

基于超声与磁粉检测的压力容器焊缝典型缺陷识别与分析

姓名：刘全乐

单位：中国石油兰州石化公司工程质量监督站

邮编：730060

摘要：压力容器焊缝是结构失效的高发部位，单一检测方法易出现漏检、误判问题。本文结合一线无损检测实践经验，梳理了压力容器焊缝的典型缺陷类型及危害，对比分析了超声检测与磁粉检测对不同缺陷的响应特征，总结了伪缺陷的实操排除方法，提出了双检测方法结合的工程应用优化策略。研究表明，两种检测方法具有极强的互补性，结合使用可有效提升缺陷识别的准确率，为压力容器焊缝的定期检验作业提供实用参考。

关键词：压力容器焊缝；超声检测；磁粉检测；缺陷识别

引言

压力容器作为承压类特种设备的核心品类，广泛应用于石油化工、电力能源、冶金加工等领域，长期承受压力、温度及介质腐蚀作用，焊缝作为结构连接的关键部位，是裂纹、未熔合等危险性缺陷的高发区。若缺陷未被及时检出，可能引发介质泄漏、爆炸等安全事故，造成人员伤亡与财产损失。现行承压设备无损检测标准中，超声检测与磁粉检测是焊缝检测的常用手段，但部分检测人员对两类方法的适用边界认识不足，单一方法检测的漏检率可达15%以上。本文基于实际检测经验，对两种方法的缺陷识别特征及联合应用策略展开分析，为一线检测作业提供实操指引。

1、压力容器焊缝典型缺陷及检测原理基础

1.1 焊缝常见典型缺陷分类及危害

压力容器焊缝缺陷主要分为四类：一是气孔，为焊接过程中气体未及时逸出形成的体积型缺陷，单个气孔对力学性能影响较小，密集型气孔会降低焊缝强度，近表面气孔易引发介质渗漏；二是夹渣，为焊接熔渣残留形成的缺陷，形态多为不规则条状或颗粒状，易产生应力集中，加快介质腐蚀速度；三是裂纹，为焊接应力或工艺不当引发的面型缺陷，具有扩展特性，是危害性最高的焊缝缺陷，极易引发容器开裂失效；四是未熔合，为焊缝与母材或焊层之间未完全熔化结合形成的面型缺陷，承载时易出现应力集中，是重点防控的危险性缺陷。

1.2 超声检测的核心原理与适用场景

超声检测依托高频声波在介质界面的反射特性实现缺陷定位定量，现场作业中多采用K值斜探头沿焊缝两侧扫查，耦合剂通常选用工业浆糊或机油，无需对工件做额外拆解，适合厚度超过2mm的铁磁性及非铁磁性压力容器焊缝检测。该方法对内部埋藏的面积型缺陷识别灵敏度较高，可准确测量缺陷的埋藏深度、当量尺寸，但对表面及近表面的微缺陷识别精度较低，易受工件表面粗糙度、耦合效果的影响。

1.3 磁粉检测的核心原理与适用场景

磁粉检测仅适用于铁磁性材料焊缝，依托缺陷处的漏磁场吸附磁悬液中的磁粉形成可见磁痕，现场作业多采用湿磁粉法，以煤油作为磁粉载液，对表面开口及深度不超过2mm的近表面缺陷识别精度远高于其他检测方法，尤其适合检出常规超声容易遗漏的表面微裂纹。该方法操作简便、缺陷显示直观，但无法检测非铁磁性材料，也无法识别埋藏深度超过2mm的内部缺陷。

2、超声与磁粉检测的缺陷识别特征比对分析

2.1 体积型缺陷的双检测方法响应特征

气孔在超声检测中多呈现为点状孤立回波，波幅较低，探头平移时回波出现与消失的过渡区间较窄，转动探头时回波信号无明显变化；若为密集型气孔则会出现一簇高低不等的点状回波，焊缝底波会出现明显衰减。磁粉检测中表面气孔呈现为圆形或椭圆形点状磁痕，边界清晰、弥散分布，近表面气孔的磁痕则相对模糊，形状不规则。夹渣的超声回波形态不规则，波幅随夹渣成分差异较大，斜探头多方向扫查均能检出回波；表面夹渣的磁痕多为不规则条状或颗粒状，磁痕堆积较松散，擦除后重新磁化磁痕会明显变淡。

2.2 面积型危险缺陷的识别特征差异

裂纹作为危害性最高的焊缝缺陷，超声回波陡峭、波幅较高，探头沿缺陷走向平移时回波连续，转动探头时回波会快速下降甚至消失，部分埋藏裂纹还会出现多次反射波。磁粉检测中裂纹的磁痕特征明显，多为线性或树枝状，两端尖细、边界清晰，磁粉堆积密集，擦除表面磁粉后重新磁化仍会在原位置出现相同磁痕。未熔合缺陷的超声回波较为稳定，沿焊缝熔合线方向扫查时回波连续性强，波幅通常高于夹渣；若未熔合延伸至焊缝表面，磁粉检测会呈现为沿熔合线分布的平直线性磁痕，无明显分支，磁痕宽度均匀。

2.3 伪缺陷的区分与排除方法

超声检测中的伪缺陷信号多来自耦合不良、探头磨损、工件表面氧化皮凸起等，笔者在实践中总结的排除方法为：首先打磨检测面去除氧化皮，重新涂抹耦合剂后复探，若信号消失则为耦合伪缺陷；若仍存在信号则更换同参数新探头扫查，信号消失则为探头磨损导致的伪信号。磁粉检测的伪磁痕多来自表面油污、磁化电流过大、工件截面突变等，排除方法为：打磨清洁检测面后降低磁化电流交叉磁化，若磁痕消失则为伪缺陷，若仍存在则需结合超声检测做进一步验证。

3、双检测方法结合的工程应用优化策略

3.1 检测流程的先后次序优化

现场检测中应按照“先磁粉后超声”的次序安排作业，一方面磁粉检测需要清洁的工件表面，先开展磁粉检测可避免超声耦合剂污染工件表面影响磁粉检测效果；另一方面磁粉检出的表面缺陷可作为超声检测的定位参考，帮助检测人员区分表面回波与内部缺陷回波。针对壁厚小于 6mm 的薄壁压力容器，可优先采用磁粉检测全覆盖，对磁粉检出的可疑区域再辅以超声检测确认内部延伸情况；针对壁厚超过 20mm 的厚壁容器，可采用两种方法同步交叉作业，提升检测效率。

3.2 缺陷定性的交叉验证方法

缺陷定性时需结合两种检测的结果交叉验证：若磁粉检测检出线性可疑磁痕，需用超声扫查对应位置的缺陷深度、内部延伸长度，判断缺陷为表面微裂纹还是埋藏裂纹，避免误将表面划痕判定为有害缺陷；若超声检测检出高波幅面积型回波，需在对应焊缝表面做补充磁粉检测，确认缺陷是否存在表面开口，表面开口的裂纹、未熔合属于极高风险缺陷，需按照现行规范要求立即返修，无表面开口的埋藏缺陷则可结合容器的压力等级、工况条件评估是否需要返修。

3.3 检测结果的记录与归档规范

检测结果的记录需同时覆盖两种方法的核心参数：磁粉检测需记录磁化方式、电流强度、磁悬液浓度、灵敏度试片型号，磁痕的位置、长度、形态要附手绘示意图；超声检测需记录探头频率、K 值、耦合剂类型、扫查方式，缺陷的埋藏深度、当量尺寸、回波特征要明确标注。所有记录需由两名持证检测人员签字确认，归档后至少留存至容器下一个检测周期，为后续定检提供对比依据，避免重复检测或漏检。

结束语

超声检测与磁粉检测在压力容器焊缝缺陷识别中具有极强的互补性，前者对内部埋藏缺陷的定位定量精度高，后者对表面及近表面缺陷的识别灵敏度高，二者结合使用可有效降低

单一检测方法的漏检率、误判率。在一线检测作业中，检测人员需熟练掌握两类缺陷的特征差异，优化检测流程，通过交叉验证提升缺陷定性的准确性，为压力容器的安全运行提供可靠的技术支撑。后续可进一步总结不同工况下的缺陷特征库，逐步形成标准化的双法检测作业指引，提升行业整体检测水平。

参考文献：

[1]胡利晨,黄辉,王红源,等.全聚焦相控阵超声检测技术在球罐定期检验中的应用[J].化工装备技术,2023,44(4):4-7.

[2]黄辉,柴军辉,张子健,等.丙烯球罐焊缝磁粉检出裂纹统计与原因分析[J].焊接技术,2023,52(7):99-102.

[3]郭宗浩,汪春晓,张岩,等.反应堆压力容器接管与筒体焊缝超声检测技术研究[J].无损探伤,2023,47(6):31-34.