

超超临界机组耐热钢焊接技术进展

刘冀邱¹, 彭杏娜², 乔亚霞², 涂德军², 王学³

(1. 国家电网有限公司, 北京 100032; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055;
3. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072)

摘要: 过去的二十年是中国超超临界机组建设高峰期, 电站焊接技术的创新与进步有力地保障了中国超超临界机组的顺利投产和长期稳定运行。该文综述了超超临界机组铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢的焊接性及焊接工艺, 阐明了主干标准修订依据, 指出了焊接材料及焊接热处理技术的发展现状。重点介绍了超超临界机组用新钢种 G115 的焊接, 大厚壁管道窄间隙自动焊的应用、焊接接头微创评价技术、电站焊接数字化技术等新材料、新工艺和新技术。最后展望了在碳达峰、碳中和国家政策下, 中国超超临界火电机组焊接技术的发展方向、机组深度调峰下焊接部件安全稳定运行所面临的挑战及对策。

关键词: 超超临界机组; 耐热钢; 焊接技术; 窄间隙自动焊; 深度调峰

中图分类号: TG47 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20231228001](https://doi.org/10.12073/j.hj.20231228001)

Progress in welding technology of heat-resistant steel for ultra-supercritical units

Liu Jiqui¹, Peng Xingna², Qiao Yaxia², Tu Dejun², Wang Xue³

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China;
3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the past two decades, construction of ultra-supercritical units have been the peak period in China. Innovation and progress in power station welding technology have effectively guaranteed smooth commissioning and long-term stable operation of ultra-supercritical units in China. Weldability and welding process of ferritic heat-resistant steel and austenitic heat-resistant steel for ultra-supercritical units were reviewed, basis for revision of main standards was clarified, and development status of welding materials was pointed out. It focused on welding of new steel grade G115 for ultra-supercritical units, application of automatic welding of large thick-walled pipes with narrow gaps, minimally invasive evaluation technology of welded joints, digital technology of power station welding and other new materials, new processes and new technologies. Finally, it looked forward to development direction of China's ultra-supercritical thermal power unit welding technology under national policy of carbon peaking and carbon neutrality, as well as challenges and countermeasures faced by safe and stable operation of welded parts under deep peak shaving of the unit.

Key words: ultra-supercritical unit, heat-resistant steel, welding technology, narrow gap automatic welding, deep peak shaving

0 前言

过去的二十年是中国超超临界机组建设高峰期, 一大批大容量高参数的机相继组投产发电, 在保证中国经济社会发展用电的同时, 取得了显著的节能减排效益。超超临界机组用新型耐热钢等级的提升

对电站焊接技术提出了更高的要求 and 更大的挑战^[1-3]。在超超临界机组建设及运行过程中, 在焊接制造、安装、失效、修复等方面积累了大量的经验。超超临界机组焊接部件的失效主要分为内、外两种因素即冶金特殊性和拘束应力大。文献 [4] 针对国内多台超超临界塔式炉 T23 水冷壁失效管样进行分析, 判断失

效性质为楔形裂纹导致的低塑性蠕变断裂,并提出降低焊缝硬度及细化晶粒的解决方案。文献[5]分析了异种钢接头早期失效的内因和外因,结合国内火电机组调峰的实际情况,对变工况运行引起的交变应力与异种钢接头早期失效的联系进行了阐述。文献[6]揭示了P92钢焊接接头IV型蠕变断裂机理。文献[7]对超超临界1000 MW机组P92钢焊接接头开裂原因分析及修复,为P92钢焊接接头早期IV型开裂的预防和处理提供经验借鉴。

近年来,更高容量更高参数的火电机组使用了大量的国产新材料,对焊接性提出新的要求。同时,随着装备及管理水平的提升,焊接自动化、智能化、数字化等新技术应运而生。该文总结了近二十年来中国超超临界机组耐热钢焊接技术现状,展望未来发展方向,更好地促进火电行业向高效、绿色方向转型发展。

1 超超临界机组耐热钢的焊接

1.1 铁素体耐热钢的焊接性及焊接工艺

超超临界机组用铁素体系耐热钢包括低合金耐热钢和中高合金马氏体耐热钢。以T23(07Cr2MoW2VNbB)钢为代表的低合金耐热钢通过降低碳含量(质量分数不超过0.1%)减小HAZ的淬硬倾向(最高硬度不超过350 HV),改善了焊接性。国外早期研究^[8]认为:对壁厚不超过10 mm的T23接头,焊接时可取消预热和焊后热处理。但是国内应用表明:T23接头易出现裂纹导致失效。根据工程应用经验,DL/T 869—2021《火力发电厂焊接技术规程》删除了对T23钢壁厚不大于8 mm可以免除焊后热处理的规定。T23钢有较明显的再热裂纹敏感性,王学等学者^[9]通过短时高温蠕变破断试验研究了T23钢再热裂纹敏感性,结果表明:T23钢在580~750℃温度范围对再热裂纹非常敏感,最敏感温度在650℃附近。

以T/P92为代表的马氏体耐热钢由于合金成分含量高焊接后形成淬硬马氏体组织,因此,有一定的冷裂纹敏感性。为了避免冷裂纹,T/P92钢焊接后要及时进行焊后热处理或后热处理。焊缝韧性偏低是T/P92钢焊接性的一个主要问题,焊接过程中要控制焊接热输入。T/P92接头在高温蠕变过程中容易产生IV型裂纹开裂,一般出现在热影响区的细晶区。文献[6]认为细晶区在焊接热作用下最高温度达到 A_{c3} 以上,焊接过程中的短时高温不能使碳化物全部

溶解,在随后的高温回火过程中粗化,并且分布也可能发生改变,碳化物沉淀强化作用下降,再加上细晶区位错密度降低,导致运行过程蠕变性能劣化,是IV型开裂的冶金学原因。

在DL/T 869—2021标准中,T/P92钢焊接时预热及层间温度宜控制在180~250℃(原标准最低温度为200℃),钨极氩弧焊打底时可降低至150~200℃,可以有效防止冷裂纹的发生。通过多年的生产实践认为:过高的预热温度和层间温度对防止冷裂纹没有必要,而且可能使焊缝金属在高温停留时间过长使晶粒长大,致使焊缝金属韧性降低,因此,必须严格控制预热温度和层间温度。该标准对T/P92的焊后热处理温度由原来的750~770℃变为740~760℃。主要原因如下:近年焊接热处理设备的升级换代,均温性更好,保温控温措施更加完善,大厚壁管道内外壁温差更加可控;为避免焊后热处理温度超过熔敷金属 A_{c1} 点后焊缝组织发生相变,适当降低最高焊后热处理温度是有利的;GB/T 5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》规定T/P92的回火温度760~790℃,ASME SA-335M《Standard specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service》规定P92的回火温度730~800℃,为避免焊后热处理温度超过母材回火温度,也有必要适当降低焊后热处理温度。在工艺允许条件下,通过控制单道焊层的尺寸来降低焊接热输入,对于保证焊缝的韧性非常必要,同时,也可以减小焊接热影响区宽度,有助于降低IV型开裂风险。

1.2 奥氏体耐热钢的焊接性及焊接工艺

超超临界机组高温过热器再热器用有Super304H, HR3C等奥氏体耐热钢^[10]。焊接Cr-Ni纯奥氏体钢时的主要问题有焊接热裂纹、接头腐蚀,此外,在机组运行过程中还易出现时效脆化。焊接材料中的Ni, C, Si, Nb, S, P, Sn, Sb等元素会提高热裂纹敏感性,其中Ni, Nb是必需加入的,其它元素的含量为避免热裂纹要给予严格地控制和限制。随着Cr, Ni含量的提高,对C, S, P含量的限制就越加严格,控制的含量水平也越低。这个原则也为选择和设计奥氏体熔敷金属成分的准则。Cr-Ni奥氏体钢的应力腐蚀发生在含有Cl⁻的介质中,而且介质温度愈高,愈容易发生应力腐蚀破裂。Cr-Ni奥氏体钢最容易发生应力腐蚀的温度范围是50~300℃。为了防止发生应力腐蚀破裂,需要确认施工过程及随后的储存、运输、运行过

程中是否存在有 Cl^- , 如果无法避免 Cl^- 对焊接热影响区的污染, 就需要进行焊后固溶处理以消除焊接应力。此外, 焊接和焊后热处理以后应避免进行冷作变形加工。Super304H, HR3C 钢在固溶状态下具有优良的塑性。但是材料在高温运行过程中, 会析出碳化物、 σ 相, 它们在强化材料的同时, 明显降低材料的塑韧性。焊缝金属也有时效脆化的倾向, 焊接时正确选择焊接材料, 以避免 σ 相脆化的危险。

奥氏体钢焊接时, 最好采用降低焊接热输入、降低层间温度的工艺方法和工艺措施, 即应尽量采用焊接热输入低的 TIG 焊接工艺, 以及确保层间温度低的短焊道和间断焊方法。焊材应选择与母材成分相近且杂质含量低的材料或者镍基焊材。选择同质焊材还是镍基焊材对 Super304H, HR3C 接头力学性能的影响不大, 均能满足要求。用镍基 617 焊丝焊接时的工艺性能不理想, 熔化和流动性不好, 易出现未熔合、根部未焊透等缺陷。

1.3 超超临界机组耐热钢焊接材料

焊接材料的开发是中国超超临界机组焊接技术中的短板, 与国外尚有不小的差距。在中国超超火电机组的建设高峰期, 电力行业电站焊接标委会针对国外 Super304H, HR3C 钢同质焊材供应紧张、价格畸高的情况, 召开紧急会议进行研讨, 提出了可用 617 镍基焊材替代同质焊材的方案, 解决了机组建设的燃眉之急。截止到目前, 国内初步实现了 T/P91 钢系列焊材的国产化和部分进口替代, 但是 T/P92, Super304H, HR3C 等耐高温等级更高的耐热钢焊材仍依赖进口。总结工程实践经验, 原电力行业电站焊接标委主任杨建平提出了马氏体耐热钢焊条的技术条件必须规定合金过渡方式、相变点等指标, 被国内外焊材企业所采用。随着焊接材料国产化的全面推进, 总结超超临界机组中焊材使用经验, 编制中国超超临界机组用焊材技术标准, 完善电站焊接标准体系的时机已逐渐成熟。

1.4 超超临界机组焊后热处理技术

超超临界机组大量使用新型耐热钢管材, 不仅接头数量增多, 且结构尺寸变大, 构件壁厚更厚。主要体现在: 由于新型马氏体耐热钢的焊后热处理温度窗口窄, 加大了现场热处理控制难度; 大型构件的焊后热处理要求设备必须具有足够大的加热能力以保证工艺要求的升温速度、加热温度, 同时还要求温度的均匀性, 以减少接头温差, 降低接头焊后热处理后

的应力。构件大型化, 也使部件焊后热处理过程中的变形控制难度加大。韩宇等学者^[11]及胡磊等学者^[12]以 9%Cr 耐热钢管道柔性陶瓷电加热局部焊后热处理过程为对象, 在大量试验的基础上, 构建了热处理温度场计算模型, 基于模型, 优化了加热宽度、分区加热数量、加热功率和升温速率等重要的焊后热处理参数。陈东旭等学者^[13]对国内外焊后热处理标准推荐的加热宽度对 9%Cr 热强钢管道的适用性进行了分析。针对异形焊接接头焊后热处理温度场改善, 陈忠兵等学者^[14]提出并开发了温度补偿法和功率补偿法 2 种焊后热处理工艺, 实例说明了 2 种工艺在工程上的应用。

2 超超临界机组新钢种、焊接新技术

2.1 G115 钢的焊接

2.1.1 G115 钢简介

为提高燃煤发电机组的效率, 各国正努力提高蒸汽温度和压力。更高的温度和压力对材料提出来的新的要求, 现用材料 P92 已不能满足 630 °C 超超临界二次再热锅炉使用要求。国外开发了 630 ~ 650 °C 的铁素体系耐热钢有 MARBN, SAVE12AD 及 T/P93 钢等。G115 钢是钢铁研究总院刘正东院士团队历时 15 年自主研发的新一代马氏体耐热钢, G115 采用“选择性强化”设计理念, 通过合理控制 B 和 N 的配比有效控制 M_{23}C_6 碳化物在服役过程中的长大速率, 在 Nb 和 V 之外通过添加适量 Cu 元素进一步增加析出强化效果, 通过把 W 含量从 3% 调低到 2.8%, 来提高服役过程中的冲击韧性。G115 钢在 620 ~ 650 °C 温度区间具有较好的组织稳定性能, 620 °C 下高温持久强度比 P92 高 40%, 650 °C 下持久强度是 P92 钢的 1.5 倍^[15-16]。其抗高温蒸汽氧化性能优于 P92 钢。

目前, G115 已纳入新版国际标准 GB/T 5310—2023。由于 G115 钢与 P92 相比提高了 B 元素含量, 焊接接头 IV 型开裂敏感性低。在目前在役 620 °C 超超临界机组中 P92 接头频繁产生 IV 型开裂的背景下, 未来 G115 钢可能会替代 P92 钢, 一方面可以减少壁厚, 另一方面降低接头 IV 型开裂的风险^[17], 提高机组安全性。

2.1.2 G115 钢用焊材研发情况

耐热钢焊材的开发需要针对熔敷金属及焊接接头进行大量的工艺试验, 其中抗拉强度、冲击韧性是基本指标, 持久强度是重要指标。文献 [16] 对 Gr.92 等级、182 镍基焊条、Chromet 933 焊条的 G115 焊接

接头进行了试验研究,但缺乏长时持久数据。国内焊材厂大西洋、北冶、西冶、三威、京群等焊材厂从2016年对G115钢配套焊材进行了研发。四川大西洋焊材公司和昆山京群焊材公司开发了G115配套焊条、埋弧焊焊丝焊剂及氩弧焊焊丝;北京北冶功能材料公司开发了配套的氩弧焊丝;四川西冶新材料股份有限公司和武汉大学合作开发了配套的埋弧焊焊丝焊剂和氩弧焊丝;长春三威特种焊材公司开发了配套的焊条等。国内后来居上,在焊材研发及焊接工艺上进行了大量试验。国内相关焊材标准有大唐华北电力试验研究院主编的T/CSTM 00017.4—2024~T/CSTM 00017.6—2024《电站用马氏体耐热钢08Cr9W3Co3VNbCuBN(G115)用焊材》三项焊材系列团体标准。

2.1.3 G115 钢焊接工艺

G115钢焊接方法主要有埋弧焊、焊条电弧焊、手工氩弧焊、半自动TIP-TIG焊、窄间隙自动TIG等。主机厂和配管厂以埋弧焊和窄间隙自动TIG焊接方法为主,现场组装焊接以焊条电弧焊为主,正计划推广TIP-TIG焊接工艺。目前,制造厂、配管厂和电建公司等电站建设全链条单位已完成多轮次G115大管工程焊接工艺评定,按相关标准检验全部满足要求,为世界首台630机组建设提供了焊接技术保障。国内相关G115焊接工艺标准有T/CSEE 0398—2023《马氏体耐热钢08Cr9W3Co3VNbCuBN(G115)焊接技术规程》以及T/CSTM 团标 00017.7—2024《电站用马氏体耐热钢08Cr9W3Co3VNbCuBN(G115)第7部分:焊接工艺》。

2.2 窄间隙自动焊技术

窄间隙自动焊技术由于坡口窄、焊接填充量少,对高水平焊工依赖度小,热输入易控制等特点,广泛用于核电、石化等领域^[18-19]。在电站管道焊接中,主蒸汽管道一般壁厚较厚,窄间隙焊优势更加明显,但由于材料强度高、焊接性差、壁厚磁偏吹等问题,致使窄间隙自动化技术在火电行业的起步较晚。随着焊接装备的不断提升,文献[20]对超超临界机组P92钢窄间隙自动氩弧焊接头的微观组织和力学性能进行了研究,摸索了焊接工艺,焊缝及热影响区冲击韧性良好,远远高于焊条电弧焊的性能。文献[21]研究了窄间隙自动埋弧焊技术焊接设备在火电厂管道工厂化预制中的适应性和焊接综合效益。目前,窄间隙自动化技术在工厂化预制阶段已实现多个工程

的应用,电站现场安装阶段在丰城电厂三期和上海石洞口项目的现场安装中得到了试点应用。图1为窄间隙自动化技术在现场安装阶段的应用。



图1 丰城电厂三期现场窄间隙自动焊

Fig. 1 On-site narrow gap automatic welding of Fengcheng Power Plant Phase III

2.3 焊接接头微损伤取样及测试技术

微损伤取样及微型试样测试技术应用领域广阔,可在核电、航空、航天、火电等领域发挥重要作用^[22-23]。为了配合新能源电力上网,火电机组将频繁的启停和深度调峰,这将直接导致火电机组部件承受大量的疲劳—蠕变损伤作用,机组部件存在巨大的安全隐患。微损伤取样及微型试样测试技术可为频繁的启停和深度调峰机组部件状态监督与寿命评估提供技术支持。微型试样测试评价技术可以对新型耐热钢部件进行定期的性能监督与剩余寿命评估,有力保障高参数火电机组的安全稳定运行。

为了不破坏机组金属部件的结构完整性,可以采用现场微损伤取样的方式获取焊接接头区域材料,如图2所示。将切取下来的材料制成各种类型的微型试样开展拉伸、冲击、疲劳及持久蠕变等试验,获得焊接接头的各项力学性能指标。目前,现场焊接接头微损伤取样技术主要分为便携式电火花和便携式机械取样设备两类。电火花式微损伤取样设备在切割的过程需要电控柜,由于电火花切割导致切割部位温度较高,需要现场布置冷却装置,整个系统结构较复杂。机械式微损伤取样设备采用气动方式驱动碗状刀具旋转磨削切割,切割处温度一般低于60℃,不需要加装冷却装置,整体设备结构简单重量轻。但需针对不同待切割材料选用合适的高耐磨碗状刀具。



图2 现场微损伤取样

Fig. 2 On-site micro-damage sampling

2.4 焊接管理数字化

工业互联网技术与焊接应用技术深度融合,可以实现精细化的焊接数据监测、多维度的焊接数据分析、数字化的焊接生产管理等功能。在钢结构、工程机械、船舶等工厂焊接量大的领域,企业在逐步推进焊接数字化信息管理平台,可以实现焊接人机料法环测全要素管控,让工艺智能管控,过程可监控,质量能追溯,提高生产效率、降低制造成本。

在传统的电力能源行业,主要集中于单一的焊接设备的智能化、数字化,与焊接人机料法环测全要素管控还有一定差距。在电站管道配管预制行业,国内企业利用焊接数字化管理系统,提高预制焊接施工的现代化水平。针对管道车间离散焊机进行设备联网改造,建立专业的管理平台,实现焊工资质、焊接工艺 WPS 及焊材等焊接资源的集中管理。此外,通过扩展设计实现了焊接工单线上派发,焊接过程实时监控及报警,焊接质量追溯等功能,加强对焊接过程的管控,提高企业焊接工序的数字化、信息化水平。

针对超超临界机组运行过程中焊接技术管理工作中存在的问题,可从焊接工具的数字化改进、焊接工艺的数字化实施和焊接质量的数字化预测 3 个方面进行焊接技术数字化系统提升。基于工程应用实际需求,可运用物联网、大数据、云平台、数字孪生等技术提升电站数字化焊接技术水平。面向机组全寿期管理体系,依托数字化焊接工具、数字化工艺实施、数据结构化采集的数字化质量预测,可解决电厂焊接技术现场监管、数据搜集、质量跟踪等电厂重要焊接接头全寿期管理难题。

3 超超临界机组焊接技术发展趋势

随着新建超超临界机组参数的不断提高,以及大量在役的超超临界机组陆续进入寿命中后期,中国电站焊接技术的发展有以下趋势。

在 630 °C 和 650 ~ 700 °C 超超临界机组中,将大量使用更高等级的新型耐热钢、高温镍铁基和镍基合金,这些新材料的焊接性需要研究和验证,以及开展焊接新方法、新工艺的研究,尽可能用自动化焊接取代手工焊接,减少对焊工的依赖;对焊接过程进行数字化控制,提高焊接质量。焊接性研究是基础,新型高温材料的焊接裂纹敏感性、焊接接头的高温蠕变性能等是研究的重点。

在更高参数的机组中,水冷壁将采用 T91, T92 钢甚至是高温合金,这类大型构件的焊接,尤其是现场焊后热处理将面临很大的挑战。需要开发高效、可精确测量控制温度的热处理设备,建立相应的热处理质量控制标准。

焊接材料的开发。中国超超临界机组用焊材长期依赖进口,近年来焊材国产化虽然取得了一些进展,但是由于在研发与应用上的起步均较晚,尚未从根本上改变国外焊材的垄断局面。中国焊材企业可以利用中国在建设更高参数超超临界机组的领先优势,及时掌握高温新材料应用信息,尽早开展攻关,实现弯道超车。

随着超超临界机组服役年限的增长,机组检修维护、改造、延寿等需求对电站焊接技术提出了更高的要求。今后需要发展焊接部件的微损伤及缺陷检测技术、寿命评估技术及高效焊接修复技术。马氏体耐热钢接头 IV 型裂纹的早期检测与寿命评估是今后研究的重点,这种裂纹在构件内部产生,且以孔洞生长方式发展,隐蔽性强,现场复型金相和传统超声检测方法均无法早期发现,非线性超声等无损检测新技术可能是今后的发展方向之一。基于微损伤检测结果,建立连续介质蠕变损伤力学模型,有可能实现马氏体耐热钢接头 IV 型断裂寿命预测和失效的早期预警。

4 深度调峰对超超临界机组焊接部件的影响

在碳达峰、碳中和国家政策的指引下,火电机组在中国电力结构中的地位将从基荷电源逐渐转变为调峰电源,火电机组在追求更高参数、更高效率的同

时,深度调峰将是今后火电机组的常态服役模式。深度调峰将对超超临界火电机组部件的安全性带来显著影响,会加速一些焊接部件的失效,主要影响有如下内容。

4.1 对锅炉设备部件的影响

机组参与调峰的过程中,汽包(汽水分离器)、联箱、三通管、蒸汽管道等厚壁金属部件在剧烈升降负荷及频繁启动中,会受到热应力和机械应力的周期性作用,产生低周疲劳损耗。焊接处、孔口处、接管处是应力集中区域,这些部位所承受的峰值应力可能是其他部位的几倍。高温蒸汽管道、联箱、三通等工作温度在 450 ℃ 以上,不仅承受低周疲劳损伤还承受高温蠕变应力作用,在蠕变-疲劳交互作用下,金属部件的损伤更大。

低负荷运行时,受热面易超温,加速焊接接头的失效。对于水冷壁管接头,当接头内壁存在焊瘤、流量分配不均时,管壁极易发生超温。安装焊缝如未做焊后热处理,残余应力较大,加上焊缝硬度偏高,在超温工况下容易发生早期失效,此外,深度调峰带来的壁温不均,即使没有发生超温,也会带来较大的热应力,可能在接头位置产生热疲劳裂纹。至于水冷壁管与鳍片(特别是宽鳍片)、钢梁、框架等钢板的连接角焊缝,在深度调峰工况下,因管子与钢板的温度变化不一致,极易出现拉裂。对于受热面管与集箱连接的管座接头,由于存在结构形状突变,在受到外载荷作用下会产生较大的应力集中,加上约束大,结构应力也大。管子与集箱在变工况运行时,将存在较大的温度差异。因此,管座角焊缝在疲劳工况下容易发生提前失效。对于 M-A 异种钢接头,由于异种钢接头焊缝与母材的线胀系数差别较大,在锅炉启停时,熔合线两侧的焊缝和母材互相约束,胀缩受限,会产生很大的热应力;因此,频繁启停会增加异种钢接头失效概率。

4.2 对汽机设备金属部件的影响

在深度调峰运行时,工质流量的变化将导致导气管、调门异常振动,易于引起接管、焊缝、螺栓等的疲劳开裂。工作介质温度的变化将产生热应力,引起螺栓、缸体、接管等的开裂。大多数火电机组当初大多是作为带基本负荷机组设计的,不适应深度调峰运行的要求。如果参与调峰运行,由于频繁启动及大范围负荷变动,机组要经常承受大幅度的温度变化,使转子、汽缸等厚壁部件产生交变热应力,导

致机组厚壁部件的低周疲劳损伤。

根据深度调峰、灵活性改造后机组运行新特点,在焊接部件失效、监督及修复方面,应开展以下几个方面的研究:①深度调峰机组焊接部件的失效行为与监督技术;②深度调峰机组焊接部件寿命评估方法;③深度调峰机组对焊接材料的要求;④深度调峰机组基建及部件修复质量验收规范。

5 结束语

总结了中国在超超临界机组用新型铁素体耐热钢及奥氏体耐热钢的焊接性、焊接工艺、标准修订、超超临界机组耐热钢用焊丝国产化进展情况,以及超超临界机组用新钢种焊接、焊接新工艺、检测新技术、焊接数字化等方面取得的成果及进展情况,展望了在碳达峰、碳中和国家政策下,中国超超临界火电机组焊接技术的发展方向、机组深度调峰下焊接部件安全稳定运行所面临的挑战及对策。

参考文献

- [1] 范长信,张红军,周荣灿,等.超超临界机组锅炉用新型耐热钢的焊接[J].电力设备,2006,7(4):11-14.
Fan Changxin, Zhang Hongjun, Zhou Rongcan, et al. Welding of new type heat resisting steel used in ultra super critical pressure boiler[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(4): 11-14.
- [2] 杨富.1 000 MW 级超超临界火电机组锅炉用新型耐热钢的焊接[J].中国电力,2005,38(8):48-52.
Yang Fu. The welding of new heat-resisting steels used for boiler of 1 000 MW class ultra-supercritical fossil-fired units[J]. Electrical Power, 2005, 38(8): 48-52.
- [3] Kondo M, Tabuchi M, Tsukamoto S, et al. Suppressing type IV failure via modification of heat affected zone microstructures using high boron content in 9Cr heat resistant steel welded joints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(2): 216-223.
- [4] 王学,李夕强,杨超,等.超超临界塔式炉 T23 水冷壁早期失效分析[J].中国电力,2014,47(12):21-27.
Wang Xue, Li Xiqiang, Yang Chao, et al. Analysis on early stage failure of welded T23 Steel waterwall in USC tower boilers[J]. Electrical Power, 2014, 47(12): 21-27.
- [5] 陈鑫,蔡文河,张坤,等.火电厂异种钢焊接接头早期失效研究现状[J].焊接,2018(2):19-25.
Chen Xin, Cai Wenhe, Zhang Kun, et al. Overview of early failure of dissimilar steels joint in power plants[J]. Welding & Joining, 2018(2): 19-25.

- [6] 王学, 潘乾刚, 陶永顺, 等. P92 钢焊接接头 IV 型蠕变断裂特性 [J]. 金属学报, 2012, 48(4): 427 – 434.
Wang Xue, Pan Qiangang, Tao Yongshun, et al. Type IV creep rupture characteristics of P92 steel weldment [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(4): 427 – 434.
- [7] 张禹, 梁恩宝, 孙中元, 等. 超超临界 1 000 MW 机组 P92 钢焊接接头开裂原因分析及修复 [J]. 焊接技术, 2022, 51(S1): 97 – 101.
Zhang Yu, Liang Enbao, Sun Zhongyuan, et al. Analysis and repair of cracking causes of P92 steel welded joints in ultra-supercritical 1 000 MW unit [J]. *Welding Technology*, 2022, 51(S1): 97 – 101.
- [8] Vaillant J C, Vandenberghe B, Hanhn B, et al. T/P23, 24, 911 and 92: new grades for advanced coal-fired power plants — properties and experience [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85: 38 – 46.
- [9] 王学, 李夕强, 杨超, 等. 超超临界锅炉水冷壁 T23 接头时效性能 [J]. 动力工程学报, 2015, 35(4): 325 – 330, 335.
Wang Xue, Li Xiqiang, Yang Chao, et al. Aging properties of T23 weld joint in water wall of USC boilers [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(4): 325 – 330, 335.
- [10] 李益民, 范长信, 杨百勋, 等. 大型火电机组用新型耐热钢 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
Li Yimin, Fan Changxin, Yang Baixun, et al. New heat-resistant steel for large thermal power units [M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013.
- [11] 韩宇, 王学, 胡磊, 等. 壁厚对 9%Cr 热强钢管局部焊后热处理温度场的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44(3): 104 – 108.
Han Yu, Wang Xue, Hu Lei, et al. Effect of wall thickness on temperature field for 9% Cr heat-resistant steel pipes during local post weld heat treatment [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(3): 104 – 108.
- [12] 胡磊, 王学, 孟庆云, 等. 9%Cr 钢厚壁管道局部焊后热处理温度场的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 13 – 16.
Hu Lei, Wang Xue, Meng Qingyun, et al. Numerical simulation of local post-weld heat treatment temperature field of 9% Cr steel thick-walled pipes [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(12): 13 – 16.
- [13] 陈东旭, 胡磊, 王学, 等. 国内外焊后热处理标准推荐的加热宽度对新型 9%Cr 热强钢管道的适用性 [J]. 中国电力, 2017, 50(11): 78 – 83.
Chen Dongxu, Hu Lei, Wang Xue, et al. Applicability of heated band width recommended by post weld heat treatment standards for new 9%Cr steel pipes [J]. *Electric Power*, 2017, 50(11): 78 – 83.
- [14] 陈忠兵, 孙志强, 吕一仕. 异型焊接接头局部焊后热处理 [J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 82 – 87.
Chen Zhongbing, Sun Zhiqiang, Lv Yishi. Local postweld heat treatment of heterogeneous welded joint [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(3): 82 – 87.
- [15] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630 ~ 700 °C 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展 [J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539 – 548.
Liu Zhengdong, Chen Zhengzong, He Xikou et al. Systematical innovation of heat resistant materials used for 630 ~ 700 °C advanced ultra -supercritical (A-USC) fossil fired boilers [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 539 – 548.
- [16] 刘正东, 陈正宗, 包汉生, 等. 新一代马氏体耐热钢 G115 研发及工程化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
Liu Zhengdong, Chen Zhengzong, Bao Hansheng, et al. Research and engineering of new generation martensitic heat-resistant steel G115 [M]. Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2020.
- [17] 孙晓翔. G115 马氏体耐热钢焊接热影响区微观组织及 IV 型蠕变裂纹敏感性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Sun Xiaoxiang. Research on Microstructure of welding HAZ & susceptibility to type IV creep crack for G115 martensitic heat-resistant steel [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [18] 翁清云, 张海林, 晏君文, 等. 双丝窄间隙埋弧焊工艺在大型石化容器上的研究与应用 [J]. 中国重型装备, 2022(2): 21 – 24.
Weng Qingyun, Zhang Hailin, Yan Junwen, et al. Research and application of double wire narrow gap submerged arc welding process to heavy petrochemical vessel [J]. *China Heavy Equipment*, 2022(2): 21 – 24.
- [19] 冯英超. 核电站主蒸汽管道窄间隙自动焊工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2017(20): 57 – 59.
Feng Yingchao. Research on narrow gap welding process on nuclear power station main steam line [J]. *Metal Forming*, 2017(20): 57 – 59.
- [20] 章雅林, 李再金, 高超, 等. P92 钢管道安装焊接接头的窄间隙全位置自动焊 [J]. 金属加工 (热加工), 2023(4): 21 – 24.
Zhang Yalin, Li Zaijin, Gao Chao, et al. Narrow gap all position automatic welding of P92 steel pipe installation welding joints [J]. *MW Metal Forming*, 2023(4): 21 – 24.

(下转第 66 页)

44.

[2] 杨慧轩, 刘荣, 吕桂志, 等. 装配生产线变位机构的设计与分析[J]. *机械设计与制造*, 2018(3): 248 – 251.
Yang Huixuan, Liu Rong, Lv Guizhi, et al. The design and analysis of positioner mechanism used in assembly line[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(3): 248 – 251.

[3] 刘伟斌, 李勇, 王永刚. 焊接机器人工作站优化设计与应用[J]. *金属加工(热加工)*, 2012(18): 27 – 29.
Liu Weibin, Li Yong, Wang Yonggang. The optimization design and application of welding robot workstation[J]. *Metal Working*, 2012(18): 27 – 29.

[4] 翟浩, 孟国强. 常用焊接变位机种类及其选用原则[J]. *工程机械与推修*, 2013(11): 179.
Zhai Hao, Meng Guoqiang. Type of commonly used welding variator and its selection principle[J]. *Construction Machinery and Modification*, 2013(11): 179.

[5] 严学书, 孙全, 夏选琼. 焊接变位机构方案设计及反转机理与定位分析[J]. *包装工程*, 2013, 34(1): 129 – 132.
Yan Xueshu, Sun Quan, Xia Xuanqiong. Welding positioner mechanism scheme design and its inversion mechanism and

orientation analysis[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(1): 129 – 132.

[6] 李立强, 姜辉. 数控回转工作台设计[J]. *制造技术与机床*, 2014(1): 99 – 102.
Li Liqiang, Jiang Hui. Design of CNC turning table[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2014(1): 99 – 102.

[7] 李素萍, 刘冰, 马永, 等. 机器人焊接系统中三轴变位机的标准化设计[J]. *电焊机*, 2022, 52(9): 86 – 89.
Li Suping, Liu Bing, Ma Yong, et al. Standardized design of three-axis positioner for robot welding system[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(9): 86 – 89.

第一作者: 樊启永, 硕士, 副教授; 主要从事焊接装备的研究; 116919897@qq.com。
通信作者: 廖小吉, 硕士, 副教授; 主要从事装备设计与制造领域的研究; 77607473@qq.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

樊启永, 廖小吉, 冯利佳, 等. L型单持双轴焊接变位机设计计算及结构研究[J]. *焊接*, 2024(10): 61 – 66.
Fan Qiyong, Liao Xiaoj, Feng Lijia, et al. Design calculation and structural research of L-type welding positioner with single holding and double axis[J]. *Welding & Joining*, 2024(10): 61 – 66.

(上接第54页)

[21] 张宇清, 杨文佳, 葛广林, 等. 窄间隙自动埋弧焊在火电厂管道预制中的应用[J]. *电力勘测设计*, 2022(12): 51 – 55.
Zhang Yuqing, Yang Wenjia, Ge Guanglin, et al. Application of narrow gap submerged arc welding in pipeline prefabrication in thermal power plant[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2022(12): 51 – 55.

[22] LaVan D A, Sharpe Jr W N. Tensile testing of microsamples[J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39(3): 210 – 216.

[23] Zhou Chao, Liang Jun, Wang Bin. Study on high tem-

perature creep test of P92 material based on the minimally invasive technique[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 734: 159 – 167.

第一作者: 刘冀邱, 硕士, 高级工程师; 主要从事电力工程建设管理的研究; jiqu-luu@sgcc.com.cn。
通信作者: 彭杏娜, 博士, 高级工程师; 主要从事电站金属材料焊接技术的研究; pengxingna2325@163.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

刘冀邱, 彭杏娜, 乔亚霞, 等. 超超临界机组耐热钢焊接技术进展[J]. *焊接*, 2024(10): 48 – 54, 66.
Liu Jiqu, Peng Xingna, Qiao Yaxia, et al. Progress in welding technology of heat-resistant steel for ultra-supercritical units[J]. *Welding & Joining*, 2024(10): 48 – 54, 66.