

超声无损检测在压力容器焊缝检测中的应用

沈强

呼和浩特市四方工程质量检测试验有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4925

[摘要] 超声无损检测技术利用超声波在材料中的传播特性,对压力容器焊缝进行内部缺陷检测。该技术具有检测范围广、定位准确、对试件无损伤等优点,已成为压力容器制造和使用过程中重要的质量保障手段。本文系统阐述了超声检测技术的基本原理、设备组成及在压力容器焊缝检测中的具体应用方式,重点分析了对接焊缝、角焊缝等不同类型的检测策略,以及裂纹、气孔、夹渣、未熔合等常见缺陷的识别方法,为压力容器安全运行提供技术支持。

[关键词] 超声无损检测; 压力容器; 焊缝检测; 缺陷识别; 改进措施

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A

Application of Ultrasonic Nondestructive Testing in Weld Inspection of Pressure Vessels

Qiang Shen

Hohhot Sifang Engineering Quality Testing and Test Co., Ltd.

[Abstract] Ultrasonic nondestructive testing technology utilizes the propagation characteristics of ultrasonic waves in materials to detect internal defects in pressure vessel welds. This technology has advantages such as wide detection range, accurate positioning, and no damage to the test piece, making it an important quality assurance method in the manufacturing and use of pressure vessels. This paper systematically expounds the basic principles of ultrasonic testing technology, equipment composition, and specific application methods in pressure vessel weld inspection. It focuses on analyzing inspection strategies for different types of welds such as butt welds and fillet welds, as well as identification methods for common defects including cracks, porosity, slag inclusion, and lack of fusion, providing technical support for the safe operation of pressure vessels.

[Key words] ultrasonic nondestructive testing; pressure vessel; weld inspection; defect identification; improvement measures

引言

压力容器在工业领域应用广泛,其焊缝质量关乎安全。传统检测方法存在局限性,超声无损检测凭借自身优势成为关键检测手段。它能在不损伤压力容器的前提下,检测焊缝内部缺陷。深入探究其在压力容器焊缝检测中的应用,对提升检测水平、保障压力容器安全稳定运行,具有十分重要的现实意义。

1 超声无损检测技术原理

1.1 超声波的基本特性

超声波属于机械波范畴,频率通常高于20千赫兹。这一频率范围界定使其具备独特性质,在众多领域得以广泛应用。在介质中传播时,超声波呈现出多种形式,纵波是其中一种重要类型,粒子振动方向与波的传播方向平行,这种传播形式让纵波能在固体、液体和气体中顺利传播^[1]。横波的粒子振动方向则与波的传播方向垂直,不过横波仅能在固体中传播,因为液体和气体缺乏足够的剪切弹性。超声波在传播过程中遵循一系列基本规

律。反射现象的产生源于波在不同介质界面遇到阻抗差异,部分能量被反射回原介质。折射是波在传播中遇到不同介质界面时,传播方向发生改变的现象,遵循斯涅尔定律。衰减现象较为复杂,主要包括吸收衰减、散射衰减等。吸收衰减是超声波在介质中传播时,因介质质点的内摩擦和热传导,将部分机械能转化为热能而损耗。散射衰减则是超声波遇到介质中不均匀性,如微小颗粒、杂质等,向各个方向散射,导致沿原方向传播的能量减少。

1.2 超声检测的物理基础

当超声波与材料相互作用,会发生能量转换与信号变化。超声波携带的机械能进入材料后,部分能量被材料吸收转化为热能,部分能量因反射、折射等改变传播方向。材料内部若存在缺陷,如裂纹、气孔等,会对超声波传播产生显著影响。裂纹会使超声波在传播到此处时发生反射和散射,改变传播路径,部分能量被反射回来,导致接收到的信号幅度发生变化。例如,一条长

度为5毫米的裂纹,可能使反射波幅度增加3-5倍。气孔的存在会使超声波在传播过程中遇到空气介质,由于空气与材料的声阻抗差异巨大,超声波在气孔处发生强烈反射和散射,不仅改变传播路径,还会使传播速度降低,信号幅度明显衰减。一个直径为2毫米的气孔,可能使信号幅度衰减6-8分贝。

1.3 超声检测设备的组成与工作原理

探头作为换能器,是超声检测设备的关键部件,类型多样。直探头主要用于检测与检测面平行的缺陷,能直接发射和接收纵波。斜探头则可发射和接收横波或表面波,适用于检测与检测面成一定角度的缺陷。仪器主机涵盖信号发射、接收、处理模块。发射模块产生高频电脉冲信号,激励探头产生超声波,其频率范围通常在0.5-20兆赫兹之间。接收模块接收探头传回的电信号,并将其放大,放大倍数可达60-100分贝。处理模块对放大后的信号进行滤波、分析等处理,以获取缺陷信息。耦合剂在超声检测中不可或缺,作用原理在于实现探头与被检测工件表面之间的声阻抗匹配,减少超声波在界面处的反射损失,同时起到润滑作用,便于探头在工件表面移动,保证检测的顺利进行。选择耦合剂时,需考虑其声阻抗与被检测材料和探头的匹配程度、粘度、流动性等因素。例如,甘油作为耦合剂,声阻抗约为 $2.4 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与钢材的声阻抗较为接近,能较好地实现声阻抗匹配。

2 超声无损检测在压力容器焊缝检测中的具体应用方式

2.1 检测前的准备工作

压力容器焊缝检测前的表面处理至关重要。清洁度方面,需彻底清除焊缝表面的油污、铁锈、氧化皮等杂质,这些杂质会影响超声波的传播,导致检测信号失真。粗糙度控制也不容忽视,过高的粗糙度会使超声波产生散射,降低检测灵敏度,需将焊缝表面打磨至合适范围。打磨范围要根据检测要求确定,不仅覆盖焊缝本身,还需延伸至两侧一定距离,确保能检测到可能存在的边缘缺陷。检测区域的合理划分与清晰标识是保证检测全面性的关键。依据压力容器的结构特点和焊缝分布,将检测区域划分为若干小区域,边界清晰,避免检测遗漏或重复检测。检测参数的科学设置直接影响检测结果的准确性。超声波频率的选择需综合考虑检测深度和分辨率,频率越高分辨率越高,但穿透能力越弱,反之亦然。折射角度的设定要根据焊缝的坡口形式和检测需求确定,以获得最佳检测效果。灵敏度校准是确保设备能准确检测出微小缺陷的重要环节,需使用标准试块校准,使设备处于最佳工作状态。

2.2 常用检测方法与技术

脉冲反射法中,单探头检测是利用一个探头既发射又接收超声波,通过分析反射波特征判断缺陷情况。操作要点在于控制探头移动速度和方向,一般不超过50毫米/秒,确保能全面扫描焊缝。这种方法适用于检测形状规则、缺陷位置明确的焊缝。双探头检测采用两个探头,一个发射一个接收,优势在于提高检测灵敏度和准确性,配置方式有一发一收式等,检测范围更广,适

用于对精度要求较高的焊缝。衍射时差法(TOFD)利用缺陷端部衍射波进行检测。在厚壁压力容器焊缝检测中,能准确检测出内部微小缺陷,且对缺陷的定位和定量精度较高。应用技巧在于合理设置探头位置和参数,探头间距一般根据焊缝厚度确定,对于50-100毫米的焊缝,可设置为80-120毫米,确保能接收到清晰的衍射波信号。相控阵超声检测(PAUT)的多阵元探头通过电子扫描实现灵活聚焦与成像。能根据检测需求实时调整聚焦位置和扫描方式,在复杂结构焊缝检测中展现出高效性与灵活性,可快速准确检测出各种类型缺陷。其阵元数量在16-128个之间。

2.3 不同类型焊缝的检测策略

对接焊缝检测时,要重点关注坡口形式和熔合区。不同坡口形式对超声波传播路径有影响,需根据实际情况调整检测参数^[2]。常见的坡口形式有V形、X形、U形等,V形坡口角度一般为 $60^\circ - 70^\circ$ 。熔合区是容易出现缺陷的部位,要加强检测力度,检测次数比其他区域增加1-2次。角焊缝检测需针对结构特点选择合适的探头与检测角度,确保超声波能有效传播到检测区域。一般选择折射角度为 $60^\circ - 70^\circ$ 的斜探头。特殊结构焊缝如T型接头、环形焊缝,检测时要掌握相应技巧,突破难点,如T型接头要注意检测垂直部位的缺陷,检测该部位时探头移动范围要扩大10-20毫米;环形焊缝要保证探头能均匀扫描整个圆周,可将环形焊缝划分为8-16个等分区域进行检测。

3 超声无损检测对压力容器焊缝常见缺陷的识别

3.1 裂纹类缺陷

压力容器焊缝中裂纹的产生受多种因素影响。焊接工艺方面,若焊接电流过大、焊接速度过快,会导致焊缝局部受热不均,产生较大的内应力,进而引发裂纹。例如,当焊接电流超过300安培、焊接速度大于300毫米/分钟时,裂纹产生的几率会显著增加。材料性能也是关键因素,某些材料韧性不足或含有过多杂质,在焊接过程中容易形成裂纹源。如含碳量超过0.25%的碳钢,裂纹敏感性较高。应力集中同样不可忽视,压力容器结构复杂,在焊缝交接处、截面突变处等部位,应力集中现象明显,为裂纹的产生创造了条件。裂纹在形态上具有多样性,常见线性裂纹,呈细长状,沿一定方向延伸,长度一般在2-50毫米之间;还有分支状裂纹,从主裂纹处分出若干细小裂纹,分支数量可达2-5条。在超声信号中,裂纹表现为反射波幅度较高,波形尖锐。由于裂纹界面不规则,超声波在裂纹处会发生多次反射和散射,导致信号持续时间较长,一般可持续5-15微秒,且可能伴有杂波。

3.2 气孔与夹渣缺陷

气孔与夹渣的形成与焊接材料和焊接环境紧密相关。焊接材料若保管不当受潮,在焊接过程中水分蒸发会产生气体,若气体来不及逸出,就会在焊缝中形成气孔。焊接环境的风速过大,会卷入空气,也可能导致气孔产生。夹渣则是焊接过程中熔渣未能完全浮出而残留在焊缝中形成的。焊接电流过小、焊接速度过快,会使熔渣来不及上浮,增加夹渣的产生几率。这两类缺陷在超声检测中的信号存在差异。气孔通常为孤立圆形缺陷,反射波幅度相对较低,波形较规则。夹渣形状不规则,反射波幅度高

低不一,波形较为杂乱。区分二者可结合缺陷的位置、大小及信号特征综合判断,一般夹渣的信号更复杂多变。

3.3 未熔合与未焊透缺陷

未熔合指焊缝金属与母材或焊缝金属各层之间未完全熔化结合,未焊透则是焊接时接头根部未完全熔透。这两种缺陷严重影响压力容器的强度和密封性,可能导致容器在使用过程中发生泄漏甚至破裂。产生原因主要有焊接电流过小、焊接速度过快、坡口角度过小等。例如,当焊接电流小于180安培、焊接速度大于300毫米/分钟、坡口角度小于45°时,未熔合和未焊透缺陷容易出现。超声检测对未熔合与未焊透缺陷较为敏感。未熔合缺陷的信号幅度通常较高,一般幅度在70-90%的量程范围内,波形呈尖锐的脉冲状,脉冲持续时间约为3-8微秒。未焊透缺陷的信号幅度也较高,且由于缺陷贯穿焊缝根部,信号持续时间较长,一般可持续8-20微秒。识别时可观察信号的幅度、波形特征以及在焊缝中的位置,未焊透缺陷通常位于焊缝根部。

3.4 其他缺陷

咬边是焊缝边缘母材上被电弧或火焰烧熔出的凹槽,超声检测中表现为焊缝边缘处信号幅度异常,波形不规则。咬边深度一般在0.5-3毫米之间,当咬边深度超过1毫米时,会对压力容器的强度产生明显影响^[3]。焊瘤是焊接过程中熔化金属流淌到焊缝之外未熔合的金属瘤,超声信号表现为在焊缝一侧出现局部幅度较高的反射波,焊瘤尺寸一般在2-10毫米之间。检测时要注意观察信号的位置和特征,准确判断缺陷类型。

4 超声无损检测在压力容器焊缝检测中的局限性及改进措施

4.1 检测局限性分析

在压力容器焊缝检测中,超声无损检测面临诸多局限。对于复杂形状焊缝,像不规则曲面焊缝,探头难以与焊缝表面紧密贴合,导致超声波传播路径复杂,信号接收困难,检测难度大幅增加。狭窄空间焊缝同样如此,探头无法灵活移动和调整角度,使得部分区域难以有效检测,容易留下检测盲区。表面粗糙度对检测影响显著。若焊缝表面粗糙度过大,耦合剂难以在探头与焊缝

表面形成均匀稳定的耦合层,超声波在传播过程中能量损失增大,反射信号减弱,检测信号质量下降,甚至可能出现误判或漏判。检测结果受操作者技能水平和经验影响较大。不同操作者对检测设备的操作熟练程度不同,对信号的分析判断能力也存在差异。经验丰富的操作者能更准确地识别缺陷信号,而新手可能因操作不当或对信号特征不熟悉,导致检测结果不准确。

4.2 改进措施与研究方向

为克服这些局限,需从多方面采取改进措施。研发新型超声探头与检测技术是重要方向。柔性探头能更好地适应复杂形状焊缝,与焊缝表面紧密贴合,提高检测效果。微型探头可深入狭窄空间进行检测,扩大检测范围。应用自动化与智能化检测系统可减少人为因素干扰。自动化系统能按照预设程序精确控制探头移动和参数设置,保证检测过程的一致性和稳定性。智能化系统可对检测信号进行自动分析和处理,快速准确地识别缺陷,提高检测效率和准确性。完善与统一检测标准与规范也十分必要。统一的标准和规范能确保不同检测人员和检测设备在相同条件下得出具有可比性的检测结果,提高检测结果的可靠性,为压力容器的安全运行提供更有力的保障。

5 结束语

超声无损检测在压力容器焊缝检测中发挥着重要作用,能有效识别多种常见缺陷。尽管存在对复杂形状和狭窄空间焊缝检测困难、受表面粗糙度和操作者影响等局限,但通过研发新型探头与技术、应用自动化智能化系统、完善统一标准规范等改进措施,可不断提升检测效果,为压力容器安全运行筑牢坚实防线。

[参考文献]

- [1]马学飞,李慧聪.无损检测技术在石化装置压力容器检验检测中的应用研究[J].中国设备工程,2025(16):271-273.
- [2]吕红彦.无损检测技术在压力容器和压力管道中的应用[J].模型世界,2023(27):10-12.
- [3]殷其杭.压力容器焊缝无损检测技术的应用与效果分析[J].石油石化物资采购,2025(3):95-97.