

石油化工用压力管道破坏形式分析及其无损检测研究

张 斌 尚武顺 (山东鼎泰检验检测有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 压力管道是石油化工行业的重要设备, 其安全运行直接关系到生产过程的正常进行和人员生命财产安全。长期运行下, 压力管道会发生各种形式的损伤和破坏, 如腐蚀、裂纹、变形等。及时发现和诊断管道的损伤状态, 采取适当的维修和更换措施, 对保证生产连续性和设备使用寿命至关重要。本文针对石油化工用压力管道常见的破坏形式进行分析, 重点介绍了无损检测技术在管道完整性评估中的应用, 为压力管道的安全运行和管理提供理论依据和技术支持。

关键词: 石油化工; 压力管道; 破坏形式; 无损检测; 管道完整性评估

近年来, 随着石油化工行业的快速发展, 管道完整性管理受到了越来越多的重视。无损检测技术作为一种有效的管道健康诊断手段, 在压力管道缺陷检测和寿命评估方面发挥着不可替代的作用。通过对管道进行定期或临时检测, 可以及时发现管道内外壁的裂纹、腐蚀、变形等缺陷, 为管道维修和更换提供科学依据。

1 石油化工用压力管道的主要破坏形式及成因分析

1.1 腐蚀

1.1.1 内腐蚀

内腐蚀是指管道内壁受到流体介质的腐蚀作用而发生材料损失。引起内腐蚀的主要原因包括流体介质的腐蚀性、流速过高、温度过高和杂质沉积等。具体而言, 含有酸、盐、氧气等腐蚀性物质的流体介质会直接侵蚀管道内壁; 高流速会加剧介质对管壁的冲刷作用, 加快腐蚀进程; 高温条件下腐蚀反应进行更加迅速; 而杂质沉积在管壁上会形成微小电池, 促使局部腐蚀加剧。此外, 焊缝区域、变形区域等应力集中处也更容易发生内腐蚀。严重的内腐蚀会导致管壁变薄、失效, 甚至出现穿孔、渗漏等严重后果。

1.1.2 外腐蚀

外腐蚀是指管道外壁受到环境介质的腐蚀作用。其主要原因包括土壤腐蚀、大气腐蚀和细菌腐蚀等。土壤中含有水分、盐分、酸碱等对金属有腐蚀性的物质, 会侵蚀埋地管线的外壁; 空气中的氧气、水汽、盐雾等也会导致管道外壁发生氧化腐蚀; 此外, 某些细菌的代谢产物具有腐蚀活性, 会加剧管道的外腐蚀过程。外腐蚀的危害性往往被忽视, 因为其发生在管道外部, 不易被直接观察到。但一旦发生外腐蚀导致管壁失效, 将会造成泄漏等严重事故。因此, 对于埋地管线和大气暴露管线, 防止外腐蚀同样至关重要。

1.2 裂纹

裂纹是压力管道的一种常见破坏形式, 主要是由于材料本身的缺陷、制造工艺不当、环境腐蚀以及机械载荷等多种因素引起的。材料本身存在的夹杂物、缩孔、气孔等缺陷可能成为裂纹的萌芽点。不当的热处理工艺也会导致材料中出现相变、残余应力等缺陷, 从而使材料更容易产生裂纹。此外, 压力管道在服役过程中遭受的酸性、碱性或其他腐蚀性介质的侵蚀, 可能会加剧裂纹的萌生和扩展。最后, 压力管道在实际使用中所承受的静态或动态机械载荷, 如内压、扭矩载荷、振动载荷等, 都有可能引发或加剧裂纹的形成。总的来说, 裂纹的产生是多种因素共同作用的结果, 需要从材料选择、制造工艺、使用环境和载荷条件等多方面加以控制和优化, 才能有效地避免裂纹的发生。

1.3 变形

管道变形主要是由于外部载荷或温度变化引起的, 常见类型包括径向变形、轴向变形和局部变形等。变形会改变管道的应力状态, 降低其承压能力, 引发局部超应力区域, 进而可能导致管道失效或泄漏。外部载荷是引起管道变形的主要原因之一, 比如土壤的不均匀沉陷会导致管道发生局部变形或扭曲; 第三方的活动如开挖或碰撞则可能直接造成管道的径向或轴向变形。温度变化也会对管道产生影响, 管材在热胀冷缩过程中会产生额外的应力应变, 如果温度梯度分布不均匀, 还可能引发局部变形。

此外, 工况变化导致的内压剧烈波动, 尤其是压力的突然升高, 也可能使管道发生临时性或永久性的变形。管道一旦发生变形, 其原有的应力状态就会被扰动, 局部区域可能出现应力集中或超应力状态, 从而增加了失效或泄漏的风险。因此, 严格控制外部载

荷、温度变化和内压波动等因素，是预防和控制管道变形的关键措施。

1.4 泄漏

泄漏是管道完整性受损的严重表现，会导致介质泄漏，危及生产安全和环境安全。泄漏的主要原因包括腐蚀孔洞、裂纹扩展、焊缝缺陷和机械损伤等。腐蚀孔洞是由于局部严重腐蚀导致管壁材料被逐渐蚀刻直至穿孔而形成的，通常是由于防腐措施失效或存在缺陷所致。裂纹扩展则是指未被及时修复的微小裂纹在载荷和环境作用下逐渐扩大，最终发展成贯穿管壁的宏观裂纹而造成泄漏。焊缝缺陷如根部未焊透、夹渣、气孔等，也可能在长期运行中逐步扩展成为泄漏源。

另外，第三方的活动如开挖或碰撞，也可能直接对管道造成机械损伤而引发泄漏问题。除了上述常见原因，管道的制造缺陷、操作失误、自然灾害等也有可能导致泄漏事故。及时发现和处理这些潜在问题，对于保证管道的安全运行至关重要。管道运营单位需要建立完善的检测、评估和维护机制，并制定相应的应急预案，从而最大限度地避免泄漏事故的发生，确保生产和环境安全。

2 石油化工用压力管道的无损检测技术的应用

无损检测 (Non-Destructive Testing, NDT) 技术是指不破坏被检测对象完整性的前提下，对其缺陷、性能和状态进行检测和评价的一种技术手段。由于其不会对被检测对象造成进一步损伤，因此被广泛应用于压力管道的状态监测和完整性评估中。常用的无损检测方法包括超声波检测、射线检测、渗漏检测、磁粉检测等。

2.1 超声波检测

超声波检测是利用超声波在不同介质中的传播特性，发射高频超声波信号并接收反射回波，根据回波的时间、强度等特征判断管道内部缺陷的存在、类型和位置。根据检测方式的不同，超声波检测可分为手工超声波检测和自动超声波检测。手工超声波检测主要用于局部缺陷的确认，操作人员手持探头在管道表面滑动，通过观察回波信号判读缺陷情况。这种方式灵活性强、便于检测复杂区域，但效率较低、检测质量较大程度依赖于操作人员的经验和技能。自动超声波检测则适用于对较长管段进行扫描，通常采用机器人或检测小车携带阵列探头环绕管道运行，可实现对整个管段的全方位扫描，检测速度快、重复性好，但

对管道的形状和表面状态要求较高。

另一种被广泛采用的是导波管导式检测 (Guided Wave Testing, GWT)，通过在管内或管外激励低频导波，利用导波在管道内传播的特性实现对长距离管线的检测，可检测范围长达数十公里，但对缺陷的定位精度较低。超声波检测的优势在于检测速度快、成本低、准确性高，可以检测管道内外壁的腐蚀、裂纹等各种缺陷类型。但它也存在一定的局限性，如对于复杂几何形状的管件、焊缝附近等区域的检测效果较差，需要结合辅助方法进行检测；另外，超声波易受到管壁残留应力、微观组织等因素的影响，存在一定的盲区。为了提高检测的可靠性和精确度，通常需要采用多种检测方式和多种频率的超声波信号，并结合数字成像、信号处理等技术对检测结果进行综合分析和评价。随着相关理论和设备的不断发展，超声波检测的适用范围和检测能力将会持续提升，为管道运维提供更加全面和精确的信息。

2.2 射线检测

射线检测利用射线 (X 射线或 γ 射线) 的穿透特性对材料内部缺陷进行成像检测。根据射线的不同种类，可分为 X 射线检测和 γ 射线检测。X 射线检测通常采用便携式 X 射线机，它利用 X 射线管内的加热阴极发射电子，这些电子在高压下被加速并轰击靶材产生 X 射线。产生的 X 射线辐射穿过被检测物体后，由成像系统 (如数字探测器阵列或射线底片) 接收并记录下来，缺陷处由于密度或厚度的变化会在成像结果中形成不同的灰度或暗化程度。X 射线检测操作灵活、成本相对较低，适用于对小尺寸管道的局部检测，但由于 X 射线穿透能力有限，对大尺寸管道的检测效果就会受到一定影响。与之相比， γ 射线检测则多用于检测大尺寸管道，它利用放射性同位素 (如铱 192、钴 60 等) 作为放射源发射 γ 射线。 γ 射线具有很强的穿透能力，可以穿透较厚的被检测体。在检测时，将放射源置于管道的一侧，使 γ 射线通过管道后在另一侧由成像系统 (通常为铅屏幕或数字成像系统) 接收并成像。

缺陷的存在会使射线在成像系统上形成不同的暗化程度，从而显现出来。 γ 射线检测成像质量高、检测范围大、适用于各种管径管道，但放射源的获取和运输需要严格的许可和管控措施。射线检测的优势在于成像效果好、检测范围广、可靠性高，能够检测出管道内外壁上的各种类型缺陷，如裂纹、夹渣、气孔、

腐蚀等,因此被广泛应用于管道的制造和检修阶段。但射线检测设备笨重、操作要求严格、存在一定的辐射安全风险,对人员和环境的影响较大,无法进行在线检测。

另外,射线检测难以准确定位缺陷的位置和深度,一般需要结合其他检测方法配合使用。在实际应用中,通常根据具体情况选择合适的射线类型和检测参数,并严格执行相关的辐射防护措施,以确保检测的有效性和安全性。

2.3 渗漏检测

渗漏检测技术是检测管道泄漏的有效手段,通常与其他无损检测方法联合使用。常见的渗漏检测方法包括压力测试、气体检测、液体检测和红外热成像等。其中,压力测试是最基本的渗漏检测方式,原理是在将被检测管段加压至一定压力后,观察压力是否能够保持恒定一段时间。如果压力下降,则说明管段存在渗漏缺陷。这种方法操作简单,但只能确定管段是否泄漏,无法定位泄漏点位置。气体检测则是利用检测仪器测量泄漏点附近空气中某些特征气体(如运输介质本身或添加的示踪气体)的浓度变化情况。

常用的检测仪器有火焰离子化检测器、半导体气体传感器等。检测人员需要沿管线缓慢移动检测探头,当浓度显著升高时即可判定该位置存在泄漏点。气体检测对小量渗漏较为敏感,但对大量喷射式渗漏的检测能力则相对较差。液体检测是在管内流体中混入某种着色或荧光染料,通过观察是否有液体渗出以判断管线是否存在泄漏,并可根据渗出液体的位置确定泄漏点。这种方法操作简单、成本低廉,但需要管线暂停运行并排空,且只能对较大的渗漏缺陷进行检测。红外热成像是利用热像仪检测泄漏点周围由于温度异常而形成的热分布图像。

当管介质温度与环境温度存在一定差异时,泄漏点处会呈现异常的高温或低温区域,从而被热像仪探测到。这种方法无需接触被测物体,能够远程快速检测,尤其适用于易燃易爆等危险工况下的泄漏检测。总的来说,渗漏检测方法操作简单、成本低廉,适用于对已发生严重泄漏的管线进行检测和定位。但它只能发现已经形成的较大渗漏缺陷,对于初期微小裂纹等潜在缺陷的检测能力则有限。因此,在管道完整性评价中,渗漏检测通常需要与无损检测等其他方法相结合,以获得更加全面和准确的检测结果,从而为管道运维提供可靠的决策依据。

2.4 磁粉检测

磁粉检测主要用于检测 ferro 磁性材料(如碳钢)管道表面的缺陷,如裂纹、锈蚀等。它的原理是在待检区外加一个磁场,缺陷处由于磁阻大而形成磁漏,漏磁场会吸引涂覆在管道表面的显示性磁粉颗粒,从而将缺陷显现出来。磁粉检测需要采用适当的磁化方式,如通入直流、交流、涡流等,以形成合适的磁场分布。通过观察磁粉在缺陷处的积聚情况和分布形态,可以判断缺陷的类型和大小。磁粉检测具有检测速度快、方便灵活、成本低廉等优点,适用于现场进行临时性检测,尤其适合于对已发现问题区域进行再次确认。但它只能检测材料表面缺陷,对于内部缺陷的检测能力较差;而且只能适用于 ferro 磁性管道材料,对非磁性材料无法检测。

另外,检测结果的分析和判读也较为依赖于操作人员的经验,存在一定的主观性。因此,在管道无损检测中,磁粉检测通常作为辅助手段,需要与其他检测方法相结合以弥补各自的不足。

除上述几种常见方法外,近年来飞行时间扩散(Flight Time Diffraction, FTD)、电化学隔膜流量监测(Electrical Resistance, ER)等新兴技术也逐渐被应用于管道无损检测领域。通过多种检测手段的综合应用,可以全面评估管道的完整性状况。

3 结束语

石油化工用压力管道在长期运行过程中,不可避免地会发生腐蚀、裂纹、变形、泄漏等各种破坏形式。及时有效地发现和诊断这些问题,是确保管道安全运行的关键。无损检测技术为管道完整性评估提供了强有力的技术支持,通过超声波、射线、渗漏、磁粉等多种检测手段的应用,可以全面评价管道缺陷的类型、位置和程度,为制定修理方案和更换时机提供依据。

未来,随着无损检测技术的不断发展,管道检测的精度、效率和自动化程度将得到进一步提高。同时,通过大数据分析、人工智能等新技术的融合应用,有望实现对管道寿命周期的全程管控,从而更好地保障石油化工生产的安全、高效、环保运行。管道无损检测技术的发展将为石油化工行业的可持续发展注入新的动力。

参考文献:

- [1] 万雪枫. 石油化工用压力管道破坏形式分析及其无损检测研究[J]. 今日制造与升级, 2023, (11): 188-190.