

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405099

核电站孔道式蒸汽发生器热工分析及换热性能研究

汪垠^{1,2}, 张双铭³, 李莹¹, 王强¹, 邱超¹, 王彤³, 杨海瑞³

(1.中核能源科技有限公司, 北京 100193;

2.清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 3.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084)

[摘要] 为满足核电站提高蒸汽参数以获得更好的发电效率及经济性的发展需求, 提出了一种适用于高温气冷堆超超临界参数下的孔道式蒸汽发生器。介绍了孔道式蒸汽发生器结构的主要特点, 分析了该结构在换热性能、运行安全、生产成本等方面的优势。通过建立理论计算模型, 对该蒸汽发生器采用直流逆流换热方式下的轴向、径向、准三维温度分布等参数进行了热工分析及换热性能研究。计算结果表明: 该孔道式蒸汽发生器以对流传热及热传导的换热方式为主, 温度分布分段明显, 换热性能优异, 符合相关换热要求。该研究可为核电站蒸汽发生器的设计及研发提供参考。

[关键词] 蒸汽发生器; 孔道式结构; 温度分布; 传热系数

[引用本文格式] 汪垠, 张双铭, 李莹, 等. 核电站孔道式蒸汽发生器热工分析及换热性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 90-96. WANG Yin, ZHANG Shuangming, LI Ying, et al. Thermal engineering analysis and heat transfer performance of duct-type steam generator in nuclear power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 90-96.

Thermal engineering analysis and heat transfer performance of duct-type steam generator in nuclear power plant

WANG Yin^{1,2}, ZHANG Shuangming³, LI Ying¹, WANG Qiang¹, QIU Chao¹,
WANG Tong³, YANG Hairui³

(1.Chinergy Co., Ltd., Beijing 100193, China;

2.Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To improve steam parameters for better power generation efficiency and economy and meet the development needs of nuclear power plants, a duct-type steam generator is proposed, which is suitable for high-temperature gas-cooled reactors with ultra-supercritical parameters. The main features of the duct-type steam generator's structure are introduced, and the advantages of this structure in terms of heat transfer performance, operation safety, and production cost are analyzed. Through the establishment of a theoretical calculation model, thermal engineering analysis and heat transfer performance study of axial, radial, and quasi-three-dimensional temperature distributions and other parameters of the steam generator with direct countercurrent heat transfer mode are carried out. The calculation results show that, the duct-type steam generator is mainly based on convection heat transfer mode, with obvious temperature distribution segments and excellent heat transfer performance, which meets the relevant heat transfer requirements. This study can provide a reference for design and development of steam generators in nuclear power plants.

Key words: steam generator; duct-type structure; temperature distribution; heat transfer coefficient

收稿日期: 2024-05-15 网络首发日期: 2024-07-17

基金项目: 中核集团集中研发项目 (ZHJTJZYFWD2020)

Supported by: Centralized Research and Development Project of China National Nuclear Corporation (ZHJTJZYFWD2020)

第一作者简介: 汪垠 (1986), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为高温气冷堆核岛主设备, yinwang@chinergy.com.cn.

蒸汽发生器是核电站的重要设备之一，作为一、二回路的枢纽设备，既是组成防止放射安全屏障的一回路压力边界，又是产生高温高压蒸汽的二回路换热设备^[1-7]。蒸汽发生器有多种结构及传热管布置方式，压水堆通常采用 U 形管式蒸汽发生器^[8-9]，高温气冷堆则采用螺旋管式蒸汽发生器^[10-13]，此外还有直管式^[14-16]、蛇形管式等。

提高蒸汽发生器所产生的蒸汽参数可以提高核电站的发电效率和经济性^[17]，但更高的蒸汽温度和压力对蒸汽发生器的挑战也更大。目前，高温气冷堆产生的蒸汽为 13.24 MPa/566 °C 的亚临界参数蒸汽^[13]，而先进的火电机组可产生 29.3 MPa/605 °C 的超超临界参数蒸汽，获得更高的发电效率^[18-19]。核电机组将向着超临界及超超临界参数的方向发展。超（超）临界参数下的换热涉及超高温超高压的工作环境，但现有的蒸汽发生器设计难以满足超高温超高压环境下的换热要求，若继续采用现有蒸汽发生器设计，会将换热死区、承压可靠性不足等缺点进一步放大^[20-22]。此外为了安全运行则需要增加管壁厚度、增大设备尺寸，这会导致造价成倍上升，严重影响生产过程中的经济性。因此，需要开发一种可以在超高温超高压的工作环境下安全可靠运行，同时又有优秀的换热性能、结构简单、造价低廉的新型蒸汽发生器。

基于此，本文提出了一种适用于高温气冷堆超超临界参数的孔道式蒸汽发生器，采用直流逆流的方式，通过孔道间工质的对流传热及孔桥的热传导进行换热。本文建立理论计算模型进行该蒸汽发生器的热工分析，并讨论其换热性能，为未来核电蒸汽发生器的设计与研发提供参考。

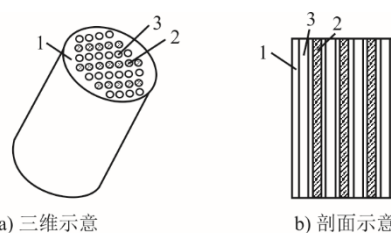
1 孔道式蒸汽发生器

1.1 蒸汽发生器结构及参数

该孔道式蒸汽发生器主换热单元部分呈圆柱体，一次侧、二次侧孔道沿圆柱体高度方向设置，工质呈直流逆流形式流动换热，即一次侧工质的入口在蒸汽发生器顶端，出口在底端；二次侧工质的入口在底端，出口在顶端。在实际投入生产时，蒸汽发生器除主换热单元还应包括出入口联箱、绝热层、承压外筒、检修口、循环泵等结构。

孔道的数量、形状、尺寸、间隔距离及孔道间的布置角度等可以根据实际的换热需求进行精密设计。本文一次侧与二次侧的孔道均直线排列，成轴对称形式，一次侧与二次侧孔道交错排列，一次

侧孔道居中布置，二次侧孔道跨中布置。蒸汽发生器的结构如图 1 所示。



a) 三维示意 b) 剖面示意
1—孔道式蒸汽发生器；2—一次侧孔道；3—二次侧孔道。

图 1 孔道式蒸汽发生器结构示意图
Fig.1 Schematic structure of the duct-type steam generator

该孔道式蒸汽发生器的结构参数见表 1。其中孔桥宽度，即相邻孔道中心距离的选择对于蒸汽发生器的承压能力及换热能力至关重要，同时还需要综合考虑生产成本等经济性要求。参考目前工业应用中传热管的壁厚在 1~3 mm^[23]，选取孔桥宽度为 13 mm，即相邻孔道间的壁面距离为 3 mm。孔道具体布置方式如图 2 所示。

表 1 孔道式蒸汽发生器结构参数
Tab.1 Structural parameters of the duct-type steam generator

项目	数值
直径/mm	1 460
高度/mm	19 000
孔道直径/mm	10
孔桥宽度/mm	13
一次侧孔道数	4 878
二次侧孔道数	4 900

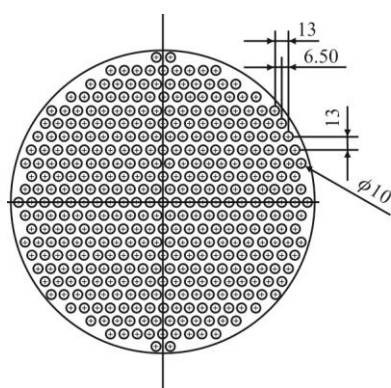


图 2 孔道布置方式示意 (mm)
Fig.2 Schematic diagram of duct arrangement (mm)

由于工质在孔道中的流动速度大，同时采用传热性能较好的金属或合金材料，使得此蒸汽发生器总体的换热系数高，换热性能好。同时可以按照热量需求加工出数量庞大的孔道，孔道的内壁面均

可作为有效的换热面,因此该蒸汽发生器在单位体积内的换热面积大、换热量大。一次侧孔道与二次侧孔道的布置方式也可以根据换热要求进行更加细化的配比。孔道内部也可以加工成带有内螺纹的结构以强化换热效果^[24-25]。

此外该孔道式蒸汽发生器采用逆流换热的方式,工质间换热温差小,装置承受的热应力小,并且本装置为一体式结构,装置整体承压。即使有超高压工质流过孔道时,也不会频繁出现类似U形管式蒸汽发生器的“爆管”事故^[26-27],可以在超超临界参数的超高压环境下安全可靠运行。

由于采用逆流换热,不同轴向位置的温度分区显著,该蒸汽发生器可以进行加工材料的分区选择,在低温段采用性能好、价格低廉的材料进行加工,只在高温段采用可以承受超高温但价格昂贵的合金材料。通过材料的分区选择,节约生产制造成本,提高经济效益。

该蒸汽发生器的设计应用场景为高温气冷堆,其一次侧工质为750℃的冷却剂氦气,二次侧工质为超临界参数下的水/蒸汽,出口参数为28.0 MPa/700℃。具体热力学参数见表2。

表2 孔道式蒸汽发生器热力学参数

Tab.2 Thermodynamic parameters of the duct-type steam generator

项目	数值
一次侧工质	氦气
一次侧入口温度/℃	750
一次侧出口温度/℃	250
一次侧工作压力/MPa	7.0
一次侧质量流量/(kg·s ⁻¹)	96.0
二次侧工质	水
二次侧入口温度/℃	205
二次侧出口温度/℃	700
二次侧工作压力/MPa	28.0
二次侧质量流量/(kg·s ⁻¹)	85.0
换热量/MW	245

1.2 理论计算模型

核电站运行过程中负荷波动幅度较小,蒸汽发生器内部接近稳态换热过程,因此在理论计算中不考虑动态过程,通过将整个流程分为多个小区间的方式进行理论计算来研究稳态换热过程。

对于一次侧及二次侧工质均有质量守恒方程:

$$M_{1,in} = M_{1,out} \quad (1)$$

$$M_{2,in} = M_{2,out} \quad (2)$$

式中: $M_{1,in}$ 、 $M_{1,out}$ 、 $M_{2,in}$ 、 $M_{2,out}$ 分别为一次侧工质

入口质量流率、一次侧工质出口质量流率、二次侧工质入口质量流率、二次侧工质出口质量流率, kg/s。

在稳态换热过程中,存在能量守恒:

$$\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_s = 0 \quad (3)$$

式中: ΔQ_1 、 ΔQ_2 、 ΔQ_s 分别为一次侧工质热量变化量、二次侧热量变化量、换热过程中的热量损失量, J。

对于该蒸汽发生器,在任一确定高度的横截面内,同次侧孔道内的工质温度基本一致。因此,可以将三维温度场计算简化为沿着蒸汽发生器高度即轴向的一维温度场计算,忽略径向的温度分布。而计算一维温度场则是典型的两流体间的传热过程,需要考虑对流传热及孔桥材料的热传导。

对于传热系数的计算存在等式:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_w + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4)$$

式中: K 为总传热系数, W/(m²·K); α_1 、 α_2 分别为一次侧和二次侧对流传热系数, W/(m²·K); R_w 为孔桥传热热阻, (m²·K)/W。孔桥传热热阻与加工材料有关,计算中考虑不同分段对应材料的实际热阻。

一次侧工质为氦气,其对流传热可认为是单相工质在管内的强迫对流湍流传热^[28],可采用 Dittus-Bolter 公式进行计算:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3} \quad (5)$$

式中: Nu 、 Re 、 Pr 分别为努塞特数、雷诺数、普朗克数。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (7)$$

式中: ρ 为流体的密度, kg/m³; v 为流体的速度, m/s; d 为孔道直径, m; μ 为流体的动力黏度, (N·s)/m²; c_p 为流体的定压比热容, J/(kg·K); λ 为流体的热传导系数, W/(m·K)。

由于采用小区间计算的方法,区间内部的物性变化较小,因此 Pr 数等准则数的物性参数可取工质的算术平均温度作为定性温度。

二次侧工质为水,在超临界压力下存在大比热容区,在此区域内水的定压比热容等物性参数发生了剧烈的变化,根据工质和管壁温度的不同,可能引起传热恶化或者是传热强化。计算其二次侧工质的对流传热系数^[29]:

$$\alpha_2 = A\alpha_0 \quad (8)$$

式中： A 为与流体的比焓和比值 q/G 有关的修正系数，可按图 3^[29] 查取； α_0 为超临界压力下水的比焓为 840 kJ/kg 时的传热系数。

换热量计算公式为：

$$\Delta Q = KA_e \Delta T \quad (9)$$

式中： ΔQ 为换热量，W； A_e 为有效换热面积， m^2 ； ΔT 为换热温差，K。

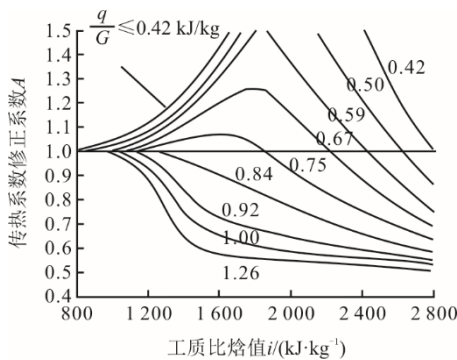


图 3 管内超临界水传热系数的修正系数
Fig.3 Correction factor for heat transfer coefficient of supercritical water in the tube

2 结果及分析

2.1 蒸汽发生器轴向

通过以上理论计算模型进行计算得到蒸汽发生器沿高度方向的一维温度场，包括温度、温差、传热系数随蒸汽发生器高度的变化，结果如图 4、图 5 所示。由图 5 的一、二次侧工质温度、传热系数随换热器高度变化可以看出，一次侧工质氦气的对流传热系数随着温度的升高有一定的增大。

由图 4、图 5 可见，在二次侧工质超临界水在到达拟临界温度之前，仍呈现类似过冷水的性质，整体的换热比较稳定，二次侧传热系数随着工质温度的升高而逐渐增大。在二次侧工质温度到达拟临界温度附近时，二次侧传热系数迅速增大。分析原因，可能是由于超临界水产生类似亚临界水蒸发换热的情况，造成换热强化。同时由于在超临界压力下，二次侧的超临界水存在大比热容区段，吸收大量热量的同时，温度升高得较为缓慢，最终得到类似蒸发换热的“平台区”温度曲线。而这样的温度曲线也造成了温差的增大，一二次侧主流温度的最大温差达到了 140 °C，这对于装置的安全可靠性造成了一定的影响，需要在设计过程中重点考虑。在过热蒸汽段二次侧工质的对流换热能力下降，整体的换热系数也有所降低。同时蒸汽的比热容下降，在吸收相同的热量后有更大的温升，传热温差在度

过“平台区”达到最大值后在过热蒸汽段又明显下降。因此，在蒸汽发生器轴向整体传热可明显分为 3 段，在设计中每段可根据不同传热特点有对应解决措施。蒸汽发生器总传热系数在 2 000 W/($m^2 \cdot ^\circ C$) 左右，优于目前已应用的其他蒸汽发生器。

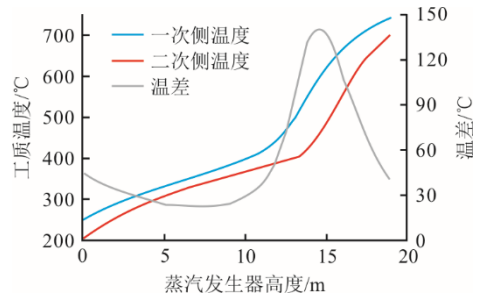


图 4 沿蒸汽发生器高度方向温度及温差变化
Fig.4 Variations of temperature and temperature along the height of the steam generator

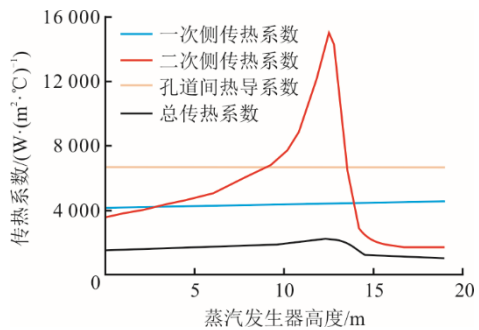


图 5 沿蒸汽发生器高度方向传热系数变化
Fig.5 Variations of heat transfer coefficient along the height of the steam generator

2.2 蒸汽发生器径向

对于蒸汽发生器径向截面温度场的计算，由于该蒸汽发生器的孔道数为单侧 4 900 个，较难进行全尺寸的截面温度场计算，此外孔道式蒸汽发生器有很强的结构重复性，因此可以将该计算模型进行简化处理。

该蒸汽发生器采用孔道式的布置方式，在不考虑靠近装置边缘可能与外界产生热交换、造成热损失的孔道，可以认为径向截面是由图 6 中橙黄色部分所示的基本结构单元紧密平铺所得到的。每个孔道与 6 个孔道相邻，包括 2 个同次侧孔道与 4 个异次侧孔道。每个孔道参与 4 个基本结构单元的组成，形成类似“梅花形”的孔道布置方式。在分析蒸汽发生器整体温度分布时则是该基本结构单元进行翻转拼接所构成。因此，对于蒸汽发生器径向截面温度分布的计算可以简化为对于该基本结构单元的温度分布研究。

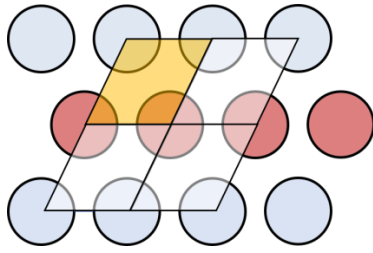


图6 基本结构单元示意

Fig.6 Schematic diagram of basic structural units

在蒸汽发生器稳定运行阶段,不考虑孔道内工质的流动波动,建立节点网格离散方程,进行温度分布的计算。在节点的温度设置上,对于孔道内的节点设置为主流温度,孔道边界通过计算传热边界层得到相应的节点温度,孔桥材料上的节点通过稳态导热的离散方程进行求解,边界上的网格节点按照绝热的方式设置。对于计算中涉及对流传热中存在的边界层现象,采用两流体间的传热过程的计算方法开展计算。

通过 MATLAB 软件编程进行径向温度分布的计算,以轴向一维温度分布计算中最大温差处的截面基本结构单元为例,该基本结构单元温度云图如图 7 所示。由于采用四边形网格来模拟圆形的孔道边界,图像上存在一定程度上的形状失真。

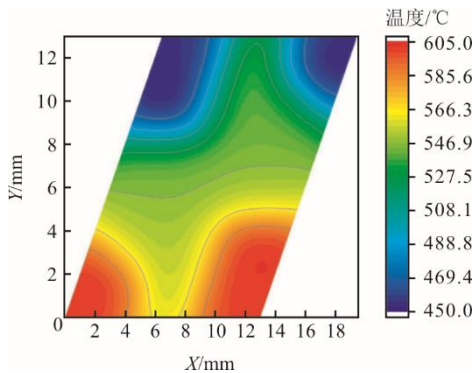


图7 基本结构单元温度云图

Fig.7 Temperature nephogram of the basic structural unit

由图 7 可以观察到,温度最高的位置为一次侧孔道主流区域,最低温度的位置为二次侧孔道主流区域,孔道边界层位置及孔桥按照不同的温度梯度对应不同的温度。其中,一次侧孔道主流温度为 599.0 °C,一次侧孔道壁面温度为 558.8 °C,孔桥中心温度为 546.6 °C,二次侧孔道壁面温度为 532.2 °C,二次侧孔道主流温度为 459.0 °C。在孔道壁面处由于流动边界层的存在,温度梯度较大。而孔桥直接承受的温度梯度则只有 27.0 °C,较低的温差有利于设备的整体承压。

为验证蒸汽发生器径向温度计算的准确性,采用 ANSYS Fluent®商业软件对径向截面的温度分布及传热情况进行数值模拟,得到截面局部温度分布如图 8 所示,与图 7 所得结果基本一致。同时可以观察到,在同次侧的相邻孔道间可能存在换热死区,即孔道的部分壁面没有参与和异次侧孔道的换热,在计算与设计中的需要考虑这种情况对于有效换热面积的影响。

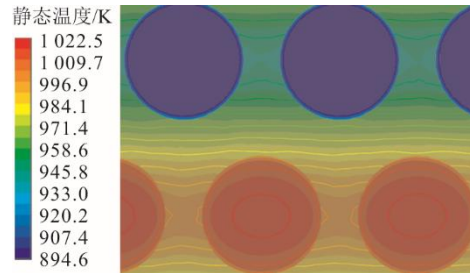


图8 截面局部温度分布

Fig.8 Local temperature distribution in cross section

2.3 准三维温度分布

在蒸汽发生器轴向不同高度取若干个基本结构单元,以轴向计算得到的一次侧与二次侧主流温度作为计算输入,采用前文提到的径向温度场的计算方法,得到径向的温度场。将轴向及径向的计算结果进行整合后,则可以得到准三维的蒸汽发生器整体温度分布。以 5 个重要温度代表径向的温度分布,即一二次侧主流温度、一二次侧孔道壁面温度及孔桥中心温度,沿蒸汽发生器轴向的分布,组成准三维的温度分布计算结果,结果如图 9 所示。该结果既可以反映各温度沿蒸汽发生器轴向的变化情况,同时也可以得到在某一特定高度下 5 个重要温度的数值,以分析在此截面的温度分布情况及具体的传热性能。

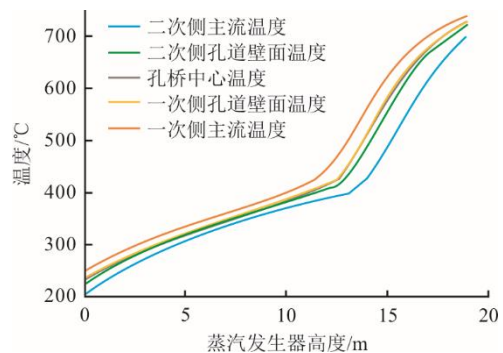


图9 准三维温度分布

Fig.9 The quasi-3D temperature distribution

由图 9 可以看出,在较低温度下,5 个重要温

度的温差较小。在超临界状态下,二次侧孔道壁面温度与二次侧主流温度的温差明显增大,说明此时系统主要的传热热阻来自超临界状态下的二次侧工质,出现类似于蒸汽换热较大的传热热阻。

3 结 语

具体介绍了孔道式结构的蒸汽发生器,通过建立理论计算模型,对在高温气冷堆超超临界参数条件下的蒸汽发生器温度分布及换热性能进行了计算及分析。在轴向即蒸汽发生器高度方向上,由于二次侧为超临界水,整体的温度分布及传热系数特点明显,且存在传热强化,总传热系数可以达到 $2\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,换热性能优异。在径向上,采用基本结构单元的简化计算,得到了主流温度、壁面温度及孔桥中心温度等重要温度。结合以上计算得到了准三维的温度分布。本文研究为核电站蒸汽发生器的设计及发展提供了参考,可为开发设计新型的核电站蒸汽发生器提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 吴宗鑫. 先进核能系统和高温气冷堆[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 238-245.
WU Zongxin. The advanced nuclear energy system and high temperature gas-cooled reactor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 238-245.
- [2] 杜圣华. 核电站[M]. 2版. 北京: 原子能出版社, 1992: 120-130.
DU Shenghua. Nuclear power plant[M]. 2nd ed. Beijing: China Atomic Energy Press, 1992: 120-130.
- [3] 熊扬恒. 核电站蒸汽发生器研究设计中的几个问题[J]. 核动力工程, 1994(4): 319-322.
XIONG Yangheng. Several problems in the research and design to the steam generator of the nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1994(4): 319-322.
- [4] 钱秋裕, 蹇宏伟, 黄晓津. 高温气冷堆核电站汽水分离系统设计[J]. 热力发电, 2015, 44(12): 103-106.
QIAN Qiuyu, QIAN Hongwei, HUANG Xiaojin. Design and research of steam-water separator system for high temperature high temperature reactor-pebbled modules[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(12): 103-106.
- [5] 王培河. AP1000 蒸汽发生器制造难点分析[J]. 中国核电, 2011, 4(1): 52-59.
WANG Peihe. Manufacturing difficulties analysis of AP1000 steam generator[J]. China Nuclear Power, 2011, 4(1): 52-59.
- [6] ZHANG Z, WU Z, WANG D, et al. Current status and technical description of Chinese $2\times 250\ \text{MWth}$ HTR-PM demonstration plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(7): 1212-1219.
- [7] KOTHARE M V, METTLER B, MORARI M, et al. Level control in the steam generator of a nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(1): 55-69.
- [8] 刘敏珊, 刘彤, 董其伍. 蒸汽发生器 U 形传热管动态特性影响因素分析[J]. 核动力工程, 2008(2): 43-47.
LIU Minshan, LIU Tong, DONG Qiwu. Analysis of factors influencing dynamic characteristics of steam generator U-tubes[J]. Nuclear Power Engineering, 2008(2): 43-47.
- [9] 刘亮, 周涛, 宋明强. AP1000 与大亚湾核电站蒸汽发生器的对比与分析[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 417-419.
LIU Liang, ZHOU Tao, SONG Mingqiang. Comparative analysis of AP1000 and steam generator of Daya Bay nuclear power plant[J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 417-419.
- [10] 库格勒, 吴宗鑫. 模块式高温气冷堆核电站[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023: 1.
KUGELER K, WU Zongxin. Power plants with modular high-temperature reactors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023: 1.
- [11] ZHANG Z Y, DONG Y J, LI F, et al. The Shandong Shidao Bay 200 MW high-temperature gas-cooled reactor pebble-bed module (HTR-P) demonstration power: an engineering and technological innovation[J]. Engineering, 2016, 2(1): 236-250.
- [12] JIANG Y, JIANG G, SUN J, et al. Characterization of leakage jet flow field and wall vibration of steam generator pipes[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 423: 113225.
- [13] YUAN Y, ZHONG M, ZHOU Y, et al. Development and validation of the helically coiled steam generator model of RELAP5/MOD3. 4 code[J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 164: 104881.
- [14] 解衡, 张金玲, 贾斗南, 等. 直管式直流蒸汽发生器的热工水力特性分析与计算[J]. 核科学与工程, 1997(2): 6-11.
XIE Heng, ZHANG Jinling, JIA Dounan, et al. Thermal hydraulic predictions of once through steam generator[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1997(2): 6-11.
- [15] 张建民, 李京光, 桑维良. 钠冷快堆蒸汽发生器的模块化模型及瞬态仿真研究[J]. 核动力工程, 1999(1): 80-83.
ZHANG Jianmin, LI Jingguang, SANG Weiliang. Modular modeling and transient simulation research of once-through steam generator for sodium-cooled fast reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1999(1): 80-83.
- [16] 刘建阁, 陈军, 孙吉良, 等. 两相流模型在直流蒸汽发生器热工水力分析中的比较研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(3): 430-439.
LIU Jiange, CHEN Jun, SUN Jiliang, et al. Comparative study of two-phase flow model in once-through steam generator thermal-hydraulic analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(3): 430-439.
- [17] 祁娜. 蒸汽侧参数对 1 000 MW 级核电机组热经济性影响分析与研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 1.
QI Na. Analysis and study on the effect of steam parameters on thermal economy of 1000MW nuclear power plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [18] 周旭, 周妍君, 李维成, 等. 660 MW 超超临界 CFB 锅炉失电壁温计算及运行措施[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(11): 91-98.
ZHOU Xu, ZHOU Yanjun, LI Weicheng, et al. Calculation of heating surface wall temperature and operation measures for 660 MW ultra supercritical CFB boiler under electricity failure[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 91-98.

- [19] 徐蕙, 徐二树. 超超临界 1 000 MW 机组锅炉动态仿真模型[J]. 热力发电, 2013, 42(7): 26-31.
XU Hui, XU Ershu. Dynamic simulation model for ultra supercritical 1 000 MW unit boilers[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(7): 26-31.
- [20] 江双. 核电站蒸汽发生器传热管的应力分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 1.
JIANG Shuang. Stress analysis of heat transfer tube for PWR steam generator[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015: 1.
- [21] 张加军, 郑丽馨, 刘英伟, 等. 压水堆核电厂蒸汽发生器传热管的降质问题[J]. 压力容器, 2013, 30(12): 57-63.
ZHANG Jiajun, ZHENG Lixin, LIU Yingwei, et al. Discussion about degradation issue of steam generator tube in PWR[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(12): 57-63.
- [22] 郑陆松, 孙宝芝, 杨元龙, 等. 基于流热固耦合的核电蒸汽发生器传热管热应力数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(1): 74-80.
ZHENG Lusong, SUN Baozhi, YANG Yuanlong, et al. Numerical simulation on thermal stress of tube in steam generator of nuclear power plant based on fluid-thermal-structure interaction[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 74-80.
- [23] 金文凯. U 型换热器管束潜在质量问题分析及处理对策[J]. 中国化工装备, 2013, 15(1): 42-44.
JIN Wenkai. Analyses and countermeasure for latent quality issues of "U" exchanger bundle[J]. China Chemical Industry Equipment, 2013, 15(1): 42-44.
- [24] 唐苇羽, 陈景祥, 韩锦程, 等. 不同强化换热管内流动沸腾换热特性对比[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(6): 1216-1222.
TANG Weiyu, CHEN Jingxiang, HAN Jincheng, et al. Comparison of flow boiling heat transfer characteristics inside different enhanced heat transfer tubes[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(6): 1216-1222.
- [25] 王跃勇. R417A 在水平光滑管和内螺纹管内沸腾换热的性能模拟[D]. 西安: 西安科技大学, 2011: 1.
WANG Yueyong. Performance simulation of boiling heat transfer of R417A inside horizontal smooth and internally grooved tubes[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011: 1.
- [26] KIM S I, KANG H S, NA Y S, et al. Analysis of steam generator tube rupture accident for OPR 1000 nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 382: 111403.
- [27] LI A, CHEN Y, RAO Y, et al. Research on optimization scheme for boiling heat transfer models of mini-channels casing-pipes once-through steam generator[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 416: 112762.
- [28] 姚彦贵. 核电蒸汽发生器热工水力稳态特性计算分析研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 1.
YAO Yangui. Study about thermal hydraulic static characteristics calculation of nuclear steam generator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 1.
- [29] 吕俊复. 气液两相流动与沸腾传热[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1.
LYU Junfu. Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2017: 1.

(责任编辑 杜亚勤)