

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

王书敏（阳泉市综合检验检测中心，山西 阳泉 045000）

摘要：压力管道作为承压类特种设备的重要组成部分，是输送石油、天然气等重要能源的载体，也是锅炉压力容器特种设备的重要连接设备。在工业生产生活中均扮演着至关重要的角色。然而，由于压力管道复杂苛刻的工作环境（压力、温度、介质等），会产生各种安全隐患，其中裂纹隐患会严重威胁管道的安全性能，因此，压力管道检验中，裂纹检验检测以及措施分析具有重要意义。本文围绕压力管道检验检测中的裂纹问题，明确裂纹的分类及其形成机理，探讨不同因素对裂纹形成的影响，分析了当前常用的裂纹检测技术，提出有效的裂纹修复技术与监控管理措施，并给出预防裂纹的建议，以供借鉴。

关键词：压力管道；裂纹检验检测；措施

0 引言

随着工业化、城市化的快速发展，压力管道作为输送石油、天然气、化工原料等流体介质的重要设备，其安全运行对工业生产、城市居民生活至关重要，然而，在长期使用过程中，压力管道因其复杂的工作环境会产生各种安全隐患，其中裂纹的产生严重威胁着压力管道的安全性与可靠性。压力管道一旦发生破裂事故，将可能导致重大的人员伤亡与经济损失，也会对环境造成不可逆转的影响，因此，及时准确地检验出压力管道中的裂纹，并对这些裂纹进行妥善处理，可以有效避免事故的发生，确保压力管道的安全运行，从而保障人民生命财产安全与社会稳定。

1 裂纹的类型与成因

1.1 裂纹的分类

基于裂纹的成因、形态和扩展方式等因素，将裂纹分为以下几类：

①应力腐蚀裂纹，指在静拉伸应力、特定腐蚀环境的双重作用下，特定金属材料产生的局部开裂现象，是应力与腐蚀联合作用的结果，通常出现在焊缝处或管道表面损伤的部位；

②疲劳裂纹，是由管道材料在反复应力作用下产生的损伤累积而形成的裂纹，疲劳裂纹通常产生在管道的弯曲部分或者由于流体流动引起的振动位置，呈细微的直线状，并可能分叉形成复杂的图案；

③机械过载裂纹，是由于管道受到超出其材料屈服极限的机械载荷而产生的裂纹，这种类型的裂纹一般较大且呈锯齿状，容易在事故或操作失误后发现；

④蠕变裂纹，指在长期高温和内部压力作用下，管道材料逐渐发生塑性变形导致的裂纹，主要发生在高温工作环境中的压力管道，且经常伴随着明显的塑性变形；

⑤冷脆性裂纹，指在低温环境下，某些材料因韧性下降而产生的裂纹，通常出现在材料缺陷或应力集中区域，裂纹边缘通常是光滑的且呈直线

⑥热疲劳裂纹，是由于温度循环变化导致材料膨胀和收缩，产生交变热应力而形成的裂纹，多发生在管道的起停频繁或温度波动较大的场合，裂纹往往细小且复杂；

⑦氢致裂纹，是由于材料吸收了内部的或环境氢，导致脆化并进一步形成裂纹，常见于焊接过程中，焊缝冷却时吸收了过多的氢而导致的开裂。

1.2 影响裂纹形成的因素

在压力管道生产及使用中，裂纹的形成是一个复杂的过程，受多种因素的影响，如以下几种因素：

①材料的化学成分、微观结构、晶粒大小和相界面等对裂纹的形成有显著影响，例如，某些合金元素会导致材料脆性增加，而细小的晶粒结构通常能提高材料的韧性，降低裂纹形成的风险；

②材料的强度、韧性、硬度等力学性能决定了其在受力时抵抗变形、断裂的能力，高韧性的材料能更好地承受冲击载荷和疲劳应力，减少裂纹的形成；

③湿硫化氢环境会加速裂纹的萌生与扩展，尤其对应力腐蚀裂纹、氢致裂纹的形成具有显著影响。

④高温可促进材料的蠕变和氧化，低温则可能导

致材料脆化，温度的循环变化还会导致热应力的产生，这些温度工况都会增加热疲劳裂纹的可能性；

⑤交变应力、冲击载荷等不同的加载条件对裂纹形成的影响不同。疲劳裂纹常在交变应力作用下形成，频繁的启停或变负荷操作会增加管道经历的应力循环次数，从而加速疲劳裂纹的形成。而机械过载裂纹往往由突发的过载事件引起。另外，长期稳定运行的管道会由于恒载荷在不知不觉中累积了微裂纹；

⑥焊接过程中产生的残余应力和潜在缺陷是压力管道裂纹的重要来源。管道在制造过程中的冷加工会导致材料应变硬化，增加表面微裂纹的形成风险。不合理的管道布局会导致局部应力集中，支撑不足或过多都可能导致管道在运行中产生过大的应力，另外，管道中的缺口、凹槽、焊缝余高、几何突变等都可能成为应力集中的来源，增加裂纹形成的概率。

2 压力管道裂纹的检验检测技术

2.1 超声波检测

超声波检测技术是一种广泛应用的无损检测方法，是利用超声波波束在材料中传播时遇到裂纹等不连续界面会发生反射、折射、波型转换等特性，通过接收并分析这些反射波来识别、定位管道材质中的缺陷。超声波具有频率高、波长短、穿透力强等特点，能够实现管道内部缺陷的检测，并且具有较高的灵敏度。

超声波检测可以定位裂纹等缺陷的位置和相对尺寸，为后续的维修和返修提供重要信息。超声波检测压力管道的类型与规格比较宽泛，包括不同材质、不同壁厚的管道，并且检测速度快，适合大面积的管道检测，效率高，检测过程中不损伤管道材料。超声波检测时，需选择合适的超声波探头、检测仪，确保其频率、晶片尺寸、角度适用于待检管道的规格与材质，另外，在检测前，应使用标准试块进行校准，确保检测设备的准确性、可靠性。

超声波检测是在管道表面移动超声波探头，并通过耦合剂确保良好的声波传递，进而接收来自管道内部的反射波，并将其转换为电信号，然后以波图形方式显示在屏幕上，最后根据波形图，分析反射波的特征，判断是否存在裂纹，评估裂纹的严重性。超声波检测技术需要经验丰富的操作人员进行检测，并对结果进行分析判断。

2.2 X射线 / γ 射线检测

射线检测是常用的无损检测方法，这种技术的基

本原理是利用射线穿透材料的能力，根据被检测物体内部结构对射线的吸收和散射不同的特性，从而在胶片上形成影像，以识别是否存在裂纹等缺陷。当材料被X射线照射时，由于不同材料的密度、厚度不同，射线穿过材料后的强度会有所不同，在胶片上形成的影像可以显示材料内部的缺与陷，如裂纹、气孔、夹杂物等。

γ 射线是由放射性同位素产生的高能光子流，其检测原理与X射线相似，但 γ 射线具有更强的穿透力，适用于更厚或密度更大的材料的检测。X射线/ γ 射线检测技术能够检测管道及焊缝的埋藏缺陷，如裂纹，形成详细的影像记录，便于后续分析和证据保存。

X射线/ γ 射线检测技术需选择合适的射线源和胶片，以及必要的屏蔽和安全设备，检测时，使用适当的标准试块进行校准，确保影像的准确性，根据需要调整曝光参数，射线穿过管道后，在胶片上形成影像，通过分析影像来确定管道中是否存在裂纹等缺陷，并评估其性质和严重程度。由于X射线/ γ 射线检测涉及辐射，需要严格的安全措施来保护操作人员和周围环境免受辐射危害，在大面积检测时，相比超声波检测，射线检测的效率较低。

2.3 相控阵检测

相控阵技术采用多个超声波晶片组成的阵列探头，通过电子控制每个晶片发射和接收超声波的时间和相位，实现声束的聚焦、偏转和扫查，这种技术可以灵活控制声束的角度和焦点位置，适应不同形状和结构的管道检测，实时生成管道截面的二维或三维图像，直观显示裂纹的位置和形状，从而对管道进行全面检测，相比传统超声波检测，相控阵技术可以在更短的时间内完成检测。

相控阵技术的操作和数据分析较为复杂，需要专业的培训和经验，需选择适当的相控阵探头和检测仪，根据管道的规格和材质，设置声束的角度、焦点、扫查模式，在管道表面移动相控阵探头，进行检测，接收回波信号，并将其转换为电信号，然后以图像方式显示在屏幕上，根据图像分析裂纹的位置、大小和形状。总而言之，对于需要全面检测和成像的复杂管道，相控阵技术则以其声束控制灵活性和成像功能，在复杂管道的检测中更具优势。

3 压力管道检验中裂纹隐患的措施分析

3.1 裂纹形态分析

在宏观形态分析方面，观察裂纹的长度与扩展方

向可以提供关于载荷类型的线索。例如,疲劳裂纹通常呈直线状并沿特定方向扩展,而应力腐蚀裂纹往往呈分枝状或沿着材料晶界扩展。裂纹表面的平滑、粗糙、有光泽等特征可以揭示裂纹扩展的速度与机制,快速扩展的裂纹表面通常较平滑,而缓慢扩展的裂纹则较粗糙。

裂纹的开口宽度及其变化可以反映裂纹受力的情况,开口宽度均匀表明是单一载荷作用,而不均匀的开口宽度则意味着复合载荷或局部应力集中。裂纹周围的颈缩、剪切唇等塑性变形可以提供材料韧性和裂纹形成时所受应力水平的信息。在微观形态分析方面,通过显微镜观察裂纹尖端的形态,可以了解裂纹的扩展模式,尖锐的裂尖通常与脆性断裂相关,而钝化的裂尖则可能与韧性断裂相关。

断裂面的微观特征可以揭示裂纹的形成和扩展机制,例如,韧窝是金属材料韧性断裂的典型特征,解理面和解理台阶则与脆性断裂相关。观察裂纹是否沿特定的相界面或夹杂物扩展,可以了解材料的微观组织对裂纹扩展的影响,夹杂物可能成为裂纹的起始点或拓展路径,检查裂纹内外的腐蚀产物和沉积物,可以帮助确定环境因素在裂纹形成中的作用。

3.2 裂纹风险评估

裂纹的风险评估是确保油气、化工等行业压力管道安全运行的关键环节。首先,需收集管道的设计资料、运行记录、检测数据以及裂纹的发现情况,包括裂纹的位置、尺寸、形态等,对发现的裂纹进行宏观和微观形态分析,确定裂纹的类型。基于裂纹的形态分析和历史扩展数据,使用断裂力学方法或统计方法预测裂纹的生长行为,结合裂纹生长行为和管道的运行条件,计算在一定时间内裂纹导致管道失效的概率,评估管道失效可能导致的后果,包括泄漏、爆炸、火灾、环境影响和人员伤亡等,将失效概率与后果严重性相结合,计算管道在裂纹存在时的整体风险水平,编制风险评估报告,评估报告包括评估方法、结果和建议的风险管理措施。

3.3 裂纹风险管理策略

在进行压力管道检验时,制定定期检验计划和裂纹监控计划,可及时发现和跟踪裂纹的发展。压力管道裂纹的监控与管理是确保管道安全运行的关键环节,定期检验检测可以及时发现裂纹的存在,防止裂纹扩展导致管道失效。对于已修复的裂纹,定期检测可以验证修复效果,确保管道安全可靠。采用声发射、

光纤传感等实时监控系统,对管道进行全天候监控,及时发现异常情况,建立预警机制,当检测到异常数据时,及时发出预警信号,启动应急预案。

另外,根据风险评估结果,制定预防性维护计划,如降压运行、更换管段等,以降低裂纹扩展的风险。使用单位制定管道失效应急预案,将风险评估结果和风险管理措施向相关人员进行宣贯和培训,不断优化管道的设计、运行、维护和监控策略,实现风险的持续降低,增强风险意识和应对能力。

4 结束语

综上所述,本论文通过对压力管道检验中,裂纹隐患的检验检测以及全面措施分析,旨在提高压力管道的安全性与可靠性。针对无损检测在压力管道检验中的应用,本文重点分析了超声波检测、射线检测等方法的原理、特点及应用。在检验检测措施的选择上,需根据管道的具体情况和裂纹的性质来选择合适的检测方法。压力管道检验中,裂纹隐患的检测是一项技术性很强的工作,需要综合运用多学科知识和多种检测方法,并结合管道的实际情况进行科学决策,期待未来有更先进的技术应用于压力管道的检验检测中,进一步提高我国压力管道的安全运行水平。

参考文献:

- [1] 李琦. 压力容器与压力管道检验中裂纹问题的解决措施 [J]. 石油石化物资采购, 2024(1):232-234.
- [2] 刘勇. 在压力管道检验中发现的缺陷原因分析及其处理探究 [J]. 中国质量监管, 2024(001):000.
- [3] 强敏娜, 张良, 王永乐, 等. 在用压力管道裂纹检验中无损检测技术分析 [J]. 山西化工, 2023, 43(1):160-161.
- [4] 王克刚, 王靖虎. 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题 [J]. 中国设备工程, 2022(6):2.
- [5] 马崇泰. 承压特种设备检验的裂纹问题分析 [J]. 中国高新区, 2018.
- [6] 付军德. 承压特种设备检验检测中的裂纹问题探究 [J]. 2020.
- [7] 邵彩元. 承压特种设备检验的裂纹问题分析 [J]. 石化技术, 2017, 24(8):2.

作者简介:

王书敏(1993.11-), 男, 汉族, 籍贯: 山西省长治市, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 特种设备检验(压力管道检验)。