

承压类特种设备压力管道检验中的裂纹问题探讨

徐 健

湖州市敬业特种设备技术咨询有限公司 浙江 湖州 313000

摘 要：承压类特种设备压力管道在工业领域应用广泛，其裂纹问题直接威胁设备安全运行与生产效益。通过系统分析焊接裂纹、应力腐蚀裂纹及疲劳裂纹等常见类型，从材料、制造安装、运行维护等多维度剖析成因，结合目视、无损、在线等先进检测技术，提出涵盖合理选材、规范工艺、强化管理及定期检测的预防策略。研究成果为压力管道裂纹防控提供科学依据，助力提升承压类特种设备运行安全性与可靠性。

关键词：承压类特种设备；压力管道检验；裂纹问题

引言

随着工业生产规模不断扩大，承压类特种设备压力管道作为输送各类流体介质的关键设施，其安全运行至关重要。裂纹作为压力管道常见缺陷，易引发泄漏、爆炸等重大事故，严重威胁人员生命与财产安全。目前，压力管道裂纹问题在类型识别、成因分析及有效防治等方面仍存在挑战。本文通过深入探讨压力管道常见裂纹类型与成因，研究先进检验检测技术，提出针对性预防措施，旨在为保障压力管道安全稳定运行提供理论与实践支持。

1 承压类特种设备压力管道概述

承压类特种设备压力管道是利用一定的压力，用于输送气体或者液体的管状设备，广泛应用于工业生产与民生保障领域。其构成包含管道组成件、管道支承件及安全保护装置等，管道组成件如管子、管件、阀门、法兰等相互连接，构成介质输送通道；管道支承件负责承载管道系统重量、限制位移并控制振动；安全保护装置则对管道超压、泄漏等异常情况进行防护。压力管道的工作原理基于流体力学，在压力差驱动下，介质在密闭管路内流动，通过调节阀门、改变管径等方式实现流量与压力的控制。所输送介质种类繁多，涵盖压缩气体、蒸汽、液化气体、可燃易爆、有毒有害以及腐蚀性液体等，不同介质的物理化学特性，如温度、压力、黏度、腐蚀性等，对管道材质、结构设计及运行管理提出差异化要求。例如，输送高温高压蒸汽的管道需选用耐高温高压的合金钢材质，且需考虑热膨胀补偿；输送强腐蚀性介质的管道则要采用耐腐蚀的不锈钢或衬里材料。从应用场景看，压力管道遍布石油化工、能源电力、冶金、城市燃气、供热等多个行业。在石油化工行业，压力管道承担原油输送、油品炼制、化工原料及产品传输等任务，其运行状况直接影响生产效率与产品质量；在

城市燃气与供热系统中，压力管道将天然气、热力安全高效地输送至千家万户，是城市基础设施的重要组成部分。压力管道在长期运行过程中，会因介质冲刷、腐蚀、疲劳、外力损伤等因素出现壁厚减薄、裂纹、变形等缺陷，这些缺陷若未及时发现与处理，可能引发泄漏、爆炸等严重事故，威胁人员生命安全，造成财产损失与环境污染，因此压力管道的安全运行与科学维护至关重要。

2 承压类特种设备压力管道常见裂纹类型及成因分析

2.1 常见裂纹类型

2.1.1 焊接裂纹

焊接裂纹是在压力管道焊接过程中或焊后，因焊接热循环与冶金反应综合作用形成的缺陷。在焊接时，熔池快速冷却凝固，焊缝金属内部会产生较大的热应力，若焊缝金属化学成分不合理，如含硫、磷等杂质较多，会降低金属的塑性和韧性，导致结晶裂纹产生。焊接接头处的氢原子在焊缝冷却过程中聚集，形成氢致裂纹，这种裂纹通常具有延迟性，可能在焊接完成后一段时间内才显现，严重影响压力管道焊接部位的结构完整性与承载能力^[1]。

2.1.2 应力腐蚀裂纹

应力腐蚀裂纹是在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下产生的裂纹。压力管道运行时，内部输送的介质如含有氯离子、硫化物等腐蚀性物质，会与管道金属发生化学反应，破坏金属表面的钝化膜。当管道存在残余应力或因介质压力、温度变化产生工作应力时，金属表面的微小缺陷处应力集中，腐蚀介质不断侵蚀，裂纹沿垂直于拉应力方向扩展。这种裂纹初期较为隐蔽，发展到一定程度会引发管道泄漏甚至破裂，对压力管道的安全运行构成极大威胁。

2.1.3 疲劳裂纹

疲劳裂纹是压力管道在交变载荷作用下形成的裂纹。管道运行过程中,介质压力的波动、温度的周期性变化以及机械振动等因素,都会使管道承受交变应力。在应力集中区域,如管道的弯头、焊缝、开孔处,金属材料内部的晶体结构会逐渐产生微观滑移,形成微裂纹。随着交变载荷的不断作用,微裂纹逐渐扩展连接,形成宏观疲劳裂纹。疲劳裂纹的扩展具有累积性,一旦形成,会随时间推移不断加深加长,最终可能导致管道失效。

2.2 成因分析

2.2.1 材料因素

压力管道材料的性能与质量对裂纹的产生有着直接影响。若选用的材料强度、韧性等性能不满足管道运行工况要求,在压力、温度等载荷作用下,材料易发生塑性变形或脆性断裂,从而引发裂纹。材料内部存在夹杂物、气孔、偏析等冶金缺陷,会破坏材料的连续性和均匀性,形成应力集中点,成为裂纹萌生的源头。材料的耐腐蚀性不佳,在接触腐蚀性介质时,表面易被腐蚀,降低材料的力学性能,增加裂纹产生的风险。

2.2.2 制造与安装因素

在压力管道制造过程中,焊接工艺参数选择不当,如焊接电流过大、焊接速度过快,会导致焊缝组织粗大,热影响区性能下降,增加焊接裂纹的敏感性。管道加工过程中的冷加工变形,如弯管、扩口等操作,若变形量过大,会使金属材料产生加工硬化,降低材料韧性,在后续使用中易产生裂纹。安装过程中,管道的对中偏差、错边等问题会产生附加应力,且安装完成后未进行有效应力消除处理,这些残余应力与工作应力叠加,促使裂纹的形成与扩展。

2.2.3 运行与维护因素

压力管道在运行过程中,超压、超温、介质流量突变等异常工况,会使管道承受超出设计范围的载荷,导致管道材料发生塑性变形或疲劳损伤,进而产生裂纹。管道内部介质的冲刷、磨损,会破坏管道内壁的表面完整性,降低管道壁厚,同时也会产生应力集中,加速裂纹的形成。维护保养不及时,未定期对管道进行检测、防腐处理,无法及时发现和处理管道存在的缺陷,使得潜在的裂纹问题不断恶化,最终影响压力管道的安全运行^[2]。

3 承压类特种设备压力管道裂纹的检验检测技术

3.1 目视检测技术

目视检测技术作为压力管道裂纹检测的基础方法,通过检测人员利用肉眼或借助低倍放大镜、照明设备等辅助工具,直接对管道表面进行细致观察。检测人员凭

借丰富的经验和专业知识,能够快速识别管道表面明显的裂纹、腐蚀坑、变形等缺陷。对于暴露在外且表面状况良好的管道,目视检测可以高效地发现裂纹起始点和扩展趋势,尤其是一些宏观的、具有明显特征的裂纹。在实际操作中,检测人员会遵循特定的观察路线和方法,确保对管道的各个部位,包括焊缝、弯头、变径处等应力集中区域进行全面检查。虽然目视检测技术无法检测管道内部及隐藏部位的缺陷,但其操作简便、成本低廉,能够在第一时间发现表面可见的裂纹,为后续更深入的检测提供重要依据。

3.2 无损检测技术

无损检测技术是在不破坏压力管道结构完整性和使用性能的前提下,对管道内部及表面裂纹进行检测的重要手段。其中,渗透检测利用液体的毛细作用,将含有染料或荧光物质的渗透剂涂覆在管道表面,使渗透剂渗入表面开口裂纹,经清洗、显像等步骤后,通过观察显示剂上的痕迹来判断裂纹的存在和形状,适用于检测表面开口缺陷。磁粉检测则基于铁磁性材料在磁场中,裂纹处会产生漏磁场吸附磁粉的原理,通过观察磁粉聚集形成的痕迹,清晰显示出裂纹的位置、长度和走向,主要用于检测铁磁性管道表面和近表面缺陷。超声检测利用超声波在不同介质中的传播特性,当超声波遇到裂纹等缺陷时会发生反射、折射和散射,通过分析反射波的信号特征,能够准确判断缺陷的位置、大小和性质,可检测管道内部较深部位的裂纹。射线检测利用射线穿透管道,根据缺陷对射线吸收和衰减程度的不同,在胶片或成像板上形成不同的影像,从而直观地显示裂纹等缺陷的形状和位置,常用于检测管道焊缝内部缺陷。这些无损检测技术各有特点和适用范围,相互补充,能够为压力管道裂纹检测提供全面、准确的信息^[3]。

3.3 在线检测技术

在线检测技术是在压力管道正常运行状态下,对管道裂纹等缺陷进行实时监测的先进方法。基于声发射检测原理的在线检测技术,利用材料在裂纹扩展、塑性变形等过程中会产生弹性波的特性,通过布置在管道表面的声发射传感器采集弹性波信号,经过信号处理和分析,能够实时监测裂纹的萌生、扩展和动态变化情况,及时捕捉裂纹发展的关键信息。光纤传感检测技术则是将光纤传感器安装在管道表面或内部,当管道因裂纹等缺陷发生应变或温度变化时,会引起光纤中光的波长、强度等参数改变,通过对光信号的监测和分析,实现对管道裂纹的在线监测和定位。基于电磁感应原理的在线检测技术,通过检测管道表面和近表面的电磁特性变

化,能够有效发现裂纹等缺陷。在线检测技术无需停产,可实时获取管道运行状态信息,及时发现潜在裂纹风险,为压力管道的安全运行提供了可靠的保障,在现代工业生产中具有重要的应用价值。

4 承压类特种设备压力管道裂纹的预防措施

4.1 合理选材

(1) 依据压力管道的实际工况,包括介质特性、工作压力与温度等参数,选择具备相应抗裂纹性能的材料。对于输送腐蚀性介质的管道,采用耐腐蚀合金钢或表面经过特殊处理的钢材,利用其致密的氧化膜或合金成分抑制介质对管道的侵蚀,避免因腐蚀引发裂纹萌生与扩展。

(2) 关注材料的韧性与强度匹配,在满足强度要求的同时,确保材料具有足够的韧性以抵抗冲击和应力集中。例如,低温环境下的管道需选用低温韧性良好的材料,防止低温脆裂现象发生。(3) 严格把控材料质量,对采购的钢材进行全面的质量检验,包括化学成分分析、力学性能测试以及金相组织检测等,排除存在夹杂物、偏析等缺陷的材料,从源头保障管道的抗裂纹能力。

4.2 规范焊接工艺

(1) 根据管道材料特性和焊接接头形式,科学制定焊接工艺参数,如焊接电流、电压、焊接速度等。合适的焊接电流与电压能够保证焊缝熔合良好,避免出现未焊透、气孔等缺陷,减少裂纹产生的诱因。(2) 加强焊接操作过程控制,焊工需具备熟练的操作技能,严格按照焊接工艺规程进行作业,确保焊缝的几何尺寸符合要求,表面平滑过渡,降低应力集中现象。例如,采用多层多道焊工艺,控制每道焊缝的厚度和宽度,改善焊缝组织性能。(3) 重视焊后处理,对焊接接头进行适当的热处理,如消除应力退火,通过加热和保温使焊接残余应力得以释放,同时改善焊缝及热影响区的组织性能,增强其抗裂纹能力,提高焊接接头的整体质量。

4.3 加强运行管理

(1) 在压力管道运行过程中,精准控制运行参数,避免压力、温度等出现大幅度波动或长时间处于极限工况。频繁的参数波动会使管道承受交变应力,加速裂纹的形成与扩展,稳定的运行工况有助于延长管道使用寿命。(2) 做好管道的日常维护工作,定期检查管道的支撑、吊架状况,确保其处于正常工作状态,防止因支撑

失效导致管道受力不均产生额外应力。对管道的防腐层进行维护,及时修复破损部位,防止介质对管道本体的腐蚀。(3) 严格控制管道内介质的杂质含量,通过设置过滤器、定期清理等措施,减少固体颗粒、腐蚀性杂质对管道内壁的冲刷和腐蚀,避免因杂质堆积或磨损引发局部应力集中,进而导致裂纹的产生^[4]。

4.4 定期检验检测

(1) 采用多种先进的无损检测技术对压力管道进行定期检查,如超声波检测、射线检测、磁粉检测等。超声波检测能够有效检测管道内部的体积型缺陷,射线检测可清晰显示焊缝内部的气孔、夹渣等缺陷,磁粉检测则对表面及近表面缺陷具有较高的灵敏度,多种检测方法相互补充,提高缺陷检出率。(2) 合理确定检验周期,根据管道的使用年限、运行工况等因素,科学评估管道的安全状况,缩短高风险管道的检验周期,及时发现潜在的裂纹隐患。(3) 对检测发现的缺陷进行专业评估,运用断裂力学等理论计算缺陷的扩展速率和剩余寿命,制定针对性的修复或监控措施,确保压力管道在安全状态下运行,防止裂纹发展导致事故发生。

结语

综上所述,承压类特种设备压力管道裂纹问题的研究对保障工业生产安全意义重大。通过明确常见裂纹类型及材料、制造安装、运行维护等多方面成因,综合运用目视、无损、在线等检测技术,实施合理选材、规范工艺、加强管理及定期检测等预防措施,可有效降低裂纹风险。未来需持续关注压力管道裂纹研究的新动态,不断优化检测与预防技术,为承压类特种设备安全运行筑牢防线。

参考文献

- [1]王书敏.承压类特种设备检验之压力管道——裂纹隐患检测及措施分析[J].中国化工贸易,2024,16(16):148-150.
- [2]孟满彤.压力容器与压力管道检验中裂纹问题的解决措施[J].科学与信息化,2023(4):7-9.
- [3]黎添妍.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题及预防处理方法[J].商品与质量,2021(12):239.
- [4]王晓宇,陈晓华.锅炉压力容器压力管道检验的裂纹问题研究[J].建筑工程技术与设计,2021(19):2139.