

锅炉压力容器检测中的常见事故及检验策略探究

李自然, 李运成, 刘先发

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060027

摘 要 : 工业生产中, 锅炉压力容器作为核心设备之一, 用于加热气体或液体, 并将其转化为蒸汽提供热能、动能。锅炉压力容器运行环境恶劣、复杂, 长期超负荷运转下性能下降, 做好锅炉压力容器检测工作至关重要。但由于锅炉压力容器自身特性及作业环境的复杂性, 易引发多种事故, 如何规避事故、提升检验质量, 成为企业重点关注的内容。文章围绕锅炉压力容器检测事故进行探究, 提出一系列检验策略以供参考, 以期保障锅炉压力容器安全稳定运行。

关 键 词 : 检验策略; 锅炉压力容器; 检测; 设备故障

Common Accidents and Inspection Strategies in Boiler and Pressure Vessel Inspection

Li Ziran, Li Yuncheng, Liu Xianfa

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

Abstract : In industrial production, boiler and pressure vessels are one of the core equipment used to heat gases or liquids and convert them into steam to provide thermal and kinetic energy. The operating environment of boiler and pressure vessels is harsh and complex, and their performance declines under long-term overloaded operation. Therefore, it is crucial to do a good job in boiler and pressure vessel inspection. However, due to the complexity of the boiler and pressure vessel's own characteristics and operating environment, it is easy to cause a variety of accidents. How to avoid accidents and improve inspection quality has become the focus of enterprises. This article explores the detection accidents of boiler and pressure vessels and proposes a series of inspection strategies for reference, aiming to ensure the safe and stable operation of boiler and pressure vessels.

Keywords : inspection strategy; boiler and pressure vessel; detection; equipment failure

锅炉压力容器作为一种特种设备, 投入运行后长期处于高压状态, 如果锅炉压力容器出现质量缺陷, 将诱发严重的安全事故, 带来不可估量的经济损失。锅炉压力容器通常应用在石油化工领域, 由于作业环境复杂、恶劣, 容易受到多种因素影响, 威胁到压力容器正常运行。因此, 生产企业为了保障锅炉压力容器安全稳定运行, 应定期检测锅炉设备运行状况, 选择合理有效的检验策略, 创设安全可靠的生产环境, 为企业生产活动安全有序进行提供坚实保障。

一、锅炉压力容器检测重要性

锅炉压力容器在现代工业生产体系中占据重要地位, 在化工、电力以及石油等领域广泛应用, 高质量检测锅炉压力容器具有重要意义。

(1) 提高设备运行可靠性。锅炉压力容器长期处于高压、高温等复杂环境, 伴随着锅炉压力容器运行时间延长, 设备容易出现一系列质量缺陷, 如, 变形、腐蚀、老化等, 定期检查设备缺陷, 制定针对性设备检修和维护措施, 有助于为锅炉压力容器设备安全稳定运行提供保障, 避免设备故障导致生产中断。以反应釜压力容器为例, 内部腐蚀缺陷检测不及时, 后期在高压作用下出现内部介质泄漏现象, 导致生产线停工, 后期重启生产线需要消耗更多的资源, 生产成本大幅度增加^[1]。

(2) 保障人员生命财产安全。锅炉压力容器出现安全事故, 对于人员生命财产安全会产生严重威胁。锅炉压力容器运行环境高温、高压, 内部涉及大量腐蚀、有毒有害介质, 可能产生高温蒸汽、爆炸、喷射等事故, 缺少有效防护将造成重大人员伤亡。因此, 通过合理、有效的检测工作, 便于及早发现事故萌芽, 并采用紧急维修和停工维护等方式扼杀隐患在萌芽状态, 为现场人员生命财产安全提供坚实保障。

(3) 保护生态环境。锅炉压力容器出现事故, 内部化学物质会泄漏到外部环境, 污染周边水体、土壤、大气环境。通过有效的压力容器检测工作, 有助于拦截有毒有害物质泄漏到自然环境中, 避免对生态环境污染破坏, 为生态系统平衡提供坚实保障^[2]。

二、锅炉压力容器检测中的常见事故分析

（一）有害物质威胁

锅炉压力容器检测中的事故类型多样，其中有毒物质威胁最为典型，将导致人员人身安全受到威胁。锅炉压力容器处理介质包含了强酸强碱、有毒有害以及易燃易爆等物质，设备一旦故障会导致大量有害物质泄漏，诱发不可估量的后果。化工生产中，部分压力容器存储大量腐蚀性强烈的溶液，设备内部受腐蚀导致防护层损坏，随着腐蚀加剧，最终出现穿孔现象，大量强酸、强碱溶液喷射而出，接触到人体皮肤和黏膜，会对人体产生严重的灼伤，如工作人员吸入过多有毒有害气体，同样会加剧身体器官损伤。在石油化工领域，压力容器多存储易燃易爆的油气资源，一旦锅炉开裂导致密封失效，可能接触火源引发火灾或爆炸事故^[3]。例如，2013年某石化公司油罐区爆炸，造成了巨大的人员伤亡与经济损失，其原因在于油罐呼吸阀故障，使得轻质油品挥发可燃气体大量聚集，接触明火后瞬间爆炸、燃烧。除了企业工作人员伤亡外，后期多名消防救援人员在扑救过程中牺牲。

（二）设备安全缺陷

锅炉压力容器的设备安全缺陷，表现为制造缺陷、材料缺陷以及生产缺陷等。设备制造环节，材料选择并未严格遵循设备运行压力、温度以及存储介质等时机特性，后期设备投入运行过程中承受不住工作压力而损坏。部分锅炉压力容器采用的钢材耐高温、耐高压性能不足，伴随着时间推移材料蠕变，强度下降，情况严重下导致设备完全损坏^[4]。制造缺陷类型多样，如，焊接过程中工艺不合理出现夹渣、气孔、裂纹等缺陷，后期锅炉运行中在温度、压力和腐蚀介质作用下，缺陷将进一步扩展，诱发严重安全事故，影响企业生产活动连续、安全进行。另外，高温、高压环境下，设备频发启停还会产生诸多新的缺陷。例如，锅炉受热面长期处于高温冲刷、腐蚀状态，锅炉内部会磨损变薄，达到一定程度无法承受压力后将破裂，诱发爆管事故。频繁压力下，筒体、接管连接区域会产生疲劳裂纹，处理不及时，裂纹会逐渐扩大化，诱发严重安全事故^[5]。

（三）电力和电磁辐射危险

复杂工业环境下，锅炉设备多配备了自动化控制系统、电气仪表以及电机设备等，这些电气设备运行中会产生电力、电磁辐射，一旦辐射强度超出设备承受标准，则为锅炉设备运行埋下隐患，威胁作业人员安全。例如，2021年某检测机构检测电阻值时，未能严格遵循 GB/T 13869-2017 要求布置双重绝缘保护，使得电源击穿检测仪器外壳，使得检测人员出现二级电击事故。通过事故调查了解到，便携式检测设备防护等级未达到 IP54 防护等级，接地电阻值实测值 8.6Ω ，超过标准的 4Ω ；未严格执行“一人操作、一人监督”制度^[6]。

强电磁辐射致使电子元件误动，采集的监测数据存在一定偏差。检测锅炉运行温度、压力等指标的传感器容易受电磁干扰，发出虚假信号，控制系统误动下威胁锅炉运行安全与稳定，甚至诱发超温、超压等安全事故^[7]。同时，部分单位并未设置安全防护距离，长期处于高频辐射环境中，可能出现神经衰弱等健康问

题。其根本原因在于辐射功率密度超出限值 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ ，检测舱体的电磁辐射屏蔽效能不足。

（四）运行生产和环境缺陷

锅炉在化工生产领域应用广泛，运行中可能由于空间资源不足，通风条件不畅，使得锅炉运行环境较为恶劣，无形中弱化了锅炉生产能力，对于企业生产成本控制同样产生了负面影响。部分企业的锅炉压力容器内部结构强度偏低，生产人员安全意识不足，运行中可能出现锅炉设备结构损伤，辐射泄漏后导致现场人员出现中毒事故。与此同时，部分沿海地区空气湿度高，并且伴有大量腐蚀性盐分，与锅炉压力容器接触会产生电化学腐蚀现象。一旦锅炉设备表面保温层受损，水分更容易侵入金属表面，加剧设备避腐蚀，腐蚀到一定程度后容易诱发爆炸或泄漏等事故，造成重大的人员伤亡和经济损失^[8]。

三、锅炉压力容器的检验策略

（一）提高锅炉压力容器质量

为了保障锅炉压力容器稳定、安全运行，提高锅炉压力容器质量，有助于从源头降低安全事故发生几率。具体从以下几点展开：

（1）材料选用。根据锅炉压力容器运行压力和温度等参数，选用合适的材料很有必要。对于长期处于高温、高压且介质腐蚀环境下的压力容器，适合选择耐腐蚀、抗高温、蠕变性能优良的合金钢材料。在确定合适材料基础上，充分市场调查选择高资质供应商，各批次材料的力学性能、化学成分等全面检验，规避劣质材料混入，保障设备质量和性能^[9]。

（2）优化指导工艺。锅炉压力容器制造工作中，焊接工艺占据重要地位，需要制定合理的焊接规程，明确焊接参数、方法以及流程等内容。焊接过程中依据标准、流程，运用自动化焊接设备进行焊接处理，避免人为主观意识干扰增加误差。焊接后使用超声波无限弹上技术进行检测，消除裂纹、夹渣、气孔等焊接缺陷^[10]。

（二）选择合适的检验方法

1. 常规检验

锅炉压力容器日常检验中，严格遵循 GB/T 30579-2014 规定，对锅炉压力容器目视检查，设备表面裂纹检出灵敏度在 0.55mm 以上，变形测量精度在 0.1mm 上下。使用小锤敲击设备，根据声音、弹力反馈和振动等情况，判断锅炉压力容器是否存在腐蚀、裂纹等缺陷，但细小的裂纹很难无法检出。采用白粉煤油检查法，在锤击法基础上检查裂纹的走向、大小。锤击发现设备表面存在裂纹时，使用砂布对表面清洁、打磨，涂抹一定量硝酸溶液侵蚀裂纹，等待一段时间后在表面上涂抹一层煤油， $20\text{min} \sim 30\text{min}$ 后，擦去煤油，涂抹百分在裂纹表面，使用小锤敲击裂纹周围区域，裂纹煤油则会析出，在白粉中留下明显的形状和走向痕迹，为后续维修提供依据。另外，使用拉线的方式可以检查设备弯曲度，或是区域是否存在鼓包现象，此种检查方式直观、简便，适合多数设备^[11]。

2. 射线检测

射线检测方法多应用于体积型缺陷检测中，基于 γ 射线和 X 射线穿透物体，不同物体密度不同，对于射线的吸收程度也不尽相同，根据这一原理可以在探测器上形成灰度不同的影响，缺陷检测灵敏度较高，具体参数如表 1。

表 1 射线检测技术参数

项目	传统胶片法	数字射线技术
灵敏度	2% ~ 3%	1% ~ 1.5%
分辨率	15LP/mm	25LP/mm
曝光时间	5min ~ 15min	0.3min ~ 3min
缺陷量化误差	$\pm 0.3\text{mm}$	$\pm 0.1\text{mm}$

运用射线检测方法检测锅炉压力容器的焊缝缺陷时，射线穿透焊缝，由于夹渣、气孔等缺陷区域密度远远低于正常焊缝金属，因此对射线的吸收能力较弱，探测器上的灰度影响较为明亮。根据影像特征分析，即可精准掌握缺陷大小、类型以及分布等情况。通常情况下，射线检测法多应用于锅炉压力容器角焊缝、对接焊缝检测中，即便是一些大型储罐拼接焊缝，射线检测技术仍然可以全面覆盖，为锅炉压力容器的焊缝质量提供保障。具体检测时，检验人员需要提前设定射线源和检测位置距离、角度等参数，获取清晰、全面的影像。同时，为了保障检验人员安全，采用射线检测方法时要做好安全防护，穿戴铅防护服，或是在内部建设铅屏蔽房，采集精准、全面的检验数据，为锅炉压力容器安全运行提供保障。

3. 超声波检测

超声波检测是一种无损检测方法，根据不同介质中超声波传播特性表现，检验压力容器缺陷。超声波传入到压力容器内部，遇到缺陷后发生折射或反射，收集这些折射或反射波，即可精准定位缺陷的位置、大小形状。具体检测中，检验人员需要在设备表面涂抹一定量的浆糊或凡士林，使得超声波探头和设备密切接触，避免部分声能损失影响检验精准度。探头根据预设轨迹在设备表面移动检测，发射、接收超声波信号。随着此项技术更新升级，现阶段的超声波检测技术采用了全聚焦法成像，分辨率提升 60%，并通过自适应滤波算法的引入，信噪比 $\geq 20\text{dB}$ ，检测灵敏

度较高，能够检出很多微小缺陷，并且不会产生辐射危害，适合广泛应用于锅炉压力容器检测领域。

4. 声发射检测

声发射检测技术，重点检测应力波变化情况。锅炉压力容器内部有缺陷，说道温度、压力等因素作用下，缺陷周围材料会发生局部结构形变，声发射接收这些弹性应力波信号，转化为电信号并输送到采集分析系统，通过持续分析信号频率、幅度等参数，在此基础上精准判断缺陷类型以及具体位置。例如，基于声发射检测高压反应釜缺陷，根据 ASTM E1316 标准确定传感器布置间距，碳钢容器传感器布置间距 6m ~ 8m，复合材料传感器布置间距 3m ~ 4m，如果接收到频繁、异常的信号，说明设备内部有裂纹扩展延伸，设备应立即停止运行检修维护。声发射检测技术优势鲜明，不需要设备停机即可掌握缺陷类型和发展情况，定位可疑区域范围缩小 70%，及时组织人员处置缺陷，预防安全事故发生。此项技术适合应用于无法停机的锅炉压力容器设备，对于保障设备运行安全，提高企业生产连续性具有重要意义。

（三）提高检验人员综合能力

锅炉压力容器检测中，为了避免安全事故爆发，维护检验人员人身安全，提高检验人员综合能力显得尤为必要。因此，企业应当定期组织检验人员学习专业知识，了解锅炉压力容器不同材料在不同工况下的指标参数变化，学会运用先进检验技术和设备确定缺陷类型。通过反复训练，逐步提高检验人员专业能力，为企业锅炉压力容器安全稳定运行保驾护航。

四、结论

综上所述，锅炉压力容器运行是否安全、稳定，很大程度上决定了企业生产安全。锅炉压力容器常见事故包括变形、裂纹、泄漏、腐蚀等，需要检验人员灵活运用射线检测、声发射检测、超声波等检测方法，便于及时发现质量问题，提升检测效率与质量，助力企业安全生产与持续发展。

参考文献

[1] 王喆. 锅炉压力容器检测中的常见事故及检验方法探究 [J]. 中国金属通报, 2024, (09): 234-236.
[2] 朱勇吉, 万明松. 锅炉能效测试计算及误差分析——评《锅炉能效测试与远程监控技术》[J]. 应用化工, 2023, 52 (12): 3484.
[3] 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, (04): 87-90.
[4] 武学涛, 武学忠, 蒲霞. 工业锅炉和压力容器检验的相关问题探讨 [J]. 中国金属通报, 2023, (04): 234-236.
[5] 于松义. 提高油田燃气工业锅炉运行效率初探 [J]. 石油工业技术监督, 2021, 37 (07): 17-20.
[6] 欧凤林. 在役燃气工业锅炉定期能效测试分析与研究 [J]. 工业计量, 2021, 31 (02): 70-73+75.
[7] 冯选明. 超声波技术在锅炉压力容器检测中的运用 [J]. 设备管理与维修, 2020, (13): 150-151.
[8] 凌富银. 浅析压力容器检验风险的防控 [J]. 石油工业技术监督, 2020, 36 (04): 45-47+56.
[9] 张沛. 锅炉压力容器检验中的问题及解决措施 [J]. 中国设备工程, 2020, (03): 162-163.
[10] 刘勇. 热式气体质量流量计在锅炉风量检测中的应用 [J]. 工业计量, 2018, 28 (06): 45-46.
[11] 秦之炜, 孙嘉. 锅炉压力容器及压力管道检验技术研究 [J]. 中国机械, 2024, (21): 146-149.