

# 承压类特种设备检验疑难问题探讨

向登峰

宁波市特种设备检验研究院 浙江 宁波 315500

**摘要：**本文聚焦承压类特种设备检验环节涌现的疑难问题，开篇点明其重要地位与潜在风险，凸显研究必要性。深入剖析材料特性引发难题，涵盖高强度钢氢脆、不锈钢应力腐蚀开裂及异种钢焊接兼容性问题；解读复杂结构检验困境，探讨特殊工况挑战，像高温蠕变损伤测量、低温脆性转变温度监测；细究无损检测技术瓶颈。文末展望前沿技术融合、智能化诊断、跨学科协作及法规标准动态更新等解决路径，旨在为攻克检验难题、提升设备安全保障水平筑牢理论与技术根基。

**关键词：**承压类特种设备；检验；疑难问题；安全运行

引言：承压类特种设备，作为工业体系核心支柱装备，涵盖锅炉、压力容器（含气瓶）、压力管道等关键类别，在化工生产流程精准控温、高压反应环境维持，电力行业汽水循环能量转换，油气远程输送高压密封保障等复杂工况肩负重任，是现代产业集群不可或缺“动脉血管”与“动力心脏”。然而，长期承受高温、高压、强腐蚀介质侵蚀及复杂应力交变作用，设备材质劣化、结构损伤累积，安全性能如高悬“达摩克利斯之剑”，时刻威胁周边人员与设施安全。检验作为安全把关键防线，却常遇材料微观劣变隐匿、结构特殊部位难触、极端工况检测受限、无损检测精度瓶颈及老化设备隐患难察等棘手难题，深入研讨应对之策，是守护设备安全、防范灾难性事故、护航工业稳健前行的迫切使命。

## 1 承压类特种设备检验中的材料特性相关疑难问题

### 1.1 高强度钢的氢脆问题

高强度合金钢在承压设备制造中因卓越强度重量比备受青睐，广泛用于深海潜水器耐压壳、高压加氢反应器等严苛装备。但服役时接触含氢介质（湿硫化氢环境、电化学腐蚀析氢等）易诱发氢脆。氢原子侵入晶格间隙，局部压力骤升致微裂纹萌生，初期隐匿于材料内部，常规力学性能测试难察觉，无损检测超声、射线手段受限于氢脆裂纹微观尺度与取向，成像辨识度低；金相分析需精准定位取样，否则易遗漏，裂纹扩展具突发性，一旦临界断裂韧性突破，脆性断裂瞬间触发，引发灾难性后果，如高压管道爆裂、容器解体，精准监测与早期预警困难重重。

### 1.2 不锈钢的应力腐蚀开裂

不锈钢凭借优异耐蚀性活跃于化工、食品加工等腐蚀敏感领域，可特定介质条件（含氯离子溶液、高温碱液等）下，拉应力与腐蚀介质“狼狈为奸”，催生应力

腐蚀开裂（SCC）。裂纹沿晶界或穿晶扩展，形态曲折蜿蜒，微观分支复杂，传统表面检测方法易被腐蚀产物蒙蔽“双眼”，难以洞察裂纹真实走向；电化学测试虽能辅助评估腐蚀电位，却难精确界定SCC萌生临界条件；服役设备应力分布受制造工艺、结构突变影响混沌复杂，模拟计算与实际应力偏差大，难精准定位高风险SCC区域，设备“带病运行”隐患难消<sup>[1]</sup>。

### 1.3 异种钢焊接接头的兼容性问题

承压设备制造常遇异种钢焊接，如碳钢与不锈钢拼接于热交换器管板，不同金属热膨胀系数、化学成分差异滋生焊接缺陷“温床”。熔合区因元素稀释形成脆性相，力学性能陡降，受载易开裂；焊接残余应力复杂，热应力、相变应力交织，加剧接头劣化，常规无损探伤聚焦焊缝内部缺陷，对熔合区微观组织劣变监测乏力；长期服役异种钢接头电偶腐蚀突出，电位差驱动电流致腐蚀加速，腐蚀速率监测缺精准手段，接头完整性维系艰难，威胁设备结构连贯与密封性能。

## 2 承压类特种设备检验中的复杂结构相关疑难问题

### 2.1 多层包扎式压力容器的层间缺陷检测

多层包扎容器以薄板逐层包扎、预应力承载优势用于高压化工容器，层间贴合质量及缺陷隐匿性强。层间间隙微小，超声检测声波散射、衰减剧烈，信号失真难辨缺陷回波；射线检测胶片成像受层间重叠干扰，缺陷特征模糊，射线穿透多层板能量损耗大，深部缺陷曝光不足成像淡薄；涡流检测限于浅层探测，深层缺陷电磁感应微弱；层间缺陷扩展受预应力影响独特，常规寿命预测模型难适配，精准评估层间结构完整性挑战巨大<sup>[2]</sup>。

### 2.2 球罐接管区的应力集中检测与评估

球罐进出料接管区结构突变，应力集中系数飙升，成为疲劳裂纹高发地。接管与球壳焊接几何不连续，局

部应力远超设计压力数倍,理论计算应力集中值受焊接变形、残余应力干扰偏差大;应变片测量受限于测点布置密度,难捕捉应力集中全貌,高应变区贴片易脱落失效;有限元模拟网格质量、边界条件设定影响结果精度,复杂加载工况模拟失真;疲劳裂纹萌生受多轴应力控制,监测裂纹萌生起始难,预测裂纹扩展路径缺可靠模型,球罐接管区安全隐患排查艰难。

### 3 承压类特种设备检验中的特殊工况相关疑难问题

#### 3.1 高温环境下的蠕变损伤检测

高温承压部件(电站锅炉过热器、乙烯裂解炉管等)长期服役,蠕变损伤渐进累积,材料微观结构晶界滑移、空洞聚合,宏观管径胀大、壁厚减薄。高温服役限制接触式检测手段,常规超声耦合剂汽化失效、探头耐高温性差,信号衰减失控;电阻应变片高温漂移大、寿命短,难以长期稳定监测蠕变应变;非接触光学测量受炉内强光、烟尘干扰,成像精度打折;蠕变寿命预测模型依赖材料本构参数准确性,服役工况波动致参数多变,精准预测剩余寿命阻碍重重<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 低温环境下的脆性转变温度监测

低温液化气体储存输送设备(LNG储罐、液氮管道等)面临材料低温脆性风险,温度降至脆性转变温度(FATT)以下,韧性锐减,裂纹易脆性扩展。低温环境下传感器精度“跳水”,热电偶冷端补偿难精准实现,电阻温度计电阻-温度特性畸变;冲击试验模拟实际低温工况失真,小尺寸试样无法反映结构真实韧性;设备运行温降波动、热应力交变干扰FATT监测稳定性,难实时掌控材料低温韧性动态,脆性断裂预防棘手。

### 4 承压类特种设备检验中的无损检测技术相关疑难问题

#### 4.1 厚壁部件的超声检测盲区问题

承压设备厚壁构件(核反应堆压力容器、大型加氢反应器筒体)超声检测,近表面与底面存在盲区。声波在界面反射、折射复杂,近表面因探头近场效应干扰,微小缺陷信号淹没噪声;底面反射波与缺陷波混叠难分,盲区范围随壁厚增加而扩张,常规超声换能器难突破;聚焦探头虽能缩窄波束改善近表面分辨,却因聚焦深度限制顾此失彼,深层盲区仍存;相控阵超声技术虽有进展,可参数优化复杂,对操作人员技能要求超高,厚壁部件超声检测全方位覆盖困境待解。

#### 4.2 射线检测中的影像判读干扰问题

射线检测成像受设备结构、内部部件干扰乱象丛生。焊缝金属结晶不均、夹杂物使影像灰度不均,似缺陷“伪像”频出;容器内部支架、垫板等结构遮挡,射线衰减

差异致阴影重叠,真实缺陷隐匿其中;数字射线成像噪声、伪影清理算法不成熟,缺陷边缘模糊难辨;双壁单影、双壁双影等特殊透照技术影像畸变严重,缺陷定性定量误差大,复杂结构射线检测影像精准解析艰难。

### 5 承压类特种设备检验中的服役老化设备相关疑难问题

#### 5.1 长期腐蚀环境下剩余壁厚的准确测量

服役多年承压设备受腐蚀介质“啃噬”,壁厚渐薄。均匀腐蚀尚可依经验公式估算,局部腐蚀坑洼、沟槽形态各异,常规超声测厚受腐蚀面粗糙度、探头耦合影响,测量值波动大;电磁超声测厚虽无需耦合剂,可对薄涂层、不规则表面适应性欠佳;腐蚀坑底部微裂纹超声检测难,漏检致剩余强度高估;涡流阵列检测深层腐蚀分辨率低,难以绘制精确剩余壁厚三维图谱,设备承载能力评估失准<sup>[4]</sup>。

#### 5.2 疲劳裂纹萌生与扩展的跟踪监测

频繁启停、压力温度交变设备疲劳裂纹威胁大。裂纹萌生初期尺寸微小,表面检测手段(磁粉、渗透)灵敏度不及,深埋裂纹更是“漏网之鱼”;超声监测裂纹尖端衍射信号微弱,受材料晶粒结构噪声干扰,定位精度受限;声发射技术捕捉裂纹动态扩展信号,可信号源定位受波传播路径复杂性干扰,多裂纹源信号混叠难析;疲劳裂纹扩展速率受应力比、环境介质等多因素交织影响,预测模型难精准模拟实际工况,设备疲劳失效防控艰难。

### 6 解决承压类特种设备检验疑难问题的展望

#### 6.1 前沿技术融合创新

在承压类特种设备检验领域,前沿技术的融合创新将为解决疑难问题提供新的思路与手段。纳米技术与无损检测的融合就是一个值得期待的方向。通过将纳米传感器嵌入材料的微观结构中,我们可以实时感知氢原子浓度、微观应力变化等关键参数,从而实现对氢脆、应力腐蚀等潜在危险的早期预警。这种技术不仅能够提高检测的灵敏度,还能在设备运行过程中进行持续监测,确保设备的安全运行。太赫兹技术同样具有巨大的应用潜力。它能够穿透非金属涂层无损探测材料内部,捕捉到早期缺陷的信号,从而突破传统超声、射线检测技术的局限。太赫兹技术的引入将使我们能够更深入地了解设备的内部状况,及时发现并处理潜在的安全隐患。此外,激光超声技术也是一项值得关注的前沿技术。它能够在高温、复杂几何结构等恶劣环境下远程非接触地激发超声信号,降低耦合干扰,提高检测的准确性。通过多技术的交叉验证,我们可以进一步提升检测的精准度

与可靠性,为承压类特种设备的安全运行提供更加坚实的保障。

### 6.2 智能化检验诊断系统研发

随着大数据与人工智能技术的快速发展,构建基于大数据与人工智能的诊断平台将成为解决承压类特种设备检验疑难问题的又一重要途径。通过收集海量设备的历史检测数据、故障案例等信息,我们可以训练出更加精准的算法模型,实现缺陷的智能识别与故障的精准预测。机器学习算法在解析复杂检测信号方面具有独特的优势。它能够过滤掉噪声、甄别伪像,从而生成更加准确可靠的检测报告。这不仅将大大提高检验工作的效率,还能降低人为因素导致的误判风险。结合物联网技术,我们可以实时采集设备的运行参数,动态评估其安全状态。当设备出现异常时,远程专家系统可以迅速进行会诊,提供解决方案。这种智能化的检验诊断系统将使设备检验诊断工作步入快车道,为承压类特种设备的安全运行提供更加及时、有效的支持<sup>[5]</sup>。

### 6.3 跨学科协同攻关

在承压类特种设备检验领域,面对复杂多变的疑难问题,单一学科的知识往往难以提供全面的解决方案。因此,组建跨学科专家团队,进行协同攻关,成为了解决这些难题的重要途径。这样的团队应涵盖材料学、力学、检测技术、工程学等多个学科领域的专家。他们将从不同角度对承压类特种设备进行全面剖析,从材料的微观劣化机制开始,深入了解材料在长期使用过程中的性能变化,以及可能导致设备失效的根本原因。同时,结构力学响应建模也是关键一环,通过对设备在受力状态下的行为进行模拟和分析,可以预测其可能的失效模式和风险点。在检测技术方面,跨学科团队将致力于适配和优化现有技术,使其更加适用于承压类特种设备的检验需求。这包括探索新的检测方法,提高检测的准确性和可靠性,以及开发适用于特定环境和条件下的专用检测工具和设备。此外,产学研联合项目也是跨学科协同攻关的重要方式。通过高校科研资源的赋能,企业可以更加高效地解决面临的检验难题。同时,国际学术交流也将为团队带来新的理念和方法,促进技术的创新和升级。跨学科协同攻关的优势在于能够打破专业壁垒,实现知识和技术的互补与融合。

### 6.4 法规标准动态更新优化

法规标准是承压类特种设备检验工作的重要依据。随着技术的不断发展和事故的教训,法规标准也需要及时修订和完善,以适应新的检验需求和安全要求。首先,法规标准应紧跟技术发展的步伐,吸纳新型材料、复杂结构、极端工况等方面的检验新技术规范。这不仅可以提高检验的准确性和可靠性,还可以推动技术的进步和创新。其次,法规标准应细化风险分级管控准则。根据设备的重要性、风险程度等因素,制定差异化的检验策略,确保检验工作的针对性和有效性。同时,给予新技术应用法规支撑,鼓励创新技术的应用和推广。最后,定期与国际对标也是法规标准优化的重要一环。通过借鉴先进理念和方法,可以促进国内承压设备检验技术的规范化、国际化升级。这不仅可以提高我国在国际上的竞争力,还可以为设备的安全运行提供更加坚实的法治保障。

结束语:承压类特种设备检验疑难问题如荆棘缠绊设备安全运行之路,从材料微观隐秘劣变,到复杂结构隐匿缺陷,从特殊工况检测掣肘,到无损技术精度瓶颈,再到老化设备隐患迷藏,各环节挑战严峻。借前沿技术融合创新“利刃”破检测精度困局,智能化诊断系统“慧眼”察隐患早期迹象,跨学科协作“巨擘”解机理复杂难题,法规标准更新“护盾”保检验规范前沿,多管齐下,方能驱散检验阴霾,守牢设备安全底线,护航工业生产与民生福祉长治久安,推动承压设备产业向高安全、高质量、高技术层级稳健跃升。

### 参考文献

- [1]张伟.承压类特种设备检验中疑难问题分析及处理对策[J].中国特种设备安全,2024(03):45-47.
- [2]李明.承压类特种设备无损检测技术的应用与疑难问题探讨[J].设备管理与维修,2024(01):120-122.
- [3]王强.承压类特种设备检验中常见问题及质量控制措施[J].化工装备技术,2023(12):15-18.
- [4]赵敏.承压类特种设备检验技术现状及发展趋势探讨[J].中国设备工程,2023(11):234-236.
- [5]刘涛.承压类特种设备检验中的安全问题及防范措施[J].安全生产与监督,2023(09):38-40.