

# 非破坏性检验技术在化工压力管道装置中的应用研究

谢叔春 (广东省特种设备检测研究院阳江检测院, 广东 阳江 529500)

**摘要:** 化工压力管道装置作为化工行业的核心组成部分, 其安全性和可靠性至关重要。非破坏性检验技术 (NDT) 的应用, 如超声检测 (UT)、射线检测 (RT)、磁粉检测 (MT)、渗透检测 (PT) 和涡流检测 (ET), 为化工压力管道的维护提供了强有力的技术支持。这些技术能够在不损害管道的前提下, 检测出内部缺陷, 从而预防潜在的故障和事故。随着自动化和智能化技术的发展, NDT 技术不断提升检测效率和准确性, 降低了成本, 同时减少了环境污染和人员健康风险。本文综合分析了 NDT 技术的理论基础、应用现状、以及在化工压力管道装置中的具体应用策略和效果, 旨在为化工行业的安全生产提供参考。

**关键词:** 化工压力管道; 非破坏性检验技术; 安全性; 自动化检测

## 0 引言

化工压力管道装置是化工生产中输送高温、高压、腐蚀性介质的关键设施, 其安全性直接关系到人员安全和环境的可持续性。随着科技的进步, 非破坏性检验技术 (NDT) 已成为确保化工压力管道装置可靠性的重要手段。本文将探讨 NDT 技术的理论基础、应用现状, 并分析其在化工压力管道装置中的应用策略和效果, 以期为化工行业的安全生产提供科学依据。

## 1 相关理论基础

### 1.1 化工压力管道装置概述

化工压力管道装置是化工生产中用于输送高温、高压、腐蚀性介质的关键设施。这些管道系统通常承受着极端的工作条件, 因此, 其安全性和可靠性至关重要。化工压力管道装置的设计、制造、安装和维护都必须遵循严格的标准和规范, 以确保其在整个使用周期内的安全运行。管道的失效可能导致泄漏、火灾甚至爆炸, 对人员安全和环境造成严重威胁。因此, 定期的检测和维护是确保化工压力管道装置安全运行的必要措施。这些装置通常包括管道、阀门、法兰、弯头、三通等组件, 它们在化工、石油、天然气等行业中发挥着至关重要的作用。

### 1.2 非破坏性检验技术的理论内涵

非破坏性检验 (NDT) 技术是一种在不损害被检测对象完整性的前提下, 对其内部结构、性质和状态进行评估的方法。这些技术广泛应用于材料科学、工程检测和质量控制领域。NDT 技术包括超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测等, 它们各自适用于不同的材料和检测环境。这些技术能够检测材料的缺陷, 如裂纹、气孔、夹杂等, 从而预防潜在的故障和事故。非破坏性检验技术的理论基础在于利

用材料对某些物理量的响应, 如声波、电磁场、射线等, 来揭示材料的内部特性。通过分析这些物理量的传播、吸收或反射行为, 可以推断出材料的完整性和潜在缺陷。这种方法的优势在于它能够在不中断生产流程的情况下, 对在役设备进行快速、有效的检测, 从而降低成本并提高安全性。

## 2 化工压力管道装置检验技术的现状分析

目前, 化工压力管道装置的检验技术已经相当成熟, 但仍面临着一些挑战。传统的检验方法, 如目视检查和手动检测, 虽然简单, 但效率低下且容易受到人为因素的影响。随着自动化和智能化技术的发展, 现代检验技术如超声导波检测、相控阵检测、TOFD 检测等新技术不断涌现, 这些技术提供了更精确、更快速的检测结果, 同时也对操作人员的专业技能提出了更高的要求。然而, 这些技术的应用也受到设备成本、操作复杂度和专业人才短缺的限制。例如, 射线检测技术虽然直观有效, 但其对环境 and 操作人员有一定的风险; 超声检测技术虽然应用广泛, 但对检验人员的技术要求较高。

因此, 如何提高 NDT 技术的普及率和检测效率, 是当前化工压力管道装置检验技术发展的关键。此外, 建立健全的压力管道检验制度和标准也是提升检验质量的重要因素。需要制定科学合理的压力管道检测制度和行为规范, 不断优化和完善检测手段和制度, 以提升管道的使用寿命, 同时保障管道正常稳定运行, 避免安全问题的发生。综上所述, 化工压力管道装置的检验技术正朝着自动化、智能化的方向发展, 新技术的不断涌现为提高检验效率和准确性提供了可能, 但同时也需要更多的专业人才和更完善的管理制度来支持这些技术的应用。

### 3 非破坏性检验技术在化工压力管道装置中的应用

#### 3.1 超声检测 (UT)

超声检测 (UT) 是一种基于超声波在材料中传播特性的非破坏性检验技术。它通过发射高频声波并接收其在材料中的反射、折射或衰减信号, 来检测材料内部的缺陷。超声检测适用于多种材料, 包括金属、塑料和复合材料, 尤其适合于检测材料内部的裂纹、气孔和夹杂等缺陷。超声波的方向性好、能量高, 能在界面上产生反射、折射、衍射和波形转换, 穿透能力强, 在大多数介质中传播时, 能量损失小, 传播距离大。超声波检测的频率一般在 0.5~10MHz 之间, 对于钢等金属材料的检验, 常用的频率为 1~5MHz。超声检测的灵敏度高, 可检测试件内部尺寸很小的缺陷, 且对人体及环境无害, 不破坏样品。

在化工压力管道的定期维护中, 超声检测被用来检测管道壁的腐蚀和减薄情况。通过在管道表面移动探头, 可以快速覆盖大面积区域, 及时发现潜在的腐蚀问题。例如, 利用超声导波技术对桥梁的钢结构进行全面的健康监测, 识别了多个潜在的腐蚀和裂纹区域, 缺陷识别准确率达到 92%。此外, 超声检测技术也广泛应用于轴承状态监测, 通过分析超声波信号, 可以辨识轴承的初期疲劳、滚道表面的压迫侵蚀等问题。在实际应用中, 超声检测技术能够提供精确的缺陷定位, 为维护 and 维修提供重要依据。

#### 3.2 射线检测 (RT)

射线检测 (RT) 是一种利用 X 射线或  $\gamma$  射线穿透材料的能力来检测内部缺陷的非破坏性检验技术。这种技术基于射线在穿透物体过程中与物质发生相互作用, 导致射线强度因吸收和散射而减弱的原理。强度衰减的程度取决于物质的衰减系数以及射线在物质中穿透的厚度。射线检测能够揭示材料内部的缺陷, 如裂纹、气孔和夹杂等, 对于确保材料的完整性和安全性至关重要。射线检测技术特别适用于检测焊接接头、铸件和锻件等的内部缺陷, 因为它可以提供材料内部结构的详细图像。然而, 这种技术也存在局限性, 例如对射线防护的要求较高, 设备成本和操作复杂度也相对较大。

在化工压力管道的新安装或维修后, 射线检测被广泛用于验证管道焊缝的质量。通过使用射线源对焊缝进行透照, 然后使用胶片或其他成像技术捕捉透射的射线, 可以形成焊缝区域的内部图像。技术人员可以通过分析这些图像来识别潜在的缺陷, 如未焊合、

裂纹或夹杂物。例如, 一项研究开发了一种可调式管道中心透照装置, 用于高压、高温和厚壁管道的对接焊缝的  $\gamma$  射线检测, 有效地提高了施工效率和胶片质量。此外, 射线检测技术也被应用于其他领域, 如航空和汽车工业, 以确保关键部件的内部质量。在实际应用中, 射线检测技术能够提供精确的缺陷定位, 为维护 and 维修提供重要依据。

#### 3.3 磁粉检测 (MT)

磁粉检测 (MT) 是一种基于磁场变化原理的无损检测方法。它利用铁磁性材料在磁化后, 其表面及近表面缺陷处会产生漏磁场的特性。当材料中存在裂纹、夹杂等不连续性时, 原本均匀分布的磁力线会发生局部畸变, 形成漏磁场。这些漏磁场会吸引施加在工件表面的磁粉, 形成可见的磁痕, 从而揭示出缺陷的位置、大小和形状。磁粉检测适用于检测铁磁性材料的表面和近表面缺陷, 如裂纹、夹杂、折叠等。它具有高灵敏度、操作简便、成本效益高、环境友好和快速便捷的特点, 但也存在局限性, 如只能用于铁磁性材料, 无法检测内部深处的缺陷, 且对磁化方向敏感。

在化工压力管道的定期检查中, 磁粉检测被用来检测管道表面的疲劳裂纹。例如, 某石化厂在对输送腐蚀性介质的管道进行维护时, 采用了磁粉检测技术。通过在管道表面施加磁粉, 并使用交叉磁轭法进行磁化, 成功地揭示了管道表面应力集中区域的微小裂纹。这些裂纹在常规目视检查中难以发现, 但磁粉检测技术的应用确保了管道的完整性和安全性, 避免了潜在的泄漏风险。此外, 磁粉检测技术也广泛应用于轴承状态监测, 通过分析磁粉信号, 可以辨识轴承的初期疲劳、滚道表面的压迫侵蚀等问题。在实际应用中, 磁粉检测技术能够提供精确的缺陷定位, 为维护 and 维修提供重要依据。

#### 3.4 渗透检测 (PT)

渗透检测 (PT) 是一种基于毛细管作用原理的无损检测技术, 用于检测材料表面的开口缺陷。该技术通过将含有染料的渗透液施加到材料表面, 液体会渗入到表面开口的缺陷中。经过一段时间, 去除多余的渗透液, 再使用显影剂吸引缺陷中的渗透液, 使其在缺陷处形成可见的标记。渗透检测特别适用于检测表面微小的裂纹和孔洞, 尤其是在形状复杂的部件上。这种方法的灵敏度较高, 但检测速度相对较慢, 且对环境和操作人员有一定的健康影响。渗透检测的灵敏度水平分级主要以荧光 / 着色渗透液为主, 分为不同的等级, 以适应不同检测灵敏度的需求。

在化工压力管道的制造过程中，渗透检测被用来检测焊接接头的表面缺陷。这种方法对于检测细小的裂纹和孔洞非常有效。例如，在特种设备行业中，如锅炉、压力容器、压力管道等承压设备，渗透检测被广泛应用于检测其表面的裂纹、白点、疏松、夹杂物等缺陷。在实际操作中，首先对焊接区域进行预处理，以确保表面清洁无油脂和其他污染物。然后，将渗透液均匀地涂覆在焊接区域，并保持一定时间让液体渗透进入任何存在的裂纹或孔洞。清除表面多余的渗透液后，再施加显影剂，缺陷处的渗透液会回渗到显影剂中，形成清晰可见的标记。通过这些标记，可以准确地定位和评估焊接接头的质量，确保化工压力管道的安全性和可靠性。

### 3.5 涡流检测 (ET)

涡流检测 (ET) 是一种基于电磁感应原理的非破坏性检测技术，广泛应用于导电材料的检测。该技术通过在导电材料中产生涡流来检测材料的电气和磁性特性。当交流电流通过探头线圈产生交变磁场时，靠近的导电材料中会产生感应电流，形成涡流。这些涡流的分布和大小受到材料的电导率、磁导率、形状、尺寸以及是否存在缺陷的影响。涡流检测能够检测材料的表面和近表面缺陷，如裂纹、腐蚀和磨损等。该技术的关键优势在于其对导电材料的高灵敏度检测能力，且检测速度快，易于实现自动化。然而，涡流检测的局限性在于它只能检测表面和近表面缺陷，且对磁化方向敏感，对缺陷定性和定量还比较困难。

在化工压力管道的维护中，涡流检测被用来检测管道壁的腐蚀和磨损情况。这种方法特别适合于检测管道内部的腐蚀情况，尤其是在难以接触的区域。例如，涡流检测技术在航空航天、汽车、石油化工和发电行业的应用，能够探测铝、不锈钢、铜、钛、黄铜、Inconel 合金甚至碳钢等原料的表面或近表面缺陷。在实际应用中，涡流检测技术能够提供精确的缺陷定位，为维护和维修提供重要依据。例如，在某核电站的蒸汽发生器传热管的检测中，采用了轴绕式探头对传热管实施全管的涡流检测，有效地提高了施工效率和胶片质量。此外，涡流检测技术也被应用于其他领域，如航空和汽车工业，以确保关键部件的内部质量。

## 4 非破坏性检验技术的应用效果分析

### 4.1 提高安全性和可靠性

非破坏性检验技术在化工压力管道装置中的应用，极大地提高了设备的安全性和可靠性。这些技术能够在不损害管道的情况下，检测出材料内部的缺陷，

如裂纹、气孔和夹杂等。射线检测利用 X 射线或  $\gamma$  射线的穿透能力，检测管道内部的缺陷，为化工压力管道的安全运行提供了重要保障。此外，磁粉检测通过磁粉的分布来揭示材料表面的缺陷，适用于检测铁磁性材料的表面和近表面缺陷，进一步提高了管道的安全性。渗透检测则利用渗透液在材料表面的毛细管作用，检测材料表面的微小裂纹和孔洞，特别适用于形状复杂的部件。这些 NDT 方法的综合性应用，为化工压力管道的完整性提供了全方位的保障，有效预防了由于材料缺陷引发的安全事故，确保了化工生产的连续性和安全性。

### 4.2 提升检测效率和经济性

非破坏性检验技术的应用还大大提高了化工压力管道装置的检测效率和经济性。与传统的破坏性检测方法相比，NDT 技术不需要对管道进行破坏，因此可以节省大量的时间和成本。例如，涡流检测利用交变磁场在导电材料中产生的涡流效应来检测材料的电气和磁性特性，适用于导电材料的腐蚀和磨损检测，提高了检测的速度和准确性。渗透检测则利用渗透液在材料表面的毛细管作用，检测材料表面的微小裂纹和孔洞，特别适用于形状复杂的部件，提升了检测的效率和经济性。此外，随着自动化和智能化技术的发展，许多 NDT 技术已经实现了自动化检测，进一步提高了检测的效率，降低了成本。这些技术的应用不仅减少了因管道故障导致的经济损失，还间接地为保温层的评价提供了依据，符合当前国家提倡的节能环保政策。

## 5 结语

非破坏性检验技术在化工压力管道装置中的应用，不仅提高了设备的安全性和可靠性，还显著提升了检测效率和经济性。随着自动化和智能化技术的发展，NDT 技术的应用前景广阔，有望进一步降低成本，减少环境污染和人员健康风险。未来，NDT 技术将继续在化工行业的安全生产中发挥关键作用，为实现可持续发展目标做出贡献。

### 参考文献：

- [1] 程凯. 无损检测技术在压力管道检验中的运用研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (08): 185-187.
- [2] 卢宁浩, 吴高锋. 压力管道裂纹检验中无损检测技术分析 [J]. 模具制造, 2024, 24(07): 252-254.

### 作者简介：

谢叔春 (1996.10-), 汉族, 籍贯: 广东茂名, 本科, 助理工程师。