

百万千瓦级压水堆核电站蒸汽发生器国产化能力分析  
Domestic Design and Manufacture Capability Assessment  
Of 1 000 MW PWR Steam Generator

刘鸿运, 秦加明, 王先元, 程慧平, 吴岗  
(核动力运行研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 蒸汽发生器是压水堆核电站的关键设备。经过数十年的努力, 我国目前已基本掌握百万千瓦级压水堆核电站蒸汽发生器关键设计技术, 具备了设计和制造能力, 可以满足新建核电站蒸汽发生器国产化的要求。本文论述了我国百万千瓦级压水堆核电站蒸汽发生器研发需要掌握的关键技术, 现有的蒸汽发生器自主设计和制造能力, 并对蒸汽发生器国产化比率作出估计。

关键词: 压水堆; 蒸汽发生器; 国产化

Abstract: Steam generator is one of key equipments of PWR. With the research results of several decades, China has acquired the key design techniques and the capability of design and manufacture of

1 000 MW PWR steam generator, which can meet the requirements of localization of steam generator for 1 000 MW PWR. This paper describes the key techniques necessary to the development of 1 000 MW PWR steam generator, sums up the present design and manufacturing capability of steam generator in China, and makes assessment of localization rate of steam generator.

Key words: PWR; Steam generator; Localization

在过去的十几年里, 我国核电已经取得了一定规模的发展, 目前已经运行和在建的有6座核电站共11台机组, 向巴基斯坦出口1台机组。尽管这12台机组中只有2台的蒸汽发生器为国内自主设计, 但在核电蒸汽发生器设计方面我国已积累了相当的经验, 也了解了国外先进的设计技术和设计特点。另外, 秦山一期(国内设计)和大亚湾核电站(国外设计)3台机组已安全可靠地运行了近10年, 积累了一定的蒸汽发生器运行经验。同时, 在核电国产化过程中, 我国的核电设备制造企业已经基本掌握了蒸汽发生器的关键制造技术和工艺, 配备了相应的制造装备, 并建立了与核安全文化相适应的质量保证体系, 逐步积累和形成了蒸汽发生器的制造能力, 基本具备了制造百万千瓦级压水堆核电站蒸汽发生器的技术能力。为了能够更加清晰地认识百万千瓦级压水堆核电站蒸汽发生器的国产化能力, 以下分别从自主设计的关键技术、设计和验证、制造和材料供应3个方面进行深入分析, 并对国产化比率作估计。

### 1 蒸汽发生器自主设计的关键技术

百万千瓦级压水堆核电站主要采用立式倒U形管自然循环蒸汽发生器。几十年来, 自然循环蒸汽发生器虽然一直保持着U形管式的基本结构形式, 但在技术上还是有着很大的变化和进步。例如: 传热管材料从奥氏体不锈钢改为镍基合金因科镍(I-600 MA和I-600 TT), 后进一步改为现在普遍采用的镍基合金I-690TT及铁镍合金因科洛依I-800, 从而极大地改进了传热管的抗腐蚀能力, 提高了蒸汽发生器的可靠性; 给水处理工艺从磷酸盐处理改为联氨或马琳全挥发水处理, 甚至采用更先进的乙醇氨处理; 碳钢钻孔支撑板改为不锈钢梅花孔支撑板, 改进了蒸汽发生器的热工水力特性, 改善了传热管周围的泥渣沉积状况; 增设流量分配挡板及改善排污装置等。

这些特点在我国秦山二期安装的两屋60F改进型和大亚湾/岭澳核电站安装的法马通55/19B型蒸汽发生器上都可以看到, 也已经成为全世界压水堆核电站蒸汽发生器普遍的技术特征。另外, 经过几十年的发展, 最初作为蒸汽发生器设计技术研究重点的热工水力性能分析和承压部件设计分析已经基本解决。设计人员可以使用成熟的分析软件和分析方法对蒸汽发生器二次侧的热工水力和复杂的承压部件的应力状况进行分析和评定。因此, 业主和蒸汽发生器研究人员的目光转向了如何更好地提高蒸汽发生器的性能和可靠性上。尤其是近10年来, 随着电力市场对核电站经济性能要求的日渐提高, 业主对于核电站的安全可靠性、经济性也提出了更高的要求。如: 美国电力研究院(EPRI)先进轻水反应堆用户要求文件(URD)中要求, 电站设计寿命从40年延长到60年, 换料周期也从12个月延长到18个月, 甚至24个月, 等等。这些要求都促进了蒸汽发生器设计的进一步改进。从目前核电先进国家蒸汽发生器设计技术的发展趋势来看, 未来蒸汽发生器设计将更加关注以下3个方面。

#### (1) 提高蒸汽发生器出口蒸汽干度

世界上已建成的绝大多数核电站自然循环蒸汽发生器的出口蒸汽干度的设计指标为99.75%。为提高

综 述  
核 电 设 计  
工 程 管 理  
工 程 建 造  
运 行 维 护  
核 安 全  
核 电 前 期  
核 电 论 坛  
核 电 经 济  
核 电 国 产 化  
质 量 保 证  
核 电 信 息

汽轮机的效率和可靠性,近10年来国际上将这一指标提高到99.9%,实现了新的突破。为达到这一新指标,需要对蒸汽发生器的汽水分离装置,尤其是干燥器进行改进,提高分离效率,减小流动阻力。

### (2) 加强对蒸汽发生器二次侧泥渣输送和沉积的管理

二次侧泥渣堆积是引起蒸汽发生器传热管腐蚀破损的最主要原因之一。目前的应对方法主要是改进蒸汽发生器水质控制指标,或改进蒸汽发生器可维修性,加强停堆期间蒸汽发生器二次侧泥渣的冲洗。

西屋公司在 $\Delta 75$ 型和秦山二期60F改进型上所采用的泥渣收集器为蒸汽发生器二次侧的泥渣管理和控制提供了新的选择,其良好的收集性能也已经在电站运行中得到了证实。

### (3) 增大蒸汽发生器二回路水装量

根据美国EPRI的URD要求,当蒸汽发生器丧失主给水后,停堆20 min内应急给水不干预时,蒸汽发生器二回路水装量仍能将反应堆衰变热导出。这意味着在此时间内蒸汽发生器二回路水容积能将热量导出而不会出现烧干锅现象,从而提高了反应堆的安全性。

新的要求对于蒸汽发生器技术的发展和改进也提出了更高的期望。目前正在开发的蒸汽发生器先进技术,汽水分离装置和泥渣收集器2项技术是研究的重点,也是核电先进国家拥有的关于蒸汽发生器的几项专利技术之一。因此,要真正拥有百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器的自主设计能力,形成具有自主知识产权的设计产品,掌握这2项技术就成为必须逾越的鸿沟。蒸汽发生器汽水分离装置(包括汽水分离器和干燥器)和泥渣收集器都涉及到复杂的两相流动过程,目前的计算分析能力还只能作为设计的辅助手段,国内外也都还没有形成成熟的分析软件,试验研究仍然是主要的研究手段。汽水分离装置是保证蒸汽发生器出口蒸汽湿度的关键设备,对于其性能的考核,热态试验考核几乎是唯一的手段。

从国内各核电厂现有状况来看,压水堆核电厂属于热功率1 000 MW级的蒸汽发生器主要为秦山二期的60F改进型和大亚湾/岭澳核电站的55/19B型蒸汽发生器。目前,这2种型号蒸汽发生器的运行状况良好,国内设计院对其也有着较深入的研究和较多的技术积累,制造厂也有着比较丰富的制造经验,制造设备和工艺也比较完备,是我国设计建造百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器的主要参考原型。55/19B型蒸汽发生器是法马通公司20世纪80年代的产品,在蒸汽品质和泥渣控制上有所不足,也未满足URD对水装量的要求。而60F改进型以其较低的出口蒸汽湿度(低于0.1%)和性能良好的泥渣收集器,显示出其更符合未来蒸汽发生器发展的方向,应该成为我国压水堆核电厂蒸汽发生器设计者的主要学习对象。

另外,美国和韩国部分核电厂采用诸如SYS80+类型的更大型蒸汽发生器,设备功率更大,系统环路可以相应减少。但是,这样大型的设备,重量一般超过500 t,最大直径接近6 m,国内企业现有厂房起重装备的起吊能力相比有所不足,而且,锻件尺寸加大,生产制造有困难,蒸汽发生器的运输能力也需要加强。尤其是目前国内尚无此类蒸汽发生器的制造经验,有些制造设备需要添置和改进,相应的技术能力也需要培养和建设,与前述的2种蒸汽发生器相比,制造更大型蒸汽发生器将面临更多的技术困难和挑战,需要通过较长时间的技术攻关和较大的资金投入,才有可能掌握其制造技术。

## 2 设计与验证

自从我国第1台核动力装置蒸汽发生器诞生以来,我国在蒸汽发生器方面已经有了几十年的研究历史,在蒸汽发生器设计、制造和运行方面积累了一定的经验,具备了较强的研发能力。国内自主研发的秦山一期蒸汽发生器虽然在运行初期出现了湿度超标的问题,但经过研究和改进,蒸汽湿度指标达到了设计要求,并在过去的10年里运行情况良好。秦山二期和大亚湾/岭澳核电站的建设,也为国内设计院、所学习先进的设计技术提供了契机。因此,通过认真学习和借鉴核电先进国家蒸汽发生器的设计思想,吸收国内外核电厂蒸汽发生器的运行经验和教训,深入研究和试验验证关键设计技术,我们完全可以设计出满足我国百万千瓦级压水堆核电厂要求的、技术先进的蒸汽发生器。

作为国内主要的核蒸汽发生器研发力量,核动力运行研究所经过近20年的努力,在国家的大力支持和投入下,在武汉建成了一个集设计、研究、试验、技术支持和服务于一体的核蒸汽发生器研发基地,拥有配套的试验设施、先进的测试技术和分析技术手段,并拥有一支专业齐全、研究设计经验丰富的专业队伍,在该领域形成了自己的特色和优势,为我国核电技术的发展做出了重要贡献。主要试验研究设施包括30 MWt的蒸汽发生器综合性能试验台架(包括汽水分离热态考核试验回路),750 kW的热工水力试验台架,蒸汽发生器管板水力试验台架,空气—水汽分离试验台架及泥渣收集器冷态试验台架等。与试验研究设施相配套,还有三维激光测速仪、高温高压两相流光纤测量仪,以及温度和压力(差)传感器,流量、水位等测量仪表和先进的网络型数据采集系统。完善的试验设施为开展蒸汽发生器试验研究和验证提供了良好条件。此外,通过自主研发开发与试验验证以及国外引进,现已形成了配套齐全的蒸汽发生器设计分析计算程序,主要包括一维和三维态蒸汽发生器热工水力设计和分析程序以及流动分析程序CFX、结构分析程序ANSYS、重力分离计算程序、限流器计算程序等。

核动力运行研究所在1999年底至2002年底的3年间,完成了蒸汽发生器汽水分离器和干燥器的冷态选型试验和热态性能考核试验,完成了泥渣收集器试验研究,建立了百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器汽水分离装置和泥渣收集器设计方法。在2002~2003年间,核动力运行研究所借鉴核电先进国家蒸汽发生器设计经验,采用自主研发的汽水分离装置和泥渣收集器技术,吸收国内外核电厂的运行经验,尤其是自身在多年从事蒸汽发生器检查和维修服务中获得的经验,完成了国产化百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器标准型——RINSG-1000型蒸汽发生器设计。其中RIN为核动力运行研究所名称的缩写,SG为Steam Generator的缩写,1000代表其热功率为1 000 MW级。目前已经绘制完成了蒸汽发生器的全部图纸,编写了有关蒸汽发生器材料、制造与验收、使用与维护等多项技术条件,完成了蒸汽发生器的稳态和瞬态热工水力分析、承压部件的强度分析和疲劳强度评定,为新建核电厂蒸汽发生器的国产化做好了技术准备。

## 3 制造与材料

以上海锅炉厂、东方锅炉厂和第一重型机械集团为代表的我国制造企业，通过为秦山一期、恰希玛核电站、秦山二期和岭澳核电站制造蒸汽发生器，已经积累了相当的技术能力和制造经验，其制造能力、制造技术和设备装备有了较大的发展，已初步掌握了制造压水堆核电厂蒸汽发生器的关键技术，并建立了相应的质量保证体系，基本具备了制造大型蒸汽发生器的能力。尤其是近2年，主要的核电设备制造厂均在沿海建立了新的制造基地，改善了生产设施，提高了制造能力，方便了设备的运输。

百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器制造过程中关键的工艺环节有6项，分别是：锻件材料供应，部件组装，传热管材料供应，焊接和热处理，大型零部件机械加工，检查检验。

目前，国内制造企业能够完成全部大型蒸汽发生器零件（如管板和筒体）的机械加工、蒸汽发生器各部件组装和总装配、焊接和热处理以及相应的检查检验。管板钻孔、传热管与管板间液压胀管连接、支撑板加工和筒体焊接等关键工艺较为成熟。对于蒸汽发生器筒体和管板的大型SA-508Cl 3a钢锻件，国内具备一定生产能力，但在大批订货时，受供货进度影响，可能需部分国外采购。而对于需要和接管整体锻造的上封头和水室封头，目前国内制造尚有一些困难。尤其是蒸汽发生器中关键的Inconel 690TT传热管则完全依赖进口。表1总结了蒸汽发生器关键工艺环节的国产化状况。另外，蒸汽发生器制造配套条件，如大型厂房、起吊设备、运输条件等，国内各制造企业也都基本具备。

#### 4 蒸汽发生器国产化比率估计

本文中的百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器国产化比率是综合了设计、制造、验证和鉴定、材料供应与配套这4个方面而得出的。为了体现各个部分对于蒸汽发生器国产化的贡献，将上述4项的国产化率以30%、40%、20%和10%的权重加权平均，作为总的国产化比率。这也是目前较为通行的算法。在设计、验证和鉴定方面，国内设计院、所和制造厂具备较为全面的自主设计、自主验证和鉴定的能力，可以达到100%国产化率。而制造和材料供应方面，如果按照工作量计算，国内制造业可以实现约70%国产化率。但由于占蒸汽发生器价值将近2/3的传热管和焊材必须进口，如果按照设备价值计算，则国产化率将只有35%。因此，综合起来，如果按照工作量计算，蒸汽发生器的总的国产化率可以达到80%。而如果按照设备价值计，则为65%。

#### 5 R1NSG-1000型蒸汽发生器

R1NSG-1000型蒸汽发生器全面满足了先进蒸汽发生器设计的3项要求。其设计参数满足目前国内三环路1 000 MWe 和四环路1 400 MWe 核电厂设计方案的有关要求，在部分参数和尺寸的选择上参考了秦山和大亚湾核电站的数据。主要技术参数如表2所示。在应用于新建核电厂项目时，蒸汽发生器还可以按照新的接口参数对设计作些调整，以满足总体设计的要求。必要时，可以将正方形布置传热管改为三角形布置，或改变传热管的规格，使用小管径的传热管，都可以有效增加传热面积，提高功率，或在一回路平均温度降低的情况下，仍然能够提供足够产量和品质的蒸汽。

R1NSG-1000型蒸汽发生器设计注重学习先进经验，采用成熟技术。蒸汽发生器传热管采用了抗腐蚀性能良好的I-690TT。管板上安装排污效果较好的T型排污管。给水接管安装热保护套管，以降低热冲击。合理布置人孔、手孔和管束拉杆位置，提高蒸汽发生器可维修性。筒体采用SA-508Cl 3a锻件，上封头和水室封头整体锻造。传热管与管板间采用液压胀管连接。支撑板采用拉削加工四叶孔不锈钢支撑板。防振条为3组不锈钢矩形截面条。然而，该蒸汽发生器更为重要的特点是，针对目前蒸汽发生器技术发展趋势，开展了汽水分离装置和泥渣收集器研究，形成了汽水分离装置和泥渣收集器的自主设计能力。

R1NSG-1000型蒸汽发生器采用18只旋叶式分离筒组成汽水分离器，独特的条形疏水结构提高了汽水分离器的疏水能力。干燥器采用了独创的变沟隙双钩波形板构成，具有出色的分离效果。单层布置的结构比之双层布置干燥器，可节省大约一半的空间高度。该汽水分离装置试验件在核动力运行研究所的30 MWt蒸汽发生器综合试验台架上进行了热态考核试验。试验结果表明，该汽水分离装置的分离能力出色。在额定负荷下，出口蒸汽湿度仅为0.0018%，在120%负荷和极端高水位的情况下，出口湿度仍能满足小于0.1%的指标，达到了世界先进水平。图1为该汽水分离装置与西屋和法马通同类装置在相同试验条件下的分离效率的比较结果。该分离装置阻力较小，干燥器的分离能力优异。在总的分离能力相当条件下，该分离装置相比法马通同类装置，可以提高水位500 mm左右，有效增加了二回路的水装量，提高了反应堆的可靠性。

R1NSG-1000型蒸汽发生器泥渣收集器安装在汽水分离器底部平台上，为非能动部件，蒸汽发生器二次侧分离器疏水在经过泥渣收集器时，低速缓慢流动，使得水中悬浮固体泥渣颗粒在重力的作用下逐渐沉积下来，从而净化二次侧循环水，减少管板表面的泥渣沉积，减轻腐蚀威胁。泥渣收集器试验研究在核动力运行研究所的专用泥渣传输与沉积试验台架上进行，蒸汽发生器二次侧固体悬浮物用人造氧化铁粉末模拟。试验研究了不同泥渣注入方式、不同水位、不同疏水分配比例和不同泥渣收集器出入口孔板等组合条件下泥渣随时间的沉积特性。试验结果表明，泥渣收集器的收集效率达到50%以上，达到了西屋同类产品性能指标。

#### 6 结束语

拥有完全知识产权的核电技术、自主设计和建造核电厂是我国核电发展的方针，也是我国全体核电工作者的梦想。国家做出的到2020年核电装机容量达到全国总装机容量4%的决定，为我国核电技术国产化提供了难得的机遇。“十年磨一剑”，希望我们已经掌握的百万千瓦级压水堆核电厂蒸汽发生器设计技术能够在核电国产化发展进程中做出贡献。

#### 参考文献

- [1] 程慧平等. 百万千瓦级核电自然循环蒸汽发生器自主化设计与试验验证. 2001年中国核学会学术年会论文集
- [2] EPRI . Utility Requirements Document on Advanced Light Water Reactor. 1995年12月第七版. 美国电力研究所出版物
- [3] 吴洪涛. 压水堆核电站蒸汽发生器的发展特点. 2001年5月. 核动力运行研究
- [4] 刘鸿运等. RINSG-1000型蒸汽发生器技术规格书. 2001.11, 核动力运行研究所内部文件
- [5] 刘鸿运等. RINSG-1000型蒸汽发生器设计图册及设计说明书. 2003年6月版, 核动力运行研究所内部文件
- [6] 秦加明. RINSG-1000型蒸汽发生器制造与验收技术条件. 2003.6, 核动力运行研究所内部文件
- [7] 秦加明. RINSG-1000型蒸汽发生器使用与维护技术条件. 2003.6, 核动力运行研究所内部文件
- [8] 刘鸿运、薛运焱等. 1 000 MWt 蒸汽发生器汽水分离装置和泥渣收集器两项关键设计技术攻关研究报告. 2002年10月, 核动力运行研究所内部研究报告
- [9] 秦家明. 1 000 MWt级蒸汽发生器国产化制造能力调研报告. 2003年5月, 核动力运行研究所内部研究报告