

# 无损检测中的磁粉检测技术研究

白海军 薛晓刚 孙累冀 刘小瑜 孙志强 王锦文

山西江阳化工有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17488

**[摘要]** 随着制造业对产品质量与安全性的严苛要求,无损检测技术迎来革新浪潮。本文聚焦无损检测中的磁粉检测技术展开研究。首先阐述其基本原理,涵盖磁化、漏磁场形成以及磁粉聚集与缺陷显像原理。接着剖析关键技术要素,包括磁化电流、方法、磁场强度、检验方法及检测环境控制。最后探讨该技术的发展趋势,如自动化与智能化检测、新型磁粉材料应用、多技术融合检测以及标准化与规范化发展。旨在为深入了解磁粉检测技术提供全面参考,推动其在无损检测领域更广泛且有效的应用。

**[关键词]** 无损检测; 磁粉检测技术; 关键要素; 发展趋势

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A

## Research on Magnetic Particle Testing Technology in Nondestructive Testing

Haijun Bai Xiaogang Xue Leigong Sun Xiaoyu Liu Zhiqiang Sun Jinwen Wang

Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd.

**[Abstract]** With the stringent demands of the manufacturing industry for product quality and safety, nondestructive testing technology is witnessing a wave of innovation. This paper focuses on magnetic particle testing technology in nondestructive testing. It first elaborates on its fundamental principles, covering magnetization, leakage magnetic field formation, and the principles of magnetic particle accumulation and defect visualization. Subsequently, it analyzes key technical elements, including magnetization current, methods, magnetic field strength, inspection methods, and testing environment control. Finally, the development trends of this technology are discussed, such as automation and intelligent testing, application of new magnetic particle materials, multi-technology fusion testing, and standardization and normalization development. The aim is to provide a comprehensive reference for an in-depth understanding of magnetic particle testing technology and to promote its broader and more effective application in the field of nondestructive testing.

**[Key words]** Nondestructive Testing; Magnetic Particle Testing Technology; Key Elements; Development Trends

## 引言

在工业生产与质量检测领域,无损检测技术至关重要,它能在不破坏被检测对象的前提下,精准发现内部或表面缺陷,保障产品质量与安全。磁粉检测技术作为无损检测的重要分支,凭借操作简便、灵敏度高、成本低等优势,广泛应用于航空航天、机械制造、汽车工业等诸多行业。随着科技不断进步,对产品质量要求日益严苛,磁粉检测技术也面临新的挑战与机遇。深入研究磁粉检测技术,掌握其原理、关键要素及发展趋势,对于提升检测水平、保障工业生产安全具有重大现实意义。

### 1 无损检测中磁粉检测技术的基本原理

#### 1.1 磁化原理

磁粉检测技术的磁化原理基于铁磁性材料的磁特性。当铁磁性材料被置于外加磁场中时,其内部磁畴会重新排列,形成与

外加磁场方向一致的磁化方向,使材料整体表现出强磁性。磁化过程需根据工件形状、尺寸及缺陷取向选择合适的磁化方法,如周向磁化法、纵向磁化法或复合磁化法。磁化强度的控制是关键,需确保材料达到近饱和磁化状态,使缺陷处漏磁场强度足以吸附磁粉,同时避免过度磁化导致背景噪声干扰<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 漏磁场形成原理

漏磁场的形成源于铁磁性材料中缺陷处的磁导率差异。当材料被磁化后,若存在裂纹、气孔等缺陷,缺陷区域的磁导率远低于材料本体,导致磁感应线在缺陷处发生畸变。部分磁感应线无法通过低磁导率的缺陷区域,被迫从材料表面溢出至空气,绕过缺陷后再重新进入材料,形成局部磁场泄漏,即漏磁场。漏磁场的强度与缺陷的几何尺寸、深宽比及材料磁特性密切相关,缺陷越深、宽度越窄,漏磁场越强,越容易被检测。

### 1.3 磁粉聚集与缺陷显像原理

磁粉聚集与缺陷显像原理基于漏磁场对磁粉的吸附作用。当磁化后的材料表面喷洒磁粉(干粉或悬浮液)时,漏磁场区域会吸引磁粉颗粒,使其沿磁力线方向排列,形成与缺陷形状对应的磁痕。磁粉颗粒通常为高磁导率、低剩磁的铁磁性材料,如四氧化三铁或三氧化二铁,其尺寸需控制在10-100 μm范围内,以确保既能被漏磁场吸附,又能清晰显示缺陷细节。通过合适光照(如白光或荧光)观察磁痕,可直观判断缺陷的位置、形状及大小,实现缺陷的定量与定性分析。

## 2 无损检测中磁粉检测关键技术要素

### 2.1 磁化电流控制

磁化电流控制是磁粉检测中影响检测效果的关键技术要素之一。(1) 电流类型的选择至关重要。常见的磁化电流有交流电、直流电、整流电等。交流电具有趋肤效应,能使工件表面获得较高的磁场强度,适合检测表面及近表面缺陷;直流电的磁场分布相对均匀,可检测较深部位的缺陷;整流电则兼具两者的部分特性。根据工件的材质、形状以及缺陷的预期位置和深度,合理选择电流类型,是确保检测有效性的基础。(2) 电流大小的精确控制不可或缺。电流过小,无法使工件达到足够的磁化程度,漏磁场微弱,磁粉吸附效果差,难以发现缺陷;电流过大,不仅会造成能源浪费,还可能使工件产生过饱和磁化,导致背景磁场过强,掩盖缺陷磁痕,同时可能引发工件发热、变形等问题。需依据工件的尺寸、材质以及所采用的磁化方法,通过精确计算或经验公式确定合适的电流大小。(3) 电流的稳定性和连续性也不容忽视。电流波动会影响磁场的稳定性,进而影响磁粉的聚集和缺陷的显示效果。在检测过程中,要确保供电设备稳定运行,避免因电压波动等因素导致电流中断或波动,保证检测过程的可靠性和准确性。

### 2.2 磁化方法控制

磁化方法控制是磁粉检测中确保缺陷有效检出的重要技术环节。(1) 要根据工件的形状和结构特点来选择合适的磁化方法。对于形状规则的轴类、杆类工件,周向磁化法较为适用,它能使电流沿工件圆周方向流动,产生环绕工件的周向磁场,主要检测与工件轴线垂直的横向缺陷;而对于平板类工件,纵向磁化法更合适,通过线圈磁化或磁轭磁化等方式,产生沿工件长度方向的纵向磁场,用于发现与工件表面平行的纵向缺陷。(2) 需考虑工件的尺寸因素。大型工件可能需要采用复合磁化法,即同时施加周向和纵向磁场,以全面检测不同方向的缺陷,避免出现检测盲区;小型工件则可根据其具体形状和缺陷可能的方向,选择单一磁化方法进行精准检测。(3) 磁化方法的控制还需结合检测灵敏度要求。对于要求高灵敏度检测的关键部位,可采用多种磁化方法组合或多次磁化的方式,提高漏磁场的强度和磁粉的聚集效果,从而更清晰地显示微小缺陷,确保检测结果的准确性和可靠性,满足不同工业场景下对产品质量和安全性的严格要求<sup>[2]</sup>。

### 2.3 磁场强度控制

磁场强度控制是磁粉检测中保障检测质量的核心要素之一。(1) 磁场强度的合理设定需依据工件材质特性。不同材质的铁磁性材料,其磁性存在差异,如磁导率、饱和磁感应强度等。对于高磁导率材料,较小的磁场强度就能使其达到较好的磁化状态;而低磁导率材料则需要更强的磁场才能实现有效磁化。因此,要根据工件具体材质,参考相关标准或通过实验确定合适的磁场强度范围,确保工件能被充分磁化,使缺陷处产生足够强的漏磁场。(2) 工件尺寸和形状也会影响磁场强度的控制。大型工件由于体积大,磁路长,需要更强的磁场来保证磁化的均匀性和深度;而形状复杂的工件,在局部区域可能存在磁场分布不均的情况,需通过调整磁化方式或增加辅助磁化装置,使各部位的磁场强度达到检测要求,避免因磁场不足或过剩导致缺陷漏检或误判。(3) 检测灵敏度要求是控制磁场强度的重要依据。对于高灵敏度检测,要适当提高磁场强度,以增强漏磁场的强度,使微小缺陷也能被磁粉清晰显示;但同时要注意避免磁场过强产生背景干扰,影响缺陷的识别,需在灵敏度和背景清晰度之间找到最佳平衡点。

### 2.4 检验方法控制

检验方法控制是磁粉检测中确保结果准确可靠的关键环节。(1) 要依据工件的特点和检测要求,精准选择合适的检验方法类型。常见的有干法检验和湿法检验。干法检验适用于表面粗糙度较大、对灵敏度要求不是极高的工件,它操作简便、成本较低;湿法检验则凭借磁悬液的良好流动性,能更均匀地覆盖工件表面,对于微小缺陷的检测灵敏度更高,常用于对质量要求严格的精密工件检测。(2) 检验过程中的观察方式也需严格控制。在自然光下观察时,要保证光照充足且均匀,避免阴影和反光干扰对磁痕的识别;采用荧光磁粉检测时,需在紫外线灯照射的暗室环境中进行,严格控制紫外线灯的波长、强度以及照射距离和时间,确保荧光磁痕清晰可见,提高缺陷检出的准确性。(3) 检验顺序和步骤不容有误。要按照规范的流程,先对工件进行预处理,去除表面污垢和杂质,再进行磁化、施加磁粉,最后仔细观察和记录磁痕。每一步都要严格把控时间和操作要点,防止因操作不当导致漏检或误判,保证检验结果能真实反映工件的表面和近表面缺陷情况。

### 2.5 检测环境控制

检测环境控制是磁粉检测中保障检测质量与结果可靠性的重要基础。(1) 光照条件需严格把控。在非荧光磁粉检测时,要确保检测区域有充足且均匀的自然光或人工照明,光照强度应满足清晰观察磁痕的要求,避免因光线不足导致磁痕显示不清晰,影响缺陷的识别与判断;在荧光磁粉检测中,需营造暗室环境,严格控制环境光照强度,防止外界光线干扰荧光磁痕的显示,同时要保证紫外线灯的波长、强度符合标准,使荧光磁痕能够清晰、鲜明地呈现。(2) 环境温度和湿度对检测效果也有显著影响。温度过高可能使磁粉的流动性发生改变,影响磁粉在工件表面的均匀分布;温度过低则可能导致磁悬液冻结或磁粉结块。湿度过大时,工件表面容易形成水膜,干扰磁粉的吸附,降低检测

灵敏度。因此,要控制检测环境的温度和湿度在适宜范围内,保证检测过程的稳定性。(3)检测现场应保持清洁、无强磁场干扰。灰尘、油污等杂质会污染磁粉和工件表面,影响磁痕的形成与观察;强磁场会干扰检测过程中的磁化磁场,导致磁场分布异常,使检测结果不准确。所以,要做好检测现场的清洁与防磁工作,确保检测环境的纯净度<sup>[3]</sup>。

### 3 无损检测中磁粉检测技术的发展趋势

#### 3.1 自动化与智能化检测

在无损检测领域,磁粉检测正朝着自动化与智能化大步迈进。传统磁粉检测依赖人工操作,不仅效率低下,还易因人因因素导致检测结果不稳定。自动化检测设备的应用改变了这一局面,它能够按照预设程序精准完成磁化、喷洒磁粉、观察磁痕等操作,极大提高了检测效率。智能化则更进一步,借助先进的传感器技术,可实时采集检测过程中的各类数据,如磁场强度、磁粉分布等。通过大数据分析和人工智能算法,能自动识别缺陷类型、评估缺陷严重程度,并生成详细报告。这不仅减少了人工判断的主观误差,还能对检测数据进行长期跟踪分析,为设备维护和质量控制提供有力依据。

#### 3.2 新型磁粉材料的应用

新型磁粉材料的研发与应用为磁粉检测技术带来了新的活力。传统磁粉在性能上存在一定局限,如灵敏度不够高、稳定性欠佳等。新型磁粉材料则针对这些问题进行了优化。例如,纳米级磁粉具有更小的粒径和更高的磁响应能力,能够在更微弱的漏磁场下聚集,从而检测出更小的缺陷,大大提高了检测灵敏度。还有一些新型荧光磁粉,其荧光性能更加优异,在特定光照条件下能发出更明亮、更清晰的光,使磁痕显示更加醒目,便于观察和识别。此外,环保型磁粉材料也在逐渐兴起,它们减少了对环境的污染,符合可持续发展的要求。

#### 3.3 多技术融合检测

多技术融合检测是磁粉检测技术发展的重要趋势。单一检测技术往往存在局限性,难以全面、准确地检测出所有类型的缺陷。而将磁粉检测与其他无损检测技术相结合,可以实现优势互补。例如,将磁粉检测与超声检测融合,磁粉检测擅长检测表面和近表面缺陷,超声检测则对内部缺陷有很好的检测能力,两者结合能够对被检测对象进行全方位“体检”。再如,与涡流检测

融合,涡流检测对导电材料的表面和近表面缺陷检测速度快,与磁粉检测结合可提高检测效率和准确性。

#### 3.4 标准化与规范化发展

标准化与规范化是磁粉检测技术持续发展的重要保障。随着磁粉检测技术在各个行业的广泛应用,建立统一、规范的检测标准和操作流程显得尤为重要。标准化的检测方法能够确保不同地区、不同企业之间的检测结果具有可比性和一致性,避免因检测方法和标准不统一而导致的质量争议。规范化的操作流程则可以提高检测人员的操作水平,减少人为因素对检测结果的影响。目前,国际和国内都在不断完善磁粉检测的相关标准,涵盖检测设备、磁粉性能、检测方法、缺陷评定等多个方面。未来,随着技术的不断进步和行业的不断发展,标准化与规范化工作将更加深入和细致,不仅会制定更加严格的检测标准,还会加强对检测过程的监督和管理,确保磁粉检测技术在工业生产中发挥更大的作用<sup>[4]</sup>。

### 4 结束语

磁粉检测作为无损检测领域的关键技术,凭借其直观显示缺陷、操作便捷等优势,在保障工业产品质量与安全方面发挥着不可替代的作用。随着自动化、智能化浪潮的推进,新型磁粉材料的研发以及多技术融合趋势的加强,磁粉检测技术正不断突破传统局限,向更高灵敏度、更广适用范围、更精准可靠的方向迈进。而标准化与规范化的持续完善,更为其广泛应用筑牢根基。未来,磁粉检测技术必将深度融入工业生产各环节,为提升制造业整体质量水平、推动行业高质量发展提供强有力的技术支持。

#### [参考文献]

- [1]邱春.磁粉检测在压力容器检验中的应用研究[J].福建冶金,2020,49(6):55-56.
- [2]张崢,林郡,张惠芳,等.磁粉检测技术在役压力容器检验中的应用[J].石油化工设备,2021,40(S2):34-36.
- [3]林平来,李绪丰,吴喜来.带涂层压力容器的磁粉检测[J].中国特种设备安全,2020,26(11):40-42.
- [4]李剑.浅谈磁粉探伤检测方法的发展[J].建筑工程技术与设计,2023(1):11-85.