

核电设备制造用关键原材料国产化进展

司巧玲, 廖 豪, 徐 骁

武汉市硚口区生态环境事务服务站, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年9月6日; 录用日期: 2022年10月4日; 发布日期: 2022年10月11日

摘 要

近年来,我国核电关键设备和材料的自主化、国产化取得了重大突破,核电厂关键九大主设备基本实现国产化,尚未完全实现国产化的设备包括核燃料、主泵电机、稳压器安全阀等,受国内技术研发和制造水平所限,部分关键材料仍采用国外进口材料,主要涵盖核燃料、高温金属、石墨等。本文从核燃料元件结构材料、蒸汽发生器用镍基合金U形传热管材料、主泵电机关键部件金属材料、核岛防火密封材料、核级焊接材料几个方面进行了调研,论述了核电设备制造用关键原材料国产化进展情况。

关键词

核电, 材料, 国产化

Progress in Localization of Key Raw Materials for Nuclear Power Equipment Manufacturing

Qiaoling Si, Hao Liao, Xiao Xu

Wuhan Qiaokou District Ecological Environment Service Station, Wuhan Hubei

Received: Sep. 6th, 2022; accepted: Oct. 4th, 2022; published: Oct. 11th, 2022

Abstract

In recent years, major breakthroughs have been made in the autonomy and localization of key equipment and materials in China's nuclear power plants. The nine key main equipments in nuclear power plants have basically been localized, and the equipment that has not yet been fully localized includes nuclear fuel, major pump motor, regulator safety valve and so on. Limited by the level of domestic technology research and manufacturing level, some key materials still use foreign imported materials, mainly including nuclear fuel, high temperature metal, graphite and so

on. In this paper, the structural materials of nuclear fuel components, nickel-based alloy U-shaped heat transfer tube materials for steam generators, metal materials of key components of major pump motors, nuclear island fire protection and sealing materials, and nuclear welding materials are investigated. The progress of localization of key raw materials for nuclear power equipment manufacturing is discussed.

Keywords

Nuclear Power, Material, Localization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

一座典型的核电厂有几千种设备, 类型包括机械设备、电气设备、仪器仪表等; 按照设备所在部位及功能, 核电厂设备通常分为核岛设备、常规岛设备、电站辅助系统设备三大类。核岛主设备制造方面, 反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器、控制棒驱动机构、堆内构件、主管道等完全实现国产化; 常规岛设备包括汽轮发电机组及辅助设备, 完全实现国产化供货能力, 技术水平达到国际先进。整体来看, 核电厂关键九大主设备基本实现国产化, 包括压力容器、蒸汽发生器、主泵、数字化仪控系统(DCS)、堆内构件、控制棒驱动机构、汽轮发电机组、主管道、应急柴油发电机; 尚未完全实现国产化的设备包括核燃料、主泵电机等。在我国核电技术自主化发展过程中, 主要设备的关键材料自主化是一个重要的基础问题。

2. 核电设备制造用关键原材料国产化现状

2.1. 核燃料相关材料

长期以来, 我国核级锆材全部依赖进口。核级锆材作为反应堆核燃料元件的结构材料, 是核电厂不可或缺的关键材料。核级锆材需经过高纯海绵锆分离、合金熔炼、高温锻造、精密冷轧等一些列工艺技术, 高质量、高标准完成包壳管、导向管、端塞棒、格架带材等多种规格、不同关键产品的制造生产。

2015年1月, 国核锆业完成核级锆材技转项目的全部工作, 并获得美国西屋公司发放的技术转让证书, 随后制订了三条路线予以推进, 逐步实现了“从进口管坯、进口原料到实现国产原料”的合格性鉴定[1]。2016年2月, 国核锆业组织电厂、设计院、元件厂制定了国产 ZIRLO 合金包壳管制造技术方案; 2017年4月, 国核锆业完成海阳核电厂首炉换料用 AP1000 核级锆合金管棒材生产、检验工作。2018年1月, 国核锆业完成了海阳核电项目首炉换料的产品验收与交付。2022年3月, 海阳核电1号机组首次大修结束, 由国核宝钛锆业股份公司(简称国核锆业)生产的三代核电核级锆材正式入堆服役。我国核级锆材国产化目标成功实现。

2010年, 中核集团启动重点科技专项“压水堆元件设计技术”研究, 明确 CF3 以新型包壳材料 N36 锆合金为突破口, 经过多批次特征化组件、先导组件的随堆运行考验和池边检查, 证明材料性能优异。2017年10月, 西部新锆核材料科技有限公司与核动力院签订《N36 锆合金管棒材制造技术转让合同》, 标志着我国掌握了完全自主知识产权的高性能锆合金包壳材料研制技术。2018年11月, 自主研发的满

足三代核电要求的锆合金材料——CF3 核燃料组件 N36 锆合金材料批量化首批产品成功下线通过验收,启运发货用于 CF3 核燃料元件制造,标志着我国自主研发的锆合金材料实现产业化[2]。

核燃料包壳是核燃料的密封外壳,其作用是防止裂变产物逸散和避免燃料受冷却剂腐蚀以及有效地导出热能。北京市科学技术研究院辐射技术研究所的陈琳研究团队依托财政资金改革与发展专项课题,自主研发制备了一种具有抗辐照、耐高温蒸汽氧化性能的核燃料包壳涂层材料。通过对电压、电流、频率等电参数及气流量等参量的不断调试,实现了晶态结构、材料组分、界面状态的可控调节,该成果已获得发明专利。下一阶段,研发团队将继续深入研究耐事故燃料包壳涂层,进一步优化工艺参数,通过模拟核燃料包壳材料工作环境,评估其稳定性、可靠性,为耐事故燃料包壳的应用提供新的技术方案。

2.2. 蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管材料

蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管国内制造厂家包括:宝银特种钢管有限公司和浙江久立特材科技股份有限公司。通过三代核电管材的研发和试制,它们突破了三代镍基管材的关键技术难点,全面掌握了三代核电(如华龙一号和 CAP 系列)蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管的关键制造技术,并建立了有效的过程质量控制措施,形成了年产 1000 吨的三代核电蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管的制造能力。通过与国外同类产品应用性能对比试验,国产蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管材各项性能均达到或超过国外同类产品水平。

CAP 系列蒸汽发生器用 690 镍基合金 U 形传热管攻克的关键技术包括:高纯净冶炼技术,提高了管坯材质的纯净度和均匀性;自主集成高精度冷轧控制技术,有效控制了管材的尺寸精度、表面质量,获取了较高的基础信噪比;高效脱脂技术,解决了细、长、小口径管脱脂难题,确保了管材具备良好的耐腐蚀性能;微压力低冷变形硬化矫直技术的突破,实现了对尺寸精度、屈服强度增加值、信噪比等指标的全面控制;高精度反变形弯管技术的突破,实现了对弯曲半径 R、弯头椭圆度和壁厚减薄量的有效控制。

华龙一号蒸汽发生器用 690 镍基合金 U 形传热管攻克的关键技术主要体现在,针对华龙一号 U 形管材在管材组织、性能均匀性、无损探伤和尺寸公差控制方面的特殊要求,企业对蒸汽发生器用 690 镍基合金 U 形传热管进行研究并取得了成果,包括:冶炼控制、每一冷轧变形道次变形量的控制、热处理工艺技术;管材表面质量及微小缺陷的控制技术(冷轧过程中的清洁控制,修磨、抛光工序中的介质控制,热处理过程中的防擦伤控制等);冷轧、矫直及弯管工模具的优化设计及控制技术。

2.3. 主泵电机关键部件金属材料

我国在运核电厂共有 6 种厂家型号的主泵,分别为:俄罗斯圣彼得堡机器制造中央设计局 1391 型主泵、德国 KSB 主泵、奥地利 ANDRITZ 主泵、日本三菱 MHI 100D 主泵、法国法马通 AREVA 热蒙主泵、美国西屋 EMD 屏蔽主泵。

主泵的国产化分别由几大动力集团负责引进消化吸收,其中上海电气(SEC-KSB)引进德国 KSB 系列轴封主泵、湿绕组主泵,东方电气(AREVA)引进法国法马通热蒙主泵,哈尔滨电气集团有限公司(简称哈电集团)引进奥地利 ANDRITZ 主泵、EMD 屏蔽主泵电机部分,沈阳鼓风机集团股份有限公司(简称沈鼓集团)负责屏蔽主泵水力部分。哈电集团和沈鼓集团主要承担 AP1000 主泵的国产化任务。目前,哈电动力装备公司和东方电气阿海珐公司已经可以自主供应二代加机组及华龙一号的主泵,AP1000/CAP1400 的屏蔽式主泵正由哈电动力装备公司和沈鼓集团联合攻关[3]。

哈电动力装备公司(简称哈电动装)联合相关单位进行了材料试制及试验研究,实现了屏蔽套、电机轴、飞轮护环、高强度支撑筒及推力盘等关键部件材料的国产化制造。

1) 哈电动装联合宝山钢铁股份有限公司针对主泵屏蔽电机屏蔽套薄板立项进行了国产化开发研究,通过炉卷热轧技术完成定、转子屏蔽套薄板整套制造工艺国产化,研究成果已用于主泵屏蔽电机中。哈电动装联合沈阳科金新材料有限公司进行国产化研制,通过开发支撑筒锻件成型工艺及热处理工艺等成套制造技术,于2013年实现高强度支撑环材料国产化和转子轴锻件的国产化试制,已成功应用于屏蔽主泵电机样机产品上。

2) 主泵电机轴承推力盘的热等静压工艺研究在国内属首次,包套设计和制造、热等静压温度压力参数摸索、粉末冶金界面扩散状况及组织状态应力开裂,均是国产化制造的难点。哈电动装联合北京安泰科技股份有限公司开展了推力盘材料及热等静压工艺的相关研究,国产化设计了两种结构,相关研究仍在进行。

3) 电机壳体锻件由主法兰、机壳和下法兰3个部件组焊而成,哈电动装先后联合二重、沈阳科金、一重进行电机壳体锻件的国产化研制,实现了下法兰锻件的国产化,但主法兰锻件和机壳锻件材料国产化存在极大的难度,尚未完全实现国产化。

主泵泵壳为一回路压力边界,API1000主泵泵壳内壁堆焊使用SANDVIK或BOHLER制造不锈钢焊材,镍基堆焊及安全端组焊使用SPECIAL METALS制造镍基焊丝,所用焊材在核电领域应用成熟,质量高且稳定,焊接质量好;国内生产焊材尚无主泵泵壳焊接实际应用业绩。制造厂采用哈尔滨焊接研究所生产的相应焊材开展了焊接工艺评定,但焊接质量不稳定,暂无法大批量进行实际生产[4]。

主泵轴承石墨环材料尚为进口,正在研发。水润滑轴承直接接触一回路介质,为避免污染介质,需采用纯度高、自光滑性能强、稳定、寿命长的石墨材料,目前国内供应商尚不具备相应供货能力。哈尔滨电碳厂具备小块高纯石墨生产能力,制造厂曾成功开展了石墨环的压制试验,但暂无批量化制造能力,也无主泵应用业绩。此外,田湾核电厂也正在进行俄罗斯主泵水润滑轴承材料的国产化科研工作。

2.4. 核岛防火密封材料

防火密封材料是用于密封或填塞各种贯穿物(如电缆、工艺管道、风管等)穿过墙壁、楼板时形成的开孔,应具有阻火、隔热功能;核电厂特殊使用环境又要求其具有耐辐照、抗一回路失水事故、生物屏蔽、可去除放射性核素沾污以及气密、水密等其它功能。核岛建筑防火密封材料的选择主要包括:硅酮橡胶、硅酮密封胶、硅布等。目前硅酮类防火密封材料越来越多地应用于国内的核电建设中,API1000的防火密封材料设计选择的为PCI-Promatec公司的硅酮类防火密封材料。

核岛防火密封材料供应曾长期被外资如德国喜利得、美国3M和法国mectiss等行业巨头垄断。江苏海龙核科技股份有限公司(简称海龙核科)在国内率先实现了核岛防火密封材料和乏燃料中子板业务的国产化。2006年,海龙核科通过与核动力院战略合作,获得了核心材料硅酮橡胶及其制备方法,并将其产业化,实现进口替代,应用于国内核电机组核岛防火封堵工程,包括方家山核电、福清核电、昌江核电、三门核电、秦山核电等,各项技术指标满足中国、美国、俄罗斯和法国核电机组堆形[5]。2015年,海龙核科突破了乏燃料中子吸收板的国产化,成为国内首家通过乏燃料中子板产业化鉴定的单位。

2.5. 核级焊接材料

通过核电重大专项的支持和实施,我国在四川大西洋焊材公司、哈尔滨焊接研究所、中国一重等单位建成了核电用低合金钢、不锈钢和镍基合金焊接材料的生产示范基地,具备了核电焊接材料成套批量供货的能力。实现了三代核电主设备用焊接材料的国产化,掌握了核级焊接材料的关键制备技术,建立了焊接材料质量保证体系,实现了国产核级焊材在核岛重要部件制造和安装中的配套应用,范围涵盖核电厂设备制造、现场安装用低合金钢、不锈钢以及镍基合金焊接材料产品等。

哈尔滨焊接研究所和四川大西洋焊材公司研制的 26 个品牌的核级焊接材料等, 不仅实现了国产化生产, 而且已经用于核电工程。但驱动机构勾爪组件堆焊用钴基合金焊材等目前主要被国外几家公司所垄断[6]。目前, 已有超过 600 吨焊材产品在三代核电项目工程中得到应用, 有力支持了三代核电重大工程的顺利实施, 包括: SA-508 Gr.3 Cl.1 钢用焊接材料; SA-508 Gr.3 Cl.2 钢用焊接材料; 钢安全壳用焊接材料; 不锈钢堆焊 309L+308L 焊接材料; 堆内构件吊篮筒体用奥氏体不锈钢焊接材料; 主管道 316L 型焊接材料; 双相不锈钢用焊接材料; 690 镍基合金焊接材料等(核级设备制造用关键原材料国产化现状见表 1)。

Table 1. Domestic status of key raw materials for nuclear power equipment manufacturing

表 1. 核电设备制造用关键原材料国产化现状

材料类型	国产化现状
核燃料相关材料	核燃料元件结构材料(核级锆材)已实现国产化; 核燃料包壳涂层材料正在研制。
蒸汽发生器用镍基合金 U 形传热管材料	镍基合金 690 已实现国产化。
主泵电机关键部件金属材料	屏蔽套、电机轴、飞轮护环、高强度支撑筒及推力盘关键部件材料已实现国产化; 主泵轴承石墨环材料尚为进口, 正在研发。
核岛防火密封材料	核心材料硅酮橡胶、乏燃料中子吸收板已实现国产化。
核级焊接材料	低合金钢、不锈钢和镍基合金焊接材料已实现国产化; 驱动机构勾爪组件堆焊用钴基合金焊材尚未完全国产化。

3. 总结

我国核电设备设计和制造能力正处于国产化能力培育关键时期, 要加快国产化进程, 尤其重要的是真正掌握关键技术、关键材料, 部分材料由于需要前期科研费用投入和研发难度大、研发周期长、总的需求量小、产品质量稳定性要求极高, 使得产品被推广应用难, 用户接受难度大, 从而造成国产化工作进展缓慢。

国产化工作要以核电项目为依托, 为各个企业间开展更紧密的技术合作提供平台, 通过技术融合、配套研发以及经验反馈体系的建设, 在加快国产化进程的同时, 打造平等、互信、互利、高效的核电设备国产化联合研发团队。在国产化路上要重视经验反馈和核安全文化, 将设备国产化、设备质量、核电安全融为一体。

参考文献

- [1] 魏薇. 核级锆材国产化是如何实现的? [N]. 宝鸡日报, 2020-03-27(004).
- [2] 潘文凯. 我国首次实现自主先进核级锆材规模生产[N]. 科技日报, 2018-11-26(004).
- [3] 李雅范, 李梦启, 秦斌, 等. 第三代核主泵屏蔽电机的关键部件金属材料国产化综述[J]. 大电机技术, 2017(4): 26-30.
- [4] 王峰, 吕明. 出口核电项目核主泵国产化历程回顾和展望[J]. 南方能源建设, 2022(9): 113-119.
- [5] 中国核电关于核电机组自主可控的分析报告[R]. 中国核能电力股份有限公司, 2022.
- [6] 阮晓琴. 核电防火材料国产化先锋海龙核科开拓非核市场蓝海[N]. 上海证券报, 2020-07-03(004).