

# 石油化工用压力管道的无损检测技术应用研究

蒋天齐（中国石化扬子石油化工有限公司，江苏 南京 210000）

**摘 要：**石油化工行业在国民经济中占据着重要地位，而压力管道是石油化工装置的关键组成部分。这些压力管道长期在高温、高压、腐蚀等恶劣环境下运行，容易出现各种缺陷，如裂纹、腐蚀坑等，这对管道的安全性和可靠性构成严重威胁。无损检测技术在保障石油化工压力管道安全运行方面发挥着不可或缺的作用。它能够在不破坏管道结构的前提下，检测出管道内部和表面的缺陷，为管道的维护、维修以及安全评估提供准确依据，有助于及时发现潜在危险，避免灾难性事故的发生，确保石油化工生产的顺利进行。

**关键词：**石油化工；压力管道；无损检测技术

石油化工生产过程中，压力管道犹如人体的血管，负责输送各种介质。由于输送介质的复杂性、运行环境的严苛性，压力管道面临着诸多风险。传统的检测方法往往存在局限性，难以全面、准确地检测出管道的缺陷。无损检测技术的发展为解决这一问题提供了有效途径。通过利用各种物理原理，如超声、射线、磁粉等，无损检测技术可以深入探测压力管道的各个部位，精确发现可能存在的缺陷，无论是微观的裂纹还是宏观的壁厚减薄情况。这对于提高石油化工压力管道的安全性、延长其使用寿命以及保障整个石油化工生产系统的稳定运行具有重要意义。

## 1 石油化工用压力管道的无损检测技术应用原则

### 1.1 安全性原则

石油化工生产涉及多种危险介质的输送，压力管道一旦发生泄漏或破裂，可能引发火灾、爆炸、中毒等严重安全事故。无损检测技术应能准确检测出管道中的缺陷，如裂纹、孔洞、壁厚减薄等，这些缺陷可能削弱管道的强度和密封性。在检测过程中，检测方法的选择、检测标准的设定以及检测设备的操作都要以保障管道安全运行为核心。例如，对于高压力、高风险区域的管道，应采用高灵敏度的检测方法，确保即使微小的缺陷也能被发现。检测结果的评估要严格依据相关安全标准，对于可能影响管道安全的缺陷必须及时处理，不能有丝毫侥幸心理，以防止因检测失误或不全面而导致灾难性的安全后果。

### 1.2 可靠性原则

无损检测结果的可靠性直接关系到管道的维护决策、使用寿命评估以及整个石油化工生产系统的稳定运行。检测技术必须能够稳定、准确地反映管道的真实状况。这要求检测方法具有良好的重复性和再现性，即不同的检测人员在不同时间使用相同的检测方法和设备，

对同一管道部位进行检测时，应得到相近的结果。例如，超声检测中的探头频率、耦合剂的选择等因素都会影响检测结果的可靠性。为确保可靠性，需要对检测设备进行定期校准和维护，检测人员要经过严格的培训并具备相应的资质，检测过程要遵循标准化的操作流程，同时还要建立完善的质量控制体系，对检测结果进行审核和验证，以减少误判和漏判的可能性。

## 2 石油化工压力管道的分类

### 2.1 按照压力等级分类

石油化工压力管道按照压力等级可分为低压管道、中压管道、高压管道和超高压管道。低压管道的压力范围一般在 0.1MPa-1.6MPa 之间。这类管道在石油化工装置中较为常见，通常用于输送一些相对低压的介质，如一般性的气体或液体原料。由于压力较低，管道的壁厚相对较薄，对管道材料的强度要求相对不高，但仍然需要满足一定的耐腐蚀和密封性要求。中压管道的压力范围为 1.6MPa-10MPa，在石油化工生产流程中承担着重要的输送任务，如输送经过初步处理的中间产品或动力介质。中压管道的设计和制造标准相对较高，需要考虑管道在一定压力下的强度、稳定性和密封性，其材质的选择也更为严格，以确保在较长时间内安全运行。高压管道的压力范围为 10MPa-100MPa，这类管道往往用于输送高压气体或高浓度的液态化学品，如高压氢气、氨气等。由于压力很高，对管道的材质、制造工艺、焊接质量等方面都有极高的要求，管道的壁厚较厚，并且需要进行严格的无损检测和质量监控。

### 2.2 按照输送介质分类

按照输送介质分类，石油化工压力管道可分为多种类型。输送气体的管道，如天然气管道、氢气管道、乙烯气管道等。气体管道的特点是介质具有可压缩性，

管道内的压力容易受到温度、流量等因素的影响。对于易燃、易爆的气体管道，如天然气管道，需要特别注意防止泄漏，因为一旦泄漏，气体容易扩散，遇到火源可能引发爆炸或火灾。氢气管道由于氢气分子小、渗透性强，对管道的密封性要求极高。输送液体的管道也是常见的类型，包括原油管道、成品油管道、各种化工溶液管道等。液体管道要考虑介质的粘度、腐蚀性等因素。例如，原油管道中的原油含有杂质和腐蚀性成分，可能会对管道内壁造成腐蚀，所以管道需要具备良好的耐腐蚀性能。还有输送气液混合相的管道，这种管道在石油化工生产中的一些特定工艺环节出现，如油气混输管道。气液混合相的存在增加了管道内流体力学的复杂性，对管道的压力控制、流量调节以及防止相分离等方面提出了更高的要求。

### 3 无损检测技术

#### 3.1 超声检测 (UT)

超声检测 (UT) 其原理基于超声波在不同介质中的传播特性。当超声波从一种介质传播到另一种介质时，由于介质的声学特性差异，会在界面处发生反射、折射和波型转换等现象。在压力管道检测中，超声探头向管道发射超声波，超声波在管道内部传播，遇到缺陷（如裂纹、孔洞等）时会产生反射波。检测设备接收反射波并分析其时间、幅度等参数，从而确定缺陷的位置、大小和性质。超声检测具有诸多优点。它能够检测出管道内部较深处的缺陷，对裂纹等平面型缺陷的检测灵敏度较高。超声检测操作相对简便，可以对管道进行快速扫描，并且对管道表面的清洁度要求不像其他一些检测方法那样严格。然而，超声检测也存在局限性。它对检测人员的操作技能和经验要求较高，因为超声信号的解读需要专业知识。超声波在管道中的传播容易受到管道形状、材质不均匀性等因素的影响，可能导致信号的衰减或散射，从而影响检测结果的准确性。

#### 3.2 射线检测 (RT)

射线检测 (RT) 是利用射线穿透物体时的衰减特性来检测压力管道内部缺陷的一种方法。常见的射线源有 X 射线和  $\gamma$  射线。当射线穿过管道时，由于管道内部不同部位（如存在缺陷处和无缺陷处）对射线的吸收程度不同，在射线透过管道后的接收屏上会形成不同的影像。通过分析这些影像，可以判断管道内部是否存在缺陷以及缺陷的类型、大小和位置。射线检测的优点在于它能够直观地显示管道内部的结构和

缺陷情况，检测结果以影像形式呈现，便于检测人员直接观察和分析。对于管道内部的体积型缺陷，如气孔、夹渣等，射线检测具有较高的检测灵敏度。但是，射线检测也有明显的缺点。射线源具有放射性，对人体健康有危害，因此在检测过程中需要采取严格的辐射防护措施，这增加了检测的复杂性和成本。射线检测的检测速度相对较慢，因为每检测一个部位都需要进行射线曝光、成像等过程。

#### 3.3 磁粉检测 (MT)

磁粉检测 (MT) 基于铁磁性材料的磁化特性。当对石油化工压力管道（如果管道材质为铁磁性材料）进行磁化时，管道内部磁力线会均匀分布。如果管道内部存在缺陷，如裂纹、夹杂物等，这些缺陷会使磁力线发生畸变。在管道表面撒上磁粉后，磁粉会被畸变的磁力线吸引，聚集在缺陷部位，从而显示出缺陷的位置和形状。磁粉检测的优点是操作简单、成本较低，对表面和近表面的缺陷检测灵敏度较高，能够快速检测出铁磁性管道表面或近表面的裂纹、气孔等缺陷。其局限性在于只能用于铁磁性材料的管道检测，对于非铁磁性材料（如不锈钢管道）则无法使用。磁粉检测只能检测表面和近表面的缺陷，对于管道内部深处的缺陷无法检测。

#### 3.4 渗透检测 (PT)

渗透检测 (PT) 是一种检测石油化工压力管道表面开口缺陷的无损检测方法。其原理是利用液体的毛细现象。将含有色料或荧光剂的渗透液涂覆在管道表面，渗透液会渗入表面开口的缺陷（如裂纹、孔洞等）中。经过一定的渗透时间后，将多余的渗透液去除，然后再涂上显像剂。显像剂会将残留在缺陷中的渗透液吸附并显示出来，从而可以直观地看到缺陷的位置、形状和大小。渗透检测的优点是对表面开口缺陷检测灵敏度较高，不受管道材质磁性的限制，可用于各种材质的管道检测。

#### 3.5 涡流检测 (ET)

涡流检测 (ET) 是基于电磁感应原理的无损检测方法。当交变电流通过检测线圈时，会在周围产生交变磁场。如果将检测线圈靠近石油化工压力管道（管道应为导电材料），管道内会产生感应涡流。当管道存在缺陷时，如裂纹、腐蚀坑等，会改变涡流的分布和大小。通过检测线圈测量涡流的变化情况，就可以判断管道是否存在缺陷以及缺陷的类型、位置和大小。涡流检测的优点在于检测速度快，可以实现对管道的



快速扫描,能够检测出管道表面和近表面的缺陷,并且对管道表面的清洁度要求相对较低。涡流检测是非接触式检测,不会对管道造成损伤。涡流检测的检测深度有限,主要用于检测管道表面和近表面的缺陷,对于深层缺陷的检测能力较弱。

## 4 无损检测技术在石油化工压力管道中的应用

### 4.1 安装过程中的无损检测

在石油化工压力管道的安装过程中,安装前对管材和管件进行无损检测是确保管道质量的基础。例如,对新采购的管材进行超声检测或射线检测,可以发现管材在制造过程中可能存在的内部缺陷,如气孔、夹渣等,避免将有缺陷的管材用于安装。在管道焊接过程中,无损检测更是不可或缺。焊接是压力管道安装中的关键环节,焊接质量直接影响管道的强度和密封性。在每一道焊缝焊接完成后,通常会进行磁粉检测或渗透检测,以检查焊缝表面是否存在裂纹、气孔等缺陷。对于重要的焊缝,还会进行超声检测或射线检测,以检测焊缝内部的缺陷。这些检测方法的组合应用能够全面地评估焊缝质量。管道安装完成后,需要对整个管道系统进行全面无损检测,包括对管道连接部位、弯管部位等容易出现问题的地方进行重点检测。通过安装过程中的无损检测,可以及时发现并纠正管道安装中的问题,确保管道在投入使用前达到规定的质量标准。

### 4.2 压力管道的定期检测

石油化工压力管道在运行过程中,由于受到内部介质的腐蚀、外部环境的侵蚀以及压力和温度的反复作用,会逐渐产生缺陷。定期检测是保障管道安全运行的必要措施。定期检测的周期通常根据管道的压力等级、输送介质的性质、运行环境等因素确定。对于高压、输送危险介质(如易燃易爆或有毒介质)的管道,检测周期相对较短。在定期检测中,会根据管道的具体情况选择合适的无损检测技术。例如,对于容易发生腐蚀的管道,可能会先采用超声测厚技术来检测管道的壁厚变化,以确定是否存在腐蚀减薄现象。如果发现壁厚异常,再进一步采用射线检测或超声检测来确定腐蚀的类型(如均匀腐蚀或局部腐蚀)和腐蚀的程度。对于可能存在表面裂纹的管道,磁粉检测或渗透检测可用于检查表面裂纹的发展情况。通过定期检测,可以及时掌握管道的健康状况,对发现的缺陷进行评估,并根据评估结果采取相应的维护或修理措施。

### 4.3 维修后的检测

当石油化工压力管道经过维修后,必须进行无损检测以确保维修质量。维修过程可能涉及到管道的补焊、更换管件等操作,这些操作可能会引入新的缺陷。在维修后的检测中要对维修部位进行重点检测。如果维修涉及焊接,那么要对焊缝进行全面的检测,包括采用超声检测、射线检测来检查焊缝内部的质量,采用磁粉检测或渗透检测来检查焊缝表面的质量。对于更换的管件,要像新管件安装时一样进行检测,确保其不存在制造缺陷。除了对维修部位的检测,还需要对维修部位周边一定范围内的管道进行检测,因为维修操作可能会对周边管道造成一定的影响,如产生应力集中等问题。通过维修后的检测,可以验证维修工作是否达到预期效果,管道是否恢复到安全可靠的运行状态,避免因维修不当而导致管道在后续运行中出现安全事故。

## 5 结束语

无损检测技术在石油化工压力管道的应用中具有不可替代的重要性,它能够及时、准确地检测出管道存在的缺陷,为管道的安全运行提供可靠保障。随着石油化工行业的不断发展,对压力管道无损检测技术的要求也在提高。未来无损检测技术需要不断创新和发展,以适应更加复杂的管道结构、运行环境和检测需求。通过持续改进和优化,无损检测技术将在石油化工压力管道的安全管理方面发挥更大的作用,确保石油化工生产过程的安全、高效运行。

### 参考文献:

- [1] 高正扬. 基于 ACFM 的石油管道裂纹检测的关键技术研究 [D]. 长江大学, 2024.
- [2] 于蒙福. 站场在役石油管道的检测技术研究 [D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [3] 王池雨. 石油管道电磁超声测量与图像处理研究 [D]. 西安石油大学, 2022.
- [4] 田登辉. 基于 FPGA 的石油管道缺陷的漏磁检测装置的研究与设计 [D]. 中北大学, 2022.
- [5] 余子瀚. 基于光纤传感的石油管道泄漏定位及识别的研究 [D]. 重庆邮电大学, 2022.
- [6] 孙超. 基于自适应置信规则库的石油管道泄漏检测方法研究 [D]. 哈尔滨师范大学, 2022.
- [7] 陈阮. 石油化工承压设备检验检测工艺优化. 广东省, 广东省特种设备检测研究院茂名检测院, 2019-07-28.