建筑钢结构焊接缺陷无损检测方法研究

●何启发

[摘要] 建筑钢结构因诸多优势被广泛应用，无损检测技术成为保障其焊接质量的关键。然而，焊接缺陷危害严重，且现有检测技术存在不足，亟待优化。本文详细阐述了多种无损检测技术的原理、特点与应用现状，深入分析了传统及新兴技术及其发展趋势，明确了各方法优势局限，预测了技术发展方向。以期为钢结构焊接缺陷检测提供全面技术支撑，有力保障建筑安全与质量，推动建筑钢结构行业健康发展。

[关键词] 建筑钢结构；焊接缺陷；无损检测；检测技术发展

建筑钢结构在现代建筑里的地位愈发重要。其因自身优势被广泛应用，而焊接质量与结构安全寿命息息相关。焊接缺陷是隐患，无损检测技术成为关键应对手段，探究其原理与发展轨迹意义重大，能为建筑钢结构品质提升提供有力支撑。通过深入了解建筑钢结构焊接，可精准定位其缺陷，提前预防风险，保障建筑工程顺利进行，推动钢结构焊接缺陷检测技术发展进步。

建筑钢结构焊接缺陷无损检测技术概述

建筑钢结构在近年来呈现出迅猛的发展态势。其自重轻的特性，极大地减轻了建筑整体负荷，在地基处理等方面具备显著优势；其高强度的特性为构建稳固的建筑框架提供了坚实基础，能够承受较大的压力与荷载；卓越的抗震性能使其在地震多发地区成为理想的建筑结构选择；其装配化程度高这一特性更是契合了现代建筑高效、快速施工的需求，有效缩短了建设周期，降低了人力成本。基于这些优点，建筑钢结构在众多领域得以广泛应用，尤其在超高层建筑中，纯钢结构的占比颇为可观，成为城市天际线构建的重要力量。

在建筑钢结构的构建过程中，焊接无疑是关键的连接方式。然而，气孔、夹渣、未熔合等焊接缺陷如影随形，给结构安全带来了严重威胁。这些缺陷的存在会使构件的承载面积减小，强度大打折扣。在长期使用过程中，应力集中等因素甚至可能引发断裂事故，后果不堪设想。无损检测技术在此背景下应运而生，其意义非凡且不可替代。无损检测技术能够在不破坏构件的前提下对焊接缺陷进行检测，犹如给建筑钢结构做一次“深度体检”。通过无损检测技术，检测人员可以精准地确定缺陷的位置、精确地测量其大小等信息，从而全面评估缺陷可能带来的危害程度，为后续的修复处理提供科学、可靠的依据。及时对检测出的缺陷进行处理，不仅能够有效避免缺陷在建筑使用过程中进一步扩大，还能切实保障建筑结构在设计使用年限内的安全稳定运行，延长建筑的使用寿命，减少因结构损坏而产生的高额维护成本。从宏观层面来看，无损检测技术是建筑钢结构质量把控的关键环节，其为整个建筑行业的健康、可持续发展提供了不可或缺的技术支撑，推动着建筑行业朝着更加安全、高效、智能的方向不断迈进。

常见建筑钢结构焊接缺陷无损检测方法原理与特点

（一）磁粉检测（MT）

磁粉检测作为一种无损检测手段，其关键原理在于，被检测的铁磁性材料经磁化后，若其表面或近表面存有缺陷，磁力线便会出现畸变，进而产生漏磁场。在这一情形下，施加工件表面的磁粉会受到磁场吸引，向缺陷边缘聚集，形成清晰可辨的磁痕。对磁痕进行细致观察与深入分析，可以精准确定缺陷所处位置、呈现形状以及大致程度。磁粉检测具备多维度优势，其检测速率相对较快，操作流程较为简易，能够快速开展。对表面及近表面的缺陷而言，其检测灵敏度颇高，可敏锐捕捉到细微的缺陷迹象，且检测成本较为低廉。这使得其在早期无损检测领域占据关键地位，广泛应用于各类磁性金属材料的焊接缺陷检测事务当中。磁粉检测存在特定局限性，其仅能应用于磁性金属材料，对非磁性材料则难以实施检测。并且，其难以精确判定缺陷的深度与性质，对于深层隐匿的缺陷，其检测能力颇为有限。这在一定程度上对其在复杂结构或对缺陷深度有较高要求的检测场景中的应用形成了限制。

（二）渗透检测（PT）

渗透检测的实施过程，首先是将包含有色染料或荧光染料的渗透液均匀地涂抹被检工件表面，经过一定时长的浸润后，渗透液会凭借自身强大的渗透性，在毛细作用的助力下渗入表面开口的缺陷内部。将工件表面多余的渗透液去除，继而施加显像剂，残留在缺陷内的渗透液会在毛细作用下重新回渗至工件表面，并与显像剂产生相互作用，从而清晰地展现出缺陷的形貌特征及分布状态。这种检测方式操作简便且易施行，无需复杂的设备与专业技能，并且检测结果直观可视，检测人员能够肉眼观察到缺陷的显示情形。但渗透检测的大部分流程依赖人工操作，这使其检测灵敏度受到众多因素的影响。渗透液自身的性能表现、被检工件的表面状况、检测环境的温湿度以及检测工艺操作的规范程度等，均会对最终的检测结果造成影响。

（三）射线检测（RT）

射线检测中，被检工件内部缺陷处与无缺陷位置的密度存有差异，当射线源所发射出的射线穿透被检材料时，它们对射线的吸收与衰减程度会有所不同。在射线穿过工件后，安置另一侧的胶片或探测器上会形成不同黑度的影像区域，对这些影像展开分析，便可判定缺陷的大小、形状、数量以及位置等信息。射线检测在探测焊缝的气孔、夹渣、未熔合以及未焊透等体积型缺陷方面彰显出显著优势。射线底片不但能够定性地显示缺陷，还可精确测量出缺陷的尺寸，并作为永久性记录予以留存，便于后续复查与分析工作的开展。此外，射线检测也存在若干不足处，其检测图像具备灰度区间相对狭窄、缺陷边缘模糊、图像噪声繁多以及缺陷特征有时会被淹没等特性，这使得焊缝缺陷信息难以被精准提取与深入分析。

（四）超声检测（UT）

超声检测中，探头所发出的超声波（频率大于 20kHz）在材料中传播。当遭遇缺陷处时，因材料声学性质发生变化，超声波会出现反射、折射以及衍射等现象。接收并分析这些反射波信号，可确定缺陷的位置、大小以及性质等信息。超声检测拥有极强的穿透力，其能够深入检测材料内部较深位置的缺陷，精准检测并定位微小缺陷，同时，其还可确定缺陷的深度。这使其在焊接缺陷检测中占据重要地位，是当前应用最为广泛的无损检测方法。超声检测从原理层面可划分为脉冲回波法与脉冲衍射时差法。脉冲回波法借助测量超声波从发射至接收的时间差来确定缺陷的位置，但该方法对抗噪性能要求颇高。尽管已有相关技术可以提升其信噪比，但也在一定程度上对检测速度与检测能力产生了影响，其产生的噪音问题仍有待进一步解决。脉冲衍射时差法主要利用缺陷端部的衍射波的时间差开展缺陷的检测与定量工作，其主要适用焊接裂纹的检测。针对脉冲衍射时差法中的部分不足，近年来有学者提出了改进举措，如基于 TOFD 检测的透射衍射时差法以及中值滤波算法等，进一步提升了检测精度。

建筑钢结构焊接缺陷无损检测新技术进展

（一）金属磁记忆检测（MMM）

金属磁记忆检测作为一种崭新的无损检测技术，其运作原理是磁性材料处应力与变形集中区域时，磁畴结构将会出现变动，进而产生自有的漏磁场，此即所谓的磁记忆效应。凭借检测该漏磁场的分布状况，检测人员能够推断材料内部应力的集中情形，对材料的微观缺陷以及早期损伤予以诊断。在建筑钢结构的情境中，金属磁记忆检测能够有效地检测焊缝以及热影响区的应力集中部位，帮助检测人员预测潜在裂纹的萌生与其扩展趋向，防范疲劳损伤导致的结构失效现象。相较传统的检测方法，金属磁记忆检测无需针对构件表面开展预处理工作，可在结构服役期间进行检测，并且能够一次性检测较大面积。该技术目前尚处发展进程中，其检测结果的精确性会受到诸多因素的影响，如材料的磁特性、检测环境中的磁场干扰等，有待进一步深入研究与完善。

（二）红外热成像检测（TT）

在建筑钢结构处于服役状态时，若存在焊接缺陷，其局部的热传导特性将会改变，表面温度分布将呈现出不均匀的态势。红外热成像仪可接收物体所发射的红外线，并将其转化为可见的热图像，检测人员可依据图像中温度异常的区域判定缺陷的位置与大小。此检测方法属非接触式检测，能够在远距离对大范围进行快速扫描，检测效率高，且能够实时动态地开展监测工作。其具备较高的温度分辨率与空间分辨率，图像直观且易理解，便展开分析。其检测精度会受环境温度、表面反射率等因素的影响，对于表面涂层较厚或者内部缺陷热信号不够显著的情况，检测的难度会有所增加，需要结合其他检测方法进行综合判断。

（三）声发射检测（AT）

声发射检测技术的独特性体现其检测信号源自被检对象内部缺陷自身的活动。在建筑钢结构承受外力作用的过程中，焊接缺陷处会由应力集中而产生微观变形或者裂纹扩展，进而释放出弹性波，也就是声发射信号。传感器接收这些信号后，经过信号处理与分析，可以展现与缺陷相关的信息，如缺陷的活性、位置以及严重程度等。声发射检测能够实时监测缺陷的动态变化过程，在缺陷萌生的初始阶段便能够将其察觉，灵敏度较高，能够对结构的整体安全性进行评估。然而，该技术极易受到噪声的干扰，对传感器的布置以及信号处理有着较高的要求。并且，不同类型缺陷的声发射信号特征极为复杂，识别与分类的难度较大。实

施声发射检测时，检测人员需要对其深入研究，以便构建更为完善的缺陷识别模型。

建筑钢结构焊接缺陷无损检测技术的应用实践与发展趋势

（一）现有技术在建筑钢结构中的应用现状

在建筑钢结构领域，常用无损检测技术各有其应用特点。对于 8mm 及以上板材、曲率半径不大的管材对接焊缝，超声检测因具备强穿透力与精准定位能力而被广泛应用。其可深入材料内部探寻焊缝缺陷并确定位置，为修复提供精确指引。针对 8mm 以下板材、曲率半径大的管材对接焊缝，操作简便的磁粉检测与渗透检查是检测表面缺陷的主要方式。磁粉检测借助铁磁性材料磁化后缺陷处磁力线畸变吸引磁粉来显示缺陷，渗透检测则依靠渗透液渗入表面开口缺陷，再通过显像剂呈现缺陷，二者能有效发现被检工件表面的细微问题。然而，8mm 以下钢板焊缝检测面临诸多困境。普通超声仪探头难以将其探测，需专门研制。如北京四机位机库钢网架结构中 8mm 以下管焊缝超声检测，探头和缺陷分级评定都需定制，暴露出规范缺失问题。超声检测在大曲率管材对接焊缝与内部角焊缝检测时也遇挑战，虽有规范补充规定，实际操作却因各种复杂因素干扰而可行性低。射线检测由于成本高、有危害且平面缺陷检出率低，在非重要构件检测中通常不被采用。这促使行业积极探索和研发更适宜、高效的检测技术手段，以满足建筑钢结构检测需求。

（二）无损检测技术发展趋势

（1）无损检测技术正坚定地朝着高效、精准与智能的方向大步迈进。检测仪器自动化进程中，其可凭借精准的程序设定，减少人为操作失误，极大提高检测速度。在如深海、高空等恶劣环境下，自动化设备能精准调控参数，稳定运行，保障数据真实可靠，让检测不再受环境限制。（2）数据处理智能化成为核心焦点，借助神经网络等先进技术，检测人员可以对检测数据进行深度挖掘与分析，过滤干扰信息，优化检测流程。依托强大的数据库管理系统存储海量数据，结合专家评判经验，运用智能算法不断训练学习，可以显著提升缺陷识别的准确率，使检测结果更具科学性和决策参考性。（3）信息融合化已成为大势所趋，不同检测方法各有优劣，如超声检测对深层缺陷敏感，射线检测能清晰呈现缺陷外貌特征。将它们融合，能整合多方面信息，实现优势互补。如在复杂结构的建筑钢结构检测时，融合后的检测方式既能精准定位内部缺陷，又能全面了解其形态。这大幅提升了检测的综合性能与精度，契合建筑领域不断攀升的检测需求与严格标准，为建筑安全筑牢根基。

结束语

建筑钢结构焊接缺陷无损检测技术丰富多样。传统的磁粉、渗透、射线和超声检测虽应用广泛，但磁粉检测局限于磁性材料，射线检测有成本与安全问题等。新兴的金属磁记忆、红外热成像、声发射技术优势突显，分别在应力检测、热特性扫描、动态监测方面独具长处。科技进步促使检测技术迈向自动化、智能化、融合化。自动化降低人为失误，智能化提升检测精度，融合化弥补单一技术缺陷。这些发展将打破现有局限，提高检测的精度与效率，为建筑钢结构安全稳定运行保驾护航，让其在建筑领域稳固占据关键地位，有力推动建筑钢结构行业的持续繁荣与进步。

参考文献

[1]张永庆，孙玉霖，韩晨阳，等.高层建筑钢结构焊接施工技术分析[J].建筑技术开发，2021，48(22)：17-19.

[2]周亚非.新技术在国内建筑钢结构焊接中的应用[J].居业，2021(10)：28-29.

[3]李元.建筑钢结构焊接裂纹的产生机理及防治措施[J].四川水泥，2021(08)：316-317.

[4]高良，俞海涛，张伟.建筑钢结构焊接机器人应用技术研究[J].焊接技术，2021，50(06)：74-77.

作者简介：

何启发(1984－)，男，汉族，广东韶关人，本科，工程师，深圳市盐田港建筑工程检测有限公司，研究方向：建筑工程检测。