

在役压力管道的超声检测技术综述

王 姬

枣庄市特种设备检验研究院 山东 枣庄 277800

摘 要：在役压力管道作为工业生产中的关键设施，其安全性至关重要。超声检测技术以其非破坏性、高精度和高效性成为管道检测的重要手段。本文综述了当前在役压力管道超声检测技术的最新进展，包括超声导波检测技术、衍射时差法超声检测技术（TOFD）、超声相控阵检测技术等。这些技术各具优势，能够实现对管道内部缺陷的精确检测与定位，为管道的安全运行提供了有力保障。

关键词：在役压力管道；超声检测技术；无损检测

1 在役压力管道超声检测技术基础

1.1 超声波检测原理

超声波探伤的基石在于超声波在媒介中的传播行为。面对声阻抗差异的界面，超声波会产生反射、折射及散射现象。在运营中的压力管道超声探伤中，该机理被应用：特定手段将声源所生成的超声波导入待测管道内部。若管道内存在有瑕疵，例如裂痕、锈蚀或杂质，它们与管道材质间会构成声阻抗不同的界面。超声波触及此类界面后，会引发反射，反射回的超声讯号随后被捕获。解析这些捕获的超声讯号，可断定管道内部瑕疵的存在与否，以及其位置、尺寸与特性。

1.2 超声检测设备的构成与功能

超声检测设备是用于评估材料内部缺陷的重要工具，其构成主要包括控制装置、脉冲发生器、探头、放大器、评估模块和输出模块。控制装置；是整个设备的指挥中心，负责协调各部件的工作流程，决定检测周期的次序。脉冲发生器；负责产生电脉冲信号，这些信号将激发探头的机械振荡，从而产生超声波。探头；能够将电脉冲转化为机械振荡，并将声波传播到被检测的材料中。它也能将反射回来的声波信号转化为电脉冲，供后续处理使用^[1]。放大器；对探头接收到的微弱信号进行放大和过滤，以便更好地进行后续处理和评估。评估模块；负责对接收到的信号进行处理和解析，以提取有关材料性质的信息，并将结果以易于理解的方式呈现给用户。输出模块；负责将处理后的数据以适当的形式呈现给用户，例如在屏幕上显示、打印或存储为文件。这些部件协同工作，实现了超声波的发射、接收、放大、处理和评估等功能，从而完成对管道内部缺陷的检测。

2 超声检测技术在压力管道检测中的重要性

超声检测技术在压力管道检测中具有极其重要的地位，主要体现在以下几个方面：第一，非破坏性检测。

超声波检测不会对管道造成损伤，保证了管道的正常使用和安全性。第二，检测精度高。能够准确检测出管道壁的厚度、内部缺陷、裂纹等问题，具有高精度的检测效果。第三，检测速度快。能够快速检测出管道问题，提高工作效率，节省维护成本。第四，提高管道安全性和可靠性。通过及时发现并修复管道中的缺陷，可以显著提高管道的安全性和可靠性，延长管道的使用寿命。

3 在役压力管道超声检测技术进展

3.1 超声导波检测技术

超声引导波探测技术标志着近年来在役压力管道超声检测领域的重大进步。该技术利用介质边界条件约束下传播的超声引导波，其行进方向与介质边界保持平行。相较于传统超声波技术，超声引导波技术展现了显著优势。引导波在整个介质厚度内激发质点振动，具备低衰减率、长传播距离及宽广声场覆盖能力，尤其契合长距离管道的检测需求。其技术精髓在于引导波沿管壁传播时的特性分析。当波遇到管壁横截面变异点（诸如缺陷）时，会生成反射信号，该信号强度与横截面总变化量直接相关。通过分析此反射信号，可精确诊断管道的特征与状况。此技术不仅限于检测管道内部缺陷，还能评估管道壁厚及腐蚀程度。超声引导波检测系统构成包括检测传感器、主机与控制计算机。常用的传感器类型涵盖压电式、电磁式以及脉冲激光式，它们能精准发射并接收超声引导波信号，确保对管道的全面无遗漏检测。超声导波检测技术的适用范围广泛，可用于埋地管道、穿跨越管道、穿路套管、穿越围墙管段、直管段以及各种支架下的管道、架空工程管道、低温工程管道等的缺陷检测。该技术还可用于防腐层下腐蚀检测，只需清除很小范围的绝缘层，大大提高了检测效率。

3.2 衍射时差法超声检测技术（TOFD）

衍射时差法超声检测技术（TOFD）是另一种在役压

力管道超声检测中的重要进展。TOFD技术利用从待试件内部结构（主要是缺陷）的“端角”和“端点”处得到的衍射能量来检测缺陷。该技术通过一发一收两个宽带窄脉冲探头进行检测，探头相对于焊缝中心线对称布置。发射探头产生非聚焦纵波波束以一定角度入射到被检工件中，其中部分波束沿近表面传播被接收探头接收，部分波束经底面反射后被探头接收^[2]。接收探头通过接收缺陷尖端的衍射信号及其时差来确定缺陷的位置和自身高度。TOFD技术具有多个显著优点。首先，它能够实现非常高的检测速度，一次扫查几乎能够覆盖整个焊缝区域（除上下表面盲区）。其次，TOFD技术具有很高的可靠性，对于焊缝中部缺陷的检出率很高。另外，该技术能够发现各种类型的缺陷，对缺陷的走向不敏感，并且可以采用D-扫描成像，使缺陷判读更加直观。TOFD技术对缺陷垂直方向的定量和定位也非常准确，精度误差小于1mm。

3.3 超声相控阵检测技术

超声相控阵检测技术是近年来在役压力管道超声检测领域的又一重要进展。该技术的基本思想来自于雷达电磁波相控阵技术，通过控制阵列天线中各单元的幅度和相位，调整电磁波的辐射方向，实现灵活快速的聚焦扫描。超声相控阵技术将这一思想应用于超声检测中，通过控制多个独立的压电晶片的激发时序和幅度，来调节控制焦点的位置和聚焦的方向。超声相控阵检测技术的核心在于相控阵探头的设计和应用。相控阵探头由多个压电晶片按一定的规律分布排列组成，能够逐次按预先规定的延迟时间激发各个晶片。所有晶片发射的超声波形成一个整体波阵面，能够有效地控制发射超声束的形状和方向。这使得超声相控阵技术能够实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦，为确定不连续性的形状、大小和方向提供更大的能力。超声相控阵检测技术在役压力管道检测中具有显著优势。首先，它能够实现对焊接接头的全体积检测，无需像普通单探头那样在焊缝两侧频繁地来回移动。其次，超声相控阵技术能够采用机械扫描和电子扫描相结合的方法来实现图像成像，提高检测效率和准确性。另外，该技术还能够对复杂几何形状的管道进行检测，并实现对缺陷的精确定位和定量。

3.4 其他新型超声检测技术

除了超声导波检测技术、衍射时差法超声检测技术和超声相控阵检测技术外，还有其他一些新型超声检测技术在役压力管道检测领域也取得了显著进展。其中，激光超声检测技术是一种利用激光束激发和接收超声波的新型检测技术。该技术通过激光束照射管道表面产生

热弹性效应来激发超声波，并通过接收反射回来的超声波信号来评估管道内部的状态。激光超声检测技术具有非接触式检测、高精度和高灵敏度等优点，特别适用于对高温、高压或腐蚀性环境下的管道进行检测。该技术对设备的要求较高，成本也相对较高。另一种新型超声检测技术是电磁超声C扫描检测技术。该技术利用电磁场与超声波的相互作用原理来检测管道内部的缺陷。通过在被测管道上施加交变电磁场，激励出超声波并在管道内部传播。当超声波遇到缺陷时会产生反射或散射信号，这些信号被接收并转化为电信号进行分析和处理。电磁超声C扫描检测技术具有检测速度快、检测面积大、对管道表面要求低等优点。然而该技术对电磁场的控制和超声波的激发与接收需要精确控制，对设备的精度和稳定性要求较高。全自动超声波检测技术（AUT）也是近年来在役压力管道检测领域取得重要进展的一种新型检测技术。该技术通过自动化设备和先进的算法实现对管道内部缺陷的快速、准确检测。AUT技术能够自动扫描管道表面并采集超声波信号，通过算法处理和分析这些信号来评估管道内部的状态。该技术具有检测效率高、准确性高、对操作人员技能要求低等优点。然而，全自动超声波检测技术对设备的精度和稳定性要求较高，且对于复杂几何形状的管道检测可能存在一定挑战。这些新型超声检测技术的出现和发展为在役压力管道检测提供了更多的选择和可能性。它们各自具有独特的优势和局限性，在实际应用中需要根据管道的具体情况和检测需求进行选择和优化。

4 在役压力管道超声检测技术的实际应用

在役压力管道超声检测技术在工业领域具有广泛的应用，是确保管道安全运行的关键手段之一。以石化行业为例，由于石化装置中的管道系统复杂且庞大，管道内部往往承载着高温、高压、易燃易爆或有毒有害的介质。因此对管道进行定期、高效的检测至关重要。超声检测技术凭借其非破坏性、高精度和适应性强的特点，在这一领域发挥着不可替代的作用^[3]。在实际应用中，技术人员会根据管道的具体情况和检测需求选择合适的超声检测技术。该技术能够快速检测管道内部的腐蚀、裂纹等缺陷，及时发现潜在的安全隐患。而对于焊接接头等关键部位，衍射时差法超声检测技术（TOFD）和超声相控阵检测技术则因其对缺陷的高检出率和精确定位能力而受到青睐。这些技术能够准确评估焊接接头的质量，确保管道的强度和密封性。随着技术的不断进步，一些新型超声检测技术也逐渐应用于在役压力管道检测中。而电磁超声C扫描检测技术和全自动超声波检测技术

则因其检测速度快、面积大和对操作人员技能要求低等优势，在大型石化装置中的管道检测中发挥着越来越重要的作用。

5 在役压力管道超声检测技术的发展趋势

5.1 数字化、自动化与智能化的发展

在役压力管道超声检测技术正朝着数字化、自动化与智能化的方向快速发展。随着信息技术的不断进步，超声检测设备的数字化程度越来越高，数据采集、处理和分析过程变得更加高效和准确。数字化技术使得超声检测数据能够以电子形式存储和传输，便于数据的远程访问和共享，提高了检测工作的协同效率和数据管理的便捷性。自动化技术的发展进一步提升了超声检测的效率和质量。通过引入自动化扫描系统和机器人技术，可以实现对管道的大面积、高效率检测，减少人工操作的依赖，降低人为误差。自动化检测还能够实现对复杂几何形状管道的精确检测，提高检测的全面性和准确性。智能化技术的发展为超声检测带来了革命性的变革，通过引入人工智能和机器学习算法，可以对超声检测数据进行智能分析和处理，实现对缺陷的自动识别和分类。这不仅提高检测的准确性，还大大缩短检测周期，降低了检测成本。未来，随着智能化技术的不断成熟和应用，超声检测将实现更加高效、精确的管道检测，为工业生产的安全和稳定提供更加可靠的保障。

5.2 多传感器融合与数据融合技术的应用

多传感器融合与数据融合技术在在役压力管道超声检测中的应用日益广泛。传统的超声检测技术往往依赖于单一的传感器进行数据采集，这可能导致检测结果的局限性。而多传感器融合技术通过结合多个不同类型或不同位置的传感器，能够实现对管道内部缺陷的全方位、多角度检测，提高检测的全面性和准确性。数据融合技术则通过对来自多个传感器的数据进行综合处理和分析，实现对缺陷的更加精确识别和定位。通过融合不同传感器提供的信息，可以消除单一传感器可能存在的误差和不确定性，提高检测结果的可靠性和稳定性^[4]。未来，随着多传感器融合与数据融合技术的不断发展，超

声检测将能够实现更加精细、全面的管道检测，为管道的安全运行提供更加有力的支持。

5.3 远程监测与诊断技术的发展

远程监测与诊断技术在在役压力管道超声检测领域也呈现出快速发展的趋势。通过引入物联网、云计算和大数据等技术，可以实现对管道检测数据的远程实时采集、传输和处理。这使得技术人员能够在远离现场的情况下对管道进行检测和分析，大大提高了检测工作的灵活性和效率。远程监测与诊断技术还能够实现对管道运行状态的实时监测和预警。通过对检测数据的实时分析，可以及时发现管道的异常情况和潜在安全隐患，为管道的维护和修复提供及时、准确的信息支持。远程监测与诊断技术还能够实现检测数据的云端存储和共享，便于不同部门之间的协同工作和数据交流。未来，随着远程监测与诊断技术的不断完善和应用，超声检测将能够实现更加高效、便捷的管道检测和维护，为工业生产的安全和稳定提供更加全面的保障。

结束语

综上所述，在役压力管道的超声检测技术正处于快速发展阶段。随着新型检测技术的不断涌现和检测设备的不断更新，超声检测在管道检测领域的应用将越来越广泛。未来，超声检测技术将朝着更加智能化、自动化的方向发展，为工业生产的安全和稳定提供更加可靠的技术支持。

参考文献

- [1] 薛建虹,黎宇,孙杰,邱浩楠.在役油气管道超声导波腐蚀检测技术应用[J].石油化工腐蚀与防护,2021,38(01):29-32.
- [2] 吴志平,陈振华,戴联双,胡亚博,毕武喜.油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J].油气储运,2020,39(08):851-860.
- [3] 刘金东.超声导波检测在压力管道检验中的应用[J].石油石化物资采购,2021(14):61-62.
- [4] 李继承,杨宁祥.高温压力管道壁厚在线监测技术研究[J].中国化工贸易,2021(7):65-66.