

基于超声波与射线检测技术在压力容器缺陷识别中的对比研究

胡帅帅

宁夏特种设备检验检测研究院 宁夏 银川 750000

摘要：本文对比研究了超声波与射线检测技术在压力容器缺陷识别中的应用。超声波检测利用超声波的反射特性，操作简便、成本低，尤其适用于检测大面积和厚壁工件，但受材质、晶粒度等因素影响。射线检测通过射线与物质的相互作用，可直观显示缺陷图像，精度高，但操作复杂、成本较高，对人体有害。两种技术在压力容器缺陷识别中各具优势，需根据具体情况选择使用，以确保检测结果的准确性和可靠性。

关键词：超声波；射线检测技术；压力容器缺陷识别；对比

引言：在工业领域中，压力容器扮演着举足轻重的角色，其安全运行直接关系到生产安全及人员生命财产安全。为确保压力容器的安全性，缺陷识别成为不可或缺的一环。超声波与射线检测技术作为当前主流的无损检测方法，各自具备独特的检测优势与适用范围。本研究旨在深入探讨这两种技术在压力容器缺陷识别中的应用，对比分析其检测效果与局限性，为实际检测工作提供科学依据，进一步提升压力容器的安全性能。

1 压力容器缺陷识别基础

1.1 压力容器常见缺陷类型及其危害

(1) 压力容器在制造、使用过程中易产生多种缺陷，裂纹是最危险的缺陷之一，按产生原因可分为热裂纹、冷裂纹等，多源于焊接应力或材质劣化；气孔常因焊接时气体未及时逸出形成，呈孔洞状分布；夹渣多为焊接残留的熔渣或杂质，影响结构连续性；未焊透则是焊接时接头根部未完全熔合，形成局部缝隙。此外，还存在变形、腐蚀坑、磨损等缺陷，不同缺陷在形态和分布上各有特征。(2) 这些缺陷对压力容器的安全性和使用寿命影响显著。裂纹会快速扩展，导致容器突发性破裂，引发爆炸等严重事故；气孔和夹渣削弱材料强度，使局部受力不均，加速疲劳损坏；未焊透降低接头承载能力，在压力作用下易产生泄漏。缺陷的存在还会缩短设备使用寿命，增加维修成本，甚至引发生产中断和人员伤亡。

1.2 缺陷识别的基本原则与方法

(1) 无损检测是缺陷识别的核心手段，指在不损伤容器结构和性能的前提下，利用声、光、电、磁等物理特性检测内部或表面缺陷。其特点包括非破坏性、全面性和可重复性，能有效发现隐蔽缺陷，为安全评估提供

依据，广泛应用于压力容器制造验收和定期检验环节。(2) 缺陷识别需满足准确性、灵敏度和可靠性要求。准确性要求精准判断缺陷类型、位置和尺寸，避免误判或漏判；灵敏度需能检出微小缺陷，尤其是早期裂纹等危险隐患；可靠性则要求检测结果稳定一致，不受环境或操作因素干扰，通过规范操作和多方法验证，确保识别结果为压力容器安全运行提供可靠保障。

2 超声波检测技术在压力容器缺陷识别中的应用

2.1 超声波检测技术的基本原理

(1) 超声波由高频电脉冲激励探头中的压电晶体产生，其频率通常在0.5-10MHz。传播特性表现为方向性强，可在固体、液体中高效传播，在气体中衰减剧烈；穿透能力强，能深入压力容器壁厚内部，且传播速度随介质密度、弹性模量变化而不同。(2) 超声波与物质相互作用时，遇到缺陷界面会发生反射，反射波被探头接收形成信号；当从一种介质进入另一种介质时，会产生折射，折射角度遵循折射定律，可通过调整入射角实现不同深度检测。此外，还存在散射、衰减等现象，为缺陷判断提供依据。

2.2 超声波检测设备的构成与操作

(1) 设备主要包括超声波检测仪（显示反射信号的波形与数据）、探头（发射和接收超声波，分直探头、斜探头等）。选型需依据容器材质（如碳钢用普通探头，奥氏体钢用聚焦探头）、缺陷可能位置（表面缺陷选斜探头，内部缺陷选直探头）及壁厚（厚壁容器用低频探头）。(2) 操作流程：表面预处理（去除锈迹、涂层）→耦合剂涂抹（排除空气，常用机油、甘油）→校准仪器（调整灵敏度、量程）→扫查检测→记录数据。注意事项：探头移动速度均匀，耦合良好避免信号失

真, 远离电磁干扰源^[1]。

2.3 超声波检测技术在压力容器缺陷识别中的具体应用

(1) 对裂纹检测灵敏度高, 尤其是平面型裂纹, 反射信号强且清晰; 对气孔等体积型缺陷, 因界面不规则, 反射信号较弱, 灵敏度稍低; 夹渣、未焊透则根据形态呈现不同信号特征。(2) 某压力容器筒体焊接检测中, 斜探头发现一处异常反射信号, 波幅高且陡峭, 结合声程计算定位在焊缝熔合线处, 判定为纵向裂纹; 另一处信号分散、波幅低, 经复核确认为气孔群, 与解剖结果一致。

2.4 超声波检测技术的优缺点分析

(1) 优势: 操作简便, 可现场便携检测; 成本低廉, 设备维护费用低; 检测速度快, 适合大面积扫查; 可检测厚度较大的容器, 对深缺陷敏感。(2) 局限性: 对操作人员经验依赖强, 需熟练解读波形判断缺陷性质; 定性(区分裂纹与夹渣)、定量(精确测量尺寸)、定位精度相对较低; 对表面粗糙或形状复杂的部位检测困难, 无法直观呈现缺陷图像。

3 射线检测技术在压力容器缺陷识别中的应用

3.1 射线检测技术的基本原理

(1) 常用射线包括X射线和伽马射线。X射线由X射线机产生, 通过高压电场加速电子撞击金属靶材(如钨靶)生成, 能量可通过管电压调节, 适用于中薄壁容器检测; 伽马射线来自放射性同位素(如钴-60、铱-192), 由原子核衰变释放, 能量固定且穿透力更强, 多用于厚壁或复杂结构检测。此外, 中子射线可检测轻金属(如铝)中的氢致缺陷, 弥补常规射线短板。(2) 射线与物质相互作用以吸收和散射为主。吸收遵循指数衰减规律, 物质密度越大、厚度越厚, 射线衰减越显著; 散射会使射线方向改变, 产生干扰信号, 降低影像清晰度。当射线穿过压力容器缺陷区域时, 因缺陷(如气孔、夹渣)与母材密度差异, 导致透过射线强度不均, 在探测器上形成缺陷影像。

3.2 射线检测设备的构成与操作

(1) 设备由射线源和探测器组成。射线源选型依据容器厚度: $\leq 50\text{mm}$ 用X射线机(如便携式定向机), $50\text{--}200\text{mm}$ 用伽马射线源(如铱-192); 探测器分胶片(成本低但需暗室处理)和数字探测器(如平板探测器, 可实时成像), 高精度检测优先选数字系统。(2) 操作流程: 预处理检测区→对位射线源与探测器(中心束垂直检测面)→设定曝光参数→曝光→影像处理(胶片显影或数字重建)。安全防护需划定 $\geq 50\text{米}$ 警戒区, 操作人

员穿铅衣、戴铅帽, 用剂量报警仪监控, 禁止在射线直射方向停留^[2]。

3.3 射线检测技术在压力容器缺陷识别中的具体应用

(1) 对体积型缺陷灵敏度高: 夹渣呈不规则深色块状, 边缘模糊; 气孔为圆形/椭圆形暗斑, 分布分散; 未焊透表现为连续深色线条, 与焊缝走向一致。对平面型裂纹(尤其与射线平行的)灵敏度低, 易漏检。(2) 某压力容器封头焊缝检测中, 胶片显示 15mm 长连续深色直线, 判定为未焊透; 另有多处 $2\text{--}3\text{mm}$ 圆形暗斑, 确认为气孔群。数字影像可电子存储, 用软件测量尺寸, 保存期不受环境影响, 便于追溯和复检。

3.4 射线检测技术的优缺点分析

(1) 优势: 结果直观, 缺陷形态/位置可直接观察; 影像可长期保存, 具可追溯性; 对体积型缺陷灵敏度高, 能准确量化尺寸; 适用于多种结构, 不受材质导电性能影响。(2) 局限性: 有辐射危害, 需严格防护, 增加操作复杂度; 设备成本高, 数字系统初期投入大, 伽马源需定期更换; 检测厚度受限, X射线对 $> 80\text{mm}$ 钢材穿透不足; 检测速度慢, 胶片处理耗时, 对平面型缺陷检出率低。

4 超声波与射线检测技术在压力容器缺陷识别中的对比分析

4.1 灵敏度对比

(1) 在缺陷灵敏度方面, 两种技术呈现显著差异。超声波检测对面积型缺陷(如裂纹、未熔合)灵敏度极高, 尤其是平面型裂纹, 即使尺寸微小(如长度 0.5mm 、深度 0.2mm), 也能通过强烈的反射信号被精准识别, 这是因为超声波在垂直于缺陷平面传播时, 反射能量损失小。而射线检测对体积型缺陷(如气孔、夹渣)更敏感, 能清晰显示缺陷的形状和分布, 对于直径 0.3mm 的气孔或体积 0.5mm^3 的夹渣, 可通过影像中的明暗对比准确检出, 但对面积型缺陷(尤其是与射线方向平行的裂纹)灵敏度较低, 易因反射信号弱而漏检。(2) 具体实例中, 某压力容器焊缝存在两处缺陷: 一处是长度 3mm 的纵向裂纹(面积型), 超声波检测显示陡峭的反射波峰, 波幅达到满屏的 80% , 定位误差 $\leq 0.5\text{mm}$; 射线检测影像中仅呈现模糊的浅淡线条, 易被误判为划痕。另一处是直径 2mm 的密集气孔(体积型), 射线检测胶片上呈现清晰的黑色圆点, 边界分明; 超声波检测则因反射信号分散, 仅能判断存在缺陷, 无法准确区分数量和尺寸^[3]。

4.2 检测效率与成本对比

(1) 检测效率上, 超声波检测优势明显: 准备时间

短（无需复杂的射线防护布置），单条焊缝检测速度可达0.5m/min，且可实时获取结果，适合大面积快速扫查；人力成本较低，通常1-2人即可完成操作。射线检测准备时间长（需设置警戒区、穿戴防护装备），单条焊缝检测速度约0.1m/min，胶片检测还需等待显影定影过程（约30分钟），数字检测虽可实时成像，但前期布置耗时仍高于超声波；人力成本较高，需至少2人配合（操作与监护），复杂环境下需增加防护人员。（2）设备成本方面，超声波检测设备购置成本低（便携式仪器约5-10万元），维护简单（主要更换探头，成本数百元），适合中小企业普及。射线检测设备成本高：X射线机约10-30万元，伽马射线源（含防护容器）约20-50万元，数字探测器系统高达50-100万元；维护成本高（伽马源需定期更换，单次费用数万元），且需支付辐射安全评估等附加费用，长期使用成本显著高于超声波。

4.3 安全性与环保性对比

（1）射线检测存在不可忽视的辐射危害。X射线和伽马射线属于电离辐射，可破坏人体细胞的DNA结构，短期大剂量照射会导致放射病，长期低剂量接触则增加癌症风险。其防护措施必须严格：操作人员需穿戴铅当量 $\geq 0.5\text{mm}$ 的防护服、铅帽和防护眼镜，检测区域设置多重警示标识（如“当心辐射”警示牌）和物理屏蔽（铅板、混凝土墙）；使用个人剂量计实时监测辐射累积量，确保年有效剂量不超过20mSv；射线源储存需专用屏蔽容器，运输过程需符合《放射性物品运输安全管理条例》，避免辐射泄漏。（2）超声波检测具有无辐射的天然优势，其工作原理是利用机械振动波，对人体组织和细胞无任何损伤，操作人员无需特殊防护装备，仅需注意探头操作规范即可。检测过程中使用的耦合剂（如机油、甘油）为环保材料，用量少且易降解，废弃后可按普通工业废物处理，对环境无污染。此外，超声波检测可在密闭空间、易燃易爆场所（如化工车间）安全进行，不会引发火灾、爆炸等二次风险，安全性和环保性均远优于射线检测^[4]。

4.4 适用性与局限性分析

（1）适用性评估：超声波检测适用于厚度20mm以上的厚壁压力容器，尤其适合检测碳钢、低合金钢等金属

材料中的裂纹、未熔合等面积型缺陷，对管道环焊缝、筒体对接焊缝的检测效果突出；但对非金属容器（如玻璃钢容器）、复合材料容器的检测灵敏度较低，因这类材料对超声波衰减严重。射线检测更适合厚度5-80mm的中薄壁容器，能精准识别焊缝中的气孔、夹渣、未焊透等体积型缺陷，适用于不锈钢、有色金属等多种材质，且对铸件、锻件中的内部疏松、缩孔等缺陷检测效果好。（2）局限性探讨：超声波检测在薄板（厚度 $< 4\text{mm}$ ）检测中，因近场区干扰大，缺陷信号易被掩盖，灵敏度大幅下降；对复杂结构（如异形封头、法兰与筒体连接的角焊缝）检测困难，探头难以紧密耦合，易导致信号失真；检测结果高度依赖操作人员的经验，对缺陷的定性误差率约8-12%。射线检测对厚度超过100mm的厚壁容器穿透能力不足，需使用高能伽马射线源（如钴-60），但设备笨重，不适合现场检测；对平面型缺陷（如横向裂纹）的检出率低，尤其是与射线方向夹角小于30°的裂纹，检出率不足50%；且因存在辐射风险，无法在人员密集区域或易燃易爆环境中使用。实际应用中，常采用两种技术联合检测，如用超声波检测裂纹，用射线检测体积型缺陷，以实现优势互补。

结束语

综上所述，超声波与射线检测技术各有千秋，在压力容器缺陷识别中均发挥着重要作用。超声波检测以其高效、便捷、低成本的优势，适用于快速筛查大面积及厚壁容器；而射线检测则在缺陷形态直观显示、高精度测量方面独树一帜，适用于对检测精度要求极高的场合。未来，随着技术的不断进步，两种检测技术将更加融合，共同推动压力容器安全检测水平的提升。

参考文献

- [1]于大雷.超声波检测技术在压力容器检测中的应用分析[J].科学与信息化,2021,(03):27-28.
- [2]陈志敏.射线与超声波检测在压力容器中的应用[J].无损检测技术,2020,37(1):13-14.
- [3]薛朝阳.射线与超声波检测在压力容器焊接质量评价中的应用[J].焊接技术,2021,37(2):45-46.
- [4]吕飞阳.射线与超声波检测在压力容器安全评估中的应用[J].特种设备安全,2020,38(3):64-65.