无损检测技术在金属锅炉焊接中的应用研究

王浩琦
国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司　宁夏　银川　750000

摘　要：金属锅炉作为工业生产核心承压设备，焊接焊缝质量直接决定设备运行安全与使用寿命。锅炉焊接受材料特性、施工工艺、作业环境等因素影响，易产生各类表面及内部缺陷，长期运行易引发安全隐患。本文分析了锅炉常用焊接材料、工艺特点及典型缺陷类型，系统阐述超声波、射线、磁粉、渗透四种主流无损检测技术的工艺特性与适用场景。针对筒体焊缝、接管角焊缝、厚壁构件、返修焊缝等不同结构部位，开展无损检测工艺适配研究，并结合行业现状总结技术发展趋势，可为锅炉焊接质量检测与安全管控提供工程参考。

关键词：金属锅炉；焊接缺陷；无损检测；焊接质量；工艺应用

引言：工业锅炉长期处于高温、高压、交变载荷的恶劣工况，焊接接头作为设备薄弱部位，缺陷产生概率较高，是引发锅炉泄漏、爆管等事故的主要诱因。随着现代锅炉设备不断向大型化、高压化发展，对焊接质量的管控标准持续提升，传统外观检查方式已无法满足设备安全运行要求。无损检测技术可在不损伤构件本体的前提下，精准排查焊缝隐蔽缺陷，是锅炉焊接质量验收、设备运维的核心技术手段。为此，本文结合现场施工经验，系统研究各类无损检测技术在锅炉焊接中的实际应用，为提升锅炉焊接检测质量、规避运行风险提供技术支撑。

1 金属锅炉焊接缺陷及检测需求分析

1.1 金属锅炉焊接常用材料与焊接工艺特点

工业金属锅炉多采用碳素钢、低合金钢等耐热承压钢材，这类材料具备强度高、耐高温、抗蠕变性能好的特点，可适配锅炉高温、高压的运行环境。锅炉核心承压构件包括筒体、接管、封头、水冷壁等，构件厚度跨度较大，厚壁构件占比高，对焊接质量要求严苛。目前锅炉焊接多采用电弧焊、埋弧焊、氩弧焊等工艺，不同构件适配不同焊接方式。筒体长焊缝多采用埋弧焊自动化焊接，小型接管、角接位置以手工电弧焊为主。受构件结构、施工环境、人工操作差异影响，锅炉焊接作业极易出现工艺稳定性不足的问题，也是焊接缺陷多发的主要原因。

1.2 锅炉焊接常见缺陷类型

结合锅炉焊接施工实际，常见缺陷主要分为内部缺陷与表面缺陷两大类。内部缺陷以气孔、夹渣、未焊透、未熔合、裂纹为主，多产生于厚壁焊缝焊接过程中，不易通过肉眼识别，也是影响锅炉承压安全的核心隐患。其中焊接裂纹危害性最高，多因焊接应力集中、材料冷却不均导致，极易引发焊缝开裂泄漏。表面缺陷主要包含咬边、焊瘤、表面气孔、焊缝成型不均等，多由人工操作不规范、焊接参数把控不当造成。这类缺陷虽不直接引发爆炸事故，但会造成应力集中，长期运行下会加速焊缝老化，扩大内部损伤。

1.3 金属锅炉焊接无损检测的核心技术要求

基于锅炉承压、高温、高压的特殊工况，其焊接无损检测有着严格的技术标准。首先检测需具备高精准度，可精准识别微小、深埋的内部缺陷，杜绝漏判、误判。其次检测需适配锅炉复杂结构，能够覆盖角焊缝、厚壁焊缝、狭小接管等检测盲区。检测作业需具备安全性与无损性，不得损伤焊接构件本体，不影响锅炉结构强度。检测工艺需贴合工业施工场景，操作便捷、检测效率高，可满足批量焊缝检测需求，检测数据需具备可追溯性，为锅炉质量验收、后期运维检修提供可靠依据[1]。

2 金属锅炉焊接常用无损检测技术

2.1 超声波检测

超声波检测广泛应用于锅炉筒体、集箱、厚壁管道等关键对接接头检测。该技术利用高频超声波在金属介质中的传播特性，通过探头耦合进入焊缝内部，声波遇到不连续缺陷界面时产生反射信号，仪器根据回波的位置、波幅及传播时间，判定焊缝内部缺陷的埋深、尺寸及分布状态。该工艺对钢材厚壁结构适配性极强，能够稳定捕捉未焊透、未熔合、内部裂纹、夹渣及分层等典型焊接缺陷。现场作业设备轻便，无需封闭作业区域，不存在辐射风险，可满足高空、狭小空间等复杂施工现场的检测需求，检测数据实时可读，适配批量焊缝质检工作。该技术存在一定现场短板，焊缝表面粗糙、余高超标会引发杂波干扰，构件近表面存在检测盲区，同时缺陷定性工作高度依赖检测人员实操经验，对人员专业

水平要求较高。

2.2 射线检测

射线检测多用于中薄壁锅炉焊缝的质量定级与存档复检。依托X射线、γ射线的金属穿透性能，射线穿透焊缝构件后，因焊缝基体、缺陷区域密度不同产生衰减差异，最终在胶片上形成灰度不同的成像图谱，工作人员可直观识别焊缝内部缺陷形态。该技术对气孔、点状夹渣、缩孔等体积型缺陷检出效果优异，成像清晰、缺陷辨识度高，检测影像可长期归档留存，检测判定标准统一，人为误差较小，符合特种设备质量验收的溯源要求。在现场应用中，射线检测的局限性较为明显，作业存在电离辐射危害，检测前需封闭现场、划定警戒区域，作业流程繁琐、检测效率偏低。

2.3 磁粉检测

磁粉检测主要用于碳素钢、低合金钢材质的角接焊缝、接管焊缝及返修焊缝检测。作业过程中对工件整体或局部磁化，焊缝表层及浅层缺陷会阻断磁力线传播，在构件表面形成漏磁场，吸附喷洒的磁粉介质形成清晰磁痕，以此确定缺陷具体位置和延展长度。该工艺对焊接应力集中区域的微裂纹、表层夹渣、发纹等缺陷灵敏度极高，现场操作简便、检测成本低，可快速完成大面积焊缝扫查作业，适合施工现场快速筛查表面缺陷。该技术适用范围存在严格限制，仅可用于铁磁性材料，无法应用于不锈钢等非磁性锅炉构件，且检测深度有限，仅能排查表层及浅层缺陷，无法检测焊缝深层内部缺陷。

2.4 渗透检测

渗透检测主要适配不锈钢锅炉构件、异种钢焊接接头等无法使用磁粉检测的焊缝质检工作。基于毛细作用原理，液态渗透液可自动渗入焊缝表面的各类开口缺陷内部，经清洗去除表面多余渗透液，再通过显像剂吸附显色，清晰呈现缺陷轮廓与分布范围。该工艺仅针对表面开口类缺陷，可有效检出肉眼难以识别的微裂纹、开口气孔、表层疏松等细小缺陷，能够有效弥补磁粉检测的材质局限性。现场作业设备简单、适配性广，可完成异形焊缝、狭小边角、不规则焊接结构的检测工作。但该工艺对工件表面清洁度要求严苛，油污、氧化皮、打磨残留都会覆盖缺陷开口，造成检测失效，且无法检测闭口缺陷与构件内部埋藏缺陷，仅作为锅炉焊缝表面质检的辅助工艺[2]。

3 无损检测技术在金属锅炉焊接中的具体应用

3.1 锅炉筒体焊接焊缝的无损检测应用

锅炉筒体为核心承压构件，多采用中厚板卷制焊接成型，纵缝与环缝是主要焊接部位，长期承受高温、高压交变载荷，对焊缝内部质量要求极高，是无损检测的重点管控区域。（1）检测工艺选型。筒体纵缝与环缝结构规整、焊缝长度大、板材厚度高，现场检测以超声波检测为主体工艺，针对焊缝深层未熔合、未焊透、内部裂纹、夹层等危险性缺陷进行全覆盖检测。对于中薄板筒体焊缝，配合射线检测进行抽样复检与竣工验收，保障缺陷检出的完整性。表面质量核验统一采用磁粉检测，排查焊接过程中产生的表面微裂纹与浅层缺陷。（2）现场作业要点。筒体焊缝检测需提前对焊道进行打磨处理，清除焊缝余高、飞溅、氧化皮，保证检测面平整光洁，避免杂波干扰与检测盲区。超声波检测采用分段扫查方式，对焊缝中心线、热影响区进行全面覆盖，重点排查焊缝根部与层间缺陷。射线检测仅用于定型验收环节，严格划定辐射警戒区域，规避现场施工交叉干扰。（3）质量判定重点。筒体焊缝检测重点关注延伸性裂纹、连续性未熔合等动态扩展缺陷，此类缺陷极易在压力载荷作用下持续扩张，引发焊缝泄漏、爆裂等安全事故。对于点状夹渣、零散气孔等轻微缺陷，需结合缺陷尺寸、分布密度对照特种设备焊接标准进行等级评定。

3.2 锅炉接管与角接焊缝的检测工艺适配

锅炉筒体与接管、集箱与支管的连接位置多为角接焊缝，结构形式复杂、空间狭小、焊接操作难度大，是焊接缺陷高发区域，同时也是无损检测的难点部位。该类焊缝受力复杂、应力集中明显，缺陷隐蔽性强，常规检测工艺适配性较差，需采用组合检测方式作业。（1）检测工艺选型。接管角焊缝结构不规则、厚度梯度大，不适合射线检测成像作业，现场核心采用超声波斜探头检测，适配角焊缝特殊截面结构，排查焊缝内部未焊透、根部裂纹、层间夹渣等缺陷。铁磁性材质接管配套磁粉检测筛查表面缺陷，不锈钢材质接管更换渗透检测工艺，完成表面开口缺陷排查。（2）现场作业要点。角接焊缝无规整检测平面，检测前需根据焊缝角度打磨适配检测区域，调整探头入射角度与扫查范围，针对焊缝根部、焊趾等应力集中重点区域进行加密扫查。狭小空间作业需选用小型便携检测设备，规避空间遮挡问题，保证扫查无遗漏、无盲区。（3）工艺适配原则。该部位检测摒弃单一检测模式，采用“内部超声+表面检测”的组合工艺，弥补单一技术的检测短板。针对接管根部极易出现的未焊透缺陷，通过专用角度探头定点检测，提升根部缺陷检出准确率[3]。

3.3 厚壁锅炉焊接构件的分层缺陷检测应用

高压、超高压锅炉筒体、集箱等核心构件板材厚度较大，多层多道焊接工艺应用广泛，焊接过程中易出现

层间未熔合、分层、厚壁纵深裂纹等特殊缺陷，此类缺陷埋藏深度大、隐蔽性极强，常规检测方式检出率较低，需采用专项无损检测工艺。（1）检测工艺选型。厚壁构件分层缺陷、纵深缺陷以超声波检测为唯一有效检测手段，摒弃射线检测方式，规避厚壁成像模糊、深层缺陷漏检的问题。采用高频、大角度探头搭配检测，针对厚壁焊缝不同深度区域进行分层扫查，精准定位层间不连续缺陷。（2）现场作业要点。厚壁焊缝焊接层数多、组织结构复杂，检测前需校准设备声速、耦合补偿参数，消除厚壁金属声波衰减带来的检测误差。采用分层分段扫查模式，从焊缝表层、中层、深层逐段排查，重点识别层间未熔合、夹层等典型分层缺陷，精准记录缺陷埋藏深度与延展范围。（3）缺陷管控重点。厚壁构件分层缺陷多为片状面型缺陷，在高压载荷作用下易产生应力剥离，缺陷扩展速度快，危害性远大于普通体积型缺陷。检测过程中需精准定性定量，对连续性分层缺陷、纵深裂纹直接判定为不合格，杜绝带缺陷运行。

3.4 锅炉焊接返修部位的复检检测应用

锅炉焊接施工中，初次检测不合格的焊缝需进行打磨返修、补焊作业，返修区域受二次焊接热循环影响，金相组织发生改变，焊接残余应力大幅增加，极易产生新的裂纹、未熔合等缺陷，是质量隐患重点区域，必须执行严格的复检检测流程。（1）检测工艺选型。返修部位复检采用全维度检测模式，内部缺陷采用超声波与射线组合检测，彻底排查补焊层内部新生缺陷与原有残留缺陷。返修焊缝表面统一采用磁粉或渗透检测，重点筛查补焊产生的热裂纹、表面开口缺陷。（2）现场作业要点。返修检测需扩大检测范围，检测区域覆盖返修焊缝及周边至少两倍焊缝宽度的热影响区，规避热影响区隐性缺陷漏检。补焊后的焊缝表面需充分打磨平整，消除焊疤、凸起、凹陷等干扰因素，保证检测精度。（3）复检判定标准。返修焊缝检测执行高于普通焊缝的验收标准，所有返修部位必须100%全检，不允许存在任何裂纹、未熔合、连续性夹渣等危害性缺陷。多次返修的关键承压焊缝，需留存全套检测数据归档，作为锅炉质量验收与后期运维的核心依据[4]。

4 无损检测技术在锅炉焊接领域的发展趋势

结合特种设备检测行业发展现状，锅炉焊接无损检测技术逐步向智能化、精准化、一体化方向迭代，具体发展趋势如下。（1）检测设备与作业模式智能化升级。依托机器视觉、超声成像、智能算法技术，自动化扫查设备逐步替代传统人工手持检测，可实现锅炉焊缝缺陷自动识别、定位与定量分析，有效降低人工经验带来的判定误差，适配高空、复杂结构焊缝的高精度检测作业。（2）高精度可视化检测技术普及。传统模糊化缺陷判定方式逐步淘汰，超声相控阵、实时射线成像等可视化技术广泛应用，可清晰呈现焊缝内部缺陷形貌、尺寸及分布状态，实现缺陷检测可视化、数据化，大幅提升厚壁焊缝、异形焊缝缺陷检出率。（3）检测与质量管控一体化发展。无损检测不再是单一的后期质检工序，逐渐融入锅炉焊接全过程，实现焊接前、焊接中、焊接后的全流程监测。检测数据可实时归档分析，为焊接工艺优化、缺陷溯源、质量管控提供数据支撑，形成完整的焊接质量管控体系[5]。

结束语：本文通过分析金属锅炉焊接缺陷特征与检测需求，明确了四类常规无损检测技术的适配范围与现场优缺点。结合锅炉不同焊接结构的工况特点，针对性梳理了差异化检测工艺与作业要点，解决了异形焊缝、厚壁构件、返修部位的检测适配难题。研究表明，不同无损检测技术需组合使用方可满足复杂焊缝质检需求。

参考文献

[1]赵铭浩.无损检测技术在金属锅炉焊接中的应用研究[J].冶金与材料,2026,46(5):118-120.

[2]王日永.无损检测技术在金属锅炉焊接中的应用研究[J].山西冶金,2025,48(1):188-190.

[3]陈路.锅炉安装生产中焊接质量控制与无损检测技术应用[J].锅炉制造,2026,(1):61-62+64.

[4]陈霄.无损检测技术在金属部件焊接中的应用研究[J].造纸装备及材料,2023,52(1):132-134.

[5]刘涛.工业锅炉焊接无损检测技术及其应用进展[J].中国金属通报,2025,(20):180-182.