

浅谈压力容器检验中无损检测技术的应用

沈 剑

湖州市敬业特种设备技术咨询有限公司 浙江 湖州 313000

摘 要：无损检测技术是压力容器检验中的重要手段，包括超声波检测、磁粉检测、渗透检测和射线检测等多种方法。这些技术能够在不破坏容器结构的前提下，准确发现其内部及表面的缺陷。通过合理选择和应用无损检测技术，可以有效提高压力容器的安全性和可靠性。本文探讨了无损检测技术在压力容器检验中的应用策略，为确保压力容器安全运行提供了技术支持。

关键词：压力容器检验；无损检测技术；应用

引言

压力容器作为工业生产中的关键设备，其安全性至关重要。无损检测技术作为一种非破坏性检测方法，在压力容器检验中发挥着重要作用。它能够在不影响容器使用性能的前提下，对容器的材料、结构完整性及潜在缺陷进行全面评估。本文旨在介绍无损检测技术的基本原理及常用方法，并探讨其在压力容器检验中的应用策略，以期为压力容器的安全使用提供有力保障。

1 无损检测技术概述

无损检测技术在工业领域占据着至关重要的地位。它是在不降低或干扰被检测对象使用功能的前提下，利用超声检测、射线探伤、磁粉探伤、渗透检测、涡流检测等多种物理及化学方法，对材料、部件、设备实施缺陷探测、成分分析及几何尺寸测定等技术操作。例如超声检测利用超声波在材料中传播时遇到缺陷会产生反射、折射等特性，来发现内部缺陷的位置和大小；射线检测则通过材料对射线吸收程度的差异，以成像的方式展现内部结构状况。无损检测能够精准地发现材料内部肉眼难以察觉的微小缺陷，像裂纹、气孔、夹杂等。这对于保障产品质量、确保设备安全可靠运行意义重大。在航空航天领域，飞机的关键零部件若存在缺陷，极有可能在飞行过程中引发严重事故，而无损检测技术可在制造和维护阶段及时发现并排除隐患。在石油化工行业，管道长期承受高压、腐蚀等恶劣工况，借助无损检测能提前知晓管道的损伤情况，避免泄漏等重大事故的发生。随着科技的不断进步，无损检测技术也在持续创新发展。新的检测方法和设备不断涌现，检测精度、速度以及可靠性都得到了大幅提升。从早期较为简单的检测手段，逐渐发展为如今智能化、自动化程度颇高的先进检测体系，为现代工业的高质量发展提供了坚实有力的技术支撑。

2 常用无损检测技术在压力容器检验中的应用

2.1 超声波检测（UT）

超声波检测是利用超声波在介质中传播时，遇到缺陷会发生反射、折射和散射等特性来检测压力容器内部缺陷的方法。当超声波从一种介质进入另一种介质时，由于两种介质的声阻抗不同，在界面处会产生反射和折射。若压力容器内部存在缺陷，如裂纹、气孔、夹渣等，超声波在缺陷处会发生反射，通过接收反射波的信号，分析其幅度、相位和传播时间等信息，就能确定缺陷的位置、大小和形状。该技术的优点显著，其对内部缺陷的检测灵敏度高，尤其是对裂纹等危害性较大的缺陷，能够准确发现并定位，且检测速度快，可实现对大面积区域的快速扫查，适用于自动化检测。超声波检测对人体无害，无需担心辐射危害，不过，它也存在一定局限性，对于形状复杂、表面不平整的压力容器，检测结果可能受到影响，导致误判或漏判，对检测人员的技术水平和经验要求较高，需要专业人员进行操作和分析。在压力容器检验中，超声波检测常用于检测压力容器的壁厚、内部缺陷以及焊缝质量，对于压力容器的主体壁厚测量，可通过超声波测厚仪准确获取壁厚数据，判断容器是否存在腐蚀减薄等情况。在焊缝检测方面，能有效检测焊缝内部的未焊透、未熔合等缺陷，确保焊缝质量符合标准要求，保障压力容器的安全运行^[1]。

2.2 磁粉检测（MT）

磁粉检测基于铁磁性材料在磁场中被磁化后，若表面或近表面存在缺陷，会在缺陷处产生漏磁场，吸附施加在表面的磁粉，从而显示出缺陷的形状和位置。当压力容器的铁磁性材料被磁化时，磁力线会在材料内部均匀分布，但如果存在缺陷，如表面裂纹、折叠、气孔等，磁力线会发生畸变，部分磁力线会泄漏到材料表面，形成漏磁场。磁粉在漏磁场的作用下，会聚集在缺

陷处,形成明显的磁痕,通过观察磁痕的形状、大小和分布情况,就能对缺陷进行评估,磁粉检测灵敏度高,能检出表面及近表面细微裂纹,操作简便快捷,成本低,结果直观易判。该技术仅适用于铁磁性材料,对于非铁磁性材料的压力容器则无法使用,检测时需要对工件进行磁化,对于形状复杂、尺寸较大的工件,磁化难度较大。在压力容器检验中,磁粉检测主要用于检测压力容器表面和近表面的缺陷,例如,对压力容器的接管部位、焊缝表面以及容易产生应力集中的部位进行检测,能及时发现由于加工、焊接或使用过程中产生的表面缺陷,防止缺陷进一步扩展导致安全事故。

2.3 渗透检测(PT)

渗透检测技术依据液体的毛细作用,将含色染料或荧光剂的渗透液施加于压力容器表面,使其渗透入缺陷内,去除多余渗透液,并施加显像剂。在毛细作用下,缺陷内的渗透液被显像剂吸附,进而清晰展现出缺陷的形态与位置。当渗透液涂覆在压力容器表面时,由于液体的毛细作用,它会渗入到表面开口的缺陷中,如裂纹、气孔、疏松等。经过一段时间的渗透作用后,移除表面多余的渗透液,而缺陷中的渗透液得以保留,随后施加显像剂,该剂能吸附并显现缺陷中的渗透液。在白色显像剂的衬托下,缺陷以红色或荧光色痕迹清晰呈现,通过观察这些痕迹,可以对缺陷进行准确的定性和定量评估。渗透检测的优点是对表面开口缺陷的检测灵敏度高,能检测出微小的裂纹和其他缺陷,不受工件材料、形状和尺寸的限制,可检测各种类型的压力容器,且检测结果直观,易于理解,其缺点是只能检测表面开口缺陷,对于内部缺陷无法检测。检测过程较为繁琐,需要严格控制操作流程和参数,以确保检测结果的准确性。在压力容器检验中,渗透检测常用于检测压力容器的表面质量。对新制造的压力容器,可检测其表面是否存在加工缺陷,对于在用压力容器,能检测由于腐蚀、疲劳等原因产生的表面裂纹,及时发现潜在的安全隐患^[2]。

2.4 射线检测(RT)

射线检测是利用射线(如X射线、 γ 射线)穿透压力容器时,由于材料对射线的吸收和散射作用,使得透过的射线强度发生变化,通过检测透过射线的强度分布,来判断压力容器内部是否存在缺陷。当射线穿过均匀的压力容器材料时,其强度会按一定规律衰减,若内部存在缺陷,如气孔、夹渣、裂纹等,由于缺陷部位与周围材料对射线吸收散射能力不同,导致透过缺陷的射线强度与正常部位相比存在明显差异。通过将透过的射线照射到胶片或探测器上,形成影像,根据影像的灰度变化

和特征,就能分析出缺陷的类型、位置和大小。射线检测的优点是检测结果准确可靠,对缺陷的定性和定量分析较为精确,检测图像可长期保存,便于后续复查和对比,能检测出压力容器内部各种类型的缺陷,不受缺陷方向和位置的限制,但射线检测对人体有害,需要采取严格的防护措施,检测成本较高,设备复杂,对检测环境要求也较高。在压力容器检验中,射线检测常用于检测压力容器的焊缝质量,通过对焊缝进行射线探伤,可清晰地显示焊缝内部的缺陷情况,如未焊透、未熔合、气孔和夹渣等,为焊缝质量的评定提供重要依据,确保压力容器的焊接质量符合相关标准和规范要求,保障其安全运行。

3 无损检测技术在压力容器检验中的应用策略

3.1 正确选择检测方法

(1) 压力容器结构与材质多样,需依据具体特性选择检测方法。对奥氏体不锈钢制压力容器,因晶间腐蚀倾向,采用超声检测时,应考虑其对不同取向缺陷的敏感性,选择合适探头频率与角度,以确保能有效探测微小晶间裂纹。对于含复合材料的压力容器,射线检测易受复合材料干扰,此时超声相控阵检测更具优势,它可通过灵活的声束控制,对复杂结构内部缺陷进行精准成像。(2) 检测缺陷类型也决定检测方法选择。表面开口缺陷,磁粉检测在铁磁性材料压力容器上效果显著,利用漏磁场吸附磁粉显示缺陷形状与位置,操作简便且灵敏度高。对于内部埋藏较深的体积型缺陷,如气孔、夹渣,射线检测能直观呈现缺陷影像,依据底片灰度差异判断缺陷大小与性质,为评估容器安全性提供关键依据。(3) 考虑检测效率与成本,在大面积检测时,如球形储罐的定期检验,超声检测因其检测速度快、对环境要求相对较低,可作为初筛手段。发现可疑区域后,再结合射线或其他更精确方法进行复查,既能保证检测质量,又能合理控制检测成本,提高整体检测效率,满足压力容器在役检测的实际需求。

3.2 制定合理的检测计划

(1) 依据压力容器运行状况制定检测计划。新投入使用的压力容器,首次定期检验时应全面检测,重点关注制造缺陷,如焊接接头的未焊透、未熔合等,对于运行多年且工况复杂的容器,需考虑使用年限、介质腐蚀性、操作压力波动等因素。频繁启停的压力容器,在应力集中部位,如接管与筒体连接处,需加强检测,安排更多点与细致项目。(2) 明确检测项目与顺序。先进行外观检测,检查容器表面有无腐蚀、变形、机械损伤等明显缺陷,为后续内部检测提供参考,接着进行无损检

测,按照从易到难、从宏观到微观顺序。先采用超声检测进行整体扫查,快速发现大面积缺陷,再用射线检测对超声发现的重点区域精确定位与定性。对于有特殊要求的压力容器,如盛装毒性介质,还需安排渗透检测,确保表面微小开口缺陷无所遁形。(3)合理规划检测时间。避开压力容器生产高峰期,减少对生产影响。在停产检修期间,提前规划好检测流程,合理安排检测人员与设备调配,确保检测工作紧凑高效进行。预留足够时间对检测结果进行分析评估,若发现严重缺陷,及时制定维修方案,保障压力容器后续安全稳定运行,使检测计划与生产实际紧密结合^[3]。

3.3 加强检测人员的培训和管理

(1)提升检测人员专业技能。定期组织内部培训,针对不同无损检测方法,如超声、射线、磁粉、渗透等,邀请行业专家深入讲解原理、操作技巧与最新技术发展。安排实际操作演练,让检测人员在模拟压力容器检测环境中,熟练掌握各种检测设备使用,如超声探伤仪的参数调节、射线机曝光参数设置等,通过大量实践提高缺陷识别与判断能力。(2)强化检测人员质量意识。开展质量控制培训,让检测人员明白检测结果准确性对压力容器安全的重要性。建立质量考核制度,对检测过程中的误判、漏判情况进行分析与责任追溯,将考核结果与绩效挂钩,促使检测人员在工作中保持严谨态度,严格按照检测标准与操作规程执行任务,确保检测数据真实可靠。(3)完善人员管理体系。根据检测人员资质与技能水平,合理分配工作任务。对高级资质人员,安排复杂压力容器检测项目与检测结果审核工作;初级人员在经验丰富人员指导下进行基础检测操作。鼓励检测人员参加外部培训与行业交流活动,拓宽视野,不断提升自身综合素质,打造一支专业过硬、素质优良的无损检测团队。

3.4 引入先进的检测技术和设备

(1)采用新兴无损检测技术。如超声导波检测技术,能在长距离管道状压力容器上快速检测,通过激发特定频率导波沿管道传播,可检测到大面积范围内的腐

蚀、裂纹等缺陷,大大提高检测效率,尤其适用于难以接近或检测面积大的部位。还有基于声发射技术的在线监测系统,可实时监测压力容器在运行过程中的缺陷萌生与扩展,及时捕捉容器内部异常信号,为早期故障诊断提供依据。(2)更新检测设备。引入高分辨率超声探伤仪,其具备更精准的缺陷定位与定量功能,能检测出更小尺寸缺陷。新型数字化射线成像设备,相比传统胶片射线检测,具有成像速度快、图像清晰度高、可实时处理与存储等优点,方便检测人员快速分析缺陷情况。先进的磁粉检测设备采用智能磁粉施加与图像采集系统,提高磁粉检测自动化程度与检测精度。(3)整合检测技术与设备。建立综合无损检测平台,将多种检测技术与设备数据进行融合分析。例如,将超声检测的缺陷位置信息与射线检测的缺陷性质信息整合,为压力容器缺陷评估提供更全面准确数据。通过先进的软件系统,实现检测过程自动化控制与检测结果智能分析,进一步提升压力容器无损检测的准确性与效率,保障压力容器安全可靠运行^[4]。

结语

综上所述,无损检测技术在压力容器检验中的应用,极大地提高了检测效率和准确性,为容器的安全运行提供了有力支持。通过正确选择检测方法、制定合理的检测计划、加强检测人员的培训和管理,以及引入先进的检测技术和设备,可以进一步提升无损检测技术的应用效果。未来,随着科技的不断发展,无损检测技术将在压力容器检验领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]李银甲.浅谈无损检测技术在压力容器检验中的应用[J].建筑工程技术与设计,2020(36):5003.
- [2]陈哲隽.压力容器检验中无损检测技术的应用[J].中国科技纵横,2021(12):28-29.
- [3]张展翔.浅析压力容器检验中无损检测技术的应用[J].中国机械,2020(20):17,19.
- [4]孔祥明,马华国.压力容器检验中无损检测技术的应用[J].魅力中国,2021(21):380-381.