

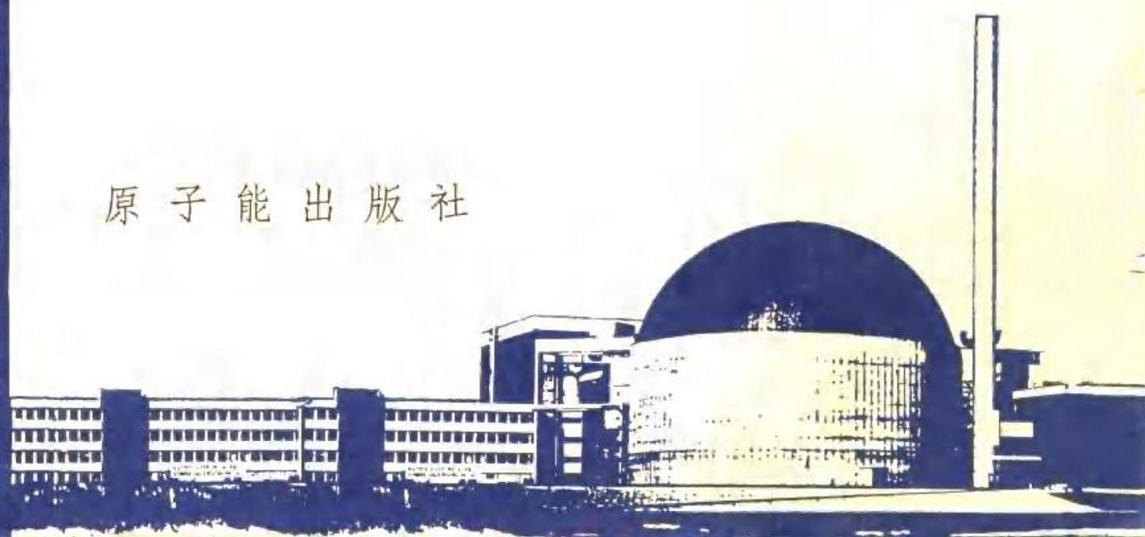
原子能出版社

核电站蒸汽发生器布置

[苏] H. Г. 拉索欣

原子能出版社

23.4



TM623.4

1
3

核 电 站 蒸 汽 发 生 器 装 置

[苏] H. Г. 拉索欣 著

孔祥谦 赵树屏等 译

6412/33

原 子 能 出 版 社

A876065

内 容 提 要

本书介绍各类核电站的蒸汽发生器的设计和详细构造,研究蒸汽产生过程中的流体动力学过程、换热过程和物理-化学过程,提出结构计算方法。

本书可供大专院校核电站和核动力装置专业的师生阅读。对从事核电站和热电站方面工作的科学技术人员也有一定参考价值。

该书译自 ERDA-tr-7, «STEAM GENERATOR INSTALLATIONS
FOR NUCLEAR POWER STATIONS», 1975.

核电站蒸汽发生器装置

[苏] H. Γ. 拉索欣 著

孔祥谦 赵树屏等 译

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重 庆 印 制 一 厂 印 刷

(重庆市枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $14\frac{5}{8}$ ·字数346千字

1982年2月第一版·1982年2月第一次印刷

印数001-1,400·统一书号: 15175·318

定价: 1.80 元

译者序

本书原文是苏联莫斯科动力学院编写的教材，并在美国译成英文出版。遗憾的是我们在翻译过程中未能找到俄文原版进行查对。本书是根据英译本翻译的。在英文译本中发现有较多错误，我们已作了一些改正。限于译者水平，译文仍会有不妥之处，希读者给予批评指正。

本书由孔祥谦同志翻译第一、二、五、六、八章；赵树屏同志翻译第九、十、十一、十二、十三章和附录Ⅷ、B；黄渭堂同志翻译第三、七章和附录Ⅰ至Ⅶ、A；宿成吉同志翻译第四、十四、十五章；李赫同志对送审前的译稿作了校阅；方庆贤同志对全书进行了仔细的审校。

译者

前 言

建于1954年的苏联第一座核电站,证明了利用核裂变能生产电能的技术可能性。其后,由于广泛的科学研究和工业实验,确定了核电站的型式。这些核电站就技术和经济两方面来说比热电站更令人满意。目前,核电站的型式有:压力水或沸腾水冷却的热中子反应堆核电站、气体冷却的热中子反应堆核电站、液态金属冷却的快中子反应堆核电站。有一些数据表明,使用有机冷却剂的热中子反应堆也是行得通的。

当代的核电站照例使用汽轮机。汽轮机的工作蒸汽可以直接在反应堆中产生,也可以在包括蒸汽发生器的专门设备中产生。只有在反应堆冷却剂是沸腾水的情况下(有沸腾水反应堆的单回路核电站设计),蒸汽才可能在反应堆内产生。在其他情况下,反应堆有两个回路,在蒸汽发生器内依靠反应堆冷却剂(一回路工质)释放的热产生工作蒸汽。

本书包括各类蒸汽发生器设计和结构方面所需要的全部材料,也研究产生蒸汽的过程。有关这些过程的知识不仅为设计蒸汽发生器所需,而且也正确使用蒸汽发生器所需。

本书以著者为核电站和设备专业的学生所讲课程为基础,共分三个部分:蒸汽发生器的设计和结构;产生蒸汽的过程(在受热面上);蒸汽发生器的结构计算。

在与技术科学副博士В. Н. Мельников共同准备的附录中,给出一回路工质物理常数和钢材方面的资料,并有几种蒸汽发生器计算的例子。在电站蒸汽发生器部分,М. А. Стирикович, К. Я. Катковска和Е. П. Серов都对本书的安排和讲述方法给予著者很多帮助。在核电站蒸汽发生器的计算和设计方面,Т. Х. Маргулова给予了帮助。

著者对技术科学博士Т. Х. Маргулова教授、技术科学副博士В. Ф. Титов、技术科学博士П. А. Андреев及技术科学副博士В. Н. Мельников表示衷心感谢,著者在准备手稿时得到了他们的许多帮助。著者还要感谢莫斯科动力学院核电站和蒸汽发生器系,他们为改进本书而召开了很有价值的会议。

目 录

第一章 核电站产生蒸汽的主要方法.....	1
1.1 热电站.....	1
1.2 核电站.....	2
1.3 核电站蒸汽发生器的特性及其类型.....	5
1.4 核电站蒸汽发生器的技术要求.....	6
第二章 一回路工质.....	8
2.1 对核电站一回路工质的要求.....	8
2.2 液体一回路工质.....	8
1. 水.....	8
2. 有机物.....	10
3. 液态金属.....	10
2.3 气体一回路工质.....	11
第三章 蒸汽发生器的设计.....	12
3.1 蒸汽发生器的参数选择.....	12
1. 压水堆中蒸汽发生器的蒸汽参数标准.....	12
2. 一回路采用饱和蒸汽的蒸汽发生器的蒸汽参数.....	13
3. 一回路工质采用有机物的蒸汽发生器的蒸汽参数.....	13
4. 一回路工质采用液态金属的蒸汽发生器的蒸汽参数.....	13
5. 一回路工质采用气体的蒸汽发生器的蒸汽参数.....	13
3.2 用压力水加热的蒸汽发生器设计.....	15
3.3 用有机物工质加热的蒸汽发生器设计.....	18
3.4 用液态金属加热的蒸汽发生器设计.....	19
3.5 采用气体加热的蒸汽发生器设计.....	21
第四章 蒸汽发生器的结构.....	25
4.1 蒸汽发生器的分类.....	25
4.2 用压力水加热的蒸汽发生器结构.....	25
4.3 采用液态金属加热的蒸汽发生器结构.....	36
1. 哈拉姆核电站的换热器与蒸汽发生器.....	36
2. 恩里哥·费米核电站的换热器与蒸汽发生器.....	38
3. BN-350 核电站的换热器与蒸汽发生器.....	39
4.4 用气体工质加热的蒸汽发生器结构.....	40
第五章 蒸汽发生器内部过程的一般特性.....	45
5.1 传热过程和流体动力过程.....	45
5.2 物理化学过程.....	46
5.3 蒸汽发生器内部过程对设备可靠性及经济性的影响.....	47
第六章 蒸汽发生器中的传热.....	50
6.1 单相介质流动的换热.....	50
1. 管内纵流换热.....	51
2. 管束中横流换热.....	52

3. 液态金属的对流换热	53
6.2 蒸汽凝结换热	55
1. 管内凝结换热	55
2. 壳侧凝结换热	56
6.3 水的沸腾换热	58
6.4 由气体工质加热的蒸汽发生器中的辐射换热	61
第七章 蒸汽发生器中的流体动力过程	64
7.1 概述	64
7.2 流过管束的单相流阻力	64
7.3 两相流的流体动力学基本原理	67
1. 两相流的特点	67
2. 两相流的流动工况及水力阻力	72
7.4 汽泡穿层流动的基本原理	75
第八章 蒸气发生器运行时受热面的热工水力条件	79
8.1 受热面的温度状态	79
8.2 换热器受热面管子的热偏移	81
1. 水力不均匀度	82
2. 热力不均匀	83
3. 防止热偏移的方法	84
8.3 采用单相流体工质运行的换热器的热工水力条件	85
1. 水预热段	85
2. 蒸汽过热器	86
8.4 二回路工质强制循环时蒸发段的热工水力条件	90
1. 水力不稳定性	90
2. 沸腾式水预热器	94
3. 强制循环蒸发段	95
4. 直流蒸发段	97
5. 直流蒸发段运行的热工条件	99
8.5 自然循环蒸发段	100
1. 循环回路的主要特性	100
2. 水循环方程中各个数值的确定	101
3. 水循环方程的求解	104
4. 复杂回路的水循环方程	105
5. 自然循环的可靠性	106
6. 压力变化对循环回路可靠性的影响	108
第九章 水中杂质进入蒸汽的机理	110
9.1 对蒸汽纯度的要求	110
9.2 杂质从水向蒸汽的转移	111
9.3 物质在蒸汽中的溶解度	112
9.4 饱和蒸汽对杂质的机械夹带	115
9.5 获得规定纯度蒸汽的方法	117
第十章 核电站蒸汽发生器的水处理	121

10.1 概述	121
10.2 二回路工质对受热面的腐蚀	122
10.3 水中杂质形成水垢	124
10.4 蒸汽发生器的给水	126
10.5 直流蒸汽发生器的水处理	127
10.6 水循环式蒸汽发生器的水处理	128
第十一章 热计算、结构计算和水力计算基础	134
11.1 设计问题和计算分类	134
11.2 热计算概述	135
11.3 结构计算概述	138
11.4 水力计算概述	141
11.5 热计算、结构计算和水力计算方法概述	142
第十二章 不同类型蒸汽发生器的热计算、结构计算和水力计算的特点	145
12.1 压力水加热的蒸汽发生器	145
12.2 用饱和蒸汽加热的蒸汽发生器	149
12.3 有机物一回路工质加热的蒸汽发生器	150
12.4 液态金属加热的蒸汽发生器	150
12.5 由气体一回路工质加热的蒸汽发生器	153
12.6 直流蒸汽发生器	158
第十三章 水质及分离设备的计算	160
13.1 水质计算	160
13.2 分离及清洗设备的设计和计算	162
第十四章 蒸汽发生器的结构材料及强度计算	167
14.1 结构材料的选择	167
14.2 蒸汽发生器部件的强度计算	168
第十五章 蒸汽发生器结构的技术-经济指标	173
15.1 影响蒸汽发生器效率的几个因素	173
15.2 选择蒸汽发生器最佳设计方案时的技术-经济考虑	174
附 录	175

第一章 核电站产生蒸汽的主要方法

1.1 热 电 站

现代汽轮机核电站发电的基本过程是把热能转变成机械能，尔后再转变成电能。所以，核电站可以认为是一种新型的热电站。尽管取得热能的方法不同，然而在核电站和热电站中所采用的基本方法却是相似的。

图 1.1 示出了热电站汽轮机的原理图。在蒸汽发生器 1 中，化石燃料进行燃烧，同时产生蒸汽。蒸汽发生器由一个燃烧室以及排出燃烧产物的烟道所组成。在燃烧室中（主要在水冷壁上）以及在烟道中（整个横截面）布置了大量的管子。水、汽水混合物和蒸汽在管内不断流动，吸收燃料燃烧放出的热量。管子受热面分为加热段（把水加热至沸腾温度）、蒸发段（产生饱和蒸汽）和过热段（把蒸汽过热至给定的温度）。蒸汽发生器中的这几部分，分别称为经济器、蒸发段和过热器。

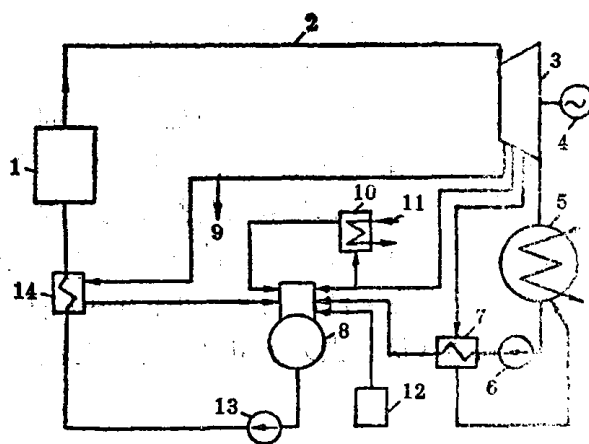


图 1.1 热电站汽轮机系统流程图

(1)蒸汽发生器；(2)蒸汽管道；(3)汽轮机；(4)发电机；(5)凝汽器；(6)凝结水泵；(7)低压加热器；(8)除氧器；(9)供工业用户的蒸汽；(10)用于加热系统的水加热设备；(11)加热系统管道；(12)补给水加热设备；(13)给水泵；(14)高压加热器。

蒸发段在燃烧室中以及烟道的初始部分。烟道的其余部分布置了过热器*、经济器和空气预热器，空气预热器用来预热燃料燃烧所需的空气。布置在烟道中的全部受热面主要依靠对流吸收热量，因为辐射换热随着烟气温度的下降急剧降低。

进入蒸汽发生器的水达饱和温度而沸腾时，蒸汽便开始产生，在蒸汽发生器出口蒸汽被过热至给定温度。

蒸汽发生器的主要特性参数是：蒸汽产生率 D (公斤/秒)；蒸汽参数，亦即过热器出口蒸汽的压力和温度， P_2 (巴) 和 T_2 (°C)；经济器入口水温，亦即给水温度 T_1 (°C)。

蒸汽（工作介质）流经管道 2 驱动汽轮机 3。在汽轮机转子上，蒸汽的热能转换成机械能，汽轮机的转子是与发电机 4 的转子连结在一起的，所以机械能又转换成电能。从汽轮机排出的蒸汽进入凝汽器 5，并在极低的压力 [0.03~0.05 (巴)] 下全部凝结在凝汽器的受热面上，成为凝结水，凝汽器由水（河水、池水或其它冷水源）冷却。凝结水由水泵 6 和 13 输送，流经换热器 7、8 和 14 后，进入蒸汽发生器的给水加热器**。

凝结水在换热器 7 和 14 的管内流过，受到从汽轮机中压级抽出的一定量蒸汽的加热；而蒸汽在这些换热器中变成凝结水后，排放至系统前级的设备中去（包括从汽轮机低压级抽出

* 原文为“水”，似有误。——译者注

** 指经济器。——译者注

的蒸汽)。系统中换热器的数目基本上取决于蒸汽的参数。

除氧器 8 在大气压力下运行, 按其传热方式来看, 它是一种混合式换热器。其主要目的是除掉溶解在凝结水中的气体, “除氧器”因此而得名, 除氧器和高压水泵都位于 低压加热器 7 和高压加热器 14 之间。

凡用汽轮机抽汽来加热蒸汽发生器给水的换热器, 称为“回热”加热器。

汽轮机发电站不仅能够生产电能, 而且能够生产低温热能, 热能可以以蒸汽或热水的形式输送到各个工业用户 9 去, 或者输入加热系统 10 和 11。蒸汽在工业用户凝结成水后并不全部返回电站, 但加热系统中的凝结水则全部送到回热加热器中去。凝结水的损失 (诸如工业用汽以及电站中各系统的漏泄) 必须补充。所以在电站中设有专门的水处理设备 12, 来自水处理设备的水进入除氧器 (或凝汽器)。从回热加热器*至除氧器, 只有凝结水在管内流动, 所以从凝汽器至除氧器的这部分管道 (低压段), 称为“凝结水”回路。为这一段服务的水泵称为“凝结水泵”, 从除氧器以后至回热加热器**, 在其中流动的是凝结水和补给水的混合物。这个混合物称为给水, 相应的回路和水泵称为给水回路和给水泵。

按流程图 1.1 建造的电站就是我们所称的“热电站”。

另一种热电站只生产电能 (不生产低温热能)。这种装置与我们前面研究过的装置不同之处在于不存在蒸汽输出 9, 也不存在加热系统中的水加热设备 10 和 11。所以凝结水的损失大大减小 (仅仅损失于电站内部, 为汽轮机耗汽量的 0.2—2%); 所以这种电站的补给水量也较小。

1.2 核 电 站

目前采用的或者已在设计的或拟议中为将来采用的核电站主流程图有许许多多的方案。这些方案的特点表现在以下几个方面: 蒸汽-动力循环的参数, 产生蒸汽的工艺过程, 电站主要设备 (核反应堆) 的型式, 以及其它许多次要因素。由于核动力工程在国民经济中正在成为重要的方面, 所以很多方案在目前是可以采用的。但是随着核动力工程的发展, 无疑地会出现一些新方案, 而现存的方案中有许多将消失, 或者要作重大的修改。

各式各样的核电站热力系统按产生蒸汽的工艺过程来分类可以分成两种类型: (1) 直接从反应堆中产生蒸汽; (2) 利用反应堆排出的热量, 在一个专门的设备中获得蒸汽。在第一种类型中, 从产生蒸汽的反应堆到汽轮发电机组只有一个回路。这样的装置称为“单回路”系统。在第二种类型中, 至少要有两个回路, 一个回路把反应堆和产生蒸汽的设备——蒸汽发生器——联结起来, 另一个回路则把蒸汽发生器和汽轮发电机组联结起来。这样的装置称之为“双回路”系统。图 1.2 示出的是单回路核电站的系统流程图。

在反应堆 1 中, 铀或钚 (核燃料) 发生裂变, 裂变放出的热量产生蒸汽推动汽轮机。反应堆的堆芯含有大量的释热元件 (燃料元件), 水和汽水混合物 (在反应堆中的蒸发段 a) 或过热蒸汽 (在反应堆中的蒸汽过热器 c) 流过这些元件。在蒸发段中, 水被加热到饱和温度并蒸发, 产生汽轮机所需要的蒸汽量。汽水混合物离开蒸发段并进入汽水分离器 b, 汽水

* 指低压加热器 7。——译者注

** 指高压加热器 14。——译者注

混合物的重量含汽量通常不大于 20%。汽水分离器布置在反应堆压力壳内，或者在一个分离设备（汽鼓）b 中进行分离。分离器中析出的水与给水一起重新进入反应堆的蒸发段。水和汽水混合物由水泵 d 驱动在反应堆循环回路中流动，在回路中水力阻力很小的情况下，它们的流动则可依靠自然循环。在分离器中分离出的干饱和蒸汽进入反应堆的过热器，使蒸汽过热至某一给定的温度，然后流经管道 2 进入汽轮发电机组。

如果核电站是在饱和蒸汽工况下运行，则蒸汽从分离器出来后直接导入汽轮机。

伴随着核裂变而来的放射性辐射，由反应堆的生物屏蔽 e 减弱至允许的水平。

至于图 1.2 中其它部件的作用，与常规热电站中回热系统的部件完全相同。

由于在蒸汽中存在放射性（因蒸汽中携带的杂质和氧化物*的活化而产生的放射性），因此核电站汽轮机部分的所有设备都具有放射性，它们也需要适当的生物防护及遥控设备。

单回路核电站设计的主要部分是反应堆，它由一回路工质的汽水混合物冷却。但在早期设计采用的单回路核电站中，有一些因素降低了这种方案的优点。因此，尔后导致了双回路装置的发展，或带有独立的单回路和双回路混合方案的发展。这些设计的实例见图 1.3 和图 1.4。

图 1.3 是别洛雅尔斯克-1 核电站的流程图。在反应堆 1 中，一回路工质是蒸汽发生器 2 中产生的过热蒸汽。在反应堆的蒸发段中产生着汽水混合物。但是，这汽水混合物并非汽轮机的工作流体，而是一种载热剂，它把反应堆中的热量带到蒸汽发生器中去。

汽水混合物从反应堆中的蒸发段引出后，进入汽水分离器。分离出来的饱和蒸汽导入蒸汽发生器 f 中凝结，在其中把热量传给二回路的工质——水——产生汽轮机所需的蒸汽。来自预热器 g（间壁式）的二回路工质水进入蒸汽发生器的蒸发段 f，这里的温度相

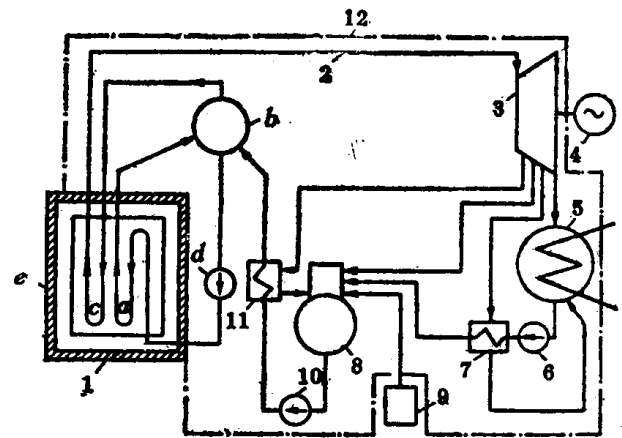


图 1.2 单回路核电站流程图

(1)反应堆；(a)反应堆中的蒸汽发生器；(b)汽水分离器；(c)反应堆中的蒸汽过热器；(d)一回路主泵；(e)反应堆生物屏蔽；(2)蒸汽管道；(3)汽轮机；(4)发电机；(5)凝汽器；(6)凝结水泵；(7)低压加热器；(8)除氧器；(9)补给水处理设备；(10)给水泵；(11)高压加热器；(12)汽轮机回路生物屏蔽。

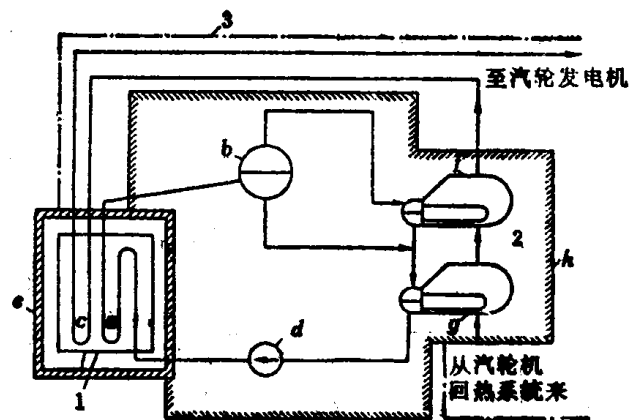


图 1.3 别洛雅尔斯克-1核电站汽轮机蒸汽的产生过程

(1)反应堆；(a)反应堆中的蒸发段；(b)汽鼓；(c)反应堆中的蒸汽过热器；(d)循环泵；(e)反应堆的生物屏蔽；(2)蒸汽发生器；(f)蒸汽发生器的蒸发段；(g)蒸汽发生器的预热器（间壁式**）；(h)蒸汽发生器的生物屏蔽；(3)汽轮发电机组的生物屏蔽。

* 指从过热器壁上剥落下来的氧化物。——译者注

** 原文中为直接混合式，似有误。——译者注

应于蒸汽发生器二回路压力下的饱和温度。在蒸发段中形成的汽水混合物在汽水分离器中进行分离。

分离器中析出的水返回蒸发段,而分离出来的干饱和蒸汽则进入反应堆中的过热器。过热蒸汽经过蒸汽管道导入汽轮发电机组。汽轮机设备及其全部回热循环部件与图 1.1 和图 1.2 热力系统图所表示的完全一样。来自回热加热器的给水进入蒸汽发生器的预热段,并在预热段中被加热至温度 t_s (图 3.1 中是 t_{s2})。预热段中的热源是一回路工质的凝结水和一回路侧蒸汽分离器中析出的水的混合物,这个混合物在预热段中被冷却至低于反应堆压力下的饱和温度。在这种热力系统图中包含一个附加的饱和蒸汽发生器回路,其目的是用无放射性的水来产生汽轮机所需的蒸汽。因为蒸汽发生器的蒸发段具有良好的分离作用,所以供给汽轮机的蒸汽在通过反应堆过热器时,基本上不带放射性,这是因为蒸汽中含的杂质很少的缘故。在这个热力系统图中,与图 1.2 中一样,所有设备都必须远距离控制。但是由于二次蒸汽的放射性水平较低,蒸汽携带的放射性杂质和汽轮机部分的沉积较小,因此便于设备的检查和修理。

采用现代的消除杂质的方法可以使图 1.2 方案中所产生的蒸汽达到所需的纯度。所以以后别洛雅尔斯克核电站的发展是按照这种方案进行的。

在发展高压过热蒸汽 ($P_2 \geq 100$ 巴) 运行的单回路核电站的同时,用中压饱和蒸汽 ($P_2 \approx 70$ 巴) 运行的单回路核电站也得到了发展。这种方案与图 1.2 方案的根本差别是反应堆中不布置过热器。但是,采用这种方案的第一个核电站(美国的美列克斯和德累斯顿-1)比上述方案还要稍为复杂一些(图 1.4),这是为了增加电站功率及改善反应堆的调节性能。系统图中包含了一个蒸汽发生器 2,在其中产生比反应堆中压力低的饱和蒸汽。蒸汽发生器的热源是从反应堆来的主冷却剂,其温度为反应堆压力下的饱和温度。

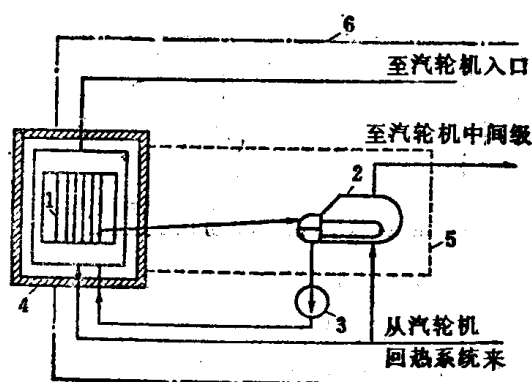


图 1.4 德累斯顿-1核电站的蒸汽产生过程

(1)反应堆;(2)低压蒸汽发生器;(3)低压回路的循环泵;(4)一(6)分别为反应堆、蒸汽发生器和汽轮发电机组回路的生物屏蔽。

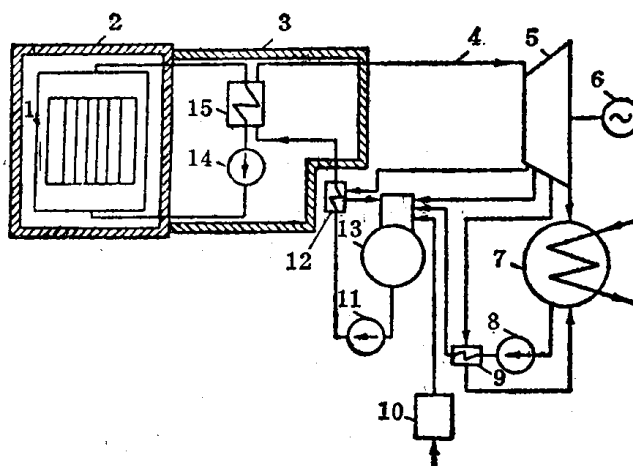


图 1.5 双回路核电站流程图

(1)反应堆;(2)反应堆生物屏蔽;(3)蒸汽发生器生物屏蔽;(4)蒸汽管道;(5)汽轮机;(6)发电机;(7)凝汽器;(8)二回路凝结水泵;(9)低压加热器;(10)补给水处理设备;(11)给水泵;(12)高压加热器;(13)除氧器;(14)一回路主泵;(15)蒸汽发生器。

为改善反应堆特性而作的运行实验研究指出,取消低压蒸汽发生器是允许的。这样,使反应堆产生饱和蒸汽的单回路核电站又向前发展了一步。

图 1.5 所示是一个双回路核电站；二回路工质蒸汽是在一个专门的蒸汽发生器中产生的。一回路工质从反应堆中获得热量，在蒸汽发生器中把热量传给二回路工质，将给水加热至饱和温度，并汽化成规定数量的蒸汽以及将蒸汽过热到给定的温度。这样，一回路工质既是反应堆 1 的冷却介质，又是蒸汽发生器 15 的加热介质。用这种工艺过程产生汽轮机所需蒸汽时，释热和把热量传给二回路工质是在不同的设备中进行的。

气体和液体都可用作一回路工质。

水泵 14 驱动一回路工质流动。一回路是封闭的。为了排污，部分工质可从一回路中放出去。有专门的设备把相应数量的补充工质加以处理并注入到一回路中去。

双回路核电站的二回路设计，其中包括蒸汽发生器、汽轮发电机组以及回热式水加热系统，在原则上与热电站或单回路核电站的热力系统设计没有什么不同。

某些核电站采用的反应堆是用液态钠冷却的，由于在反应堆与蒸汽发生器之间需添加一个中间换热器，因此设计变得复杂了（见图 3.12）。在这个中间换热器内，来自一回路工质的热量传给作为蒸汽发生器热源的次级工质（也是液态金属）。这种设计类似于具有三个回路的核电站。但从产生蒸汽的工艺过程来说，这种设计仍属双回路的布置，只因添加了一个中间换热器而使第一个回路复杂化。

所有核电站的研究设计都属于凝汽式的电站。但是，这对将来设计其它型式的核电站没有多大妨碍。

1.3 核电站蒸汽发生器的特性及其类型

核电站中供给汽轮机的蒸汽，或者是在反应堆中产生，或者是在专门的换热设备——蒸汽发生器中产生。

在反应堆中产生蒸汽的情况下，除了有通常换热器中所存在的热力过程和物理化学过程外，还有中子过程，这就决定了这些设备的特殊性质，所以把它们列入特殊的一类中去。把处于反应堆中的蒸汽发生器和反应堆外面的蒸汽发生器作同样考虑是不切合实际的。

众所周知，核电站的蒸汽发生器就是用来产生汽轮机所需蒸汽的换热器，一回路工质把反应堆中的热量带到蒸汽发生器中去。蒸汽发生器是双回路核电站的主要设备之一。但是，在早期的核电站中，也采用过单回路布置（图 1.2 和图 1.3）。与热电站中的蒸汽发生器一样，核电站蒸发器的主要特性是：蒸汽产生量，蒸汽特性参数，蒸汽纯度（对饱和蒸汽循环来说，还有湿度或蒸汽品质）以及给水温度。一般来说，核电站的蒸汽发生器均有预热段（经济器）、蒸发段和过热段。这些部件可以组装成一个换热器，也可以是各自独立的换热器串接在一个回路中。

二回路中携带热量的物质（水、汽水混合物或蒸汽）称为“二回路工质”。一回路中的载热剂（反应堆冷却剂）称为“一回路工质”。

在预热器中，二回路工质总是以强迫流动的方式一次通过。在蒸汽发生器的蒸发段中，二回路工质的流动可以是下列三种方式中的一种：自然循环、强制循环或直流。

自然循环蒸汽发生器的特征是：进入蒸发段中的水在自然压头作用下产生再循环，自然压头是由下降系统中的液柱与上升系统中的汽水混合物的重量差造成的。在此情况下水在蒸发段内有其固有的循环回路（见图 3.11）。

强制循环蒸汽发生器的特征是：进入蒸发段中的水也有再循环，但这个循环的压头是由布置在下降系统中的循环泵产生的。

直流蒸汽发生器的特征是把所有部件都串接起来，工质由给水泵加压强迫一次流过这些部件（见图 3.10）。

一回路工质可以是液体，也可以是气体。它们都是强迫流动的。

蒸汽发生器的热工经济指标是热效率。蒸汽发生器只有一种形式的热损失——热量散失到周围环境中去，这个损失只占蒸汽发生器热功率的 1—2 %。

1.4 核电站蒸汽发生器的技术要求

换热器已被广泛地应用在工业的许多领域中（动力工程、化学工业等等）。所以，了解核电站蒸汽发生器的技术要求、决定如何使现有的换热器很好地满足这些要求，以及研究新型的蒸汽发生器都是很需要的。

蒸汽发生器的主要技术要求是：

1. 蒸汽发生器及其部件的设计，必须保证供给核电站在任何运行工况下所需要的蒸汽量及规定的蒸汽参数。满足了这个要求也就能保证电站在不同载荷下经济运行。

2. 蒸汽发生器的容量应该最大限度地满足满功率负荷的需要，而且要求随着单机容量的增加，其技术经济指标会得到相应的改善。

3. 蒸汽发生器的所有部件应该绝对地安全可靠。蒸汽发生器的受热面是由大量小直径的管子组成的，这样，在一回路（带有放射性）中就有大量的管子。因此核电站运行的可靠性在很大程度上取决于蒸汽发生器的可靠性。蒸汽发生器的屏蔽问题必须解决，所有部件必须保证工作稳定。

4. 蒸汽发生器各零、部件的装配，必须保证在密封面上排除一回路工质漏入二回路中去的可能性。一回路工质不容许漏入二回路工质中去的原因，是汽轮机回路没有生物防护，任何这种漏入将会导致反应堆危急事故。

5. 必须排除加剧腐蚀的任何可能性。特别是一回路中的腐蚀，主要是为了防止腐蚀产物对一回路工质的污染。腐蚀产物过多地进入到一回路中去，一方面引起一回路工质放射性的增加，另一方面导致放射性腐蚀产物在一回路的沉积。腐蚀产物在燃料元件上的沉积是极其危险的，它能使传热性能骤然下降。

6. 蒸汽发生器必须产生必要纯度的蒸汽，以保证蒸汽过热器在高温下可靠运行，并保证汽轮机可靠而经济地运行。

7. 蒸汽发生器应该设计得简单紧凑，应该便于安装使用，便于发现损坏并排除故障，并有可能彻底疏干。

8. 保证蒸汽发生器具有高的技术经济指标。

在设计蒸汽发生器时，要考虑一、二回路两种工质的种类和参数。正确地选择结构方案、材料、传热管尺寸、传热系数以及载热流体等，对取得蒸汽发生器最佳技术-经济指标是非常重要的。另外，必须采取减小向外散热损失的措施。

按工作原理（即传热方式）换热器可分成两大类型：混合式和表面式。在混合式换热器中，一、二回路工质在换热器中发生混合，这是一种非常有效而简单的换热器。但是，一、

二回路工质的混合与核电站的基本要求相矛盾。

在表面式换热器中，又可区分为蓄热式*和间壁式两种。在蓄热式换热器中，两种工质交替地流过受热面。在一回路工质流经受热面期间，受热面积蓄热量，尔后把这个热量传给二回路工质。一、二回路工质交替流经同一个受热面，就意味着一种工质漏入另一种工质中去是不可避免的，但这是采用双回路的汽轮机核电站所不能容许的。

在间壁式换热器（图 1.6 中），两种流体同时流过受热面的两侧，一回路工质的热量通过分隔两种流体的间壁传给二回路工质。用这种传热方法设计出来的换热器有可能满足核电站蒸汽发生器的全部要求。

在换热器的具体结构中，诸如受热面形状、换热流体以什么方式流过受热面、换热器壳体的结构、水室的型式等等都是不同的。换热器的式样在很大程度上取决于一回路工质的参数和性质。

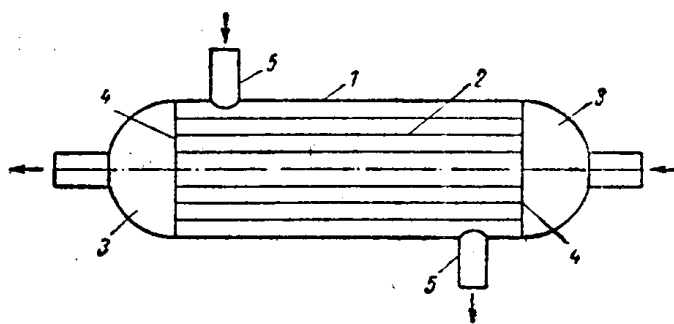


图 1.6 间壁式换热器剖面图

(1)换热器壳体；(2)换热器受热面；(3)水室（一回路工质出、入口）；(4)管板；(5)接管（二回路工质出、入口）。

* 也可以译作回热式或同流式。——译者注

第二章 一回路工质

2.1 对核电站一回路工质的要求

一回路工质从反应堆堆芯中取得热量，并把热量传送到蒸汽发生器中去，在二回路中产生蒸汽，一回路工质必须满足某些要求。这些要求取决于核电站一回路中发生的核过程、热物理过程以及物理化学过程。

在核性质方面，一回路工质必须由中子俘获截面和中子散射截面尽可能小的物质构成，并且具有高的辐照稳定性，当其流过反应堆堆芯时活化能力最小。在热物理性质方面，最好的一回路工质应该在低消耗*的条件下，能够与受热面发生强烈的热交换。

至于一回路工质的物理化学性质，首先应该注意其对回路材料的化学活性和电化学活性，还有它与二回路工质之间的化学反应。回路材料还应价廉及易于得到。在核能工程中，一回路工质能否在高温下从反应堆中带走热量，这一点是非常重要的。

反应堆出口处一回路工质的温度愈高，蒸汽发生器产生蒸汽的参数也就愈高。反应堆出口处一回路工质温度可能达到的最高值（由堆芯材料的热阻来确定），对于各种不同的工质，主要取决于它的热物理性质以及物理化学性质。在物理化学性质方面，应该考虑到一回路工质与结构材料化学反应速率的变化以及在高温下的热稳定性。

气体和液态金属作为一回路工质时，反应堆出口温度没有什么限制。但是应该说明，由于气体的热物理性质太差，在气体与受热面之间的边界层中必然有很大的温度差，要提高反应堆出口气体温度只有加强热交换，这意味着提高一回路中气体压力，增大气体的质量流速。

提高水温必须要求在一回路中提高压力，这实际上限制了反应堆出口处能够获得的最大温度。对于有机物质，反应堆出口温度受工质热稳定性的限制。出口温度高的反应堆适用的工质只有液态金属和气体。这样，在蒸汽发生器中才能形成高参数、超高参数和超临界参数的蒸汽。按照这个原则，一回路工质可以区分为低温物质（反应堆出口处的温度不超过 400℃）和高温物质（反应堆出口处的温度大于 450℃，但是不超过 850℃）。

下面对一回路工质的主要热物理和物理化学性质作一些简短讨论，这些性质会影响到蒸汽发生器的结构和使用。

2.2 液体一回路工质

1. 水

目前，用于核电站的液体一回路工质有普通水、重水、有机化合物中的几种聚苯类以及液态金属中的钠或钠钾合金。水和有机化合物是低温物质，而液态金属则为高温物质。

普通水是最便宜而且最易于得到的液体一回路工质。从对换热系数和工质流量有影响的

* 指流体动力损耗。——译者注

物理和热物理性质（密度，导热系数，粘度，比热）综合起来看，普通水是一种最好的低温一回路工质。水在较低的流速下具有较高的对流换热系数，并且当流速增加时，对流换热系数增加得很快。例如，对于流速在 0.3 米/秒时，对流换热系数约为 2×10^5 瓦/米²℃；在 1 米/秒时则为 5×10^5 瓦/米²℃；而在 5 米/秒时则为 20×10^5 瓦/米²℃。因为水的比热高、粘度低以及密度大，所以水在沿着回路输送时，动力损耗不大。水还有良好的抗辐照能力，另外，它的放射性活化率也不太高。

水最严重的缺点是它的饱和蒸汽压太高，且随着温度增加得很快。例如，在压力为 1 巴时，饱和温度为 99.6℃，而当压力为 221.1 巴时，饱和温度只有 374.1℃。这意味着压力增加 200 多倍时，饱和蒸汽的温度只增加到 3 倍多一点。可见用水带走反应堆中的热量，只能在不太高的温度下进行。在此情况下，尽管一回路工质压力很高（100 巴以上），在蒸汽发生器中也只能产生中压（30—70 巴）的饱和蒸汽。

水的一个明显的缺点是它的密度随温度变化较大且它随着温度的增加而增加（压力对密度的影响小得可以略去不计）。例如，当压力为 100 巴时，温度从 250℃ 增至 300℃，水的比容约增大 11%。因此在一回路中就必须设置一个专门的补偿系统（膨胀箱）。

水是一种良好的溶剂，这种性质使水的净化设备复杂化，在净化设备中不仅要除去水中的悬浮物质和胶体物质，还要除去溶解物质。所有溶解在一回路水中的物质都可能活化成长寿命的同位素。放射性物质从溶液中沉淀下来，给一回路（包括蒸汽发生器）的清洗和重新安装带来困难。

水也是一种腐蚀性很强的物质。水对其所流经的各种材料的腐蚀速率，与温度、水中所溶解的杂质（固体的和气体的）、pH 值以及其它因素有关。即使腐蚀过程是缓慢的，水也会受到溶解物质和固体物质的污染，因为这些物质在反应堆中会活化成长寿命的放射性同位素。

目前采用清除杂质和调整 pH 值的方法所获得的高纯水，在用碳钢和珠光体合金钢制造的一回路设备中，其腐蚀速率还不能保证达到可接受的程度。奥氏体不锈钢实际上对任何实际工况温度的水都有很高的抗腐蚀能力。所以现在一回路设备都是采用这种型号的钢材（Cr 18 Ni10Ti）制造的。但是对奥氏体不锈钢来说，危险的是应力腐蚀，在结构材料上承受拉应力的部分，且那里的水中又含有自由氧和氯离子时，就特别容易产生应力腐蚀。

在蒸汽发生器设计中必须考虑应力腐蚀，因为管束在压差下受到一个总体应力，弯管处和管接头补强处还有局部应力，等等。

饱和水蒸汽作为一回路工质在实际应用时有局限性，可是蒸汽冷凝时，与壁面的换热非常强烈。所提到的水的其它缺点同样也适用于饱和水蒸汽。

重水具有良好的核性质。其慢化比（综合考虑其对中子的慢化能力和吸收）是普通水的 87 倍。所以用重水作慢化剂，使得在反应堆中采用天然铀有了可能。这就减少了燃料的初始装载量及其年耗量。当把重水同时用作慢化剂和冷却剂时，经济性达到最大。所以，尽管价格昂贵是重水的基本缺点，但它还是被用作核电站的一回路工质。

在物理化学性质方面，重水与普通水是一样的，但在热物理性质方面则稍有不同。重水的临界温度和临界压力分别为 374.58℃ 和 222 巴（普通水为 374.1℃ 和 221.29 巴）。重水和普通水的蒸汽压力、密度、导热系数、比热以及粘度等都是相似的。所以上面提到的普通水的有关传热特性也适用于重水。