

66

蒸汽发生器

《蒸汽发生器》编写组

原子能出版社

内 容 简 介

本书系在调研了国外新近的大量资料的基础上编写而成，主要内容包
括：蒸汽发生器的工作原理、结构型式及发展概况；蒸汽发生器传热管的
腐蚀破裂事故，腐蚀类型和机理，以及在材料、设计、制造和运行等方面
防止传热管腐蚀破裂的措施；蒸汽发生器的热力特性和热力计算方法，水
动力特性和计算，用于蒸汽发生器的汽水分离设备的结构型式及工作性能；
蒸汽发生器动态过程的理论分析和试验研究；管板的强度计算和应力分析；
蒸汽发生器主要部件的制造及爆炸焊接堵管新技术。本书共有插图 263 幅。

本书供核动力、热能动力、石油、化工、冶金等部门从事热交换设备
设计、研究及运行的同志阅读，大专院校有关专业的师生亦可用作参考。

蒸 汽 发 生 器

《蒸汽发生器》编写组

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京市丰台区靛厂印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168_{1/32}·印张 13·字数388千字

1982年6月第一版·1982年6月第一次印刷

印数001—3,000·统一书号：15175·320

定价：1.60元

前 言

实践证明，用压力水减速和冷却的核反应堆装置，具有切实的可靠性、安全性和稳定性，同时具有良好的经济性。因此，压水堆在核电站中获得了广泛应用。而且，现在的核船舶也都采用这种堆型。

近年来，世界上核发电量不断增长。据估计，到1900年核发电量可达2.5亿千瓦。在1900年以前，核电站将仍以轻水反应堆核电站为主。压水堆动力装置，在今后一个相当长的时期内仍然占有重要位置。

蒸汽发生器是压水堆动力装置中的主要设备之一，是连接一、二回路的枢纽。它的工作性能及安全可靠性，直接影响到整个核动力装置的工作性能及安全可靠性。因此，对蒸汽发生器的结构设计、材料选择、制造工艺、运行操作和维护检修等，必须十分重视。

本书介绍了压水堆蒸汽发生器的工作原理、设计原则及发展概况，收集了各种蒸汽发生器的结构型式及其设计参数。蒸汽发生器传热管的破损事故，尤其是管子的腐蚀破裂事故，严重地影响着压水堆动力装置的安全运行，已引起人们的密切注意。书中对发生在压水堆蒸汽发生器中的各种类型的腐蚀，以及从材料、设计、制造和运行等方面防止管子发生腐蚀破裂的措施，进行了较详细的分析。本书还分别介绍了蒸汽发生器的热力特性和热力计算，蒸汽发生器的水动力特性和有关计算，用于自然循环蒸汽发生器的各种汽水分离设备，蒸汽发生器动态过程的理论分析和试验研究，管板的强度计算及应力分析，蒸汽发生器主要部件的制造以及目前各国普遍采用的堵管新技术——爆炸焊接堵管。

这是一本压水堆蒸汽发生器调研资料汇编。全书共分九章，

由以下同志编写：颜世忠（第一章），巴长喜（第二章），丁训慎、张连璧、巴长喜（第三章），崔保元、薛运燧、刘世勋（第四章），刘志人（第五章），周寿康（第六章），吴洪涛（第七章），王葆祥（第八、九章）。本书由刘志人、薛运燧同志负责校对、整理，并由肖隆水、赵兆颐同志进行了审校。

在编写本书的过程中，曾得到张蜀治、全惠琴、周青、顾蓉珍等同志的帮助，谨表示深切谢意。

由于时间较紧，搜集到的资料不够全面，加上水平所限，书中错误之处在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1979. 10.

目 录

一、压水堆动力装置蒸汽发生器及其发展概况	1
(一) 蒸汽发生器在核动力装置中的作用	1
(二) 蒸汽发生器的分类	3
(三) 蒸汽发生器的基本设计原则	14
(四) 蒸汽发生器的典型结构与工作原理	17
(五) 压水堆核电站蒸汽发生器发展概况	24
二、蒸汽发生器的热力计算	65
(一) 热力计算概述	65
(二) 一回路侧的放热计算	68
(三) 管壁热阻和污垢热阻	72
(四) 二回路侧的放热计算	77
(五) 沸腾放热危机	107
(六) 二回路侧蒸发段的膜态沸腾放热计算	123
三、蒸汽发生器的水动力学问题	130
(一) 单相流的阻力计算	130
(二) 两相流及其阻力计算	139
(三) 立式自然循环蒸汽发生器的水循环	159
(四) 热工水力特性对传热管腐蚀破裂的影响	174
(五) 直流蒸汽发生器的水动力特性	185
四、自然循环蒸汽发生器的汽水分离装置	205
(一) 关于汽水分离的基本观点	205
(二) 蒸汽发生器的汽水分离系统	207
(三) 一次分离器	213
(四) 二次分离器	229
(五) 三次分离器	233
五、关于蒸汽发生器的动态特性问题	244
(一) 理论分析法与动态数学模型	245

(二) 动态特性的试验研究.....	272
六、压水堆蒸汽发生器管材的腐蚀问题.....	283
(一) 压水堆蒸汽发生器管材的腐蚀.....	289
1. 常用的压水堆蒸汽发生器管材.....	289
2. 奥氏体不锈钢的腐蚀.....	291
3. 因科镍-600 的腐蚀.....	313
4. 因科洛依-800 的腐蚀.....	324
(二) 压水堆蒸汽发生器管材应力腐蚀的预防.....	334
1. 材料.....	335
2. 设计与制造.....	344
3. 运行.....	345
七、蒸汽发生器管板的强度及应力分析.....	356
(一) 几种常见的计算管板厚度的公式.....	356
(二) 管板的应力分析.....	365
八、蒸汽发生器的制造.....	384
(一) 传热管的制造.....	385
(二) 二回路侧外壳的制造.....	387
(三) 一回路水室封头的制造.....	387
(四) 管板的加工.....	388
(五) 耐腐蚀层的堆焊.....	389
(六) 蒸汽发生器的装配.....	391
九、爆炸焊接堵管.....	400
(一) 爆炸焊接原理.....	400
(二) 爆炸焊接堵管技术.....	402
(三) 堵管前的准备和工具系统.....	408
(四) 爆炸焊缝质量的评定.....	410

一、压水堆动力装置蒸汽发生器 及其发展概况

自 1957 年 12 月美国希平港核电站建成发电以来^[1]，压水堆动力装置的发展极为迅速，作为压水堆动力装置关键性设备之一的蒸汽发生器也获得了很大的发展。最初采用的是中小型卧式蒸汽发生器，单台电功率只有 2—3 万千瓦；现在世界各国都趋向于采用大容量立式蒸汽发生器，单台电功率最高的已超过 60 万千瓦。近年来，蒸汽发生器传热管泄漏事故不断发生，所造成的经济损失是巨大的。这就迫使设计人员对蒸汽发生器的结构、管材、制造工艺和运行操作等进行改进，从而更促进了蒸汽发生器的发展。随着蒸汽发生器向高功率、大型化和系列化发展，以及对核动力装置经济性和安全可靠性的要求不断提高，出现了各种结构型式的蒸汽发生器。本章将对用于压水堆动力装置的蒸汽发生器的工作原理、分类、设计原则、结构型式及发展概况作一介绍。

（一）蒸汽发生器在核动力装置中的作用

核电站和火电站是相似的动力企业，二者都是将热能转换为电能的。火电站是利用矿物燃料燃烧产生的热能，而核电站是利用核裂变链式反应产生的热能。压水堆核电站由于采用高压水作载热剂和减速剂，这就确定了它的许多特点，例如，为提高装置热效率，必须提高参数，要提高饱和水温度就必须提高压力，这就使得反应堆压力壳以及其它部件的结构设计复杂化，而且十分笨重。由于用水作载热剂，对水的纯度和材料的抗腐蚀性能要求较高；由于水经辐照后，水中杂质会活化而带放射性，这对系统设备部件的密封性提出了更高的要求等。

压水堆包括轻水堆和重水堆两种。目前应用最为广泛的是轻水堆核电站，本章重点介绍用于轻水堆核电站的蒸汽发生器，只附带介绍一下用于重水堆核电站的蒸汽发生器。

蒸汽发生器的作用，可用一个压水堆动力装置系统简图（图1-1）来说明。在反应堆中，核裂变产生的热能传给载热剂（水）。

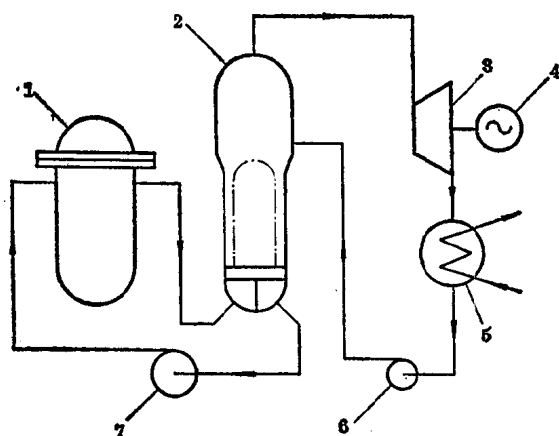


图1-1 压水堆动力装置系统简图

- 1——反应堆，2——蒸汽发生器，3——汽轮机，
4——发电机，5——冷凝器，6——给水泵，
7——主循环泵。

高温高压水由主循环泵唧送到蒸汽发生器，放出热量后又主被循环泵打回反应堆，重新被加热后，再被唧送到蒸汽发生器中去。这样周而复始就形成闭式的循环回路——一回

回路。在蒸汽发生器中，传热管内（或管外）一回回路载热剂的热量，通过管壁传给管外（或管内）工质（水），使之预热、蒸发（或预热、蒸发、过热）而产生饱和蒸汽（或过热蒸汽）。品质合格的蒸汽送往汽轮机，带动发电机发电。在汽轮机内作过功的蒸汽，进入冷凝器被冷却水（河水或海水）冷却并凝结成水，和补水一起被给水泵打回到蒸汽发生器，重新被加热。这样周而复始形成另一个循环回路——二回路。因此，压水堆动力装置又称为双回路循环动力装置。

从这种装置的工作过程看，蒸汽发生器既是一回路设备，又是二回路设备，所以被称为一、二回路的枢纽。

由于一回路载热剂流经堆芯，载热剂中的杂质及腐蚀产物等被辐照会活化，加之有燃料元件的裂变碎片进入，使得一回路载

热剂带有较强的放射性。因此，一回路为带有放射性的回路，而二回路为非放射性回路。这就对蒸汽发生器的结构、强度、材料抗腐蚀性能、水质指标、密封性和清洁度等与安全可靠性有关的因素，提出了很高的要求。蒸汽发生器如果发生破损，不但造成放射性污染，而且使核电站不能发电。近年来，蒸汽发生器的事事故率是比较高的。至1971年末，世界上运行中的36座压水堆核电站有19座（占56%）发生了蒸汽发生器传热管泄漏事故^[1]，事故平均时间间隔为0.6年。根据1972年的统计，已经投入运行的大多数核电站蒸汽发生器的传热管发生了严重破损，其中至少有8座不是更换蒸汽发生器，就是更换了传热管。蒸汽发生器事故造成的经济损失是很大的。以10万千瓦轻水堆核电站为例，蒸汽发生器发生事故后，仅停堆维修的经济损失就是500—1,000美元/小时。至于重水堆发生事故，则损失更大。例如，装置功率为540兆瓦的皮克灵重水堆核电站，由于出现流量达50公斤/小时的重水泄漏，使发电价格增加了一倍^[22]。

上述事实充分说明了蒸汽发生器在核动力装置中的重要作用，同时亦说明蒸汽发生器的设计、制造和运行的合理与否，严重地影响着核电站的经济性和安全可靠性。

（二） 蒸汽发生器的分类

压水堆核电站蒸汽发生器与热交换器或火电站的蒸汽锅炉在结构、热工、水动力特性等方面有某些相似之处。根据热交换器和蒸汽锅炉的分类特点，蒸汽发生器可按工质流动方式、传热管形状、设备的安放方位及与其它一回路设备的组合情况进行分类。

1. 按工质流动方式分类

按二回路工质在蒸汽发生器中的流动方式，可分为自然循环蒸汽发生器和直流（强迫循环）蒸汽发生器。

自然循环蒸汽发生器是借助于上升通道和下降通道中汽水混

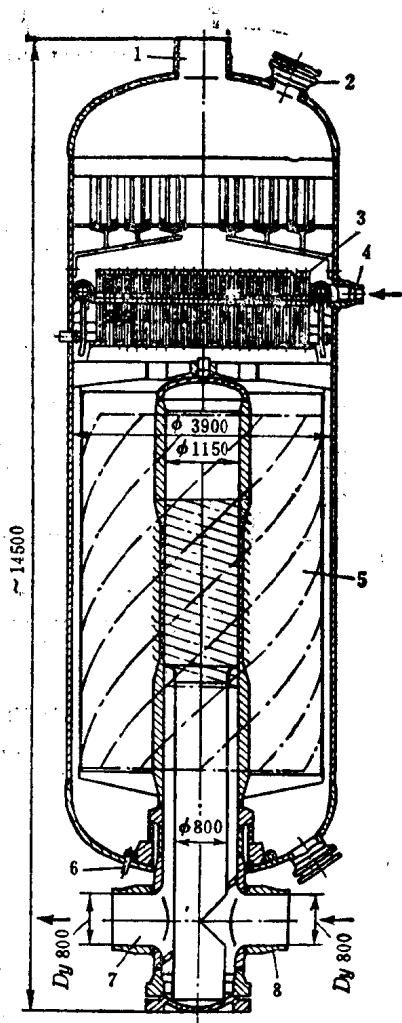


图 1-2 立式自然循环蒸汽发生器

- | | |
|-------------|-------------|
| 1——蒸汽出口接管； | 2——人孔； |
| 3——汽水分离器； | 4——给水进口接管； |
| 5——传热管； | 6——排污管； |
| 7——载热剂出口接管； | 8——载热剂进口接管。 |

式自然循环蒸汽发生器（图 1-3）。

自然循环蒸汽发生器的优点是：水容积大，蓄热量大，缓冲性好，对自动控制（给水及蒸汽量的控制）的要求不高，由于可

合物与水的比重差产生的力来推动工质运动并建立循环的。上升通道中的水被载热剂加热，经预热、蒸发而产生饱和蒸汽。自然循环蒸汽发生器的设计参数一般为饱和参数。进入上升通道的水量为给水量和再循环水量之和，它是大于蒸发量的。进入上升通道的水量与蒸发量的比值称为循环倍率。显然自然循环蒸汽发生器的循环倍率是大于 1 的。因此可以把自然循环蒸汽发生器称为循环倍率大于 1 的蒸汽发生器。

自然循环蒸汽发生器又可分为立式自然循环蒸汽发生器(图 1-2)和卧

进行锅内水处理和排污，可适当降低对传热管材和二回路水质的要求，从而可简化辅助系统并提高设备的安全可靠性。

自然循环蒸汽发生器的缺点是：为保证蒸汽品质，需要装设汽水分离器，使蒸汽发生器结构复杂；静态特性较差，从满负荷降到零负荷，压力变化范围大；由于自然循环蒸汽发生器产生饱和蒸汽，在汽轮机高低压缸之间，必须装设去湿装置（汽水分离器），使系统复杂化，占地面积大，投资高。

在直流蒸汽发生器中，工质的流动依靠给水泵的压头来实现，外力强迫工质一次流过传热管，随着水沿传热管流动，水被载热剂加热，经预热、蒸发、过热而达到所要求的温度。通常直流蒸汽发生器被设计成产生微过热蒸汽。根据循环倍率的定义，可以把直流蒸汽发生器称为循环倍率为1的蒸汽发生器。

直流蒸汽发生器又可分为管外直流蒸汽发生器（图1-4）和管内直流蒸汽发生器（图1-5）。

所谓管外直流蒸汽发生器，即是二回路工质在传热管外流动，而一回路载热剂在传热管内流动。所谓管内直流蒸汽发生器，即是二回路工质在传热管内流动，而一回路载热剂在传热管外流动。目前，在压水堆核电站中采用的都是管外直管型直流蒸汽发生器。管内直流蒸汽发生器，多用于舰船压水堆动力装置，例如西德的“奥托·哈恩”号核动力研究船和苏联的“列宁”号（改装后的）破冰船、“北极”号破冰船等^[10,11,12]。

直流蒸汽发生器的优点是：它不需要装设汽水分离器，结构简单；静态特性好，机动性能也好；由于产生的是过热蒸汽，在汽轮机高低压缸之间可不装去湿装置，简化了系统，并可提高装置的热效率；其功率重量比比较高（约1.5兆瓦/吨），单台电功率可达60—65万千瓦。

直流蒸汽发生器的缺点是：对给水品质和传热管材的抗腐蚀性能要求较高；因水容积小，蓄热能力小，对自动控制的要求高；对于管内直流蒸汽发生器，尚存在单管和管间脉动问题，至于水动力特性的不稳定性和整体脉动问题，管内和管外直流蒸汽

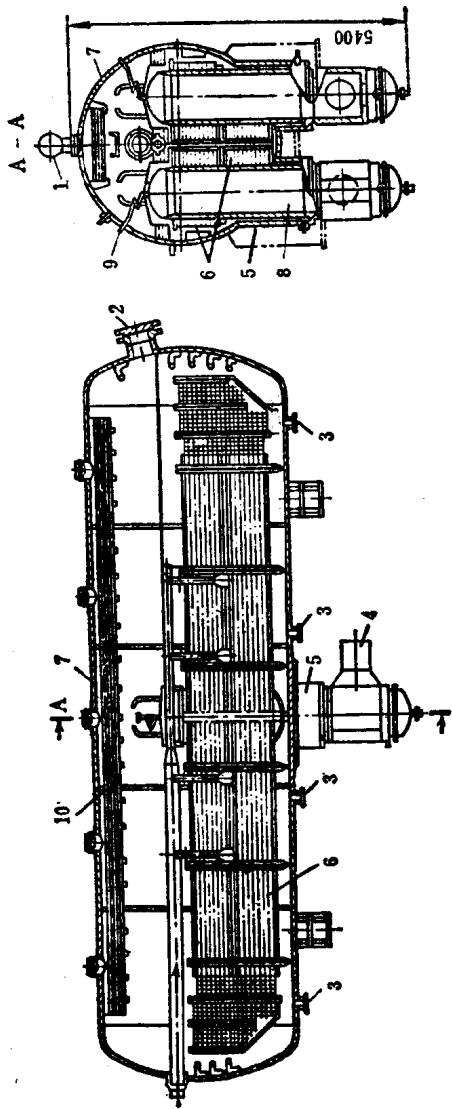
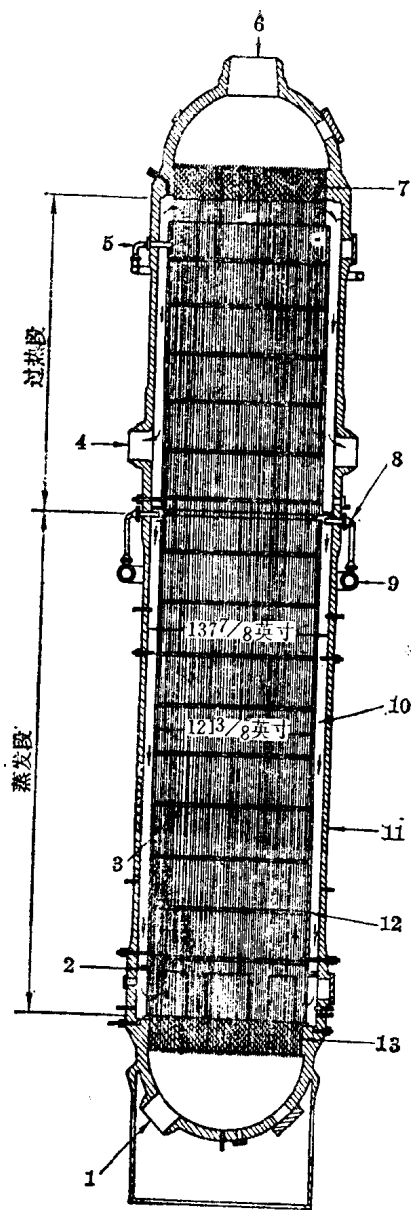


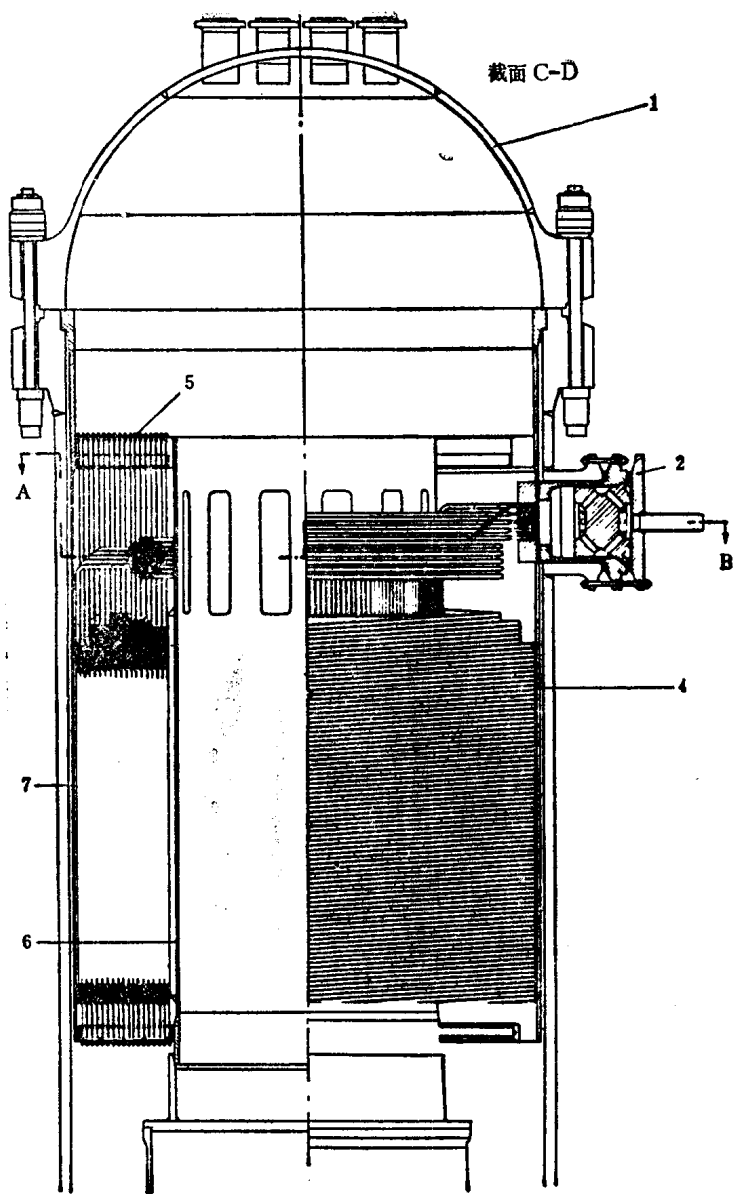
图 1-3 卧式自然循环蒸汽发生器

- | | |
|-------------|---------------|
| 1——蒸汽出口联箱， | 2——人孔， |
| 3——排污和排水接管， | 4——载热剂进、出口接管， |
| 5——载热剂进口联箱， | 6——传热管， |
| 7——筒体， | 8——载热剂出口联箱， |
| 9——回路排气管， | 10——汽水分离器。 |



- 1——载热剂出口接管,
- 2——孔板,
- 3——梅花形支撑板,
- 4——过热蒸汽出口接管,
- 5——辅助给水接管,
- 6——载热剂进口接管,
- 7——管板,
- 8——给水分管,
- 9——给水联箱,
- 10——环形给水加热室,
- 11——筒体,
- 12——套筒,
- 13——管板.

图 1-4 管外直流蒸汽发生器



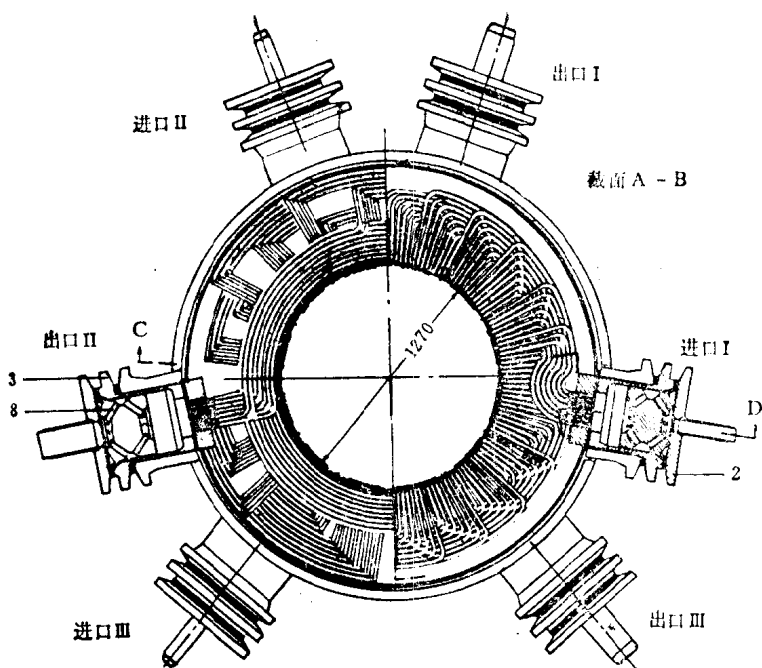


图 1-5 管内直流蒸汽发生器

- 1——反应堆压力容器；2——给水进口；
3——过热蒸汽出口；4——传热管；
5——传热管吊架；6——内套筒；
7——外套筒；8——铅屏蔽。

发生器两者都存在，不过后一种问题容易解决。

2. 按蒸汽发生器的安放方位分类

按蒸汽发生器的安放方位，可分为卧式蒸汽发生器和立式蒸汽发生器。

所谓卧式蒸汽发生器，就是蒸汽发生器筒体的轴线与地面平行，亦称为水平蒸汽发生器。

卧式蒸汽发生器又可分为单筒卧式蒸汽发生器（图 1-6）和双筒卧式蒸汽发生器（图 1-7）。

单筒卧式蒸汽发生器是把汽水分离器和传热管束布置于一个

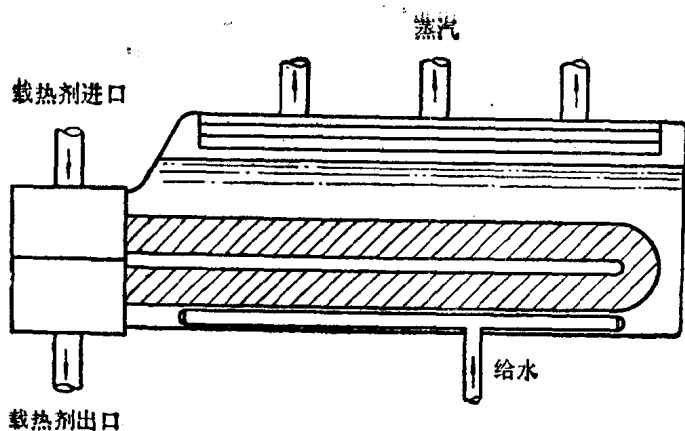


图 1-6 单筒卧式蒸汽发生器

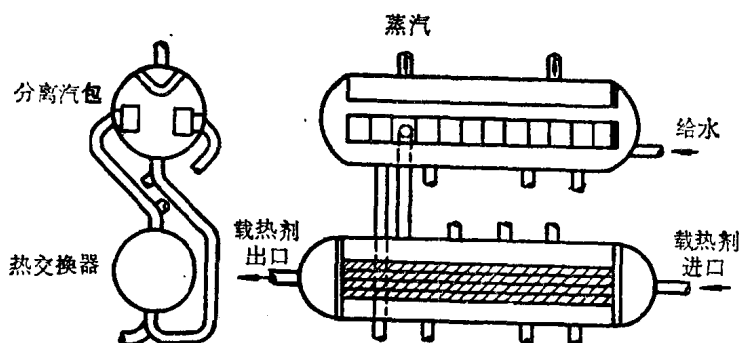


图 1-7 双筒卧式蒸汽发生器

平放筒体内。其工作原理与立式自然循环蒸汽发生器相同，只是没有明显的上升、下降通道。

这种蒸汽发生器的优点是可靠性好（因为它把载热剂进出口联箱垂直放置），蒸发面负荷小，采用比较简单的汽水分离装置即可保证蒸汽品质。其缺点是体积大，重量大，占地面积大。

双筒卧式蒸汽发生器是把传热管束和汽水分离器分别置于两个平放筒体内，通过上升管和下降管，把二者连接起来形成自然循环回路。其优缺点与单筒卧式蒸汽发生器相同，不过汽水分离

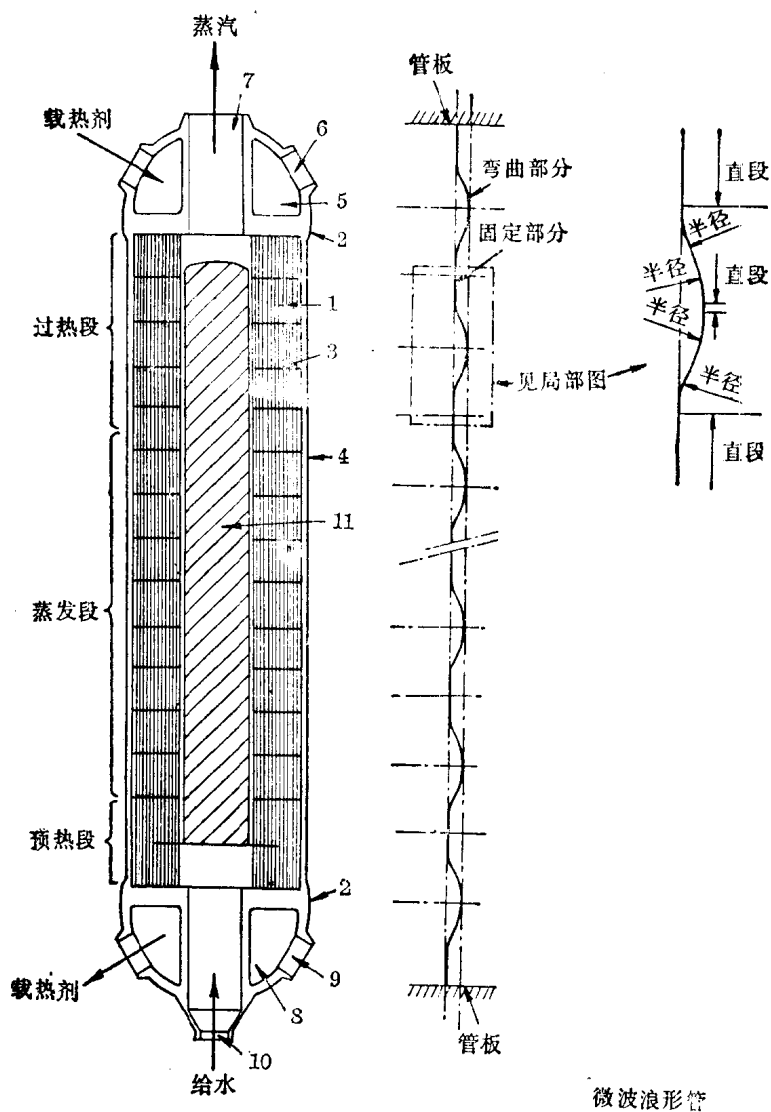


图 1-8 微波浪形管蒸汽发生器

- 1——微波浪形管束；2——管板；3——支撑装置；4——筒体；5——载热剂进口环室；6——载热剂进口；7——蒸汽出口；8——载热剂出口环室；9——载热剂出口；10——给水进口；11——圆筒形孔区。