

聚乙烯及其复合管道安全检测与评价方法

施建峰, 郭伟灿, 师俊, 钟思嘉, 郑津洋
(浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 聚乙烯及其复合管道广泛应用于油气输送、城市燃气等能源领域, 其安全性至关重要。焊接接头的安全检测及评价是聚乙烯及其复合管道系统安全的关键技术。介绍了聚乙烯管道焊接接头的无损检测原理及方法、冷焊检测技术以及缺陷分类与失效模式三方面内容。对电熔和热熔焊接接头分别采用超声相控阵和耦合聚焦技术进行超声检测, 并给出了缺陷剖切与检测结果的对比图。提出了物理概念清晰、工程应用方便的冷焊超声检测方法。将电熔接头中的缺陷分为熔合面缺陷、孔洞、结构畸变和过焊。分别对含不同类型和大小缺陷的电熔接头进行力学性能测试, 发现电熔接头存在三种典型的失效模式, 即沿电熔套筒壁贯穿裂纹失效、熔合面失效以及沿电阻丝所在平面贯穿裂纹失效。根据试验测试与理论分析结果, 提出了相应的安全评定方法。所提出的方法, 填补了国内外在聚乙烯管道安全检测与评价方法方面的技术空白, 提高了燃气管道的本质安全性。

关键词: 聚乙烯管; 复合管; 焊接接头; 无损检测; 安全评定

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2013.02.048

中图分类号: TQ 320.72

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2013) 02-0756-09

Development of non-destructive testing and safety assessment of polyethylene and composite pipes

SHI Jianfeng, GUO Weican, SHI Jun, ZHONG Sijia, ZHENG Jinyang

(Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Polyethylene (PE) and its composite pipes have been widely used in the transportation of energy, such as natural gas and petroleum. Pipe welding joints have been proven to be a weak link of the whole pipeline. This means that non-destructive testing (NDT) and safety assessment of these joints are key technologies to guarantee safety of pipeline. In this paper, the theory and method of NDT technology on welding joint of PE pipes, inspection technique of cold welding and safety assessment of welding joints containing defects are introduced. Ultrasonic phased array and coupling focusing technology are applied in the inspection of electrofusion and butt-fusion joints of PE pipes respectively. Figures with inspecting image and cross section of practical joint are given. A cold welding inspection method based on ultrasonic phased array technology was invented, which has clear physics concept and is convenient in application. The defects in the electrofusion joints of PE pipe are classified into four categories: poor fusion interface, over welding, voids and structural deformity. Mechanical tests of joints with different kind of defects show that there are three main failure modes of EF joint under inner pressure, that is, cracking through the fusion interface, cracking through the fitting, and cracking through copper wire interface. A safety assessment method was proposed based on the experimental and analytical results. The proposed method can greatly

2012-08-02 收到初稿, 2012-09-05 收到修改稿。

联系人: 郑津洋。第一作者: 施建峰 (1985-), 男, 博士后。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAK06B01)。

Received date: 2012-08-02.

Corresponding author: Prof. ZHENG Jinyang, jyzh@zju.edu.cn

Foundation item: supported by National Key Technology R&D Program (2011BAK06B01).

improve intrinsic safety of such pipeline.

Key words: polyethylene pipe; composite pipe; welding joint; non-destructive testing; safety assessment

引言

管道作为五大运输方式之一,是输送石油、天然气等关键能源物质的主要手段,对国民经济的发展和稳定起着至关重要的作用,是国民经济的“生命线”。随着“西气东输”、“川气东送”等重大工程的实施和城市化的高速发展,管道运输以其高效率、低成本和安全可靠的优势,越来越显示出强劲的发展潜力。相比传统金属管道,聚乙烯及其复合管道具有耐腐蚀、柔韧性好、使用寿命长和不污染输送介质(如饮用水)等优点^[1],符合国家倡导的“低碳”、“绿色”的发展方向,是国家中长期发展规划中主推的管材之一。据统计,我国每年因管道腐蚀而造成的事故约占事故总数的30%~40%,造成的经济损失占国民生产总值的4%左右;目前,我国新铺设的中低压城市燃气管90%以上是聚乙烯管材;在油气输送领域也已经开始大量应用聚乙烯复合管道,如钢丝缠绕增强塑料复合管、玻璃纤维增强塑料复合管等。聚乙烯及其复合管道的使用,因减少维护和腐蚀事故而产生显著的经济效益^[2-5]。

管道系统中,由于连接处改变了管材自身的一体性,使得管道接头成为系统的薄弱环节。美国国际管道研究委员会(PCI)认为焊缝、焊接缺陷是“稳定存在的失效因素”^[6]。现有聚乙烯及其复合管道技术标准采用常规静液压与拉伸试验来评价焊接接头质量。但越来越多的测试结果证明该方法无法有效检验出劣质的焊接接头,从而使大量不合格的管道接头被投放使用,给聚乙烯及其复合管道的油气输送管道埋下巨大的安全隐患,并成为当前限制聚乙烯及其复合管道推广应用的主要因素^[7]。因此,聚乙烯及其复合管道焊接接头亟需一种行之有效的安全保障技术。

目前国内外针对聚乙烯及其复合管道焊接接头安全保障技术的研究主要从检测设备及方法与力学性能测试两方面开展研究。在无损检测方法研究方面。美国西南研究院最早对聚乙烯管尝试了超声、红外、X射线等无损检测方法,得出结论认为这些无损检测方法均不能有效检测出聚乙烯中较小的空

洞缺陷和裂纹缺陷^[8]。2008年,美国西北太平洋国家实验室(PNNL)利用超声TOFD技术成功检测出核电站用聚乙烯管道系统焊接接头中的孔洞和未熔合缺陷^[9]。然而,目前世界范围内均未见报道能有效检测冷焊等工艺性缺陷的无损检测技术。力学性能测试方面,国内外均还未有聚乙烯及其复合管道安全评定的国家标准,现有的聚烯烃及其复合管道焊接接头的产品质量控制主要依赖于剥离试验和静液压试验。剥离试验要求电熔接头剥离面脆性破坏程度不超过1/3,这种方法存在的问题是,对剥离后破坏表面的韧性或脆性的判断依赖于实验者本身,而且对于不同初始熔合面长度的焊接接头相互之间没有可比性。而对于静液压试验,已有大量的试验证明,即使存在非常严重的冷焊缺陷,电熔接头也有很大的概率通过165 h和1000 h的测试^[10],表明该方法无法有效地检测出性能不合格的接头。

针对现有聚乙烯及其复合管道焊接接头无损检测设备、检测方法与安全评定等方面存在的不足,本文针对聚乙烯及其复合管道焊接接头缺陷检测及安全评价的关键技术进行深入研究,在聚乙烯管道焊接接头无损检测方法及设备研制,电熔接头的冷焊检测与表征技术及焊接接头缺陷分类与安全评定技术方面取得突破。该技术部分成果已在国内多家塑料管道生产企业、天然气公司等单位的新产品开发、焊接工艺优化、产品质量检验、事故鉴定中获得广泛应用,创造了显著的经济效益和社会效益。

1 焊接接头无损检测原理与方法

1.1 无损检测原理

针对熔焊面与检测面平行且两者之间存在电阻丝阻隔的聚乙烯管道电熔接头,引入高频相控阵动态聚焦和电子线扫查技术,设计了电熔接头专用相控阵探头,通过相控阵探头线性阵元排列方式和触发时间控制,动态调节声束焦距,获取焦点位置信息。

超声相控阵换能器的设计基于惠更斯原理,超声阵列换能器内部含有多个压电晶片,每个压电晶片形成一个发射/接收阵元,运用电子技术,按计算得到的时序控制激发各个阵元,使阵列中各阵元

发射的超声波叠加形成一个新的波阵面，在效果上相当于改变了换能器的空间排列形式。同样，在反射波的接受过程中，按一定规则和时序控制接收阵元的接受并进行信号合成，再将合成结果以适当形式显示，由此实现了超声波声束的动态聚焦。电子线扫查是以固定数量的阵元，以相同聚焦规则沿着探头排列方向移动扫描，直到整个探头扫描完毕的扫查方式。通过记忆各焦点的位置信息和其反射波幅值，形成 B 扫查成像技术，在断面图上可获得缺陷的深度位置、水平位置以及用辉度（或颜色）表示的缺陷波高。

对于熔焊面与检测平面垂直且带不规则卷边结构的聚乙烯热熔焊接接头，发明了全自动卷边切除技术与装置^[11]，使之能够更方便快捷高效地自动切除聚乙烯管道热熔接头内外卷边，从而基本排除外卷边对超声检测产生的干扰。针对聚乙烯材料的声学特征和聚乙烯管道热熔接头特有的结构特点，原创性地提出了液浸耦合与超声曲面聚焦相结合的耦合聚焦技术^[12]，其技术原理如图 1 所示。

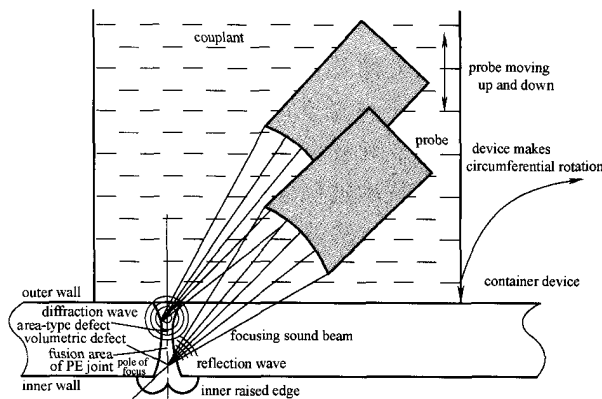


图 1 耦合聚焦技术原理^[12]

Fig. 1 Inspecting mechanism of coupling focusing ultrasonic technique^[12]

1.2 检测方法与精度

聚乙烯电熔接头的超声检测要求被测表面应当没有污物，连接好超声检测设备并根据所要检测的接头尺寸选择合适的探头，调整仪器灵敏度，直到超声图像清晰为止，将耦合剂涂于被检表面，沿宽度方向移动探头以检查整个接头同时记录接头情况。探头频率应与套筒厚度相匹配，表 1 为不同频率探头适用的套筒厚度值。

聚乙烯电熔接头超声检测调节灵敏度可以采用两种方法：校准试块调节法和试件金属丝调节法。校准试块调节法将探头放置在校准试块表面，并调

表 1 不同频率探头适用的套筒厚度

Table 1 Selecting of probe frequency to inspect different thickness of EF fittings

Frequency/MHz	Thickness of EF fitting/mm
3.5	20 or above
5.0	6—25
7.5	5—15

节至获得的图像有足够的分辨率和灵敏度可以鉴别每个侧面的钻孔，如图 2(a) 所示。试件金属丝调节法将探头放置在与试件同厚度的合格的电熔接头外表面，然后调节至获得的图像有足够的分辨率和灵敏度可以鉴别每一根电阻丝，如图 2(b) 所示。

用于聚乙烯管材的聚乙烯材料，国家标准对其物理性质（如密度、模量）以及添加剂含量（如炭黑等）均有严格的规定，可以认为不同批次的聚乙烯管材之间的声速差异可以忽略。此外，对焊接后焊区材料进行测试，发现其密度、模量等与声速相关的物理量在各个区域的差异并不显著。因此，研究中不考虑材料批次以及焊接引起的声速差异。

具体检测时，在待检的电熔接头上涂抹上耦合剂，以 90°为间隔选择 4 个探测点，观测显示器是否有可记录信号。以传感器宽度为扫描区域宽度沿套筒圆周移动传感器探测整个接头，是否有可记录信号被检测到，如果检测到可记录信号，将传感器沿周向扫查，以确定缺陷分布的范围。

通过对大量带有典型缺陷的试块、试样的检测试验，结合工程实践，验证超声相控阵聚焦技术对聚乙烯电熔接头熔合面缺陷、孔洞及金属丝错位等缺陷均有较高的检测灵敏度和检出精度。结果表明^[13]，对金属丝上方 ≥ 1.0 mm、金属丝信号之间 ≥ 1.0 mm 以及金属丝信号下方 ≥ 2.0 mm 的缺陷有 100% 的检出率；对熔合面缺陷、金属丝上方的孔洞及金属丝错位的定量、定位精度可达 0.5 mm，对金属丝下方孔洞的定量、定位精度可达 1.0 mm。检测灵敏度和检出精度符合电熔接头质量控制要求。

通过试制含缺陷热熔对接接头，并采用耦合聚焦技术进行可靠性检验，结果表明该技术可有效检出接头中的 $\Phi 1$ 的孔洞（图 3）、1 mm 高的裂纹和典型的未熔合缺陷（图 4）。通过对比试验证明其对缺陷的检测灵敏度优于 TOFD 技术和传统的接触法斜波技术^[9]。

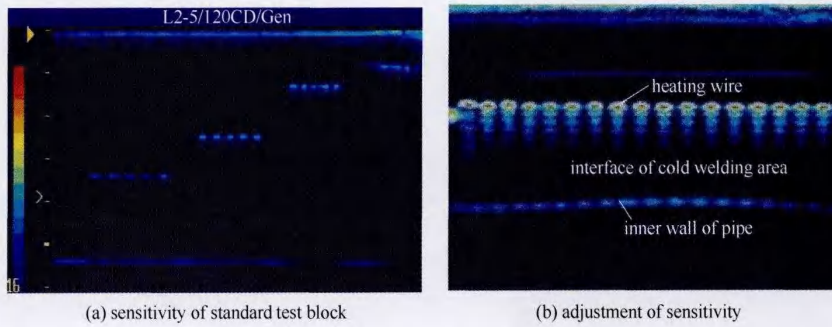


图 2 校验超声图谱

Fig. 2 Calibration of ultrasonic testing image

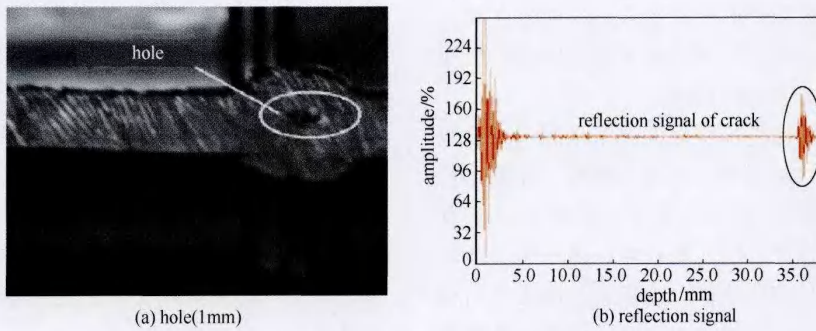


图 3 耦合聚焦技术对孔洞的检测灵敏度^[14]

Fig. 3 Sensitivity of hole inspection^[14]

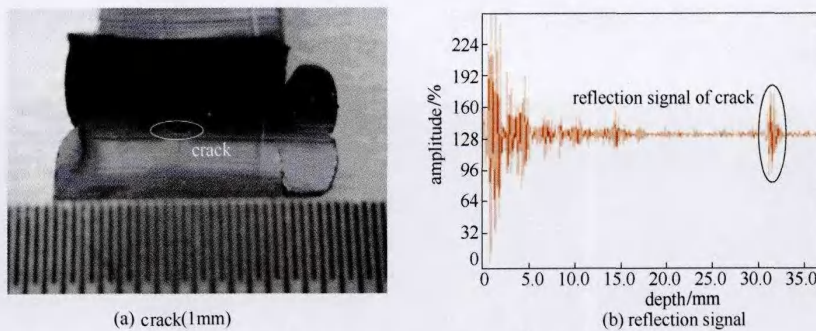


图 4 耦合聚焦技术对小裂纹的检测灵敏度^[14]

Fig. 4 Sensitivity of crack inspection^[14]

2 冷焊检测原理与方法

2.1 冷焊检测原理

通过对电熔接头进行超声相控阵 B 扫描成像，发现电熔接头超声成像图谱中电阻丝回波信号上方有一条水平方向的白色亮线，如图 5 所示。由于这条超声信号线在焊接结束后能被永久地固化在电熔接头内部，成为记录该接头的焊接工艺或焊接条件的“指纹”，因而将其称为特征线。因而只要建立起特征线位置与焊接输入热量的关系，就可以根据

特征线位置判断电熔接头是否存在冷焊缺陷，并用以表征其冷焊程度^[15]。

在相同的焊接电压下，焊接时间直接决定了焊接输入热量^[16]。图 6 为不同焊接时间下电熔接头的超声截面图。图中横向整齐排列的为电阻丝的超声信号线，在电阻丝信号线上方的模糊线即为焊接特征线。由图中可以看出，特征线贯通套筒的整个焊接区域，基本与电阻丝信号平行。对比图 6(a)~(f) 发现，随着焊接时间的增加，特征线离电阻丝的距离也逐渐变大。由于超声检测特征线在电熔焊

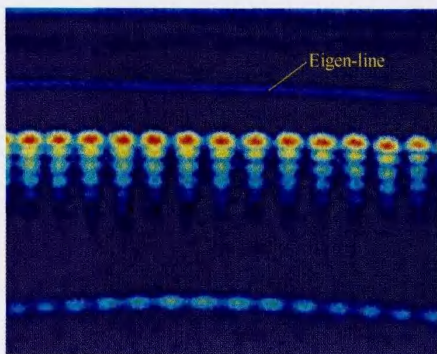


图 5 电熔接头超声截面图^[15]

Fig. 5 Ultrasonic image of cross section of EF joint^[15]

接过程中与熔融区边界的位置重合，因而建立高精度的电熔焊接温度场模型并准确预测熔融区扩展规律成为冷焊检测与表征的关键。

电熔焊接过程温度场结果的误差来源包括模型参数的测量误差（包括聚乙烯材料参数、焊接工艺参数以及接触热阻）、数值计算方法的误差以及有这些误差相互耦合产生的新的误差。由于每个因素都随温度呈非线性变化规律，由因素与因素之间相互耦合产生的影响将更加难以预计。因此，准确获得这些材料的参数值，清楚各个因素对结果的影响，将数值计算方法的误差限制在一定范围之内，从而防止各个误差因素之间的非线性耦合，是保证温度场预测结果准确性的关键。

综合考虑上述各焊接参数的影响建立电熔焊接过程温度场模型，将实测的材料参数和电阻丝参数随温度的变化规律带入模型计算。传统的理论分析和有限元方法计算包含多个非线性变化参量及其之间相互耦合数值模型时，往往存在收敛困难及计算精度较差的问题。为此，开发了具有智能调整时间步长的数值计算程序，可根据每一时间步温度变化幅度自适应调整时间步长，确保温度场计算结果具有较高精度^[17]。

根据温度场预测结果发现，在熔融区形成以后，其扩张速率基本是均匀的，即除了焊接开始阶段，特征线与电阻丝之间的距离随焊接时间近似成线性关系。通过对比熔融区边界与电阻丝间距以及实际测量得到特征线与电阻丝之间距离，表明该温度场模型可准确预测特征线的移动规律，如图 7 所示。

2.2 冷焊检测方法

由于特征线与电阻丝之间的距离与焊接输入热量之间有明确的对应关系，因而可将其用于冷焊的间接检测，其实施方法为：

- (1) 利用超声检测方法对正常焊接接头焊接部分的某一截面进行检测，获得超声反射信号图像，测得该超声反射信号图像中的特征线与电阻丝的距离 L_0 ；

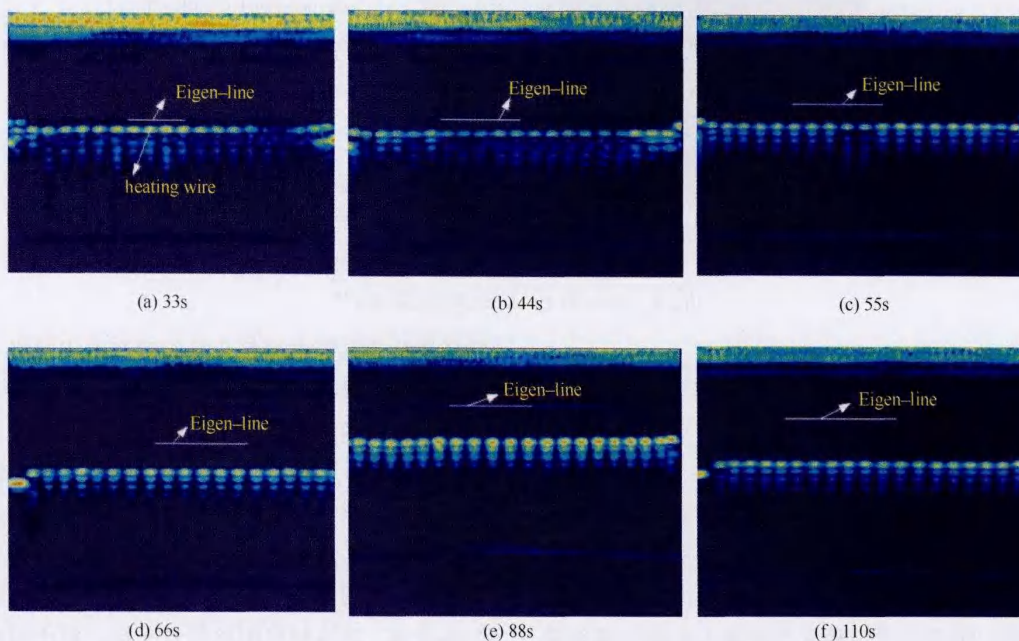


图 6 不同焊接时间下的特征线位置^[17]

Fig. 6 Position of Eigen-line with different welding time^[17]

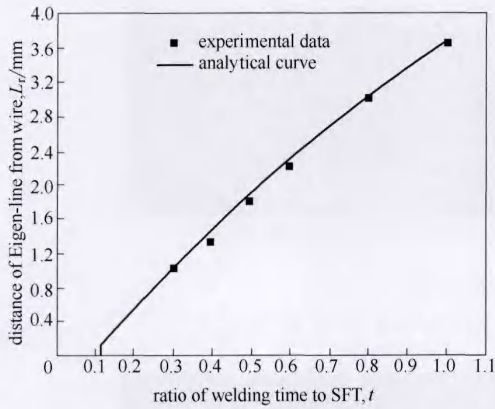


图7 特征线的理论分析及试验结果^[17]

Fig. 7 Comparison of position of Eigen-line with theoretical analysis and experiments^[17]

(2) 对待测电熔接头同样进行超声检测，获得某一截面的超声反射信号图像，测得该超声反射信号图像中的特征线与电阻丝的距离 L ；

(3) 根据上述两个图像中的特征线距离电阻丝的远近来判断该待测电熔接头是否存在冷焊缺陷。

3 焊接接头的缺陷分类与失效模式

缺陷的分类依据必须来源于工程实践。通过对国内多家塑料管道生产与应用单位进行实地调研，将管道接头按《聚乙烯燃气管道工程施工技术规范》要求进行剖切后的截面进行记录与归类。在此

基础上，试制了大量人工缺陷模拟施工现场环境下产生的缺陷，并对其进行剖切与超声检测，建立了接头实物剖切图与超声图谱之间的对应关系。随着实地调研、人工缺陷试验以及超声检测图谱等相关数据的增加，为了系统地对各类缺陷数据及其对应的超声检测图谱进行管理，并方便后续研究对这些缺陷进行识别、比对或查询，开发了“聚乙烯管道接头失效基础数据库软件”。同时还详尽地公布了该数据库开发的基本原理、系统架构、实体联系图、接头缺陷数据的分类方法、接头超声图谱数据获取方式与原理、软件实现方式以及具体操作方法，供塑料管道系统相关研究人员、监管人员或施工人员的查询与使用^[16]，从而便于该项技术的推广应用。

基于工程调研结果，将电熔接头中缺陷分为熔合面缺陷、孔洞、结构畸变以及过焊四大类。熔合面缺陷是指出现在熔合界面，即套筒的内壁与管材外壁的结合面上的缺陷。熔合面缺陷主要包括未熔合（图8）、夹杂（图9）、冷焊（图10、图11）等^[18]，该类缺陷属于面积型缺陷；孔洞是指位于焊接界面上或在焊接界面附近出现的孔洞，如图12所示，该类缺陷属于体积型缺陷；结构畸变缺陷指电熔接头结构或外观发生明显改变的缺陷，如原先均匀排布的电阻丝在焊接后发生了水平或垂直方向的位移，如图13所示。过焊缺陷是指由于焊

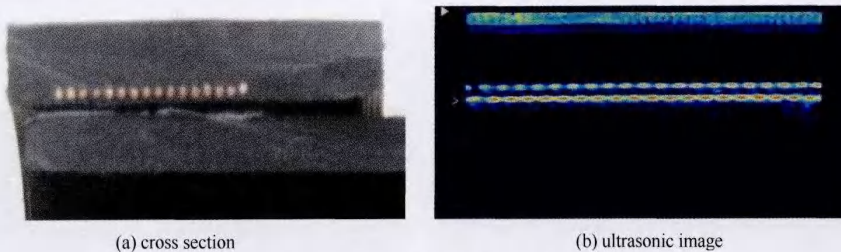


图8 未熔合缺陷示意图^[18]
Fig. 8 Sectional view of unfused EF joint^[18]

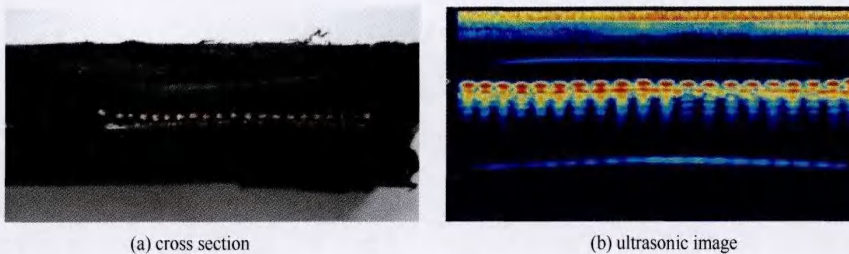


图9 夹杂缺陷示意图^[18]
Fig. 9 Sectional view of EF joint containing contamination^[18]

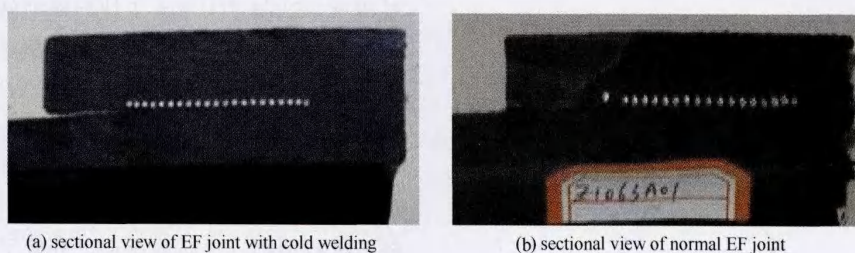


图 10 冷焊及正常焊接实剖对比图^[18]

Fig. 10 Comparison of cross section of cold welding and normal EF joint^[18]

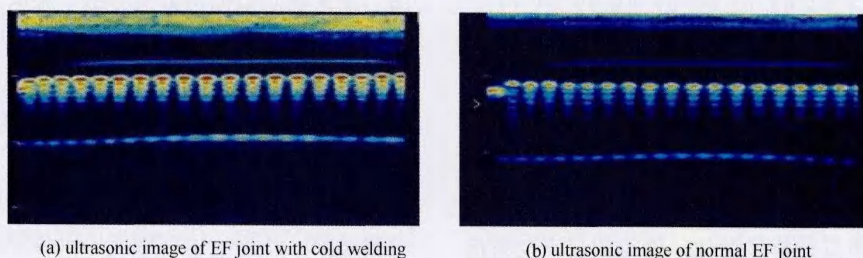


图 11 冷焊及正常焊接超声对比图^[18]

Fig. 11 Comparison of ultrasonic image of cold welding and normal EF joint^[18]

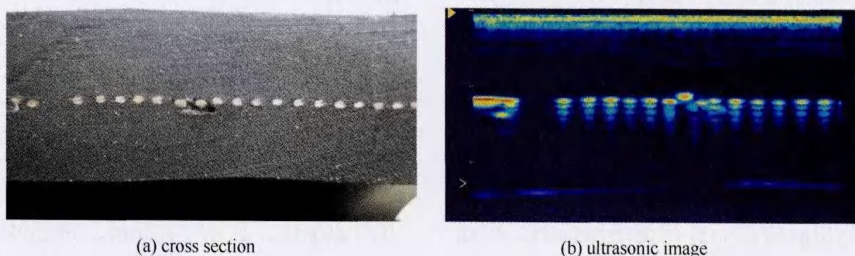


图 12 孔洞缺陷示意图^[18]

Fig. 12 Sectional view of EF joint containing holes^[18]

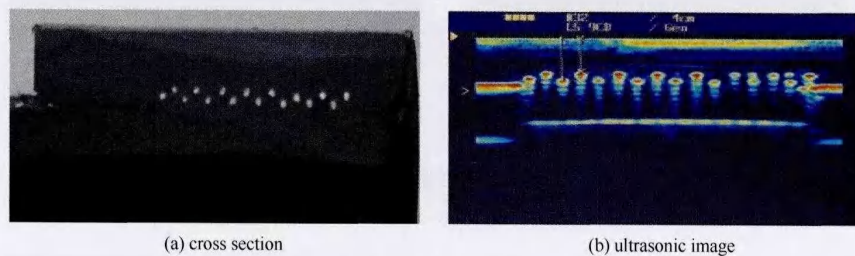


图 13 结构畸变缺陷示意图^[18]

Fig. 13 Sectional view of EF joint with deformity^[18]

接温度过高，在电阻丝所在平面处发生材料劣化导致性能下降的缺陷。

为了研究这四类缺陷对电熔接头力学性能的影响，需要制作含缺陷电熔接头进行大规模长时间的力学性能测试。通过对大量含缺陷电熔接头进行破坏性测试，涵盖不同材料（PE80，PE100 及其组

合）、结构形式（聚乙烯管、钢丝缠绕增强复合管）、焊接工艺、缺陷种类、大小、位置等类型的电熔接头，测试时间大多分布于 0（短时爆破）~3000 h 之间，其中最长的两个试样测试时间已达 36000 h 以上（目前仍在测试中），积累了大量含缺陷电熔接头的失效数据，掌握了缺陷种类、大小、位置等

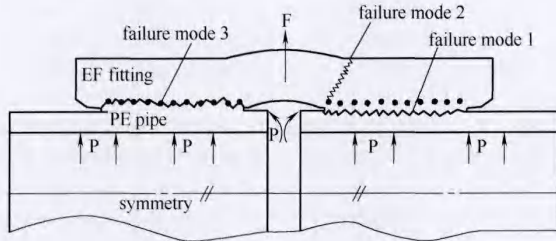


图 14 电熔接头失效模式示意图^[18]

Fig. 14 Failure modes of EF joint^[18]

failure mode 1: cracking through fusion interface;

failure mode 2: cracking through fitting;

failure mode 3: cracking through copper wire interface

因素对电熔接头力学性能的影响规律，归纳了电熔接头主要存在 3 种失效模式：沿电熔套筒壁贯穿裂纹失效、熔合面失效以及沿电阻丝所在平面贯穿裂纹失效，如图 14 所示^[18]。

这 3 种失效模式中，沿电熔套筒壁贯穿裂纹失效主要由与内冷焊区连通的熔合面夹杂缺陷引起。研究发现，与内冷焊区连通的熔合面夹杂缺陷在长时静液压测试中会在内冷焊区端部产生应力集中并萌生裂纹，随着测试时间的增长，裂纹缓慢沿着电熔套筒壁向外扩展，并最终贯穿整个电熔套筒，裂纹扩展方向与轴向所成的角度约为 70°，其失效形态如图 15 所示。即使在较短的时间内，电熔套筒未发生失效，但只要电熔接头包含却冷焊区缺陷，往往在其根部也有类似的裂纹。图 16 所示为含内冷焊区缺陷电熔接头经过 825 h 的高温静液压测试后（未破坏），将其取出并进行轴向剖切，在内冷焊区根部发现的初始裂纹。该结果说明与内冷焊区连通的熔合面夹杂缺陷随着时间增加最终总会使电熔接头发生沿电熔套筒壁贯穿裂纹失效。因而在安全评定标准中必须对与内冷焊区连通的熔合面夹杂缺陷进行严格限制，即所有与内冷焊区连通的熔合面夹杂缺陷均判为不可接受。

4 结 论

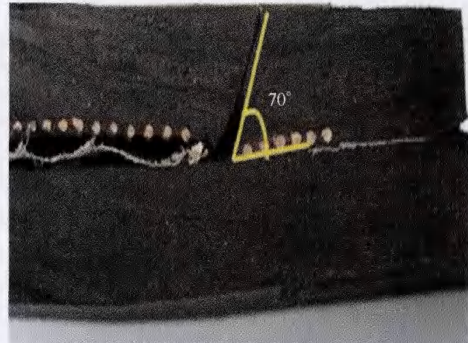
(1) 提出了热熔接头的耦合聚焦缺陷超声检测方法，发展了电熔接头相控阵超声检测技术，实现了聚乙烯及其复合管道各类焊接接头的有效检测。

(2) 发现了可用于标识熔融区边界的特征线，提出了高精度的焊接温度场预测模型及其算法，揭示了聚乙烯及其复合管道冷焊的形成及其检测机理，实现了聚乙烯及其复合管道冷焊检测与表征。

(3) 将电熔接头中缺陷分为熔合面缺陷、孔



(a) outer surface of failed EF joint



(b) cross section

图 15 沿电熔套筒壁贯穿裂纹失效^[18]

Fig. 15 Failure with crack through fitting wall^[18]

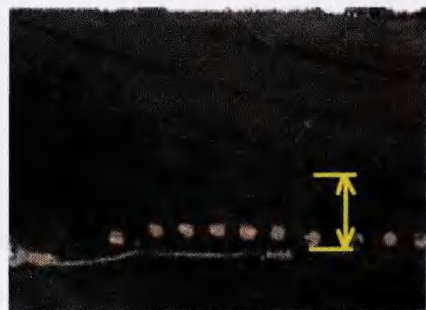


图 16 电熔套筒内冷焊区根部的初始裂纹^[18]

Fig. 16 Initial crack from root of copper wire in EF joint^[18]

洞、结构畸变以及过焊四大类，介绍了接头中的缺陷形态及其对应的超声图谱，并提出了电熔接头的主要失效模式。

References

- [1] Sun Xun (孙逊). Polyolefin Pipe (聚烯烃管道)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 588
- [2] Greig J M. Polyethylene pipe in the British gas distribution system [J]. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1994, 21 (3): 133-140
- [3] Xiong Daohua (熊道华). An analysis of the performance and the application of PE pipeline//Symposium for

- Trenchless Tech. [C]. Beijing, 2008
- [4] American Gas Association. Plastic piping data collection initiative status report [R]. Washington DC: PPDC, 2010
- [5] Kong Dehui (孔德辉). The current situation and analysis of development in polyethylene pipe for gas [J]. *Petrochemical Industry Technology* (石化技术), 2010 (3): 61-64
- [6] Sun Yongqing (孙永庆), Zhang Xiaoqing (张晓庆), Zhang Zheng (张峥), Zhong Qunpeng (钟群鹏). Present situation and developing strategy of risk assessment on gas pipeline in China [J]. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2004, 24 (5): 113-115
- [7] Zheng Jinyang (郑津洋), Shi Jianfeng (施建峰), Shi Jun (师俊), Xu Cheng (徐成), Rao Jing (饶静). Discussion about the effectiveness of the key testing contents of PE pipe in national standard//7th National Conference of Pressure Vessel Design [C]. Wuxi: Chinese Mechanical Engineering Society, 2010
- [8] Kim L J, Grigory S C. Exploratory research on infrared imaging for inspection of electrofusion joints in polyethylene gas pipe [R]. San Antonio: Southwest Research Institute, 1992
- [9] Crawford S L, Doctor Steven R, Cinson A D, Cumblidge S E, Anderson M T. Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion//ASME Pressure Vessels and Piping Conference [C]. Prague, Czech republic; American Society of Mechanical Engineers, 2009
- [10] Lever E. Design and pressure rating of PE fittings, stress concentrations, slow crack growth and the use of regression coefficients in material choice//Annual Technical Conference-ANTEC [C]. Boston, United States; Society of Plastics Engineers, 2005: 246-251
- [11] Zheng Jinyang (郑津洋), Qin Yongquan (秦永泉), Shi Jianfeng (施建峰), Xu Ping (徐平), Wang Fei (王菲), Guo Weican (郭伟灿). Automatic outer bead remover of polyethylene pipe [P]: CN, 200910098412. 2. 2009-05-07
- [12] Zheng Jinyang (郑津洋), Ding Shoubao (丁守宝), Guo Weican (郭伟灿), Shi Jianfeng (施建峰). Coupling focusing ultrasonic inspection method and devices for butt fusion joint of polyethylene pipes [P]: CN, 200810121786. 7. 2008-10-18
- [13] Wang Hui (王卉), Zheng Jinyang (郑津洋), Guo Weican (郭伟灿), Fang Xiaobin (方晓斌), Ding Liangyu (丁良玉), Kou Guanxiang (寇官祥), Hyeon Jae Shin, Shi Jianfeng (施建峰). Ultrasonic test for electrofusion joint of polyethylene pipe [J]. *Pressure Vessel Technology* (压力容器), 2007, 24 (5): 45-49
- [14] Guo Weican (郭伟灿), Zheng Jinyang (郑津洋), Liu Zhongqiang (刘仲强), Shi Jianfeng (施建峰), Ding Shoubao (丁守宝), Zuo Shangzhi (左尚志). Experimental investigation on coupling focusing ultrasonic technique for inspection of polyethylene butt-fusion joint//ASME Pressure Vessels and Piping Conference [C]. Bellevue, Washington, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2010
- [15] Zheng Jinyang (郑津洋), Ding Shoubao (丁守宝), Wang Hui (王卉), Guo Weican (郭伟灿). Ultrasonic inspection method for electrofusion joint containing cold welding [P]: CN, 200710069206. X. 2007-06-05
- [16] Shi Jianfeng, Zheng Jinyang, Guo Weican, Xu Ping, Qin Yongquan, Zuo Shangzhi. A model for predicting temperature of electrofusion joints for polyethylene pipes [J]. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 2009, 131 (6): 061403
- [17] Wang Fei (王菲), Li Guangzhong (李广忠), Shao Hanzeng (邵汉增), Shi Jianfeng (施建峰), Zheng Jinyang (郑津洋). Development of ultrasonic detection database of polyethylene pipe joints [J]. *China Plastics* (中国塑料), 2010 (6): 86-90
- [18] Shi Jianfeng (施建峰), Zheng Jinyang (郑津洋), Guo Weican (郭伟灿), Qin Yongquan (秦永泉). Defects classification and failure modes of electrofusion joint for connecting polyethylene pipes [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124 (5): 4070-4080