

任功祖

动力反应堆 热工水力分析

原子能出版社

内 容 提 要

本书以压水反应堆为主要讨论对象，系统地介绍了动力反应堆热工水力设计的基础知识和分析方法。全书共分十一章。前六章介绍了进行动力堆热工设计所必须了解的水力学和传热问题。着重讨论了反应堆设计中涉及到的一些特殊课题，如棒束的摩擦系数和放热系数、两相压降、临界热通量、固体间的接触热导以及辐照对材料热物性的影响等。收集了较多的计算公式以供选用。第七至第十一章介绍热工水力分析的方法，内容包括反应堆热工设计的准则和参数的选择、计算冷却剂焓场的单通道模型和子通道模型、用于热工设计可靠性分析的统计方法、热工暂态分析和事故分析等。

本书可供从事动力反应堆热工水力设计工作的工程技术人员、与核动力工业有关的科学工作者及大专院校有关专业师生参考。

动力反应堆热工水力分析

任 功 祖

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

房山南召印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $15^{3/4}$ · 字数 420 千字

1982 年 3 月第一版 · 1982 年 3 月第一次印刷

印数 001—1000 · 统一书号：15175·245

定价：2.70 元

前 言

反应堆热工设计的任务随着反应堆的用途不断扩大而日益重要。对于生产堆，把热能从活性区导出的基本出发点只是为了保证反应堆的安全。对于动力堆，从活性区导出热能，不仅是为了反应堆的安全，而且更重要的是为了有效地利用热能。这就对动力堆热工设计提出了更高的要求。

动力堆热工设计的过程大致是：首先，根据设计任务的要求，明确设计指导思想，确定热工设计准则，并与有关设计部门一起协调平衡来确定反应堆热工水力的主要参数，如热功率、流量、温度和压力等。然后，在此基础上进行反应堆稳态热工水力设计，计算在整个活性区寿期内能否安全地发出额定功率。最后，做反应堆的热工暂态性能分析和事故分析，以了解反应堆在各种暂态过程中是否满足热工设计准则的要求，各种参数的选择是否合理，并提出为保证安全运行所应采取的保护措施。

本书试图根据设计和实验方面的大量研究成果，以压水堆为主要讨论对象，较系统地介绍用于动力堆热工设计的基本知识和分析方法，以使读者对整个动力堆热工设计过程和要处理的主要问题有较全面的了解。虽然以压水堆为主，没有更多地讨论其它类型动力堆的一些特殊问题，但是这里所介绍的大部分内容都可供其它类型动力堆热工设计参考。

全书共分十一章。

第一章根据热工设计的需要，简要地介绍了动力堆的特点、压水堆动力装置的各个系统、活性区和燃料组件的基本结构以及堆内能量的来源和分布。

第二章至第六章比较详细地介绍了动力堆热工设计所必须了

解的水力学和传热问题以及燃料和材料的热物性。其中着重介绍了与反应堆设计有关的一些特殊课题，如棒束的摩擦系数和放热系数、两相压降、临界热通量、固体间的接触热导以及辐照对热物性的影响等。这里给出的公式较多，可根据它们的使用范围加以选用。

第七、八章介绍了活性区热工设计的准则和参数的选择，给出了设计中广泛使用的计算冷却剂熔场的两种基本模型：单通道模型和子通道模型。这两章所用的基本知识除热通道（点）因子外，基本上在前面几章中已介绍过了，在这里只是综合应用它们以解决动力堆的热工设计问题。

第九章介绍了用于分析活性区热工设计可靠性的统计方法。这是一个正在研究和发展中的课题。在此仅扼要地给出分析问题的方法和几种基本模型，可供读者进一步研究时参考。

第十、十一章介绍了动力堆的热工暂态分析和事故分析，着重于基本原理和方法。其中对失水事故的分析，目前的计算模型很多，本书只作一些扼要的介绍。

本书是由西南反应堆工程研究设计院的袁乃驹、裘烽椿、杨彬、黄士鉴、魏永仁、于俊崇和王荣忠等同志集体编写的。在编写过程中，有关单位提出了许多宝贵的意见，徐燕椿同志对第十章做了重要补充，在此一并表示感谢。

编者水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

一九七九年五月十七日于长沙

目 录

| | |
|---------------------------|--------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 1·1 动力反应堆简介 | (1) |
| 1·2 压水堆动力装置简介 | (3) |
| 1·3 反应堆内裂变能的分配 | (8) |
| 1·4 均匀裸堆中热中子通量分布 | (10) |
| 1·5 活性区和元件功率强度的表示方法 | (11) |
| 1·6 堆内部件发出热量的计算 | (14) |
| 1·6·1 γ 射线的来源和能量 | (14) |
| 1·6·2 部件吸收的 γ 射线能量 | (16) |
| 1·7 剩余中子功率和衰变热 | (19) |
| 1·7·1 剩余中子功率 | (19) |
| 1·7·2 衰变热 | (21) |
| 1·8 热平衡计算的各项热量 | (24) |
| 第二章 流动与压降 | (28) |
| 2·1 引言 | (28) |
| 2·2 流动方式的分类 | (29) |
| 2·3 两相流的形成 | (32) |
| 2·3·1 过冷沸腾起始点 | (34) |
| 2·3·2 汽泡脱离壁面起始点 | (35) |
| 2·4 含汽量、空泡份额和滑速比 | (37) |
| 2·4·1 含汽量的计算方法 | (38) |
| 2·4·2 滑速比的计算方法 | (41) |
| 2·4·3 空泡份额的计算方法 | (43) |
| 2·5 单相等温沿程摩擦压降 | (45) |
| 2·5·1 圆管或矩形通道的单相等温摩擦系数 | (46) |
| 2·5·2 棒束构成的通道的等温摩擦系数 | (48) |

| | | |
|-------|--------------------|---------|
| 2·6 | 加热或冷却下的单相摩擦系数 | (54) |
| 2·7 | 两相流沿程摩擦压降 | (58) |
| 2·7·1 | 均匀流模型的处理方法 | (58) |
| 2·7·2 | 修正单相摩擦压降的方法 | (60) |
| 2·8 | 形阻压降 | (66) |
| 2·8·1 | 单相流的形阻系数 | (67) |
| 2·8·2 | 两相形阻压降 | (72) |
| 2·9 | 加速压降 | (74) |
| 2·9·1 | 由于通道截面改变产生的加速压降 | (75) |
| 2·9·2 | 由于流体重度改变产生的加速压降 | (75) |
| 2·10 | 提升压降 | (78) |
| 第三章 | 流量计算与流动问题 | (83) |
| 3·1 | 封闭回路中的流量计算 | (83) |
| 3·1·1 | 泵的特性曲线 | (83) |
| 3·1·2 | 回路特性曲线 | (84) |
| 3·1·3 | 强制循环流量 | (86) |
| 3·1·4 | 自然循环流量 | (87) |
| 3·2 | 并联闭式通道间的流量分配 | (88) |
| 3·2·1 | 通道的分类 | (88) |
| 3·2·2 | 闭式通道间流量分配的计算 | (89) |
| 3·3 | 开式通道间流体的交混 | (93) |
| 3·3·1 | 开式通道间动量、质量和热量迁移的分类 | (93) |
| 3·3·2 | 动量紊流交混的计算方法 | (94) |
| 3·4 | 开式通道间的横流混合 | (97) |
| 3·4·1 | 光棒束及带栅格定位栅棒束的横流 | (97) |
| 3·4·2 | 带绕丝定位栅棒束的横流 | (102) |
| 3·5 | 交混和混合对轴向动量的影响 | (107) |
| 3·6 | 开式通道间的流量分配 | (109) |
| 3·7 | 燃料组件流量分配的改善 | (111) |
| 3·8 | 流动引起部件的振动问题 | (112) |
| 3·9 | 控制棒设计的水力问题 | (114) |
| 3·10 | 临界流速及压力波的传递 | (116) |

| | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------|
| 3·10·1 | 临界流速的计算 | (116) |
| 3·10·2 | 压力波的衰减 | (120) |
| 3·11 | 两相流动不稳定性问题 | (120) |
| 3·12 | 流量漂移 | (124) |
| 3·13 | 流动方式变迁不稳定性 | (130) |
| 3·14 | 声波不稳定性 | (130) |
| 3·15 | 密度波不稳定性 | (132) |
| 3·15·1 | 通道加热长度的影响 | (132) |
| 3·15·2 | 通道进口和出口节流的影响 | (133) |
| 3·15·3 | 通道入口过冷度的影响 | (133) |
| 3·15·4 | 系统压力的影响 | (134) |
| 3·15·5 | 重量流速和功率密度的影响 | (135) |
| 3·15·6 | 并联平行通道旁通比的影响 | (137) |
| 3·16 | 平行通道的流动不稳定性 | (138) |
| 3·17 | 动态流动不稳定性理论分析 | (139) |
| 第四章 燃料、包壳材料、冷却剂及其热物性 | | (155) |
| 4·1 | 对燃料、包壳材料及冷却剂的一般要求 | (155) |
| 4·1·1 | 燃料 | (155) |
| 4·1·2 | 包壳材料 | (156) |
| 4·1·3 | 冷却剂 | (157) |
| 4·2 | 熔点 | (157) |
| 4·3 | 导热系数 | (159) |
| 4·3·1 | 二氧化铀的导热系数 | (160) |
| 4·3·2 | 其他燃料、材料的导热系数 | (164) |
| 4·4 | 膨胀系数 | (167) |
| 4·5 | 比热和焓 | (169) |
| 4·6 | 辐照和燃耗对热物性的影响 | (171) |
| 4·6·1 | 辐照和燃耗对二氧化铀熔点的影响 | (172) |
| 4·6·2 | 辐照和燃耗对燃料导热系数的影响 | (173) |
| 4·6·3 | 辐照下芯块的肿胀 | (176) |
| 第五章 燃料元件和堆内部件温度场 | | (182) |
| 5·1 | 计算导热的基本方程 | (182) |

| | | |
|-------|--------------------|-------|
| 5.2 | 稳态下无内热源部件的温度场 | (186) |
| 5.2.1 | 板状元件包壳的温度场 | (186) |
| 5.2.2 | 棒状燃料元件包壳的温度场 | (188) |
| 5.2.3 | 颗粒燃料涂层的温度场 | (190) |
| 5.3 | 稳态下有内热源部件的温度场 | (191) |
| 5.3.1 | 体积释热率为常数的芯块的温度场 | (191) |
| 5.3.2 | 体积释热率为变数的芯块的温度场 | (196) |
| 5.3.3 | 热屏蔽的温度场 | (199) |
| 5.4 | 包壳与芯块间的间隙热导 | (201) |
| 5.4.1 | 气隙导热模型 | (202) |
| 5.4.2 | 气隙导热和接触导热混合模型 | (204) |
| 5.4.3 | 间隙热导的经验数值 | (214) |
| 5.5 | 辐射传热 | (216) |
| 第六章 | 对流放热与活性区通道中冷却剂的温度场 | (218) |
| 6.1 | 对流放热概述 | (218) |
| 6.2 | 单相对流放热系数 | (220) |
| 6.2.1 | 强迫对流的放热系数 | (220) |
| 6.2.2 | 自然对流的放热系数 | (229) |
| 6.3 | 两相流放热系数 | (231) |
| 6.3.1 | 池式沸腾的放热系数 | (231) |
| 6.3.2 | 流动沸腾的放热系数 | (234) |
| 6.4 | 沸腾放热的临界热通量 | (239) |
| 6.4.1 | 流动沸腾的临界热通量 | (240) |
| 6.4.2 | 池式沸腾临界热通量 | (254) |
| 6.5 | 影响临界热通量的主要因素 | (254) |
| 6.5.1 | 冷壁的影响 | (256) |
| 6.5.2 | 轴向热通量分布的影响 | (257) |
| 6.5.3 | 定位栅的影响 | (262) |
| 6.5.4 | 重量流速的影响 | (264) |
| 6.5.5 | 压力的影响 | (264) |
| 6.5.6 | 加热壁面粗糙度的影响 | (265) |
| 6.5.7 | 流动方向的影响 | (266) |

| | | |
|-------|------------------------------------|-------|
| 6.5.8 | 棒间距大小的影响 | (268) |
| 6.5.9 | 非稳态下的临界热通量 | (269) |
| 6.6 | 冷却剂焓升的计算 | (270) |
| 6.6.1 | 闭式通道内冷却剂焓升 | (270) |
| 6.6.2 | 开式通道内冷却剂的焓升 | (272) |
| 第七章 | 热工设计概论 | (287) |
| 7.1 | 热工设计简介 | (287) |
| 7.2 | 热工设计与热能动力装置总体设计、堆物理设计、堆内结构设计的关系 | (290) |
| 7.2.1 | 热工设计与热能动力装置总体设计的关系 | (290) |
| 7.2.2 | 热工设计与堆物理设计的关系 | (290) |
| 7.2.3 | 与堆内结构设计的关系 | (291) |
| 7.3 | 热工设计与燃料元件设计的关系 | (292) |
| 7.4 | 热工设计准则 | (294) |
| 7.5 | 热工参数的选择 | (296) |
| 7.5.1 | 压力 | (296) |
| 7.5.2 | 流量和流程 | (296) |
| 7.5.3 | 温度 | (298) |
| 7.6 | 稳态热工设计中应考虑的一些安全因素 | (299) |
| 7.6.1 | 热工运行参数容许的波动范围 | (300) |
| 7.6.2 | 恰当的设计参数(功率、温度、压力、流量) | (301) |
| 7.6.3 | 额定工况或设计参数下热工设计准则所各自对应的值 | (301) |
| 7.6.4 | 计算最小烧毁比时所采用的烧毁安全因子 $F_{\text{烧毁}}$ | (303) |
| 7.6.5 | 旁通流量 | (304) |
| 7.7 | 一些典型轻水堆的热工参数和燃料元件参数 | (304) |
| 第八章 | 反应堆稳态热工设计 | (319) |
| 8.1 | 稳态热工设计简介 | (319) |
| 8.2 | 单通道模型 | (320) |
| 8.2.1 | 反应堆参数计算 | (321) |
| 8.2.2 | 冷却剂流量计算 | (322) |
| 8.2.3 | 最小烧毁比的计算 | (324) |

| | | |
|--------|--------------------------|---------|
| 8·2·4 | 燃料元件温度场的计算 | (325) |
| 8·3 | 子通道模型 | (327) |
| 8·3·1 | 子通道的划分 | (328) |
| 8·3·2 | 一维基本方程式 | (330) |
| 8·3·3 | 三维基本方程式 | (334) |
| 8·3·4 | 联解方程组的方法 | (337) |
| 8·4 | 热通道(点)因子 | (345) |
| 第九章 | 活性区热工设计的可靠性分析 | (354) |
| 9·1 | 问题的提出 | (354) |
| 9·2 | 可靠性和可靠性分析程序 | (355) |
| 9·3 | 设计变数不确定性 | (359) |
| 9·4 | 设计参数数学表达式 | (361) |
| 9·5 | 单一设计参数模型 | (364) |
| 9·5·1 | 基本假设 | (364) |
| 9·5·2 | 单一设计参数模型的活性区非破损概率 | (365) |
| 9·6 | 独立设计参数模型 | (366) |
| 9·6·1 | 破损点发生的多元性 | (366) |
| 9·6·2 | 各个点的非破损概率对活性区非破损概率的影响 | (367) |
| 9·6·3 | 独立设计参数模型的活性区非破损概率 | (368) |
| 9·6·4 | 关于点尺寸大小的讨论 | (370) |
| 9·7 | 相关设计参数模型 | (372) |
| 9·7·1 | 各点设计参数的相关性 | (372) |
| 9·7·2 | 相关设计参数模型的活性区非破损概率 | (373) |
| 9·8 | 允许元件棒破损时的活性区可靠性 | (375) |
| 9·8·1 | 活性区可靠性 $P\{D \leq D^*\}$ | (375) |
| 9·8·2 | 蒙特·卡洛处理 | (377) |
| 9·9 | 结语 | (379) |
| 第十章 | 反应堆热工暂态分析 | (382) |
| 10·1 | 引言 | (382) |
| 10·2 | 燃料元件的导热方程及其边界条件 | (383) |
| 10·3 | 描写冷却剂热工水力状态的基本方程 | (386) |
| 10·3·1 | 质量守恒方程 | (387) |

| | | |
|--------|----------------------------------|-------|
| 10·3·2 | 动量守恒方程 | (388) |
| 10·3·3 | 能量守恒方程 | (389) |
| 10·4 | 几种特殊情况下的质量、动量和能量守恒方程 及其应用 | (390) |
| 10·4·1 | 在通道中冷却剂作一维流动时的质量、动量和能量 守恒方程 | (390) |
| 10·4·2 | 在等截面通道中冷却剂作一维流动的质量、动量和 能量守恒方程 | (395) |
| 10·4·3 | 描写两相流动用的宏观量计算 | (397) |
| 10·4·4 | 质量、动量和能量守恒方程在燃料组件出 入口处的应用 | (400) |
| 10·5 | 反应堆暂态计算中热工水力学方程的几种处理方法 | (402) |
| 10·5·1 | 分段可压缩模型 | (402) |
| 10·5·2 | 动量积分模型 | (404) |
| 10·5·3 | 单一质量流速模型 | (406) |
| 10·5·4 | 通道积分模型 | (406) |
| 10·6 | 反应堆功率的计算 | (409) |
| 10·6·1 | 中子动力学方程 | (409) |
| 10·6·2 | 各种反应性及其计算 | (411) |
| 10·7 | 主循环泵电机断电后的回路流量暂态计算 | (417) |
| 10·8 | 反应堆热工水力暂态分析的活性区模型、所需 基本方程及其应用 | (424) |
| 10·9 | 几种可能发生的事故工况介绍 | (428) |
| 10·9·1 | 反应堆一回路系统冷却剂流量丧失事故 | (429) |
| 10·9·2 | 控制棒反应性事故工况 | (431) |
| 10·9·3 | 冷水事故 | (432) |
| 10·9·4 | 蒸汽负荷丧失事故 | (434) |
| 第十一章 | 失水事故 | (436) |
| 11·1 | 概述 | (436) |
| 11·1·1 | 失水事故的起因及后果 | (436) |
| 11·1·2 | 失水事故的过程及预防措施 | (441) |
| 11·1·3 | 失水事故热工分析的准则 | (443) |

| | | |
|--------|------------------|-------|
| 11·1·4 | 失水事故安全分析的发展趋向 | (444) |
| 11·2 | 计算模型 | (445) |
| 11·2·1 | 计算模型的演变 | (445) |
| 11·2·2 | 控制容积 | (446) |
| 11·2·3 | 通道 | (447) |
| 11·3 | 回路热工水力状态的计算 | (449) |
| 11·3·1 | 破口流量的计算 | (450) |
| 11·3·2 | 控制容积的质量、能量平衡 | (453) |
| 11·3·3 | 各容积的压力求解 | (455) |
| 11·3·4 | 各容积泡沫高度的计算 | (457) |
| 11·3·5 | 安全壳压力计算 | (459) |
| 11·3·6 | 通道的流量计算 | (461) |
| 11·4 | 活性区的热工水力状态计算 | (463) |
| 11·4·1 | 活性区通道的焓场及压降计算 | (463) |
| 11·4·2 | 活性区相对功率和临界热通量的计算 | (465) |
| 11·4·3 | 元件温度场的计算和放热系数的选取 | (468) |
| 11·4·4 | 金属-水反应 | (470) |
| 11·4·5 | 危急冷却期的传热分析 | (472) |
| 11·4·6 | 时间步长的选择 | (474) |
| 11·5 | 压力波分析 | (476) |

基本符号表

附录 单位换算表

第一章 绪 论

1.1 动力反应堆简介

自从发现铀-235 可以裂变并同时释放大量能量以来,为利用裂变产生的能量,许多国家进行了大量的研究工作。在四十年代建造了第一个可控制的核裂变反应装置——核反应堆后,五十年代开始建造了以生产动力为目的的核动力反应堆。到今天,已有数以百计的动力堆投入使用。它们所提供的核能在全世界消耗的能量中已占有可观的份额,而且还在不断地增长。

核反应堆,按参加核反应的中子能量的大小,大致可分为快中子反应堆和热中子反应堆两类。直至现在,快中子反应堆尚未进入实用阶段。世界上现有的核动力堆基本上都是热中子反应堆。

过去二十多年,曾发展了许多类型的动力堆。它们之间虽然差别很大,但也有共同之处,这主要有以下几个方面:

1. 都必须装有足够的可裂变物质——核燃料,以保证核裂变链式反应在规定的寿期内能持续进行。也就是,堆内核燃料的质量不得小于临界质量。

2. 热中子反应堆还必须有使快中子慢化为热中子的慢化剂。能作慢化剂的都是原子量较小的元素或它们的化合物,如水、重水、铍、石墨和烃类等。

3. 所有动力堆都必须及时地、有效地从活性区内把核裂变产生的热能导出。这个任务由流过活性区的冷却剂来完成。水、重水、氮气和液态钠都可以作冷却剂。

4. 各种类型的反应堆都必须有控制中子链式反应速度的手

段，如加入中子吸收截面大的控制材料，移动燃料的位置以及改变慢化剂的数量和它们的慢化能力等。

5. 为了保证燃料、慢化剂、冷却剂和控制材料在活性区内按一定方式定位或运动及保证各种测量、控制和连接的部件处在适当的位置，各种类型的反应堆都要有专门设计的堆内部件。

由于可作为燃料、慢化剂和冷却剂的材料有许多种，它们之间的不同组合会给出相当多不同类型的反应堆。但实际上，适宜作动力堆的并不多。表1.1中列出的是目前主要动力堆的类型，其中还包括一类尚未实现但被认为很有希望的气冷快中子反应堆。

表 1.1 主要动力堆类型

| | 反应堆类型 | 燃料 | 慢化剂 | 冷却剂 | 电站举例 | | |
|--------|-----------|-------|-----|------|----------------|-----|--------|
| | | | | | 名称 | 国家 | 功率,兆瓦热 |
| 热中子反应堆 | 石墨慢化水冷堆 | 天然铀 | 石墨 | 轻水 | Kypck | 苏联 | 2100 |
| | 石墨慢化气冷堆 | 天然铀 | 石墨 | 二氧化碳 | Calder Hall | 英国 | 220 |
| | 重水慢化重水冷却堆 | 天然铀 | 重水 | 重水 | Douglas | 加拿大 | 698 |
| | 重水慢化轻水冷却堆 | 低浓缩铀 | 重水 | 轻水 | SGHWR-100 | 英国 | 294 |
| | 压水堆 | 低浓缩铀 | 轻水 | 轻水 | SanOnofre-2 | 美国 | 3390 |
| | 沸水堆 | 低浓缩铀 | 轻水 | 轻水 | Bailly | 美国 | 3579 |
| | 改进型气冷堆 | 低浓缩铀 | 石墨 | 二氧化碳 | Hunterstone-B | 英国 | 2600 |
| | 高温气冷堆 | 低浓缩铀 | 石墨 | 氦气 | Peach Bottom-1 | 美国 | 115 |
| | 球床高温气冷堆 | 低浓缩铀 | 石墨 | 氦气 | AVR | 西德 | 49 |
| 快中子堆 | 钠冷快堆 | 高浓缩铀钚 | 无 | 钠 | Phenix | 法国 | 563 |
| | 气冷快堆 | 高浓缩铀钚 | 无 | 氦气 | (未实现) | — | — |

表1.1所列举的热中子动力堆，以压水堆、沸水堆、高温气冷堆和重水堆的经济性要好些。压水堆和沸水堆的数量差不多占

世界上核电站动力堆的80%。

压水堆是动力堆中最重要的一种，通过对它的分析也有助于了解其它类型动力堆的一般情况。因此，下面将重点介绍压水堆。

1.2 压水堆动力装置简介

压水堆是采用轻水慢化和冷却的反应堆。它是核动力装置的核心。核裂变产生的热量由冷却剂带到蒸汽发生器，在其中经过热交换产生蒸汽，并用它来推动汽轮机以获得动力。为了提高蒸汽的参数，冷却剂要有较高的温度；但又要保持活性区出口无净蒸汽产生，反应堆必须在高压下运行。压力的大小是与选用的蒸汽参数密切相关的。苏联早期建造的压水堆，选用了压力为29公斤/厘米²的饱和蒸汽，堆内压力为100公斤/厘米²。若蒸汽压力为42公斤/厘米²，堆内压力就要保持在140公斤/厘米²左右。目前，大多数电站压水堆的正常运行压力都在140—160公斤/厘米²之间。

世界上第一个功率较大的压水堆是美国核潜艇“鲐鱼号”的模拟堆S₁W。根据这个反应堆设计了压水堆电站 Shippingport。自从1957年这个电站投入运行以来，二十年中，全世界已建成和正在建造的压水堆电站达一百多个。单堆电功率高达130万千瓦。压水堆电站生产的电能差不多占全部核电站供电量的一半。据资料报道，各国的核动力舰船几乎都是采用压水堆。

1. 压水堆本体

堆本体包括压力壳、活性区、堆内支承结构和控制棒驱动机构四大部分。图1.1是典型压水堆本体的纵剖面图。活性区由燃料元件组件（简称燃料组件）组成，它的外面是活性区围板。活性区和它的围板置于压力壳内，并由支承结构定位。核裂变反应在活性区内进行，反应速度由控制棒驱动机构带动的控制棒来调节。活性区和压力壳间的金属圆筒称为热屏蔽。它和水隙起减弱 γ 射

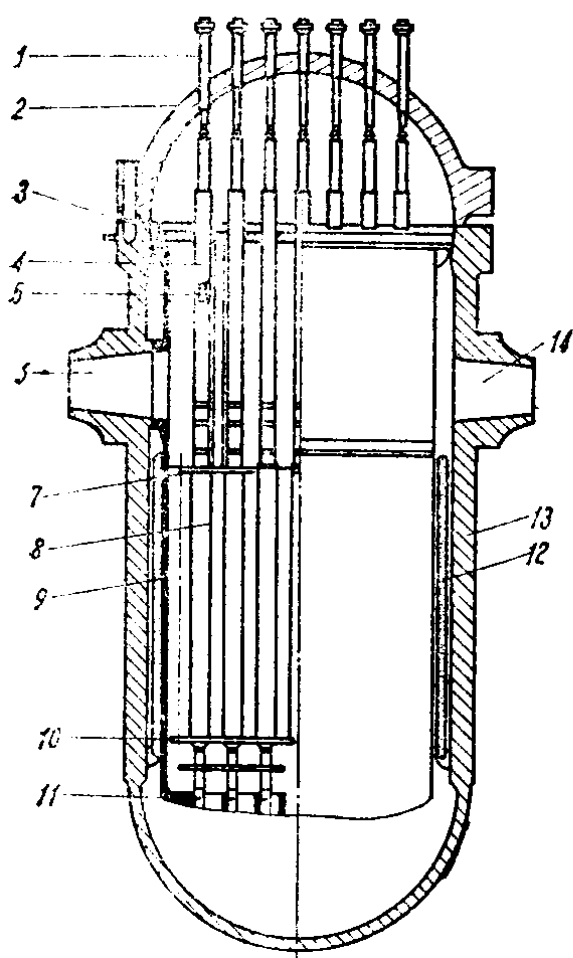


图 1.1 典型压水堆的纵剖面图

1. 控制棒驱动机构； 2. 压力壳顶盖； 3. 导向管支承板； 4. 导向管； 5. 控制棒； 6. 出口接管； 7. 上栅格板； 8. 燃料组件； 9. 吊篮； 10. 下栅格板； 11. 活性区支座； 12. 热屏蔽； 13. 压力壳； 14. 入口接管。

线强度和降低快中子通量的作用；这有利于改善压力壳的工作条件，延长它的使用寿命。最近设计的压水堆也有不用热屏蔽的。在压力壳外围设有一次屏蔽，使安置在压力壳外面的设备处于较低的中子和 γ 通量水平之下。

铀-235、铀-233 和钚-239 都可以用来作为水堆的燃料。目前，核电站压水堆主要是用低浓缩的二氧化铀陶瓷燃料。早期的反应堆曾用过金属铀和它的合金作燃料，由于其使用温度不能超过相变温度，且易受高温水腐蚀，不宜用于活性区温度较高的压水堆。陶瓷燃料还包括铀的碳化物和氮化物等。这两类化合物能与水发生

激烈的化学反应，因而对压水堆是不适宜的，只能考虑在气冷或钠冷堆中使用。目前，也有一些功率小的压水堆为提高燃耗深度而采用高浓缩的二氧化铀弥散在基体金属中的弥散体作燃料。

压水堆采用过的燃料元件有三种形式：板状、管状和棒状，其中管状元件用得很少。

板状元件是把燃料做成薄片，然后用包壳材料覆盖两面压紧密封而成的。将若干片元件固定在一起制成燃料组件。组件内各燃料板间保持一定的距离，作为冷却剂流动的通道。Shippingport 压水堆的点火区采用的是板状元件。

目前，绝大多数压水堆电站都采用棒状元件。元件棒是由烧结的二氧化铀柱状芯块装在壁厚为 0.5—0.7 毫米的锆合金包壳管中密封而制得的。芯块的直径和高度约为 10 毫米。燃料棒按三角形或正方形的方式排列，固定在由导向管、通量测量管与定位栅连接而成的刚性骨架结构内，再加下部和上部结构，构成一个燃料组件。燃料棒之间保持一定距离，冷却剂从中间流过，把燃料棒内产生的热量带走。

压水堆普遍采用加入中子吸收剂的控制方法，包括用控制棒、用可燃毒物和冷却剂中加入可溶毒物如硼酸等办法。

控制棒由铪、铟-银-镉合金或碳化硼制成。通过控制棒在活性区中上下移动，可以控制中子链式反应的速度并实现开堆与停堆。

由于压水堆的初期剩余反应性很大，若都靠控制棒中的补偿棒来抵销，则需要很多控制棒。这不但布置、排列有困难，对展平活性区的中子通量也是不利的。因此，可以采用可燃毒物和冷却剂中加可溶硼化物的附加办法，来抵销掉一部分初期剩余反应性。可燃毒物都是中子吸收截面大的材料，如碳化硼、氧化钐和硼钢等。可以制成单独的可燃毒物棒，固定在活性区内确定的位置上。也可以把可燃毒物混在燃料中。但是，要保证少量的可燃毒物和燃料混合得符合反应堆物理设计要求，在工艺上是比较困难的。陆上电站压水堆普遍地在冷却剂中加入一定浓度的硼酸，以抵销剩余反应性。舰船用的压水堆还没有采用过这种方法。

有关控制棒的改进，例如采用较细的束棒代替较粗的单棒控制，采用长的和短的控制棒结合进行控制等，主要是围绕着如何把活性区中子通量展平这一目的进行的。

2. 蒸汽发生器

蒸汽发生器是核动力装置中的主要设备。它利用核能产生一定压力和温度的水蒸汽。核电站采用的蒸汽发生器有两种类型：一种是直流式蒸汽发生器，另一种是带汽水分离器的饱和蒸汽发生器。