

DOI: 10.19666/j.rlfed.202407186

液态金属堆蒸汽发生器螺旋管束流动 传热特性研究

谢海燕, 聂鑫, 赖建永, 田雅婧

(中国核动力研究设计院核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610213)

[摘要] 液态金属堆的螺旋管蒸汽发生器一次侧为液态金属工质、二次侧为水工质, 其热工水力特性相比传统压水堆的自然循环饱和式蒸汽发生器有较大区别。提出将螺旋管蒸汽发生器等效为流动网络系统的方法, 将螺旋管束分为流动回路、压力节点等元件; 基于质量守恒、动量守恒、能量守恒等方程, 建立了计算蒸汽发生器螺旋管回路的压降、流量和温度等热工水力参数的数学模型和管束金属壁温计算的数学模型; 通过对流动回路未知流量、压力节点组成的非线性方程组进行直接求解, 最终得到了螺旋管束内流量分配、压降、工质温度变化、出口汽温分布、壁温分布、干度及换热系数等变化情况, 获得了蒸汽发生器螺旋管束流动传热特性, 开发了除 RELAP5 外的一维系统分析计算程序, 并完善了液态金属堆螺旋管束蒸汽发生器热工水力计算分析手段。

[关键词] 液态金属堆; 蒸汽发生器; 螺旋管束; 流动网络; 流动传热特性; 热工水力

[引用本文格式] 谢海燕, 聂鑫, 赖建永, 等. 液态金属堆蒸汽发生器螺旋管束流动传热特性研究[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 109-117. XIE Haiyan, NIE Xin, LAI Jianyong, et al. Flow and heat transfer characteristics of helical coiled tubes in steam generator of liquid metal reactor[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 109-117.

Flow and heat transfer characteristics of helical coiled tubes in steam generator of liquid metal reactor

XIE Haiyan, NIE Xin, LAI Jianyong, TIAN Yajing

(National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: For helical coiled tube steam generator for liquid metal reactor, the working medium at the first side is liquid metal and that at the second side is water, and its thermal and hydraulic characteristics are significantly different from those of conventional pressurized water reactor natural circulation saturated steam generators. The helical coiled tube steam generator of liquid metal reactor is equivalent as flow network system and divided into flow circuits, pressure nodes, and other components. The mathematical model for calculating thermal hydraulic parameters such as pressure drop, flow rate and temperature, and mathematical model for calculating the metal wall temperature of tube bundles are established, based on the mass, momentum and energy conservations. Moreover, the profile of flow rate, pressure drop, working medium temperature, outlet steam temperature, wall temperature, vapor quality and heat transfer coefficient in helical coiled tubes are obtained through the direct solving of nonlinear equations composed of unknown flow rate and pressure nodes in the flow circuit. The flow and heat transfer characteristics of the helical coiled tubes in steam generator are obtained. Besides, one-dimensional system analysis and calculation programs are proposed other than RELAP5 and the thermal hydraulic calculation method of helical coiled tube steam generator has been improved.

Key words: liquid metal reactor; steam generator; helical coiled tubes; flow network; flow and heat transfer characteristics; thermal hydraulic

液态金属冷却核反应堆(液态金属堆)包括钠冷快堆、铅铋合金冷却快堆等,是具有较大发展潜

收稿日期: 2024-07-21

第一作者简介: 谢海燕(1992),女,硕士,主要研究方向为核动力装置系统设计,997267385@qq.com。

力的第四代核能技术先进堆型。铅、铅铋、铅锂合金等铅基材料具有中子性能优良、高温、高效率、结构紧凑、安全性高等特点^[1]。螺旋管具有空间利用率高、同空间传热面积更大的优点，比直管具有更高的传热系数与换热效率，同时重心低下、结构紧凑，适应性及可靠性更好，广泛应用于各种换热设备，目前已成为核反应堆蒸汽发生器和化工换热设备的主要型式^[2]。液态金属堆如法国凤凰堆、日本 280 MW 钠冷快堆、德国钠冷快堆 SNR-300^[3]、欧洲开发的铅铋合金冷却快堆 ELSY^[4]、俄罗斯铅铋合金冷却快堆 BREST^[5]均采用了螺旋管蒸汽发生器。

用于液态金属堆的螺旋管蒸汽发生器具有一次侧液态金属工质、二次侧水工质、螺旋管结构、工质温度较高等特点，其热工水力特性相比传统压水堆的自然循环饱和式蒸汽发生器有较大区别。国内有较多学者针对此类蒸汽发生器开展研究。赵孝等^[6]针对一体化小型模块式反应堆设计了一种螺旋式蒸汽发生器，并分析了组件中单根螺旋管温度、换热系数及热流密度等沿管长的变化。黄晓津等^[7]针对 HTR-10 螺旋管蒸汽发生器建立了实时动态模型。李晓伟等^[8]针对高温气冷堆蒸汽发生器热工水力问题进行了阐述，并介绍了清华大学针对该堆型开发的各种程序。马腾跃等^[9]通过缩尺模型冷态实验与数值建模研究了蒸汽发生器换热管流量分配问题，得出换热管存在较严重的流量分配不均的结论。杨宇鹏等^[3]利用 FLUENT 对液态金属螺旋管蒸汽发生器流体耦合流动传热过程进行了数值模拟。刘佳伦等^[10]基于漂移流模型对液态金属快堆螺旋管蒸汽发生器热工水力特性开展了分析。秦长平^[11]、袁媛^[12]、Hoffer^[13]、Bayless^[14]等人均采用软件 RELAP5 对螺旋管束进行建模，在确定横截面积、传热面积、水力直径等参数的情况下，将螺旋管束简化为一根倾斜的直管，未对螺旋管束的各单管流量分配等进行计算分析^[15]。

螺旋管蒸汽发生器螺旋管束内流量分配并不是完全均匀的，且目前公开发表的文献并未完整报道蒸汽发生器所有螺旋管内流量分布、工质温度分布、内壁温度分布、外壁温度分布、出口汽温分布等热工水力特性分析结果，同时对螺旋管内发生传热恶化时的壁温飞升现象也缺乏研究。本文提出了将螺旋管束结构划分为若干流动回路，并将流动回路沿工质流动方向划分为若干管段，在守恒方程和相关补充方程的基础上建立数学模型，通过迭代法

进行求解，用 Fortran 编程计算得到了液态金属堆蒸汽发生器螺旋管束流动传热特性。

1 计算模型及方法

螺旋管蒸汽发生器 HOTSG 的一次侧为液态金属冷却剂，二次侧的工质为水，蒸汽发生器的入口处为过冷水，从蒸汽发生器底部进入蒸汽发生器内，在有多根并行的螺旋管中自下而上流动，与一次侧的液态金属冷却剂逆流换热，在蒸汽发生器二次侧出口处被加热至过热蒸汽，进而引出至压力容器外部，推动下游汽轮机做功。

设计 HOTSG 单根换热管管长相同，有效的受热长度约 26 m，但每层管的盘绕倾角不同，与水平方向的倾角平均为 5.3°，换热管材料粗糙度 0.001 5 mm。为准确计算蒸汽发生器 HOTSG 内的流动传热特性，将蒸汽发生器的物理结构通过流动网络法等效为相关的流动回路、压力节点等元件，再进行数学建模。

1.1 回路及管段划分

对螺旋管蒸汽发生器 HOTSG 结构进行建模。因螺旋管蒸汽发生器 HOTSG 每层的螺旋管倾角相同、受热相似，可将每层螺旋管束划分为同一个流动回路。螺旋管蒸汽发生器由 11 层的螺旋管构成，具体如图 1 所示，螺旋管蒸汽发生器共划分 11 个流动回路。

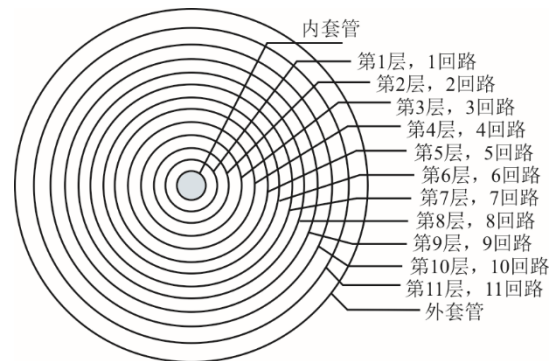


图 1 HOTSG 回路划分示意

Fig.1 Schematic diagram of HOTSG circuit division

为准确计算压力、温度及焓值沿管长的变化特性，将每一个计算回路沿工质流动方向划分为若干个具有一定长度的换热管。管段中各个位置处的热负荷以及流动结构等参数完全相同。在每一个管段中，通过管段的进、出口工质参数，判断管段内的流动状态进行分类计算。图 2 为沿高度方向 HOTSG 换热管的热流密度分布。图 3 为流动回路管段划分示意，每个螺旋管回路共划分约 70 个管段。

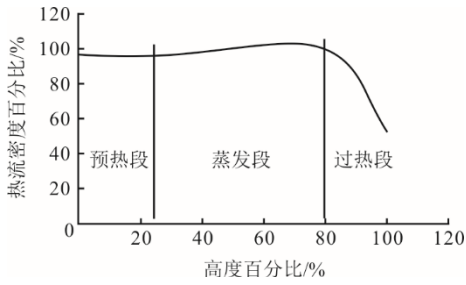


图 2 受热部分热流密度分布
Fig.2 Distribution diagram of heat flux density in the heated part

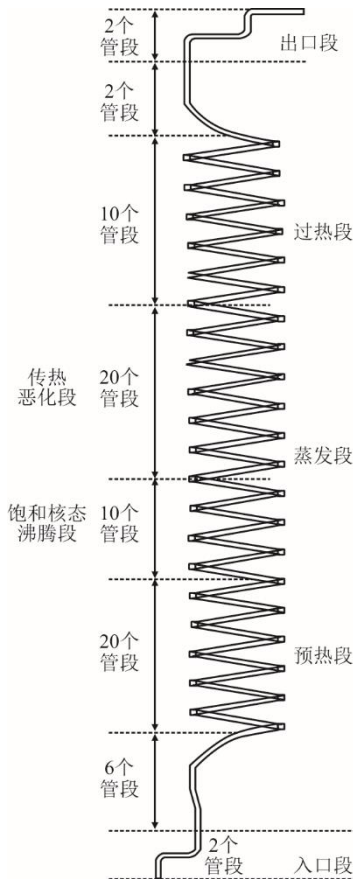


图 3 管段划分示意
Fig.3 Schematic diagram of pipe section division

图 4 为本文计算蒸汽发生器的流动网络流动回路、压力节点编号示意。

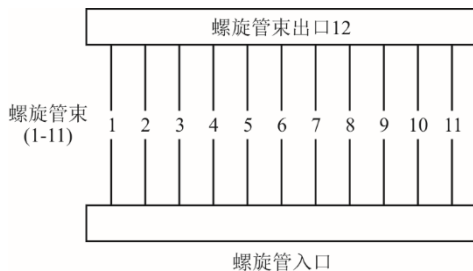


图 4 网络流动系统示意
Fig.4 Schematic diagram of network flow system

1.2 计算模型

对蒸汽发生器各回路的流量及节点的压力等这些未知量进行假设，以列出回路、连接管和节点所遵循的质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程。对这些方程组成的封闭非线性方程组进行求解，即可得到各回路的流量分配和节点压力分布。

设回路 1—11 单管质量流量为 $Q_i(i=1,2,\dots,11)$ ，回路管子根数为 $n(i)$ ，可建立压力平衡方程和流量平衡方程组成的非线性方程组。利用拟牛顿迭代法对由流动回路和压力节点所建立的非线性方程组进行迭代求解，便可得到整个螺旋管蒸汽发生器中所划分回路的流量大小以及压力节点的压力值。计算流程思路示意如图 5 所示。图中 k 为迭代次数， i 为计算回路， j 为回路的管段数， l 为回路最大数， m 为压力节点数编号， n 为压力节点编号最大数，压力节点数的编号为回路最大数后的继续编号。 ϵ 、 δ 分别为压力平衡方程 f_l 及流量平衡方程 f_m 最大误差。

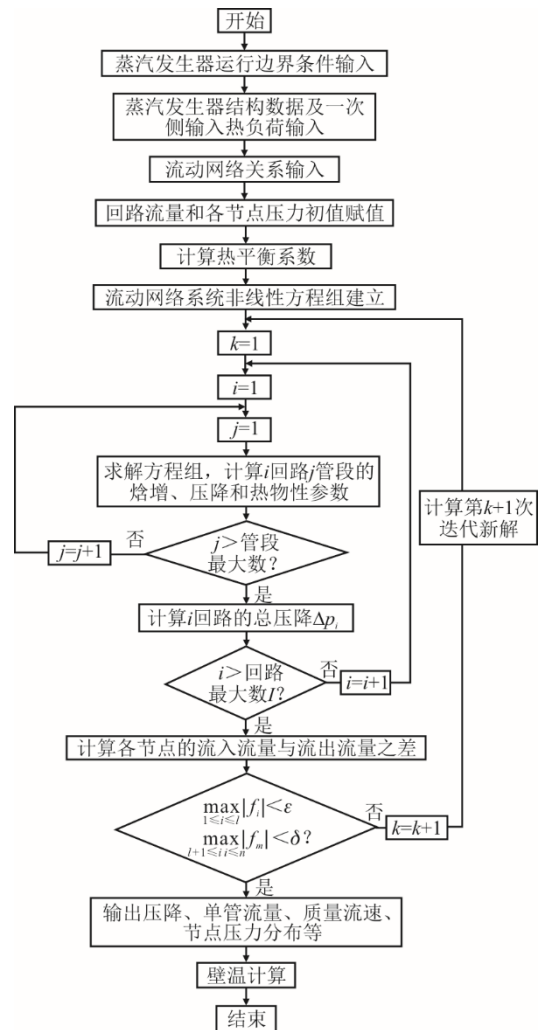


图 5 计算流程示意
Fig.5 Calculation process diagram

1.2.1 压力平衡方程

对于螺旋管束而言, 由于处于相同的上、下联箱之间, 故其工作压力也相同。处于相同上、下联箱之间的第 i 根管子的压降 Δp_i 即上、下联箱间压降与管内工质质量流量 Q_i 之间存在一定关系, 如式(1)所示:

$$\Delta p_i = \phi_i(Q_i), \quad i=1, 2, \dots, 11 \quad (1)$$

式中: ϕ_i 为管子 i 内工质质量流量 Q_i 与压降 Δp_i 之间的函数关系。

螺旋管入口、螺旋管出口两压力节点间的压力平衡方程为:

$$0 = p_{in} - p(12) - \Delta p(i), \quad i=1, 2, \dots, 11 \quad (2)$$

式中: p_{in} 为螺旋管入口压力, Pa; $p(12)$ 为螺旋管出口压力, Pa; $\Delta p(i)$ 为第 i 回路的总压降, 是 i 回路的质量流量 Q_i 的函数。

1.2.2 流量平衡方程

式(3)给出了螺旋管束出口 12 号节点的质量守恒的方程。

$$0 = Q - \sum Q_i \quad (3)$$

式中: Q 为给水总流量, kg/s。

式(1)、式(2)、式(3)可转换为:

$$\begin{cases} f(i) = \Delta p - \phi_i(Q_i) \\ f(i+1) = Q - \sum_{i=1}^{11} Q_i \end{cases}, \quad i=1, 2, \dots, 11 \quad (4)$$

即方程组

$$f_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_{11}, \Delta p) = 0, \quad m=1, 2, \dots, 12 \quad (5)$$

采用拟牛顿迭代法对上述非线性方程组进行求解, 从而得到各回路的质量流量以及压力节点的压力值。

1.2.3 能量守恒方程

能量守恒方程用来计算回路各管段内的工质参数, 每个回路管段的入口热力参数为上一管段的出口参数, 受热边界条件为蒸汽发生器设计参数, 管内工质参数调用水蒸气物性函数查询。可用能量守恒方程计算所划分回路在各划分管段的出口焓值, 如下式所示:

$$h_{out} = h_{in} + \frac{qsl}{w} \quad (6)$$

式中: h_{in} 为螺旋管入口焓值, J/kg; q 为热流密度, W/m^2 ; s 为管子节距, m; w 为单管质量流速, kg/s。

此外, 根据传热学原理和文献[16], 结合螺旋管几何结构、内壁换热系数、管子导热系数、管外流密度计算管壁金属温度。

1.2.4 螺旋管传热系数及摩擦阻力系数

流体在螺旋管内流动时的一个显著特点就是在垂直于主流方向的流动截面上产生了二次回流, 这将引起管内换热加强, 同时导致管道流动阻力增大。

换热方面, 螺旋管内工质依次经过欠焓单相流动、两相流动及蒸干后两相流动、过热单相流动等状态, 对应流动状态选择现有文献经验公式^[10,17-21], 其中欠焓单相流动和过热单相流动参考修正的 D-B 公式^[20,22], 两相流动采用 Chen 关系式^[19], 换热计算还包括临界干度判断准则及干涸后传热计算公式, 蒸干后流动传热参考 Miropolskiy 关系式^[17,20]。

阻力计算包括摩擦阻力计算、重位压降、局部阻力, 因加速压降占比非常小, 忽略加速压降计算。单相流体及两相流体的阻力计算方法参考国内相关标准^[23]。而在摩擦阻力计算方面, 国内外学者对螺旋管内湍流摩擦阻力已进行了大量研究, 相应提出了很多摩擦阻力系数的经验公式^[17,24-26]。根据公式适用范围, 结合蒸发器螺旋管束内流动特点, 本文计算引入适用于螺旋管内流动的摩擦阻力系数^[26] (式(7)), 该经验公式合理地考虑了螺旋管道表面粗糙度对摩擦阻力的影响, 适用于螺旋管内整个湍流区 (包括水力光滑区、粗糙过渡区和水力粗糙区)。

$$\lambda = 0.11 \left[\frac{A}{d} + 87Re^{-0.8} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.4} \right]^{0.25} \quad (7)$$

式中: λ 为螺旋管摩擦阻力系数; A 为表面粗糙度, m; d 为管子内径, m; Re 为雷诺数; D 为螺旋直径, m。

2 计算模型验证

为验证计算模型的可靠性, 以 IRIS 螺旋管式直流蒸汽发生器为参考对象, 对比本文计算结果和公开文献的计算结果^[18,20], IRIS 蒸汽发生器设计参数见表 1。

表 1 IRIS 蒸汽发生器设计参数
Tab.1 Design parameters of IRIS steam generator

项目	数值
螺旋管数/根	655
螺旋管内径/mm	13.24
螺旋管外径/mm	17.46
有效高度/m	7.90
平均长度/m	32.00
流量/(kg·s ⁻¹)	62.50
二次侧入口温度/°C	223.95
二次侧出口温度/°C	317.00
二次侧入口压力/MPa	6.096
二次侧出口压力/MPa	5.800

计算螺旋管蒸汽发生器内螺旋管工质温度随管长的变化，并与公开文献计算数据对比，结果如图 6 所示。由图 6 可以发现，3 种计算方法工质温度的变化趋势和数值基本一致，工质从过冷至两相区曲线吻合度高，但本文计算程序计算工质过热较为提前，此外本文计算方法考虑了螺旋管出口引出部分不受热，因此工质温度在出口段未变化。3 种计算方法得到的管出口蒸汽均为过热蒸汽，与设计值误差为-0.99%，出口蒸汽温度与 RELAP5 和文献 [18] 计算结果误差分别为-0.46%、-1.63%。管路进、出口总压降计算值为 0.34 MPa，设计值二次侧压差为 0.3 MPa，本文压降计算模型偏保守，但在合理范围内。表明本文计算模型能够适用于螺旋管式蒸汽发生器的计算。

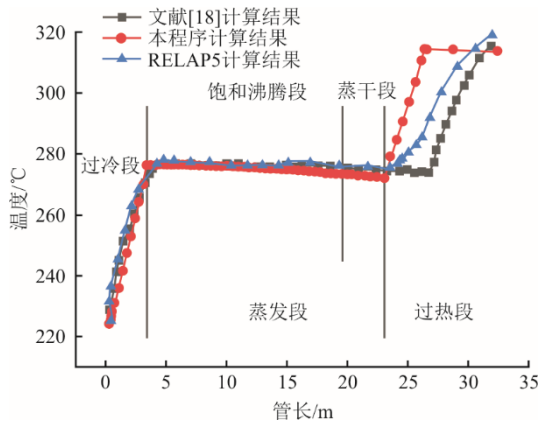


图 6 IRIS 蒸汽发生器螺旋管内工质温度计算对比
Fig.6 Comparison of fluid temperature calculation inside the spiral tube of IRIS steam generator

3 计算结果分析

3.1 压降计算结果

根据计算结果，包含进出口连接管在内的蒸汽发生器螺旋管束入口至螺旋管束出口的压降为 0.595 MPa。

各回路单根螺旋管的压降如图 7 所示。因每根螺旋管长度一致，故每根管沿程摩擦阻力基本相同；因各层管子相对高度相近，重力压降差距不大；因每根管特别设计了节流元件，保证了各管局部阻力压降相近。总体来说，每根螺旋管总压降基本相同，局部阻力约 68.90%，摩擦阻力约 29.60%，重力压降约 1.41%。

3.2 回路质量流量和质量流速计算结果

表 2 给出了计算得到的螺旋管蒸汽发生器各回路单管流量分配情况。

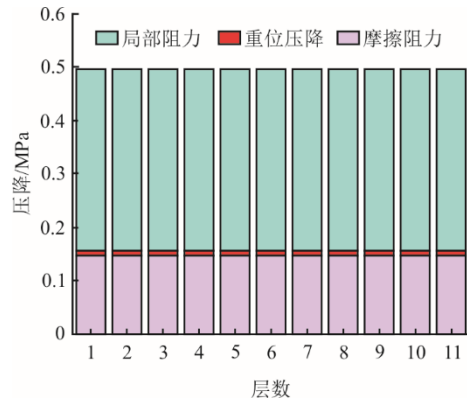


图 7 螺旋管蒸汽发生器各回路单管压降分布
Fig.7 Pressure drop distribution of single tube in each circuit of helical coiled tubes steam generator

表 2 各回路单管质量流量和质量流速
Tab.2 Mass flow and mass flow rate of single pipe in each circuit

回路号	质量流量/(kg·s ⁻¹)	质量流速/(kg·(m ² ·s) ⁻¹)
1	0.222 648	980.916 2
2	0.217 250	957.130 9
3	0.224 098	987.303 8
4	0.220 067	969.542 0
5	0.224 810	990.438 7
6	0.221 920	977.706 7
7	0.225 236	992.315 0
8	0.222 664	980.982 7
9	0.220 502	971.461 4
10	0.223 285	983.722 7
11	0.221 610	976.341 0

从表 2 可以看出，各回路单管质量流量存在较小差别，除结构的流动阻力影响外，其主要原因是螺旋管纵向受热高度不同，螺旋管蒸汽发生器热负荷大小与流量分布呈负相关。总体而言，每层螺旋管因为总压降基本相同，所以流量分布偏差较小。各层螺旋管数量均不相同，管子数量从第 1 层至 11 层逐渐递增，根据计算的单管质量流量可以得到每层的质量流量，各层螺旋管质量流量分布如图 8 所示。由图 8 可以看出，流量从里层至外层逐渐增大。

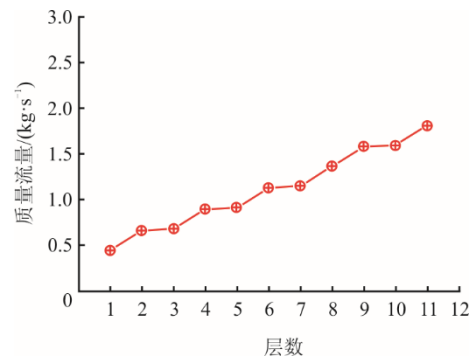


图 8 螺旋管蒸汽发生器各层质量流量分布
Fig.8 Mass flow distribution of each layer in helical coiled tubes steam generator

图9给出了计算得到的螺旋管蒸汽发生器各层单管质量流速分布情况。每层换热管的内径结构均相同，单根管的质量流速与质量流量分布规律一致，最大的流量偏差为第2层单管，为-2.2%。因设计时单根管的长度均一致，第2层管倾角较大受热高度最大，因此受热最强，在并联管路的直流蒸汽发生器中流量和质量流速最小。

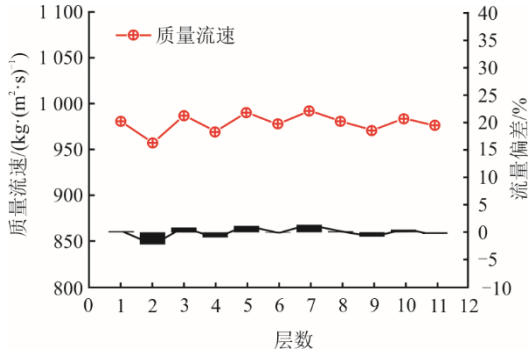


图9 螺旋管蒸汽发生器各层单管质量流速分布
Fig.9 Mass flow velocity distribution of single tube in each layer of helical coiled tubes steam generator

3.3 回路出口焓值和汽温分布计算结果

图10和图11分别为螺旋管蒸汽发生器各回路出口工质焓值分布和温度分布。

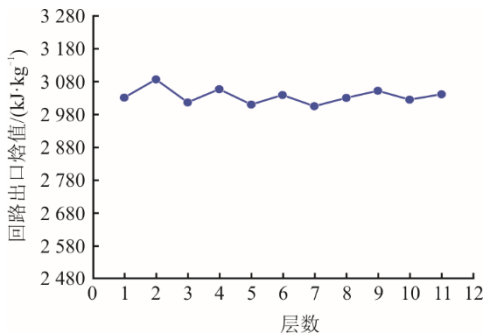


图10 螺旋管蒸汽发生器各回路出口焓值分布
Fig.10 Distribution of enthalpy values at outlet of each circuit of helical coiled tubes steam generator

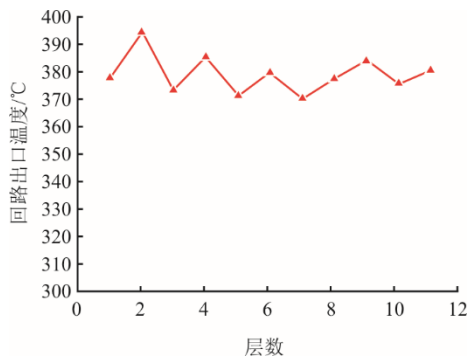


图11 螺旋管蒸汽发生器各回路出口汽温分布
Fig.11 Distribution of outlet steam temperature in each circuit of helical coiled tubes steam generator

可以看出，蒸汽发生器各回路的出口温度分布和焓值分布规律相同，流量较小回路的出口蒸汽温度值较高。第2回路（即第2层）出口汽温最高，为394.4℃；第7回路（即第7层）出口汽温最低，为370.3℃，最大汽温偏差为24.1℃。

3.4 壁温分布等计算结果

图12示出了螺旋管蒸汽发生器第1回路（第1层）的工质温度、内壁温度、中间壁温、外壁温度沿蒸汽发生器高度方向的变化曲线。图13示出了第1层螺旋管干度、换热系数、热流密度沿蒸汽发生器高度方向的变化情况。

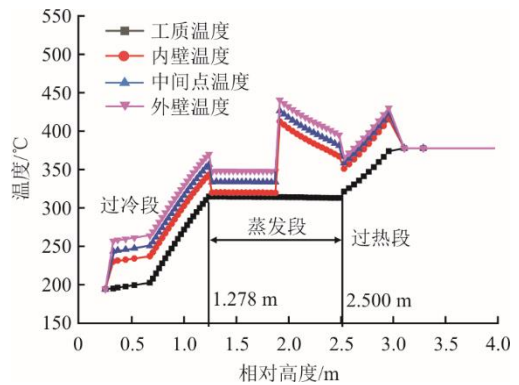


图12 螺旋管蒸汽发生器第1层螺旋管温度分布
Fig.12 Temperature distribution of the first layer helical coiled tubes in steam generator

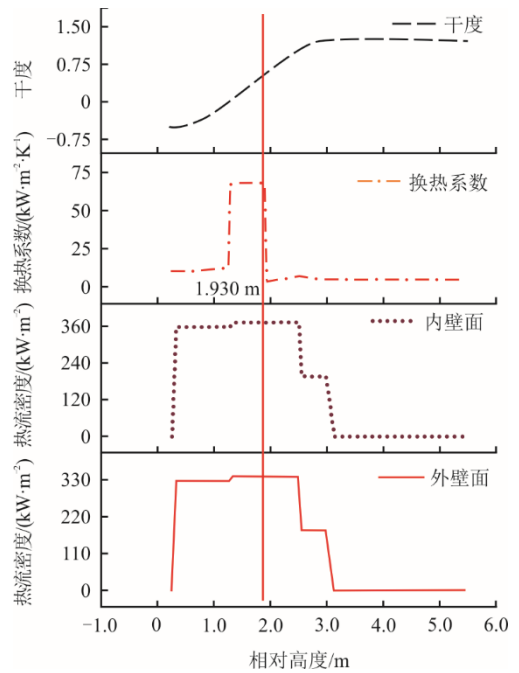


图13 第1层螺旋管干度、换热系数、热流密度分布
Fig.13 Distribution of dryness, heat transfer coefficient, and heat flux density of the first layer helical coiled tubes

以第1回路为例，可以看出：工质刚开始处于

单相区,因此工质温度随相对高度的增加而增加,壁温也随之升高;随后在相对高度 1.278 m 处工质进入两相区,工质温度几乎不变,随着换热系数增大,壁温减小;在相对高度 1.930 m 处管内发生蒸干传热恶化,换热系数大幅减小,壁温出现较大飞升,外壁温从 348 °C 升高至 442 °C,对应临界干度为 0.57;但蒸干发生后,随着高度增大,壁温再逐渐减小;在相对高度 2.500 m 左右处,工质达到过热状态,工质温度升高,管壁温度也随之升高,最高外壁温度为 442 °C,最高中间点温度为 428 °C;最后,由于螺旋管段出口处不受热,因此壁温减小,和工质温度相同。

图 14 示出了螺旋管蒸汽发生器第 5 回路(第 5 层)的工质温度、内壁温度、中间壁温、外壁温度沿蒸汽发生器高度方向的变化曲线。

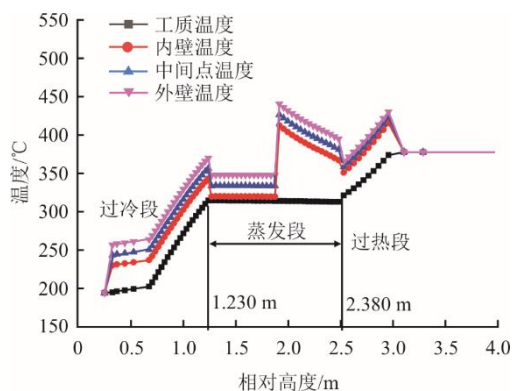


图 14 螺旋管蒸汽发生器第 5 层螺旋管温度分布
Fig.14 Temperature distribution of the fifth layer helical coiled tubes in steam generator

图 15 示出了第 5 层螺旋管干度、换热系数、热流密度沿蒸汽发生器高度方向的变化情况。需要说明的是干度热力学定义为 $[0,1]$,文章计算时为了区分“过冷区”和“过热区”工质,图示干度有小于 0 或大于 1 的数。

对于第 5 回路,在相对高度 1.230 m 处工质进入两相区,工质温度几乎不变,随着换热系数增大,壁温减小;在相对高度 1.847 m 处管内发生蒸干传热恶化,换热系数急剧减小,壁温大幅飞升,外壁温从 348 °C 升高至 443 °C,对应临界干度为 0.56;蒸干发生后,随着高度增大,壁温再逐渐减小;在相对高度约 2.380 m 处,工质达到过热状态,工质温度升高,管壁温度也随之升高,最高外壁温度为 443 °C;由于螺旋管段出口处不受热,因此壁温减小,和工质温度相同。

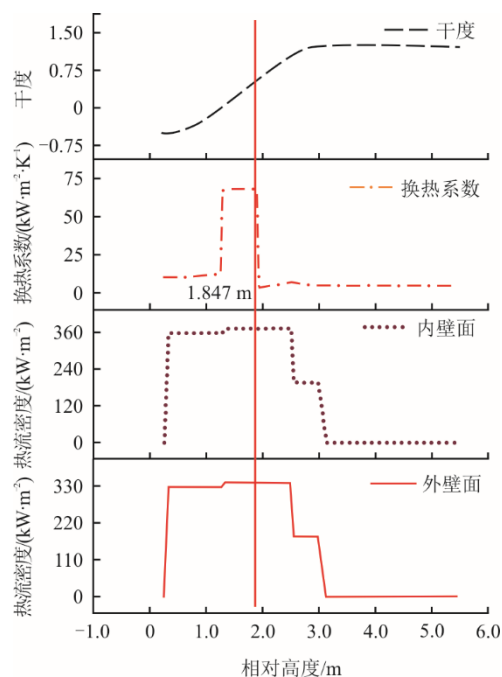


图 15 第 5 层螺旋管干度、换热系数、热流密度分布
Fig.15 Distribution of dryness, heat transfer coefficient, and heat flux density of the fifth layer helical coiled tubes

4 结 论

本文将液态金属堆螺旋管蒸汽发生器等效为流动网络系统,并建立计算模型,将每层螺旋管束划分为 1 个回路,基于质量守恒、动量守恒和能量守恒方程建立数学模型,并通过对非线性方程组的求解得到螺旋管束的流量、压降、工质温度、出口汽温、壁温、干度、换热系数等分布情况,通过公开文献计算案例验证了计算模型的适用性,并得到如下结论。

1) 螺旋管蒸汽发生器每根螺旋管总压降基本相同,局部阻力约 68.90%,摩擦阻力约 29.60%,重力压降约 1.41%。

2) 螺旋管蒸汽发生器每根螺旋管因总压降基本相等,所以流量分布偏差较小。各管质量流量的差别是因为管子纵向受热高度的不同,热负荷大小与流量分布呈现负相关。

3) 蒸汽发生器各层螺旋管的出口温度分布和焓值分布规律相同,流量较小的层数相应出口蒸汽温度值较高。

4) 计算得到各层螺旋管的热工水力特性参数分布情况,第 1 层螺旋管在 1.930 m 处管内工质发生蒸干传热恶化,换热系数大幅减小,外壁温从 348 °C 升高至 442 °C,对应临界干度为 0.57。第 1 层螺旋管最高外壁温度为 442 °C,最高中间点温度

为 428 ℃。

5) 该计算模型能够揭示液态金属堆螺旋管蒸汽发生器所有螺旋管的压力、流量分布情况,并可计算得到各层螺旋管在不同相对高度的工质温度、壁面温度、干度以及换热系数情况,获得蒸汽发生器螺旋管束流动传热特性。此研究完善了螺旋管蒸汽发生器热工水力分析计算,具有一定的参考意义。

[参 考 文 献]

- [1] SOBOLEV V. Thermophysical properties of lead and lead-bismuth eutectic[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 362(2/3): 235-247.
- [2] 毕勤成, 陈昕宽, 田永生, 等. 螺旋管内高压汽水两相流传热恶化规律的研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 30-35.
BI Qincheng, CHEN Tingkuan, TIAN Yongsheng, et al. Study on critical heat flux of steam-water two-phase flow in helical coil tubes[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 1996, 30(5): 30-35.
- [3] 杨宇鹏, 王成龙, 张大林, 等. 液态金属螺旋管式直流蒸汽发生器数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(7): 1288-1295.
YANG Yupeng, WANG Chenglong, ZHANG Dalin, et al. Numerical study of liquid metal helical coil once-through tube steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(7): 1288-1295.
- [4] ALEMBERTI A, CARLSSON J, MALAMBU E, et al. European lead fast reactor-ELSY[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(9): 3470-3480.
- [5] DRAGUNOV, YU G, LEMEKHOV V V, et al. Lead-cooled fast-neutron reactor BREST[C]// Proceedings of International Scientific and Technical Conference. Moscow, 2014.
- [6] 赵孝, 张震, 杨星团, 等. 小型模块式反应堆螺旋管蒸汽发生器设计和热工水力分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2361-2366.
ZHAO Xiao, ZHANG Zhen, YANG Xingtuan, et al. Design and thermal hydraulic analysis of helically coiled tube steam generator in small modular reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(12): 2361-2366.
- [7] 黄晓津, 冯元琨, 郭人俊. HTR-10 螺旋管直流蒸汽发生器实时动态模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000(6): 88-90.
HUANG Xiaojin, FENG Yuankun, GUO Renjun. Real time dynamic model of helical coils in HTR-10 steam generator[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000(6): 88-90.
- [8] 李晓伟, 吴莘馨, 张作义. 高温气冷堆螺旋管式直流蒸汽发生器热工水力学[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 1906-1917.
LI Xiaowei, WU Xinxin, ZHANG Zuoyi. Thermal hydraulics of HTGR helical tube once through steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 1906-1917.
- [9] 马腾跃, 王鹏飞, 许忠斌, 等. 蒸汽发生器换热管流量分配及其对核主泵入口流场的影响[J]. 核动力工程, 2018, 39(4): 58-62.
MA Tengyue, WANG Pengfei, XU Zhongbin, et al. Flow distribution of heat exchanger tubes in a steam generator and its effect on flow field at entrance of reactor coolant pump[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(4): 58-62.
- [10] 刘佳伦, 李会雄, 张顺哲, 等. 基于漂移流模型的液态金属快堆螺旋管蒸汽发生器热工水力特性分析[J]. 核动力工程, 2023, 44(3): 79-89.
LIU Jialun, LI Huixiong, ZHANG Shunzhe, et al. Analysis on thermal hydraulic characteristic of helical coiled tube steam generator of liquid metal fast reactor based on drift-flux model[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(3): 79-89.
- [11] 秦长平. 紧凑式小型反应堆直流盘管蒸汽发生器热工水力研究[D]. 北京: 中国科学院, 2016: 1.
QIN Changping. Thermal-hydraulic study on once through steam generators applied in small integrated reactors[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2016: 1.
- [12] 袁媛. 螺旋管式直流蒸汽发生器建模与仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015: 1.
YUAN Yuan. Research on modeling and simulation of helical coil tube type once-through steam generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015: 1.
- [13] HOFFER N V, SABHARWALL P, ANDERSON N A. Modeling a helical-coil steam generator in RELAP5-3D for the next generation nuclear plant[R]. Idaho National Laboratory, 2011: 1.
- [14] BAYLESS P D. RELAP-5/MOD 3.2 assessment using an 11% upper plenum break experiment in the PSB Facility[R]. Idaho National Lab, 2003: 1.
- [15] 李文哲. 铅冷快堆螺旋管式直流蒸汽发生器一、二次侧耦合传热数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024: 1.
LI Wenzhe. Numerical study of coupled heat transfer in primary and secondary sides of LFR helical coiled once-through steam generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024: 1.
- [16] 马玉华, 邢长清, 徐君诏, 等. 深度调峰负荷时亚临界自然循环锅炉水循环安全计算与分析[J]. 热力发电, 2018, 47(10): 108-114.
MA Yuhua, XING Changqing, XU Junzhao, et al. Safety calculation and analysis for thermal-hydraulic circulation of a subcritical natural circulation boiler at severe peak load regulation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(10): 108-114.
- [17] MORI Y, NAKAYAMA W. Study on forced convection heat transfer in curved pipes (2nd report, turbulent region)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1967, 10: 37-59.
- [18] 袁媛, 彭敏俊, 夏庚磊, 等. 螺旋管式直流蒸汽发生器热工水力分析模型[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增刊 1): 251-256.
YUAN Yuan, PENG Minjun, XIA Genglei, et al. Thermal hydraulic model for helical coil once through steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl.1):251-256.
- [19] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1966, 5(3): 322-329.
- [20] 连强, 田文喜, 秋穗正, 等. 基于 RELAP5 的螺旋管蒸汽发生器热工水力程序研发与验证[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(6): 1007-1013.
LIAN Qiang, TIAN Wenxi, QIU Suizheng, et al. Code development and validation for thermal-hydraulic

- analysis of helical coil steam generator based on RELAP5[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(6): 1007-1013.
- [21] 徐济璿. 沸腾传热和汽液两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: 1.
XU Jiyun. Boiling heat transfer and gas-liquid two-phase flow[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001: 1.
- [22] 周云龙, 孙斌, 张玲, 等. 多头螺旋管式换热器换热与压降计算[J]. 化学工程, 2004, 32(6): 27-34.
ZHOU Yunlong, SUN Bin, ZHANG Ling, et al. Calculation and application of heat transfer and pressure drop in heat exchanger with multi-start helical coiled tubes[J]. Chemical Engineering, 2004, 32(6): 27-34.
- [23] 电站锅炉水动力计算方法: JB/Z 201—1983[S]. 上海: 上海发电设备成套设计研究所, 1983: 1.
The national standard of the boiler hydrodynamics calculation: JB/Z 201—1983[S]. Shanghai: Shanghai Power Generation Equipment Complete Design and Research Institute, 1983: 1.
- [24] ITO H. Friction factors of turbulent flow in curved pipes[J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1959, 81: 123-134.
- [25] SRINIVASAN P, NANDAPURKAR S, HOLLAND F. Pressure drop and heat transfer in coils[J]. The Chemical Engineering Journal, 1968, 218: 113-119.
- [26] 毛宇飞, 齐伟, 刘庆君. 螺旋管内单相湍流摩擦阻力计算方法新探[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(4): 20-24.
MAO Yufei, QI Wei, LIU Qingjun. New method of calculating friction resistance of single phase turbulent flow in helical coils[J]. Process Equipment & Piping, 2015, 52(4): 20-24.

(责任编辑 邓玲惠)