

无损检测技术在锅炉检测中的应用

魏 渊

浙江省工业设备安装集团有限公司第五分公司 浙江 宁波 315200

摘 要：无损检测技术对保障锅炉安全稳定运行意义重大。本文首先介绍了射线检测（RT）、超声检测(UT)、磁粉检测（MT）、渗透检测（PT）四项常规无损检测技术原理、特点及适用范围。接着分析了无损检测技术在锅炉筒、锅壳、集箱、炉胆等锅炉不同部件检测中的应用。最后指出了无损检测技术未来发展趋势，包括多种检测技术融合、智能化检测设备发展、远程检测技术实现，以及激光超声检测、太赫兹检测等新型无损检测技术的研发，以保障锅炉安全稳定运行。

关键词：无损检测技术；锅炉检测；应用

引言：锅炉是工农业生产和人民生活中广泛应用的重要设备,它可以为工农业生产,交通运输和人民生活提供动力或热能,锅炉在承受较高压力的同时,还在高温下工作,工作条件比较恶劣,锅炉还具有爆炸的危险性,一旦发生事故,不仅毁坏设备,破坏生产,造成重大的经济损失,而且会造成人员伤亡和社会的不安定,其后果极其严重,保证锅炉的安全运行是至关重要的,无损检测技术当前在锅炉检测中有着广泛的应用。

1 常见的无损检测技术

1.1 射线检测

射线检测基于X射线、 γ 射线穿透物体时内部缺陷导致吸收散射差异使透射射线强度变化的原理,通过在物体另一侧放置感光胶片或数字探测器记录射线强度分布,实现内部缺陷检测。其成像机制源于缺陷区域材料密度与基体不同,对射线的衰减系数存在差异,气孔、夹渣等体积型缺陷因密度低于基体呈现暗区,未熔合、未焊透等面积型缺陷因密度差异形成清晰边界^[1]。该技

术优势在于可直观显示缺陷几何特征,检测结果具有可追溯性,胶片或数字图像可长期保存供复核分析,对气孔、夹渣类体积型缺陷检出率很高,面积型缺陷裂纹、未熔合类缺陷,其检出率的影像因素包括缺陷形态尺寸、透照角度、透照厚度、胶片种类、像质计灵敏度等,检测灵敏度受裂纹走向影响显著,当裂纹面与射线束夹角小于 15° 时,有效吸收截面减小导致缺陷显示模糊,需通过多角度投照提高检出率。射线防护是关键限制因素,需建立三级防护体系:时间防护通过缩短曝光时间减少辐射暴露,距离防护利用平方反比定律降低剂量率,屏蔽防护采用铅房、铅屏风等阻挡散射线,操作人员须佩戴个人剂量计、个人剂量报警仪并定期送有资质监测单位进行剂量鉴定。对中高压锅炉,为尽可能的检测出焊缝内部缺陷,采用RT和UT并用,对于RT检测,检测厚度上限取决于射线能量,但灵敏度随厚度增加而降低,通常需结合超声检测进行综合评判,锅炉检测的主要要求见表1。

表1 锅炉检测的主要要求

检测比例		压力	$p \leq 0.1\text{MPa}$	$0.1\text{MPa} < p \leq 0.4\text{MPa}$	$0.4\text{MPa} < p < 2.5\text{MPa}$	$2.5\text{MPa} \leq p < 3.8\text{MPa}$	$p \geq 3.8\text{MPa}$
部位							
锅筒纵、环缝,集箱纵缝,封头下脚圈拼缝	蒸汽炉		10%RT	25%RT	100%RT	100%RT或100%UT+25%RT	100%UT+25%RT
	热水炉	出水温度 $< 120^{\circ}\text{C}$ 时, 25%RT出水温度 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ 时, 100%RT					
	有机热载体炉		100%RT或100%UT+25%RT				
炉胆纵、环缝,炉胆顶拼缝,回燃室对接缝	汽炉		10%RT	25%RT	25%RT		
	水炉		25%RT				
内燃锅壳锅炉的管板与炉胆、锅壳的角接焊缝			$p < 1.6\text{MPa}$ 时: 管板与锅壳: 100%UT管板与炉胆、回燃室50%UT				
集箱环焊缝			外径 $> 159\text{mm}$ 或壁厚 $> 20\text{mm}$ 时或热水温度 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ 时为100%RT或UT外径 $\leq 159\text{mm}$ 或热水温度 $< 120^{\circ}\text{C}$ 时, 为25%RT或UT。				

续表:

检测比例 部位	压力	$p \leq 0.1\text{MPa}$	$0.1\text{MPa} < p \leq 0.4\text{MPa}$	$0.4\text{MPa} < p < 2.5\text{MPa}$	$2.5\text{MPa} \leq p < 3.8\text{MPa}$	$p \geq 3.8\text{MPa}$
管子、管道环缝(外径 $\leq 159\text{mm}$)		10%RT或UT 有机热载体炉: 辐射段: 10%RT, 对流段: 5%RT, 热水温度 $> 120^{\circ}\text{C}$ 时, 20%RT或UT				$p = 3.8\sim 9.8\text{MPa}$ 工厂内: 50%, 安装工地: 25%, $p \geq 9.8\text{MPa}$, 工厂内: 100%, 安装工地: 25%
集中下降管的角接头						100%RT或UT; 其他管接头、角接头: 10%RT或UT

1.2 超声检测

超声检测依托超声波在物体内部传播遇缺陷产生反射、折射和散射的原理, 通过发射脉冲超声波并接收反射波, 分析反射波幅度、时间、频率信息, 判定物体内部缺陷状态。采用横波斜探头检测时, 超声波在被检物内斜向传播, 无底面回波, 缺陷距离与位置由声程和折射角共同决定^[2]。该技术对面积型缺陷检出率较高, 对体积型缺陷检出率偏低, 具备检测速度快、成本低的特点, 检测结果受操作人员技能影响, 需借助标准试块校准系统灵敏度, 依靠经验区分缺陷回波与结构噪声, 复杂几何形状工件需配套专用扫查装置, 多用于锅炉压力容器焊缝、管材、板材的内部缺陷检测。厚焊缝光滑反射面的未熔合缺陷易造成单探头检测漏检, 可通过TOFD技术实现缺陷精准检测, 相控阵技术可完成声束电子扫描, 对厚度超8mm焊缝、超6mm金属板材具备良好缺陷检出效果。

1.3 磁粉检测

磁粉检测依据铁磁性材料磁化后, 表面及近表面缺陷位置产生漏磁场的原理开展检测。铁磁性材料磁化后, 内部存在缺陷会增大材料磁阻, 造成缺陷处磁场畸变, 部分磁力线溢出材料表面形成漏磁场, 施加高磁导率磁粉后, 磁粉会被漏磁场吸附聚集在缺陷位置形成磁痕, 可通过磁痕的分布和形态判定缺陷的位置、形状及大小。该技术设备简易、磁粉成本低廉, 整体检测成本较低, 检测速度快, 可快速完成大面积检测, 检测效率较高, 对材料表面和近表面缺陷检测灵敏度高, 可清晰识别微小缺陷。该技术仅适用于铁磁性材料, 无法应用于非铁磁性材料, 且不能精准测量缺陷深度, 仅可检测材料表面与近表面缺陷。在锅炉检测中, 该技术多用于检测锅筒、集箱、管道等铁磁性材料部件, 可排查部件裂纹、折叠、夹层等表面及近表面缺陷, 及时排查隐患, 防止缺陷扩张引发安全事故, 保障锅炉运行安全

1.4 渗透检测

渗透检测技术依托液体毛细现象, 先将含荧光或着色染料的渗透液均匀涂覆在被检物表面, 借毛细作用渗入表面开口缺陷, 充分渗透后, 去除表面多余渗透液,

确保仅缺陷处留存, 再涂显像剂, 其吸附作用将缺陷内渗透液吸出, 在紫外光下含荧光染料的渗透液发荧光, 白光下含着色染料的渗透液显颜色, 清晰地呈现缺陷形状与位置^[3]。该技术优点明显, 不受被检物材料和形状限制, 金属、非金属及规则、不规则形状物体均可检测, 对表面开口缺陷检测灵敏度高。但也有缺点, 材料较贵, 成本较高, 检测工序多, 速度慢, 检测剂大多依然有毒, 必须采取有效措施保证安全。在锅炉检测中, 渗透检测适用于非多孔性材料部件表面开口缺陷检测, 锅炉部件运行中表面易因各种因素产生裂纹、气孔、疏松等开口缺陷, 通过渗透检测及时发现处理, 可保障锅炉安全稳定运行, 降低事故风险。

2 无损检测技术在锅炉不同部件检测中的应用

2.1 锅筒检测

锅筒检测分为焊缝检测与筒体检测, 焊缝检测采用射线检测和超声检测相结合的方式, 射线检测依据射线穿透焊缝不同部位的衰减系数差异, 通过胶片捕捉射线强度变化, 呈现焊缝内部缺陷的形状和大小, 超声检测依靠超声波遇缺陷的反射现象, 分析反射波信息判定缺陷, 可检出射线检测难以发现的面积型缺陷, 焊缝表面缺陷可通过磁粉检测或渗透检测排查, 磁粉检测利用铁磁性材料磁化后的漏磁场吸附磁粉显示缺陷, 渗透检测依托液体毛细现象显现表面开口缺陷, 筒体检测以超声检测排查内部缺陷、磁粉检测排查表面裂纹为主, 人孔圈、接管座等特殊部位采用基于电磁感应原理的涡流检测, 排查导体材料表面及近表面缺陷, 全方位保障锅筒质量与锅炉运行安全。

2.2 集箱检测

集箱焊缝检测与锅筒焊缝检测方法相近, 主要结合射线检测与超声检测开展检测工作, 射线检测依靠射线穿透物体时的吸收和散射差异, 通过胶片呈现焊缝内部缺陷, 超声检测依据超声波遇缺陷产生的反射现象及反射波分析判定缺陷, 两种检测方式结合可实现焊缝全面检测。空间狭窄无法开展射线检测的焊缝, 可采用超声衍射时差法, 通过测算缺陷两端衍射波传播时间差确定缺陷位置与高度^[4]。集接管座为缺陷高发部位, 采用超声

检测结合渗透检测的方式检测,超声检测可排查管座内部缺陷,渗透检测利用液体毛细现象,显现管座表面开口缺陷,全方位把控集箱质量,保障锅炉安全运行。

2.3 管道检测

管道直管检测常用多种技术手段,超声检测依托超声波在物体内传播遇缺陷反射的特性,分析反射波信息可检出管壁内部裂纹、腐蚀等缺陷,涡流检测依据电磁感应原理,通过检测导电管壁涡流场变化判断管壁减薄情况,高温高压管道可采用红外热成像检测技术,接收物体红外辐射并转化为可见图像,依据管道表面温度分布及温度异常情况,判定管道保温缺失或泄漏问题,弯管因受弯曲应力易产生缺陷,通常结合超声检测与磁粉检测开展检测工作,超声检测排查弯管内部裂纹缺陷,磁粉检测利用铁磁性材料磁化后缺陷处产生漏磁场吸附磁粉形成磁痕的原理,检测弯管表面裂纹,两种技术结合可全面把控弯管质量,保障锅炉管道安全稳定运行。

2.4 炉胆检测

炉胆纵环封、顶拼缝检测采用超声检测与射线检测相结合的方式,超声检测依托超声波在物体中的传播特性,可通过分析缺陷反射波信息,精准检测焊缝内部缺陷。射线检测利用射线穿透金属工件的原理,依据射线衰减差异成像,可直观识别焊缝内部体积型缺陷,精准判定缺陷具体情况,弥补超声检测的检测短板。两种方式优势互补,能够全面排查焊缝内部各类隐患,保障炉胆焊缝焊接质量与整体结构的安全稳定性。

3 无损检测技术的发展趋势

3.1 多种检测技术融合

不同无损检测技术都有其独特的原理和适用范围,也存在各自的局限性。未来,多种无损检测技术融合将成为必然的发展趋势。比如射线检测能直观呈现缺陷形状大小,超声检测对微小缺陷灵敏度高,二者结合可优势互补,更精准全面地检测出锅炉内部缺陷,提升检测结果的准确性与可靠性。超声检测可检测管壁内部缺陷,涡流检测能检测管壁减薄情况,二者融合能同时获取管壁内部和厚度信息,实现对管壁更全面的检测,为保障锅炉安全运行提供更有力的技术支持。

3.2 智能化检测设备

由于传统检测易受操作人员技术水平、经验及主观判断等人为因素干扰,导致检测效率与质量存在波动。而智能化检测设备能有效规避这些问题,大幅提高检测效率和质量。未来,无损检测设备必然朝着智能化大步迈进,将具备自动扫描功能,可快速全面覆盖检测区域;能自动识别缺陷,精准捕捉各类微小或复杂缺陷;还可自动评估

缺陷严重程度,为后续处理提供科学依据。像智能超声检测设备,可依据检测对象和环境自动调整参数,通过分析缺陷反射波自动确定缺陷类型与位置,并生成详细评估报告,让检测过程更高效、结果更准确可靠。

3.3 远程检测技术

当下,锅炉运行安全至关重要,传统检测方式难以满足实时掌控需求。未来,网络技术持续发展,无损检测技术与网络技术深度融合实现远程检测将成为趋势。在锅炉上安装无线传感器和检测设备,这些设备可实时采集锅炉各类检测数据,并借助网络迅速传输至远程监控中心。管理人员在监控中心就能对数据展开分析处理,依据数据变化精准判断锅炉状态,一旦发现数据异常,便能及时察觉潜在安全隐患,提前采取措施防范事故发生,有效保障锅炉安全稳定运行,降低运维成本与安全风险。

3.4 新型无损检测技术的研发

锅炉检测有特殊要求,如精准检测复杂结构、微小缺陷及特殊材料等,现有技术有时难以全面满足。为此,科研人员持续研发新型无损检测技术。激光超声检测技术无需接触被检测物体,利用激光激发超声波,具备高分辨率特性,能清晰地呈现锅炉部件的微小缺陷,降低检测对锅炉的影响^[5]。太赫兹检测技术凭借独特频段,可深入检测材料内部结构,精准找出缺陷,在对锅炉中非金属材料,如保温层、密封件检测时,能发挥独特优势,保障锅炉整体质量与运行安全。

结束语:综上所述,常见检测技术各具特点,在锅炉不同部件检测中发挥关键作用。随着科技发展,多种检测技术融合、智能化检测设备、远程检测技术及新型无损检测技术研发等趋势,将提升检测准确性、效率与全面性,降低人为因素干扰,满足锅炉检测特殊需求。未来,无损检测技术将持续进步,为锅炉安全运行提供更坚实保障,推动工业领域稳定发展。

参考文献

- [1]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.
- [2]丁佩仕.无损检测技术在锅炉压力管道检验中的应用探讨[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(3):121-123.
- [3]俞燕.浅谈无损检测技术在锅炉压力容器检验中的应用[J].品牌与标准化,2025(5):183-185.
- [4]徐家琦.浅谈无损检测技术在锅炉检测中的应用[J].科学与信息化,2022(11):133-135.
- [5]陈白雪.无损检测技术在锅炉压力容器检验中的应用实践研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(2):022-025.