

化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析

徐建兴（广东省特种设备检测研究院梅州检测院，广东 梅州 514000）

摘要：文章聚焦于化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题，全面剖析了常见裂纹的类型，包括疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹、蠕变裂纹、热疲劳裂纹、腐蚀裂纹以及过热和过烧裂纹等，详细阐述了各类裂纹的特征，涵盖宏观和微观层面。针对这些裂纹问题，从生产加工质量把控、操作人员技能提升以及定期质量检查加强等多个维度提出了预防措施，旨在降低裂纹产生风险，保障化工压力容器压力管道的安全稳定运行，为化工生产的安全性和可靠性提供有力支撑。

关键词：化工生产；压力容器；压力管道检验；裂纹

中图分类号：TQ050.7 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）029-0166-03

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

Xu Jianxing (Guangdong Institute Of Special Equipment Inspection and Research Meizhou branch, Meizhou Guangdong 514000, China)

Abstract: This paper focuses on crack issues in the inspection of chemical pressure vessels and pressure pipelines, providing a comprehensive analysis of common crack types, including fatigue cracks, stress corrosion cracks, creep cracks, thermal fatigue cracks, corrosion cracks, as well as overheating and overburning cracks. It elaborates on the characteristics of these cracks at both macroscopic and microscopic levels. To address these crack-related problems, preventive measures are proposed from multiple dimensions, such as improving production and processing quality control, enhancing the skills of operators, and strengthening regular quality inspections. The aim is to reduce the risk of crack formation, ensure the safe and stable operation of chemical pressure vessels and pressure pipelines, and provide robust support for the safety and reliability of chemical production.

Keywords: chemical production; pressure vessels; pressure pipeline inspection; cracks

化工生产压力容器压力管道长期处于高温、高压、强腐蚀等条件下，一旦存在裂纹，出现裂纹故障，将会引发泄漏、爆炸等严重的安全事故，严重威胁到人们的生命安全，给企业造成重大的经济损失，并对环境造成严重污染。在化工压力容器及管道系统的检测过程中，为确保设备安全运行，检验人员需重点研究各类裂纹的形成机理，包括疲劳裂纹、开裂缺陷以及应力腐蚀裂纹等，并深入剖析其诱发因素。因此通过研究化工压力容器压力管道裂纹缺陷的检验，正确地判断裂纹的类型、特点、成因及防范措施，对化工生产的安全化运行有着非常重要的现实意义。

1 化工压力容器压力管道检验分析

化工企业在日常工作时加强压力容器压力管道内部外部环境检查工作，现场监视人员要根据压力容器压力管道运行过程中的条件变化，分析其中存在的隐患问题，对应力应变集中的部位进行检验，应确保其内部外部均不存在缺陷。对化工压力容器压力管道进行现场检查时，通常要停止压力容器压力管道运行工作，尽可能采取无损检测方式对压力容器的内部外部环境进行检查^[1]。无损检测的方法有多种，如：超声波检验，射线检验。对于检查出的裂纹或者有裂纹隐

患的应当安排制定检修计划，确保其安全使用。

2 压力管道检验中的裂纹问题

2.1 裂纹分类

在材料科学领域中，裂纹的分类体系还没形成统一标准，从裂纹形成的时序角度能够划分为原生裂纹和次生裂纹，依据裂纹扩展路径的差异，可以分为晶界裂纹与晶内裂纹。根据裂纹区域塑性变形的程度，可区分为脆性断裂裂纹和延性断裂裂纹，学术界一般基于裂纹萌生与扩展机制来进行分类，主要包含机械循环载荷引发的疲劳裂纹等多种类型裂纹。

2.2 各类裂纹特征分析

2.2.1 机械疲劳导致的裂纹

在化工压力容器和管道系统周期性载荷检测中，疲劳裂纹形成机理主要是材料受交变应力作用产生渐进性损伤累积，经过特定服役周期之后，这类裂纹一般以45°斜向扩展或弓形断裂模式出现在构件表面，需要注意的是此类缺陷检测流程具备操作简便的技术特征。

2.2.2 应力腐蚀裂纹

应力腐蚀裂纹是指构件在各种应力和侵蚀介质下产生的开裂，这类裂纹大多是在压力容器或者管道材

料的表层区域产生的，它的形貌特征呈现出根系状或者放射状的分布状态，常出现在汽水输送管道、集箱管座这些部位。研究表明，当把奥氏体不锈钢当作应力腐蚀材料来使用时，在汽水介质的环境下，只承受比较低的应力水平，也会引发应力腐蚀开裂的现象。需要注意的是在冷加工、机械振动以及残余应力等都能够成为应力腐蚀开裂的应力来源，从微观结构方面去观察，应力腐蚀裂纹的扩展方向一般和所受到的拉应力方向保持着垂直关系。微观上存在之字型分支，混晶、穿晶、沿晶同时存在，裂纹不连续性。应力腐蚀裂纹一旦产生，会快速扩展并隐藏，不易发现。应力腐蚀裂纹对材料的强度、韧性具有很大的危害性，严重影响化工压力容器压力管道安全使用，应力腐蚀裂纹会导致构件出现意想不到的断裂，导致严重的安全问题，应力腐蚀裂纹在化工压力容器压力管道检验中具有很重要的地位^[2]。

2.2.3 蠕变裂纹

蠕变裂纹是材料在恒温、恒载荷条件下，经过长时间应力作用后形成的裂纹，研究表明，在压力容器和管道系统当中，在持续应力作用下，缺陷将沿特定方向移动，导致塑性变形累积，当缺陷密度达到临界值时，裂纹在薄弱位置萌生并扩展。通过微观组织分析能够发现，此类裂纹的扩展路径通常跟主应力方向呈正交关系。微观上，在裂纹发育的区域，可在金属体内部发现无规则圆形孔洞，这些圆形孔洞进一步发育可形成宏观的蠕变裂纹，即宏观上观察到蠕变裂纹的区域，其内部必然存在大量的蠕变孔洞。

2.2.4 热疲劳裂纹

热疲劳指的是金属材料承受周期性温度变化时产生的特殊失效形式，它的形成机理是在反复热应力作用下，即便应力水平低于材料极限抗拉强度，裂纹也会逐渐萌生扩展直至断裂。从宏观形貌特征来讲，这类裂纹大多起源于构件表面热应变集中区域，其形成过程受表面状态影响比较小，却和内部孔隙、结构缺陷等应力集中区域密切相关，裂纹形态多数呈贝壳纹或放射状条纹。在应力松弛条件下次生裂纹的扩展通常会受到抑制，宏观观察显示热疲劳裂纹普遍具有短而粗的形态特征。表面会发现明显的网状或线状痕迹。微观形态则极不规则，经常呈现跳跃式发育，微观可发现二次裂纹和分支裂纹，内部的氧化物呈断续分布。

2.2.5 腐蚀导致的裂纹

腐蚀裂纹是化工生产中承压部件常见的失效表现形式，通常在振动应力和介质压力同时存在的区域较为多发。宏观特征上，腐蚀疲劳和一般疲劳存在明显区别，也与应力腐蚀裂纹特征不同，通常呈现穿晶形

态，经常成组、成对出现。在腐蚀疲劳作用持续进行的过程中，裂纹尺寸逐渐增大，其内部空间往往被疏松的腐蚀产物所填充，进而在压力容器及管道系统的内外表面形成明显的腐蚀凹坑与沟槽，这些缺陷的终端部位普遍呈现出钝化形态的特征。

2.2.6 过热和过烧裂纹

过热和过烧裂纹通常出现在压力容器、管道承压部件的加工制造过程中。过热是指所用材质在加热到临界点后继续升温，过烧则是指金属材料在高温下局部融化形成裂纹，从而给压力容器压力管道的使用埋下安全隐患。过热裂纹使晶体发生氧化或融化，若金属材料加热温度在临界温度以上，产生过热裂纹可能性大；过烧裂纹则是金属局部融化，危害性极大^[3]。

3 裂纹检测技术

3.1 目测法

在化工压力容器及压力管道检验过程中，目视检测(Visual Inspection, 简称 VT)是进行宏观裂纹缺陷检查的基本方法，通过表面宏观观察，检验人员能直观判断，且成本较低。对于微观的裂纹缺陷检测效果不佳。检查人员必须配备个人防护用品：防静电工作服、防静电安全鞋、防冲击护目镜符合 GB/T11651-2008 规定，特殊场所必须佩戴正压式空气呼吸器(PAPR)等防护仪器。检查时，光照度应大于 1000lux，大于 5-10 倍光学放大镜和 0.02mm 游标卡尺。检查前应对检测表面进行清洗，用 pH 值中性清洗液对检测表面附着物进行清洗，使用非金属刮刀刮洗表面的附着物，必要时可用目数大于 240 目的砂纸打磨，粗糙度 $R_a \leq 6.3 \mu m$ 。针对压力管道检测，需着重关注以下易产生缺陷的区域：首先，在管道与容器连接处、管径变化部位，由于结构突变导致的应力集中效应显著，成为裂纹萌生的高发区域；其次，各类焊接接头（包括对接和角接焊缝）需重点检测，这主要源于焊接残余应力和工艺缺陷的双重影响，对经多次返修的焊缝须加强检查力度；最后，在流体转向部位如弯头、三通等，由于复杂流态引起的交变载荷作用，极易诱发疲劳裂纹。通过渐进式的表面扫查手段，借助高亮度手电筒，从多方位照射被检物，细致观察其反射特性，尤其在裂纹区域，其反射效果往往会出现异常表现，如反射光线的不连贯或显现暗纹等。

3.2 无损检测技术

超声波检测是基于超声波在介质中的传播特性，通过检测反射、折射、散射波与物质相互作用产生的信号变化，从而发现裂纹等缺陷，具有灵敏度高、检测速度快，对人体无害等优点。缺点是对形状比较复杂的工件检测较困难。射线检测是利用射线穿透被检

物,根据射线的吸收能力不同,使射线落在胶片上的强度和感光程度不同,得到不同的影像,能准确、可靠、非破坏性地显示缺陷的形状、位置和大小,优点是对体积型缺陷敏感,缺点是对线状缺陷或微裂纹等难于发现,对检测人员有一定伤害,防护要求高,检测效率低。

磁粉检测可以用于铁磁性材料表面和近表面的裂纹检测,被检物被磁化后,由于被磁化,表面或近表面在裂纹处产生漏磁场,磁粉被吸附形成磁痕,可检测出裂纹的位置和形状^[4]。此方法检测方便、灵敏度高,但是只能检测铁磁性材料。渗透检测是利用液体的毛细管作用,将有色染料或荧光剂的浸润液涂覆在被检工件表面,渗入裂纹等缺陷中,然后清除表面多余的渗透液,涂上显像剂,缺陷处的渗透液被吸附在表面显像出来,从而检测裂纹。这种方法只能表面开口性缺陷,对于表面非多孔性材料的缺陷检测效果很好,而对内部的缺陷则无法检测。

4 化工压力容器压力管道裂纹的预防和修复措施

4.1 重视压力容器压力管道生产加工质量

提高压力容器压力管道的生产加工质量,需要以下几个方面入手,首先,分析其使用环境,了解其使用的条件,从而选用合适的生产材料,比如,有强腐蚀环境,就需要选用耐腐蚀强的材料,选择特殊防腐的加工处理工艺。其次,对加工生产图纸、制作细节进行核实,严格按照生产工艺进行制造。再次,在实际的加工生产中,避免生产环境的突然变化,并做好产品的质量检验工作,避免不合格产品流入市场。做好焊接生产中的温度控制工作,避免焊接温度过高或者过低,避免出现焊接过热裂纹和过烧裂纹。做好生产设备、工具维护和保养工作,保证其完好状态,避免因为设备问题产生质量问题。做好这些工作,能够使压力容器压力管道的制造质量进一步提升,为防止压力容器压力管道裂纹出现奠定基础。

4.2 提升操作人员的技能水平

压力容器压力管道长期处在化工生产装置中,其受到高温高压腐蚀的伤害,在使用中受到很大的影响。比如,设备重新开车,设备内部温度、压力变化剧烈,这就要求尽可能地减少剧烈的环境波动给设备带来的影响,所以,要制定科学的生产工艺和操作规程,延长设备的使用寿命。严格执行生产工艺、操作规程,加强人员培训,提高理论和操作水平,定期举行操作培训、技能竞赛,不但有利于调动人员的积极性,更能提高人员操作水平。通过制定完善的奖罚措施,对优秀人员表扬和奖励,对拙劣人员批评教育、处罚、再学习,营造良好的工作环境。同时,也鼓励操作人

员多进行技术创新改造,进行合理化建议,不断改进操作流程、优化操作设备,提高生产效率,继续减少裂纹的产生^[5]。

4.3 加强压力容器压力管道的定期质量检查工作

为了确保裂纹问题不影响到正常生产,那么化工企业需要对裂纹的检测重视起来,安排专业的检测人员。首先,要制定完善的规章制度,要求检测人员定期对压力管道进行检测,对于一些易出现问题的部位,要确保检测的有效性和及时性。其次,如果发现裂纹问题,要对裂纹的形状、性质进行及时判断,制定相应的整改维修方案,防止裂纹形成裂缝。此外,由于压力容器压力管道具有设计的使用范围,要避免超出使用范围、超负荷运行和使用,要让设备疲劳得到释放,延长使用寿命。

4.4 裂纹修复方法

对于部分小的裂纹,可以采用焊接的方法进行修整,焊接之前做好对裂纹的清理,清除裂纹表面的杂质和氧化物,选择适宜的焊接材料、焊接技术,在焊接过程中对焊接电流、电压、焊接速度等进行控制,确保焊接过程中没有产生新的缺陷,确保焊接质量符合标准。对于表面部分的裂纹,采用打磨的方式除去裂纹部分,然后将打磨部位抛光,满足设备的使用要求。对于一些较大的裂纹,可以采用补板的方式在裂纹部位上焊接一个板,在补板中加入相同材质的母材,提高结构强度。

5 结论

综上所述,化工生产过程中化工压力容器压力管道产生裂纹影响深远,关系到化工生产环节过程的安全,因此分析常见的裂纹类型、特点,预防措施的采取,运用科学的检测措施与方法,能够及时发现和处理裂纹,减少安全事故的产生,保障化工压力容器压力管道生产安全。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘兴林.锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题及处理措施分析[J].中国机械,2023,(29):101-104.
- [3] 孙嘉.浅谈压力容器压力管道检验的裂纹问题[J].现代制造技术与装备,2023,59(06):101-103.
- [4] 赵维强.冶金工业炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题研究[J].中国金属通报,2023,(06):7-9.
- [5] 毛国均,柴军辉,钱盛杰,等.石油化工成套装置压力容器及压力管道定期检验的基本要求和关注点[J].化工装备技术,2020,41(04):45-48.