锅炉压力容器压力管道检验中常见裂纹问题及预防措施

王建军
内蒙古自治区特种设备检验研究院　内蒙古　呼和浩特　010020

摘　要：承压设备长期复杂运行环境下易产生各类裂纹缺陷，直接影响设备运行稳定性与使用安全性。本文梳理锅炉、压力容器及压力管道常见裂纹的形态与分布特征，从力学载荷、温度工况、材质加工、运行介质四个维度，系统剖析裂纹萌生与扩展的主要诱因，结合设备运行实际工况，提出载荷温控优化、工艺质量管控、介质防护及常态化运维检验等针对性防控手段，可有效抑制承压设备裂纹病害滋生与延伸，保障特种设备安全稳定运行。

关键词：锅炉；压力容器；压力管道；裂纹缺陷；防控措施

引言：锅炉、压力容器、压力管道属于工业生产中的核心承压特种设备，广泛应用于各类工业生产场景。设备长期承受压力波动、温度变化及介质冲刷侵蚀，金属结构易产生疲劳损伤与开裂缺陷。裂纹作为高发、危害性极强的设备缺陷，会逐步破坏结构完整性，弱化设备承压性能，引发各类安全隐患。规范识别裂纹类型、找准缺陷产生诱因、落实常态化防控工作，是维系特种设备平稳运行的关键，也是提升工业生产安全管控水平的重要抓手。

1 锅炉压力容器压力管道常见裂纹类型及分布特征

1.1 表面裂纹

表面裂纹形成于锅炉、压力容器、压力管道的内外裸露壁面，完全暴露于设备表层，形态多为细长线状、网状或断续纹路，开口浅、延展直观。锅炉表面裂纹多发于锅筒外壁、水冷壁及受热面表层。压力容器裂纹常见于筒体壁面、封头外表面等承压裸露区域[1]。压力管道裂纹主要出现在直段外壁与露天敷设管段表层。设备工况差异造就裂纹形态区别，锅炉高温环境易催生细密网状裂纹，压力容器裂纹多为规整长线状，管道裂纹沿轴向或环向延展。工作人员可通过目视及表层检测方式直接检出该类缺陷。

1.2 埋藏裂纹

埋藏裂纹处于设备壁厚内部，封闭于基材当中，不延伸至设备表面，属于隐蔽性承压缺陷。裂纹多为扁平片状、椭圆状或细短裂隙，集中分布在设备壁厚中层位置。设备壳体基材、管道管壁中层、焊缝内部基材都是该类裂纹的主要滋生位置。壳体设备裂纹多分布在均匀壁厚的主体承压区，管道裂纹成型于管壁实心基材内部。常规目视检查无法发现该类缺陷，需借助专用内部检测技术完成筛查定位。

1.3 焊缝裂纹

焊缝裂纹包含焊接成型时产生的原生裂纹和设备运行中产生的次生裂纹，全部集中在设备焊接接头区域。焊趾裂纹形成于焊缝与母材交接位置，沿焊缝边缘轮廓延展。焊根裂纹位于焊缝打底根部，藏于接头内侧，易穿透局部焊接层。层间裂纹产生于多层焊接的融合区域，形态细碎、分布零散。焊接工艺和运行状态会改变裂纹成型形态与位置，依托焊缝专项检测技术精准排查各类焊接缺陷。

1.4 应力集中裂纹

应力集中裂纹产生于设备结构突变位置，转角、开孔、变径段、接管连接处均为高发部位。结构突变会聚集局部承压应力，长期荷载作用下引发开裂。裂纹初始形态短小尖锐，起裂于应力峰值点位，随设备运行持续向外扩展。载荷波动会改变裂纹扩展速率，结构异形位置开裂问题更为突出，专项点位排查可高效防控该类开裂隐患[2]。

2 锅炉压力容器压力管道裂纹产生的核心诱因

2.1 力学载荷因素诱发裂纹

承压设备长期处于动态力学环境中，各类载荷持续作用于基材与焊接结构表层及内部。设备频繁启停会产生交变载荷，反复拉扯、挤压设备本体结构，逐步消耗材料疲劳强度。稳定运行阶段的持续承压状态，会让设备固定区域长期维持应力紧绷状态，造成材料内部晶体结构缓慢损伤。工况异常时出现的局部过载，会瞬间超出材料额定承载极限，破坏基材内部组织结构。各类力学作用会先让设备内部产生微观孔隙与微小裂隙，持续的载荷冲击会不断拓宽、延伸裂隙通道，推动微观缺陷逐步发展为宏观裂纹，彻底破坏设备承压结构完整性。

2.2 温度工况因素诱发裂纹

设备运行全程伴随温度动态变化，温度波动会直接改变金属材料的物理性能与结构状态。设备启停阶段会

产生大幅温差，单次温变幅度超过80℃时，设备壁面会产生不均匀热胀冷缩，约束应力会集中在结构薄弱区域。运行过程中的温度起伏，会让金属材料反复经历膨胀与收缩循环，弱化材料韧性与抗裂能力。局部过热问题会造成小范围材质退火软化，局部温度超标100℃以上会大幅降低结构承载能力。低温环境下设备会出现冷脆现象，金属材料韧性急剧降低，脆性特质显著提升。温度引发的材质形变与性能衰减，会直接打破结构受力平衡，推动裂纹在薄弱区域逐步生成。

2.3 材质与加工因素诱发裂纹

设备生产加工环节的各类缺陷，会为后续开裂问题埋下固有隐患。基材生产过程中若材质均匀性不达标，内部会存在杂质、疏松等原生缺陷，大幅降低材料抗开裂能力。管材、板材裁切、折弯、成型加工过程中，不当工艺操作会造成表层损伤与内部结构错位。焊接作业的工艺参数偏差、操作不规范，会产生未焊透、夹渣等焊接缺陷。各类成型加工工序都会留存不同程度的残留应力，应力长期滞留于设备结构内部。结构缺陷与残留应力相互叠加，会持续弱化设备整体强度，外界工况稍有波动就会触发开裂问题。

2.4 运行介质因素诱发裂纹

承压设备内部长期流通水、蒸汽及各类工业介质，介质会持续作用于设备内壁金属结构。清水介质长期冲刷设备内壁，会逐步磨损表层金属，减薄设备壁厚，暴露内部薄弱基材。高温蒸汽会加速金属材质老化，改变表层组织结构，降低材料耐久性能。含腐蚀性成分的介质会缓慢侵蚀金属内壁，形成点状、片状腐蚀坑。腐蚀与磨损会持续破坏设备表层完整性，逐步形成微小缺陷。缺陷位置会持续聚集应力，不断拓展开裂范围，让初始微小损伤逐步延伸成贯穿性或表层裂纹。

3 锅炉压力容器压力管道裂纹针对性预防技术措施

3.1 优化设备载荷运行管控方式

承压设备日常运行的不规范操作，是诱发载荷类裂纹的主要人为诱因。建立标准化设备操作体系，细化设备启动、停运、升压、降压的全套操作步骤，明确各阶段操作节奏与执行标准。严格放缓启停阶段的压力升降速度，杜绝快速升压、骤然泄压的粗放操作模式。细化负荷调整的管控细则，根据设备额定承载性能平稳调节运行负荷，杜绝超负荷运行状态。精准把控设备运行过程中的载荷变化节奏，弱化工况切换带来的应力波动幅度[3]。稳定的载荷运行状态能够减少结构内部应力反复交变，规避局部应力集中堆积问题。规范的操作模式可以从运行源头规避力学损伤，有效阻断载荷作用引发的裂纹萌生与扩展。

3.2 规范设备温度工况调控标准

金属材质的开裂隐患与温度工况的无序波动存在直接关联，稳定的温度环境可以有效保护设备承压结构。制定明确的设备升降温速率管控标准，限定升温、降温的区间速度，杜绝温度骤升骤降的工况出现。全程监测设备运行温度状态，及时调整供热与散热配比，让设备整体壁面温度保持均匀一致。针对性排查设备易过热区域，做好局部散热与温控调节，消除局部高温过热的不良工况。规避大幅温差引发的不均匀热胀冷缩，减少结构内部产生的温度应力。稳定可控的温度工况能够保护金属材料固有韧性与强度，有效遏制温度应力诱发的材质开裂问题。

3.3 提升设备加工与焊接质量管控

设备生产加工与焊接环节的工艺缺陷，是设备投用后开裂故障的固有源头。优化构件裁切、折弯、成型等加工工艺，选用精细化加工方式，减少成型过程中产生的结构形变与表层损伤。增设成型后应力消除工序，通过专业工艺消解构件内部残留应力，还原金属材料稳定结构状态。统一现场焊接作业执行标准，规范焊前预处理、焊接过程操作、焊后修整的全流程工艺。精准匹配适配的焊接工艺参数，规避参数偏差造成的焊缝夹渣、未焊透、气孔等质量缺陷。细化焊缝成型质检流程，全面排查焊接区域细微缺陷。严苛的工艺管控能够夯实设备结构基础，彻底消除加工与焊接缺陷带来的开裂隐患。

3.4 强化设备介质环境管控防护

设备内部流通介质的腐蚀与冲刷作用，会持续损耗金属基材性能，逐步催生各类裂纹病害。落实介质常态化净化处理工作，针对设备运行用水、蒸汽介质开展专项水质优化，过滤介质内部杂质与有害成分。搭建完善的介质防腐防护体系，根据设备运行工况适配对应的防腐防护工艺与防护材料。定时清理设备内壁附着的污垢、锈蚀层，避免杂质长期附着造成局部腐蚀加剧。降低介质高速流动带来的内壁冲刷磨损，减缓金属表层材质损耗老化速度。阻隔腐蚀性介质与金属基材的长期接触，维持设备内壁结构完整性，有效抑制介质侵蚀引发的各类裂纹缺陷。

4 锅炉压力容器压力管道裂纹常态化防控运维管理

4.1 建立常态化专项检验机制

承压设备产生的各类裂纹都有相对固定的分布区域与生长规律，不同结构位置的开裂概率、缺陷隐蔽程度存在较大差异。结合设备整体结构特征与历年缺陷发生情况，梳理出锅筒、焊接接头、结构突变位置、管道弯

头等风险较高的重点区域，明确专属检验重点范围。参照设备运行年限、实际工况强度及介质腐蚀环境，制定分层、分周期的专项检验方案，科学安排检验频次与检查侧重点[4]。选用适配的检测技术，重点筛查埋藏裂纹、微细疲劳裂纹等不易发现的隐性缺陷，精准识别设备运行初期的微小开裂隐患。细化各部位的检验判定标准，明确缺陷识别细节，最大限度规避漏检、误检问题。有序推进专项检验工作，尽早发现处于萌芽阶段的裂纹缺陷，为后续缺陷治理争取充足处置时间。

4.2 优化设备日常运维操作规范

日常运维过程中的不规范操作，会不断累积结构损伤，慢慢诱发各类裂纹病害。系统梳理设备全流程运维作业内容，细化日常巡检的检查点位、工作内容与检查频次，关键承压部位每日巡检不少于2次，全面掌握设备实时运行状态。明确设备启停、负荷调整、工况切换的标准化作业流程，细化每一项操作的执行标准与管控细则。完善设备停机保养流程，有序开展设备清洁、结构检查、状态封存等基础维护工作。汇总现场运维过程中频繁出现的不规范行为，建立长效纠错整改机制，及时纠正各类违规作业方式。严格把控整体运维质量，从日常操作源头减少裂纹滋生的各类隐患。

4.3 落实设备缺陷前置处理工作

承压设备裂纹会随运行时间持续拓展延伸，初期轻微损伤若不及时干预，会逐步发展为危险性极高的宏观裂纹。针对现场检验排查出的微细裂纹、表层磨损、局部结构损伤等轻微隐患，分类建立缺陷台账，详细记录缺陷具体位置、外观形态与发展趋势。结合设备承压设计标准与整体结构性能，制定科学的前置处置方案，选用匹配的修复处理工艺。对表层微细裂纹开展打磨修形，彻底清除裂纹起始缺陷点位。对存在应力集中的结构区域实施消应力处理，均衡设备内部应力分布状态。对出现轻微材质损耗的区域做补强修复，恢复设备原有结构承载能力。快速处理各类初期缺陷，有效遏制裂纹继续延展、持续恶化。

4.4 强化设备工况动态管控

设备运行工况出现无序波动，会加速裂纹生成，推动已有缺陷持续扩张升级。搭建完备的工况动态监测体系，对运行压力、工作温度、介质组分、介质流速等关键参数实施全程不间断监控。持续跟踪各项参数的变化趋势，精准捕捉小幅偏移、隐性异常等不易察觉的工况问题。对照设备额定运行指标，及时对异常工况做出微调矫正，让各项参数稳定维持在合理运行区间。跟随设备负荷变化节奏，灵活匹配温度、压力及介质输送状态，规避单一参数异常引发的结构性损伤[5]。长期维持平稳稳定的运行环境，保障承压结构状态稳定，从运行层面持续压制裂纹生成条件。

结束语

承压设备裂纹问题的防控属于系统性运维工作，贯穿设备生产加工、投用运行、日常检修全流程。各类内外因素叠加催生的裂纹缺陷，均可通过标准化工况调控、精细化工艺管控、常态化检验运维及前置缺陷处理实现有效把控。持续优化设备运行管控模式，细化裂纹防控举措，能够稳步降低承压设备开裂故障发生率，夯实特种设备运行安全基础，为工业生产有序开展提供可靠设备保障。

参考文献

[1]刘志朋.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题[J].今日自动化,2022(3):145-147.

[2]赵长龙,孔鹏.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析[J].山东工业技术,2023(4):87-90.

[3]陈文亮.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题[J].大众标准化,2025(8):170-172.

[4]霍佳玲.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题及处理措施研究[J].中国科技纵横,2025(5):72-74.

[5]张国杰.锅炉、压力容器及压力管道检验中裂纹问题研究[J].中国高新科技,2024(8):122-124.