

# 聚乙烯管道中热熔对接焊和电熔接头的现场容积检测

## On-site Volumetric Inspection of Butt Fusion and Electrofusion Joints in Polyethylene Pipes

Dr. Mike Troughton and Dr. Fredrik Hagglund, TWI Ltd, UK

### 摘要

在现场焊接聚乙烯管道时，许多接头缺陷只能通过观察来完成，如空气中的灰尘，油脂，污垢，指纹或冷焊等影响因素。为了检测这些类型的缺陷，需要体积检测技术。

本文介绍了一种新型相控阵超声波检测系统及相关程序，专门用于现场检查聚乙烯管道中的热熔对接焊和电熔接头。还介绍了一些现场和工厂环境中使用该系统的案例研究，以及目前开发关于聚乙烯管接头体积检测的国际标准的工作。

关键词：聚乙烯 管材 热熔对接焊 电熔 无损检测 检测缺陷

## 1 简介

聚乙烯（PE）管道在输送流体的领域相较铸铁管道、钢铁管道、铜管道和混凝土管道有着显著的优势。因为聚乙烯管道耐腐蚀的特点，所以它的使用寿命更长，更换频率更低。聚乙烯材料重量轻，灵活性好，安装成本更低，并且它采用全焊接系统技术，泄漏率明显降低。然而由于缺少有对焊接接头性能可靠的无损检测（NDT）方法，它们在安全的关键的环境中（如核电站的冷却水进水管系统）的使用仍然受到限制。

目前确保聚乙烯管道中热熔对接焊（BF）和电熔（EF）接头质量的做法是，记录所使用的焊接参数，并对焊接接头进行目测检查和短期静水压试验，使用从接头切下的经过短期实验的样品的接头进行破坏性测试。但目测检查只能检查管接头的外表面，无法确保是否嵌入缺陷或冷焊缝。此外，以前在 TWI [1,2]的工作表明，只有热熔对接焊和电熔接头中包含严重的缺陷，静水压试验才会导致接头失效。另外，即使接头有缺陷，将缺陷部位包括在准备进行机械测试的切割样品中的可能性仍然很小。并且如果对接头进行机械测试，然后用未知质量的接头替换它，仍然不能确保管道的完整性。

体积无损检测可以提供对整个管道的完整分析，不会破坏管道的接头。因此，这是唯一可以确保安装聚乙烯管道中接头完整性的方法。所以为了做到这一点，无损检测技术必须被证明能够检测到所有可能的降低管道关节完整性的缺陷。

## 2 聚乙烯管道中热熔对接焊和电熔焊缝的潜在缺陷

由于聚乙烯管道通常在现场安装，所以焊接接头可能存在很大的瑕疵。下面列出了可能发生的潜在缺陷。

- 接头错位：由于焊接机器没有夹紧或者管道椭圆度，可能导致焊缝管道轴向不对齐。如果在焊接过程中管道未被夹紧，电熔焊缝中的角度有可能会有偏差。这些缺陷都可以通过目测检查焊接接头来检测。

- 管道制备不良：在热熔对接焊的焊缝中，刨削不正确会导致管端产生一个阶梯，从而产生不规则的焊道，这也可以通过目测检查来检测。在电熔焊缝中，如果在将管道插入接头之前，管道表面未被刮擦，则可以通过目测检查。但是，如果刮削不良，留下未修复的区域，那么就不能通过目测检查检测到完成的接头。

- 离散的平面缺陷：这种类型的缺陷可能存在于热熔对接焊和电熔接头中。它们可能由指纹引起，即在热熔对接焊过程中，在修整阶段结束后移除切屑或者在电熔过程中接触刮过的管道表面时意外地碰到管端；落在待焊表面上的汗水或者雨滴也会造成这类型缺陷。目测无法检测到这些缺陷。

- 颗粒物：在干燥，多风的环境中，空气中的尘埃或细沙可能会被吸引到聚乙烯管表面。在热熔对接焊中，在加热板移除阶段，这些颗粒物可以到达熔化的管端，也可以到达加热板本身。在电熔焊接中，在将管道插入配件之前，特别是在潮湿和泥泞的沟槽中，污垢可能会到达刮过的管道表面。然而这些类型缺陷不能通过目测来检测。

- 穿透不足：在电熔接头中，如果管道在焊接过程中没有被夹紧，由于轴向负载可能会移动，这意味着它们没有完全插入接头。如果在焊接之前在管道上标记了电熔接头的末端，则只能通过目测才能发现这种缺陷。

- 冷焊缝：由于分子链渗透不足和界面处的共结晶导致的不完全或只有部分熔合。这导致短时机械测试时可能出现脆性破坏模式。如果焊接操作是在寒冷，多风的条件下进行的，而焊接操作没有得到足够的保护，则在热熔对接焊焊缝中会出现冷焊缝。并且如果管子和焊缝之间存在过大的缝隙或者如果加热周期过早终止，都可能导致冷焊缝。

### 3 聚乙烯管道相控阵超声检测技术的发展

热熔对接焊和电熔接头类型需要非常不同的检测技术。图 1 显示了这两种类型的接头使用的技术。



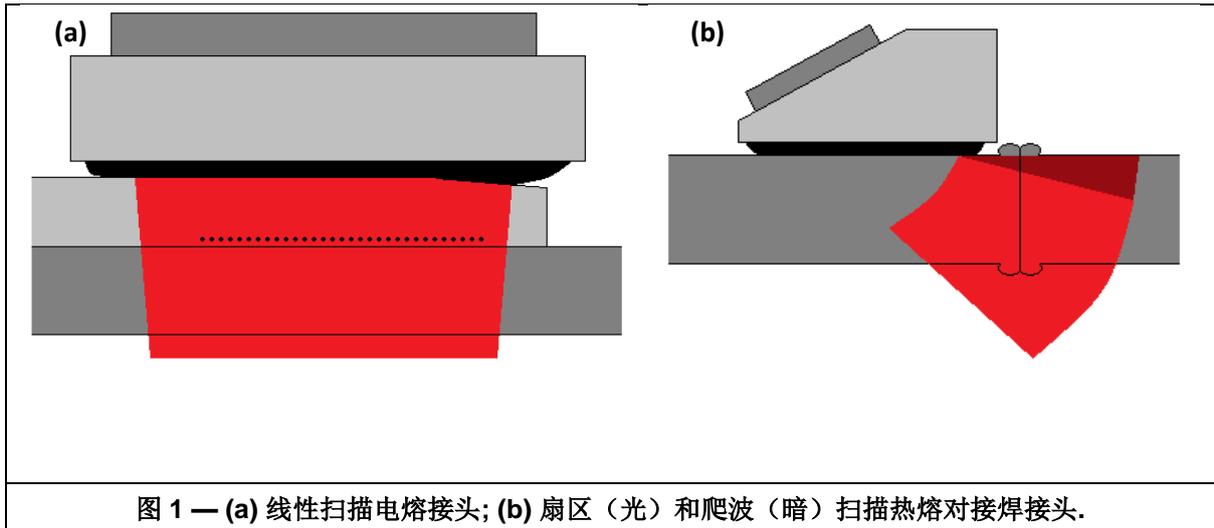


图 1 — (a) 线性扫描电熔接头; (b) 扇区（光）和爬波（暗）扫描热熔对接焊接头。

电熔接头的检测技术是一个 0 度线性扫描，重点在配件和管道之间的熔接区域；见图 1 (a)。电熔接头检测的最关键因素是覆盖率和分辨率。熔化区通常位于加热线下方，并且需要足够的分辨率以在线匝之间进行检查。通常，分辨率随着频率的增加而增加。然而，聚乙烯是一种高度衰减的材料，其衰减近似随功率因数随频率增加 [3]。因此，为了获得足够的声音传播距离，较大的较厚配件的频率需要较低。并且在较大的电熔配件中，导线直径和导线间距通常也较大，因此分辨率仍然足够。对于较小的管道，线径和间距都变小，则需要更高频率的探头才能检查熔合区。

对于热熔对接焊接头的检查，使用两种不同的技术：扇区脉冲回波和爬波，见图 1 (b)。这些技术在覆盖面上是互补的。扇形脉冲回波技术使用探头阵列中的所有元件来创建一个光圈，除了靠近外表面几毫米，光束可以扫过一定范围的角度以覆盖大部分熔合区域。爬波技术被设计为覆盖接近外表面的区域，这是焊接部分未被扇形脉冲回波技术覆盖的部分。爬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，以检测是否存在表面破坏和近表面缺陷（即在外表面的几毫米内）。

## 4 检测系统的发展

相控阵超声波检测系统由多个部件组成：

- 相控阵探头，可产生超声波信号，并检测来自接头缺陷的反射信号。
- 探头楔块，确保超声波能以正确的角度从探头传输到聚乙烯管道或接头中，同时可以使能量损失最小。
- 探头支架，在接头的整个圆周上确保探头楔块和聚乙烯管或者接头之间有良好的接触。
- 扫描器，它将探针组件围绕管接头运送而不会沿轴向移动并记录其圆周位置。
- 探伤仪，将电信号发送到探头元件并分析返回的信号。

### 4.1 相控阵探头

如前所述，聚乙烯是超声波的高度衰减材料，因此探针必须专门针对这种材料进行设计。据发现，检测直径在 90mm 和 800mm 之间的热熔对接焊和电熔接头，至少需要四种不同的探头（表 1）。

表 1-探针的性质

类型	管子大小	探头频率, MHz	探头元件数量
热熔对接焊	小	4	32
	大	2	64
电熔	小	5	128
	大	3.5	128

#### 4.2 探头楔块

为了对塑料管进行检查，设计和制造了新型的膜水楔块。使用它的优点是低衰减速度比能够转向成角度的梁。图 2 显示了一些探头/楔块组件。

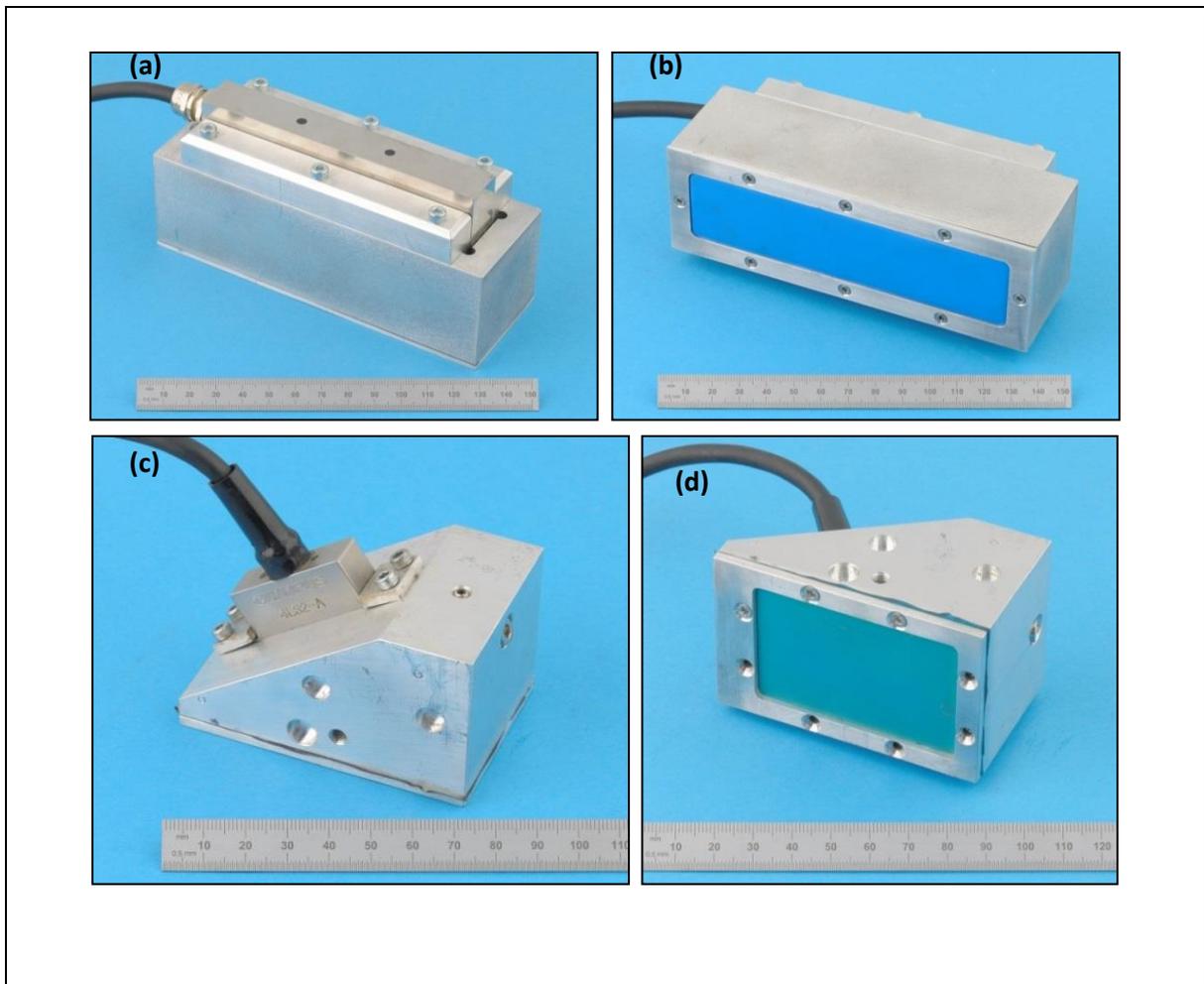


图 2 探头/楔块组件：（a）和（b）在 0° 膜水楔块中的 5MHz 探头，用于检测小直径的电熔接头；（c）和（d）在一个成角度的水楔块中的 4MHz 探头，用于检测小直径的热熔对接焊接头。

对于热熔对接焊焊缝，楔块的角度进行了优化，使其尽量减少探头元件的电子转向。对于电熔焊缝，需要 0° 的楔块。该膜是一种柔性材料，适合于管道和管件表面。

#### 4.3 扫描系统和探头支架

扫描系统是专门为检测聚乙烯管道接头而设计制造的，适用于不同的管道尺寸和接头类型。它包括一个主板，通过多个连杆和一个调节机构（图 3）在管道周围固定。主板包含编码器及探针座的支撑，该编码器记录关节周围的周向位置。对于不同的连接结构探针/楔组件使用相同的探头支架，所有管道直径 90mm 以上。

#### 4.4 探伤仪

相控阵超声波测试使用包含硬件和软件的阵列控制器来进行检查。对于现场部署，一些便携式系统可用。适用于检测聚乙烯管接头的探伤仪的基本要求是支持 128 个元件的相控阵探头，同时处理 32 个元件。

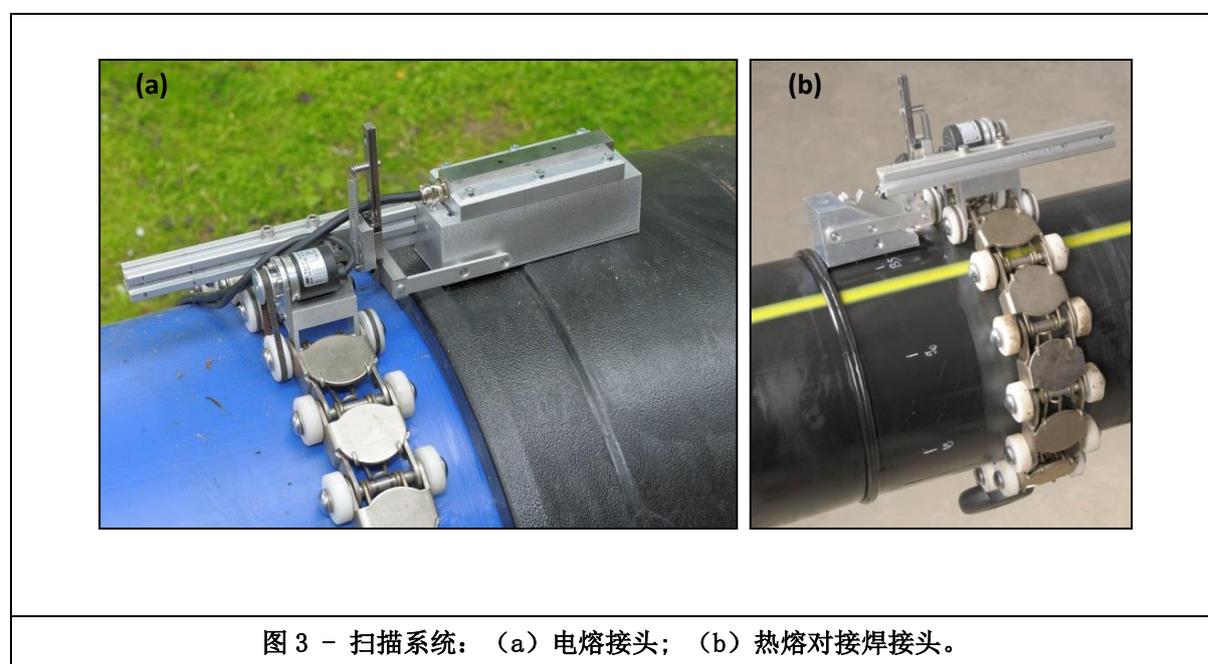


图 3 - 扫描系统：（a）电熔接头；（b）热熔对接焊接头。

## 5 检测系统的评估

### 5.1 试验评估

为了使检测系统对行业有价值，需要检测所有相关的缺陷。为此，该系统和相关程序已经在实验室中进行了评估，检测了超过 200 个直径在 180 和 710 毫米之间的焊接聚乙烯管接头，其中包含人造缺陷。使用人造缺陷的原因是为了确定无损检测技术的检测范围，并且可以确定减少关节完整性的缺陷的临界尺寸，知道缺点的具体位置，尺寸和数量每种缺陷类型。

使用的人造缺陷是：

•25 $\mu\text{m}$  厚的铝盘，用于模拟离散的平面缺陷。TWI 的以前的工作表明，就超声无损检测而言，薄金属圆盘可以很好地模拟聚乙烯管接头中没有完全熔合的情况 [4]。

•微粉滑石，粒度<45 $\mu\text{m}$ ，以模拟微粒。

•分级硅砂，粒径 150-300 $\mu\text{m}$ ，模拟粗颗粒。

图 4 和图 5 分别示出了包含直径为 2mm 的铝盘的 225mm 电熔接头的超声波图像，同时管道没有完全插入耦合器（管道下方）。这两种缺陷都可以清楚地检测出来。

图 6 显示了标准的 450mm 电熔接头和冷焊缝的图像，加热时间降低到制造商推荐值的 50%。已经显示在电热丝上方的线表示为电熔配件中熔化区的边界[5]。因此熔融区边界指示与电热丝的指示之间的距离可用于检测冷焊缝 [5-7]。

图 7 显示了含有硅砂污染的 225mm 电熔接头的超声图像，图 8 显示了来自 355mm 热熔对接焊接头的扇形脉冲回波图像，其在融合界面处包含 4mm 的平面缺陷。同样，这两种缺陷类型都可以被检测到。

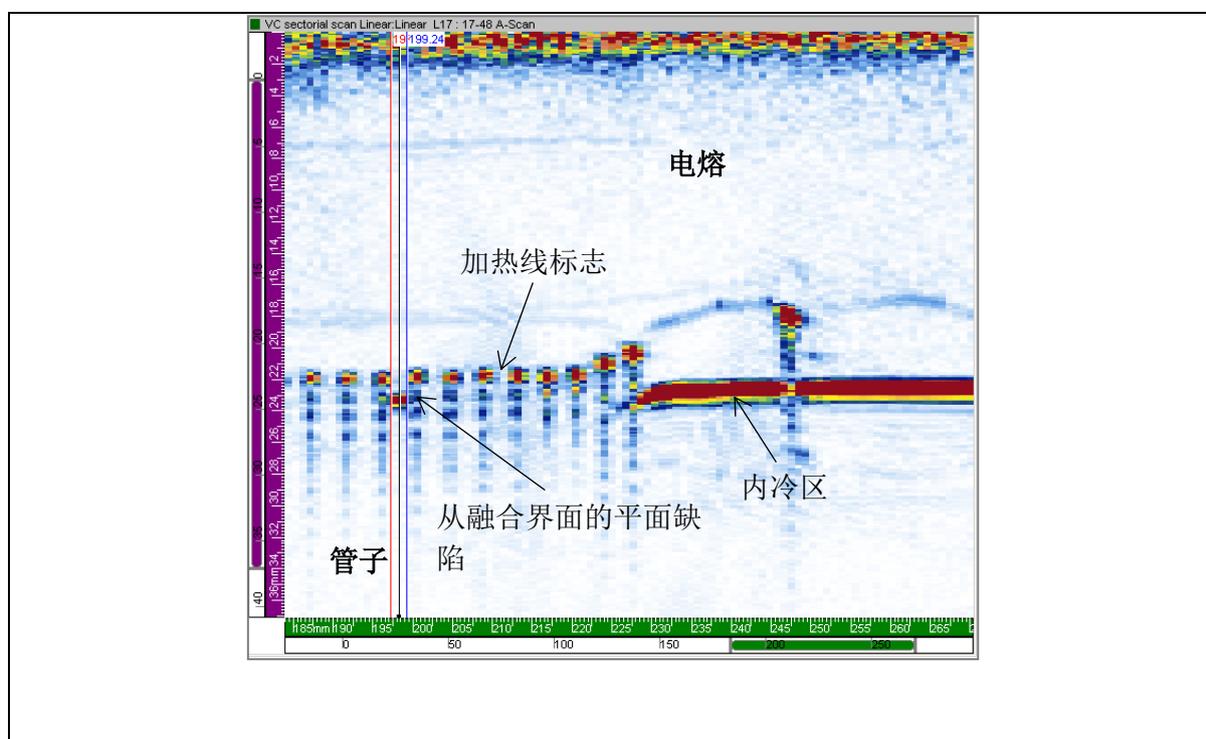


图 4 - 在融合界面包含 2mm 铝盘的 225mm SDR11 电熔接头的超声图像。

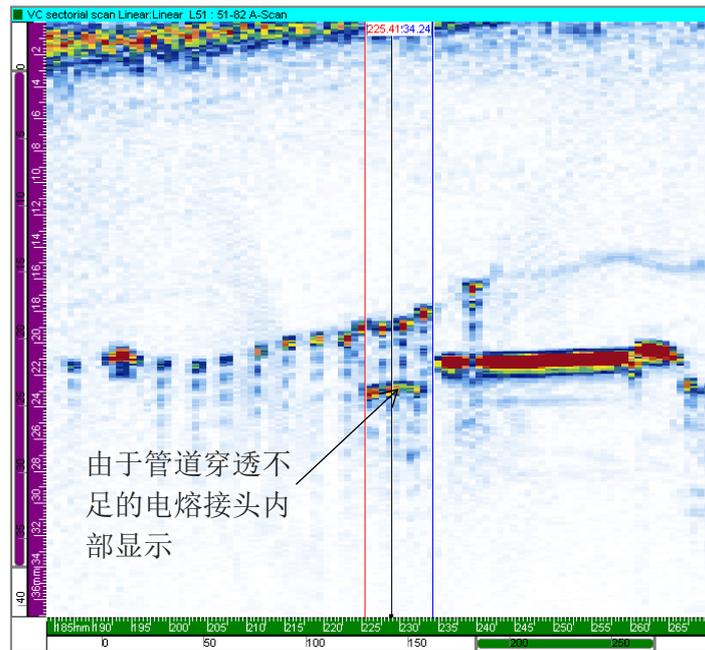


图 5 - 225mm SDR11 电熔接头的超声图像，管道穿透不足。

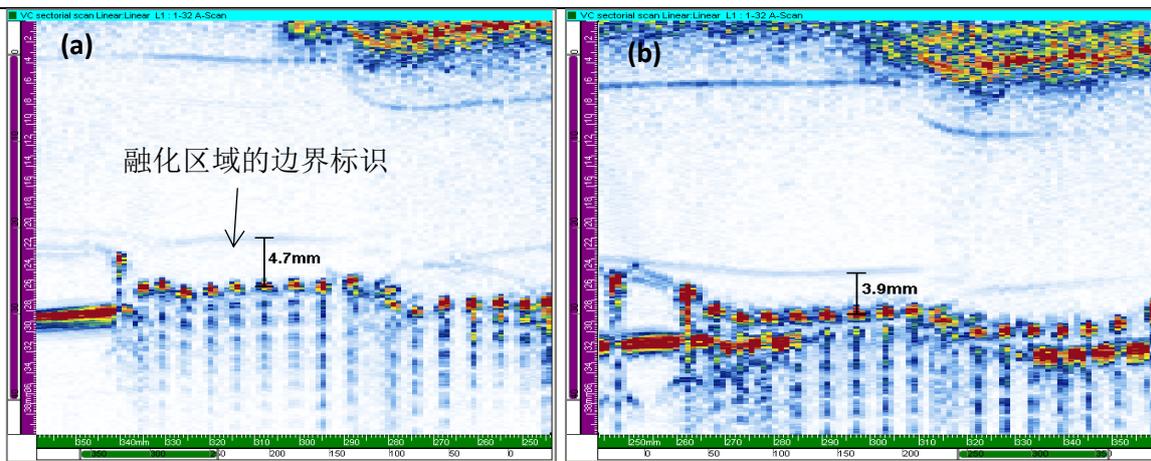


图 6 - 超声波图像：（a）标准的 450mm SDR17 电熔接头；（b）加热时间减少 50% 的 450mm SDR17 电熔接头，导致冷焊接。

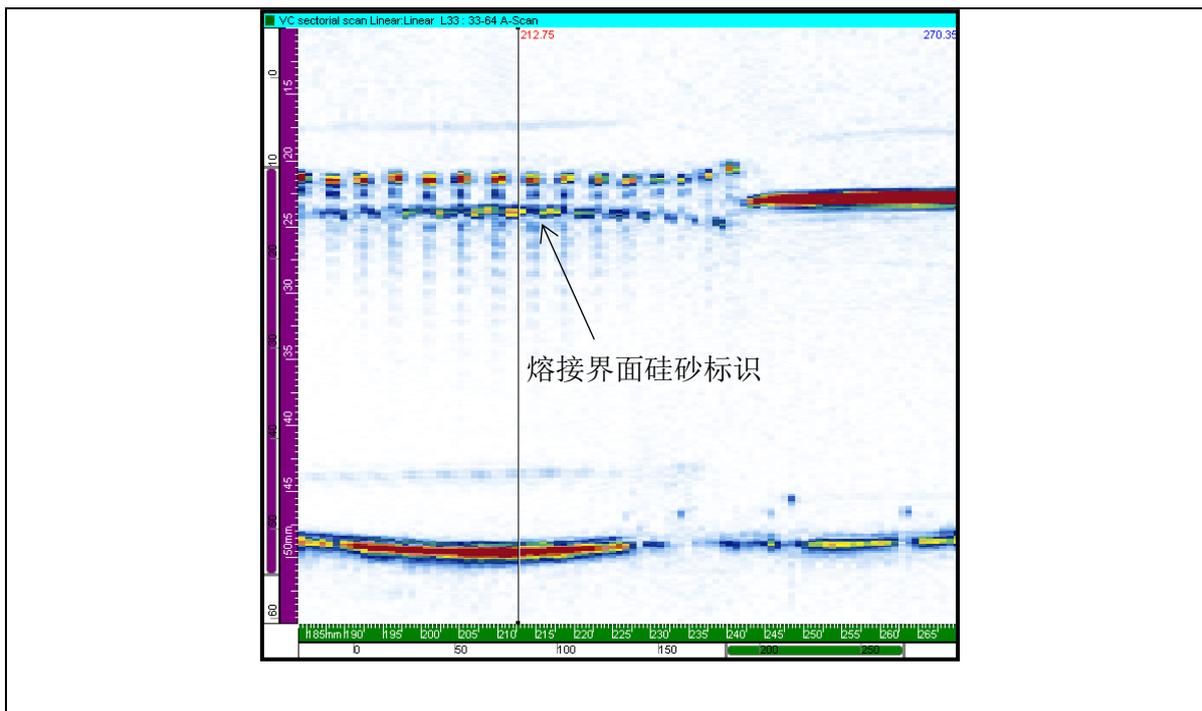


图 7 - 包含分级硅砂的 225mm SDR11 电熔接头的超声图像。

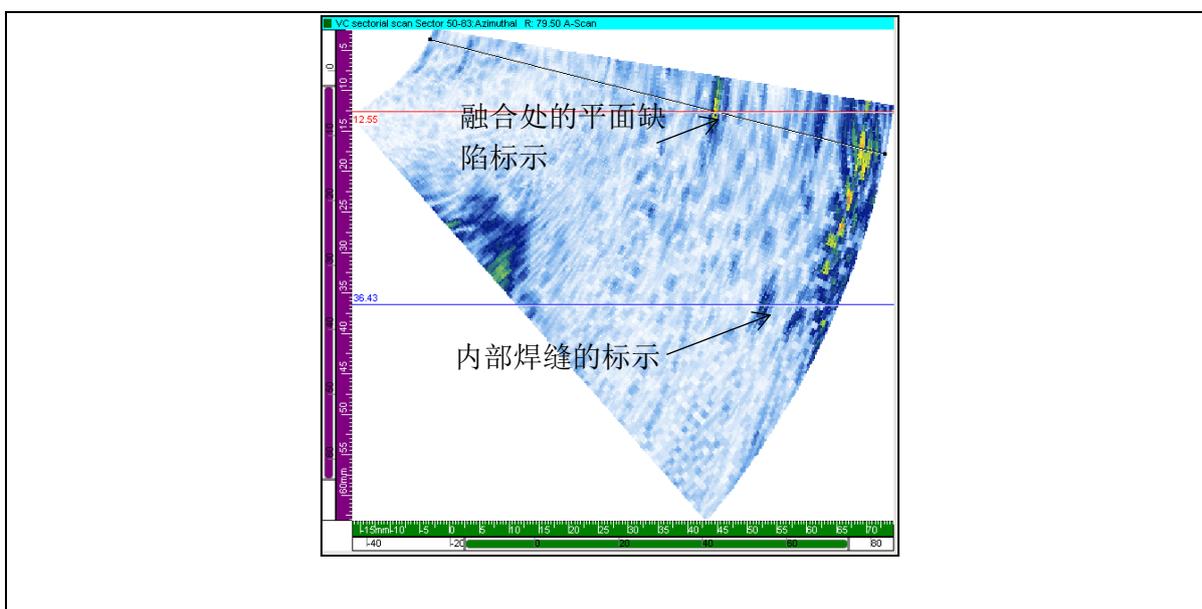


图 8 - 在融合界面包含 4mm 平面缺陷的 355mm SDR11 热熔对接焊接头的超声图像。

实验室的试验结果表明，检测系统能够一致地检测出热熔对接焊和电熔接头中的下列缺陷：

- 平面瑕疵，缺乏融合和空隙，直径可达 1mm。
- 细小颗粒和粗颗粒。
- 冷焊缝。

•电熔接头中的管道渗透不足。

还通过机械测试评估了这些缺陷对关节短期和长期性能的影响，以制定缺陷验收标准。

## 5.2 工业检测

在英国罗瑟勒姆的工厂检测将要安装在英国发电站的聚乙烯管道。管子直径在 450 至 630 毫米之间，壁厚在 36 至 60 毫米之间。总共检测了 88 个热熔对接焊接头（图 9）。

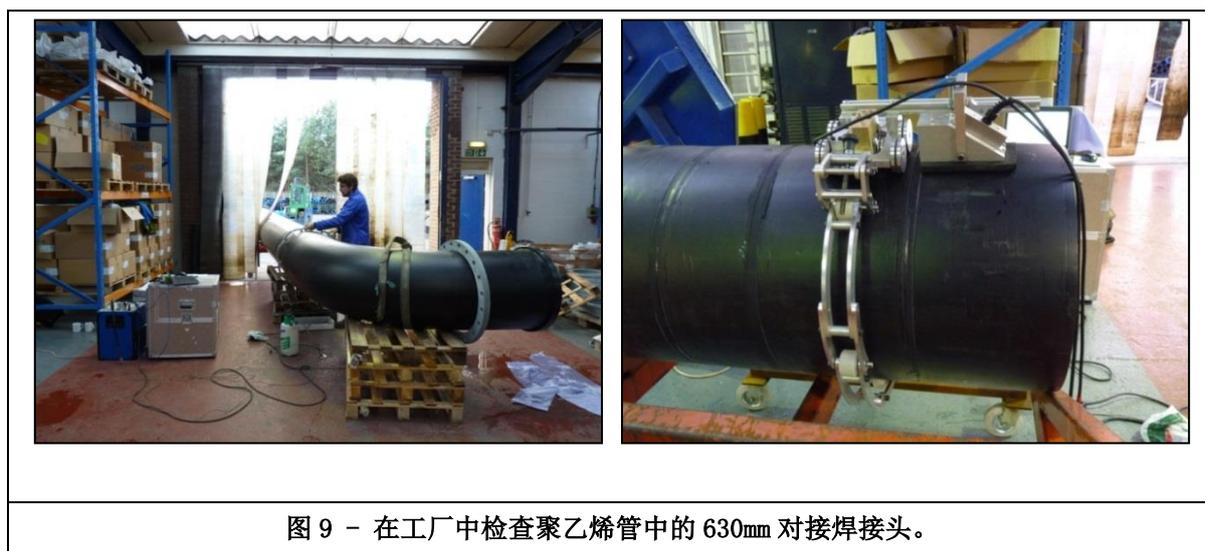
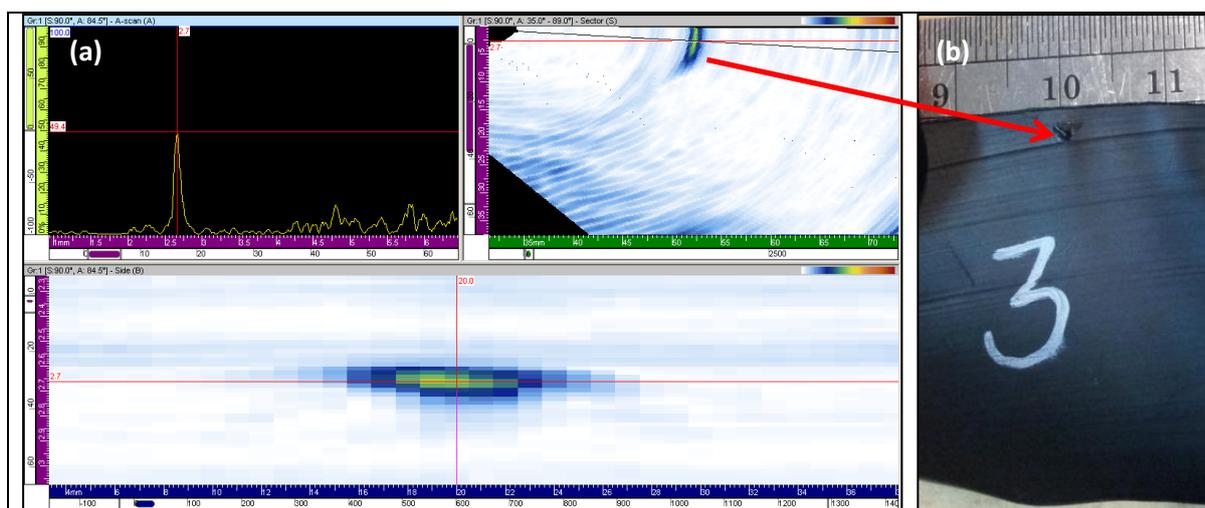


图 10 (a) 示出了在其中一个管道周围的一个位置处的关节中存在指示的扇形扫描图像。指示的圆周位置标记在管道上，随后切断接头，并在对接熔接机中修整包含焊缝的部分。然后分析在指示位置的任何瑕疵。图 10 (b) 显示了指示位置的照片，显示了关节中的缺陷。



### 5.3 现场检测

这种技术已经应用在在英国和海外，进行了现场检查。图 11 (a) 示出了用于检查北威尔士 710mm 用于为水电站安装管道的电熔接头的设备，图 11 (b) 示出了在 250mm 电熔接头处进行的检查英国谢菲尔德的一条输气管道。



图 11 - (a) 北威尔士和 (b) 英国谢菲尔德的实地视察。

图 12 显示了在米兰市中心检查的 30 个热熔对接焊和电熔接头中的一些位置。管径范围从 90 到 315 毫米。检查完成后，根据检查报告将部分接头切断并切断。图 13 显示了该部分与超声图像之间的相关性。



图 12 - 在米兰市中心的两个不同的发掘项目中检查的管道。

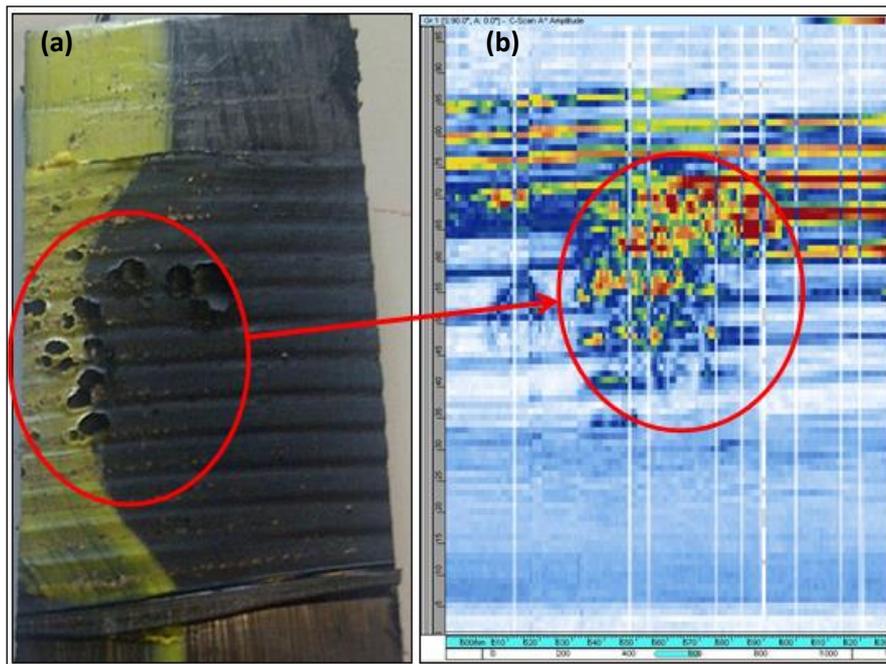


图 13 (a) 315mm 电熔接头的断裂界面照片； (b) 在切片之前对相同区域的 C 扫描图像。

## 6 标准发展

TWI 在开发聚乙烯管相控阵超声波检测技术方面所做的工作，正在被收录在 ISO / TC138 / SC5 / WG17 工作组中（塑料管材，管件和阀门 - 替代测试方法）。技术报告草案 ISO / DTR 16943（使用相控阵超声波检测方法检测电熔插座接头）于 2014 年 11 月获得批准，并将于今年出版。使用相控阵检测对接接头的技术报告草案超声波检测方法目前正在由工作组审议。此外，TWI 在聚乙烯管接头的无损检测方向，为 ASME BPV 规则第 III 部分强制性附录 XXVI（3 类埋地聚乙烯管道的建造规则）提供技术支持。

## 7 结论

在实验室试验期间，已经开发和评估了一种用于检查聚乙烯管中的电熔和热熔对接焊接头的相控阵超声波无损检测系统，其外径为 90 至 800mm，壁厚为 8 至 65mm。然后进行了现场检查。这项工作的结果表明：

- 聚乙烯管道中的电熔和热熔对接焊接头均可在现场进行挖掘或壕沟检测。
- 在检查后立即给出每个接头的初始分析以便立即反馈，并且基于这个分析可以替换接头。
- 检验结果与后续样品之间有很好的相关性。

## 8 参考资料

1. C.I. Brown and M.J. Troughton, 'Qualifying long-term PEformance of butt fusion welds in PE piPEs from short-term tests', Plastics PiPEs XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
2. M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano, "Comparison of long-term and short-term tests for electrofusion joints in PE piPEs", Plastics PiPEs XIII Conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
3. L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisauskas, 'Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples', Ultragarsas, Vol. 65(4), 2010.
4. I.J. Munns and G.A. Georgiou, 'Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene piPEs', Insight, 41(5), 1999.
5. C. Bird, D. Caravaca and A. Raude, 'The insPEction of cold welds in electrofusion joints'. Plastics PiPEs XIII conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
6. M. Troughton, M. Spicer and F. Hagglund, 'Development of ultrasonic phased array insPEction of Polyethylene piPE joints', ASME 2012, Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto, Canada, 15-19 July 2012.
7. J. Shi, J. Zheng, W. Guo and C. Xu, 'Safety assessment of cold welding d 电熔 ect in electrofusion joint of polyethylene piPE', ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2012-78655, 2012.

## 关于作者

**Mike Troughton** 博士是 TWI 塑料技术部经理，负责协调聚合物领域的所有研发，咨询和培训活动。他的主要专业领域包括聚乙烯管材的焊接，检验和机械测试，他撰写了 30 多篇技术论文。他也是 *Plastics Joining – A Practical Guide* 的编辑。他曾为世界各地的客户管理过 80 多个研究和咨询项目，其中包括三个用于开发聚乙烯管道焊接超声波检测方法欧洲资助的项目，总价值超过 500 万欧元。他是欧洲标准委员会 CEN / TC249 / WG16（热塑性材料焊接）的主要英国专家，负责开发有关热塑性塑料焊缝无损检测的唯一国际标准。他是各种国家和国际塑料焊接委员会的主席，也是英国各种 ISO，CEN，ASTM，AWS 和 ASME 标准委员会的专家。

**Fredrik Hagglund** 博士在加入无损检测，超声波和测量技术领域拥有超过十年的经验。他发表了 30 多篇研究论文，积极撰写和出席 ISO 和 ASME 标准的会议。**Fredrik** 加入了 TWI 的非破坏性技术小组，致力于研究，开发和应用超声波技术。在他的职业生涯中，他已经在超声波技术，信号处理，相控阵超声波测试和建模方面发展了广泛的技能。在 TWI 多年来，**Fredrik** 赢得了包括非线性声学 and 多层材料检测等无损检测的新兴研究领域众多的合作项目，。