

# 特种设备焊接结构疲劳裂纹扩展规律及在线无损检测技术研究

胡革春<sup>1</sup> 王贞琼<sup>2</sup>

1 湖北特种设备检验检测研究院, 湖北武汉, 430060;

2 湖北特种设备检验检测研究院孝感分院, 湖北孝感, 432100;

**摘要:** 特种设备焊接结构疲劳裂纹失效成为限制工业生产效率, 影响公共安全的主要难点, 传统防控方法由于裂纹机理认知浅, 检测手段单一等原因, 无法满足复杂多变的设备运行状况需求, 在线无损检测技术具有实时监测、精准识别、动态预警这些长处, 给特种设备焊接结构疲劳裂纹防控带来新的解决办法, 文章先讲特种设备焊接结构疲劳裂纹防控存在的问题, 再深入讲解在线无损检测技术在裂纹规律研究、精准识别隐患、构建预警体系这三个方面的关键作用, 剖析技术使用时要注意的地方和改进方向, 从而为加强特种设备焊接结构安全管控能力, 创建智能安全防护网络供应可资借鉴的经验。

**关键词:** 特种设备; 焊接结构; 疲劳裂纹扩展; 在线无损检测; 安全预警

**DOI:** 10.64216/3080-1508.26.03.063

## 引言

工业化进程不断加快, 特种设备向大型化、高参数方向发展, 焊接结构疲劳裂纹失效现象愈发严重, 这既令设备运行风险升高, 维护成本上升, 又致使生产中断、人员伤亡等诸多连锁后果, 成了工业高质量发展的重大阻碍。以往防控疲劳裂纹往往凭借经验判断并实施局部检修, 比如定期离线检测、裂纹修补或者更换部件等措施, 这些方法存在精准度差、反应迟缓以及只是治标不治本之类的问题, 很难从根本上解决裂纹失效困扰, 不过如今在线无损检测技术飞速发展, 给特种设备焊接结构疲劳裂纹防控带来技术层面的支持。整合裂纹扩展、设备工况、材料特性、环境影响等大量源头数据之后, 在线无损检测技术可以做到随时感知裂纹发展情况, 精确剖析裂纹成因, 并制订出科学合理的应对策略, 从而促使疲劳裂纹防控由过去的消极等待转为积极预测, 再精确采取行动, 深入探究在线无损检测技术应用于特种设备焊接结构疲劳裂纹防控的途径, 找出技术应用过程中的主要难点, 这对于优化特种设备安全管控的现代化水平有着十分重要的意义。

## 1 特种设备焊接结构疲劳裂纹防控的痛点与在线无损检测技术的适配价值

### 1.1 传统疲劳裂纹防控的核心痛点

传统特种设备焊接结构疲劳裂纹防控模式受限于技术手段和管理理念, 存在三个主要难点, 无法符合现

代特种设备安全管控的需求, 其一, 裂纹感知滞后, 防控缺少足够的依照: 传统裂纹检测大多依靠定期离线检测、人工巡检等方法, 这些方法存在检测间隔长、覆盖范围有限、不能及时更新等问题; 其二, 检测大多集中于关键部件、主干道焊缝等重要区域, 对于隐蔽部位、复杂接头等区域的裂纹状况感知不够; 其三, 检测大多关注裂纹尺寸、位置等基本指标, 未将裂纹扩展速率、设备工况、材料老化等大量数据融合起来, 造成防控决策没有全方位、精确的数据支持, 很难抓住裂纹失效的关键原因; 其四, 防控反应迟缓, 控制效率低: 传统疲劳裂纹防控常常采取“裂纹萌生-人工察觉-措施执行”这样的被动应对模式, 从裂纹扩展到防控措施落实之间有较大时间间隔, 常常会错过理想的控制机会。

### 1.2 在线无损检测技术的核心适配价值

在线无损检测技术具备实时监测、精准识别及动态预警这些核心能力, 可以精确解决传统防控存在的问题, 给疲劳裂纹防控给予全方位支持, 它的适配价值主要表现在三个方面, 一是达成全面裂纹状态的感知与追踪, 在线无损检测技术能整合多种来源的监测数据, 比如裂纹扩展数据、设备运行工况、材料性能参数、环境影响数据等等, 冲破数据隔离的情况, 形成起全面又随时更新的裂纹状态感知网络, 经由对这些数据的综合分析, 就能准确描绘出焊接结构裂纹发展的整体状况, 做到从局部检测向全域感知的过渡, 从而给防控决策赋予全面的参考。依靠在线无损检测的即时分析及预测功能, 可

以及时察觉裂纹萌生的时间、地点以及扩展速率,并精准剖析裂纹产生的原因,比如交变载荷作用、焊接缺陷或者腐蚀介质侵蚀等情况,促使裂纹防控体系朝着协同化和智能化方向发展,冲破部门之间的隔阂,推动防控举措相互配合协作。

### 1.3 在线无损检测技术在疲劳裂纹防控中的应用逻辑

在线无损检测技术应用于特种设备焊接结构疲劳裂纹防控时,其核心逻辑在于塑造“裂纹感知-分析研判-精准防控-效果评定”这样的循环防控体系,从而达到疲劳裂纹防控的科学化、精准化与智能化目标,依靠多源数据感知,整合各种监测数据之后,可以全方位把握焊接结构裂纹发展的动态情况;把裂纹分析研判当作重点,利用数据挖掘、数值模拟等技术,精确找出裂纹成因,预判裂纹扩展走向,给防控决策赋予科学按照;将精准防控看作要点,遵照分析成果制订不同、具有指向性的防控方案,做到对疲劳裂纹的精准控制;把效果评价当成支撑,凭借在线无损检测技术来观测防控方案的执行状况,归纳经验并改善防控方案,创建起循环防控模式,不断改进疲劳裂纹防控的水准。

## 2 在线无损检测技术在特种设备焊接结构疲劳裂纹防控中的核心应用

### 2.1 疲劳裂纹扩展规律的全维度感知与分析

疲劳裂纹扩展数据要全面获取并分析,这属于在线无损检测技术应用的基本情况,经由塑造多源裂纹监测体系,可以做到对裂纹发展状况全域、随时、精确地感知,多源裂纹数据采集依靠各种检测终端来创建起全面的裂纹数据采集网络,在结构表面,利用超声检测、磁粉检测、红外热成像这些设备来收集裂纹位置、尺寸、扩展速率等即时的裂纹数据;对于结构内部,凭借相控阵超声、射线检测等技术来采集内部裂纹的深度、形态等数据;就运行工况而言,依靠传感器设备来收集交变载荷、环境温度、腐蚀介质等影响裂纹扩展的外部数据;还要整合材料性能、焊接工艺、运行年限等基础数据,从而形成全面的裂纹数据资源库。数据清洗与标准化处理:多源裂纹数据存在不少问题,比如格式不统一、数据质量参差不齐、多余信息过多等,所以要用专业技术做清洗和标准化处理,采用数据清洗算法,去掉错误数据、重复数据、异常数据,改善数据质量;制订统一的数据标准,把不同来源、不同格式的数据转成标准形式,保证数据的适配性和一致性;利用数据融合技术,把立

体度的数据联系起来整合,创建起完整的裂纹发展数据库,给后续的分析应用打下基础。裂纹数据要以可视化形式表现出来,把复杂的裂纹数据变成直观的图表或者模型之类的,从而做到裂纹发展情况的可视化显示。

### 2.2 裂纹隐患精准识别的技术应用

在线无损检测技术给疲劳裂纹隐患的精准识别给予了关键支持,可以做到对裂纹状态实施精准监测,对裂纹趋势展开精准预测,制订出恰当的防控措施。针对裂纹状态执行精准监测:利用信号处理、图像识别这些技术,深入分析裂纹监测数据,精确识别裂纹的萌生、扩展和失稳等不同状态,经由分析裂纹尺寸、扩展速率等数据,区分裂纹是处于早期萌生阶段、稳定扩展阶段还是失稳扩展阶段;借助分析设备工况数据,找出影响裂纹扩展的关键因素,比如交变载荷幅值、环境温度变化等,从而为裂纹防控赋予定向的目标。裂纹趋势可精准预测,依靠历史裂纹数据并结合即时监测数据形成预测模型,以此来精准判定裂纹扩展走向。利用机器学习算法,并考虑材料性能、工况条件、环境影响等要素,创建短期、中期和长期的裂纹扩展预测模型,可预先几小时到几个月判断裂纹何时会达到临界尺寸及其风险程度;而且,经由模拟不同防控措施下的裂纹发展状况,预估措施的实际效果,进而为防控方案的抉择给予科学依照。

### 2.3 特种设备安全防护系统的智能化优化

在线无损检测技术可做到对裂纹隐患精确识别,并从系统角度改善特种设备安全防护体系,从根本上防止裂纹失效事故产生,设备运维策略优化方面,经由分析裂纹扩展规律和设备工况数据,找出设备运行的薄弱环节,从而给设备运维计划的制订供应科学按照。借助分析裂纹分布情况和扩展速率,确定重点监测部位和检测频次,进而指导针对性的维护检修工作;而且,借助分析裂纹防控效果数据,优化检修工艺和防控措施,提升运维工作的效率和精准度,降低设备运维成本。安全预警系统智能运作方面,则依靠在线无损检测的即时分析功能形成自适应预警机制,达成预警阈值的动态改良。时时收集裂纹监测数据,用专业算法算出理想的预警阈值,自动调节预警等级、响应流程等参数,使之符合即时的裂纹发展情况,从而提升预警系统的响应效率。安全管控智能化升级方面,凭借在线无损检测平台,可以向设备管理人员给予精确的裂纹安全信息,指导其合理安排运维工作以降低安全风险。依托监控平台、移动终

端、预警装置等渠道,及时传递裂纹发展情况、风险等级、应对措施等信息,助力管理人员快速响应裂纹隐患,采取高效防控措施;借助分析裂纹历史数据,给出针对性的运维建议,比如推荐裂纹修复方案、提醒设备更换周期等,指导管理人员优化运维安排,提升特种设备安全管控水平。

### 3 在线无损检测技术应用中的关键问题与优化路径

#### 3.1 技术应用中的核心问题

在线无损检测技术应用于特种设备焊接结构疲劳裂纹防控时会碰上一些关键问题,这些问题限制了该技术效能的完全发挥,其一,数据共享壁垒未被彻底打破,尽管在线无损检测技术具有整合数据的能力,但裂纹监测数据散落在各个企业、监管部门手中,受数据安全、利益分配等因素的影响,数据共享机制还不够完善,于是企业之间、政企之间仍然存在数据壁垒,造成裂纹数据无法做到全面整合并高效利用,从而影响到防控决策的科学性和精准性。其二,检测精度和安全风险一同存在,在复杂工况下,检测信号易受干扰,导致微小裂纹识别精度不足,影响检测结果的准确性;而且,特种设备运行环境复杂,高温、高压、腐蚀等恶劣工况会影响检测设备的稳定性和使用寿命,增加检测设备的安全风险,怎样协调好检测精度和设备安全成了技术应用的一大难题。

#### 3.2 技术应用的优化路径

要想解决在线无损检测技术应用中的关键问题,就要从机制、技术、人员这三个方面形成改进途径,从而改善技术应用的效果,创建完善的数据共享与治理机制:塑造起跨企业、跨政企的裂纹数据共享机制,清楚界定数据共享的范畴、标准以及流程,冲破数据隔阂,达成裂纹数据的全方位整合;还要制订数据治理准则,明确数据采集、存储、使用的负责方及其管理需求,保证数据依法依规得到运用,创建数据共享的奖励机制,促使企业、科研机构加入到数据共享当中来,充实数据的源头。加强对检测精度和设备安全的把控并实施防护措施:改良检测信号处理算法,并配合多技术融合检测来改善微小裂纹识别精度,保证检测结果准确无误;加大专用检测设备研发及应用力度,利用耐高温、抗腐蚀、抗干扰等技术提升检测设备的环境适应性;制定设备安全管理制度,明晰设备运维职责,全面监督检测设备的运行

状态,规避设备故障、检测失效等风险,做到检测精度和设备安全相协调。

#### 3.3 技术应用的未来发展趋势

技术持续更新之际,在线无损检测技术应用于特种设备焊接结构疲劳裂纹防控将会向着更为智能、协同且可靠的方向发展,它要同人工智能技术深度融合,当在线无损检测和人工智能技术相互交融之后,就能达成疲劳裂纹防控的智能提升效果,依靠人工智能算法具有深度学习的能力,可以更为精确地预判裂纹扩展走向并优化防控策略;而且,随着物联网、数字孪生技术逐步普及开来,会生成更多的立体度裂纹信息,从而让裂纹防控变得更精准、效率更高。创建全面协同的防控体系,凭借在线无损检测平台,把裂纹防控同设备运维、安全监管、应急救援等范畴紧密结合,形成起全面协同的特种设备安全管控体系,经由数据来剖析裂纹发展和设备运行之间的本质联系,做到防控措施和运维计划的协同优化,从根本上降低裂纹失效风险,促使工业生产向安全可持续方向发展,以绿色高效为导向的技术改良:在线无损检测技术更多着眼于绿色运维的发展,借助对裂纹数据和运维成本的分析,准确找出最优运维方案,进而优化设备运维流程,降低能耗和污染物排放,引领工业生产采取绿色高效的运行方式。

### 4 结语

在线无损检测技术给特种设备焊接结构疲劳裂纹防控带来新的技术手段和防控思路,其依靠全面的裂纹状态感知,做到精准识别裂纹隐患,并优化安全防护系统,这些核心应用可有效解决传统防控模式存在的问题,日后,伴随在线无损检测同人工智能、物联网等技术深度融合,特种设备焊接结构疲劳裂纹防控将会形成全域协同、智能精准且绿色高效的防控体系,从而给工业生产创造更安全、更高效又可靠的运行环境,推动工业向高质量方向发展。

#### 参考文献

- [1] 李伟,陈小超. 特种设备检测机构在大数据背景下加快信息化建设的必要性[J]. 特种设备安全技术, 2024, (02): 59-60.
- [2] 张俊超. 特种设备检验中无损检测技术应用研究[J]. 中国设备工程, 2019(9): 104-105.
- [3] 魏正祥. 探讨承压类特种设备无损检测现状[J]. 中国金属通报, 2019(7): 138-139.