

无损检测技术在变压器金属焊接件检测中的应用

王学超

中国电建集团河南工程有限公司 河南 郑州 450001

摘要: 变压器作为电力系统的核心设备,其稳定运行关乎整个电网的安全与可靠。本文围绕无损检测技术在变压器金属焊接件检测中的应用展开。先列举了变压器金属焊接件常见的焊缝裂纹(热裂纹、冷裂纹)、气孔(成因与危害)、夹渣(来源及影响)等缺陷类型。接着阐述超声、射线、磁粉、渗透、涡流等无损检测技术的具体应用。最后探讨其发展趋势,涵盖多种技术融合、智能化发展、微观结构检测技术应用,旨在为变压器金属焊接件检测提供全面且深入的技术参考,助力电力设备安全稳定运行。

关键词: 无损检测技术;在变压器金属;焊接件检测;应用

引言:在电力系统中,变压器扮演着极为重要的角色,而其金属焊接件的质量直接关系到整个电力系统的可靠性。焊接过程中,诸如焊缝裂纹、气孔、夹渣等缺陷难以避免,这些缺陷会严重威胁变压器的正常运行,甚至引发电力事故。无损检测技术因其不会对被检测物体造成损伤,能够有效检测出各类缺陷,成为保障变压器金属焊接件质量的关键手段。深入研究其在变压器金属焊接件检测中的应用,对提升电力系统安全性和稳定性意义重大。

1 变压器金属焊接件常见的缺陷类型

1.1 焊缝裂纹

1.1.1 热裂纹

热裂纹是在焊接的高温阶段,焊缝金属从液态向固态转变时产生的。在焊缝结晶期间,低熔点共晶物质会在晶界处聚集,形成脆弱的液态薄膜。当焊接过程中的应力作用于这些薄弱部位时,液态薄膜就会被撕裂,进而产生热裂纹。热裂纹通常沿着晶界分布,表面因高温氧化而呈现出氧化色彩。例如在某大型变压器的制造中,由于焊接电流过大,焊接速度过快,导致焊缝冷却不均匀,产生了热裂纹,使得该批次产品不得不返工处理,造成了巨大的经济损失。热裂纹的存在严重削弱了焊接接头的强度,大大降低了变压器金属焊接件的承载能力,是变压器安全运行的重大隐患。

1.1.2 冷裂纹

冷裂纹是在焊接冷却到较低温度时出现的裂纹。其产生与焊接接头中的氢含量、拘束应力以及母材的淬硬倾向紧密相关。焊接时,氢原子融入焊缝金属,在冷却过程中,由于氢的扩散速度较慢,会在局部区域聚集。当氢浓度达到一定程度,在拘束应力和淬硬组织的共同作用下,就会引发冷裂纹。冷裂纹具有延迟性,可能在焊

接完成后的数小时甚至数天后才出现,这使得它很难在焊接后立即被检测出来。曾经有一起变压器运行事故,就是因为冷裂纹在运行一段时间后逐渐扩展,最终导致变压器短路起火。冷裂纹的这种特性对变压器的长期安全运行构成了潜在的巨大风险,必须引起高度重视。

1.2 焊缝气孔

1.2.1 气孔形成的原因

气孔的形成主要源于焊接过程中气体的卷入与滞留。一方面,焊接材料中本身含有的水分、油污等杂质,在高温作用下分解产生气体,如水分分解为氢气和氧气。另一方面,焊接区域周围的空气,在焊接时被电弧的高温电离,其中的氮气、氧气等也可能混入焊缝熔池中。熔池在快速冷却凝固时,这些气体来不及逸出,便在焊缝中形成了气孔。此外,焊接工艺参数也有影响,电流过小、焊接速度过快,会使熔池存在时间过短,不利于气体排出,从而增加气孔产生的几率。

1.2.2 气孔的危害

焊缝气孔对变压器金属焊接件危害显著。从力学性能看,气孔相当于在焊接件内部形成空洞,破坏了金属的连续性,使焊接件的有效承载面积减小,导致强度和韧性降低,在承受较大应力时,气孔周围易产生应力集中,进而引发裂纹扩展。在密封性方面,气孔的存在会破坏焊接件的密封性能,对于需要保证密封性的变压器部件,如油箱等,气孔会导致油液渗漏,影响变压器的正常运行,还可能引发绝缘性能下降,威胁电力系统的安全稳定。

1.3 焊缝夹渣

1.3.1 夹渣的来源

夹渣主要来源于多个方面。其一,焊接材料本身质量不佳,例如焊条药皮中含有过多的杂质,在焊接过程

中这些杂质无法充分熔入熔渣而残留在焊缝中。其二,焊接操作不当是重要原因,焊接时未能及时清理前一层焊缝的熔渣,后续焊接时就会将其卷入新的焊缝;或者运条速度不均匀,导致熔池搅拌不充分,熔渣难以浮出。其三,焊接工艺参数不合理,电流过小使得熔池温度低,熔渣的流动性变差,难以与液态金属分离,最终造成夹渣现象。

1.3.2 夹渣对焊接件的影响

焊缝夹渣严重影响变压器金属焊接件性能。在力学性能上,夹渣相当于在焊接件内嵌入了“异物”,改变了金属的均匀性,极大地削弱了焊接接头的强度,使其在承受载荷时容易发生应力集中,导致焊接件过早失效。在长期运行过程中,夹渣部位还可能因电化学腐蚀等作用而逐渐恶化,缩短焊接件的使用寿命。而且,夹渣也会影响焊接件的外观质量,不符合相关标准要求,对于高精度的变压器制造来说,夹渣缺陷往往需要返工处理,增加了生产成本和时间成本^[1]。

2 无损检测技术在变压器金属焊接件检测中的应用

2.1 超声无损检测技术

超声无损检测技术是利用超声波在不同介质中传播时的反射、折射和衰减等特性来检测缺陷。检测时,超声探头向焊接件发射超声波,当超声波遇到缺陷时,会产生反射波,接收探头捕捉这些反射波并将其转化为电信号。通过分析电信号的特征,如反射波的幅度、传播时间等,就能确定缺陷的位置、大小和形状。这种技术优势显著。它对内部缺陷检测灵敏度高,尤其是对裂纹、未焊透等线性缺陷十分敏感,能够发现极其微小的内部隐患。检测速度快,可实现快速检测,提高生产效率。成本相对较低,适合大规模检测。在实际应用中,常用于检测大型焊接件,如油箱壁、铁芯夹件等部位的内部缺陷。例如,在某大型变压器制造企业,通过超声无损检测技术,成功检测出油箱壁内部一条长度仅为3mm的裂纹,避免了产品投入使用后可能出现的泄漏风险,有效保障了变压器的结构强度和密封性。不过,该技术对检测人员的经验要求较高,检测结果的判读存在一定主观性,且对于形状复杂的焊接件检测难度较大。

2.2 射线无损检测技术

射线无损检测技术基于射线穿透物质时的衰减特性。当X射线或 γ 射线穿透变压器金属焊接件时,由于缺陷部位与正常金属的密度不同,对射线的吸收程度也不同,从而在射线底片或数字探测器上形成不同的影像。通过观察影像的灰度差异,就能判断是否存在缺陷以及缺陷的类型、尺寸和位置。该技术优点明显,检测结果

直观、准确,对体积型缺陷如气孔、夹渣等检测效果极佳,能够清晰呈现缺陷的形状和大小。在变压器焊接件检测中,常用于检测重要部件的焊缝,像绕组的焊接接头等。某电力公司在对一批变压器绕组焊接接头进行检测时,利用射线无损检测技术,准确检测出多个气孔和夹渣缺陷,及时进行返工处理,避免了因缺陷导致变压器运行故障。但射线无损检测技术也存在局限性,其对人体有一定危害,检测过程需要严格的防护措施,设备成本较高,检测效率相对较低,不适用于大规模快速检测。

2.3 磁粉无损检测技术

磁粉无损检测技术适用于铁磁性材料的表面和近表面缺陷检测。其原理是当被检测的变压器金属焊接件被磁化后,若表面或近表面存在缺陷,就会产生漏磁场,此时在焊接件表面喷洒磁粉,磁粉会被漏磁场吸附,形成与缺陷形状和位置相对应的磁痕,通过观察磁痕即可判断缺陷情况。该技术操作简便,检测灵敏度高,能快速检测出微小缺陷,对表面裂纹等缺陷尤为敏感。在变压器检测中,常用于检测铁芯、绕组等铁磁性部件的表面和近表面缺陷。例如,在对某变压器铁芯进行检测时,利用磁粉无损检测技术,检测出表面一处长度为2mm的细微裂纹,及时采取修复措施,防止因表面缺陷引发的故障。然而,该技术只能检测铁磁性材料,对非铁磁性材料无效,且检测后需要对焊接件进行退磁处理,增加了一定的工序。

2.4 渗透无损检测技术

渗透无损检测技术主要用于检测非多孔性材料的表面开口缺陷。检测时,先将含有染料或荧光剂的渗透液涂覆在变压器金属焊接件表面,渗透液会在毛细管作用下渗入表面开口缺陷中,然后去除表面多余的渗透液,再涂上显像剂,渗入缺陷中的渗透液被吸附到表面,从而显示出缺陷的形状和位置。这种技术对表面开口缺陷检测灵敏度极高,能检测出细微裂纹、针孔等缺陷,检测结果直观,易于观察。在变压器焊接件检测中,常用于检测油箱、散热器等部件的表面缺陷。某变压器生产厂在对油箱进行检测时,通过渗透无损检测技术,发现多处针孔缺陷,避免了油箱在使用过程中出现渗漏问题,确保了这些部件的密封性和外观质量。但该技术检测时间较长,对检测环境要求较高,且只能检测表面开口缺陷,对于内部缺陷无能为力。

2.5 涡流无损检测技术

涡流无损检测技术利用电磁感应原理。当交变磁场作用于变压器金属焊接件时,会在其内部产生感应电流,即涡流。若焊接件存在缺陷,会改变涡流的分布和

大小,进而引起检测线圈的阻抗变化。通过检测线圈阻抗的变化,就能判断缺陷的存在与否以及缺陷的位置和大小。该技术检测速度快,可实现非接触式检测,对表面和近表面缺陷检测效果良好,特别适用于导电材料制成的焊接件检测。在变压器检测中,常用于检测铜绕组的焊接接头等。例如,在对某变压器铜绕组焊接接头进行检测时,利用涡流无损检测技术,快速检测出表面一处微小裂纹,保障了变压器的电气性能。不过,该技术对缺陷的定性和定量分析难度较大,检测结果受材质、形状等因素影响较大,检测深度有限^[2]。

3 无损检测技术在变压器金属焊接件检测中的发展趋势

3.1 多种检测技术的融合

单一的无损检测技术往往存在局限性,难以全面、准确地检测出变压器金属焊接件的所有缺陷。因此,多种检测技术的融合成为必然趋势。例如,将超声无损检测技术与射线无损检测技术相结合,超声检测擅长发现内部线性缺陷,射线检测则对体积型缺陷敏感,两者结合可实现对焊接件内部缺陷的全面检测。在实际应用中,先利用超声检测进行初步筛查,快速定位可能存在缺陷的区域,再运用射线检测对这些区域进行精确成像分析,从而更准确地判断缺陷的类型、大小和位置。此外,磁粉检测与渗透检测也可联合使用,用于检测铁磁性材料的表面和近表面开口缺陷,通过不同技术的优势互补,提高检测的准确性和可靠性,减少漏检和误检的概率。

3.2 智能化检测技术的发展

智能化检测技术是无损检测领域的重要发展方向。随着人工智能、大数据和机器学习等技术的飞速发展,无损检测设备正朝着智能化、自动化方向迈进。智能化检测系统能够自动采集、分析检测数据,通过预设的算法和模型,快速准确地判断焊接件是否存在缺陷以及缺陷的性质。例如,利用深度学习算法对大量的超声检测信号、射线图像等数据进行训练,使系统能够自动识别不同类型的缺陷特征,实现缺陷的自动分类和定量分析。同时,智能化检测设备还可以实时监测检测过程中

的各种参数,根据实际情况自动调整检测策略,提高检测效率和质量。此外,借助物联网技术,检测数据可以实时传输到云端,实现远程监控和数据分析,方便专家进行远程诊断和决策^[3]。

3.3 微观结构检测技术的应用

传统的无损检测技术主要关注焊接件的宏观缺陷,而微观结构检测技术的应用则能够从微观层面深入了解焊接件的质量状况。例如,扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等微观检测技术,可以观察焊接接头的微观组织结构、晶界状态以及微观缺陷等。通过分析微观结构,能够评估焊接件的力学性能、耐腐蚀性能等,提前发现潜在的质量隐患。在变压器金属焊接件检测中,微观结构检测技术可用于研究焊接热影响区的组织变化,分析焊接工艺对材料微观性能的影响,为优化焊接工艺提供依据。此外,纳米压痕技术、电子背散射衍射(EBSD)等微观检测技术也逐渐应用于无损检测领域,为全面评估变压器金属焊接件的质量提供了更丰富、更准确的信息^[4]。

结束语

随着电力行业的快速发展,变压器金属焊接件的质量关乎电力系统的稳定运行。无损检测技术通过超声、射线、磁粉等多种方式,精准检测各类缺陷,在保障变压器安全运行中意义重大。如今,多种检测技术融合、智能化及微观结构检测技术的应用,为该领域注入新活力。未来,无损检测技术将不断创新,进一步提升检测精度与效率,为变压器金属焊接件质量把控筑牢防线,推动电力行业持续发展

参考文献

- [1]陈涛.超声无损检测技术在金属材料焊接中的应用探析[J].中国金属通报,2020(09):210-211.
- [2]赵顺利.超声无损检测技术在金属材料焊接中的应用研究[J].中国建材科技,2019,28(04):10-11.
- [3]马俊.超声无损检测技术在金属材料焊接缺陷检测中的应用[J].中国金属通报,2019(03):195-196.
- [4]张成侠.超声无损检测技术在金属材料焊接检测中的应用[J].中国新技术新产品,2018(24):24-25.