

蒸汽发生器一次侧阻力估算探讨

王巍

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 介绍了压水堆立式自然循环蒸汽发生器一次侧阻力估算方法。以 AP1000 蒸汽发生器的结构尺寸、热工参数等作为输入条件, 根据此方法一次侧阻力进行计算, 并将计算结果与西屋公司的设计结果进行了比较。

关键词: 蒸汽发生器; 一次侧阻力; PWR

中图分类号: TL353+.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2017)03-0052-03

Calculation of Primary Fluid Pressure Drop for AP1000 Steam Generator

WANG Wei

(Dongfang Electric(Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China)

Abstract: This paper presents a brief methodology of primary fluid pressure drop calculation for vertical natural circulated steam generator in PWR, along with calculations of the primary fluid pressure drop for AP1000 SG with input of data on design specification, etc. Comparison of the result so calculated is made with the values designed by WestingHouse.

Key words: steam generator; primary fluid pressure drop; PWR

立式自然循环的蒸汽发生器作为压水堆核电站核岛系统的关键设备之一, 是联接一回路与二回路的枢纽, 其功能是将一回路冷却剂从反应堆芯带出的热量通过 U 形管进行换热, 将热量传递给二回路的冷却剂, 产生合格品质的蒸汽去推动汽轮机发电。

一次侧冷却剂在蒸汽发生器的一回路侧流动, 一次侧流体的流动阻力(即一回路流体的压降)计算是蒸汽发生器热工水力计算的重要内容之一, 其目的在于通过计算, 得到一回路流体从蒸汽发生器的进口至出口, 流经整个一次侧的总的阻力大小。阻力的大小影响一回路主泵参数的选择, 压降还关系到一回路冷却剂的定性压力及物性参数的选取, 而这些都和蒸汽发生器的热工水力计算息息相关。因此, 采用正确的计算方法, 选择适合的计算公式, 准确且快速有效的计算蒸汽发

生器一次侧阻力大小具有重要意义。

本文介绍了一种快速简便估算压水堆立式自然循环 U 形管式蒸汽发生器一次侧阻力的方法, 按此方法对 AP1000 蒸汽发生器一次侧阻力进行了计算, 并将本文计算结果与西屋公司给出的设计值进行了比较。

1 计算输入参数

1.1 结构参数

一次侧冷却剂阻力, 由冷却剂从蒸汽发生器进口接管至出口接管的流通过程上各部分阻力(包含局部阻力和沿程阻力)之和计算。这些阻力与流通过程上涉及的蒸汽发生器结构尺寸密切相关。

从进入蒸汽发生器的进口接管开始, 沿流动方向, 一次侧冷却剂阻力依次有: 一次侧进口接管局部阻力、管束入口局部阻力、U 形管内流动的

收稿日期: 2017-04-20

作者简介: 王巍(1986-), 男, 2009年毕业于华中科技大学工程热物理专业, 工学硕士, 工程师。现在东方电气(广州)重型机器有限公司设计部工作。

沿程阻力、管束出口局部阻力、一次侧出口接管局部阻力。表1中列出了AP1000蒸汽发生器结构中上述阻力涉及的结构参数。

表1 部分结构参数

参数	符号	数值
进口接管流通内径/mm	D_{in}	787.4
水室封头内直径/mm	D	3 967.8
U形管总根数	N	10 025
U形管外径/mm	d_e	17.48
U形管内径/mm	d_i	15.42
U形管累计总长度/mm	L	225 054 091
出口接管流通内径/mm	D_{out}	657.4

1.2 热工参数

在几何结构确定的情况下，影响一次侧冷却剂阻力的还有流体自身的物性。表2中列出了在最佳估值工况（该工况最贴近实际运行状况的数值，未考虑蒸汽发生器10%堵管）下，计算一次侧冷却剂阻力涉及的相关热工参数，这些参数来自于AP1000蒸汽发生器设计规格书^[2]，为便于计算，所有数据均以SI单位制给出。

表2 热工设计工况

参数	符号	数值
一次侧运行压力/MPa	P_s	15.52
一次侧冷却剂流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_f	9.937
一次侧冷却剂入口温度/°C	T_{in}	321.1
一次侧冷却剂出口温度/°C	T_{out}	280.5

2 阻力计算

根据各部分阻力所对应的结构特点，查流体阻力手册^[3]，采用经验公式计算各部分的阻力系数，进而计算阻力大小。采用经验公式可以高效快捷得到一次侧流体阻力，计算过程简洁，但由于蒸汽发生器结构的特殊性，经验公式在计算时对结构模型进行了一定程度的简化，因此，计算结果存在一定的偏差。

一次侧流体总的阻力 ΔP 可表示为：

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 \quad (1)$$

如图1所示，温度较高的一次侧冷却剂从进口接管流进蒸汽发生，经换热后从出口接管流出。

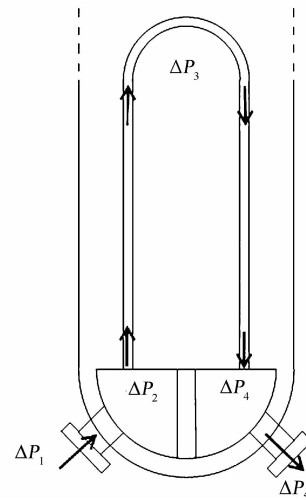


图1 一次侧流体流动示意图

其中： ΔP_1 为一次侧进口接管局部阻力； ΔP_2 为管束入口局部阻力； ΔP_3 为U形管内流动的沿程阻力； ΔP_4 为管束出口局部阻力； ΔP_5 为一次侧出口接管局部阻力。

2.1 一次侧进口接管局部阻力

一次侧进口接管局部阻力，是流体从进口接管流进水室封头时，流通面积突然扩张引起的，根据扩张流动经验公式，该阻力可表示为：

$$\Delta P_1 = \left(1 - \frac{S_{in}}{S_{ch}}\right)^2 \times \frac{G_{in}^2}{2} \times \nu_{in} \quad (2)$$

其中，

$$S_{in} = \frac{\pi}{4} \times D_{in}^2, \text{ 进口接管处流通面积, 可由}$$

表1中进口接管流通内径 D_{in} 求得。

$$S_{ch} = \frac{\pi}{12} \times D^2, \text{ 流体在水室封头内的流通面}$$

积，可由表1中水室封头内直径 D 求得。

$$G_{in} = \frac{Q_f}{\nu_{in} \times S_{in}}, \text{ 流体在进口接管处的质量流}$$

率，表征了流体在单位面积上的质量流速大小。

ν_{in} ，流体在进口接管处的比容，由表2中一次侧运行压力 P_s 和一次侧冷却剂入口温度 T_{in} ，查询水和蒸汽物性表可得流体物性参数^[4]。

经计算，得到 $\Delta P_1 = 0.109705 \text{ MPa}$ 。

2.2 管束入口局部阻力

一次侧冷却剂由水室封头热侧流进管束，管束入口处的局部阻力，是流体流通面积的突然收缩引起的，根据突缩流动经验公式，该阻力可表

示为:

$$\Delta P_2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{S_{\text{tube}}}{S_{\text{ch}}}\right) \times \frac{G_{\text{tube}}^2}{2} \times \nu_{\text{in}} \quad (3)$$

其中, $S_{\text{tube}} = \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \times N$, 管束所有管孔的流通面积之和, 由表1中U形管内径 d_i 和U形管总数目 N 计算。

G_{tube} , 流体在管束内的质量流率, 假设所有管孔的流动均匀。

经计算, 得到 $\Delta P_2 = 2.064 \times 10^{-3}$ MPa。

2.3 U形管内流动的沿程阻力

U形管内流动的沿程阻力, 由流体在U形管内流动时的摩擦引起, 该阻力可表示为:

$$\Delta P_3 = f \times \frac{L_t}{d_i} \times \frac{G_{\text{tube}}^2}{2} \times \nu_{\text{tube}} \quad (4)$$

其中, $f = 0.3164 \times \text{Re} - 0.25$, 表征流体在U形管内流动时的摩擦阻力系数, Re 为流体U形管内流动的雷诺数。

$L_t = \frac{L}{N} + 16 \times d_i$, 计算沿程摩擦阻力的特征长度, 可由表1中U形管总长度 L 、管数目 N 求得, $16 \times d_i$ 部分是表征U形管的弯管段会导致额外阻力的等效名义长度。

ν_{tube} , 流体在U形管内流动的平均比容, 由表2中一次侧运行压力 P_s 、入口温度 T_{in} 和出口温度 T_{out} 的算术平均温度作为定性参数, 查询水和蒸汽物性表可得流体物性参数。

经计算, 得到 $\Delta P_3 = 0.14757$ MPa。

2.4 管束出口局部阻力

流体从管束管孔内流进水室封头的冷侧, 流通面积突然扩张引起管束出口局部阻力, 根据扩张流动经验公式, 该阻力可表示为:

$$\Delta P_4 = \left(1 - \frac{S_{\text{tube}}}{S_{\text{ch}}}\right)^2 \times \frac{G_{\text{tube}}^2}{2} \times \nu_{\text{out}} \quad (5)$$

其中, ν_{out} , 流体在出口接管处的比容, 由表2中一次侧运行压力 P_s 和一次侧冷却剂出口温度 T_{out} , 查询水和蒸汽物性表可得流体物性参数。

经计算, 得到 $\Delta P_4 = 2.523 \times 10^{-3}$ MPa。

2.5 一次侧出口接管局部阻力

一次侧冷却剂由水室封头冷侧流向出口接管, 该处的局部阻力, 是流体流通面积的突然收缩引

起的, 根据突缩流动经验公式, 该阻力可表示为:

$$\Delta P_5 = \left(1 - \frac{S_{\text{out}}}{S_{\text{ch}}}\right)^2 \times \frac{G_{\text{out}}^2}{2} \times \nu_{\text{out}} \quad (6)$$

其中, $S_{\text{out}} = \frac{\pi}{4} \times D_{\text{out}}^2$, 出口接管处流通面积, 可由表1中出口接管流通内径 D_{out} 求得。

G_{out} , 流体在出口接管处的质量流率, 表征了流体在单位面积上的质量流速大小。

经计算, 得到 $\Delta P_5 = 4.4947 \times 10^{-2}$ MPa。

一次侧流体总的阻力 $\Delta P = 0.307$ MPa。

3 计算结果分析

AP1000 蒸汽发生器设计规格书规定, 一次侧冷却剂在蒸汽发生器一回路的总压降(在任何设计工况下)不超过 (0.34 ± 0.07) MPa^[2]。作为 AP1000 蒸汽发生器的设计方, 西屋公司给出的在最佳估值工况下, 一次侧冷却剂总阻力为 0.33 MPa。

按本文第3章所得到的结果, 符合设计规格书中对蒸汽发生器一回路最大压降限制的要求; 与国外公司的计算值相比, 误差为 6.97%。

另外, 笔者曾按本文的方法, 对某二代半核电项目百万千万级的压水堆蒸发器的一回路压降进行过计算, 计算结果与设计规格书的压降值之间的误差约为 5%。

4 结语

一次侧流体的流动阻力计算是蒸汽发生器热工水力计算的重要内容之一, 本文给出了一种简单有效的估算立式自然循环U形管式蒸汽发生器一次侧阻力的方法。

通过计算结果的比较说明, 文中所采取的方法、计算公式、模型假设是正确和合理的, 误差范围对于简化快捷的计算, 是可接受的。

参考文献:

- [1] CPP-MB01-V2-102, CPP-MB01-V2-103, CPP-MB01-V2-104, APP-MB01-V2-241
- [2] APP-MB01-Z0-101-6, AP1000 Steam Generator (SG) Design Specification
- [3] 华绍曾, 杨学宁编译. 实用流体阻力手册[T]. 国防工业出版社, 1985
- [4] 国际水和水蒸汽性质协会. 工业用水和水蒸汽热力学特性 1997年 IAPWS 公式[S], 1997