

化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析

张建顺 黄菲菲(威海市特种设备检验研究院, 山东 威海 264200)

摘要: 化工压力容器与压力管道存在裂纹, 将给运行中的化工装置造成极大风险, 影响正常运行。因此需对化工设备裂纹进行系统探讨, 从多方面入手分析和研究设备的裂纹成因、裂纹检测以及裂纹控制措施等, 并从工程设计、制造加工以及运行、管理和维护等环节探讨预防、控制设备裂纹的可行思路, 以此为改善设备的运行、降低事故的发生率和损失提供理论支持和参考依据。

关键词: 化工压力容器; 压力管道检验; 裂纹问题

中图分类号: TQ053.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167(2025)034-0166-03

Analysis of Crack Problems in the Inspection of Chemical Pressure Vessels and Pressure Pipelines

Zhang Jianshun, Huang Feifei (Weihai Special Equipment Inspection and Research Institute, Weihai Shandong, 264200, China)

Abstract: The presence of cracks in chemical pressure vessels and pressure pipelines poses significant risks to the operation of chemical plants and affects their normal functioning. Therefore, it is necessary to systematically investigate cracks in chemical equipment, analyzing and studying the causes of cracks, crack detection methods, and crack control measures from multiple perspectives. Furthermore, feasible approaches for preventing and controlling equipment cracks are explored from the stages of engineering design, manufacturing, operation, management, and maintenance. This provides theoretical support and references for improving equipment operation and reducing the incidence and severity of accidents.

Keywords: Chemical pressure vessels; Pressure pipeline inspection; Crack problems

化工压力容器和压力管道作为现代流程工业的核心装备, 裂纹的存在不仅会显著降低设备的承载能力, 更可能引发灾难性的脆性断裂事故, 因此对裂纹问题的深入理解与有效控制始终是特种设备安全领域的重要课题。开展系统的裂纹问题分析, 对提升设备本质安全水平、保障化工装置长周期稳定运行具有重要的现实意义。

1 化工压力容器压力管道裂纹产生的原因

1.1 设计制造阶段遗留的先天缺陷

压力容器和管道的设计与制造先天缺陷是裂纹萌生的主要原因。设计缺陷, 可能从一开始就能预示隐患的存在, 例如设备设计存在形状突变的部位, 如开口接管部位的尖角, 会产生严重的应力集中, 这就直接成为裂纹发生的驱动力之一。如果钢材选择不当, 选择了对所处理介质不合适的应力腐蚀敏感钢, 那么这些材料在正常工作应力的作用下也易于发生裂纹。其次是制造缺陷, 最典型的是焊接, 焊接是非常容易出现质量缺陷的过程, 如果施焊前预热不充分、施焊过程工艺参数选择不合理或焊后热处理不到位, 都会导致焊接残余应力的产生, 并且可能会产生焊接冷裂纹、热裂纹。

另外, 材料自身由于炼钢时带入的杂质或者冶金过程中产生的一些缺陷, 例如在焊接材料、锻轧材料

以及板棒型材等成材过程中所形成的“非金属夹杂物”或者分层, 这些缺陷在随后的加工与使用过程中也可能成为裂纹源; 有些材料还存在成型阶段的冷加工变形带来的硬化和裂纹等现象。这些天生的瑕疵很可能在装置投运不久就显现出来并迅速扩展。

1.2 运行过程中复杂的力学与化学作用

在长期运行的过程中, 复杂的载荷和恶劣的外部环境是裂纹产生、扩展的最重要原因。交变载荷起着主要的作用。例如, 在化工生产中由于压力、温度的变化以及各种各样的机械振动, 在化学工业设备上产生出周期性作用下的应力。这种交变应力会使金属发生疲劳, 它甚至可以在远低于屈服极限的情况下使金属材料出现裂纹并缓慢扩展形成断口。如果这种拉应力发生在高温条件下, 材料将不断地发生蠕变, 导致金属原子缓缓移动到某个方向并形成位错。蠕变的发生会显著降低合金的抗拉强度和断裂强度, 而形成的微小孔洞会不断扩大成为所谓的“蠕动孔”, 并渐渐融合形成孔洞之间的“裂纹”。

除了上述因素外, 还有一些危害极大且具有隐蔽性的问题。对于特定环境下的特定化学介质引起的裂纹有着极强的隐蔽性和突然性破坏特点, 例如氯离子、硫化物或碱液等在拉应力作用下易出现所谓的腐蚀开裂; 急冷急热操作过程中产生巨大温度梯度造成的热

应力对金属材料结构也有冲击性的影响作用。

1.3 设备维护与管理环节的疏忽失效

针对压力容器或管道，在设备的服役期间，如果维护方式或策略选择不当，或者管理不善，则必会进一步加快其裂纹等缺陷形成、发展。定期检验发现其早期的各种潜在危害性缺陷，但如果检验周期是固定的或是不合适的，没有覆盖到所有的高风险区（包括但不限于设备各部位的应力集中区、易腐蚀处），则可能会使其萌生阶段已经失去检出的最佳时机；或因为检测手段和人员的能力等方面不足与缺乏，致使某些相对不易观察和及时发现的闭合型裂纹或者可能具有威胁隐患性质的一些裂纹（如开裂时受某种具体原因的影响，又因某种特定的因素而呈现为封闭式类于“假”焊缝的形式等）就更加不容易被查找到，或使得查找出这些问题较为费时费力，导致缺陷不能被彻底地消除。

另还有些诸如对于压力容器或压力管道的维修特别是有焊接介入修补的过程质量问题控制，若是管理不够严格的话，可能出现一个由焊接产生的新裂纹，或者在高残余应力的状态下，使得这一局部段周边区域再度产生新的裂纹或较原有的各种各样的缺陷情况所引起的后果等问题。还有若不重视系统管理设备的维修过程的有关档案资料和原始数据，就会难以通过回溯来查取历年有关各类裂纹的萌生长等问题，因而更无法预判该设备未来变化的问题等。

2 化工压力容器压力管道裂纹的检测方法

2.1 表面检测技术

渗透、磁粉两种检测方法都是应用最广泛的表面检测方法。渗透方法应用比较广泛，它可以用于各种非多孔材料，包括金属和非金属材料；通过涂抹含有颜色染料的渗透液，渗透液渗入被测件表面开口的缺陷当中，然后擦去多余渗透液后，在工件表面涂抹显像剂，则会产生一种类似于吸墨纸一样的原理，把渗入缺陷的液吸出来，使得有缺陷的位置产生缺陷显示。该方法易于开展、成本较低而且结果易于观察。磁粉方法能够检测铁磁性的钢材料，如碳钢，并能有效地对表面裂纹和近表面裂缝进行检测等；磁粉法是通过对被检物件进行磁化，若存在有缺陷则会在缺陷处存在一个漏磁场，该漏磁场吸引施加在物体表面上的磁粉，使磁粉出现漏磁场的区域而形成漏磁显迹或成为视觉可观察到的磁痕；这种方法对裂纹本身是有很大灵敏度，检出情况十分显著。

2.2 内部检测技术

超声检测和射线检测是主要的两种检测工件内部缺陷的方式。其中，超声检测采用频率很高、波长非

常短的高频声波进入检测对象内，这种声波遇到裂纹、未熔合、焊接气孔及其他缺陷时，会通过反射将其返回，通过对该信号的分析，能够对缺陷的位置及其当量尺寸做出准确判断。其优点是对面积型缺陷灵敏度高，能进行较大深宽比缺陷的检测，且有便于携带的特点。适用于厚壁容器、管道等零件的检测。射线检测就相当于为工业设备做X光拍片检测。将射线导入被检物品中，利用缺陷处及周边无缺陷完好材料之间的X射线吸收量差异，在胶片（成像板）上出现黑度不一的影象，可以较为直观地呈现被检物品缺陷的二维形貌以及分布形状。该种方式对体积型缺陷或者开口有一定缝隙、宽度的大开口气孔等缺陷检测效果较好。

2.3 先进检测与监测技术

为了处理这些复杂的结构及评价裂纹的活动性，相控阵超声和声发射这样的先进技术正变得更加重要。相控阵超声是传统超声的一个飞跃，它可以控制阵列换能器中各晶片在不同时间的激发来改变声束方向和聚焦，探头固定后通过高速电子扫描实现对被检工件进行快速的实时自动检测并可生成清晰直观的二维或三维的缺陷图像。声发射是一种监测方法，即动态无损检验技术，它通过聆听由零件缺陷的应力松弛、裂纹生长或塑性形变发出的波信号来定位和评级材料缺陷的活动性。声发射可以对整个大部件实时整体监测，并找出正发生的活性缺陷/裂纹源，它是预测修理的有效工具。

3 化工压力容器压力管道裂纹的处理与预防措施

3.1 裂纹处理措施

3.1.1 根本性处理：裂纹的消除与修复

当裂纹可以修复时，则应当首选消除缺陷，做到彻底还原。如果裂纹较浅，可以用打磨的方法将裂纹完全去除，经打磨后必须确保剩余壁厚满足强度的要求并具有圆滑过渡以避免出现新的应力集中的状况。对于深层的裂纹则可以用补焊来修复；这是项严格的工作，一定要制定完善的方案，如补焊前的预热、焊补材料的选择、焊接技术和焊后热处理方法等，尽量减少补焊造成的残余应力。补焊修复完成后必须进行无损检测，确保修复后的焊补处裂纹完全被消除和消除新缺陷才能完成这项工作，从根本上恢复设备完整。

3.1.2 风险性管控：安全评定与监控使用

对于特定的裂纹，立即修复并非是惟一的方法和选择。可以基于断裂力学进行合于使用的评定。这是一种基于分析计算裂纹在预计使用的工况中的安全裕度的一种办法，判断裂纹在预计使用寿命是否具有稳定性，如果能够确定该状态下裂纹“合于使用”，可

采取监控使用的手段，继续留用缺陷，但需要严密的计划和措施，如缩短检修期、采用更灵敏可靠的技术或安装测量工具进行监测等，对所有的裂纹情况定期地或连续追踪检查与评估。这是一举两得的办法，在确保结构使用的前提下避免不必要停机检修或改造。

3.1.3 最终性方案：设备的降级与报废

上述都做不到或行之无效时，只有采取最后一招，即降级或报废。常见的降级方法有降压运行和降速运行两种。为了减小裂纹尖端驱动力而降低安全壳内的工作压力也是一种降级手段，但它需经认真计算和审批，并需变更设备参数等；对那些已大量开裂、很快就会开裂，或所用材质已坏，其维修又很不经济者，则必须予更换，这是保障人员与工厂万无一失的“生命线”，是将人的生命置于首位。

3.2 裂纹预防措施

3.2.1 强化设计选材与制造源头控制

预防裂纹首先要强调从设计制造入手，首先是设计，需要合理避免如截面变化、尖锐转折等各种可能导致应力集中的部件和接合处，从而从源头上消除裂纹的滋生因素。此外还必须慎重地选择材料，要确保选用与工艺介质温度压力及腐蚀环境相符的正确牌号特别避免引起应力腐蚀开裂的各种合金与材料组合。到了制造阶段则要控制严格的质量：其中以焊接为主进行的重点控制，则是对重要部位应制定和采用经评定后执行的相关焊接工艺文件加强必要的焊前预热控制合理的焊中施艺措施和必须的焊后热处理从而最大程度降低其有害的焊接残余应力并尽可能不产生焊接裂纹。当然还有对进厂材料的质量检查要严把关口确保没有原始冶金铸造等方面的缺陷从而为设备的先天质量增加一道防火墙。

3.2.2 规范生产操作与工艺过程管理

设备在运行过程中会不会出现裂纹，主要是操作与工艺管理上的事情。必须确保操作控制指标符合设计要求，杜绝超温、超压等违规行为，哪怕是短时间的违反参数值，都会对设备造成不同程度的不可修复伤害。同时尽量做到平稳操作，减少生产过程中压力或温度急剧升降所带来的交变载荷，避免发生疲劳损伤或热应力的影响，延缓产生和扩展疲劳裂纹。在特定工况下的工艺介质，也可积极开展防腐工艺技术的研究和应用（例如添加适量缓蚀剂，或对介质进行脱水、脱氧处理等等），有效改进和改变腐蚀环境，从根本上取消应力腐蚀开裂的条件。

3.2.3 建立基于风险的预测性检验体系

建立先进的有针对性的检验体系是及早发现裂纹

的最后一条防线。要继续积极提倡和实施风险评定的理念，通过评估设备的风险等级有针对性分配检验工作量，把精力重点放在高风险设备和重点部位上。制订有针对性的检验计划，对易产生疲劳裂纹的部位应特别关注；对于某些特介质环境下易发生应力腐蚀的设备则要考虑对微裂纹敏感性强的检出手段等。要加强声发射监测等在线检测手段的应用，动态地实时监控缺陷的活性。充分利用过去已检出的检测数据对比缺陷的历史发展情况，变被动检修为主动预测性的按需检。将定期检变为按需检模式是一种较为先进的检验方式。

3.2.4 构建完善的设备完整性管理体系

预防裂纹最根本的做法是要实施并维持一套行之有效的设备全生命周期的管理体系。这要求为每一台重要的设备建立起全生命周期（包括设备设计、制造、安装、使用、维护乃至报废全过程）完整的档案，作为分析与消除或预防裂纹的依据。一套管理体系有效运行的基础是明确责任人及其能力和培训提高，定期对操作与维护工程师进行相关培训，使他们充分了解在设备过程中形成裂纹的后果和机理，从而正确地操作与处理；要使设备管理中有关裂纹预防的要求体现在实际的工作活动中，并形成一个持续改进的管理闭环，才能真正让预防裂纹建立起一条结实长久的第一道防线。

4 结束语

综上所述，化工压力容器与管道的裂纹防治是一项贯穿设备全生命周期的系统性工程。通过精准分析成因、应用先进检测技术、并执行科学的处理与预防策略，方能构建坚实的安全防线。

参考文献：

- [1] 余诚. 化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析 [J]. 石化技术 ,2025,32(04):311-313.
- [2] 王郡良, 廖先良, 安峻永. 压力容器及压力管道检验中的裂纹问题分析 [J]. 中国设备工程 ,2024,(20):174-176.
- [3] 卢宁浩, 吴高峰. 压力管道裂纹检验中无损检测技术分析 [J]. 模具制造 ,2024,24(07):252-254.
- [4] 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,(08):122-124.
- [5] 宋伟斌. 压力容器压力管道检验中裂纹问题的解决措施 [J]. 中国质量监管 ,2024,(02):86-87.
- [6] 张伟成. 分析锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题 [J]. 清洗世界 ,2021,37(11):78-79.
- [7] 黎佳, 宁朝阳, 谢筱丽. 压力管道腐蚀速率与使用寿命预测方法研究 [J]. 化工机械 ,2017,44(1):4.