

磁粉检测与渗透检测在工程机械结构件无损检测中的应用分析

刘兆

中国能源建设集团西北电力建设工程有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17209

[摘要] 工程机械结构件长期承受重载、冲击等复杂载荷,易产生隐性缺陷,无损检测是保障其安全运行的关键。磁粉检测(MT)与渗透检测(PT)因操作便捷、成本可控,在该领域应用广泛。本文阐述了两种检测技术的原理、流程及特性差异,再结合工程机械结构件类型、缺陷特点及检测要求,从流程、适用性、效率成本维度对比分析二者应用场景。同时剖析技术局限性,提出针对性改进方向。研究旨在明确两种技术的应用边界与优化路径,为工程机械结构件无损检测提供科学的技术选择依据,助力提升检测质量与设备运行安全性。

[关键词] 磁粉检测; 渗透检测; 无损检测

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A

Application Analysis of Magnetic Particle Testing and Penetrant Testing in Nondestructive Testing of Engineering Machinery Structural Components

Zhao Liu

China Energy Engineering Group Northwest Electric Power Construction Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Engineering machinery structural components are subjected to complex loads such as heavy loads and impacts over time, making them prone to hidden defects. Nondestructive testing is crucial for ensuring their safe operation. Magnetic particle testing (MT) and penetrant testing (PT) are widely used in this field due to their operational convenience and cost-effectiveness. This paper elaborates on the principles, procedures, and characteristic differences of the two testing techniques. Based on the types of engineering machinery structural components, defect characteristics, and testing requirements, a comparative analysis of their application scenarios is conducted from the perspectives of process, applicability, efficiency, and cost. Additionally, the technical limitations are analyzed, and targeted improvement directions are proposed. The study aims to clarify the application boundaries and optimization paths of the two techniques, providing a scientific basis for technical selection in the nondestructive testing of engineering machinery structural components and contributing to the improvement of testing quality and equipment operational safety.

[Key words] Magnetic Particle Testing; Penetrant Testing; Nondestructive Testing

引言

工程机械作为基建核心装备,其结构件如车架、臂架等的完整性直接决定设备运行安全与施工效率。这类结构件在焊接、锻造等制造环节及长期服役过程中,易形成裂纹、夹杂等缺陷,若未及时检出,可能引发断裂等严重事故。无损检测技术无需破坏构件即可实现缺陷探测,其中磁粉检测与渗透检测凭借技术成熟、现场适应性强的优势,成为工程机械行业的主流检测手段。因此,系统分析两种技术的应用特性与适用场景,对提升检测精准度、降低安全风险具有重要现实意义。

1 磁粉检测(MT)与渗透检测(PT)技术概述

1.1 磁粉检测(MT)

磁粉检测基于电磁感应原理,适用于铁磁性材料构件的表面及近表面缺陷检测。检测时先通过磁化设备对构件施加磁场,使构件内部形成闭合磁场回路,若存在裂纹、气孔等缺陷,缺陷处会产生漏磁场。随后施加磁粉(干粉或磁悬液),磁粉在漏磁场作用下聚集形成磁痕,通过目视观察磁痕形态即可判断缺陷位置、大小及性质。该技术根据磁化方式可分为纵向磁化、周向磁化等,需结合构件形状与检测需求选择。其核心优势是对铁磁性材料的表面裂纹敏感性高,可检出0.1mm以下的细微裂纹,且检测结果直观,无需复杂数据处理,在工程机械焊接接头、轴类构件检测中应用频繁。

1.2 渗透检测(PT)

渗透检测依据毛细作用原理,适用于各种材质构件的表面开口缺陷检测,不受材料磁性限制。检测流程包括预处理、施加渗透剂、去除多余渗透剂、施加显像剂、观察判断五个核心步骤。预处理需清除构件表面油污、锈蚀等杂质;渗透剂通过毛细作用渗入表面开口缺陷;去除多余渗透剂后,施加显像剂使渗入缺陷的渗透剂被吸附至表面,形成清晰的缺陷显示痕迹。该技术按渗透剂类型可分为荧光渗透检测与着色渗透检测,荧光渗透需在紫外线下观察,检出灵敏度更高;着色渗透可直接目视观察,现场适应性更强^[1]。其突出特点是适用范围广,对铝、铜等非铁磁性材料及焊缝、铸件均有良好检测效果。

1.3两种技术的共性与差异

磁粉检测与渗透检测的共性体现在均针对构件表面及近表面缺陷,检测成本较低、操作流程简便,无需复杂大型设备,适合现场快速检测。二者均依赖人工目视判断结果,检测质量与操作人员经验相关,且检测前均需对构件表面进行清洁处理。核心差异体现在适用材料上:MT仅适用于铁磁性材料,如工程机械常用的Q345钢、45钢等;PT不受材料磁性限制,适用于所有材质。检测深度方面,MT可检出表面下1-2mm的近表面缺陷,PT仅能检测表面开口缺陷。灵敏度上,MT对铁磁性材料表面裂纹灵敏度更高,PT在非铁磁性材料检测中更具优势,且不受磁场干扰影响。

2 工程机械结构件特点与检测需求

2.1 工程机械结构件的常见类型

工程机械结构件按功能可分为承载结构件、传动结构件与连接结构件三类,各类构件形态与材质存在显著差异。承载结构件包括挖掘机臂架、装载机车架、起重机吊臂等,多采用高强度钢板焊接成型,结构尺寸大、壁厚不均,长期承受弯曲、扭转等复合载荷。传动结构件如传动轴、齿轮轴等,以锻造工艺为主,材质多为合金结构钢,表面经热处理强化,易在应力集中部位产生缺陷。连接结构件涵盖螺栓、法兰等,虽尺寸较小,但作为关键连接节点,其完整性直接影响整机稳定性。这些构件的材质以铁磁性材料为主,但部分特种工程机械也采用铝合金等非铁磁性材料制造结构件。

2.2 典型缺陷类型与产生原因

工程机械结构件的典型缺陷以表面及近表面缺陷为主,可分为制造缺陷与服役缺陷两类。制造缺陷包括焊接裂纹、未焊透、夹杂、锻件折叠等,焊接裂纹多因焊接工艺参数不当、焊后冷却过快导致;未焊透源于焊接电流不足或坡口清理不彻底;夹杂与折叠则是材料熔炼或锻造过程中工艺控制不严的结果。服役缺陷主要为疲劳裂纹与应力腐蚀裂纹,承载结构件在长期交变载荷作用下,易在焊缝边缘、截面突变处产生疲劳裂纹;传动结构件因润滑不良、过载运行,表面易出现磨损裂纹;在潮湿、腐蚀环境下作业的构件,还可能产生应力腐蚀裂纹,这类裂纹初期细微,易被忽视但扩展速度快。

2.3 检测技术要求

工程机械结构件的无损检测需满足“精准、高效、适配”的核心要求。精准性方面,需能检出0.1mm以上的表面裂纹及深

度1mm以内的近表面缺陷,且缺陷定位误差不超过5mm,避免因检测遗漏导致安全隐患。高效性要求检测流程简便,单构件检测时间控制在合理范围,如小型连接构件检测不超过30分钟,大型承载构件单次检测不超过4小时,以适应工程现场的快速检测需求。适配性要求检测技术能适应现场复杂环境,如高温、粉尘、狭小空间等工况,检测设备需便于移动,操作不受场地限制。同时,检测结果需具备可追溯性,便于后续质量跟踪与数据分析^[2]。

3 MT与PT在工程机械结构件检测中的应用分析

3.1 检测流程对比

磁粉检测与渗透检测在工程机械结构件检测中的流程既存在关联又有明显差异,核心区别体现在磁化环节与试剂使用上。MT流程为:构件表面预处理(除油、除锈)→选择磁化方式(如轴类构件采用周向磁化)→施加磁场并喷洒磁悬液→观察磁痕→退磁→后处理。其中磁化参数需根据构件尺寸调整,如直径50mm的传动轴需采用2000A周向磁化电流;退磁环节必不可少,避免构件残留磁场影响后续使用。PT流程为:表面预处理→施加渗透剂(浸泡或喷涂,渗透时间10-20分钟)→乳化(针对乳化型渗透剂)→水洗去除多余渗透剂→施加显像剂(等待5-10分钟显像)→目视观察。二者预处理要求一致,但MT需额外进行磁化参数调试与退磁,流程复杂度略高;PT无需考虑构件磁性,在多材质构件检测中流程更统一。以挖掘机臂架焊接检测为例,MT需针对不同焊缝位置调整磁化线圈摆放角度,PT则可统一采用喷涂方式完成渗透与显像,操作更简洁。

3.2 适用性分析

MT与PT的适用性需结合工程机械结构件的材质、缺陷类型及服役环境综合判断。MT在铁磁性构件检测中优势显著,尤其适用于承载结构件与传动结构件的表面及近表面缺陷检测,如起重机吊臂的焊接裂纹、传动轴的疲劳裂纹等。对于这类构件的近表面夹杂缺陷,MT可通过磁痕形态精准识别,而PT因无法渗透至近表面则难以检出。PT的核心优势是材质适应性广,适用于非铁磁性构件检测,如铝合金挖掘机铲斗、铜合金液压管路等,同时也可用于铁磁性构件的表面开口缺陷复检,避免MT因磁场分布不均导致的检测盲区。在潮湿环境下,荧光型PT比MT更适用,因磁悬液在潮湿表面易流淌,影响磁痕清晰度,而荧光渗透剂在紫外线下显示稳定^[3]。对于螺栓等小型连接构件,PT因操作灵活更适合批量检测,MT则需频繁调整磁化设备,效率较低。

3.3 检测效率与成本对比

检测效率方面,MT与PT的差异体现在设备调试、检测操作及结果判断三个环节。MT对大型铁磁性构件的检测效率更高,如装载机车架检测,一次磁化可覆盖1-2平方米区域,磁痕形成后可直接观察,单构件检测时间约2-3小时;但对小型构件需频繁调试磁化参数,效率降低30%以上。PT检测效率受渗透与显像时间限制,单构件检测周期通常比MT长10-15分钟,但设备调试简单,批量检测时效率优势明显,如批量螺栓检测,PT每小时可完成50-60件,MT仅能完成30-40件。成本方面,MT的设备投入较高,一套

便携式磁粉检测设备(含磁化机、磁悬液)约3-5万元,且磁悬液需定期更换,年耗材成本约5000元;PT设备成本更低,一套着色渗透检测试剂与工具仅需5000-8000元,年耗材成本约3000元。但MT在铁磁性构件检测中检出精度高,可减少复检成本;PT在非铁磁性构件检测中无需额外设备投入,综合成本更优。以年检测1000台工程机械结构件计算,全铁磁性构件采用MT的综合成本比PT低15%-20%,含非铁磁性构件时PT综合成本更低。

4 MT与PT的局限性及改进方向

4.1 MT的局限性

磁粉检测的局限性主要体现在材质限制、磁场干扰及检测盲区三个方面。材质上,MT完全无法用于非铁磁性材料检测,对不锈钢等弱磁性材料的检测灵敏度也大幅下降,如奥氏体不锈钢结构件的裂纹检出率不足50%。磁场干扰问题突出,构件表面的剩磁、检测环境中的电磁设备都会影响磁场分布,导致磁痕模糊或虚假显示,如在电焊机附近进行MT检测,虚假磁痕发生率可高达20%。检测盲区主要存在于构件几何形状复杂区域,如车架的拐角、焊缝交叉处,磁场在此类区域分布不均,难以形成有效漏磁场,导致缺陷漏检。此外,MT对缺陷方向敏感,仅能检出与磁场方向垂直或成一定角度的缺陷,平行于磁场的裂纹易被遗漏。同时,检测结果受表面状态影响大,构件表面的氧化皮、涂层厚度超过0.1mm时,会阻碍磁粉聚集,降低检测灵敏度。

4.2 PT的局限性

渗透检测的核心局限性在于检测深度有限与表面状态依赖性。PT仅能检测表面开口缺陷,对近表面缺陷完全无检出能力,如传动结构件内部的微小夹杂缺陷,PT无法识别,易造成“表面合格但内部存在隐患”的误判。表面状态直接决定检测效果,构件表面的油污、锈蚀未彻底清除时,会堵塞缺陷开口,阻碍渗透剂渗入,导致缺陷漏检;表面粗糙度超标($Ra > 12.5 \mu m$)时,多余渗透剂难以彻底去除,形成背景干扰,影响缺陷识别,如铸造件的粗糙表面易导致PT检测的误判率超过30%。此外,PT的检测周期受环境温度影响大,低温环境(低于 $5^{\circ}C$)下渗透剂粘度增加,渗透速度减慢,需延长渗透时间至常温下的2-3倍,降低检测效率;高温环境下渗透剂易挥发,导致检测成本上升^[4]。荧光型PT还需依赖紫外光源,在强光直射的户外环境下,缺陷显示清晰度大幅下降。

4.3改进方向

针对MT与PT的局限性,可从技术融合、设备升级与流程优化三个方向实现改进。技术融合方面,推行“MT+PT”组合检测模式,铁磁性构件先采用MT检测表面及近表面缺陷,再用PT复检表面开口缺陷,如挖掘机臂架检测可使裂纹检出率提升至98%以上;非铁磁性构件采用“PT+超声检测”组合,弥补PT无法检测内部缺陷的不足。设备升级上,MT可研发智能磁化设备,通过传感器自动识别构件尺寸与材质,精准匹配磁化参数,同时集成退磁检测功能,确保构件剩磁符合标准;PT开发低温适应性渗透剂与高效显像剂,降低环境温度对检测周期的影响,荧光型PT配备便携式强紫外光源,提升户外检测清晰度。流程优化方面,引入机器视觉技术,通过高清摄像头采集磁痕与渗透痕迹图像,结合AI算法自动识别缺陷,减少人工判断误差,如AI识别系统可将MT的缺陷误判率从15%降至5%以下;建立检测数据管理平台,实现检测流程与结果的数字化追溯,为构件全生命周期管理提供数据支撑。此外,加强操作人员培训,提升对复杂工况下检测技术的应用能力,也是提升检测质量的重要保障。

5 结束语

磁粉检测与渗透检测作为工程机械结构件无损检测核心技术,优势互补而非替代。MT对铁磁性构件表面及近表面缺陷精准高效,PT以材质适应性广在表面开口缺陷检测中不可或缺。工程实践需科学选技,避免安全风险。未来,智能检测设备与AI识别技术将突破二者局限,大幅提升检测精度与效率。推动无损检测技术创新应用,对保障工程机械安全运行、降低运维成本、促进基建行业高质量发展意义重大。

[参考文献]

- [1]徐文.无损检测技术在机械焊接结构中的运用[J].大众标准化,2022(03):159-161.
- [2]马国,贾华东,卢长煜.磁粉检测与渗透检测在工程机械结构件无损检测中的应用[J].期刊论文,2019(2):744-745.
- [3]杨羿,张建东,李昊.钢结构桥梁焊接无损检测技术应用及发展[J].轻工科技,2020,36(12):70-71+114.
- [4]鲁宏进.浅谈机械工程中的焊接无损检测技术[J].机电信息,2020(11):83-84.