

盘管直流蒸汽发生器两相段计算模型

曹丹, 张佑杰

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:文章构造盘管直流蒸汽发生器(SG)两相段计算模型。采用四方程漂移流模型,对盘管直流 SG 的两相段传热进行进一步划分。选用适当的结构关系式和传热关系式,用数值方法进行了盘管 SG 的稳态分析。

关键词:盘管直流蒸汽发生器;两相流模型;热工计算

中图分类号:TL332 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2006)05-0549-04

Calculating Model for Two-Phase Flow Section of Once-Through Helical-Coiled Steam Generator

CAO Dan, ZHANG You-jie

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A two-phase section calculating model for once-through helical-coiled steam generator was developed. Nonequilibrium four-equation drift-flux model was adopted and the two-phase flow section of once-through helical-coiled steam generator was divided into more subsections. Suitable structure property equations and heat transfer equations were adopted, and steady state analysis for once-through helical-coiled steam generator was carried out by numerical method.

Key words: once-through helical-coiled steam generator; two-phase flow model; thermal calculation

盘管型直流蒸汽发生器(SG)在核电站、核动力设备、化工和石油工程中具有广泛的应用。与直管型直流 SG 相比,盘管型直流 SG 具有热膨胀自由、布置紧凑、高度大比例降低等结构特点。盘管直流 SG 热工分析是核电站安全分析的一项重要内容^[1],且可以为 SG 的结构设计、自动调节系统设计、异常工况的监测与处理以及运行规程的编制提供必要的依据。

本文采用四方程漂移流模型,用数值模拟计算的方法对盘管直流 SG 进行稳态分析,并对 SG 二次侧蒸发段的计算模型进行改进,在此基础上开发直流 SG 热工分析程序。

1 计算模型

1.1 流场守恒方程组

建立直流 SG 的数学模型的关键在于建立

汽液两相流流动及传热的数学模型。本文采用四方程的漂移流模型。漂移流模型中采用代表两相介质横向分布的量和代表两相之间局部相对速度的量来描述两相流的特性。漂移模型整体上具有均匀流模型的特点,如求解简单,同时又可表现出两相流的局部特性。折衷选用了漂移流模型作为建立盘管 SG 热工分析的计算模型。

针对盘管内两相流体向上流动这一具体现象,模型作如下假设:1) 每根盘管组件的流量和受热均相同;2) 同一横截面上汽、液两相压力相等;3) 使用一维模型,忽略轴向导热;4) 不考虑表面张力对混物流场的动量及能量影响;5) 不考虑由于界面及介质脉动引起的效应;6) 忽略界面剪切力的功、动能和重位势能;7) 弥散相处于饱和状态;8) 一次水侧压力恒定;9) 流体的动能和重位势能与流体的比焓相比可忽略,流体的总能中只考虑流体的比焓;10) 在计算某一工况的稳态或动态分布时,饱和水和饱和汽的密度恒定不变。

流场守恒方程组如下。

1) 二次水-水蒸气侧守恒方程

混合物质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v_m)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m 为混合物密度(kg/m^3); v_m 为混合物质心速度(m/s)。

汽相质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\alpha \rho_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho_v v_m)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_v (1-\alpha) \rho_l v_r}{\rho_m} \right] = \Gamma \quad (2)$$

式中: α 为空泡份额; ρ_v 为汽相密度(kg/m^3); ρ_l 为液相密度(kg/m^3); v_r 为汽液两相相对速度差(m/s); Γ 为单位体积蒸汽产生率($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)。

混合物动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_m}{\partial t} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial z} + \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha(1-\alpha) \rho_l \rho_v v_r^2}{\rho_m} \right] = \\ - \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g \sin \phi + \frac{1}{\rho_m} f_{\text{vis}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: p 为汽相或液相压力(Pa); f_{vis} 为由壁面摩擦引起的压降梯度(Pa/m)。

混合物能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_m}{\partial t} + v_m \frac{\partial e_m}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\rho_m \partial z} \cdot \\ \left[\frac{\alpha \rho_v (1-\alpha) \rho_l (e_v - e_l) v_r}{\rho_m} \right] = \frac{4q_1}{\rho_m \pi d^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: e_m 为混合物总能(J/kg); e_l 为液相总能(J/kg); e_v 为汽相总能(J/kg); q_1 为单位管长的壁面热流量(W/m); d 为螺旋管的管内径(m)。

2) 一次水侧守恒方程

参照 1.1 节中的假设条件 8), 不考虑一次水侧动量方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + v \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{q}{\rho} \quad (6)$$

式中: ρ 为密度(kg/m^3); v 为质心速度(m/s); e 为总能(J/kg); q 为单位体积热流量(W/m^3)。

1.2 结构关系式的选择

二次水侧的 4 个场方程涉及 13 个未知变量: p 、 α 、 v_m 、 e_m 、 e_v 、 e_l 、 ρ_m 、 ρ_v 、 ρ_l 、 Γ 、 v_r 、 q_1 、 f_{vis} 。选择其中的 p 、 α 、 v_m 、 ρ_m 作为主要场变量,它们通过求解 4 个守恒方程得到,其余的 9 个变量需补充相关的结构关系式进行计算。

结构关系式的选取遵循以下原则^[1]。

1) 选择适合盘管热工计算的结构关系式。

选择范围:(1) 为研究某些特定管型的盘管 SG 的特性所设专项实验研究总结中的有关经验关系式;(2) 某些盘管直流 SG 热工水力稳态设计中选用的关系式,该关系式的可信度较高,计算裕度较大;(3) 其它有关两相流和流动沸腾传热的文献中推荐的关系式,选用此类关系式时要注意关系式的使用条件和准确度。

2) 关注选择的结构关系式与传热工况的判断逻辑相协调。若不协调,因强烈的非线性作用,直流 SG 模型误差增大,在数值求解中易发散。

为使模型的基本方程组封闭,求得合理的解,且保证数值求解的收敛性与稳定性,真实含气率采用 Levy 公式^[2],相间相对速度 v_r 采用由两流体模型汽、液两相动量方程导出的微分关系式^[3]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \{ v_r v_m + 0.5 v_r^2 [\rho_l (1-\alpha) - \rho_v \alpha] / \rho_m \} =$$

$$\left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}\right) \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{K \rho_m v_r}{\rho_v \rho_l \alpha (1 - \alpha)} \quad (7)$$

式中: 相间动量传递系数 $K = \frac{\rho_m A_1}{8 \alpha_1} \cdot (C_d |v_r| + \frac{12\nu}{r_0})$, ν 为空泡份额和运动粘度的函数; r_0 为汽泡半径; A_1 为混合物体积中的汽液边界面积; C_d 为两相之间的阻力系数, 本文取为 0.5。

1.3 方程的离散化方法

稳态计算所采用的流场方程是将守恒方程中关于时间的微分项去除后的守恒方程, 即所有的微分项都是关于流场空间的微分函数。本文采用交错差分格式对稳态方程进行差分处理, 以得到描述稳态流场的线性方程组。

交错差分格式的作用在于将描写动量方程的控制体和描写标量方程的控制体进行互相交错的排列(图 1)。图 1 中的实线代表标量控制体的边界, 虚线代表动量控制体的边界; $i-1$, i 和 $i+1$ 等整数坐标点位于网格单元中心, 所有热力学变量, 如压力 p 、焓 h 等均位于网格单元的中心; 速度等矢量参数均分布在网格单元的边缘。

实际计算中的网格划分按标量单元进行划分。为写出完整的差分方程, 并使方程稳定, 需在差分微元体上使用施主平均法^[2], 即: 如果 $v_{i+1/2} \geq 0$, 则 $\rho_{i+1/2} = \rho_i$; 如果 $v_{i+1/2} < 0$, 则 $\rho_{i+1/2} = \rho_{i+1}$ 。

进行隐式有限差分处理后, 即可得到离散化的稳态方程组。整个场方程组成为 1 个含有 4 个主要未知数 v_m 、 α 、 p 和 e_m 的线性方程组。结合结构关系式, 通过代数迭代运算即能求解出整个流场的参数分布。

1.4 传热公式

SG 稳态计算通常分为 3 段: 两相段、蒸发段、过热段。本文对两相段的流场进行了进一步的细分, 考虑了两相段随液体不断汽化而相继出现的传热工况区(欠热泡核沸腾区、饱和泡

核沸腾区、恶化沸腾区), 确定各工况的分界点并采用不同的结构关系式, 从而提高了 SG 稳态热工计算的精度。不同传热区选用相应的传热公式, 并需经过对盘管的修正。传热公式的引用还需考虑流型, 根据盘管中流体不同的流型选用不同的传热公式。

考虑到不同盘管的弯曲半径会产生大小不同的离心力, 从而对流体的流型产生影响, 所以, 为在流型判定的过程中考虑螺旋半径对流型的影响, 引入了狄恩数, $De = Re \sqrt{\frac{D}{2R}}$ 。具体的划分准则^[4]如下:

- 1) 对单相液体对流传热区, 采用 Dittus-Boelter 关系式^[5];
- 2) 始沸点温度, 采用 Thom 提出的用于计算泡核沸腾(包括欠热沸腾)传热的计算公式;
- 3) 对欠热泡核沸腾传热区, 采用修正的 Chen 换热系数关系式^[4];
- 4) 饱和点温度, 根据水和水蒸气的物性公式计算;
- 5) 对饱和泡核沸腾传热区, 选用 Chen 关系式^[4];
- 6) 蒸干点温度, 采用 Biasi 关系式计算达到临界热流密度时的壁温;
- 7) 对恶化沸腾传热区, 选用 Miropolskiy 关系式^[4];
- 8) 对单相蒸汽对流传热区, 采用与单相液体传热类似的关系式, 并需乘以螺旋管修正系数, 所有水的物性参数均换成单相蒸汽的物性参数。

本文采用的传热公式主要针对大盘管。对修正条件稍作调整后适用于小盘管。对于一些特殊型式的盘管结构, 还需补充相应的结构关系式和传热公式。

1.5 边界条件和计算过程

为保证具有确定的单值解, 稳态计算中需确定进出口的 3 个边界条件: 1) SG 二次侧入



图 1 交错网格示意图

Fig. 1 Sketch of staggered grid

口参数;2) SG 二次侧出口蒸汽的温度;3) SG 一次侧水的流量和压力。

计算中将 SG 沿螺旋管方向划分网格。整个计算过程从 SG 底部二次侧入口开始,通过一、二次侧的耦合计算,递推计算出所有流场的节点参数。划分网格不能过大或过细,过大造成计算结果不准确和换段效应,过细则会因系统的强烈非线性而导致迭代计算过程中出现溢出错误。另外,一次水侧的流动属于螺旋管的外侧流动,流场网格的划分一、二次侧具有不同的空间步长和几何特性参数,在换热的耦合计算中需进行换算。大盘管 SG 的螺旋半径各圈不等,须分别计算各圈的流场参数分布以得到总传热量。

2 结构条件和盘管 SG 热工分析程序

在进行 SG 设计和热工计算时,需先设定蒸发器的结构参数。在前文热工分析基础上,编制了盘管直流 SG 的热工分析程序。程序具有盘管 SG 结构设计辅助程序,先进行 SG 排管计算,根据输入预置参数确定 SG 的螺旋半径、管间距、排管圈数等结构参数,然后进入流场稳态分析程序,得出 1 套完整的热工参数,并与排管计算得出的结构参数相校核。排管计算具有较大的灵活性,输入参数和输出参数可以多种组合形式互换。

采用细分后的两相段计算模型可得出更为细致和准确的 SG 热工参数及相关结构参数。鉴于一般稳态计算均具有较大的裕度,本文的计算模型可为蒸发器设计和校核计算提供更为精确的参考。

3 结论

比较了两相流数学模型,结合盘管 SG 热工计算的特点,选用四方程漂移流模型作为盘管直流 SG 两相段的数学模型。以往直流 SG 热工计算中,二次侧通常划分为单相过冷水段、蒸发段、过热蒸汽段 3 段,本文通过对两相段物理过程的分析,进行了更为合理的两相段细分,对每个区间选用了不同的针对盘管校正过的传热公式和压力损失计算公式,构成了完整的两相段计算模型,为盘管直流 SG 的设计和校核计算提供了更为完善的分析手段。在此基础上开发了盘管直流 SG 热工分析程序,对于某些特殊结构的盘管 SG 计算留下了修正和扩充的余地,具有良好的可扩展性。

参考文献:

- [1] 黄晓津,冯元琨,郭人俊. HTR-10 螺旋管式直流蒸汽发生器的动态数学模型[J]. 高技术通讯, 2001, (1):96-99.
HUANG Xiaojin, FENG Yuankun, GUO Renjun. Dynamic mathematical model of helical coils of steam generator of HTR-10[J]. Chinese High Technology Letters, 2001, (1): 96-99 (in Chinese).
- [2] 徐济望,鲁钟琪. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京:原子能出版社, 2001.
- [3] 叶桂珍,王洲,杨献勇,等. 快堆螺旋管式直流蒸汽发生器的热工水力分析模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37:35-38.
- [4] 李卫华. HTR-10 蒸汽发生器热工水力学计算说明书[R]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 1997.
- [5] 赵兆颐,朱瑞安. 反应堆热工流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1991.