

化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析

耿 帅 尹传博(威海市特种设备检验研究院, 山东 威海 264200)

摘要:文章聚焦化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题,阐述了裂纹的常见类型,深入分析其成因涵盖材料、设计、制造及使用等多方面因素,随后详细介绍了目视检查、无损检测等多种检验方法,以及打磨消除、补焊修复、更换部件等相应处理措施,最后结合实际案例探讨具体应对策略,旨在为化工行业准确检测、有效处理此类裂纹问题提供参考,保障化工压力容器压力管道的安全稳定运行,助力化工生产活动顺利开展。

关键词:化工压力容器;压力管道;裂纹问题;检验方法;处理措施

中图分类号: TQ050.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)031-0156-03

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

Geng Shuai, Yin Chuanbo (Weihai Special Equipment Inspection Institute, Weihai Shandong 264200, China)

Abstract: This paper focuses on crack problems in the inspection of chemical pressure vessels and pressure pipelines. It describes common types of cracks and provides an in-depth analysis of their causes, covering factors such as materials, design, manufacturing, and usage. Subsequently, various inspection methods, including visual examination and non-destructive testing, as well as corresponding treatment measures such as grinding elimination, repair welding, and component replacement, are introduced in detail. Finally, specific response strategies are discussed based on practical cases. The aim is to provide references for the accurate detection and effective handling of such crack issues in the chemical industry, ensuring the safe and stable operation of chemical pressure vessels and pressure pipelines, and supporting the smooth execution of chemical production activities.

Keywords: chemical pressure vessels; pressure pipelines; crack problems; inspection methods; treatment measures

在化工领域中,压力容器和压力管道作为极为重要的生产设施,承担着各类介质的输送与反应过程,不过裂纹问题是不容忽视的重大隐患,一旦出现裂纹且发展到发生泄漏甚至破裂的程度,所带来的后果将不堪设想,对此深入分析化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题显得格外重要。本文系统地梳理裂纹的类型、成因,同时深入探讨行之有效的检验方法与处理措施,以此为保障化工生产安全筑牢有力的理论与实践根基。

1 化工压力容器压力管道裂纹的类型及特征

化工压力容器压力管道中存在多种类型的裂纹,其中疲劳裂纹多因设备长期承受交变应力作用而产生,其特征体现为裂纹起始处常常存在像焊缝、开孔边缘这类应力集中点,裂纹一般呈现细而长的形态,扩展方向与主应力方向垂直,断口会呈现出贝壳状花纹且有着明显的疲劳辉纹,借助微观观察即可分辨,并且随着交变应力的持续作用,裂纹会持续缓慢地扩展。

应力腐蚀裂纹是在拉应力与腐蚀介质共同作用下形成的,通常于管道内表面萌生,形状多表现为树枝状、穿晶或沿晶分布,裂纹走向较为曲折,在宏观层面不容易被发现,往往要等到设备运行了一段时间后,因裂纹扩展进而导致泄漏等问题才会被察觉,其扩展

速度受应力大小以及腐蚀介质浓度等因素影响。热裂纹常出现在焊接过程中或焊接后冷却阶段,由焊接热应力、杂质偏析等因素引发,外观形状多为不规则曲线,大多沿晶界开裂,还带有明显的氧化色彩,且容易在焊缝及热影响区出现^[1]。

2 化工压力容器压力管道裂纹的成因分析

化工压力容器压力管道裂纹的成因主要涵盖了材料因素、设计因素、制造因素以及使用因素这几方面,具体而言,在材料因素方面,若管材本身质量欠佳,存在诸如内部夹杂物、气孔等冶金缺陷,又或者所选用的材料耐腐蚀性与韧性不足,那么在长期运行过程中便极易产生裂纹^[2]。就设计因素来讲,当出现不合理的结构设计,例如应力集中区域过多,像过度的开孔、截面突变等情况时,会使局部应力过大,进而为裂纹的萌生创造相应条件。

制造因素方面,一旦焊接工艺不当,比如焊接参数不合理、焊缝未清理干净等,就容易在焊缝处出现热裂纹、未焊透等缺陷,随后这些缺陷会进一步发展成裂纹,并且加工过程中若残余应力没能得到有效消除,同样也会引发裂纹。至于使用因素,要是设备长期处于高温、高压、腐蚀性介质环境里,或者因频繁的启动、停止使得温度和压力发生剧烈变化,如此一来设备便会承受交变应力,从而加速了裂纹的形成与

扩展^[3]。

3 化工压力容器管道裂纹的检验方法

化工压力容器管道裂纹的检验方法包含目视检查以及无损检测技术这两大方面，其中目视检查作为最基础且较为直观的方法，检验人员依靠肉眼或者借助低倍放大镜等简单工具，对压力容器和管道的外表面予以仔细查看，旨在观察是否存在像表面裂纹、变形、腐蚀这类明显迹象，重点会放在焊缝、开孔、接管等容易出现问题的部位以及长期受冲刷、磨损的区域进行查看，虽然该方法很难发现内部及细微裂纹，却能够为后续检验提供初步线索。无损检测技术又涵盖了超声波检测、射线检测、磁粉检测以及涡流检测，超声波检测是利用超声波在材料中的传播特性，通过向被检测物体发射超声波，再依据反射、折射、散射等信号去判断内部是否存在裂纹等缺陷，它不仅能检测出埋藏较深的裂纹，而且对平面型缺陷较为敏感，适用于多种材质的管道和容器，操作相对简便且检测效率较高，只是对检测人员的专业技能和经验要求较高^[4]。

射线检测常用的有 X 射线和 γ 射线检测，是通过射线穿透物体后在底片上成像，依据影像来分析内部结构情况，能够清晰呈现裂纹的形状、大小和位置等信息，尤其适合检测体积型缺陷及内部裂纹，不过射线对人体有伤害，检测成本较高且检测速度相对较慢。磁粉检测主要应用于铁磁性材料，当对被检测部件施加磁场后，若存在裂纹等缺陷便会造成磁力线畸变，进而使表面吸附磁粉形成显示痕迹，便于直观发现表面及近表面的裂纹，操作简单快捷，但局限于铁磁性材料的检测。涡流检测是基于电磁感应原理，通过检测线圈中产生的涡流变化情况来判断材料表面及近表面是否有裂纹等缺陷，检测速度快且能实现自动化检测，只是对于形状复杂、表面不平整的部件检测效果可能受限^[5]。

4 化工压力容器管道裂纹的处理措施

在化工压力容器管道出现裂纹的情况下，需依据裂纹的具体状况来采取相应处理措施，当裂纹较浅、长度较短且处于非关键部位时，可优先考虑打磨消除的方法，即使用专业的打磨工具按照既定的工艺要求，小心将裂纹及其周边一定范围内的材料磨去，一直持续到通过肉眼观察以及后续检测能够确认裂纹已完全消除为止。

并且在打磨过程中必须严格控制打磨深度和范围，以防出现过度打磨致使容器或管道壁厚减薄，进而影响其强度和承压能力的情况，例如针对一些仅在表面出现的细微裂纹，且所在区域应力水平相对较低

时，通过精准打磨至合格的表面状态，便可消除隐患，后续再搭配适当的表面防护措施，就能防止裂纹再次出现。

对于那些较深、较长或者处于关键受力部位的裂纹，补焊修复是常用手段，先是要运用机械加工或碳弧气刨等方法对裂纹进行彻底清理，将裂纹去除干净并加工出合适的坡口，以确保坡口两侧的材料纯净、无杂质，接着根据母材的材质特性来选择匹配的焊接材料以及合适的焊接工艺参数。在焊接时，安排经验丰富的焊工严格按照焊接工艺规程操作，采用多层多道焊等合理的焊接方式，以此保证焊缝质量，减少焊接应力和变形，比如在管道的焊缝处出现裂纹时，通过精心准备坡口、选用优质焊条并规范焊接流程，便可使修复后的焊缝强度达到甚至超过母材，让管道重新安全运行。

要是裂纹情况十分严重，诸如裂纹贯穿整个壁厚、大面积分布且已严重影响到部件的整体性能，又或者经过评估认为通过打磨、补焊等方式难以保证修复效果时，就应当果断采取更换部件的措施，也就是选择符合设计要求、质量可靠的新部件进行替换。在安装过程中要严格把控安装精度和装配工艺，确保新部件与其他相连部件连接紧密、受力均匀，避免因安装不当产生新的问题，例如压力容器的某段关键管道因严重裂纹已无法修复，通过更换相同规格、材质且质量合格的新管道，并做好连接部位的密封与固定，就能从根本上解决因裂纹带来的安全风险。

5 案例分析

5.1 案例介绍

某化工企业压力容器入口管道在生产过程中发生工艺气泄漏事故，该泄漏管与法兰之间由焊缝连接，泄漏位置靠近焊缝，管道规格为 $530\text{mm} \times 16\text{mm}$ ，管子材料为 S32168 不锈钢，法兰基层材料为 15CrMo 钢，覆层堆焊层材料为 S30403 钢。设备设计压力为 4.0MPa，操作压力为 3.65MPa，设计温度为 320 °C，操作温度为 280 °C，管道中介质为工艺气，主要由 CO₂、CO、氯胺、H₂O 等组成。检验人员通过宏观观察、渗透检测、化学成分分析、力学性能测试、金相检验、断口分析和垢物成分分析等一系列理化检验方法，发现管段裂纹起裂于内壁，向外壁扩展，呈树枝状，具有典型的应力腐蚀开裂特征，断口分析表明符合氯致应力腐蚀开裂特征，垢物中含有 Cl 元素，是导致应力腐蚀开裂的重要因素。

5.2 解决措施

5.2.1 应急处置措施

对于泄漏源控制而言，泄漏点靠近焊缝且处于运

行状态，无法直接关阀止漏，要依据《危险化学品泄漏事故处置行动要则 XF/T970-2011》采用卡具堵漏法，准备与管道规格相匹配且能够承受管道操作压力 3.65MPa、设计压力 4.0MPa 以及操作温度 280℃、设计温度 320℃工况的卡具，并且在堵漏过程中，利用喷雾水枪进行掩护，驱散泄漏的工艺气以降低其浓度，进而防止爆炸或中毒事故发生。

此外，在泄漏介质处置方面，需采用喷雾状水对泄漏的工艺气依据其所含的 CO₂、CO、氯胺等成分的特点来进行中和、稀释、驱散和溶解，通过合理布置喷雾水枪的位置形成水幕，防止气体扩散，同时还要构筑围堤或挖坑收容处置过程中产生的废水，以此避免污染环境。

5.2.2 泄漏修复措施

在对该化工企业压力容器入口管道泄漏问题进行修复时，先是要做好修复前准备，施工前务必经有关部门签发批准方可实施，要充分了解现场情况并对管道的材质、规格、压力、温度等参数予以详细记录，同时作业现场需确定有经验的人负责现场指挥，且制定各种事故预想及应急配套方案。接着要谨慎进行修复方法选择，对于管道材料为 S32168 不锈钢、法兰基层材料为 15CrMo 钢、覆层堆焊层材料为 S30403 钢且泄漏位置靠近焊缝的实际情况，可采用手工电弧焊进行补焊修复，焊接材料应依据母材材质来选择，比如可选用碱性低氧型焊条如 E347-15 等以保证焊接质量，手工电弧焊电源宜选用直流电焊机，且焊接电流应比正常情况高出约 37%~58%，以此增强电弧吹力、提高熔合性。

随后要严格按照焊接修复操作步骤开展工作，首先要对泄漏部位进行清理，去除表面的污垢、油污和铁锈等杂质，而后采用间断-熄弧法进行焊接，在水平位置焊接时需选用较大焊接电流，在坡口的上端向下以弧形轨迹形成第一个熔池，再逐渐自后向前拉动电弧迅速起弧，待熔池凝固后再次自后向前起弧，经多次循环直至将焊口完全焊住为止，在仰焊位置时可先用一个铁盒包住漏点，将不受压的部位焊完。最后在水平焊接位置将漏点完全堵住，立向位置焊接时要以坡口以外引弧，然后迅速向坡口内摆条，并在电弧到达流体作用中心前熄弧，待熔池凝固后再重复这一步骤。

且在漏点坡口内停留时间要尽量短以防止液态金属吹走，爬坡位置焊接时要由上向下焊接，同时加大电流、低压电弧，利用电弧吹力及熔滴自重将漏点补住；最后要认真落实焊接质量检验工作。焊接完成后，要对焊接部位进行外观检查，确保焊缝表面无气孔、

夹渣、裂纹等缺陷，再采用渗透检测或超声波检测等方法对焊缝进行无损检测，检测比例不低于焊缝长度的 20%，从而确保焊接质量符合要求。

5.2.3 后续预防措施

为有效避免类似事故再次发生，一方面要严格控制压力容器的操作压力和温度，坚决避免出现压力波动超过设计压力的 ±10% 以及温度波动超过设计温度的 ±20℃ 的情况，同时精心制定合理的开停车方案与负荷调整方案，以此减少温度和压力的急剧变化。另一方面要着重加强对管道中工艺气成分尤其是 Cl 元素含量的监测工作，务必将其控制在安全范围内，并且定期对介质进行取样分析，进而建立起介质成分数据库，以便能够及时察觉异常情况并迅速采取应对措施。

此外，还应制定详尽的压力容器和压力管道定期检验计划，不仅要增加对焊缝部位的检验频次，而且除常规的宏观检查、无损检测外，也要定期开展金相检验、硬度测试等项目，从而及时发现潜在的裂纹和其他缺陷。

同时此次事故是由氯致应力腐蚀开裂引发的，可考虑对管道和法兰的材料进行升级，选择诸如双相不锈钢这类抗应力腐蚀性能更佳的材料，以切实提高设备整体的安全性与可靠性。

6 总结

化工压力容器压力管道的裂纹问题对于整个化工生产系统的安危而言至关重要，无论是材料本身存在的缺陷，还是在设计、制造、使用这些环节中出现的不当之处，均有可能催生出裂纹。只有借助多种检验方法的综合运用，才能够更为精准地去发现裂纹隐患，并且针对不同程度的裂纹，采取诸如打磨、补焊或更换部件等与之相适宜的处理措施，方可实现对存在裂纹问题的有效修复，进而推动化工行业持续健康地向前发展。

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] 李广一. 冶金工业炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题分析 [J]. 冶金与材料 ,2024,44(09):130-132.
- [4] 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.
- [5] 高聪. 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析 [J]. 中国设备工程 ,2022,(19):158-160.