

高温环境下压力容器与管道在线超声波检测技术研究

赵 诚 杜佳男（浙江省特种设备科学研究院，浙江 杭州 310020）

摘 要：压力容器与管道在高温高压的工作条件下，容易出现一些缺陷，这些缺陷的及时发现和处理对于预防事故具有重要意义。传统的检测方法往往需要在设备停机状态下进行，这不仅影响生产效率，而且可能错过缺陷的早期发现时机。在线超声波检测技术能够在设备运行状态下进行实时监测，对于提高检测效率和准确性具有显著优势。基于此，以下对高温环境下压力容器与管道在线超声波检测技术进行了探讨，以供参考。

关键词：高温环境；压力容器与管道；在线超声波检测技术；研究

0 引言

随着工业技术的不断进步，压力容器与管道在各行业的应用日益广泛，它们的安全运行直接关系到生产安全和人员健康。在高温环境下，压力容器与管道的材料性能会发生变化，传统的离线检测方法难以满足实时监控的需求。因此，开发一种能够在高温环境下对压力容器与管道进行在线检测的技术显得尤为重要。超声波检测技术因其非破坏性、高灵敏度和实时性等特点，成为研究的热点。

1 在线超声波检测技术的原理

在线超声波检测技术是一种利用超声波在材料中传播的特性来检测材料内部缺陷或结构变化的无损检测方法。其基本原理是发射超声波脉冲进入被检测材料，当超声波遇到材料内部的缺陷（如裂纹、气孔、夹杂物等）或界面（如材料与空气的界面）时，部分超声波会被反射回来，形成回波。通过接收和分析这些回波，可以确定缺陷的位置、大小和形状等信息。具体来说，在线超声波检测技术通常包括以下几个步骤：

1.1 发射超声波

使用超声波探头发射高频电脉冲，这些电脉冲通过压电效应转换为超声波脉冲，并进入被检测材料。

1.2 接收回波

当超声波在材料中传播遇到缺陷或界面时，部分超声波会被反射回来，这些反射波被同一探头或另一个探头接收。

1.3 信号处理

接收到的回波信号经过放大和滤波等处理，以提高信噪比，便于后续分析。

1.4 数据分析

通过分析回波信号的时间延迟和幅度变化，可以确定缺陷的深度和大小。现代检测系统通常配备有先

进的信号处理软件，能够自动识别和分类缺陷。在线超声波检测技术的优势在于其非破坏性、实时性和高灵敏度，能够在不中断生产过程的情况下对压力容器与管道进行连续监测。如图 1 所示。



图 1 在线超声波检测技术原理

2 高温环境下压力容器与管道在线超声波检测技术的应用原则

2.1 温度适应性原则

在高温环境下进行压力容器与管道的在线超声波检测，首要原则是确保检测技术的温度适应性。这意味着所选用的超声波检测设备、材料和技术方案必须能够在高温条件下稳定工作，不会因温度升高而导致性能下降或损坏。为此，应选择耐高温的超声波探头材料，如特殊合金或复合材料，这些材料在高温下仍能保持良好的压电效应和机械强度。同时，电子元件和信号处理系统也应具备高温特性，通过特殊封装和散热设计来提高其耐高温性能。此外，检测设备的设计应考虑到高温环境下的热膨胀和热应力问题，确保

设备在高温下的结构稳定性和可靠性。通过这些措施，可以确保超声波检测技术在高温环境下的有效应用，为压力容器与管道的安全运行提供可靠的检测保障。

2.2 安全防护原则

在高温环境下进行压力容器与管道的在线超声波检测，安全防护原则至关重要。操作人员必须接受专业的安全培训，熟悉高温环境下的操作规程和应急措施，以防止意外事故的发生。应配备必要的个人防护装备，如耐高温的防护服、手套、面罩和安全鞋，以保护操作人员免受高温和潜在化学物质的伤害。检测设备的设计和使用应符合相关的安全标准和规范，确保设备在高温环境下的电气安全和机械安全。在检测过程中，还应实施严格的安全监控和管理，对可能的安全风险进行评估和控制，确保检测工作的安全进行。通过这些安全防护措施，可以最大限度地降低高温环境下超声波检测操作的风险，保障人员和设备的安全。

2.3 精确检测原则

在高温环境下进行压力容器与管道的在线超声波检测，精确检测原则是保证检测结果准确可靠的关键。应选用高精度的超声波检测设备，确保在高温环境下仍能准确捕捉到微弱的超声波信号。通过优化信号的采集与处理过程，采用先进的信号处理算法，如自适应滤波、小波变换等，可以有效去除噪声，提高信号的清晰度和可识别性。利用模式识别和机器学习技术，可以对信号进行智能分析，自动识别和分类不同的缺陷类型，提高检测的准确性和效率。在检测过程中，还应考虑到高温环境下信号传播特性的变化，对检测参数和算法进行针对性的优化和调整。

3 环境下超声波检测技术面临的问题

3.1 高温对超声波探头材料的影响

在高温环境下，超声波探头材料可能会经历热膨胀、热应力以及化学反应等变化，这些变化会直接影响探头的性能和寿命。热膨胀可能导致探头与被检测材料之间的接触不良，从而影响超声波的传输效率和信号的接收质量。持续的高温作用下，探头材料可能会发生结构变化，如晶格畸变或相变，这会降低其压电性能，导致超声波的发射和接收效率下降。高温还可能引发材料的氧化或腐蚀，进一步损害探头的功能。这些因素共同作用，可能导致检测信号的失真或丢失，从而影响缺陷的准确检测和评估。

3.2 高温对超声波传播特性的影响

高温环境下，材料的声速会发生变化，这会直接

影响超声波的传播路径和时间。声速的变化可能导致传统的检测参数（如传播时间、波形等）不再适用，从而影响缺陷定位的准确性。此外，高温还可能改变材料的衰减特性，使得超声波在材料中的传播距离缩短，信号强度减弱，这会降低检测的灵敏度和分辨率。在极端情况下，高温甚至可能导致超声波的完全衰减，使得检测无法进行。这些传播特性的变化会使得缺陷的检测和评估变得更加困难，增加了误判和漏检的风险。

3.3 高温对电子元件和信号处理系统的影响

高温对电子元件和信号处理系统的影响同样不容忽视。在高温环境下，电子元件的性能可能会下降，如集成电路的运行速度变慢，电阻器的阻值变化，电容器的容量漂移等，这些都会影响信号处理系统的稳定性和准确性。高温还可能导致电子元件的寿命缩短，增加故障率，从而影响检测系统的可靠性和连续工作能力。信号处理系统的性能下降会直接影响检测结果的解释和分析，可能导致错误的缺陷判断，甚至引发安全事故。

4 高温环境下超声波检测技术的优化策略

4.1 开发耐高温的超声波探头材料

在高温环境下进行超声波检测，探头材料的耐高温性能是关键。目前，大多数超声波探头使用的材料如压电陶瓷在高温下性能会显著下降，导致检测精度降低。因此，开发新型耐高温材料是优化超声波检测技术的重要方向。可以考虑使用高温合金作为探头材料，这些合金通常具有良好的热稳定性和机械强度，能够在极端温度下保持结构完整。例如，镍基或钴基高温合金，它们在高温下仍能保持较好的物理和化学稳定性。

探索新型复合材料也是一个有效途径。例如，将陶瓷材料与金属材料结合，形成具有优异热稳定性和电性能的复合材料。这种材料不仅能够承受高温，还能保持良好的压电效应，确保超声波的有效发射和接收。表面涂层技术也可以用来提高探头的耐高温性能。通过在探头表面涂覆一层耐高温的涂层，如陶瓷涂层或金属氧化物涂层，可以有效隔离高温环境对探头内部材料的影响，延长探头的使用寿命。

4.2 优化超声波信号处理算法

可以采用先进的滤波技术来减少噪声的影响。例如，使用自适应滤波器，这种滤波器能够根据信号的特性自动调整参数，有效去除与信号频率不匹配的噪

声。小波变换等时频分析方法也可以用来分离和去除噪声，保留有用的信号成分。信号增强技术也是提高信号质量的有效手段。通过使用峰值检测、信号平均等方法，可以在保持信号特征的同时，增强信号的强度，提高信噪比。这些技术特别适用于重复性检测场景，可以通过多次测量取平均来减少随机噪声的影响。模式识别和机器学习算法在超声波信号处理中的应用也越来越广泛。

这些算法可以用来识别和分类信号中的不同模式，从而实现对复杂信号的自动分析和解释。例如，支持向量机（SVM）和神经网络等机器学习模型可以用来训练识别特定缺陷类型的信号模式，提高检测的智能化水平。考虑到高温环境下信号传播特性的变化，需要对信号处理算法进行针对性的优化。这可能包括对传播路径的建模，以及对信号衰减和散射效应的补偿。

4.3 提高电子元件和信号处理系统的耐高温性能

提高这些组件的耐高温性能是优化超声波检测技术的关键环节。选择或开发能够在高温环境下稳定工作的电子元件是基础。这包括使用高温半导体材料，如碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN），这些材料具有更高的热稳定性和更低的导热率，能够在极端温度下保持良好的电性能。采用高温封装技术，如陶瓷封装，可以保护电子元件免受高温和化学腐蚀的影响。信号处理系统的设计也需要考虑高温环境的影响。这可能涉及到使用高温 tolerant 的集成电路（IC）和专用的高温处理器。

同时，系统的热管理也是关键，通过合理设计散热结构和使用高效的散热材料，如石墨烯或金属基复合材料，可以有效降低系统的工作温度，延长其使用寿命。软件层面的优化也不可忽视。通过开发能够在高温环境下稳定运行的操作系统和管理软件，可以确保信号处理系统的可靠运行。这可能包括对软件算法的优化，以适应高温环境下可能出现的计算延迟和数据丢失问题。进行严格的高温测试和验证是确保系统耐高温性能的关键步骤。

4.4 实施严格的质量控制与安全管理

质量控制方面，应建立一套完整的检测标准和流程，确保每一环节都符合行业规范和标准要求。这包括对检测设备进行定期的校准和维护，确保其性能稳定可靠；对检测数据进行严格的审核和分析，确保检测结果的准确性；以及对检测人员进行专业培训，提

高其操作技能和质量意识。在安全管理方面，应制定详细的安全操作规程和应急预案，确保在高温环境下操作人员的安全。

这包括提供必要的个人防护装备，如耐高温的防护服、手套和面罩，以保护操作人员免受高温和潜在化学物质的伤害；实施现场安全监控，对可能的安全风险进行实时评估和控制；以及定期进行安全演练，提高操作人员应对突发事件的能力。还应建立健全的安全管理体系，包括安全责任制度、安全检查制度和安全教育培训制度，确保每个环节都有明确的安全责任人和安全措施。通过这些严格的质量控制与安全管理措施，可以最大限度地降低高温环境下超声波检测操作的风险，保障人员和设备的安全，同时确保检测结果的准确性和可靠性。

5 结束语

高温环境下压力容器与管道的在线超声波检测技术是一项具有挑战性的研究课题。对现有技术的分析和总结，我们认识到在多方面仍有许多技术难题需要克服。未来的研究应致力于开发更加耐高温的探头材料，优化信号处理算法，提高数据分析的准确性，以及实现检测技术的智能化和自动化。随着这些关键技术的突破，高温环境下压力容器与管道的在线超声波检测技术将更加成熟，为工业生产的安全运行提供强有力的技术支持。我们期待这一领域的研究能够不断取得新的进展，为保障工业安全做出更大的贡献。

参考文献：

- [1] 沈锦军, 罗展慧. 无损检测技术在压力容器和压力管道检验中的应用 [J]. 设备监理, 2024, (03): 58-61.
- [2] 尹洪恩, 张新岗. 锅炉压力容器压力管道裂纹 X 射线检测方法研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(07): 42-44.
- [3] 国宾. 压力容器压力管道检验的要点思考 [J]. 中国质量监管, 2024, (03): 92-93.
- [4] 刘建冲, 王立学, 胡伟. 油气管道完整性在线检测技术研究进展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 64-66+70.
- [5] 陈有强, 宋永翔. 锅炉压力容器及管道检验技术 [J]. 石化技术, 2023, 30(07): 212-214.
- [6] 李晓丽, 王娟. 超声波检测技术中的数字信号处理方法 [J]. 电子测试, 2021, (07): 98-99+67.
- [7] 赵诚. 高温环境下压力容器与管道的超声波检测技术 [J]. 化工管理, 2021, (27): 155-156.