

探析钢结构无损检测技术

李 剑

广西科诚建设工程质量检测科技有限公司 广西 南宁 530001

摘 要：钢结构焊缝质量对结构安全至关重要。无损检测技术，包括超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测及相控阵超声波检测，是现代工业中保障产品质量的关键技术。这些技术通过非破坏性手段，精准评估材料内部及表面缺陷，广泛应用于多个工业领域。本文探讨了这些无损检测技术的工作原理、优势、应用及局限性，为钢结构质量控制和安全评估提供了有力支持。

关键词：钢结构；无损检测；技术；应用

引言

钢结构作为现代建筑和工程的主要结构形式，其焊缝质量直接关系到结构的整体性能和安全性。为确保钢结构的质量，无损检测技术应运而生并迅速发展。本文旨在综述当前主要的无损检测技术，包括超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测及相控阵超声波检测，探讨其在钢结构检测中的应用原理、优势及局限性，为钢结构质量控制提供技术参考。

1 钢结构焊缝及其特性

钢结构焊缝及其特性是钢结构工程中的核心要素，对结构的整体性能和安全性具有决定性影响。焊缝作为钢结构件之间的关键连接部分，其质量和特性直接关系到结构的承载力和使用寿命。在钢结构中，焊缝形式多样，如对接、搭接、T形、角形及十字形接头等，每种形式都有其独特的应用场景和优势。对接接头因强度高、应力分布均匀，特别适用于承受重载的构件；搭接接头施工简便，适应性强，常用于薄板或壳体结构；而T形、角形和十字形接头则能满足复杂结构中的多向受力需求，增强结构的稳定性。焊缝的特性同样值得重视。焊接结构不仅具有高强度和轻质的特点，还展现出良好的塑韧性和安装便捷性。焊缝的塑韧性使得结构在受力时能承受较大变形而不易破坏，确保了安全性。同时，焊接结构的轻质特性有助于减轻建筑自重，提升抗震性能。但焊缝在焊接过程中易产生裂纹、气孔等缺陷，这些缺陷会削弱焊缝的强度和密封性，甚至成为结构破坏的隐患。因此，在钢结构工程中，必须严格把控焊接工艺，加强焊缝质量检测，确保焊缝质量符合设计要求，从而保障整个钢结构的安全与耐久^[1]。

2 无损检测技术概述

无损检测技术是现代工业中一项至关重要的技术，它以其独特的非破坏性特点，在保障产品质量、设备安

全及结构可靠性方面扮演着关键角色。这项技术的核心优势在于，它能在不损伤被检测对象的前提下，精准地评估其内部及表面的缺陷、结构完整性和材料性能。无损检测技术种类繁多，如超声波检测利用超声波传播特性判断材料内部缺陷，射线检测则通过强穿透性射线透视被检测对象。此外，磁粉检测、渗透检测、涡流检测等技术也各具特色，广泛应用于不同领域和材料。无损检测技术的应用范围极为广泛，从航空航天到汽车制造，从石油化工到铁路交通，再到建筑建设等各个领域，都能见到其身影。它帮助工程师和技术人员及时发现并处理潜在的安全隐患，确保设备和结构的安全运行。可以说，无损检测技术是现代工业安全的守护神，为工业发展和产品质量提升提供了坚实的技术支撑^[2]。

3 主要无损检测技术及其应用

3.1 超声波检测（UT）

（1）超声波检测（Ultrasonic Testing，简称UT）作为一种基于超声波在材料中传播特性的无损检测技术，已广泛应用于制造业、航空航天、能源、医疗等多个关键领域。该技术巧妙地运用超声波在遇到不同介质或缺陷时产生的反射、折射、散射等现象，来精准地检测材料内部的缺陷、评估材料的物理特性，甚至测量材料的厚度。（2）其工作原理相当精妙，超声波探头发射出高频声波信号（频率通常在1 MHz至10 MHz之间），这些声波穿透被检测材料。一旦声波遭遇材料内部的裂纹、气孔、夹杂物等缺陷，或碰到材料界面，就会发生反射、折射和散射。接收器捕捉到这些反射回来的声波信号，并将其转换为电信号。随后，通过分析这些信号的幅度、时间延迟和频率等关键参数，检测人员就能准确判断材料内部的缺陷类型、位置和大小。（3）超声波检测的优势显而易见，它穿透力强、分辨率高，能深入材料内部探测缺陷；同时，作为一种真正的无损检测技术，

它不会对被检测材料造成任何物理损伤或性能改变；检测速度快，适用于大规模快速检测；灵敏度和准确性均极高，能捕捉到微小的内部缺陷和变化。（4）在航空航天、汽车制造、核能工业等领域，超声波检测发挥着举足轻重的作用。然而，它也并非万能，对于与超声波波束方向平行的缺陷，检测效果可能受限。此外，超声波检测对检测人员的专业技能要求较高，需要专业的操作和分析人员来确保检测结果的准确无误^[3]。

3.2 射线检测（RT）

（1）射线检测（Radiographic Testing，简称RT）作为无损检测技术的重要一员，广泛应用于工业质量控制、航空航天、船舶、核能及桥梁工程等多个关键领域。其工作原理基于X射线、 γ 射线等射线的穿透性，通过测量透射射线的强度变化，来揭示物体内部的缺陷和结构信息。（2）在射线检测过程中，射线束穿透物体时会与物质发生相互作用，如吸收和散射，导致射线强度发生变化。若物体内部存在裂纹、气孔或夹杂物等缺陷，这些区域对射线的吸收和散射特性将与正常区域不同，进而使得透射射线的强度分布产生差异。通过检测这些强度变化，即可准确推断出物体内部的缺陷位置、形状和大小。（3）射线检测的优势在于其能提供直观的缺陷图像，便于缺陷的准确评估和定位。同时，它对体积型缺陷具有较高的灵敏度，能检测到微小的内部问题。此外，射线检测几乎适用于所有材料，展现出广泛的适用性。（4）在工业应用中，射线检测常用于焊缝、铸件和锻件等工件的内部缺陷检测。在航空航天领域，它确保飞机发动机叶片、机身结构等关键部件的安全。汽车制造中，则用于检测发动机缸体、曲轴等零部件的内部质量。此外，在石油化工、核能和桥梁工程等领域，射线检测也发挥着重要作用，有效防止设备泄漏和爆炸事故的发生。（5）射线检测也存在局限性，如辐射危害和较高成本，需严格防护和专业操作。同时对于某些类型缺陷，其灵敏度可能受透照角度和厚度等因素影响。

3.3 磁粉检测（MT）

（1）磁粉检测（Magnetic Particle Testing，简称MT）是铁磁性材料无损检测的重要技术，广泛应用于机械、汽车、航空航天、石油化工、建筑等工业领域。其核心原理基于铁磁性材料的磁化特性，用于检测材料表面及近表面的缺陷。（2）当铁磁性材料被磁化后，其内部磁力线会形成闭合路径。若材料表面或近表面存在裂纹、气孔等缺陷，磁力线的连续性会被打断，进而产生漏磁场。此时，在材料表面撒上铁磁性粉末（磁粉），这些磁粉会被漏磁场吸引并聚集在缺陷部位，形成明显

的磁粉痕迹，从而可以观察到缺陷的具体位置、形态和尺寸。（3）磁粉检测操作包括预处理、磁化、施加磁粉、观察和记录及后处理。预处理需清洁被检测物体表面，去除杂质；磁化阶段根据工件特性选择合适方法和设备；施加磁粉后，在适宜光照下观察磁粉分布，记录缺陷位置；检测完成后进行退磁处理，消除残余磁场。

（4）磁粉检测优点显著，对表面和近表面缺陷检测灵敏度高，能检测到微米级缺陷；操作简单，速度快，成本低，适合大规模应用；能直观显示缺陷信息，便于准确评估和定位。（5）磁粉检测也有局限性，仅适用于铁磁性材料，非铁磁性材料无法使用；主要检测表面和近表面缺陷，对深埋缺陷检测能力有限；检测结果受环境温度、湿度等条件影响，需在适宜环境中进行检测^[4]。

3.4 渗透检测（PT）

（1）渗透检测（Penetrant Testing，简称PT）是一种基于毛细管作用的无损检测方法，专用于检测非多孔性材料表面的开口缺陷，对金属材料、非金属材料及其复合材料均适用，尤其在检测微小表面缺陷方面表现卓越。（2）其原理是利用带荧光或着色染料的渗透剂，使其渗透到材料表面开口缺陷中。渗透足够时间后，去除表面多余渗透剂，再施加显像剂。显像剂能吸附回渗透到表面的渗透剂，形成放大的缺陷图像。在白光或黑光（针对荧光渗透剂）下，可清晰观察到缺陷的位置、形状和大小。（3）渗透检测的优势在于对表面缺陷的高度敏感性，能检测出仅几微米宽的裂纹、气孔等缺陷。操作简便，无需复杂设备，成本较低。且不受材料化学成分和磁性的影响，适用范围广。（4）在航空航天、汽车制造、机械制造、石油化工等行业，渗透检测被广泛应用于零部件表面缺陷检测。如航空航天领域用于检测飞机发动机叶片、机身蒙皮等部件，确保飞行安全；汽车制造中用于检测发动机缸体、缸盖等零部件的铸造和加工缺陷，提升汽车质量和可靠性。（5）渗透检测也有局限，无法检测内部缺陷，且受温度、湿度等环境因素影响大。检测时需严格控制条件，确保结果准确可靠。对于表面粗糙或多孔材料，检测效果可能受影响。因此在实际应用中需综合考虑其优缺点，合理选择检测方法。

3.5 涡流检测（ECT）

（1）涡流检测（Eddy Current Testing，ECT）是一种基于电磁感应原理的无损检测技术，它主要针对导电材料（例如金属）的表面及近表面缺陷进行检测，并可用于评估材料的物理特性。这一技术通过在被测材料表面或附近设置通有交流电的线圈，利用电磁感应原理在材料内部诱发涡流，随后通过分析这些涡流的变化来识别

材料内部的缺陷。(2) ECT的基本原理在于,交流电线圈靠近导电材料时,会产生交变磁场,进而在材料内部感应出涡流。涡流的大小和分布特性受到材料电导率、磁导率以及内部缺陷等多重因素的影响。若材料内部存在缺陷,涡流的流动将受阻,导致涡流分布发生变化。这种变化可通过测量线圈的阻抗、电压或相位等参数来捕捉和分析。(3) 涡流检测具有非接触、检测速度快、对表面及近表面缺陷敏感度高等优点。它不会损伤被测材料,能在短时间内完成大面积检测,并能有效检测出微小的裂纹、腐蚀和夹杂等缺陷。(4) 涡流检测在航空航天、汽车制造、石油化工等多个工业领域有广泛应用,如检测飞机发动机叶片、汽车零部件和石油管道等设备的缺陷。但ECT也有其局限性,它仅适用于导电材料,且对材料表面条件有一定要求。表面污染、涂层或氧化层都可能影响检测效果。因此,在实际应用中,需根据被测材料的特性和检测需求,选择恰当的检测方法和设备。

3.6 相控阵超声波检测(PAUT)

(1) 相控阵超声波检测(Phased Array Ultrasonic Testing,简称PAUT)是超声波检测技术的一种先进形式,它利用多个超声波阵元组成的相控阵阵列,通过电子方式控制各阵元发射和接收超声波的相位和幅度,从而实现超声波束的动态聚焦和扫描。(2) 相控阵超声波检测的工作原理是基于惠更斯原理,通过调整各阵元的发射相位,可以形成不同方向的超声波束,实现对被测材料的全方位扫描。同时,通过动态聚焦技术,可以提高超声波的分辨率和穿透力,从而更准确地检测出材料内部的缺陷。(3) 相控阵超声波检测的优势在于其高度的灵活性和准确性。它可以实现对复杂形状和结构的

全面检测,且能够成像显示缺陷的位置、形状和大小,为缺陷的评估和定位提供了直观的依据。此外,相控阵超声波检测还具有检测速度快、操作简便等优点。(4) 在钢结构无损检测中,相控阵超声波检测被广泛应用于焊缝、厚板、管道等复杂结构的检测。它能够准确检测出焊缝中的裂纹、气孔、夹渣等缺陷,为钢结构的质量控制和安全评估提供了有力支持。(5) 然而,相控阵超声波检测也存在一定的局限性。例如,它对检测人员的专业技能要求较高,需要专业的操作和分析人员来确保检测结果的准确无误。同时,对于某些特殊材料或结构,可能需要特殊的相控阵阵列和检测参数设置,以确保检测的有效性。

结束语

无损检测技术作为现代工业中不可或缺的一部分,为钢结构的质量控制和安全评估提供了有力保障。通过综述超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测及相控阵超声波检测等多种技术,我们深刻认识到每种技术都有其独特的优势和局限性。在实际应用中,应根据钢结构的特点和检测需求,合理选择无损检测技术,确保钢结构的安全与耐久。

参考文献

- [1]宋阳.探析钢结构无损检测技术[J].安徽建筑,2023,30(2):176-177.
- [2]魏喜波.探析钢结构无损检测技术[J].电脑高手,2020(4):2390-2391.
- [3]任海峰.钢结构无损检测中超声波探伤技术的应用浅析[J].中国金属通报,2020(2):112-113.
- [4]顾晓雯.用于钢结构检测的无损探伤技术研究[J].工程技术研究,2023,8(14):216-218.