

关于推进核电焊接领域国产化、智能化的探索

李想[✉], 刘焕

(上海市核电办公室, 上海 200032)

摘要: [目的] 焊接技术是重要的工业基础能力之一, 核电焊接关系着核电设备的安全稳定运行。针对核电焊接领域出现的技术研发水平欠缺, 生产检测手段落后的现状, 解决核电关键焊材、焊接设备、检测装置依赖于进口, 核电建设进度及发展受制于人的“卡脖子”问题。[方法] 上海市核电办公室走访调研了大量生产制造企业、高校及科研院所、工程建设单位, 了解核电焊接产业的发展现状, 对比分析现有技术和国际先进水平的差距。[结果] 结合市场需求, 指出核电焊接产业链上下游的共生促进关系, 并找到技术难点以及攻关方向。基于上海地区的核电产业基础, 响应国家和地方的引导政策。[结论] 提出了核电领域高效可靠焊接技术、焊材、工艺、检测、应用“一条龙”的整体提升方案, 探索了产业链上下游互融共生、分工合作的新模式, 提出了推进核电焊接领域的国产化、智能化发展的攻关路径。

关键词: 核电; 焊接; 国产化; 智能化; 攻关路径

中图分类号: TL4; TG47

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0093-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Exploration on Promoting the Localization and Intelligent Development of Welding in Nuclear Industry

LI Xiang[✉], LIU Huan

(Shanghai Municipal Nuclear Power Office, Shanghai 200032, China)

Abstract: [Introduction] Welding is one of the important basic industrial technologies, which is related to the safe and stable operation of nuclear power equipment. Considering that the R&D technologies are not sufficient, the production and testing methods are not advanced, and the key welding materials, welding equipment and testing devices are imported, the nuclear power plant construction progress and development meet a large number of “bottleneck” issues. [Method] To learn the current development of nuclear power welding industry and difference between the current technologies and the international advanced technologies, Shanghai Municipal Nuclear Power Office visited and investigated a large number of manufacturing enterprises, universities, research institutes and construction enterprises. [Result] Based on the market demands, it demonstrated that the enterprises in the nuclear industry relied on and supported each other, and the technical difficulties and research direction were found. Based on the nuclear industry base and responding to the state and local industry policies, it gives the scheme on application of efficient and reliable welding technology, welding materials, welding processes and testing. [Conclusion] It explores a new mode of mutual symbiosis and cooperation between the upstream and downstream enterprises of the nuclear industrial chain, and puts forward the path of promoting welding localization and intelligentize development in nuclear industry.

Key words: nuclear power; welding; localization; intelligentize; development path

焊接作为一种通过热加工实现材料连接的手段, 广泛应用于我国工业的各个领域, 是装备制造业不可或缺的技术手段, 其发展水平从一个侧面展

现了我国工业的基础能力。核电作为最复杂的工业系统之一, 是典型的技术密集型产业, 是我国先进制造业和先进服务业的用武之地^[1]。焊接在核电领域的应用具有重要的意义, 它既是主设备如压力容器、稳压器、控制棒驱动机构的制造工序之一, 也是工程设备安装过程中的重要工艺之一, 焊接质量

收稿日期: 2020-06-16 修回日期: 2020-08-04

基金项目: 上海市工业强基专项“核电领域高效可靠焊接技术、焊材、工艺、检测、应用一条龙”(GYQJ-2018-2-03, 沪经信技[2018]491号)

直接关系到核电的安全稳定运行。

然而,在核电工程建设中,大型设备的国产化工作受到了更多的重视,而焊接领域的研发水平和制造技术与国外还存在较大差距,部分核电建造关键的焊接设备、焊材、检测装备仍依赖于国外进口,导致了核电建设进度及发展受制于人的“卡脖子”问题。因此,寻找一揽子的解决方案,推进核电焊接领域的国产化、智能化发展具有重要的意义。

1 核电焊接领域发展的现状和不足

国外核电焊接领域发展较早,重视程度高,已经形成了完整的产业链,工程建设中参考标准体系完备。我国核电从秦山起步,经过二代加核电的批量建设、运行,三代核电消化引进吸收,焊接水平取得了长足的进步,常规焊材、焊机等产品实现了国内生产,一批可靠的供应商逐步发展壮大。为了适应核电焊接环境苛刻,可靠性要求高的特点,核电主设备智能焊接装置、焊接成果自动诊断等需求日益增多,整个行业向着智能化的方向快速发展。然而从整体来看,产业发展与国外相比仍存在着大而不强的问题,焊材、焊接设备、检测手段三个细分领域中高技术附加值产品和服务被国外垄断。

1.1 焊材

受制于基础材料研发欠缺,同时产品开发大都基于订单,基础数据积累不连续,导致产品稳定性不足。目前国内焊材厂家仅在常规岛及BOP系统中参与供货,大量焊材仍然依赖于进口,尤其是用于核安全设备的核级焊材,被国际寡头垄断,价格是国内常规焊材的数倍,同时供货、服务周期无法保障。我国各堆型核电站采用进口焊材情况见表1。

1.2 焊接装备

核电站设备制造和建设安装中常用的焊接方法是非熔化极惰性气体保护焊和焊条电弧焊,通常情况焊接的工作条件十分苛刻,对质量和进度要求较高,而目前国内仍采用手工焊为主的施工方式,对技术人员的水平依赖性高,效率低下,目前仅在关键部件的焊接上采用自动化焊接,比例不足1%,自动焊接机器人装备大多来自于进口,主要有美国WELD LAGIC,德国ORBIMATIC,日本ANCHI等品牌。目前,焊接机器人因其高效、持续性好等

表1 国内各堆型进口应用焊材主要情况

Tab. 1 Table of imported welding materials used in China nuclear power station

机组	堆型	主要进口焊材
大亚湾核电、岭澳一期核电	法国M310	瑞士欧瑞康 法国莎福
田湾核电	俄罗斯AES-91	俄罗斯УОНИИ
秦山二期、岭澳二期、宁德核电等	二代加改进型	瑞典伊萨 英国曼彻特 法国莎福
石岛湾核电	高温气冷堆	英国曼彻特 美国SMC
—	钍基熔盐堆	美国HAYNES

明显优势,使得焊接自动化、智能化已经成为行业发展的必然趋势,但是由于受制于缺少核心部件制造技术和控制系统的核心技术,我国焊接机器人尚处于起步阶段,与国际市场成熟产品仍有较大差距。

1.3 检测装置

核电站因为自身属性特点,使得核电设备长期处于高温、高压、中子辐射状态下运转,容易导致设备疲劳、脆化、裂缝等缺陷,对于核电焊缝的检测和评估,就成一项重要的工作。为了减少人员的受辐射时间,解决现场空间狭小问题,自动化、远程化焊缝检测装置应运而生,同时通过视觉采集技术实现焊接图像的可视化、可追溯化,智能分析焊接参数和效果。在此领域国外发展较早,日本奥林巴斯公司研发的PipeWizard爬行器、丹麦FORCE公司研制的AGS爬行器、美国Worthington Industries公司研发的焊缝跟踪设备都在核电厂取得了良好的应用。国内得益于人工智能技术的发展,产品研发生产也取得了长足的进步。

2 焊接国产化、智能化的必要性和基础

2.1 市场空间广阔

当前,我国已经进入三代核电全面建设,四代先进核电堆型加速研发的阶段。国家能源局在针对我国自主研发核电“华龙一号”的批复中要求,充分利用我国目前的核电装备制造体系,支持关键设备、零部件和材料的国产化工作^[2],690U形管、核级电缆、焊材等关键材料的国产化比例不能低于85%^[3],这为焊接工作国产化提供了广阔的应用场

景和市场空间。以焊材为例,一台百万千万级机组,主设备制造和安装需要核级焊材约500 t,其中高端镍基合金、不锈钢、低合金钢焊材占70%,单台机组核级焊材成本约3 000万元,另外用于海水循环系统的奥氏体不锈钢焊材每台机组也能创造近千万的经济效益,而焊接机器人及自动化检测装备,已有的应用场景每台设备进口价格都在数百万量级,随着人工成本的提高以及质量稳定性的要求,智能化应用场景会越来越多,因此焊接领域国产化、智能化工作具有广阔的市场空间和社会效益。

2.2 政策引导支持

推进核电焊接国产化、智能化的工作符合国家推进“工业制造2025 造接工业强基工程”的导向,焊材是典型的关键基础材料,自动焊接装置及智能化检测装置也是典型的产业技术基础,工信部在《关于加快推进工业强基的指导意见》中指出,提高国防军工、新能源、重大装备、电子等领域专用材料自给保障能力,提升制备技术水平^[4]。在《上海市工业强基工程实施方案(2017—2020)》中提出了“重点领域补短板”“强链补链一条龙行动”以及“产业技术基础立柱架梁行动”,并在2018年将核电焊接列为上海市工业强基专项重点方向。政府的政策引导支持为核电焊接领域国产化、智能化的发展提供了良好的支撑。

2.3 产业基础

随着我国工业水平的发展,国内已经培育出了一批在焊接领域有所建树的高校、科研院所和生产企业,上海交通大学、哈尔滨工业大学、江苏科技大学、上海工程技术大学等都长期参与焊接技术的研究,大西洋焊材、天津金桥、天津大桥等企业是国内著名的焊材生产商,上海沪工、成都焊研威达等公司致力于开发特种自动焊接装置,哈尔滨焊接研究院在镍基合金和专用焊机领域均有较好的业绩。核电焊接领域国产化的系统性研究起源于AP1000技术的消化引进吸收,以及国家重大专项CAP1400的设计和建设,大西洋焊材针对AP1000钢制安全壳的焊材通过了ASME审查并实现供货,上海电力修造厂有限公司的“核级镍基焊接材料国产化研发及实验平台”通过了验收^[5],国核运行公司完成了“核岛关键部件自动检测维修设备和技术研发平台”建设。这些成果都为进一步发展积累了

宝贵的经验。

3 核电焊接国产化、智能化的途径

3.1 焊接补链“一条龙”整体方案

上海核电产业基础良好,产业链完备,科研机构、装备制造企业林立,多次承担国家级攻关任务,在核电焊接领域,具有多家技术积累丰富,具备攻关能力的单位^[6],见表2,因此采用技术与产业协调、成果和应用互动、信息与技术有效融合的核电焊接“一条龙”模式,最大限度发挥优势,具有重要的意义。

表2 上海地区核电焊接领域主要单位列表

Tab. 2 Table of main units engaged in welding in Shanghai area

企业名称	主要业务
中国核工业第五建设有限公司	核电施工单位,核电安装过程焊材、焊接装备使用单位
上海电气核电设备有限公司	主设备生产企业,制造过程焊材、焊接装备使用单位
上海大西洋焊接材料有限责任公司	焊接材料生产龙头企业
宝钢特钢有限公司	宝武集团全资子公司,特种材料产业化基地
中国电建集团上海能源装备有限公司	原“上海电力修造厂”,我国第一批焊材生产厂,中电建集团骨干企业
国核电站运行服务技术有限公司	核电在役检测服务单位,检测装备使用单位及研发平台

同时,以上企业在核电焊接领域中,是一种研发、生产、应用、验证产业链上下游共生关系,因此结合各自的业务特点和优势,提出了核电领域高效可靠焊接技术、焊材、工艺、检测、应用“一条龙”的整体提升方案,针对行业发展过程中难点并加以聚焦,重点攻关以下几个方面:

1) 焊材:奥氏体不锈钢、镍基合金焊、高强度安全壳配套焊丝。

2) 焊接装备:核电管道TIG焊接机器人、耐蚀层机器人高效气保焊焊接、电构件双丝MIG^[7]。

3) 检测装置:管道环焊缝超声自动检测机器人及系统,实现焊缝质量远程自动检测,实现应力检测与模拟计算一体化。

3.2 焊接补链“一条龙”方案的组织推进

推进过程由行业主管部门协调,牵头单位总负

责,整合资源,形成合力。

1) 建立上下游紧密合作、分工明确、利益共享的产业组织新模式,形成有效协调的产业链^[8],依托产业联盟、项目共同体的机制保障,实现人才、信息、技术的共享,产品开发全过程对接,全流程参与,以问题为导向,以最终客户需求为研发目标,使得基础研究与最终应用紧密结合,实现应用带动研发,研发优化应用的良性循环,保障科研成果的有效转化。

2) 鼓励基础研究,搭建验证平台。通过与上海交通大学、上海应用物理研究所、上海核工程研究设计院等科研院所的合作,从机理研究出发,做到完全自主可控,掌握自主知识产权。同时搭建验证平台,依托第三方服务机构,对科研成果进行验证,形成从原理到产品再到认证的闭环,为用户的国产化替代工作提供强有力的保障。

3) 发挥产业链协同的优势,提高系统集成能力。通过先进的焊接装置,实现先进焊接技术的应用,还能够提供可视化的验证结果并进行分析,为用户提供一站式的解决方案,使得核电焊接领域进一步代表“上海制造”、“上海服务”,成为“上海核电”品牌效应的有力支撑,同时利用“一条龙”产业链的作用,带动一批相关产业的发展,还可以推动核电技术成果向非核市场的转化应用,填补相关空白。

4) 借力产业政策扶持。目前为了解决核电领域的“卡脖子”技术,各大业主集团纷纷梳理问题清单,谋划替代方案和支持政策。在上海市层面,积极寻求产业政策支持,既解决核电业主的工作困扰,也通过补足核电基础能力,进一步做强上海核电产业^[9]。

4 结论

我国核电发展面临难得的历史机遇,推进核电安全稳步的发展,最终实现走出去的目标,离不开自主创新能力的提升及瓶颈问题的突破。由此,在核电焊接领域创新性的提出产业链上下游补链“一条龙”的模式,由中核五公司牵头,联合上海电气核电设备有限公司、上海大西洋焊接材料有限责任公司、宝钢特钢有限公司、中国电建集团上海能源装备有限公司等优势单位,依托上海应用物理研究

所、上海交通大学、上海电机学院、上海工程技术大学、江苏科技大学、西华大学等单位的科研能力,从8个方向对核电焊接领域的卡脖子问题进行为期两年的全方位的攻关。补链“一条龙”联合攻关行动是政、产、学、研、用五位一体推进产业发展模式的具体实践,为提高核电领域工业基础能力,促进核电自主创新发展做出了探索,贡献了力量^[10]。

参考文献:

- [1] 叶奇蓁. 我国核电及核能产业发展前景 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 18-21.
YE Q Z. Development and prospect of nuclear power and nuclear energy industry in China [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 18-21.
- [2] 中核网. 国家能源局给予批复:“华龙一号”将落地福清5、6号 [J]. 中国核工业, 2014(11): 6.
China National Nuclear Network. Reply of national energy administration on "Hualong No. 1" landing on Fuqing No. 5 and No. 6 [J]. China Nuclear Industry, 2014(11): 6.
- [3] 张宏韬, 李想, 郭爱华. 关于推进第三代核电关键仪控系统国产化的探索 [J]. 自动化仪表, 2016, 37(11): 48-51.
ZHANG H T, LI X, GUO A H. Exploration on promoting the localization of the critical instrumentation and control system for the third generation nuclear power [J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(11): 48-51.
- [4] 朱明皓, 孙虎, 邵立国. 工业基础能力托起中国制造 2025 [J]. 装备制造, 2014(8): 46-49.
ZHU M H, SUN H, SHAO L Q. Industrial basic capacity supporting made in China 2025 [J]. China Equipment, 2014(8): 46-49.
- [5] 王淦刚, 赵建仓, 朱平, 等. 核电用焊材国产化研究现状与应用发展趋势 [J]. 金属加工(热加工), 2015(8): 15-16.
WANG G G, ZHAO J C, ZHU P, et al. Research status and application development trend of domestic welding materials for nuclear power [J]. Metal Forming, 2015(8): 15-16.
- [6] 顾银祥, 李想. 上海核电运行服务体系建设研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 170-175+46.
GU Y X, LI X. Strategic thinking of "going out" strategy for Shanghai nuclear power industry [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 170-175+46.
- [7] 张茂龙. 第三代核电核岛主设备关键制造技术及发展 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 16-17.
ZHANG M L. Key manufacturing technology and development of the third-generation NPP nuclear island major components [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 16-17.
- [8] 佚名. 工业和信息化部关于加快推进工业强基的指导意见

[N]. 中国电子报,2014-02-28(003).

佚名. Guiding opinions of the ministry of industry and information technology on accelerating the development basic industry capacity [N]. China Electronic News. 2014-02-28(003).

- [9] 张宏韬,刘伟瑞. 关于推进上海核电技术装备自主化的探索与思考 [J]. 南方能源建设,2018,5(1):22-28.

ZHANG H T, LIU W R. Exploration and speculation of promoting Autonomation of nuclear technical equipment in Shanghai [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(1):22-28.

- [10] 徐玉明. 中国核电发展的进展与战略 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4):1-2.

XU Y M. Progress and strategy of PWR nuclear power development in China [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4):1-2.

作者简介:



李想

李想 (通信作者)

1985-, 男, 河南洛阳人, 上海市核电办公室核电产业处主管, 高级工程师, 华中科技大学自动化学院硕士, 主要从事核电产业推进, 核电装备国产化的研究工作 (e-mail) lixiang0831@163.com.

刘焕

1987-, 女, 辽宁沈阳人, 上海市核电办公室核电产业处, 上海交通大学工程硕士, 主要负责核电质量管理和培训 (e-mail) liuhuan0417@sina.com.

项目简介:

项目名称 核电领域高效可靠焊接技术、焊材、工艺、检测、应用“一条龙”

承担单位 中国核工业第五建设有限公司, 联合单位共五家, 协作单位共七家

项目概述 项目主要对核电焊接领域上下游的薄弱环节进行技术攻关。通过开展核电领域高效可靠焊接技术、焊材、工艺、检测、应用“一条龙”项目研究, 自主开发核电焊接高效可靠焊接技术, 突破核电专用焊接设备、关键焊接技术与焊材研发、自动检测等技术瓶颈, 强化上海核电焊接工业基础能力, 形成具有自主知识产权的核电建造焊接装备、焊接材料、检测技术, 进一步提升我国核电建造水平。

主要创新点 (1) 研制核电管道自动焊接机器人, 实现核电管道关键焊接设备的国产化; 提升核电构件自动化焊接技术; (2) 新型钢安全壳高强度钢板配套焊丝为国际首创, 核电超级奥氏体不锈钢配套焊接材料国内领先; 优化焊材成分体系, 形成全流程自主制造工艺, 解决异种合金焊接技术难题, 实现核级焊材国产化自主制造, 填补国内空白; (3) 实现远程控制及焊缝中心自动识别、跟踪检测, 保证人员辐射安全及焊缝检测数据质量。

(责任编辑 李辉)

