

# 金属结构钢焊缝无损检测技术及应用

段文梁

珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510000

**摘要:** 本文聚焦金属结构钢焊缝无损检测技术。先分析常见焊缝缺陷类型与成因,如裂纹、气孔等及其形成原因。接着对比常规(射线、超声等)与先进(相控阵超声、TOFD等)无损检测技术原理、优缺点。随后阐述该技术在制造业、建筑工程、特种设备及在役设备监测等场景的应用。旨在为金属结构钢焊缝检测提供技术参考,保障产品质量与结构安全,推动无损检测技术的进一步发展。

**关键词:** 金属结构钢; 焊缝检测; 无损检测技术

引言: 金属结构钢凭借高强度与良好韧性,在制造业、建筑工程、特种设备等众多领域广泛应用,其焊缝质量直接关乎整体结构安全与可靠性。然而,受多种因素影响,焊缝易产生裂纹、气孔等缺陷,传统检测方法存在局限。无损检测技术凭借不损伤工件、能精准检测缺陷等优势,成为保障焊缝质量的关键手段。本文将深入剖析金属结构钢焊缝缺陷,对比多种无损检测技术,并探讨其应用场景。

## 1 金属结构钢焊缝缺陷类型与成因分析

### 1.1 常见焊缝缺陷分类

金属结构钢焊缝常见缺陷按形态和形成机制分类。裂纹最为危险,呈线性开裂,分热裂纹和冷裂纹,前者产生于焊缝结晶过程,后者在焊缝冷却至室温后形成。气孔是焊缝内部或表面的圆形或椭圆形孔洞,可单个或成群分布。未焊透指焊缝根部未完全熔合,缝隙沿焊缝长度连续或间断分布。未熔合是焊缝与母材、层间未充分熔合形成的缝隙,多出现在坡口侧壁或焊道间。夹渣是焊缝内残留的不规则块状或条状熔渣或杂质。咬边是焊缝边缘母材熔化后未填充形成的沟槽状凹陷,多在焊缝两侧。

### 1.2 缺陷成因

焊缝缺陷成因与多方面因素有关。裂纹因焊接应力超材料强度形成,热裂纹是低熔点共晶物在晶界富集,冷却收缩产生拉应力开裂;冷裂纹是母材含碳量高、预热不足,马氏体转变产生内应力且氢富集所致。气孔由焊接区域气体未逸出造成,如油污锈蚀产气、保护气不足、焊接速度过快等。未焊透和未熔合是因焊接参数不当致熔深不够,或焊丝摆动不足<sup>[1]</sup>。夹渣是熔渣黏度大、脱渣差,或焊接速度过快、熔池搅拌不足使熔渣滞留。咬边是焊接参数不当致母材边缘过度熔化未填充。

## 2 无损检测技术原理与方法对比

### 2.1 常规无损检测技术

#### 2.1.1 射线检测(RT)

射线检测基于射线穿透物质时的衰减特性实现检测,常用X射线、 $\gamma$ 射线作为检测射线。射线穿过被检测工件时,工件内部不同密度的区域会导致射线衰减程度不同,密度高的缺陷区域(如气孔、夹渣)对射线的衰减更强,穿透后的射线强度更弱,这些差异会通过胶片感光或数字探测器转化为可观察的图像。该技术可直观呈现缺陷的形状、大小和位置,尤其适用于检测金属和非金属材料内部的体积型缺陷。不过,射线检测对平面型缺陷(如裂纹)的检出灵敏度较低,且检测过程中存在射线辐射,需要配备专业的防护设备和操作人员,检测成本相对较高,同时不适用于对射线敏感的材料检测。

#### 2.1.2 超声检测(UT)

超声检测利用超声波在介质中的传播特性进行检测,通过超声探头向工件内部发射频率高于20kHz的超声波,超声波在工件内部传播时,遇到缺陷或材料界面会发生反射、折射和衰减,探头接收反射信号后,将其转化为电信号并显示在荧光屏上。该技术对平面型缺陷(如裂纹、未焊透)的检出灵敏度极高,能够准确测定缺陷的深度和大小,且检测过程无辐射危害,检测速度快,成本较低,适用于金属、非金属等多种材料的检测,可检测板材、管材、锻件等不同类型的工件。但超声检测对操作人员的技术水平要求较高,需要操作人员具备丰富的经验来判断缺陷性质,同时对工件表面粗糙度有一定要求,表面过于粗糙会影响检测精度。

#### 2.1.3 磁粉检测(MT)

磁粉检测基于电磁感应原理,仅适用于铁磁性材料检测。检测时,通过磁化设备对工件进行磁化,使工件内部产生磁场,当工件表面或近表面存在缺陷时,缺陷处的磁场会发生畸变,形成漏磁场。此时在工件表面施

加磁粉（干磁粉或湿磁悬液），磁粉会在漏磁场的作用下聚集，形成与缺陷形状对应的磁痕，通过观察磁痕即可判断缺陷的存在<sup>[2]</sup>。该技术对表面和近表面的裂纹、夹杂等缺陷检出灵敏度高，检测速度快，操作简便，成本较低，且能直观显示缺陷位置和形状。但磁粉检测仅能检测铁磁性材料，无法检测非铁磁性材料，同时对工件内部较深的缺陷检出能力较弱，检测前需要对工件表面进行清理，去除油污、锈蚀等杂质。

#### 2.1.4 渗透检测（PT）

渗透检测基于毛细作用原理，适用于各种非多孔性材料的表面检测，不受材料磁性影响。检测过程分为预处理、施加渗透剂、去除多余渗透剂、施加显像剂和观察五个步骤。渗透剂具有良好的毛细作用，能渗透到工件表面的微小缺陷中，去除多余渗透剂后，施加的显像剂会将缺陷中的渗透剂吸附出来，形成明显的缺陷显示。该技术操作简单，设备轻便，成本低廉，适用于检测金属、陶瓷、塑料等多种材料表面的裂纹、针孔、疏松等缺陷，尤其适用于形状复杂工件的检测。但渗透检测仅能检测工件表面开口缺陷，无法检测内部缺陷，且检测结果受操作人员技能和环境因素影响较大，检测前对工件表面的清理要求严格，油污、锈蚀等会影响检测效果。

### 2.2 先进无损检测技术

#### 2.2.1 相控阵超声检测（PAUT）

相控阵超声检测是在常规超声检测基础上发展的先进技术，其核心是采用由多个独立晶片组成的相控阵探头。通过控制各个晶片的激励时间差，可实现超声波束的聚焦、偏转和扫查角度调整，无需移动探头即可完成对工件较大区域的检测。该技术能生成高分辨率的二维或三维图像，清晰呈现缺陷的空间位置和形态，检测效率远高于常规超声检测，尤其适用于复杂形状工件（如焊缝、管道弯头）的检测。相控阵超声检测对缺陷的定位精度和定量精度更高，可有效检测出微小缺陷，且检测数据可存储和回放，便于后续分析和追溯。不过，该技术设备成本较高，对操作人员的专业知识和操作技能要求更高，需要进行系统的培训才能熟练掌握。

#### 2.2.2 TOFD检测（衍射时差法）

TOFD检测基于超声波的衍射现象，采用一对探头（发射探头和接收探头）对称布置在缺陷两侧。发射探头发出的超声波遇到缺陷的上下端点时会产生衍射波，接收探头分别接收缺陷上端点和下端点的衍射波，根据两束衍射波到达接收探头的时间差，结合超声波在工件中的传播速度，可精确计算出缺陷的深度和高度。该技

术对缺陷的定量精度极高，能准确测量缺陷的尺寸，尤其适用于焊缝中裂纹、未焊透等平面型缺陷的检测，检测结果不受缺陷取向影响。TOFD检测可实现对工件的快速扫查，检测效率高，且检测数据可数字化存储，便于后期分析和对比。但该技术对表面缺陷的检出能力较弱，通常需要与其他检测技术配合使用，同时设备成本较高，对检测环境的要求也较为严格。

#### 2.2.3 激光超声检测

激光超声检测是一种非接触式检测技术，利用脉冲激光照射工件表面产生超声波。当高能量脉冲激光作用于工件表面时，表面材料因吸收激光能量而瞬间升温膨胀，产生应力波并向工件内部传播，形成超声波；同时采用激光干涉仪接收工件表面的振动信号，将其转化为电信号后进行分析处理，从而判断工件内部是否存在缺陷。该技术无需与工件接触，适用于高温、高压、有毒等恶劣环境下的检测，以及表面易损伤、形状复杂的工件检测。激光超声检测具有较高的检测分辨率，能检测出微小缺陷，且检测速度快，可实现自动化检测。但该技术设备成本高昂，受工件表面粗糙度和材质影响较大，对检测环境的振动和温度变化也较为敏感。

#### 2.2.4 红外热成像检测

红外热成像检测基于物体的热辐射特性，通过检测工件表面的温度分布差异来判断内部是否存在缺陷。检测时，可采用主动加热（如热风、红外灯加热）或利用工件自身发热使工件产生温度场，当工件内部存在缺陷时，缺陷区域的热传导特性与周围正常区域不同，会导致表面温度分布出现异常。红外热像仪捕捉工件表面的红外辐射信号，将其转化为温度图像，通过分析温度图像中的异常区域即可识别缺陷。该技术可实现对工件的大面积快速扫查，检测效率高，且为非接触式检测，适用于高温、高压等恶劣环境。但红外热成像检测对缺陷的定量精度较低，难以准确测量缺陷的尺寸和深度，受环境温度、工件表面emissivity以及加热方式等因素影响较大，对内部较深的缺陷检出能力较弱。

### 2.3 技术对比与选型依据

无损检测（NDT）通过不损伤试件的方式评估材料性能与缺陷，核心技术原理及适用性存在显著差异。超声检测（UT）利用超声波传播反射特性，可定位内部裂纹、夹杂等缺陷，检测深度大，适用于金属、复合材料等，但对表面平整度要求高；射线检测（RT）基于射线穿透衰减差异成像，直观显示内部缺陷形态，多用于焊缝、铸件检测，却存在辐射防护需求<sup>[1]</sup>。磁粉检测（MT）借助磁场吸附磁粉显示表面及近表面缺陷，仅

适用于铁磁性材料,检测速度快但范围局限;渗透检测(PT)通过渗透剂渗透显像,可检测非多孔材料表面开口缺陷,不受材质磁性影响,但无法探及内部缺陷。涡流检测(ECT)利用电磁感应原理,适合导电材料表面及近表面缺陷检测,可实现高速自动化,对复杂形状工件适应性差。选型需紧扣三大核心依据:一是工件特性,如材质(磁性/非磁性、导电/非导电)、形状、厚度;二是缺陷需求,明确检测缺陷类型(表面/内部)、大小及定位精度;三是应用场景,兼顾现场操作性(如辐射防护、自动化需求)及成本预算,实现技术适配性最大化。

### 3 无损检测技术在金属结构钢焊缝中的应用场景

#### 3.1 制造业应用

在制造业中,无损检测技术是金属结构钢焊缝质量把控的核心环节,贯穿产品生产全流程。从原材料入库时的焊缝基础质量筛查,到零部件焊接过程中的实时监测,再到成品出厂前的最终质量核验,均发挥关键作用。制造业中常用超声检测、射线检测等技术,精准识别焊缝中的裂纹、气孔、夹渣等缺陷。对于汽车车架、工程机械臂等关键金属结构,通过该技术可确保焊缝强度与密封性符合设计标准,避免因焊缝缺陷导致产品在使用中出现断裂、泄漏等问题,保障产品可靠性与市场竞争力,同时降低因返工返修带来的生产成本与时间损耗。

#### 3.2 建筑工程应用

建筑工程中,金属结构钢焊缝的质量直接关系到建筑物整体安全,无损检测技术是保障该环节质量的重要手段。在钢结构厂房、桥梁、高层建筑钢结构等工程中,针对钢柱与钢梁连接焊缝、节点焊缝等关键部位,广泛采用超声检测、磁粉检测等技术进行检测。施工阶段,技术人员对焊接完成的焊缝及时检测,排查未焊透、焊瘤等缺陷并督促整改;竣工验收阶段,对全项目关键焊缝进行系统性检测,确保符合建筑结构设计规范与安全标准。该技术有效规避因焊缝缺陷引发的结构坍塌等重大安全隐患,为建筑工程长期安全稳定运行提供坚实保障。

#### 3.3 特种设备应用

特种设备因运行环境特殊、承载压力大,其金属结构钢焊缝质量要求极高,无损检测技术在此领域应用尤为关键。锅炉、压力容器、压力管道等特种设备的焊

缝,长期处于高温、高压或腐蚀性环境中,易产生疲劳裂纹等缺陷。行业内主要采用射线检测、超声检测及渗透检测等技术,对特种设备制造阶段的焊缝进行全方位检测,确保出厂时无质量隐患;在安装阶段,对现场焊接的焊缝严格核验,保障安装质量<sup>[4]</sup>。通过该技术可精准发现焊缝隐藏缺陷,防止特种设备在运行中出现焊缝破裂、介质泄漏等事故,保障操作人员人身安全与设备稳定运行,符合特种设备安全监管要求。

#### 3.4 在役设备监测

在役设备监测中,无损检测技术是及时发现金属结构钢焊缝老化与缺陷的重要手段,能有效延长设备使用寿命并降低故障风险。工业生产中的各类在役金属设备,其焊缝因长期承受载荷、温度变化及介质腐蚀,易逐渐产生裂纹、腐蚀等损伤。技术人员采用便携超声检测仪、涡流检测设备等,定期对设备关键焊缝进行现场检测,无需拆解设备即可完成监测。通过对比不同时期检测数据,分析焊缝缺陷发展趋势,提前预警潜在故障。对于发电设备、化工生产设备等大型在役设备,该技术可实现故障早发现、早处理,避免因焊缝突发失效导致生产中断,减少经济损失。

#### 结束语

金属结构钢焊缝无损检测技术对保障结构安全意义重大。通过对其缺陷类型成因的剖析,以及多种检测技术的对比研究,明确了不同技术在各场景的适用性。在实际应用中,需依据工件特性、缺陷需求和场景条件合理选型。随着技术发展,未来检测技术将更精准高效。持续探索创新,提升检测水平,能为各领域金属结构钢焊缝质量提供更可靠保障,推动行业高质量发展。

#### 参考文献

- [1]王国棉,吴炎炎.水利金属结构的钢焊缝无损检测技术分析[J].电脑校园,2024(29):140-142.
- [2]唐晖.超声波探伤技术在桥梁钢结构对接焊缝检测中的应用[J].交通世界,2020,5(17):163-164.
- [3]胡国伟.水利金属结构的钢焊缝无损检测技术分析[J].山西水利,2023(03):56-57.
- [4]杨洋.超声无损检测技术在金属材料焊接的应用研究[J].大众标准化,2020,15(03):115-116.