mm inner	4mm inner	2mm inner

### 2.3 探头，水楔和扫描系统

为了评估检查技术，使用两组不同的 1D 线性相控阵探针。对于较小尺寸的管道，使用 32 个元件的 4MHz 探头，对于较大的管道，使用 32 个元件的 2MHz 探头。需要成角度的梁来检查热熔对接接头，并且由于这些探头的转向能力受到限制，所以使用成角度的楔块来最小化换能器元件的转向。

为了对塑料管道进行检测，设计和制造了新颖的开放式水楔块原型。使用水楔块的优点是低衰减和速度，使角度射束能够转向熔合区。由于焊道阻止了探头的最佳定位，所以需要高角度。图 4 显示了带有探针的楔块，(a) 显示了 4MHz 探针，(b) 显示了 2MHz 探针。该图还显示了用于有效地将水保持在探头楔中的柔性裙边密封件。

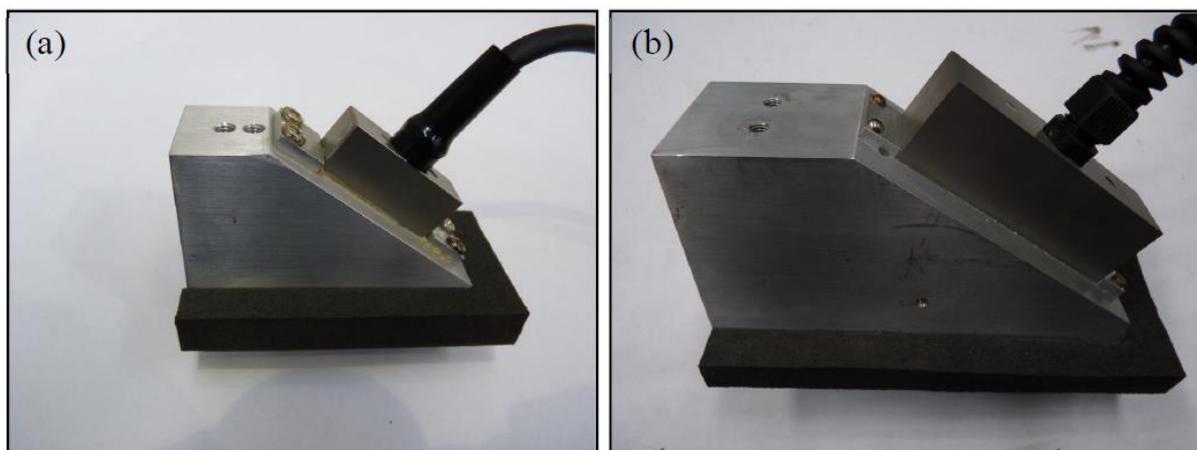


图 4 有角度的水探针楔块。(a) 4MHz 和 (b) 2MHz。

已经设计了扫描仪系统用于检查焊接管道，参见图 5 中的扫描仪系统包括主板，该主板通过多个连杆和调节机构保持在管道周围的位置。这个灵活的系统应该允许扫描仪检查外径从 90mm 到 1m 的管道。主板上将包含编码器和探头支架。在图 5 (a) 和 5 (b) 中，显示了用

于热熔对接接头的柔性扫描器系统和两个探头支架。使用预先加载的弹簧使探头与管道保持接触，并使用恒定的供水保持联轴器。

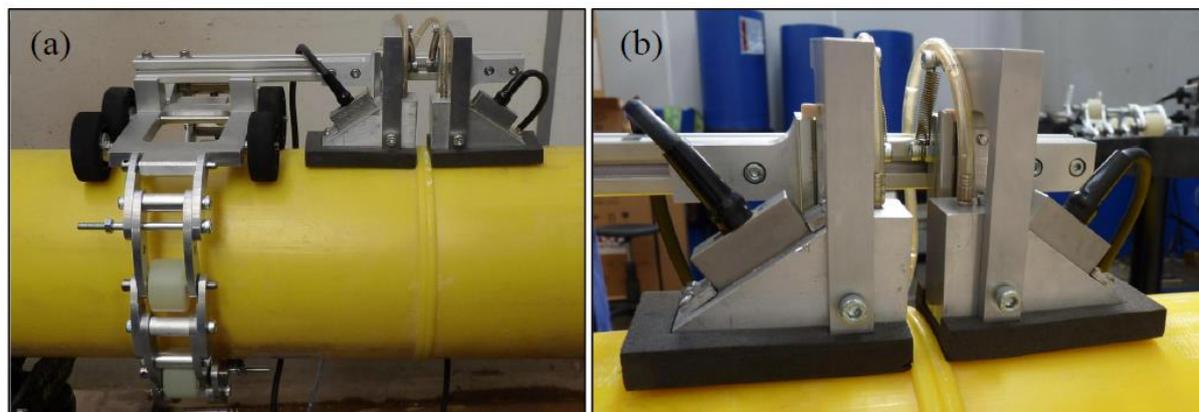


图 5 (a) 带有 4MHz 探头的灵活链式扫描器。(b) 热熔对接探针座。

### 3. 检查技术

为了检查高炉接头，研究了四种不同的技术:自串联，扇区脉冲回波，蠕变波和 TOFD (图 6)。在大多数情况下，这些技术在覆盖范围和检测到的缺陷类型方面都是相辅相成的。

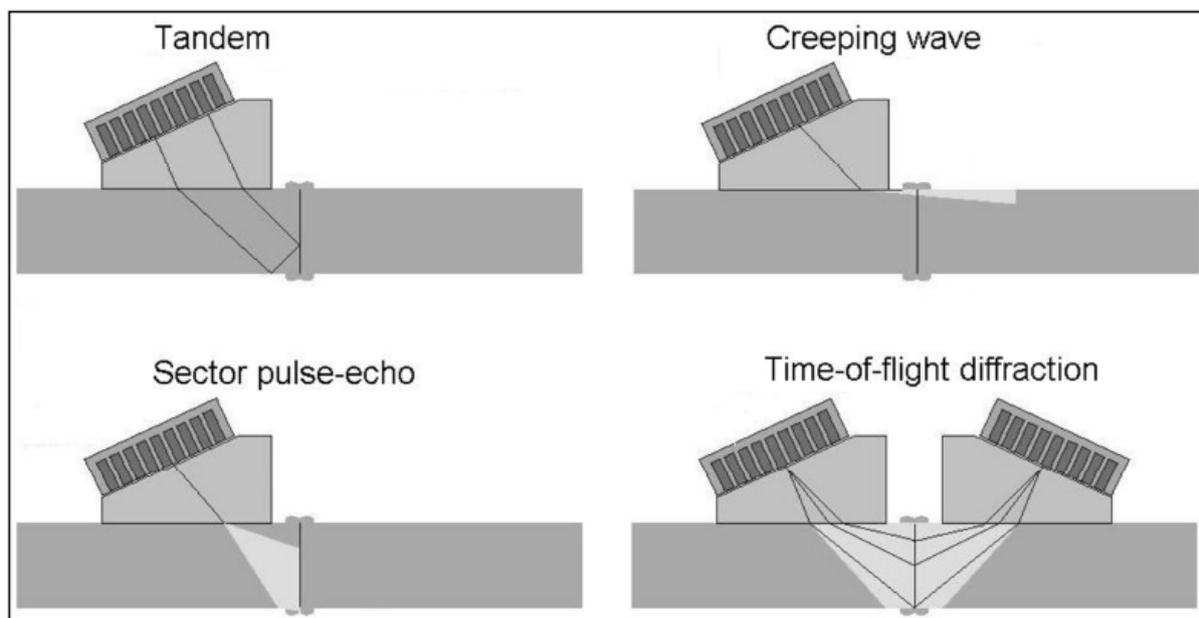


图 6 开发的热熔对接接头检测技术示意图。

扇区脉冲回波使用阵列中的所有元素来创建一个光圈，从较低角度扫描光束到较高角度。该技术给出了焊接的概述，并且除了靠近外表面几毫米外，覆盖了大部分焊接熔合区域。

自串联技术使用相控阵元件的一半进行传输，另一半进行接收。该技术对于检测平面缺陷是有利的，但覆盖区域限于更靠近内表面的区域。

蠕变波技术旨在覆盖接近外表面的区域，这是前两种技术未被覆盖的部分。蠕变波技术的配置使用高角度扇形扫描，产生在检测表面下方立即传播的压缩波，以检测表面缺陷和近表面缺陷。

TOFD 技术旨在覆盖整个融合区域。该技术利用正向衍射，对垂直缺陷敏感。该技术使用两个探头，项目的这个阶段评估的配置是使用两个扇区扫描的俯仰技术。采用这种技术，两个传感器都使用大光圈来传输覆盖整个焊缝的光束。

## 4. 结果

本节介绍使用扇形脉冲回波和不同外径和厚度管样品的串联技术的结果。所有的管道都有平底孔插入不同直径，不同位置的管道一端，详见表 1。所有的平底孔都是圆形的，但由于长宽比的变化，在一些示意图中显示为椭圆形，这些仅用于显示目的。

在这部分的所有图中都显示了三个图像：管道横截面的示意图，使用扇形脉冲回波技术的检查结果以及使用串联技术的检查结果。在横截面图左侧显示了两个条，以指示每种技术的理论覆盖率。黑条指示扇区脉冲回波技术的直接覆盖，黑灰条指示串联技术的直接覆盖。条纹末端的浅灰色表示光束扩散有助于覆盖范围。检查过程中的实际覆盖范围总是会有所不同，具体取决于探针未对准，变化的压力和不同的距离。

### 4.1 管道尺寸：外径 220mm，厚度 14mm

在图 7 中，给出了 220mm 外径，14mm 厚的 PE100 管的检查结果。在顶部图像中，显示了具有平底孔的管道的横截面的示意图。扇形脉冲回波技术的检查结果表明，该技术检测到所有的平底孔。通过串联技术，八个平底孔中的六个被检测到。

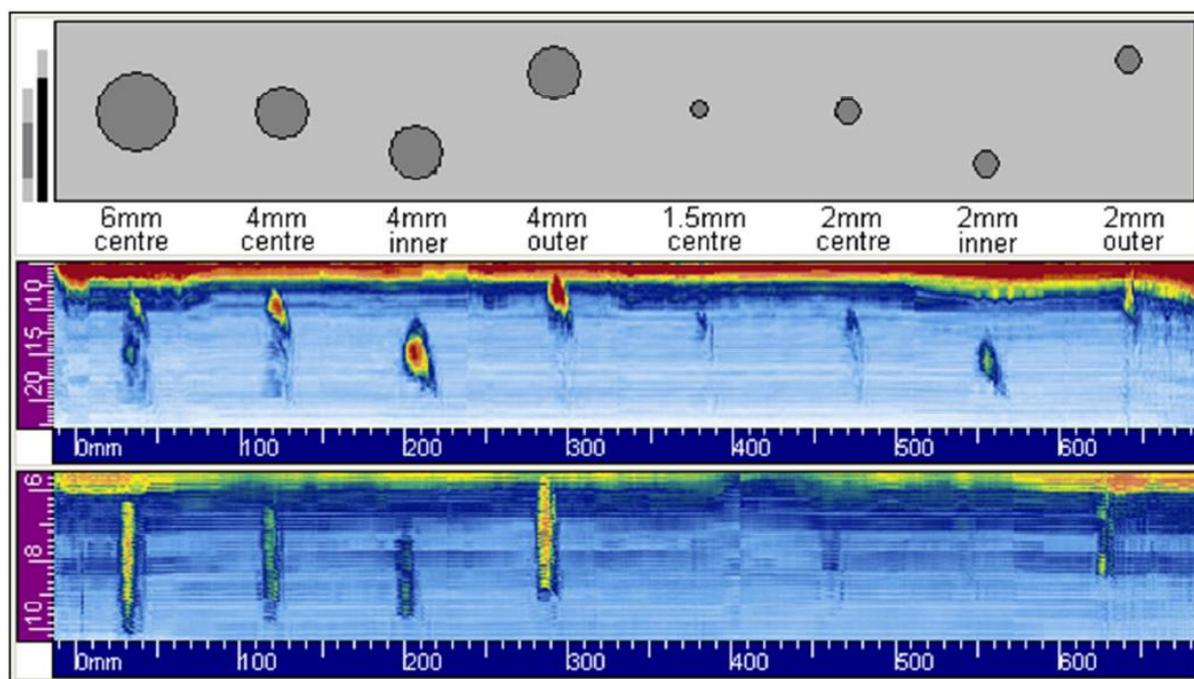


图 7 具有平底孔的 220mm 外径和 14mm 厚管的横截面以及扇形脉冲回波和串联检验结果的示意图。

### 4.2 管道尺寸：外径 450mm，厚度 28mm

在图 8 中给出了一个 450mm 外径，28mm 厚的 PE100 管道的检测结果。扇区脉冲回波技术能够检测到所有的平底孔，而串联技术能够可靠地检测到 16 个平底孔中的 10 个。其他一

些平底孔显示弱的迹象，未检测到的平底孔是最靠近外表面的平底孔。图 8 带有平底孔的 450mm 外径和 28mm 厚管道横截面的示意图。

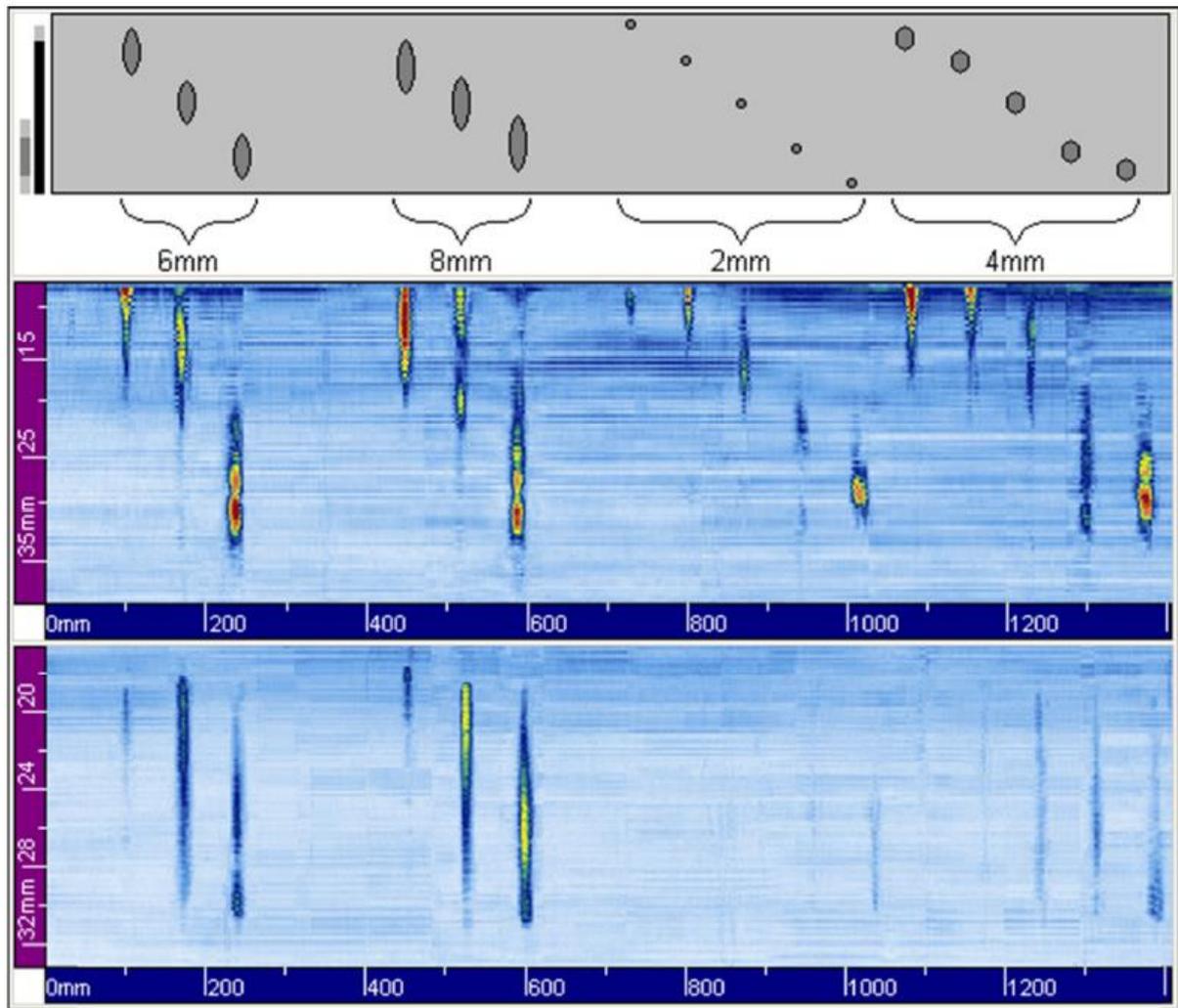


图 8 具有平底孔的 450mm 外径和 28mm 厚管的横截面以及扇形脉冲回波和串联检验结果的示意图

#### 4.3 管道尺寸：外径 355mm，厚度 33mm

图 9 显示了一个 355mm 外径，33mm 厚的 PE80 管材的检测结果。扇形脉冲回波技术设法检测 16 个平底孔中的 10 个，而串联技术可靠地检测到 16 个平底孔中的 8 个。一些其他的平底孔显示了一些弱的迹象，并且未检测到的平底孔也是最接近于外表面的那些平底孔。

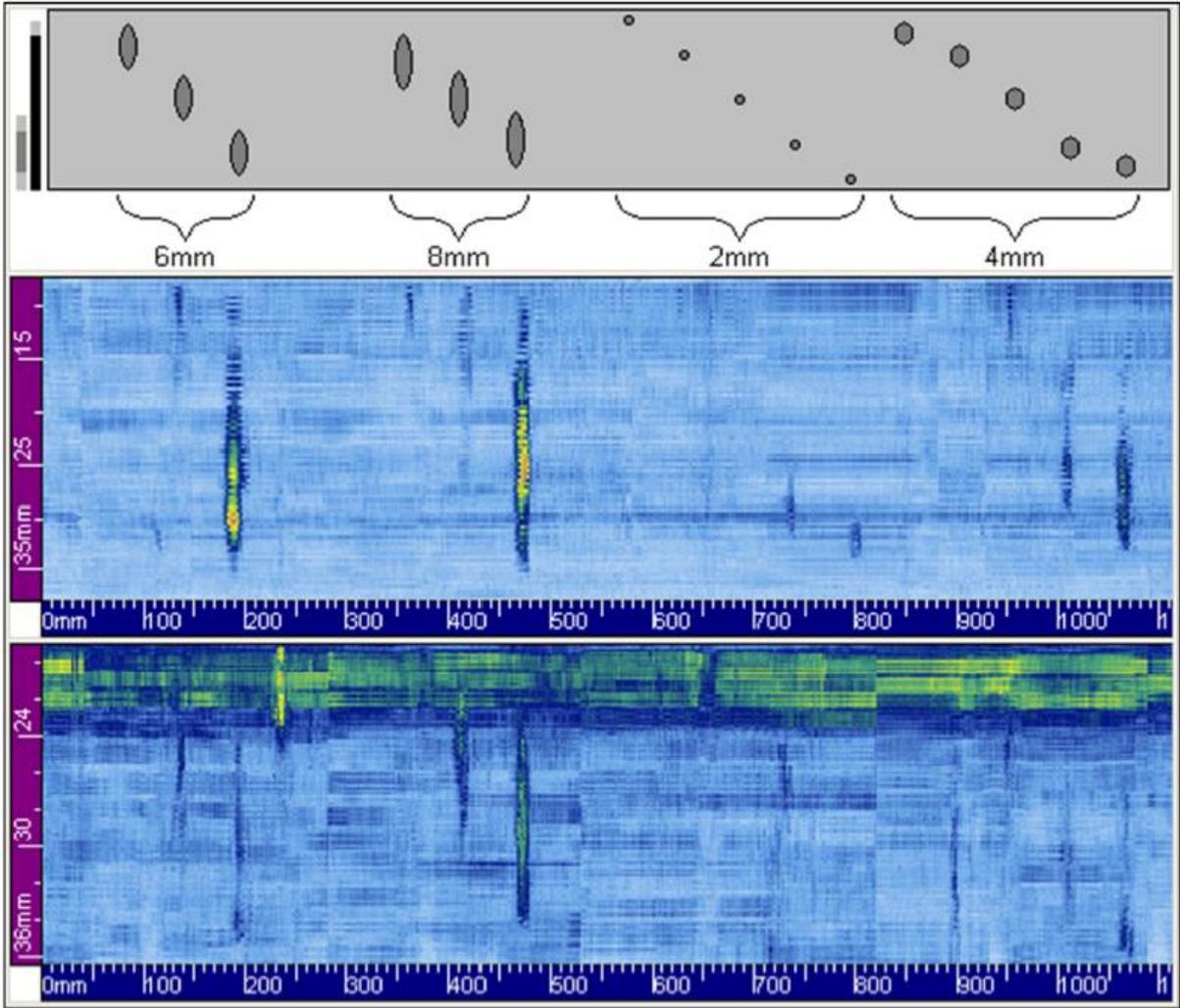


图9 采用平底孔的355mm外径和33mm厚管的横截面示意图以及扇形脉冲回波和串联检验结果。

#### 4.4 管道尺寸：外径710mm，厚度45mm

在图10中，给出了710mm外径，45mm厚的PE100管的检查结果。扇形脉冲回波技术设法检测16个平底孔中的15个，而串联技术可靠地检测到16个平底孔中的7个。

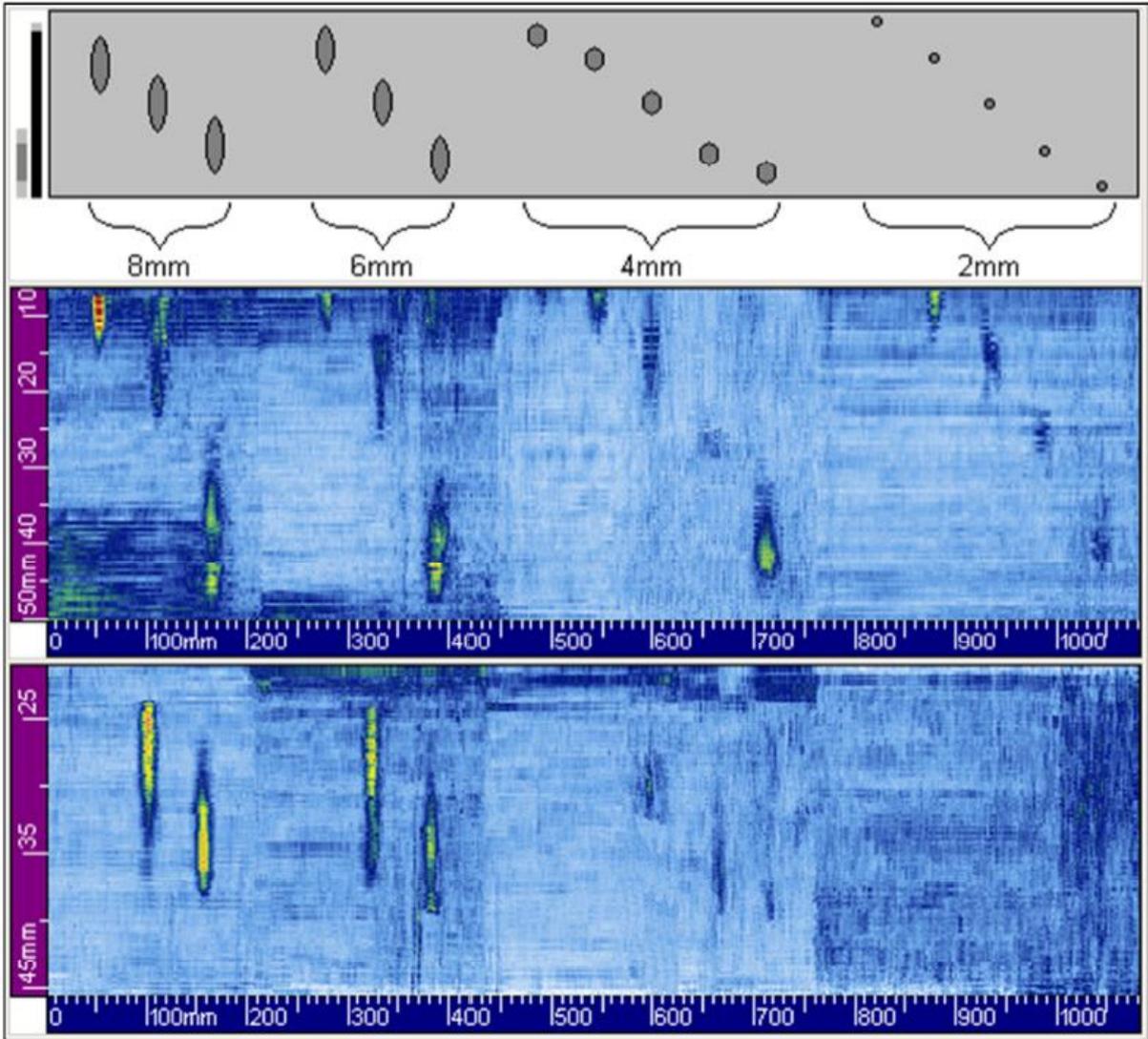


图 10 具有平底孔的 710mm 外径和 45mm 厚管的横截面的示意图以及扇形脉冲回波和串联检验结果。

#### 4.5 检查结果汇总

表 2 中给出了评估技术的检测结果。总体而言，扇形脉冲回波技术在 56 个平底孔中检测到 49 个（88%），并且串联技术在 56 个平底孔中检测到 31 个（55%）。由于覆盖面积较小，预计串联技术的检测能力较低。通过串联技术检测到的所有平底孔也被扇形脉冲回波技术检测到。如果位于理论覆盖范围之外的平底孔被忽略，那么两种检测技术的检测能力都高于整体结果。91%用于扇形脉冲回波，84%用于串联技术。未检测到的平底孔的百分比是较小的尺寸，通常接近外表面。

表 2 检查结果汇总

FBH (size)	Technique	220mm OD	450mm OD	355mm OD	710mm OD
1.5mm	Sector PE	1/1	-	-	-
	Tandem	0/1	-	-	-
2mm	Sector PE	3/3	5/5	2/5	4/5
	Tandem	2/3	1/5	1/5	0/5
4mm	Sector PE	3/3	5/5	3/5	5/5
	Tandem	3/3	3/5	2/5	3/5
6mm	Sector PE	1/1	3/3	2/3	3/3
	Tandem	1/1	3/3	2/3	2/3
8mm	Sector PE	-	3/3	3/3	3/3
	Tandem	-	3/3	2/3	2/3
Total	Sector PE	8/8	16/16	10/16	15/16
	Tandem	6/8	10/16	8/16	7/16

## 5. 讨论

开发 PAUT 技术是一个项目的一部分，该项目旨在将其纳入扫描系统进行现场检查，涵盖一系列聚乙烯材料等级和管道尺寸。因此，单个材料和尺寸的性能可能需要优化。该项目的另一部分是设计和制造用于特定接头结构和管道尺寸的探头和楔块。此外，本文所评估的检测能力并不考虑整个系统，只是考察了两种技术。还需要指出的是，只有少数同样规模和位置的平底孔进行了检查，平底孔的形状和位置尚未得到验证。为了获得更多统计学上正确的数据，将对更大样本量进行更定量的实验研究。

## 6. 结论

已经开发了外径在 220-710mm，厚度在 14-45mm 之间的热熔对接接头的检测技术。这些技术的能力已经通过在管端钻出的平底孔形式的含有人造缺陷的试样进行鉴定。总体检测能力为扇形脉冲技术的 88%，串联技术的 5%。所有尺寸的平底孔都可以通过两种技术在所有管道尺寸中检测到。未被发现的平底孔的主要原因是由于该位置在该技术的覆盖区域之外。每种技术在覆盖区域内的检测能力分别为扇形脉冲回波技术的 91% 和串联技术的 84%。

## 致谢

这些结果的研究由 REA-Research 执行机构管理的第七个框架计划[FP7 / 2007-2013]资助，授权协议编号为[243791-2]。本文档中的信息按原样提供，不保证或保证信息适合于任何特定用途。其用户将该信息作为其唯一的风险和责任。

## 参考文献

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-755, "Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe. Section III, Division I, and Section XI".
2. M.J. Troughton, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", *Plastics Pipes XI Conference*, Munich, Germany, 3-6 September 2001.
3. I.J. Munns and G.A. Georgiou, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", *Insight*, vol. 41, no. 5, May 1999.
4. C. Frederick, D. Zimmerman, and A. Porter, "High-density polyethylene piping buttfusion joint examination using ultrasonic phased array", *Pressure Vessels and Piping*, Prague, Czech Republic, 26-30 July 2009.
5. S L Crawford, S E Cumblidge, S R Doctor, T E Hall and M T Anderson, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", *PNNL*, May 2008.
6. D. MacLennan, I.G. Pettigrew and C.R. Bird, "Plastic Fantastic? – An NDE inspection solution for HDPE butt welds", *18th World Conference in Non-Destructive Testing*, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
7. C. Hekun, C. Zheng, C. Hong and F. Yang, "Ultrasonic phased array inspection on PE pipe heat fusion joints and electr-fusion joints", *18th World Conference in Non-Destructive Testing*, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
8. B. Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, "Novel High Resolution Defect Detection for Thermoplastic Butt -Welds", *Pipeline and Gas Journal*, March 2003.
9. H.J. Shin, Y.H. Jang, J.R. Kwon and E.J. Lee, "Nondestructive Testing of Fusion Joints of Polyethylene Piping by Real Time Ultrasonic Imaging". *Plastics Pipes XII Conference*, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
10. J.Q. Zhao, L. Daigle and D. Beaulieu, "Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 787-798, October 2002.
11. L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisauskas, "Measurement of Velocity and Attenuation for Ultrasonic Longitudinal Waves in the Polyethylene Samples", *Ultragarsas*, vol. 65, No. 4, 2010.