

DOI: 10.11973/wsjc202402015

P91 钢无损检测技术研究进展

欧阳雨丰^{1,2,3}, 沈功田^{2,3}, 宋 凯¹, 崔西明¹, 沈永娜^{2,3}

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029;

3. 国家市场监管重点实验室(无损检测与评价), 北京 100029)

摘要: P91 钢作为一种新型马氏体耐热钢, 具有优异的抗腐蚀性、抗高温氧化性, 因此广泛应用于火电机组以及电厂锅炉内高温、高压设备的建造, 然而, 在高温、高压环境中服役, P91 钢极易产生损伤而出现性能劣化甚至失效情况。利用无损检测技术对 P91 钢的健康状态进行评估, 不仅可以有效保障工程安全, 也能节约经济成本。综述了目前用于 P91 钢质量评估的磁粉检测、超声检测、渗透检测、磁检测以及声发射检测技术的研究成果, 总结了各检测方法应用的侧重点, 提出了 P91 钢无损检测技术存在的问题, 展望了其发展方向。

关键词: P91 钢; 高温; 无损检测; 综述

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)02-0077-08

Research progress of nondestructive testing technology for P91 steel

OUYANG Yufeng^{1,2,3}, SHEN Gongtian^{2,3}, SONG Kai¹, CUI Ximing¹, SHEN Yongna^{2,3}

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation for State Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: P91 steel, as a new type of martensitic heat-resistant steel, is widely used in the construction of high-temperature and high-pressure equipment in thermal power units and power plant boilers due to its excellent corrosion resistance and high-temperature oxidation resistance. When used in high temperature and high pressure environments, however, P91 steel is prone to damage, leading to performance degradation and even failure. The use of nondestructive testing technology to evaluate the health status of P91 steel can not only effectively ensure engineering safety, but also save economic costs. This article summarized the research achievements of ultrasonic testing, penetration testing, magnetic testing, and acoustic emission testing techniques currently used for quality evaluation of P91 steel. The focus of each nondestructive testing method was summarized, and the problems in the nondestructive testing technology of P91 steel were pointed out. The development direction of these methods was also discussed.

Key words: P91 steel; high temperature; nondestructive testing; review

近年来, 我国电力发展迅速, 超(超)临界机组成为各发电企业的主力机型。超(超)临界火电机组技术是一种新型的发电技术, 其在常规火电机组基础

上通过加压或者提高温度的方法来提高热效率^[1-3]。P91 钢是美国 20 世纪 70 年代末开发的一种改良 9Cr1Mo 马氏体耐热钢, 其在 9Cr1Mo 钢的基础上, 通过降低含碳量, 限制 P、S 等有害元素, 并添加一定量的 N 以及强碳化物元素(V 和 Nb)以达到固溶强化、细化晶粒的效果^[4-6]。自 1996 年起, 国产 600 MW 及以上超临界机组开始把 P91 钢作为主蒸汽管道以及高温再热管道的主要材料^[7-8]。随着 1 000 MW 的超临界及超超临界参数机组投入建

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071494)

作者简介: 欧阳雨丰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为磁声发射检测

通信作者: 沈功田, shengongtian@csei.org.cn

设,对材料耐高温高压的性能要求越来越高,P91 钢作为一种高强度马氏体耐热钢,以其优秀的冲击韧性、抗高温氧化性能、导热性能、持久强度而被广泛应用^[9-11]。

(1) 主蒸汽温度从 538 °C 至 566 °C 过渡的首要材料

538 °C 和 566 °C 锅炉出口温度可达 541 °C 和 571 °C,同时再热器和过热器的管道和出口集箱的壁温均低于 593 °C。而 P91 钢的最高使用界限温度为 625 °C,故 P91 钢是适用于 566 °C 主蒸汽温度锅炉的首要材料。

(2) 蒸汽温度从 566 °C 至 593 °C 过渡的关键材料

主蒸汽温度达到 593 °C 的发电机组是世界各国发展超(超)临界机组的第一步,也是我国电力能源行业发展超临界机组的合适参数^[12]。目前除了 P91 耐热钢外,还有 P92/T92(NF616)等材料适用于超临界机组服役环境。T92/P92 是在 T91/P91 材料基础上通过增加 W 元素减少 Mo 元素所得的 9Cr 系钢,因此加强对 P91 钢服役过程中性能以及微观组织结构变化的研究,有利于未来开发性能更优异的 9Cr 系钢。

(3) P91 钢可以替代 TP304H、TP347H 不锈钢,作为亚临界机组锅炉过热器和再热器的材料

P91 钢焊缝塑形与 TP347H 钢的相当,抗氧化性与 TP340H 钢几乎相同,裂纹敏感性低于 TP347H 钢的。从蠕变断裂角度来看,P91 钢在约 625 °C 下具有高于 TP304H 钢的强度,适用于高温蒸汽的环境。此外,P91 钢代替 TP304H 钢可以避免异种钢焊接接头的早期失效。

(4) P91 钢是改造现役发电机组高温部件最有前途的替换材料

P91 钢具有较高的蠕变断裂强度,可以采用较薄的壁厚,降低了管道和集箱运行过程中的热应力^[12]。

在高温、高压的环境中,P91 钢存在蠕变以及焊接接头性能劣化的问题,从而导致材料力学性能下降,甚至发生断裂失效,进而危害工业安全。2006 年 10 月某发电厂 300 MW 亚临界机组的主蒸汽 P91 管道在调试过程中发生直管段爆裂,裂缝长达 900 mm,造成了严重的安全事故^[13]。同时,P91 钢的返修性能较差,在返修过程中极易出现冲击韧性下降的问题,因此,利用无损检测技术准确高效地对

P91 钢实施检测,对确保火电机组、锅炉等设备的安全运行具有重要意义^[14-16]。

文章简要介绍了 P91 钢的主要缺陷,并对 P91 钢的磁粉检测、渗透检测、超声检测、声发射检测、磁检测等无损检测方法进行详细介绍,阐述了国内外 P91 钢无损检测技术的研究现状,分析各种无损检测方法的应用效果,最后提出 P91 钢无损检测存在的问题,对其发展方向进行展望。

1 P91 钢无损检测重点及易产生的缺陷

焊接接头性能的劣化是钢材服役过程中的主要质量问题^[17]。P91 钢焊接接头的工艺要求十分严格,在焊接过程中难以对温度、热处理工艺和焊接线能量等实施严格控制,故极易产生缺陷。P91 钢焊接与服役特点决定了其缺陷类型,主要包括以下几类^[18-19]:① P91 钢属于高强度马氏体耐热钢,其具有较高的淬硬倾向,易产生冷裂纹;② P91 钢焊接过程中,熔池中金属流动性较差、黏度高,在焊缝部位易出现气孔、层间未熔合、夹渣等缺陷;③ P91 钢焊缝熔池冷却过快会使收弧处杂质来不及溢出,在冷却凝固收缩时产生弧坑裂纹;④ P91 钢属于高温承压部件,其焊接接头的热影响区受蠕变损伤影响最大,易形成焊缝裂纹。P91 钢收弧裂纹形貌如图 1 所示^[20]。

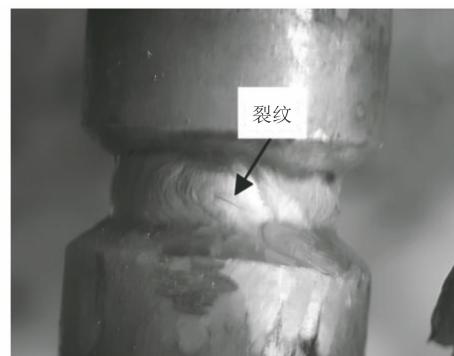


图 1 P91 钢收弧裂纹形貌示意

相关研究表明,锅炉在运行过程中发生的爆炸事故大多由焊接接头的失效断裂引起。因此,P91 钢焊接接头质量的好坏直接影响着 P91 钢的使用安全性与稳定性。在实际检测过程中,须重点对 P91 钢焊接接头的缺陷以及组织劣化进行检测评估。

2 P91 钢无损检测时机

P91 钢表面以及内部缺陷在焊接前、焊接后都应进行无损检测。由于 P91 钢具有延迟裂纹倾向,

焊接接头的无损检测应在其焊后热处理至少 24 h 后进行^[21]。P91 钢常见缺陷及损伤分布如表 1 所示^[22]。

表 1 P91 钢常见缺陷及损伤分布

缺陷或损伤类型	主要分布位置	占比/%	检测时机
气孔	焊接接头	0.6	
微小夹渣	焊接接头	60.6	服役前
未熔合	焊接接头	20	
裂纹	焊接接头	18.8	服役前、在役
蠕变损伤	母材、焊接接头	—	
热损伤	母材、焊接接头	—	在役

3 P91 钢表面及内部缺陷检测

P91 钢作为一种新型马氏体耐热钢, 生产中对其焊接工艺的要求十分严格, 焊接工艺参数设置不当极易产生气孔、夹渣、未熔合以及裂纹缺陷。故在 P91 钢服役前后应使用无损检测技术对其表面及内部缺陷进行检测。考虑到 P91 钢在实际工程应用中以厚壁、大径管为主, 目前其缺陷检测主要以磁粉、渗透、常规超声与超声检测新技术为主。

3.1 P91 钢表面缺陷检测

(1) 磁粉检测

磁粉检测主要应用于铁磁性材料表面及近表面缺陷的检测, 在常规无损检测方法中, 磁粉检测对于表面裂纹的检测灵敏度较高。

李成超等^[23]对某电厂 XD-150/9.8-M 型 P91 钢主蒸汽管进行磁粉检测时, 首次检测并未发现裂纹, 随后结合金相检验结果, 通过调整磁悬液浓度与磁粉粒度后在集汽集箱前一环焊缝上发现了两处明显的磁痕(呈放射状, 符合裂纹特征)。对于 P91 钢表面微裂纹的磁粉检测, 严正等^[24]进行了相关研究, 提出了磁粉检测工艺的优化方向, 即选用粒度细的黑磁粉, 将磁悬液浓度控制在标准浓度的偏下限, 提高光洁度的同时避免炫光。针对 P91 钢联箱壁厚大, 容易出现表面裂纹的特点, 李树军等^[25]提出, 在对联箱焊缝进行磁粉检测时应选用交流磁轭并使用反差增强剂以防漏检。以上研究结果表明, 优化磁粉检测工艺并结合其他检测方法有利于提高 P91 钢焊缝微裂纹的检出率。

张立新^[26]使用 MP-A2L 型交流磁轭, 利用黑磁粉湿法对某厂锅炉过热器出口联箱疏水管标高 40 m 下方的焊缝泄漏部位进行了磁粉检测, 发现焊缝外表面存在一长度为 140 mm 的裂纹, 磁粉检测发现的焊缝裂纹位置如图 2 所示。张凡志等^[27]依

据标准 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》, 对主蒸汽管道 P91 钢对接焊缝进行了磁粉检测, 在 9 条焊缝中发现线性裂纹显示, 其中焊缝周向裂纹宽度细小、走向不规则, 长度从几毫米至几十毫米不等, 最长为 27 mm, 其检测结果如图 3 所示。

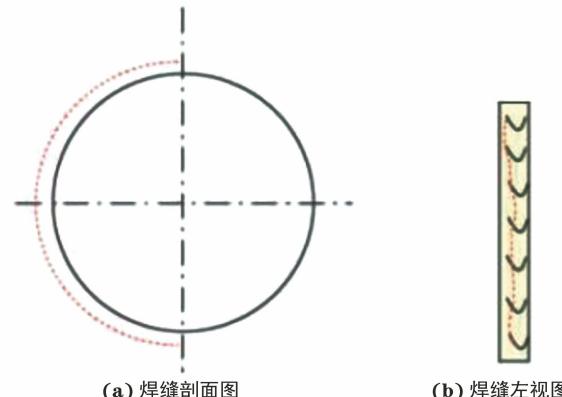


图 2 磁粉检测发现的某过热器焊缝裂纹位置

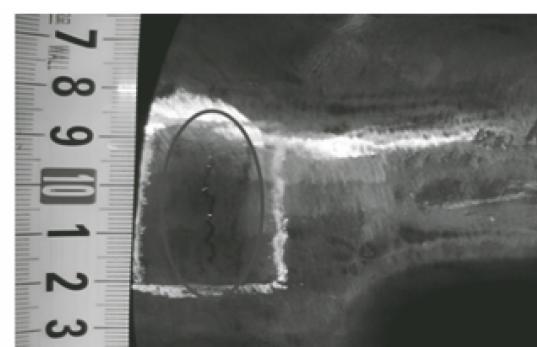


图 3 某主蒸汽管道 P91 钢焊缝裂纹磁粉检测结果

上述研究结果表明, 磁粉检测技术对 P91 钢表面裂纹敏感, 缺陷显示直观, 可以作为 P91 钢表面无损检测的主要手段。

(2) 渗透检测

渗透检测流程为: 在预先处理过的检测面上, 采用喷、刷或浸渍的方式涂上适量渗透剂, 当 P91 钢表面存在缺陷时, 渗透剂渗入到表面缺陷中, 随后对检测面进行清洗、喷涂显像剂, 此时缺陷中残存的渗透剂会在毛细管作用下渗出, 形成缺陷显示。

牛林兴等^[28]对温度计套管与 P91 主蒸汽母管焊接部位进行了渗透检测, 其结果如图 4 所示, 发现焊缝表面分布着整圈裂纹。师学礼^[29]利用渗透检测技术对 P91 钢焊缝起弧与收弧处进行了质量评价, 未发现表面缺陷, 表明焊接工艺得当。

目前渗透检测技术主要应用于 P91 钢焊接前坡口、母材的检测以及无法进行磁粉检测的焊接部位的表面检测。



图 4 某温度计套管与主蒸汽母管焊接部位渗透检测结果

裂纹类缺陷往往危害性大,漏检易造成严重安全事故。由于磁粉检测对铁磁性材料表面极易出现的微裂纹检出率高于渗透检测的,目前 P91 钢表面缺陷检测以磁粉检测方法为主。

3.2 P91 钢内部缺陷检测

P91 钢内部缺陷检测以射线与超声检测方法为主,由于其面积型缺陷出现比重高且射线检测在对大厚度 P91 焊接接头检测时,容易出现底片灰度高、缺陷检出率低的情况,故 P91 钢内部缺陷检测优先使用超声检测方法。

(1) 常规超声检测

常规超声检测技术是利用超声波与待测试件的相互作用,通过对反射波幅值等信息来表征待测试件内部连续性、力学性能以及微观组织结构的一种无损检测技术。

在对 P91 钢焊接接头进行常规超声检测时,P91 钢声学特性的准确测定是有效检出缺陷的前提。为此,杨勇等^[30]提出一种利用双探头快速测定 P91 钢衰减系数和横波声速的方法,选用 2 组 P91 钢试块,依据所得的声特性传播数据,对仪器以及距离-波幅曲线进行调整与修正,选用尺寸为 10 mm×12 mm(宽×长),频率为 2.5 MHz,K 值为 1 和 2 的探头对 P91 钢焊接接头进行无损检测,发现超声方法能够准确高效地检出裂纹、未熔合等关键缺陷。

在实际现场检测中,P91 钢材料专用试块获取困难,用碳钢试块调整检测灵敏度时存在以下两个问题:①普通碳钢与 P91 钢相比,声速存在较大差异,缺陷定位不准;②普通碳钢与 P91 钢材衰减系数不同,缺陷定量存在误差。考虑到无专用 P91 钢试块的超声检测工况,吕磊等^[31]对碳钢试块所得的声速、K 值以及衰减系数进行修正,一定程度上解决了利用碳钢试块校准的超声检测仪器在 P91 钢焊接接头检测中存在的缺陷垂直及水平定位不准的问题。但该方法存在一定的局限性,即随着 K 值以

及深度的增加,缺陷水平定位误差会逐渐增大,因此在保证检测要求的情况下宜选用小 K 值的超声探头。

在 P91 钢超声检测过程中,常出现波幅处于评定线与定量线之间的缺陷回波,按照相关标准可能判定为合格,但解剖后常发现有一定比例为裂纹、未熔合等危害性大的缺陷,因此需要对此类缺陷回波特征进行相关分析。李振山等^[22]依据多年实践经验对 P91 钢裂纹、未熔合缺陷的超声检测波形特征进行了总结,发现以下特征:①裂纹缺陷回波波幅可能较低,在转动探头时,波趾处宽度发生明显变化,同时存在多个高点;②纵向未熔合缺陷波形呈陡直尖锐形,波趾平整,回波在探头移动时变化平滑且缓慢,多种 K 值探头检测结果相差较大;③对于横向未熔合缺陷,使用探头进行斜向平行扫查时,缺陷长度延伸方向垂直或近似垂直于焊缝轴线,波幅非常低。因此,实际检测中除了依据相关标准对缺陷定量分析以外,还需根据回波特征对缺陷性质进行分析。

常规超声检测技术对于 P91 钢内部裂纹、未熔合等面积型缺陷检出率高,但在工程应用中仍存在以下问题^[17]:①大型电厂蒸汽管道的壁厚一般在 60 mm 以上,使用常规超声进行单面双侧检测时存在上表面检测盲区;② P91 钢焊缝中的裂纹方向具有不确定性,对于与声速方向不垂直的裂纹,反射波幅很低,容易漏检;③ P91 钢专用超声检测试块很少,难以满足现场检测需求。

(2) 超声检测新技术

相控阵超声(PAUT)与超声波衍射时差法(TOFD)作为超声检测新技术,在 P91 钢缺陷检测方面也有一定应用。

相控阵超声波束可控,能够调控声场的聚焦与偏转,检测易于成像,检测可达性好。某电厂受限空间 P91 钢管道焊缝位置如图 5 所示,该位置超声检测的难点在于要在 20 mm 空间范围内实现对焊接接头上部至根部声场的全覆盖。针对此问题,韩传高等^[32]设计了受限空间焊接接头相控阵超声检测工艺,采用 CIVA 仿真软件优化相控阵超声探头参数,并将相控阵仿真、检测与 X 射线检测结果进行对比,其结果如图 6 所示。结果表明,相控阵超声在典型缺陷(根部裂纹、中心裂纹、焊趾裂纹)定性方面与 X 射线检测结果基本一致,在受限空间,相控阵超声方法能有效检出规格为 368 mm×38 mm(直

径×壁厚)P91 钢的焊缝缺陷。尽管相控阵超声技术在 P91 钢焊接接头缺陷定性定量方面具有独特优势, 但因存在 5 mm 表面盲区, 还需在焊缝边缘增加探头扫查或辅以其他无损检测技术加以验证。

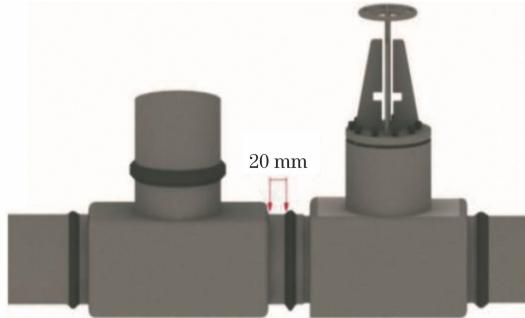


图 5 受限空间 P91 钢管道焊缝位置示意

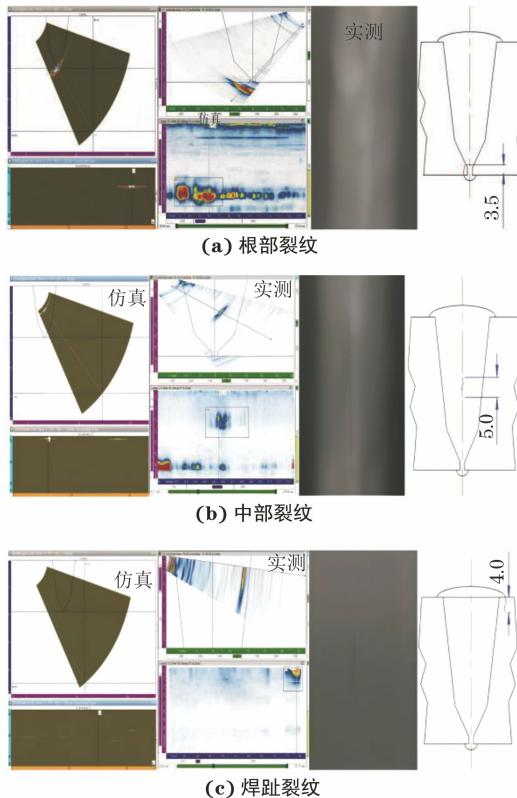


图 6 P91 钢典型缺陷相控阵超声检测与 X 射线
检测结果对比

TOFD 检测技术是一种利用缺陷尖端衍射信号对缺陷进行定位定量的无损检测方法, 其检测结果与缺陷方向无关, 定位定量精度不依赖于信号波幅, 因此 TOFD 检测技术可靠性好, 具有较高的缺陷检出率。ABRAHAM 等^[33]基于弹性波在裂纹尖端的衍射, 提出利用 TOFD 技术监测不同载荷比下紧致拉伸试样的疲劳裂纹在阈值区附近的扩展情况, 通过建立有限元二维波传播模型, 模拟裂纹尖端的衍射现象并与常规直流电位降法进行了对比, 结

果表明, 该方法对 P91 钢疲劳裂纹敏感, 在 P91 钢定期检测、在线监测方面应用前景广阔。

4 P91 钢蠕变损伤以及热损伤检测

P91 钢长期服役在高温高压环境中, 极易发生蠕变损伤以及热损伤, 带来安全隐患, 因此对 P91 钢服役后的蠕变以及热损伤进行评估具有重要意义。对 P91 钢服役后的蠕变、热损伤的评估, 主要采用非线性超声、磁巴克豪森以及磁声发射检测技术。

4.1 非线性超声检测

非线性超声检测技术对位错等引起的损伤非常敏感, 其检测原理如图 7 所示, 首先利用基波幅值与高次谐波幅值获得非线性系数, 然后通过非线性系数对 P91 钢材料进行评估。大量研究表明, 非线性系数与金属材料损伤密切相关。

在 P91 钢热损伤研究方面, 孙锦中等^[34]基于非线性超声理论, 搭建非线性超声检测平台, 对 P91 钢的高温热损伤进行研究, 获得了不同 P91 钢热损伤试样的基波和二次谐波信号, 得到的非线性系数与 P91 钢加热温度的关系曲线如图 8 所示, 可见非线性系数随着 P91 钢加热温度的升高呈单调递增趋势, 表明高温会导致 P91 钢内部组织结构发生变化, 非线性系数可以作为 P91 钢早期高温热损伤评价的重要指标。

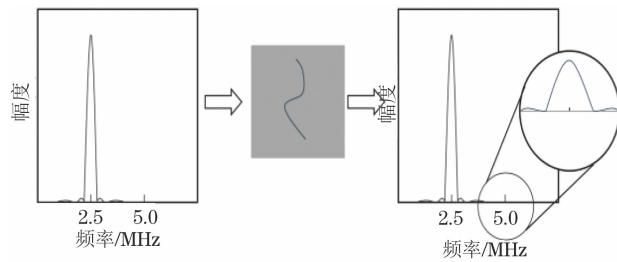


图 7 非线性超声检测原理

在 P91 钢蠕变损伤研究方面, 谷涛等^[35]针对传统非线性超声检测高温蠕变存在的问题, 定义高频能量段与低频能量段之比为非线性参数, 提出依据一定频率范围内非线性参数的累计效应来表征 P91 钢蠕变损伤的新方法, 结果表明, 该方法克服了二次谐波的分离问题且检测灵敏度高, 在金属材料蠕变损伤表征方面具有很大的潜力。但该研究采用的是一发一收的穿透法, 不利于在现场开展检测工作。宋俊俊^[36]提出通过分离第一次底波反射信号获得基波与高次谐波参量的方法, 搭建反射式非线性超声检测系统对不同蠕变寿命(0%, 35% 及 70%) 的

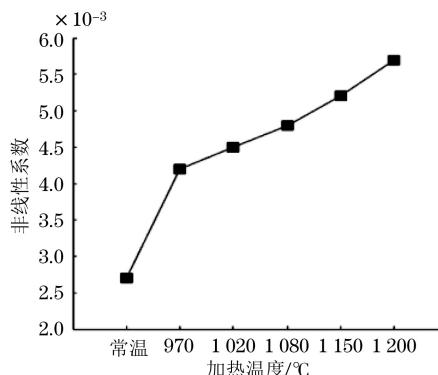


图 8 非线性系数与 P91 钢加热温度的关系曲线

P91 钢蠕变试件进行了检测, 研究结果表明, 该方法不仅能有效区分不同蠕变时间的 P91 试块, 还能表征热影响区受蠕变的影响程度。目前各种蠕变的超声检测都是通过对检测信号中的少量参数进行量化来实现, 虽然利用这些参数能够快速对 P91 钢蠕变状态进行评估, 但却丢失了一些检测信息。为提高 P91 钢蠕变检测灵敏度, 原可义等^[37]提出一种新的超声检测信号处理方法, 该方法利用未蠕变 P91 钢焊接接头超声检测信号生成零蠕变特征空间, 将不同蠕变速率 P91 钢试件的检测信号投影在该特征空间, 以投影残差能量与原信号能量的比值表征试件蠕变程度, 比值越高说明蠕变损伤越严重。该方法对于蠕变检测具有较高的检测成像效果, 是材料组织劣化综合评价的一种有效方法, 但其缺点在于不能区分材料组织劣化的原因。

目前非线性超声检测技术对于 P91 钢损伤的研究主要集中于实验室理论研究层面, 该方法虽能够有效表征 P91 钢热损伤及蠕变损伤状态, 但距离现场检测应用还有一定距离, 主要有以下原因: ① 非线性超声检测仪体积较大, 与非线性超声检测系统相配合的硬件很难在现场展开; ② 对大型主蒸汽管道检测时难以保证检测条件的一致性。

4.2 磁检测

磁检测技术主要包括磁声发射法与磁巴克豪森法, 其通过检测 P91 钢磁性的变化来表征钢内部组织结构以及是否含有缺陷, 具有快速、精度高的特点。

在 P91 钢服役后的蠕变损伤评估方面, 主要采用磁巴克豪森与磁声发射检测技术。AUGUSTYNIAK 等^[38]研究了 P91 钢在塑性变形以及蠕变(应力为 290 MPa、温度为 773 K)两种不同组织状态下磁声发射强度的变化规律, 其结果如图 9 所示, 可见未损伤的样品(N)和两个蠕变损伤

后的样品(C1, C7)的 MAE(磁声发射)强度包络随场强的增加而变化, 即随着蠕变的进行 MAE 信号幅度有所下降且信号特征由原来的双峰宽峰转变为单峰窄峰, 表明磁声发射检测技术对蠕变引起的组织变化非常敏感, 适用于 P91 钢蠕变损伤阶段的无损检测。同样为了利用磁参数对 P91 钢的蠕变过程进行表征, TAKANORI 等利用微磁多参数显微组织与应力分析(3MA)装置, 从微磁性能中提取位错密度变化信息, 对 P91 钢蠕变退化后的组织变化进行评价; 结果表明, 在 1 kHz 时窄带滤波消除了沉淀对磁性能的影响, 由增量磁导率曲线得到的矫顽力场强是提取和评价 P91 位错密度信息的最佳参数。张苏周^[39]对 P91 钢服役过程中的磁特性展开了研究, 发现在服役状态下 P91 钢保留了较好的磁滞特性, 表明基于磁滞的无损检测技术在高温构件蠕变损伤在线监测评价方面具有很大的潜力。

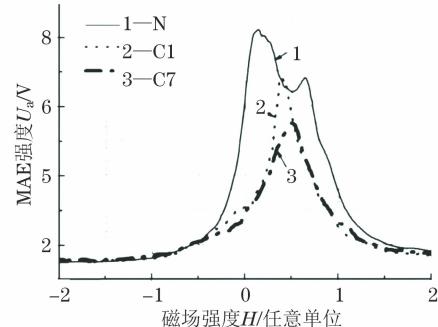


图 9 不同组织状态下磁声发射信号随磁场强度变化曲线

上述研究结果表明, 磁检测技术对 P91 钢微观组织结构变化非常敏感, 能有效评估 P91 钢的蠕变状态。未来 P91 钢的磁检测技术将向多磁参数表征、在线监测、磁声智能化信息识别等方向不断发展, 且检测效率将不断提高, 应用范围将不断扩大。

5 P91 钢裂纹扩展监测

在服役过程中, P91 钢中微裂纹的扩展是一个重大安全隐患, 须使用无损检测技术对其进行监测。

声发射是材料局域源快速释放能量而产生瞬态弹性波的一种现象, 利用瞬态弹性波的信息对材料的完整性和组织结构进行评价的方法是声发射检测技术的本质。该方法属于动态无损检测范畴, 多应用于泄漏监测、腐蚀检测以及材料疲劳监测。

近些年来, 不少学者利用声发射检测技术对 P91 钢裂纹扩展进行评估, 以实现 P91 钢裂纹扩展的在线监测。HANEEM 等^[40]搭建了如图 10 所示的声发射监测系统对 P91 钢焊缝的氢致裂纹进行

了检测, 利用波导结构散热、传播声波的特点, 采集了熔炉中 P91 钢拉伸时的声发射数据, 识别了无预热、不同预热及前后联合加热组合的焊接过程中氢致裂纹的萌生和扩展。声发射监测结果表明, 前后联合加热对减少氢致裂纹有良好的效果, 从声发射结果中获得的开裂信息有助于选择合适的热条件来消除氢致裂纹。BABU 等^[41]研究了 P91 钢在 300~823 K 温度下的疲劳裂纹扩展行为, 同时监测了其声发射信号; 发现在不同 ΔK 值下, 声发射计数率先随温度的升高而减小, 然后增大, 在 623~673 K 时计数率最小, 对应动态应变时效的最大值。该研究结果表明, 可利用声发射参数捕捉不同机制的开始, 如动态应变时效和高温环境辅助裂解。

上述研究表明, 声发射检测技术作为一种动态监测无损检测技术, 在 P91 钢裂纹萌生与扩展监测方面展现出了巨大的潜力, 有望在实际 P91 钢的检测和监测工程中投入使用。

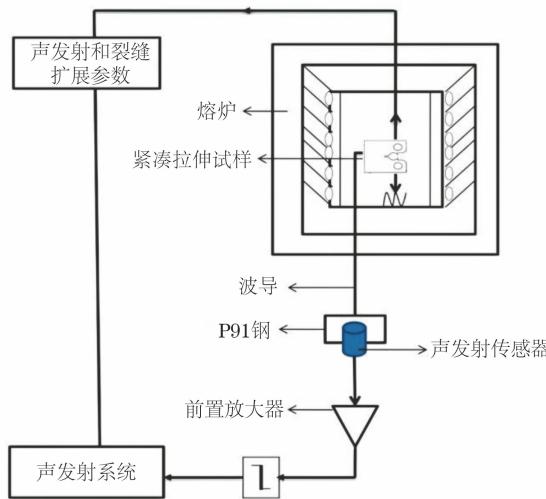


图 10 疲劳裂纹扩展的声发射监测系统构成

6 P91 钢无损检测技术应用总结

每种无损检测方法在 P91 钢缺陷、高温热损伤及蠕变损伤检测方面都有其相应的侧重点与适用范围, 具体如下所述。

(1) P91 钢表面缺陷检测以磁粉检测方法为主, 焊接前坡口、母材的检测以及无法进行磁粉检测的焊接部位辅以渗透检测。

(2) P91 钢内部缺陷检测优先选用常规超声检测方法。在检测前需准确测定 P91 钢的声学特性, 检测过程中应特别注意处于评定线与定量线之间的反射回波, 依据裂纹、未熔合等缺陷回波特征进行分

析比对, 以避免危害性缺陷漏检。

(3) 针对狭小空间 P91 钢焊缝缺陷检测以及 P91 钢缺陷的精确定量, 可以采用相控阵超声和超声波衍射时差法。

(4) P91 钢高温蠕变、热损伤的评估可以选用非线性超声检测、磁声发射检测以及磁巴克豪森检测技术。

(5) 声发射检测技术在 P91 钢裂纹扩展监测方面具有巨大潜力。

在实际 P91 钢无损检测中, 面对不同的检测工况、检测需求, 常需结合不同检测方法以达到检测目的。

7 结论与展望

针对 P91 新型马氏体耐热钢在亚临界、超(超)临界火电机组中的重要地位, 文章详细阐述了磁粉、渗透、超声、磁检测以及声发射检测技术在 P91 钢缺陷检测、高温蠕变损伤以及高温热损伤当中的应用, 总结了各无损检测方法的侧重点。

目前, 关于 P91 钢缺陷定量化、在役 P91 钢无损检测以及实时监测的研究还较少, 还需作深入研究, 推动无损检测技术在 P91 钢检测中的应用。此外, 将人工智能、自动化与无损检测技术相结合, 进而节省人工, 更好地利用检测数据来提高检测效率, 降低生产成本, 也将成为 P91 钢无损检测的发展方向, 在此趋势下, P91 钢无损检测技术将向着智能化、多样化以及可视化方向不断发展。

参考文献:

- [1] LORD A E JR. Acoustic emission[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [2] HIGGENS F P, CARPENTER S H. Sources of acoustic emission generated during the tensile deformation of pure iron[J]. Acta Metallurgica, 1978, 26(1):133-139.
- [3] KUSANAGI H, KIMURA H, SASAKI S. Stress effect on the magnitude of acoustic emission during magnetization of ferromagnetic materials[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(4):2985-2987.
- [4] 孙锦中. P91 钢高温热损伤的非线性超声检测[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(3):278-282, 292.
- [5] 方园园, 赵杰, 李东明. 9Cr1Mo 型耐热钢持久性能的统计分析及可靠性预测[J]. 机械强度, 2010, 32(5): 750-753.
- [6] 张建强, 吴苏, 赵海燕, 等. 马氏体/贝氏体异种耐热钢

- 焊接接头的力学性能及界面失效[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 58-61.
- [7] 陈君平, 杨文峰, 韩腾, 等. P91/P92 钢管道对接焊缝微裂纹的超声波检测[J]. 无损检测, 2016, 38(8): 44-46, 50.
- [8] 徐春, 赵学峰, 朱志贵, 等. 国产 600 MW 超临界机组锅炉高温再热蒸汽出口排空气管座裂纹分析与治理[J]. 锅炉技术, 2018, 49(1): 69-73.
- [9] ONOK, SHIBATA M. Magnetomechanical acoustic emission of iron and steels[J]. Materials Evaluation, 1979, 38(1): 55-61.
- [10] 张安文, 王洋, 张志博, 等. 服役 8.8 万小时后超临界机组 P91 钢马氏体结构的退化行为[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 74-78.
- [11] 张太超, 牛文献, 张高君, 等. 埋弧自动焊在 P91 钢厚壁管道焊接中的应用[J]. 热加工工艺, 2008, 37(11): 119-122.
- [12] 束国刚. T/P91 钢国产化工艺组织和性能改进的研究与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [13] 杨富, 赵卫东, 蔡文河. 依据 ASME 标准准确识别 P91 钢管[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 47-50.
- [14] 金南辉, 牟彦春. 对高合金钢对接接头采用相控阵检测及 TOFD 检测技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2011, 27(1): 32-34, 56.
- [15] 张红军, 刘树涛, 范长信. 国产 P91 钢在蠕变过程中微观组织和性能的变化[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 12-16.
- [16] 田成川, 赵海, 田妮, 等. 长期服役 P91 钢蒸汽管道焊接接头显微组织及力学性能研究[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(6): 920-927.
- [17] 金南辉, 牟彦春. 对高合金钢对接接头采用相控阵检测及 TOFD 检测技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2011, 27(1): 32-34, 56.
- [18] 徐桂冲, 吕恒. 600MW 电站锅炉后屏过热器 P91 大径管焊接与特殊检测[J]. 金属加工(热加工), 2014 (22): 80-82.
- [19] 谷涛. P91 钢高温蠕变状态的非线性超声检测方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [20] 赵欣刚, 赵立, 金南辉. 超超临界机组 P91/P92 钢安装过程质量控制[J]. 电焊机, 2012, 42(10): 87-91.
- [21] 李应钦, 徐森, 刘文峰. T/P91 钢及其焊接、焊接热处理、无损检测工艺要点[J]. 中国化工装备, 2015, 17 (3): 13-23.
- [22] 李振山, 严正, 柳志明, 等. P91/P92 钢管道焊接接头的无损检验[J]. 电力建设, 2010, 31(8): 94-99.
- [23] 李成超, 张勇, 李强. 电厂 P91 主蒸汽连接管裂纹原因分析及预防措施[J]. 化工装备技术, 2021, 42(5): 28-30.
- [24] 严正, 胡庆, 李震山. P91/P92 钢管焊接接头表面裂纹磁粉检测工艺探讨[J]. 金属加工(热加工), 2012 (18): 47-48.
- [25] 李树军, 于杰, 王志永, 等. 火电厂锅炉联箱安装和运行阶段典型缺陷分析[J]. 河北电力技术, 2012, 31 (2): 5-7, 25.
- [26] 张立新. 末级过热器出口联箱疏水管焊缝裂纹分析及处理[J]. 山东电力技术, 2019, 46(8): 61-66.
- [27] 张凡志, 李晓晖, 楼玉民, 等. 300MW 机组主蒸汽管道焊缝表面裂纹成因分析及处理[J]. 浙江电力, 2015, 34(10): 29-32.
- [28] 牛林兴, 杨升军, 张启文, 等. 超临界机组 P91 主蒸汽管道温度计套管焊接改造[J]. 陕西电力, 2012, 40 (8): 80-84.
- [29] 师学礼. T/P91 钢热处理强化及焊接接头组织性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2011.
- [30] 杨勇, 李晓红, 端震, 等. 火电站 P91 钢焊接接头超声检测方法的研究[J]. 压力容器, 2008, 25(2): 5-8, 32.
- [31] 吕磊, 刘扬. P91/P92 钢焊接接头超声波检测方法研究[J]. 内燃机与配件, 2019(18): 113-115.
- [32] 韩传高, 王飞, 赵阳, 等. P91 钢管道受限空间焊缝相控阵超声检测[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 167-172.
- [33] ABRAHAM S T, BABU M N, VENKATRAMAN B. A novel ultrasonic non-destructive testing methodology to monitor fatigue crack growth in compact tension specimens[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(3): 37-41.
- [34] 孙锦中, 马世伟, 蔡叶青, 等. P91 钢高温热损伤的二次谐波评价[J]. 声学技术, 2015, 34(6): 510-514.
- [35] 谷涛. P91 钢高温蠕变状态的非线性超声检测方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [36] 宋俊俊. 反射式非线性超声评价典型高温设备用钢蠕变状态的试验研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- [37] 原可义, 韩赞东, 陈以方, 等. 基于零蠕变特征空间投影的 P91 钢焊接接头蠕变超声检测[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 51-57.
- [38] AUGUSTYNIAK B, CHMIELEWSKI M, PIOTROWSKI L, et al. Comparison of properties of magnetoacoustic emission and mechanical barkhausen effects for P91 steel after plastic flow and creep[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 3273-3276.
- [39] 张苏周. 材料组织损伤与缺陷的电磁及超声导波检测方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [40] HANEEF T K, CHAKRABORTY G, REJEESH R, et al. Characterisation of hydrogen assisted cracking in modified 9Cr-1Mo steel welds using acoustic emission non destructive technique[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(6): 692-708.
- [41] BABU M N, MUKHOPADHYAY C K, SASIKALA G. High-temperature fatigue crack growth study of P91 steel using acoustic emission[J]. JOM, 2021, 73 (12): 3950-3958.