

蛇形管蒸汽发生器的设计与性能分析

曲闪亮¹ 孔泽学² 李彦峰¹ 翟伟³

1.国核电力规划设计研究院有限公司；2.杭州中科长基机械工程有限公司；3.国核示范电站有限责任公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8813

[摘要] 在全球低碳发展及“双碳”目标的背景下，核能供工业蒸汽系统的研发至关重要，而蒸汽发生器作为该系统的核心设备，其可靠性、效率等性能备受关注。本文通过对比 U 形管蒸汽发生器与蛇形管蒸汽发生器的技术性和经济性，阐述了蛇形管蒸汽发生器在抗热冲击性能、负荷响应性、使用寿命、造价等方面的优势。同时，详细介绍了蛇形管蒸汽发生器的总体设计方案，包括结构布置、过冷区布置、选材、蒸汽除湿及疏水箱设计等内容，分析了设计要点、难点及相应解决方案，为蛇形管蒸汽发生器的进一步研发和应用提供参考。

[关键词] 蛇形管蒸汽发生器；U 形管蒸汽发生器；设计方案；性能对比

Design and Performance Analysis of Serpentine Tube Steam Generators

Qu Shanliang¹ Kong Zexue² Li Yanfeng¹ Zhai Wei³

1.State Nuclear Power Planning and Engineering Research Institute Co., Ltd.;

2.Hangzhou Zhongke Changji Mechanical Engineering Co., Ltd.;

3.State Nuclear Demonstration Power Plant Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of global low-carbon development and the "dual carbon" goals, the research and development of nuclear energy systems for industrial steam supply has become crucial. As the core equipment in such systems, steam generators' reliability and efficiency have garnered significant attention. This paper compares the technical and economic advantages of U-tube steam generators with serpentine tube steam generators, highlighting the latter's superior performance in thermal shock resistance, load responsiveness, service life, and cost-effectiveness. Additionally, it provides a detailed design framework for serpentine tube steam generators, covering structural layout, subcooling zone configuration, material selection, steam dehumidification systems, and condensate tank design. Key design challenges and corresponding solutions are analyzed to offer insights for further R&D and practical applications of serpentine tube steam generators.

[Key words] Serpentine tube steam generator; U-tube steam generator; Design scheme; Performance comparison

引言

研究背景

当前，全球变暖问题日益严峻，碳达峰、碳中和已成为国

家重要发展战略，削减碳排放成为必然趋势。在这样的背景下，工业领域对低碳用汽的需求愈发迫切，核能作为一种清洁、高效的能源，在工业蒸汽供应方面具有广阔的应用前景。

本项目聚焦于全国大规模工业用汽的低碳背景，针对工业蒸汽应用场景的需求，积极开展核能供工业蒸汽系统集成的研究探索。在该大规模供汽系统中，三回路蒸汽发生器是核心关键设备，其性能直接影响整个系统的运行效率、可靠性和经济性，因此需要具备大规模供汽容量、高可靠性、先进性和灵活性。

1、国内外研究现状

在蒸汽发生器领域，国内外的的发展呈现出不同的特点和格局。

国外方面，蒸汽发生器市场呈现“寡头垄断 + 细分赛道专精”的格局。在核电领域，蒸发器均为 U 型管板式，GE、三菱重工、斗山重工等企业技术成熟度高，项目经验丰富；在工业蒸汽领域，SPX FLOW 的模块化管壳式和阿法拉伐的高紧凑型板式蒸汽发生器具有一定优势；在低碳创新领域，Heliogen 的光热（类似熔盐冷管壁式）和 Sunfire 的氢能（水冷壁式）蒸汽发生器颇具特色；对于成本敏感项目，加拿大 ACME（稠油开采）和俄罗斯 Atomenergomash（极地设备）的产品较为适用。总体而言，GE、西门子、三菱重工等巨头主导市场，且均采用 U 型管板式，而一些专精特新企业在细分领域建立了技术壁垒。

国内方面，与国外情况相仿，三大动力企业在蒸汽发生器领域占据一定份额，所采用的技术基本为 U 型管板式或螺旋管式，这些技术多是对国外技术的模仿，目前正逐步走向成熟，市场占有率也在逐步提高。但由于 GE、西门子等国外企业持有该领域 60% 的专利，国内产品在出海方面面临较大困难。同时，国内一众专精特新企业正在兴起，技术研发开始取得突破，技术壁垒逐步建立，但知识产权保护问题较为突出。

目前，大容量蒸汽发生器形式主要为 U 型管板式，小容量的螺旋管式也开始得到应用。

2、研究目的与意义

本研究的目的是研发一种新型的蛇形管蒸汽发生器，以解决传统 U 形管蒸汽发生器在运行过程中存在的诸如抗热冲击性能差、负荷响应性低、使用寿命短、造价高等问题。

该研究的意义在于，蛇形管蒸汽发生器的成功研发和应用，能够提高核能供工业蒸汽系统的可靠性和效率，降低系统运行成本，推动核能在工业领域的广泛应用，为实现碳达峰、碳中和目标提供有力支撑。同时，也有助于提升我国在蒸汽发生器领域的自主研发能力和技术水平，打破国外企业的专利垄断，增强国内产品在国际市场的竞争力。

3、蒸汽发生器功能及结构型式

3.1 蒸汽发生器的功能及传统结构形式

在核电厂中，蒸汽发生器处于一回路与二回路的交叉位置，主蒸汽发生器利用一回路的反应堆高压冷却剂载热水，在蒸发器的换热管内流动，加热管外壳侧的给水，将给水转化为蒸汽，以推动汽轮机发电。不过，这种主蒸发器产生的蒸汽含有一定的放射性，直接用作工业蒸汽存在严格的局限性。

本项目中的蒸发器，即第三回路蒸汽发生器，以核电厂主蒸发器产生的蒸汽作为热源，该蒸汽在换热管内部凝结并放出潜热，加热管外壳侧的给水，将其变成清洁的工业蒸汽供使用。

目前，第三回路蒸汽发生器与主蒸发器一样，多采用 U 型管管板式结构。U 形管管板式蒸发器的管侧为高压部分，由半球形水室、管束（管板、U 形管、导流板和支撑板等）、壳体等组成。

a) 水室：采用半球型封头加自紧密封人孔结构，内部装有分程隔板组件。水室封头上部设有启动放气口，同时也可作为设备出厂前及现场水压试验满水检查和运输存放期间充氮保护用接口；底部设有放水口，用于水压试验后排水和停机检修排水。

b) 管系：由管板、U 形管、支撑板、定距管、拉杆、管束抗振结构等组成。传统传热管采用 U 形管形式，材料多为 INCL690 或俄罗斯的 847，且换热管需进行 100% 无损检测、逐根水压试验和消除应力热处理。胀接采用液压胀，焊接采用自动氩弧焊，焊后进行高灵敏度氦检漏，以保证换热管与管板连接和密封可靠。为减少蒸汽发生器管板的热应力，给水从管板汽侧均匀进入管束，使管板两侧的温差均匀，从而降低不均匀二次热应力的影响。

c) 壳体：由筒节、筒身、封头和若干管接头组成，设置有给水进口、蒸汽出口、溢流疏水出口、壳侧安全阀接口、启动放气口、启动放水口等。蒸发器由筒节蒸发段、锥壳、蒸汽汽水分离段组成，外壳受压部件间的焊接均采用双面、全焊透型式，壳体管座均采用厚壁管整体补强。其布置原则是将不连续应力集中降到最小，减小老化风险。

然而，U 形管管板式蒸发器存在诸多问题，如管板较厚导致升降温速率缓慢（仅 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ），灵活性欠缺；管板易老化，硬度增加，容易出现危险裂纹；管子与管板的胀接因管束振动而失效，引起间隙腐蚀；封口焊缝因 SCC 失效泄漏；管束支撑板对管子的咬击破坏；以及积泥腐蚀、点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀 SCC、磨蚀等。这些问题使得部分 U 型管蒸发器仅运行 10 年左右就需退役，且在机组整个寿命期内，一般需要更新一次，费用高昂。因此，研发新型长寿命、高效率、高可

靠性的蒸汽发生器迫在眉睫。

3.2 结构形式选择及面临的关键问题

目前常见的换热器形式有管板式、板式和蛇形管集箱式等。其中,板式换热器容量小且易结垢,不适合本项目;管板式即上述的 U 形管管板式,存在较多弊端。

大型机组蒸汽发生器设计压力高、流量大, U 形管式蒸汽发生器的管板厚度随着设计参数的提高而增加,达到 400~1000mm,机组的启停会造成较大的热应力,容易引起壳体和管板连接处的热裂纹。

而蛇形管蒸发器的集箱厚度一般在 70~100mm,仅有管板厚度的 10% 左右,热应力分布比较均匀,具有较好的抗热冲

击性能,未有过热疲劳断裂情况,提高了温升速率限制和变工况运行次数。例如,1000MW 核电 U 形管蒸汽发生器允许的温升速率限制为 1.5~3℃/min,部分项目反映其实际运行寿命小于 15 年;而 1000MW 蛇形管蒸汽发生器允许的温升速率可达 10℃/min,实际运行寿命达 35~50 年。

通过对比蛇形管蒸汽发生器与 U 形管蒸汽发生器的本体主要特点(见表 1)可以看出,蛇形管蒸发器具有显著优势:集箱厚度小,抗热冲击性能好,允许温升速率高,加工制造容易,管子与集管可对焊,换热管泄漏率低,设备可靠性高,布置方式灵活,且使用压力和温度无限制,能克服管板式的不连续应力集中和一系列腐蚀问题。

表 1 蛇形管蒸汽发生器与 U 形管蒸汽发生器本体主要特点对比

项目名称	多列 U 形管式蒸发器	单列蛇形管式蒸发器
管板厚度 \ 集箱厚度	650mm 左右,加工难度大	70~90mm,加工容易
水室厚度	~200mm	70~90mm
热应力适应性	管板较厚,管板与壳体的连接处的热应力集中,易产生裂纹和发生泄漏	集箱壁厚较薄,热应力适应性大大提高,不易产生裂纹和发生泄露
温升速率限制	1.5~3 (K/min)	>10 (K/min)
钻孔难度	管板厚度大,难度大	集箱厚度小,钻孔容易
供货周期	因管板厚度增大,需采用新型设备,新型材料,供货周期 12~14 个月	焊接工艺要求高,特别是无损检测要求更为严格,供货周期 12~14 个月
管子与管板焊缝	角接,受力情况差,易出现缺陷,仅能 PT 渗透检查	对接,受力情况优,不容易出现缺陷,能 RT 射线检查。

因此,本项目选定蛇形管集箱式作为新型蒸汽发生器的结构进行研发。但蛇形管集箱式作为蒸汽发生器是全球首创,研发过程中面临诸多关键问题,如采用立式还是卧式布置、蛇形管和集箱的选材、过冷疏水的布置与实现、蒸汽除湿的高效率实现、如何防止腐蚀以及管内疏水的吹扫与接收等。

4、总体设计方案、设计要点、难点及解决方案

4.1 总体设计结构布置方案

蛇形管集箱式蒸汽发生器有两个集箱,若采用立式布置,加热蒸汽从上集箱进入,在管内冷凝放热,由于至少是 3 流程换热器,3 个流程对管外水的加热强度不一致,会导致同一截面沸腾气泡不均匀,引起换热管振动,进而造成疲劳破坏。而且,采用立式布置难以从结构上避免加热强度不一致的问题,同时气泡从下到上路径长,阻力大。

为避免立式蛇形管蒸发器的上述问题,本项目采用卧式布置方案。该方案中,集箱位于设备两侧,设备主要由壳体、封头、接管、集箱、蛇形管、管束支撑、初级分离器、二级分离

器、支座等组成。

4.2 过冷区布置

管内凝结水如果没有过冷就排出,会因流动阻力而引起管内强烈两相流,造成出口管端冲蚀,使蒸发器提前失效。因此,必须布置冷却管内疏水的冷却区,利用进口的低温给水吸收管内疏水热量,将其变成过冷疏水从出口集箱排出。

采用将进入的给水从下到上进行梯级加热至沸腾的方式,不仅容量大、热流场均匀,能使产生的气泡均匀分布,而且气泡上升距离短,阻力小。

4.3 选材

由于管内主蒸汽(该主蒸汽是主蒸发器产生的,主蒸发器可能泄漏)依然有一定的放射性,因此与之相关的材料均需要至少含有 0.3% 的 Cr,以避免老化影响。对于换热管,还需要防止 SCC 应力腐蚀开裂。

基于以上要求,换热管选用 S31603 含 Mo 不锈钢,以隔绝辐射影响,同时防止 SCC 应力腐蚀开裂;集箱选用 S31608

含 Mo 不锈钢，其强度相对较高，且能与 S31603 牢固施焊，有效防止焊缝 SCC。

4.4 蒸汽除湿

湿蒸汽作为工业蒸汽使用前必须进行除湿，否则会造成管线和热网加热器提前失效。例如，304 不锈钢在湿蒸汽的冲刷下，寿命不超过 2 年，且会出现变脆开裂的现象，相关经验案例已证实这一点。

为此，在蒸发区上部设置不动叶旋风分离器，可分离出大于 0.5 微米粒径的水，这些水通过接水盘从壳体两侧回流到蒸发器底部，进行再热蒸发。在蒸汽出口，再经过带钩分离器进行分离后进入供汽管道，分离出的疏水引至两侧通道，回流到蒸发器底部，进行再热蒸发。

需要注意的是，湿蒸汽的分离已成为决定成本的重要因素。如果不做湿蒸汽分离，设备直径会小至少 400mm，但分离器均为高级不锈钢，成本较高。

4.5 疏水箱

蒸发器管内是饱和蒸汽凝结放热，本项目设有过冷区，排出的过冷疏水由独立的疏水箱接收。为保证疏水畅通，疏水箱配备有三个液位变送器，通过疏水箱与二级给水预热器管道上的调节阀控制疏水箱水位。

为确保管内疏水排放顺畅，在管内增加 3% 的吹扫蒸汽，推动疏水前行。同时，在疏水箱与出口集箱之间设汽平衡管道。

疏水箱均为卧式压力容器，其容积按 10% 疏水量确定，主要由筒体、椭圆封头、接管座、双鞍座等部件组成。

4.6 模拟案例

我们模拟生产 826.3T/H 参数为 3.4Mpa 温度 240.9℃ 的饱和蒸汽，经过换热计算需要参数为 5.38Mpa 温度 268.56℃ 的主蒸汽 844.6T/H，采用蛇形管式蒸汽发生器，通过 CFD 进行模拟仿真计算，利用一台设备就可精确实现，如下图 1 是壳侧流量云图，右侧接管为给水进口，下部接口为溢流口，上部接口为蒸汽出口，红色表示待蒸发的水，蓝色表示已生成的蒸汽，蒸汽分布均匀且体积大，验证了蛇形管蒸发器的大流量特性，非常有价值推广。

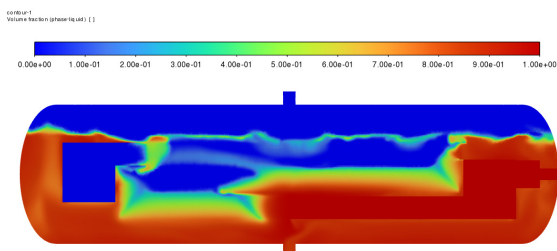


图 1 是壳侧流量云图

5、结果与分析

5.1 研究结果

通过对 U 形管蒸汽发生器和蛇形管蒸汽发生器的对比分析以及蛇形管蒸汽发生器的设计研究，得出以下结果：

在技术性方面，蛇形管蒸汽发生器的集箱厚度小，仅为 U 形管蒸发器管板厚度的 15% 左右，热应力分布均匀，抗热冲击性能较好，允许的温升速率高 (>10 (K/min)，部分可达 >25 K/min)，远高于 U 形管蒸汽发生器的 1.5-3 (K/min)，能更好地适应负荷变化，提升机组灵活性；蛇形管蒸发器的集箱和水室厚度小，加工制造难度低，管子与集管采用对接焊，受力情况优，不易出现缺陷，且能进行 RT 射线检查，换热管泄漏率低，设备可靠性高；其布置方式灵活，可卧式、立式、叠式布置，使用压力和温度无限制，能克服管板式的不连续应力集中和一系列腐蚀问题。

在经济性方面，在整个寿命期内，蛇形管方案比 U 形管蒸发器方案总计减少费用约 30%，具有明显的成本优势。

在设计方面，确定了蛇形管蒸汽发生器采用卧式布置方案，解决了立式布置存在的加热强度不一致、汽泡上升阻力大等问题；合理设计了过冷区，避免了管内凝结水无过冷排出造成的出口管端冲蚀问题；选定了合适的材料(S31603 含 Mo 不锈钢作为换热管，S31608 含 Mo 不锈钢作为集箱)，满足了防辐射和防 SCC 应力腐蚀开裂的要求；采用不动叶旋风分离器和带钩分离器进行蒸汽除湿，保证了工业蒸汽的质量；设计了合理的疏水箱，确保了管内疏水的顺畅排放。

5.2、结果分析

蛇形管蒸汽发生器在技术性上表现出的优势，主要源于其独特的结构设计。较小的集箱厚度使得热应力能够更均匀地分布，从而提高了抗热冲击性能和允许的温升速率，这对于机组应对负荷变化、提高运行灵活性至关重要。对接焊的连接方式相比 U 形管的角接，在受力性能上更优，减少了缺陷产生的可能性，降低了泄漏风险，提高了设备的可靠性。灵活的布置方式则增强了设备在不同应用场景下的适应性。

作者简介：第一作者，曲闪亮，198805，男，河南偃师，汉族，硕士研究生，高级工程师，研究方向：核电设计；

第二作者，孔泽学，1966.09.28，男，四川成都，汉族，大学本科，总经理高级工程师，研究方向：传热与传质的基础发展；

第三作者，李彦峰，198004，男，陕西，汉族，大学本科，高级工程师，研究方向：核电设计；

翟伟，1987.10.8，男，江苏南通，汉族，大学本科，副处长，工程师，研究方向：核电厂运行及优化。