

# Comparative analysis of X-ray and ultrasonic techniques in non-destructive testing of metal structures

Yanshan Song

Institute of Product Quality Standards, Ministry of Water Resources, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

## Abstract

Non-destructive testing technology plays a key role in ensuring the safety and reliability of metal structures. In this paper, radiographic testing and ultrasonic testing are taken as the research objects, and a systematic comparative analysis is carried out from the aspects of principle, characteristics and application. The advantages of X-ray and  $\gamma$ -ray imaging mechanism, digital ray technology, and the propagation characteristics of ultrasonic waves in metals and emerging ultrasound technologies such as phased array and total focus imaging are discussed in depth, and the differences between the two technologies in key indicators such as metal defect detection ability, precision resolution, detection efficiency and environmental adaptability are emphatically evaluated. The research results of this paper can provide a theoretical reference for the rational selection of nondestructive testing technology in engineering practice.

## Keywords

non-destructive testing; radiographic inspection; ultrasonic testing; metal defects; Comparative analysis

## 金属结构无损探伤检测中射线与超声技术的对比分析

宋燕山

水利部产品质量标准研究所, 中国·浙江 杭州 310012

## 摘要

无损检测技术在保障金属结构安全性与可靠性方面发挥着关键作用。本文以射线检测与超声检测为研究对象, 从原理、特点、应用等方面进行了系统的对比分析。深入探讨了X射线与 $\gamma$ 射线成像机理、数字射线技术的优势, 以及超声波在金属中的传播特性与相控阵、全聚焦成像等新兴超声技术, 并重点评估了两种技术在金属缺陷检出能力、精度分辨率、检测效率与环境适应性等关键指标上的差异。本文的研究结果可为工程实践中无损检测技术的合理选用提供理论参考。

## 关键词

无损检测; 射线检测; 超声检测; 金属缺陷; 对比分析

## 1 引言

金属结构件广泛应用于航空航天、能源电力、交通运输等关键领域, 其结构完整性与安全可靠性直接关系到整个系统的正常运行。然而, 金属材料在冶炼、加工、使用等环节中不可避免地会产生各类缺陷, 如裂纹、夹杂、未焊透等。及时准确地检测出这些缺陷对预防事故、保障安全具有重要意义。无损检测技术以其检测过程不破坏被检工件、检测成本低、适用范围广等独特优势成为金属结构件质量控制的首选方法。射线检测与超声检测是目前应用最广泛的两大无损检测技术, 它们在缺陷识别机理、检测性能、使用条件等方面存在显著差异。系统分析两种技术的原理特点与应用效

果, 对指导工程实践具有重要参考价值。

## 2 射线无损检测技术的原理与应用特性

### 2.1 X射线与 $\gamma$ 射线成像原理及其在金属探伤中的物理基础

X射线与 $\gamma$ 射线是一种高频电磁波, 具有较强的穿透能力。它们在物质中传播时, 会因光电效应、康普顿效应等作用而被选择性吸收、散射, 导致穿过物体后射线强度呈指数衰减规律<sup>[1]</sup>。材料内部的缺陷如裂纹、气孔会引起局部射线吸收系数的变化, 在成像面上形成与缺陷对应的亮暗差异, 从而实现缺陷的可视化检测。射线成像质量的关键在于衰减系数差异, 它与缺陷的尺寸、形貌以及材料的密度、原子序数等因素密切相关。X射线与 $\gamma$ 射线在金属材料内部引起的光电效应、康普顿散射与电子对效应是其实现成像的物理基础。

【作者简介】宋燕山(1979-), 男, 中国浙江兰溪人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程及启闭机安全检测、水利水电工程建设管理研究。

## 2.2 射线检测设备的技术参数与性能指标分析

射线检测设备主要由射线源、准直系统、成像系统等组成。常用的 X 射线管包括玻璃封装管与金属陶瓷管，靶材多选用高原子序数的钨、钼等，管电压决定了射线能量与穿透能力。 $\gamma$  射线源主要有铯-137、钴-60 等放射性同位素。准直系统包括铅制准直器与准直孔，用于限制射线束范围、降低散射辐射。成像系统既有传统的 X 射线胶片，也有成像增强器、平板探测器等数字成像器件。射线检测的关键性能指标包括对比度、清晰度、分辨率与灵敏度。对比度反映图像明暗差异，决定缺陷的可检测性；清晰度表征图像的清晰程度，影响缺陷边界、形貌的识别；分辨率是探测器分辨细小缺陷的能力；灵敏度则反映射线穿透被检工件的难易程度。

## 2.3 数字射线成像技术 (DR) 在金属结构检测中的优势

数字射线成像技术利用电子探测器将射线信号直接转换为数字图像，具有成像质量高、检测效率高、灵活性强等优势<sup>[2]</sup>。与传统胶片射线照相技术相比，数字成像可实现实时成像与动态观察，缩短检测周期；灵活调节曝光条件与图像处理参数，优化成像质量；直接获得数字化的图像数据，便于缺陷的定量分析与自动识别。此外，数字射线技术还可与计算机断层扫描 (CT) 相结合，获得材料内部三维缺陷分布图像，全面反映缺陷的空间特征。数字射线技术在航空发动机叶片、压力容器等关键金属构件的无损检测中得到了广泛应用，大幅提升了缺陷检出率与评估准确性。

## 2.4 射线检测技术的局限性及安全防护要求

尽管射线检测具有诸多优势，但仍存在一定局限性。首先，射线对缺陷的检出能力与缺陷的取向有很大关系，与射线束平行的狭长缺陷容易被漏检。其次，对于厚大、高密度工件，射线可能无法有效穿透，影响成像质量。此外，射线检测对缺陷定位精度较低，尤其是射线束发散时更易产生投影变形。最后，射线属于电离辐射，对人体健康有潜在危害，需要严格的安全防护措施。常用的防护手段包括时间控制、距离控制、屏蔽防护等，操作人员还须配备个人剂量计，定期进行职业健康检查。

# 3 超声波无损检测技术的机理与应用特点

## 3.1 超声波在金属介质中的传播特性与缺陷识别原理

超声波是一种频率高于 20kHz 的机械振动波，在固体介质中以纵波、横波、表面波等多种形式传播。超声波遇到界面时会发生反射、透射与转换，当界面处于缺陷时，反射波的幅度、相位会发生变化，这是超声无损检测的基本原理<sup>[1]</sup>。影响超声检测的介质特性参数主要有声速、衰减、声阻抗、各向异性等。通过分析反射信号的时间、频率、能量特征，可判断缺陷的位置、尺寸、类型等。超声检测的缺陷分辨力

与检测频率密切相关，频率越高，波长越短，能识别的最小缺陷尺寸越小。在金属材料超声检测中，纵波因具有较低衰减、良好穿透能力而被广泛采用，横波则常用于表面、近表面缺陷的检测。

## 3.2 相控阵超声检测技术在复杂金属结构中的应用

相控阵超声检测是一种新兴的高端超声检测技术，采用多阵元换能器和多路独立发射接收电路，通过控制各阵元的激励延迟时间，在被检材料内部形成预定的超声波束。相控阵技术可灵活调控声束形状与入射角度，实现对不同方位缺陷的快速扫查，显著提高了检测效率与缺陷识别能力。相控阵超声对异型件、曲面、焊缝等复杂结构的适应性尤为突出，可在不移动或少移动换能器的情况下实现区域成像。此外，相控阵技术可方便地实现声场聚焦，提高缺陷定位精度与灵敏度。三维相控阵检测系统集成机械扫查装置、高性能电子系统与专用软件，可获得直观、完整的三维缺陷图像。在核电、航空等领域，相控阵超声已成为复杂金属构件质量评价的重要手段。

## 3.3 时域反转与全聚焦成像技术在提高检测分辨率中的作用

时域反转 (TR) 是一种利用换能器阵列实现声场重构、提高超声成像分辨率的技术。其基本原理是利用缺陷处声波散射的时间反演不变性，由阵列换能器接收初始缺陷回波信号，反向加载到原位置，二次散射声场会在原缺陷处汇聚叠加，从而突出缺陷回波、抑制噪声干扰。时域反转可有效改善成像信噪比、提高探测灵敏度，但其缺陷聚焦能力有限。为此，研究者提出了全聚焦 (TFM) 成像技术，采用合成孔径聚焦原理对全声程进行动态聚焦，可获得与缺陷同尺寸的高分辨率图像。全聚焦成像利用全部阵元数据对每个像素点进行计算成像，计算量大、成像速度慢，但缺陷识别性能优异。时域反转、全聚焦等新型超声成像技术的应用，使得检测盲区减少、缺陷分辨率显著提高，为金属构件的精细化无损评价开辟了新的途径。

## 3.4 超声检测的设备配置与操作技术要求

超声检测仪器的核心部件是超声探头，由压电陶瓷晶片、阻尼材料、保护层等组成，可根据检测对象的材质、厚度、形状等选择合适的晶片频率。耦合剂如水、油脂等用于填充探头与工件间的空隙，减少性能损失。超声检测还需配备校准试块、耦合装置、扫查器等辅件。数字式超声检测仪可实现波形显示、缺陷定位、数据存储等功能，部分高端机型还具备相控阵、时域翻转等新技术功能。超声检测对操作人员的技术水平要求较高，需掌握声学理论知识，熟练操作仪器，准确判读各种缺陷信号。规范的检测操作如合理选择探头、校准仪器灵敏度、控制耦合条件、优化扫查轨迹等，是保证检测结果可靠性的关键。超声检测人员通常需接受专业培训，取得相应的资质认证。

## 4 射线与超声技术在金属结构缺陷检测中的比较

### 4.1 不同类型金属缺陷的检出能力对比分析

裂纹、未焊透、夹杂是金属构件的常见缺陷类型，射线与超声检测对不同缺陷的识别能力存在差异。对于表面开口型裂纹，如疲劳裂纹，超声检测灵敏度高，且能准确测量裂纹深度。射线检测易受裂纹开口宽度、取向影响，但对内部未开口裂纹的检出能力强于超声。对于未焊透缺陷，射线检测易于识别，但对埋藏较深的未焊透，超声检测更具优势。夹杂作为一种体积型缺陷，通常具有较大尺寸，射线检测可明显识别；但当夹杂尺寸较小或界面与基体结合紧密时，超声检测更为有效。气孔在射线照片上表现为圆形暗点，容易识别；而在超声检测中，气孔回波信号弱，易被误判。总的来说，射线检测更适合体积型缺陷，超声检测在检测面型缺陷方面具有独特优势。

### 4.2 检测精度、分辨率与可靠性的系统性评价

射线检测的空间分辨率主要取决于焦点尺寸与像素尺寸，数字探测器的分辨率可达到50~100 $\mu\text{m}$ ，高于超声检测。超声检测的缺陷分辨力与频率有关，常用频率下的分辨力在0.5~2mm之间。在缺陷定位精度方面，射线检测易受工件厚度、射线发散度等因素影响，而超声检测可通过选择聚焦探头、动态深度聚焦等方法获得较高的缺陷定位精度。就检测可靠性而言，射线检测判读结果的一致性较好，但漏检、误判情况时有发生；超声检测结果的可靠性很大程度上取决于操作人员的技术水平，熟练的操作者可获得较高的检出率，但也存在较大的人为因素。总的来说，射线检测精度高、稳定性好，而超声检测灵活性强、对缺陷定位准确。

### 4.3 检测效率、适应性与经济性的综合比较

就检测效率而言，射线检测的单次曝光时间较短，但胶片处理、判读比较耗时；数字成像可实现快速动态检测，但大型工件可能需多次分区域曝光。超声检测采用电子扫描成像方式，实时成像速度快，但手工扫查较为耗时。在实际检测中，射线一次成像范围大，而超声则需要对被检工件进行全面扫查，相对耗时。就适应性而言，射线检测受工件形状与尺寸限制较小，但对厚大、高密度材料的穿透能力不足；超声检测灵活性高，适用于不同形状、尺寸构件，但对粗糙表面、高衰减材料的检测困难较大。在经济性方面，射线检测设备价格相对较高，射线源也需定期更换，检测成本大；

超声检测设备种类多样，价格差异大，总体而言费用相对较低，更具经济优势。综合而言，射线检测适用范围广，检测效率高，而超声检测灵活性强，经济性好。

### 4.4 环境与材料因素对两种技术检测结果的影响分析

环境因素如温度、湿度、振动等对射线检测和超声检测均有一定影响。对于射线检测，高温会导致胶片感光度下降，数字成像探测器性能受损；湿度过大时胶片易发霉变形，电气设备绝缘性能降低；此外还需避免强射线环境干扰。对于超声检测，高温会改变材料声学性能，影响检测灵敏度；湿度变化会引起材料声速、衰减系数改变；同时还应避免强电磁场、振动等因素干扰。就材料因素而言，含高原子序数元素的高密度材料会显著衰减X射线，而 $\gamma$ 射线具有更强的穿透力。超声检测则容易受到晶粒散射、高衰减相位的影响，对奥氏体不锈钢、粗晶铸件等材料的检测能力有限。环境与材料因素确实会对射线检测和超声检测的结果产生不同程度的影响。在实际应用中，应根据具体情况采取相应的预防和补偿措施，以保证检测结果的可靠性和准确性。例如控制环境参数、选择合适的射线源、优化超声检测参数设置等，从而最大限度地减小环境和材料因素的不利影响。

## 5 结语

射线检测与超声检测在金属结构无损评价中各有所长。射线检测凭借直观、可靠的成像效果，在复杂构件内部缺陷识别中不可或缺；超声检测则以灵活、高效的动态成像性能，在薄板、焊缝裂纹检测等方面展现独特优势。现代无损检测正朝着“多模联检”方向发展，射线、超声、涡流、磁粉等不同无损检测手段优势互补、联合应用，可全面评价材料结构完整性、准确诊断失效风险。数字成像、相控阵、图像融合等新兴技术不断涌现，极大地拓展了射线、超声检测的应用范围和性能边界。可以预见，射线与超声技术在智能化、信息化的推动下，必将在金属构件安全保障与寿命预测中发挥更加关键的作用。

### 参考文献

- [1] 杨震樱.超声无损检测技术在装配式混凝土建筑中的应用[J].中国厨卫,2025,24(1):267-269.
- [2] 张瑾,李洁,魏子璇,王晓璐,张莉.GFRP损伤X射线和超声无损检测的融合方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(8):169-177.
- [3] 张志刚,张岩,吴文平,马贵荣.基于X射线数字成像的GIS设备缺陷无损检测方法[J].计算机测量与控制,2024,32(6):35-41.