

# 管道补口粘接质量超声检测方法研究

宫清君 王维斌\*

国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司 河北省廊坊市 065000

**摘要:** 为应对管道补口热缩带剥离人工抽检效率低、人为因素影响大的问题,通过对现有管道粘接质量检测的方法和现有超声检测技术的研究,提出了一种管道补口粘接质量超声成像检测模型和超声检测方法,设计了超声检测的设备,加快了检测速度,实现了对管道粘接质量的定性分析。通过实验结果表明,本文提出的管道粘接质量超声检测方法能够对管道粘接质量进行定性分析。

**关键词:** 管道补口; 超声检测; 脱粘

## 1 引言

油气管网作为国家能源动脉,具有非常高的安全性要求。防腐为油气储运设备的关键式施工点之一,其质量直接影响管网安全。管道防腐补口的粘接质量是影响管道防腐性能的主要因素之一,而管道腐蚀可导致管道事故的发生。GB/T23257—2017《埋地钢质管道聚乙烯防腐层》规定,为保证补口质量,需对管道补口进行质量检验,其中剥离强度是补口质量检验的关键指标<sup>[1]</sup>。

目前,通用的补口检测方法<sup>[2]</sup>是破坏性手工剥离检测:先将防腐层沿环向划开宽20mm、长100mm左右的长条,并撬起一端,然后采用测力计以10mm/min的速率垂直钢管表面匀速拉起防腐层,并记录测力计稳定数值,由此得到剥离强度<sup>[3]</sup>。这种破坏性手工剥离检测方式为破坏性方式,检测后需进行修复,成本高、效率低。因此,对管道补口进行无损检测,有助于降本增效,进而提高补口质量,降低管道腐蚀可能性,保障油气管道安全。

### 1.1 粘接结构超声检测

目前,国内外针对管道补口粘接质量检测的研究尚处于起步阶段,但对于结构件粘接质量的无损检测则已成为研究重点,其中超声检测由于无损和高效等特点,成为粘接结构检测常用技术之一。

用于检测多层粘接结构的超声检测手段主要包括超声脉冲回波法、板波诱发波法、聚焦传感器双模式检测法等<sup>[4]</sup>。唐明州等采用脉冲回波法,选用窄脉冲宽频带单发单收超声换能器,对铝-镁合金层与橡胶层相粘接的试件进行了无损检测,结合小波分析技术,成功检测出试件中的脱粘

缺陷<sup>[5]</sup>;郭洪涛等利用板波诱发波法,成功地检测出各界面的胶接质量<sup>[6]</sup>;张吉堂等根据聚焦传感器双模式超声检测原理,通过粘接质量诊断图像判断机载固体火箭发动机双包覆层粘接质量<sup>[7]</sup>。由此可知,超声检测应用于管道补口检测是可行的,但目前缺乏针对管道补口热缩带的超声检测的相关研究。

### 1.2 信号处理技术

在粘接质量检测领域,由于粘接界面的特殊性,超声检测的直接结果很难反映粘接质量,需要通过合适的信号处理才能获得可靠的结果。目前,粘接质量检测中常用的信号处理技术主要包括小波变换、ANN、解卷积等技术。

高文清、张建生等使用人工神经网络模式识别的方法,对钢-橡胶多层粘接结构进行检测,成功识别了不同界面脱粘时的实验信号<sup>[8-9]</sup>。张建生、李明轩基于小波变换技术,处理钢-橡胶多层粘接结构的超声检测回波信号,由重构出的脱粘界面时域和频域特征信号中提取出了小波特征参数,很好地实现了界面脱粘的定征和识别<sup>[10]</sup>。张建生、李明轩利用同态滤波解卷积的信号处理技术,对层状粘接结构的超声检测信号进行了分析,实现了脱粘界面的定征与识别<sup>[11]</sup>。

可以看到,在界面之间粘连层的超声回波信号,在通过信号处理、特征标定与模型识别后,才能够实现对存在缺陷的识别。

### 1.3 创新点

近年来,我国油气管道建设快速发展,管道补口粘接质量的检测工作量越来越大。虽说目前已经有许多关于不同界面粘接状态检测的研究,但是由于该项技术应用于油气管

道的特殊性，本文如下创新点：

(1) 本文通过对目前存在的异界面超声检测技术进行了深入调研，提出了一种用于补口粘接质量超声成像的检测模型，根据模型与实际检测数据，可对管道缺陷进行定性分析。

(2) 基于以上理论，进行了实验对象、设备和实验方法的设计，并进行了超声检测实验，实验结果表明，通过超声检测的方法，可以对管道粘结质量进行定性分析。

## 2. 管道补口粘接超声检测模型建立

### 2.1 正常粘接的模型

首先超声信号垂直入射，其后对回波信号进行相位分析，可得到背粘接质量影响的超声信号。具体来看，如图1所示，探头激发超声信号，信号在耦合剂中传播，后到达界面1，导致反射回波信号的产生。同时，信号也经过界面1透射，产生信号。信号在热收缩带中传播一定距离后到达界面2，引发了反射回波信号，同时透射形成信号。信号在钢管中传播一段距离后到达界面3，产生反射回波信号，并同时形成信号。在这个过程中，我们假设界面1、2和3的反射系数分别为、和，而耦合剂、热收缩带、钢管和空气的声阻抗分别为、和。通过这些参数代入公式(2.1)，我们可以建立一个理论模型，用于描述正常粘接的情况。这个模型将有助于我们分析回波信号的特性，从而评估粘接的质量。

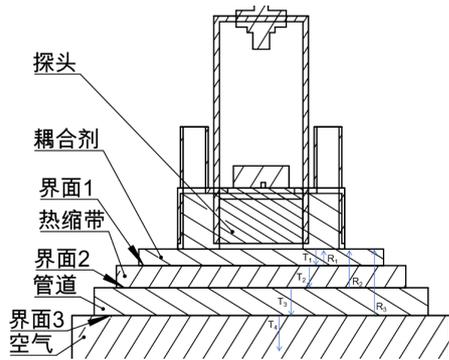


图1 管道补口防腐层结构示意图

$$\begin{cases} P_{R_1} = K_1^2 \gamma_1 P_{T_1} \\ P_{R_2} = K_1^2 K_2^2 \gamma_2 (1 - \gamma_1^2) P_{T_1} \\ P_{R_3} = K_1^2 K_2^2 K_3^2 \gamma_3 (1 - \gamma_1^2) (1 - \gamma_2^2) P_{T_1} \end{cases} \quad (2.1)$$

式中： $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  分别为耦合剂层、热收缩带层和管道层的衰减常数， $K = e^{-\alpha L}$ 。

### 2.2 存在粘接问题的模型

当补口中存在脱粘或夹层等缺陷时，具体情况如图2

所示。

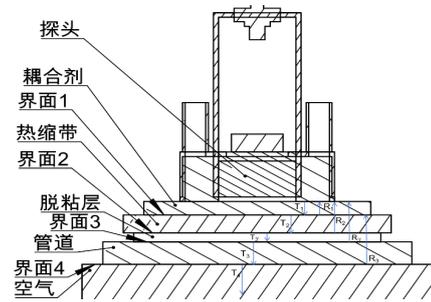


图2 管道补口防腐层结构示意图

在这种情况下，其他过程与未脱粘类似，不同的是，透射形成管道补口信号  $T_3'$  在脱粘层中传播一段距离后到达界面3'，产生反射回波信号  $R_3'$ ，同时透射生成信号  $T_3'$ 。

在这个过程中，我们考虑了界面2'和3'的反射系数分别为  $\gamma_2'$  和  $\gamma_3'$ ，并引入了缺陷层的声阻抗  $Z_3'$  以及衰减系数  $K_3'$ 。通过推导各个界面回波的声压公式，可以建立一个超声波理论模型，如公式(2.2)。

$$\begin{cases} P_{R_1} = K_1^2 \gamma_1 P_{T_1} \\ P_{R_2'} = K_1^2 K_2^2 \gamma_2' (1 - \gamma_1^2) P_{T_1} \\ P_{R_3'} = K_1^2 K_2^2 K_3'^2 \gamma_3' (1 - \gamma_1^2) (1 - \gamma_2'^2) P_{T_1} \\ P_{R_3} = K_1^2 K_2^2 K_3^2 K_3'^2 \gamma_3 (1 - \gamma_1^2) (1 - \gamma_2'^2) (1 - \gamma_3'^2) P_{T_1} \end{cases} \quad (2.2)$$

## 3. 超声探头设计

### 3.1 超声探头设计

本研究设计的探头检测探头为纵波水膜探头，主要包括：压电片、水口、耐磨壳、水膜层、延迟块、插接头和外壳七部分组成。其结构图如图3所示。

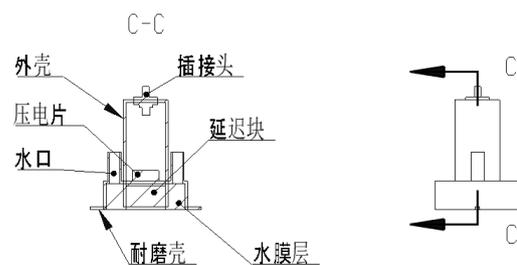


图3 超声探头结构图

管道热收缩套补口质量检测原理机探头矩阵设计安装探头32个，每个探头检测范围10mm，这样矩阵有效检测为80mm，探头为阵列排开。检测探头和探头装配后的情形如图4。

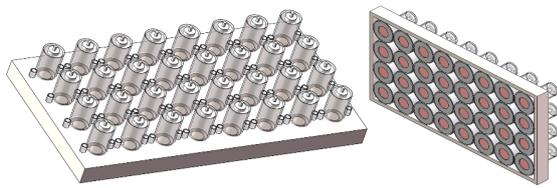


图4 探头阵列

## 4. 超声检测实验

### 4.1 实验对象

本研究的实验对象为带防腐层的钢板共 30 块，热缩带防腐层厚度约为 3mm，钢板厚度约 10mm，如图 5 所示。

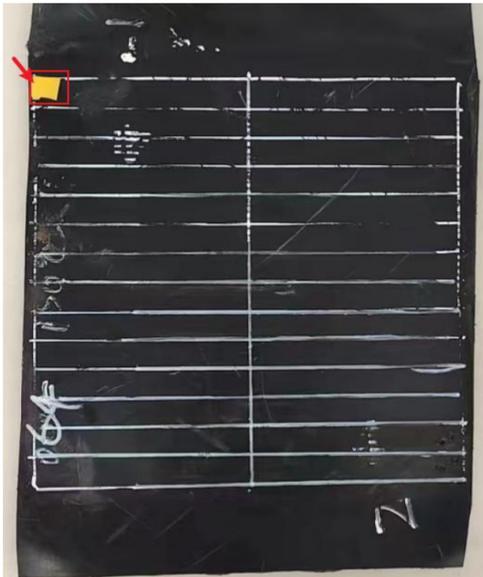


图5 带防腐层的钢板

### 4.2 实验设备

为了保证检测精度和效率，来更准确的评估管道粘结质量，本次实验选择 Multiscan 独立多通道超声检测板卡，采用了水浸自动化检测系统。原因在于水作为声波传播的优越介质，具有多重有益特性。首先，水有助于降低声波的反射，增加声波的穿透深度，因此更容易检测到深层或较小的缺陷。此外，水具有与大多数材料的声阻抗相匹配，这有助于降低传感器和探头的磨损，延长其使用寿命。此外，与其他耦合方法不同，水浸系统无需额外的表面涂覆或耦合剂，使得实验更加便捷和高效。

### 4.3 实验过程

基于前两小节中提到的实验设备与材料，本文进行了平板-橡胶层粘结强度超声检测实验。实验流程如图 6 所示，具体实验步骤如下：

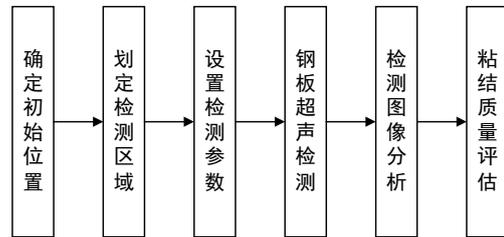


图6 超声检测实验流程

(1) 确定初始位置。部分钢板表面状态差，有鼓包、内凹、褶皱等情况，为了便于待测钢板与图像位置对应，在待测钢板表面贴有胶带做标记。

(2) 划定检测区域。在钢板的防腐层上划定一个大小为的区域，并在区域内划分去宽度为 2cm 的条形区域，用来当作探头移动路径。

(3) 设置检测参数。设置钢板底面波幅为 80%，扫查分辨率 1mm，分布分辨率 5mm。

(4) 将实验探头按照划定区域移动，进行超声检测实验并通过软件记录实验结果。

(5) 超声检测图像分析。对于每块钢板的超声图像，分析检测到的各种特征、缺陷的位置和形状。这些特征可能包括反射、散射和干扰信号的性质。特别关注那些在图像中显示出的粘结缺陷，以便定量评估它们的粘结质量。

(6) 粘结质量评估。通过对比粘结正常和粘结较差的钢板超声检测图像，进行粘结质量的定量评估。

### 4.4 实验结果

通过对带防腐层的钢板进行超声检测，得到了每块钢板的超声图像，图 7 和图 8 分别为粘结正常和粘结较差的图像。图中左下角的波形图里，从左开始第一个波峰为水-热缩带界面信号，左二为位热缩带内部结构信号，左三为热缩带-钢结合层信号，左四为钢底波信号。

### 4.5 实验分析

通过图 7 和图 8 的超声图像的对比，可以发现粘结较差的钢板中，钢底波信号会弱一些。通过以上检测结果可知工件表面状态对扫查的结果有一定的影响。因探头聚焦不在结合层处，故在底波降低处，结合层的回波未有明显升高。本文还对比进行了 C 扫成像实验，步进分辨率调整为 1mm、3mm 和 5mm，从 C 扫成像上看与上述结果基本相同。

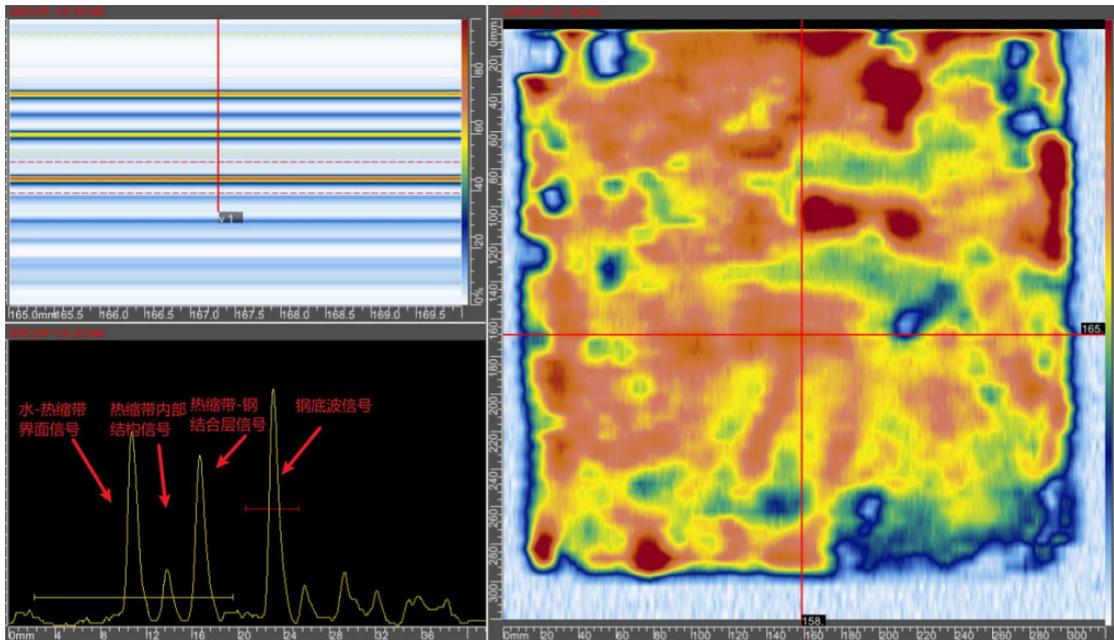


图 7 粘结正常的钢板超声图像

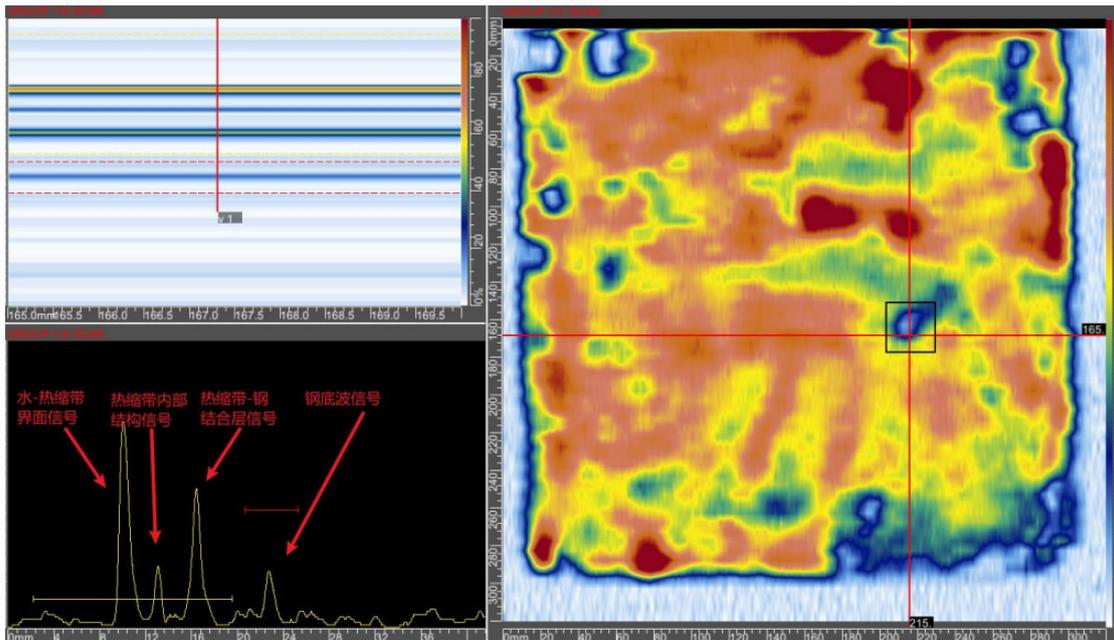


图 8 粘结较差的钢板超声图像

## 5. 总结与展望

### 5.1 总结

本研究通过对现有管道粘结质量检测的方法和现有异界面超声检测技术的研究，提出了一种管道补口粘接质量超声成像检测模型，该模型结合实际检测数据，能够进行管道缺陷的定性分析。本研究设计了超声检测的设备，进一步提

高了检测的灵敏度和缺陷分辨率，使检测图像更加清晰，同时也加快了检测速度，为管道维护 and 安全管理提供了有力支持。

### 5.2 展望

尽管本研究在管道粘结质量超声检测领域取得了显著的进展，但仍有一些未来的研究方向和潜在的改进空间需要

进一步探索:

(1) 多模态融合技术: 未来的研究可以探索将超声检测与其他成像技术, 如热成像、射线成像、超声曲线等相结合, 以提高检测的全面性和准确性。

(2) 智能化分析: 利用人工智能和机器学习技术, 可以开发智能化的管道缺陷分析工具, 帮助运维人员更快速地识别问题并采取必要的措施。

(3) 实际应用与标准化: 将本研究的成果与实际工程应用相结合, 并推动相关的标准制定, 以确保该技术在工程实践中的可行性和可靠性。

(4) 材料研究: 进一步研究不同管道材料对超声检测的影响, 以适应各种工程环境和材料特性。

总之, 管道粘结质量超声检测方法的研究具有重要的工程应用前景, 进一步的研究将继续推动该领域的发展, 以满足不断增长的工程需求。

#### 参考文献:

[1] 王维斌, 周海鹏, 康叶伟, 等. 管道补口热收缩带粘接质量的超声检测方法 [J]. 油气储运, 2014, 33(06): 643-647. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2014.06.016

[2] 张良, 蔡克, 莫子雄等. 温度对油气管道外防腐层性能的影响规律研究 [J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(01): 46-48. DOI:10.19459/j.cnki.61-1500/te.2019.01.011.

[3] 刘清松, 王维斌, 王立君等. 管道补口防腐层粘接处超声检测信号相位分析 [J]. 无损检测, 2015, 37(06): 53-56.

[4] 姬保平. 金属层合板复合质量激光超声检测方法研究 [D]. 北京科技大学, 2022. DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2022.000043.

[5] 唐明州, 张记龙. 粘接结构超声信号的小波分解与特征提取 [J]. 测试技术学报, 2003(04): 363-366.

[6] 郭洪涛, 曹付齐. 固体火箭发动机装药界面胶接质量超声波检测 [J]. 航空兵器, 2006(06): 49-52. DOI:10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2006.06.014.

[7] 张吉堂, 路宏年, 曹付齐. 固体火箭发动机多层粘接结构超声图像诊断 [J]. 推进技术, 2008(01): 13-17. DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.2008.01.020.

[8] 高文清, 陈东辉. 采用人工神经网络 BP 对钢-橡胶分层粘接界面的超声检测实验 [J]. 粘接, 2022, 49(11): 10-15.

[9] 张建生, 李明轩. 多层粘接结构中脱粘界面的人工神经网络余弦变换谱特征识别 [J]. 声学学报, 2001(04): 349-354. DOI:10.15949/j.cnki.0371-0025.2001.04.011.

[10] 张建生, 李明轩. 脱粘界面超声检测信号的小波多分辨率分析与重构 [J]. 声学学报, 2001(03): 231-238. DOI:10.15949/j.cnki.0371-0025.2001.03.008.

[11] 张建生, 李明轩. 层状粘接结构超声检测信号的同态解卷积脱粘界面定征 [J]. 应用声学, 2001(01): 23-29.

#### 基金项目:

国家管网集团定向委托项目“建设期管道检测技术研究与应用”, SJSJG202203。

#### 作者简介:

王维斌 (1972-), 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事管道腐蚀检测监测和腐蚀大数据与智能化技术研究工作。

宫清君 (1986-), 博士研究生, 工程师, 主要从事管道腐蚀检测监测和腐蚀大数据与智能化技术研究工作。