

风电塔筒环焊缝 UT 检测信号特征与缺陷识别

张羽

中车兰州机车有限公司，甘肃兰州，730000；

摘要：超声检测（UT）作为风电塔筒环焊缝缺陷排查领域的核心技术手段，其检测结果的精度水平，直接取决于对检测过程中各类信号特征的精准辨析与科学解读。本文系统梳理 UT 检测信号的基础构成要素，深入剖析环焊缝常见典型缺陷所对应的 UT 检测信号特征，针对性提出缺陷识别的优化实施路径，进一步完善缺陷识别工作的保障措施，最终为提升风电塔筒环焊缝缺陷的检出效率与准确率、切实保障风电设备长期稳定运行安全，提供具备实践价值的技术支撑与理论参考。

关键词：风电塔筒；环焊缝；超声检测（UT）；检测信号特征；缺陷识别

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.011

引言

风电塔筒环焊缝，该部位长期暴露于户外复杂工况环境中，持续承受风载荷作用、周期性振动冲击，以及昼夜与季节交替带来的温度波动，在多重外部作用叠加影响下，易因焊接工艺执行过程中的参数偏差、焊缝部位长期应力集中等内在与外在因素，滋生各类结构缺陷。超声检测（UT）凭借其超声波穿透能力强、检测精度高、对检测对象无损伤的技术优势，已成为风电塔筒环焊缝缺陷检测领域的主流技术方式，在行业内得到广泛应用与推广。因此，明确 UT 检测中不同类型信号的本质特征、科学优化缺陷识别的逻辑与方法，成为解决当前风电塔筒环焊缝 UT 检测难题、提升检测质量的关键所在。

1 风电塔筒环焊缝 UT 检测信号基础构成

1.1 缺陷信号

缺陷信号作为反映环焊缝内部缺陷存在与属性的关键信号载体，其核心呈现出两大显著特征，即稳定性特征与关联性特征。在超声波在环焊缝母材与焊缝金属内部传播的过程中，缺陷信号所包含的核心参数，包括信号波幅、信号频率以及信号传播时间，始终保持相对恒定的状态。即便在检测操作过程中，检测探头的移动速度出现细微波动，或者耦合剂的用量存在少量差异，缺陷信号的上述核心参数也不会产生明显的波动与变化，能够持续稳定地被检测系统捕捉与记录。缺陷的横向尺寸与纵向尺寸，会直接决定缺陷信号波幅的高低水平，缺陷尺寸越大，通常情况下所产生的缺陷信号波幅也相对越高。

1.2 背景杂波信号

背景杂波信号则主要表现出随机性特征与无关联性特征。从信号产生的来源来看，背景杂波信号的产生来源具有较强的分散性，并非由单一因素引发，而是由多种复杂因素共同作用形成。其中，主要的产生因素包括：环焊缝焊接过程中焊缝成形不均匀，导致焊缝金属内部组织存在细微差异，引发超声波反射产生杂波；母材金属晶粒相对粗大，超声波在晶粒边界处发生不规则反射，形成晶粒反射杂波；以及在检测过程中，超声波在检测探头与环焊缝检测界面之间发生反射，产生界面反射杂波等。

2 风电塔筒环焊缝典型缺陷 UT 检测信号特征

2.1 未熔合缺陷的 UT 检测信号特征

从信号波幅来看，未熔合缺陷的 UT 检测信号波幅整体处于中高区间，既不会因缺陷反射能力过弱而呈现低波幅，也不会因反射过于强烈而表现出极高波幅，波幅水平相对稳定。从波形形态来看，未熔合缺陷的 UT 检测信号波形形态规则，无明显的杂乱波动，多呈现出单峰结构或双峰结构，且在信号波形上无明显的杂波叠加现象，波形轮廓清晰可辨。当检测人员操作检测探头沿环焊缝的长度方向缓慢移动，对未熔合缺陷所在区域进行连续检测时，未熔合缺陷的 UT 检测信号出现的位置具有连续特征，不会产生跳跃式的位置变化，能够持续稳定地在检测波形图中呈现。

2.2 气孔缺陷的 UT 检测信号特征

气孔缺陷主要是在环焊缝焊接过程中，熔池中的气体未能及时溢出，最终被凝固的焊缝金属包裹而形成的

缺陷，其在环焊缝内部多为圆形或椭圆形，且分布相对零散，无固定的分布规律。受这一结构特点影响，气孔缺陷对应的 UT 检测信号，表现出与未熔合缺陷明显不同的特征：在信号波幅方面，气孔缺陷的 UT 检测信号波幅整体处于偏低区间，这是因为气孔多为空心结构，超声波与气孔接触时，仅有气孔的内壁表面会产生反射，反射面积相对较小，导致反射信号的能量较弱，表现为波幅偏低。这一信号特征的形成，与气孔多为圆形或椭圆形、在焊缝中分布零散的结构特点直接相关，超声波与不同气孔接触时，反射面积差异较小，因此信号呈现出“小而散”的显著特点。

2.3 裂纹缺陷的 UT 检测信号特征

裂纹缺陷多是在环焊缝焊接后，受焊接残余应力、设备运行过程中应力集中等因素影响，焊缝或母材金属内部产生的线性开裂缺陷，其在环焊缝内部多呈线性延伸形态，裂纹表面粗糙且不规则，导致超声波反射界面复杂。从波形形态来看，裂纹缺陷的 UT 检测信号波形多呈多峰叠加结构，由于裂纹表面粗糙不规则，超声波在裂纹表面的不同位置会发生多次反射，形成多个反射信号，叠加后呈现出多峰形态；部分裂纹缺陷的检测信号还伴随有明显的旁瓣，进一步增加了波形的复杂性，与其他类型缺陷的波形形态有显著区别。当检测探头沿裂纹的延伸走向缓慢移动时，随着探头位置的变化，超声波与裂纹接触的深度也随之改变，因此裂纹缺陷检测信号的传播时间会随裂纹深度的变化而逐渐改变，呈现出连续渐变的特征；而信号波幅则会呈现出先上升至峰值、再缓慢下降的趋势，当探头移动至裂纹的最深部位或最宽部位时，超声波反射面积最大，信号波幅达到峰值，随后随着探头远离该部位，反射面积逐渐减小，波幅也随之缓慢下降。

3 风电塔筒环焊缝 UT 检测缺陷识别优化路径

3.1 强化信号预处理，削弱背景杂波干扰

首先可采用信号滤波技术，根据不同类型背景杂波信号的频率特征，选择适配的滤波方式，实现对杂波信号的针对性过滤。对于由母材晶粒反射产生的高频杂波信号，可采用低通滤波技术，设定合理的滤波频率阈值，将频率高于阈值的高频杂波信号过滤掉，同时保留缺陷信号中具有实际意义的中低频成分；对于由检测界面反射产生的低频杂波信号，则可采用高通滤波技术，过滤掉频率低于阈值的低频杂波，避免其与缺陷信号叠加，影响缺陷信号的识别。其次，需采用信号归一化处理技

术，对不同检测场景下采集到的 UT 检测信号进行标准化处理。由于在不同的检测批次、不同的检测时段，检测环境（如温度、湿度）、检测设备状态可能存在细微差异，导致相同缺陷在不同场景下产生的检测信号基准存在偏差，不利于信号的对比与辨析。通过信号归一化处理，可将不同场景下的检测信号统一转换至相同的信号幅度基准与频率基准，消除因检测环境细微差异导致的信号对比偏差，让不同场景下的缺陷信号特征具有可比性，进一步突出缺陷信号的核心特征，降低杂波干扰带来的识别难度。

3.2 建立信号参数关联逻辑，提升缺陷定性精度

首先需全面梳理不同类型典型缺陷（如未熔合、气孔、裂纹）的物理属性，与对应的 UT 检测信号核心参数（如波幅、衰减速度、传播时间、探头位置）之间的对应关系，构建“缺陷属性—信号参数”关联矩阵。例如，在判断缺陷类型时，可将“信号波幅高低”与“信号衰减速度”作为核心判断指标，形成组合判断逻辑：波幅中高、衰减缓慢，多对应未熔合缺陷；波幅偏低、衰减快速，多对应气孔缺陷；波幅偏高、衰减缓慢，多对应裂纹缺陷。在判断缺陷的深度与分布范围时，则可将“信号传播时间”与“检测探头位置”作为核心关联参数，结合超声波在环焊缝金属中的传播速度，通过公式计算得出缺陷的埋藏深度；同时根据探头移动过程中缺陷信号出现的连续位置范围，判断缺陷在环焊缝长度方向上的分布范围。通过上述关联逻辑的梳理与应用，形成一套标准化的信号参数判断体系，检测人员可依据该体系，结合实际采集到的信号参数，逐步推导缺陷的类型、深度与分布范围，减少因个人经验差异导致的主观判断误差，提升缺陷定性的精度与一致性。

3.3 适配环焊缝结构，调整检测技术参数

首先需根据环焊缝的实际厚度，优化超声波探头的角度与频率。对于厚度较大的环焊缝，需选择角度相对较小的探头，确保超声波束能够穿透焊缝全厚度，覆盖焊缝内部的关键区域，避免因探头角度过大导致超声波束无法到达焊缝深层，引发缺陷漏检；对于厚度较小的环焊缝，则可选择角度稍大的探头，提升超声波束在焊缝内部的反射效率，便于捕捉浅层缺陷信号。其次，需结合环焊缝的焊接坡口形式，调整超声波的传播路径。通过改变探头在环焊缝表面的放置位置与倾斜角度，优化超声波束在焊缝内部的传播方向，确保超声波束能够精准指向焊缝易产生缺陷的区域（如坡口根部、焊缝层

间),减少因焊缝不规则部位(如坡口边缘)对超声波束的阻挡与反射,降低额外杂波的产生,让缺陷信号能够更清晰地被检测系统捕捉,进一步提升缺陷识别的准确性。

4 风电塔筒环焊缝 UT 检测缺陷识别保障措施

4.1 制定标准化检测与识别规范

首先需明确 UT 检测信号采集环节的技术参数标准。具体包括:检测探头的移动速度标准,明确探头移动的最大与最小速度范围,避免因探头移动过快导致信号采集不完整,或移动过慢影响检测效率;耦合剂的使用标准,规定耦合剂的类型、浓度,以及涂抹的均匀度与用量要求,确保超声波能够顺畅地在探头与焊缝之间传播,减少界面反射杂波的产生;检测系统的参数设置标准,明确超声波的发射频率、增益水平等系统参数的设定范围,避免因系统参数设置不当导致信号失真或杂波增多。其次,需规范 UT 检测信号辨析与缺陷定性的操作流程。明确信号辨析的步骤,规定需先进行信号预处理、再开展信号参数分析的操作顺序;同时明确不同信号特征对应的缺陷判断依据,例如,明确不同波幅区间、不同衰减速度所对应的缺陷类型范围,不同传播时间对应的缺陷深度计算方法等,形成标准化的判断流程与依据体系。通过上述标准化规范的制定与执行,可确保所有检测人员在开展工作时均有章可循,有效提升缺陷识别工作的规范性与稳定性,减少操作与判断过程中的人为误差。

4.2 强化检测人员能力培养

首先需聚焦检测人员的信号特征辨析能力提升,开展针对性的技术培训。培训内容需涵盖:风电塔筒环焊缝 UT 检测中缺陷信号与背景杂波信号的核心差异,帮助人员清晰区分两类信号;不同典型缺陷(未熔合、气孔、裂纹)UT 检测信号特征的详细解读,结合波形图讲解各类缺陷信号的波幅、衰减速度、波形形态等特征的具体表现;信号预处理技术与信号参数关联逻辑的原理与应用方法,让人员不仅掌握操作步骤,更理解背后的技术逻辑,能够在实际工作中根据具体情况灵活应用。其次,需开展模拟实操训练,提升检测人员应对复杂场景的能力。搭建模拟不同环焊缝结构(不同厚度、不同坡口形式)、不同缺陷类型与分布情况的训练场景,让检测人员在模拟场景中开展 UT 检测操作,练习信号采

集、预处理、辨析与缺陷定性的全流程操作;同时设置包含大量背景杂波的复杂模拟场景,训练人员在杂波干扰较强的情况下,精准捕捉缺陷信号、辨析信号特征的能力。通过理论培训与模拟实操训练的结合,可全面提升检测人员的专业能力,确保其能够熟练掌握缺陷识别的优化方法,准确应对实际检测工作中的各类场景,为提升缺陷识别准确率提供可靠的人员保障。

5 结语

风电塔筒环焊缝 UT 检测工作的核心,在于精准把握各类检测信号的本质特征,科学优化缺陷识别的逻辑与路径,同时依托完善的保障措施,确保识别方法能够稳定落地。通过系统明确 UT 检测信号的基础构成,厘清缺陷信号与背景杂波信号的核心差异;深入剖析未熔合、气孔、裂纹等典型缺陷对应的 UT 检测信号特征,为缺陷定性提供清晰依据;优化“信号预处理—参数关联—技术适配”的缺陷识别路径,有效削弱杂波干扰、提升识别精度;完善“标准化规范—人员能力培养”的保障措施,确保优化路径稳定执行,可切实提升风电塔筒环焊缝 UT 检测的缺陷识别准确性。这一技术逻辑体系,既为风电塔筒环焊缝缺陷排查工作提供了清晰的技术方向,也为风电设备长期稳定运行安全筑牢了关键的检测防线,最终实现了 UT 检测技术逻辑与风电塔筒环焊缝检测实际需求的高度契合,具备重要的实践价值与应用意义。

参考文献

- [1] 祖平文,许帅,张向军,等.风电机组塔筒焊接缺陷在线修复技术[J].设备管理与维修,2023,(12):113-116.
- [2] 杨昊.风电塔筒的可靠性分析与检测技术研究[D].沈阳工业大学,2023.
- [3] 王康技,何康.风电塔筒的焊接和表面缺陷对防腐蚀的危害及修整方法[J].材料保护,2019,52(08):166-170+185.
- [4] 华绪银.反向平衡法兰风电塔筒制作工法[J].中国新技术新产品,2020(09):60-62.
- [5] 王冠,李晨,张雪,许红,王鑫,迟绍宁.风电塔筒地脚螺栓断裂失效分析[J].现代制造技术与装备,2019(11):88-90.