

# 核材料与应用

周明胜 田民波 戴兴建 编著

清华大学出版社

核材料与应用

本书为核材料科学与工程领域的一本重要教材，旨在系统介绍核材料的物理、化学、冶金、材料科学等方面的基础知识。本书共分八章，第一章介绍核材料的定义、分类及用途；第二章介绍核材料的物理性质；第三章介绍核材料的化学性质；第四章介绍核材料的冶金学；第五章介绍核材料的材料科学；第六章介绍核材料的辐照效应；第七章介绍核材料的腐蚀与防护；第八章介绍核材料的回收与再利用。本书可作为核工程、核物理、核化学、核材料等专业本科及研究生的教材，也可供从事核材料工作的工程技术人员参考。

# 核材料与应用

ISBN 7-302-10741-9 R949.84-915 定价：35.00元

周明胜 田民波 戴兴建 编著

清华大学出版社

清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座 邮编：100084  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

电话：(010)62770175 传真：(010)62770176

发行：(010)62770175

核材料与应用  
周明胜 田民波 戴兴建 编著  
清华大学出版社  
北京

清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn  
清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn  
清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

《核材料与应用》是为工程物理系本科生“核材料系列课程”编写的教材之一,内容包括核能利用与核材料,核燃料,锆合金包壳材料,压力壳用低合金高强度钢,反应堆用不锈钢,核电厂用高温合金和耐热钢,高温气冷堆用石墨材料,快堆燃料和包壳材料,中子吸收材料及屏蔽材料,聚变堆材料等共 10 章,涉及核材料与应用各个方面。

本书针对不同的材料,如核压力容器用钢、反应堆用不锈钢、耐热钢、高温合金、锆合金、控制、慢化和反射材料等,不同的结构,如燃料元件、燃料元件包壳、核压力容器、主管道、蒸汽发生器等,不同的工况,如高温、高温度梯度、高热流、高速流场的作用及高剂量辐照等,从材料科学与工程四面体角度,分析了材料成分、组织结构、加工制造以及性能与功能之间的关系,以便为核工程选材以及分析、解决反应堆材料问题提供坚实的基础与依据。

本书对从事反应堆材料和反应堆设计、研究、运行、生产和教学以及其他相关材料专业的科技人员、大学生、研究生都有参考价值。

核材料与应用

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

清华大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

核材料与应用/周明胜,田民波,戴兴建编著. —北京:清华大学出版社,2017  
ISBN 978-7-302-48653-4

I. ①核… II. ①周… ②田… ③戴… III. ①核工程—工程材料 IV. ①TL34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 262218 号

责任编辑:袁琦  
封面设计:常雪影  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:210mm×297mm

印 张:20.75

字 数:686千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00元

清华大学出版社

产品编号:069034-01

本书是为工程物理系本科生“核材料系列课程”编写的教材。该系列课程教材包括《材料学导论》《核能利用与核材料》《核材料与应用》《材料的腐蚀与防护》等。

没有核燃料便没有核能发出；没有核结构材料便不能构成核装置。《核材料与应用》正是针对核燃料和核结构材料这两类材料进行讨论的。内容包括核能利用与核材料，核燃料，锆合金包壳材料，压力壳用低合金高强度钢，反应堆用不锈钢，核电厂用高温合金和耐热钢，高温气冷堆用石墨材料，快堆燃料和包壳材料，中子吸收材料及屏蔽材料，聚变堆材料等共 10 章，涉及核材料与应用各个方面。

目前，对“核材料”这个名词没有统一的看法和定义。有人认为它是用于核科学和核工程的材料的总称；有人认为它是专指裂变反应堆和聚变反应堆所用材料；有人把它定义为裂变材料和聚变材料的总称，即与核燃料的概念相似。

广义的核材料是核工业及核科学研究中所专用的材料的总称，也可以把核材料归结为核能材料或核工业所用材料的总称。

核燃料是指能产生核裂变或核聚变反应并释放出巨大核能的物质。核燃料可分为裂变燃料和聚变燃料(或称热核燃料)两大类。裂变燃料主要指易裂变核素如铀 235、钚 239 和铀 233 等。此外，由于铀 238 和钍 232 是能够转换成易裂变核素的重要原料，且其本身在一定条件下也可以产生裂变，所以习惯上也称其为核燃料。聚变燃料包含氢的同位素氘、氚，锂 6 和其化合物等。

核工程材料是指反应堆及核燃料循环和核技术中用的各种特殊材料，如反应堆结构材料、元件包壳材料、反应堆控制材料、慢化剂、冷却剂、屏蔽材料等。例如特种铝合金、镁合金、锆合金、钛合金、低合金高强度钢、特种不锈钢、高温镍基合金、耐热钢、特种石墨、特种陶瓷、混凝土、半导体乃至高分子材料等。

材料科学与工程包括四个基本要素，即材料的成分、材料的组织和结构、材料的制备与加工、材料的性能和应用特性，一般形象地将四要素表示为四面体的四个顶点。这是理解材料科学与工程问题的总纲。核材料的研制和应用，核材料在服役过程中受到的影响，核材料的时效、老化、失效乃至核事故的分析等，当然也涵盖在这四个要素之中。显然，整个核工程和核材料领域都离不开材料科学与工程的基础知识。

一个核反应堆，它的核心是一个能量密度很高的热源。处在那里的材料自然会面临高温、高温度梯度、高热流、高速流场的作用，这本身已构成很特殊的问题。但是，在这以外最特殊的因素当属材料的核性能和中子的作用。反应堆材料所面临的工况比迄今为止我们遇到的任何工程所面临的条件要复杂得多，包括核燃料的链式反应、放射性、高温、扩散、肿胀，核结构材料的辐照、腐蚀、高温、蠕变环境等。因此人们说：“The importance of behavior of the reactor materials can not be over-emphasized.”意思是说，反应堆材料问题的重要性无论如何强调也不过分。

压水堆的“压”，沸水堆的“沸”，高温气冷堆的“高温”，都是为了提高堆芯的能量密度，更高效地取出能量而采取的非常规措施。但与此同时，核材料必须承受超常的负荷。实际上，这些反应堆的工作参数，如

温度、压力、功率密度、燃耗等,无一不是由材料的性能和承受能力来确定的。

因此,本课程在讨论材料的性能、制备工艺、使用行为等与成分、微观组织和结构关系的同时,将针对核工程材料的特殊问题,包括材料的核特性、辐照、腐蚀、高温环境等进行论述。只有掌握这些,才能将材料科学的知识升华为核材料科学的水平。

从工程角度,核材料工作者的任务是选材(包括制作)、改性、检测和创新。由于核材料服役于更严酷的环境下,因此,上述任务更艰巨,承担的责任也更大。为此培养的学生,理论基础要更厚实,知识面要更宽,工程实践训练要更充分。

材料科学与工程已经是一个很综合的领域,再结合到“物理工程”的特点,这就需要跨学科地学习和交叉融汇,这当然不是一两门课程所能奏效的。

基于上述特殊服役环境,核材料具有以下特点:①种类繁多,不可替代;②服役环境恶劣;③性能要求极高;④易老化失效;⑤一旦失效,后果严重;⑥服役结束后,处理、处置困难。“核材料系列课程”要侧重这些来讲授。

为此,“核材料系列课程”主要针对以下问题进行讨论:①是什么,②为什么,③怎么加工制造,④有什么用、怎么用,⑤服役中会发生什么变化,⑥如何提高性能。《材料学导论》主要涉及问题①、②、③、⑥;《核材料与应用》主要涉及问题③、④、⑤、⑥。

“核材料系列课程”在内容组织上强调浅、宽、新、活、鲜,避免深、窄、旧、偏、玄。力求突出重点、理清思路,强调基本概念和基本原理,着重核材料的应用和创新,提高同学分析问题(例如核材料的失效分析)和解决问题(例如反应堆材料的选材)的能力。加上通俗易懂、图文并茂的教材,相信会达到较好的教学效果。

本书所涉及的领域极为广泛,不仅多学科交叉,而且许多知识既专又深且新,显然编者力所不能及。受惠于许多学长的学识和开创性劳动以及新出版的著作,本教材在编写过程中引用了许多他们的原始论述,在书后的参考文献中都一一列出。在对诸位学长深表谢意的同时,也为他们与编者一起为培养人才和普及知识所做出的贡献十分欣慰。

本书的编写受到清华大学工程物理系教学指导委员会的指导并得到工程物理系的资助,在此表示衷心感谢。

本书可作为工程物理、材料、能源、机械、环境、化工、电力等学科本科生及研究生教材,对于从事相关行业的科技工作者和工程技术人员,也有极为难得的参考价值。

编者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2017年9月

# 目 录

## CONTENTS

第 1 章 核能利用与核材料 .....	1
1.1 核电发展概况 .....	1
1.1.1 天然的核反应堆 .....	1
1.1.2 核电厂的原理及优势 .....	2
1.1.3 核电厂系统组成 .....	3
1.1.4 核电厂主要反应堆类型 .....	6
1.1.5 世界核电发展历史和现状 .....	13
1.1.6 中国核电发展后来居上 .....	17
1.2 核反应堆部件的功能和工件环境 .....	21
1.2.1 核燃料元件 .....	22
1.2.2 慢化剂 .....	23
1.2.3 冷却剂 .....	23
1.2.4 堆内构件 .....	23
1.2.5 控制棒组件 .....	24
1.2.6 反射层 .....	24
1.2.7 反应堆容器 .....	24
1.2.8 安全壳 .....	25
1.2.9 屏蔽层 .....	25
1.2.10 回路管道 .....	25
1.2.11 主泵 .....	25
1.2.12 蒸汽发生器 .....	26
1.2.13 稳压器 .....	26
1.3 对核反应堆材料的要求 .....	26
1.3.1 低中子俘获截面 .....	27
1.3.2 辐照稳定性 .....	28
1.3.3 耐蚀性 .....	28
1.3.4 相容性 .....	28
1.4 核电厂材料的分类 .....	29
1.4.1 常规岛用材料 .....	29

1.4.2	反应堆核岛用材料 .....	29
1.5	利用材料科学与工程四要素分析核材料 .....	30
1.5.1	材料科学与工程四要素 .....	30
1.5.2	各类核反应堆电厂的结构部件及所用材料 .....	31
1.5.3	压水堆核电站结构及所用材料 .....	33
	复习题及习题 .....	35
<b>第2章</b>	<b>核燃料</b> .....	<b>37</b>
2.1	核燃料概述 .....	37
2.1.1	核燃料的分类 .....	37
2.1.2	核燃料资源 .....	39
2.1.3	裂变核燃料的临界质量和临界体积 .....	40
2.1.4	核燃料的入堆形式 .....	41
2.1.5	裂变核燃料的富集度·浓缩铀 .....	43
2.1.6	裂变核燃料材料的类型和化学成分 .....	44
2.1.7	核燃料的增殖 .....	46
2.2	金属型燃料 .....	47
2.2.1	铀和铀合金 .....	48
2.2.2	铀-钚-锆合金 .....	50
2.3	二氧化铀燃料的制造 .....	55
2.3.1	二氧化铀作为核燃料的优势 .....	55
2.3.2	二氧化铀燃料芯块的生产流程 .....	55
2.3.3	对 UF <sub>6</sub> 原料和二氧化铀粉末产品的初步了解 .....	56
2.3.4	二氧化铀粉末的生产 .....	58
2.3.5	二氧化铀芯块的生产 .....	62
2.3.6	压水堆燃料元件(棒)制造 .....	64
2.3.7	燃料组件 .....	64
2.4	二氧化铀的基本性质 .....	65
2.4.1	铀-氧系相图 .....	65
2.4.2	物理性质 .....	65
2.4.3	热物理性质 .....	67
2.4.4	二氧化铀燃料的力学性能 .....	68
2.4.5	二氧化铀燃料的化学性能 .....	69
2.5	二氧化铀芯块的堆内行为 .....	70
2.5.1	辐照下二氧化铀燃料中发生的现象 .....	70
2.5.2	芯块开裂 .....	71
2.5.3	芯块密实化 .....	72
2.5.4	重结构 .....	72
2.5.5	辐照肿胀 .....	73
2.5.6	裂变气体释放 .....	73
2.5.7	氧及可挥发性裂变产物的再分布 .....	75
2.6	MOX 燃料 .....	75
2.7	高性能陶瓷燃料 .....	76
2.7.1	陶瓷型燃料对比 .....	76
2.7.2	碳化物燃料 .....	77

2.7.3 氮化物燃料 .....	82
2.8 其他燃料 .....	85
2.9 核燃料循环 .....	85
2.9.1 裂变核燃料循环 .....	85
2.9.2 聚变核燃料循环 .....	88
2.9.3 核反应堆中放射性物质的生成 .....	88
2.9.4 核裂变与裂变能 .....	88
2.9.5 核裂变中生成的放射性物质 .....	90
2.9.6 放射性废弃物及其处理和处置 .....	92
复习题及习题 .....	93
<b>第3章 锆合金包壳材料 .....</b>	<b>95</b>
3.1 热堆燃料元件包壳材料选取原则 .....	95
3.1.1 包壳的作用及包壳材料应具备的条件 .....	95
3.1.2 各种热堆包壳材料简介 .....	96
3.1.3 轻水堆包壳材料非锆莫属 .....	96
3.2 金属锆的基本性质 .....	97
3.2.1 锆的发展简史 .....	97
3.2.2 锆的矿物资源 .....	97
3.2.3 锆的基本性质 .....	98
3.2.4 锆的晶体结构 .....	99
3.2.5 锆的塑性形变特点 .....	100
3.3 锆的合金化 .....	101
3.3.1 锆合金的合金化原理 .....	101
3.3.2 锆锡合金的发展 .....	102
3.3.3 锆合金包壳材料的成分及其作用 .....	102
3.4 锆合金在反应堆中的应用 .....	104
3.4.1 锆合金用于反应堆的发展历程 .....	104
3.4.2 作为燃料包壳材料的锆合金 .....	104
3.4.3 用于反应堆的其他锆合金 .....	107
3.4.4 中国的锆合金发展 .....	107
3.5 锆合金管的制造 .....	107
3.5.1 锆合金管制造工艺流程 .....	107
3.5.2 冶炼和铸锭制造 .....	108
3.5.3 压力加工和热处理 .....	111
3.5.4 锆合金包壳的微观组织结构和宏观特性 .....	113
3.6 锆合金的力学性质 .....	114
3.6.1 Zr-2 和 Zr-4 合金的基本力学性质 .....	114
3.6.2 Zr-2 和 Zr-4 合金的蠕变性能 .....	115
3.7 锆合金包壳管的堆内行为 .....	115
3.7.1 表面腐蚀(氧化) .....	115
3.7.2 吸氢与氢脆 .....	117
3.7.3 锆合金辐照生长 .....	119
3.7.4 力学性能变化 .....	120
3.7.5 芯块与包壳的相互作用 .....	120

3.8	事故条件下锆合金管的行为	122
3.8.1	失水事故条件下锆合金包壳管的行为	122
3.8.2	堆芯熔毁事故条件下的包壳行为	125
	复习题及习题	128
<b>第4章</b>	<b>压力壳用低合金高强度钢</b>	<b>129</b>
4.1	钢及镍合金构成轻水堆的骨架和循环系统	129
4.1.1	一座100万kW核电厂要使用5万t以上的优质钢材	129
4.1.2	压力容器的作用及服役条件分析	130
4.1.3	压力容器成形加工及焊接	131
4.1.4	压水堆核电厂核岛部分用大型锻件	134
4.2	反应堆压力容器及选材特殊要求	136
4.2.1	反应堆容器及对反应堆安全的保障	136
4.2.2	反应堆对钢和镍合金材料的特殊要求	137
4.3	核电压力容器用钢及其演化历史	139
4.3.1	核电压力容器用钢简介	139
4.3.2	核电压力容器用钢的演化历史	141
4.3.3	压力容器钢及其性质	143
4.4	SA508(20 MnMoNi)系列钢的化学成分和力学性能	145
4.4.1	压水堆压力容器用钢的化学成分和力学性能	145
4.4.2	SA508系列钢中的主要元素及其作用	146
4.5	SA508-3钢的冶炼、加工及热处理	148
4.5.1	SA508-3钢的冶炼	148
4.5.2	通过控制锻造提高合金钢的性能	148
4.5.3	借由 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变实现 $\alpha$ 相晶粒细化	150
4.5.4	贝氏体组织SA508-3压力容器用钢	150
4.5.5	调质处理的SA508-3压力容器用钢	150
4.6	压力容器钢的辐照脆化及其影响因素	151
4.6.1	压力容器钢的辐照脆化	151
4.6.2	压力容器钢的辐照脆化的影响因素	153
4.7	大型锻件中的氢及氢损伤	157
4.7.1	大型锻件中氢的来源	157
4.7.2	氢在钢中的存在状态	157
4.7.3	氢在钢中的渗透与溶解	158
4.7.4	氢对钢力学性能的影响	159
4.7.5	氢脆理论	159
	复习题及习题	160
<b>第5章</b>	<b>反应堆用不锈钢</b>	<b>161</b>
5.1	何谓不锈钢	161
5.1.1	不锈钢的定义	161
5.1.2	不锈钢“不生锈”的原因	161
5.1.3	有哪些类型的不锈钢	162
5.1.4	为什么奥氏体不锈钢在反应堆中用得最多	164
5.2	不锈钢的成分和相组成特点	165

5.2.1	各类不锈钢的成分和相组成特点	165
5.2.2	铬镍奥氏体不锈钢的热处理	167
5.2.3	不锈钢的发展和性能提高	169
5.3	不锈钢的基本性质	170
5.3.1	物理性质	170
5.3.2	力学性质	170
5.3.3	耐蚀性	171
5.4	不锈钢在反应堆中的应用	172
5.4.1	堆芯和堆内构件以及控制棒驱动机构用不锈钢和镍合金	172
5.4.2	一回路管道和冷却剂泵用不锈钢	175
5.4.3	对反应堆用不锈钢性能的要求	176
5.5	不锈钢在堆内的腐蚀行为	176
5.5.1	不锈钢在水溶液中的几种主要腐蚀现象	176
5.5.2	奥氏体不锈钢在堆内的腐蚀	183
5.5.3	管道材料的应力腐蚀	184
	复习题及习题	186
<b>第 6 章</b>	<b>核电厂用高温合金和耐热钢</b>	<b>187</b>
6.1	蒸汽发生器严酷的服役环境	187
6.1.1	反应堆中的蒸汽发生器	187
6.1.2	蒸汽发生器的服役环境和各类腐蚀问题	188
6.2	蒸汽发生器传热管材料现状	190
6.2.1	传热管破损的部位和原因	190
6.2.2	传热管材料现状	191
6.3	反应堆用高温合金	192
6.3.1	高温合金的种类	192
6.3.2	高温合金的合金化原理和相组织	193
6.3.3	合金元素的作用及其对性能的影响	195
6.3.4	镍基合金的抗 SCC 性能	197
6.3.5	堆芯用镍基合金	199
6.4	耐热钢的合金化原理	200
6.4.1	耐热钢的性能要求	201
6.4.2	耐热钢的合金化措施	201
6.5	超临界发电机组用 9%~12%Cr 马氏体耐热钢	204
6.5.1	超临界机组发电是提高热效率的有效手段	204
6.5.2	铁素体耐热钢的发展历史	205
6.5.3	9%~12%Cr 马氏体耐热钢的强化机理	206
6.5.4	9%~12%Cr 马氏体耐热钢的研究现状及主要存在的问题	209
6.5.5	G115 钢的成分设计	215
	复习题及习题	216
<b>第 7 章</b>	<b>高温气冷堆用石墨材料</b>	<b>217</b>
7.1	高温气冷堆——石墨的用武之地	217
7.1.1	高温气冷堆是第四代反应堆的代表	217
7.1.2	高温气冷堆用石墨材料	217

7.2	石墨的结构、性能及制作工艺	218
7.2.1	石墨的晶体结构	218
7.2.2	石墨的独特性能使其成为核能领域的关键材料	220
7.2.3	核石墨的基本制作工艺	221
7.3	高温气冷堆用包覆颗粒燃料	221
7.3.1	高温气冷堆简介	221
7.3.2	高温气冷堆燃料元件类型	223
7.3.3	包覆燃料颗粒类型	225
7.3.4	燃料核芯类型	228
7.4	高温气冷堆用石墨的发展	228
7.4.1	核石墨的制作	228
7.4.2	石墨在高温气冷堆中的应用	231
7.4.3	各国高温气冷堆石墨的发展	234
7.4.4	核石墨材料的发展方向	237
	复习题及习题	238
<b>第8章</b>	<b>快堆燃料和包壳材料</b>	<b>239</b>
8.1	实现核燃料增殖的有效途径——快中子增殖堆	239
8.1.1	快堆发展已进入第三代	239
8.1.2	可转换核素和核燃料的增殖	240
8.1.3	快中子增殖堆的特征	241
8.2	快堆燃料组件	243
8.2.1	燃料组件的功能和结构	243
8.2.2	快中子增殖堆燃料的发展史、现状和发展趋势	246
8.3	快堆燃料元件的使用环境和性能要求	249
8.3.1	快堆燃料组件极严酷的工作环境	249
8.3.2	快堆燃料芯块的发热分析	250
8.3.3	快堆用二氧化铀燃料	251
8.4	快堆用 MOX 燃料制造	252
8.4.1	用于快堆和热堆的 MOX 燃料	252
8.4.2	快堆 MOX 核燃料组件制造流程	252
8.4.3	MOX 粉末制造	254
8.4.4	MOX 芯块制造	259
8.5	$(U,Pu)O_2$ 的基本性质及堆内行为	261
8.5.1	物理性质	261
8.5.2	力学性质	263
8.5.3	堆内行为	264
8.6	快堆包壳材料	265
8.6.1	快堆包壳材料应具备的条件	265
8.6.2	材料选择要求	265
8.6.3	材料的选择和演化	266
8.7	快堆包壳材料的辐照损伤	267
8.7.1	辐照损伤机制	267
8.7.2	不锈钢的辐照效应	271

8.7.3 新型抗肿胀合金 .....	274
复习题及习题 .....	277
<b>第 9 章 中子吸收材料及屏蔽材料 .....</b>	<b>278</b>
9.1 中子吸收材料 .....	278
9.1.1 反应堆控制概述 .....	278
9.1.2 碳化硼陶瓷 .....	281
9.1.3 银-钢-镉和合金 .....	283
9.1.4 铪 .....	285
9.1.5 稀土氧化物 .....	287
9.2 屏蔽材料 .....	289
9.2.1 辐射屏蔽的基础知识 .....	289
9.2.2 屏蔽材料 .....	291
复习题及习题 .....	292
<b>第 10 章 聚变堆材料 .....</b>	<b>294</b>
10.1 聚变能与聚变堆 .....	294
10.1.1 取之不尽,用之不竭的能量源泉 .....	294
10.1.2 聚变堆基本原理——等离子体的约束、加热和诊断 .....	297
10.1.3 磁惯性约束核聚变 .....	298
10.1.4 惯性约束聚变实验装置 .....	302
10.2 聚变堆中的面向等离子体材料 .....	303
10.2.1 聚变堆中的核反应及相关材料问题 .....	303
10.2.2 面向等离子体构件的工况及对第一壁材料的要求 .....	304
10.2.3 等离子体-材料表面相互作用 .....	305
10.2.4 面向等离子体材料现状 .....	306
10.2.5 高能中子辐照效应 .....	307
10.3 第一壁材料及结构 .....	309
10.3.1 第一壁材料 .....	309
10.3.2 第一壁结构实例 .....	309
10.4 聚变堆设计和工况条件 .....	311
10.4.1 第一壁环境条件 .....	311
10.4.2 真空壁材料的设计限值 .....	311
10.4.3 聚变堆材料与裂变堆材料使用性能的比较 .....	312
复习题及习题 .....	313
缩略语 .....	314
参考文献 .....	320

# 第 1 章

## 核能利用与核材料

### 1.1 核电发展概况

核裂变反应堆(简称核反应堆)是借助易裂变核素,在中子作用下发生可控的自持核裂变链式反应产生能量的装置。裂变过程中释放出的中子用于维持链式反应,多余的中子可用于生产新核素和开展核物理等研究。裂变产生的能量是一种清洁的能源,可用做动力驱动船舶,生产电力或以热源形式供化工、冶金等工业使用。由于核反应堆有如此广泛而重要的用途,使它在 20 世纪 40 年代一出现就得到迅猛的发展。研究试验堆、生产堆以及不同用途的动力堆纷纷建成,其中尤以核电的应用最为普遍,其数量居核反应堆用途之首。

核电发展经过几起几落。近年来,随着核电安全性能建设的不断提升和福岛核事故影响的消退,全球核电事业正在稳步复苏,无论是发电量还是在运行反应堆数量均出现提升。在当前的核电市场上,第三代先进轻水堆核电机组以及经过改良设计的“三代加”核电机组是在建核电厂的主流机组。截至 2017 年 5 月 5 日全世界共有 449 台核电机组在运行,总装机容量为 3.9 亿 kW,相对于 2010 年福岛核事故发生之前,不仅数量增加,而且安全性能、技术平均出现较大提升。

本章将首先介绍核反应堆组成部件的功能及其材料体系;然后叙述为制造各类核反应堆部件所用的材料;最后针对核电厂介绍与核反应堆应用相关的材料。

#### 1.1.1 天然的核反应堆

奥克洛(Oklo)是非洲加蓬共和国一个矿区的名字。从这个矿区,法国取得其核计划所需的铀。1972 年,当这个矿区的铀被运到一家气体扩散工厂时,人们发现这些铀是被利用过的,其 $^{235}\text{U}$ 的富集度仅为 0.44%(质量分数),低于 0.711%(质量分数)的自然含量。似乎这些铀矿石早已被一个核反应堆使用过。法国政府宣布了这一发现,震惊了全世界。科学家们对这个铀矿进行了研究,并将研究成果于 1975 年在国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)的一个会议上公布。

法国科学家在整个矿区的不同地方都发现了核裂变的产物(FP)和超铀元素(TRU)废物。开始时,这些发现让人很迷惑,因为天然的铀在这种情况下是不可能使“反应堆”越过临界点(而发生核反应的),除非在特别的情况下,有石墨和重水。但在奥克洛周围地区,这些条件是从来都不大可能具备的。

$^{235}\text{U}$ 的半衰期约为七亿( $7.13 \times 10^8$ )年,小于 $^{238}\text{U}$ 的半衰期,后者的半衰期约为四十五亿( $4.51 \times 10^9$ )

年。从地球形成至今,相比 $^{238}\text{U}$ ,更多的 $^{235}\text{U}$ 衰变了。这就说明在久远年代以前,天然铀矿中的可裂变核素浓度比今天高得多。实际上,简单的计算就可以证明,30 亿年前 $^{235}\text{U}$ 的浓度为 3%(质量分数)左右。而此浓度已足以在一般的水中发生核反应。而当时在奥克洛附近是有水源的。图 1-1 表示在非洲发现的天然核反应堆示意图。

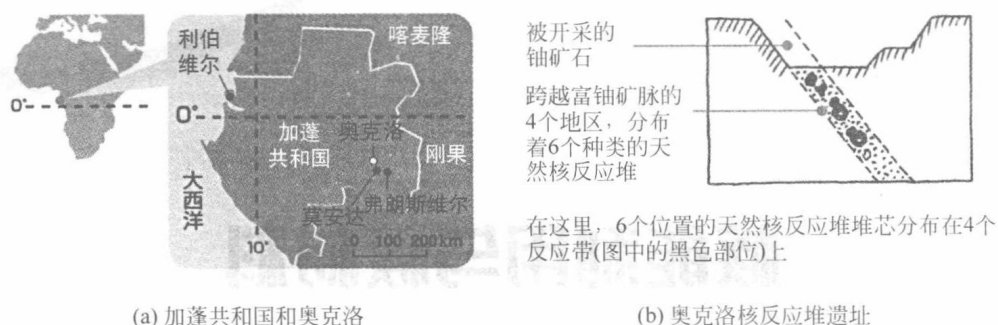


图 1-1 在非洲奥克洛发现的天然核反应堆

进一步的研究表明,奥克洛天然反应堆在数十年的时间里曾断断续续达到过临界值。渗入铀矿的地下水发挥了与轻水堆内相同的慢化作用。一旦热水蒸发,核反应堆即停止。而地下水再度涌入后,就又会出现临界反应,如此反复。在此期间,这一天然反应堆的总功率相当于 5 座 1000MW 级的核反应堆满功率运行。

奥克洛天然反应堆的发现和相关的研究表明,要实现可控制的裂变反应,特别是要将裂变能取出为人类所利用,必须具备很多条件,而“核材料”就是最关键的条件。

### 1.1.2 核电厂的原理及优势

核电厂是利用原子核内部蕴藏的能量产生电能的新型发电厂。核电厂以核反应堆来代替火电站的锅炉,以核燃料发生裂变反应产生核能代替化石燃料燃烧产生的化学能。核电厂使用的燃料被称为核燃料,目前主要是铀。核燃料在反应堆中发生裂变来产生大量热能,再用冷却剂(水、氦气、熔融态的钠等)把热能带出,在蒸汽发生器中产生蒸汽,蒸汽推动汽轮发电机旋转产生电。

利用蒸汽通过管路进入汽轮机,推动汽轮发电机发电,使机械能转变为电能。这一点核电厂与火电厂无差别,其主要的奥妙在于核反应堆。

核反应堆是装配了核燃料以实现大规模可控制裂变链式反应的装置。核反应堆的物理基础是爱因斯坦的质能关系和链式反应。当 $^{235}\text{U}$ 受到外来中子的轰击时,会发生裂变反应,并且裂变产物有 2~3 个中子。根据质能关系,前后损失的能量转变为热能释放,一次裂变反应大约放出 200MeV 的能量。又由于裂变产物中有 2~3 个中子,那么这些中子可以继续诱发裂变反应,如此持续进行。

但是裂变产生的中子能量很高,如果不采取措施,中子会大量泄漏,不一定与 $^{235}\text{U}$ 发生反应,而且与 $^{235}\text{U}$ 发生裂变反应几率最大的中子是热中子(与周围物质达到热平衡的中子,室温下平均能量是 25meV)。另外,核燃料及裂变产物都具有强放射性,需要防护。裂变反应产生的大量热量需要被冷却剂带走才能避免反应堆因过热被烧毁。由上可见核反应堆的主要结构有:核燃料+慢化剂+冷却剂+控制设施+防护装置。

目前中国电力供应主要由煤电,天然气发电,水电,核电,风电,太阳能发电六种发电方式提供,六种发电方式具有不同的技术特点。从 2015 年的能源结构来看,化石能源仍是中国电力供应的主力能源,占据电力供应的 70%左右,装机容量占 63%左右。核电的电力供应占总体的 3.0%(截至 2017 年 8 月,已达 3.9%,核电年增长率 20%),总装机容量占总体的 1.8%。核电呈现出利用时间(h)相对较高,发电相对优先的特点。

中国核电目前已经初具规模,同时正在快速发展。截至 2016 年第一季度,中国投入商业运行的核电机组总共有 30 台,总装机容量达到 2859.6 万 kW,2015 年发电量为 1695 亿 kW·h,在建核电机组总共 21 台,总装机容量达到 2457.7 万 kW。

根据《核电中长期发展规划(2011—2020 年)》,到 2020 年,核电装机容量将达到 5800 万 kW,在建容量将达到 3000 万 kW 以上,核电发电量将达到总发电量的 5.6%。到 2030 年核电总装机容量将达到 1.36 亿 kW,核电发电量将达到总电总量的 11.8%。

中国之所以制定核电优先发展战略,主要是基于核电厂的下述优势:

(1) 核能发电不会产生温室气体  $\text{CO}_2$ ,可以减少  $\text{CO}_2$  的排放。在全球气温上升,温室效应显著的情况下,这一优势尤为引人注目。在上述六种发电方式中,核电的温室气体排放系数为 29t 等效二氧化碳/(GW·h),水电、风电的温室气体排放系数为 26t 等效二氧化碳/(GW·h),核电与可再生能源的温室气体排放系数在同一个数量级上,而煤电的温室气体排放系数为 888t 等效二氧化碳/(GW·h)。核电在发电过程中不产生温室气体,温室气体主要在天然铀的采矿冶炼,转化,浓缩等环节中产生。核电作为一种基荷能源,相对于水电的季节性特点,风电,太阳能发电的间歇性,波动性等特点,其发电量具有稳定,清洁,高效的特点,是电力系统减少温室气体排放的首选。

中国公开承诺的碳排放目标一是在 2009 年哥本哈根世界气候大会上的承诺,2020 年单位国内生产总值的二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%;非化石能源占据一次能源消费比重到达 15%,二是在中美关于应对气候变化和清洁能源合作的联合声明当中,中方首次承诺在 2030 年左右二氧化碳的排放到达峰值,非化石能源占一次能源的消费比例提升到 2030 年的 20%左右。测算结果表明电力系统的碳排放量峰值在 45 亿 t 到 50 亿 t 之间,2015 年的电力系统碳排放量为 36 亿 t,距离峰值水平还有 10 亿 t 的空间。

(2) 核燃料是能量密度极高的能源。将其与常用的能源相比,便可一目了然。

首先,核燃料经一次裂变可放出约 200MeV 的能量。以  $^{235}\text{U}$  为例,若  $1\text{g}^{235}\text{U}$  全部发生核裂变,则可产生  $8.2 \times 10^7 \text{kJ}$  的能量。

与之相比,1g 氢与氧发生化学反应,燃烧过程中产生的能量为 142.9kJ;作为煤炭主成分的石墨(C)与氧结合时,每 1g 的燃烧能为 32.2kJ;每 1g 石油燃烧的发热量为 40.0kJ。

若以相同质量的燃料对比, $^{235}\text{U}$  发出的能量约是石墨的 255 万倍,约是石油的 182 万倍,约是氢的 57 万倍。而且,由于石油常温下为液体,氢常温下为气体,若以相同体积的燃料对比,上述差距会大大拉开。也就是说,利用核反应,可以由袖珍状的燃料中取出庞大无比的能量。

现在核电厂所用的核燃料,通常以氧化物的化学构成做成丸(饼)状芯块。这些芯块,一般做成直径约 1cm,高 1cm 左右的圆柱形陶瓷。一个这样的陶瓷芯块可取出的能量,足够一个家庭 10 个月的能量消耗。

如此看来,利用核裂变的核能是能量密度极高的能源。

(3) 核电电价相对较低,发电成本可大幅度降低。投资收益是工程上特别关心的问题。根据现行的核电上网电价政策,2013 年后投运的机组标杆上网电价为 0.43 元/(kW·h)。而 2015—2016 年年末,全国燃煤机组电价两次下调,大部分省的燃煤标杆电价已经下降至 0.4 元/(kW·h)。核电的电价与煤炭发电相比占据微弱劣势,但在六大发电类型当中总体处于强势地位。根据中国各类发电方式的平均上网电价统计结果,煤炭发电平均上网电价为 0.41877 元/(kW·h),比核电的 0.45570 元/(kW·h)有略微优势。在地毯能源中,水电的平均上网电价最低,为 0.29161 元/(kW·h)。而风电和太阳能发电的平均上网电价较高,分别为 0.57206 元/(kW·h)和 1.07582 元/(kW·h)。而总体比较几种地毯排放发电方式,风电和太阳能发电存在能量密度低,难以调峰的问题,水电存在总量有限特点以及水电的主要潜在开发区域(西南地区)与中国用电量需求较大地区(东部地区)距离远的问题。核电存在的问题包括核安全问题等等。

从总体趋势上而言,核电的平均上网电价有继续下降的趋势。就核电厂内部而言,上网电价同样存在差距。例如红沿河核电厂的上网电价为 0.4142 元/(kW·h),相对于火电的平均价格相当有竞争力,而田湾核电厂为 0.455 元/(kW·h)。

(4) 核资源丰富。全球的化石燃料存量有限,不足以支撑全球未来的能源需求,存在能源短缺的危机。人们需要寻求新能源。世界上拥有较丰富的核资源,且核能发电技术成熟,核电较其他清洁能源是最可能解决人类能源短缺危机的方法。目前,已探明的具有开采价值的铀资源的埋藏量大致有 250 万 t。海水中也含有低浓度 $[(1\sim 4) \times 10^{-3} \text{mg/L}]$ 的铀,而全球海水中的含量高达 45 亿 t。对这些铀的捕集、利用的研究也正在进行之中。而且,钍的资源是铀的约四倍之多,作为将来的核燃料而受到关注。

核能发电成本中,燃料费用所占的比例较低,核能发电较不易受到国际经济情势影响,发电成本较其他发电方法较为稳定。

### 1.1.3 核电厂系统组成

核电厂是依靠核裂变或核聚变产生的能量来发电的,因此核电厂必须有核反应堆系统,这部分称为核

岛；核能不能直接用来发电，把核能以热量的形式带出，并把热量转换为电能的蒸汽转换系统，称为常规岛。因此核电厂由两大部分组成，它们分别是核岛和常规岛，核岛的核心是核反应堆。图 1-2 以压水堆(PWR)为例，表示核电厂外观，图 1-3 表示压水堆核电厂主要厂房。核反应堆的功能有以下几种：

- (1) 导出核裂变释放的能量来发电(如核电厂)、供热或用作其他动力(如核潜艇)；
- (2) 增殖、生产新的核燃料(如 $^{232}\text{Th}\rightarrow^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}\rightarrow^{239}\text{Pu}$ )；
- (3) 生产放射性同位素(如钼-锝靶件，医用同位素等)；
- (4) 作科学研究和中子的应用(如中子衍射，中子掺杂，中子照相相等)。

显然，为满足核反应堆的不同功能，必须选择最合适的类型、结构、工艺参数、所用材料等。换句话说，不同功能的反应堆，在类型、结构、工艺参数、所用材料等方面都会有所不同。

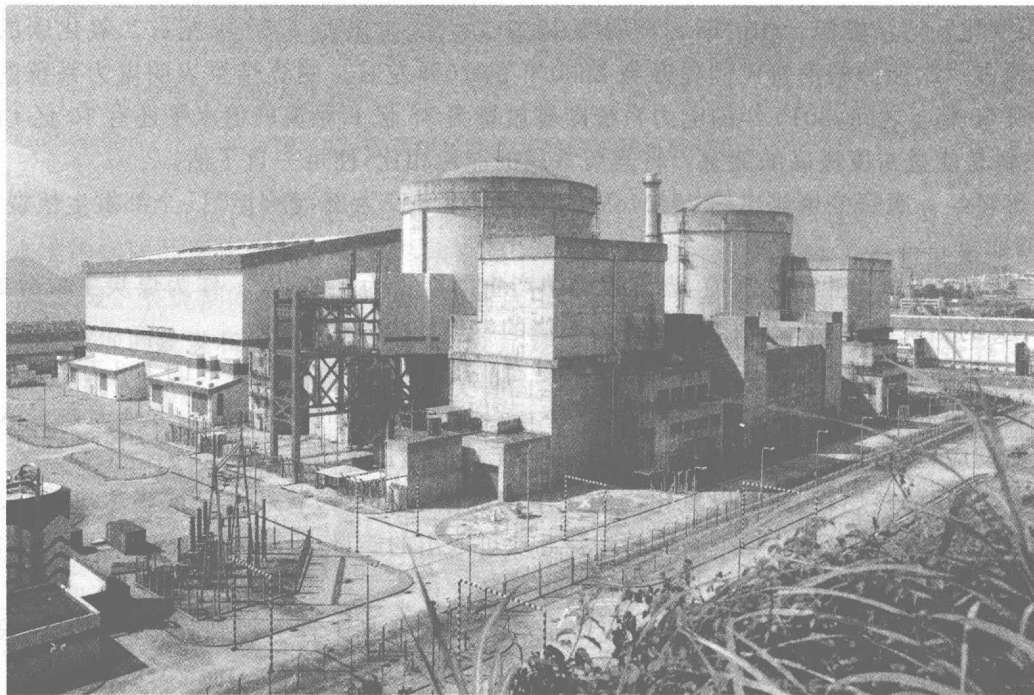


图 1-2 压水堆核电厂外观

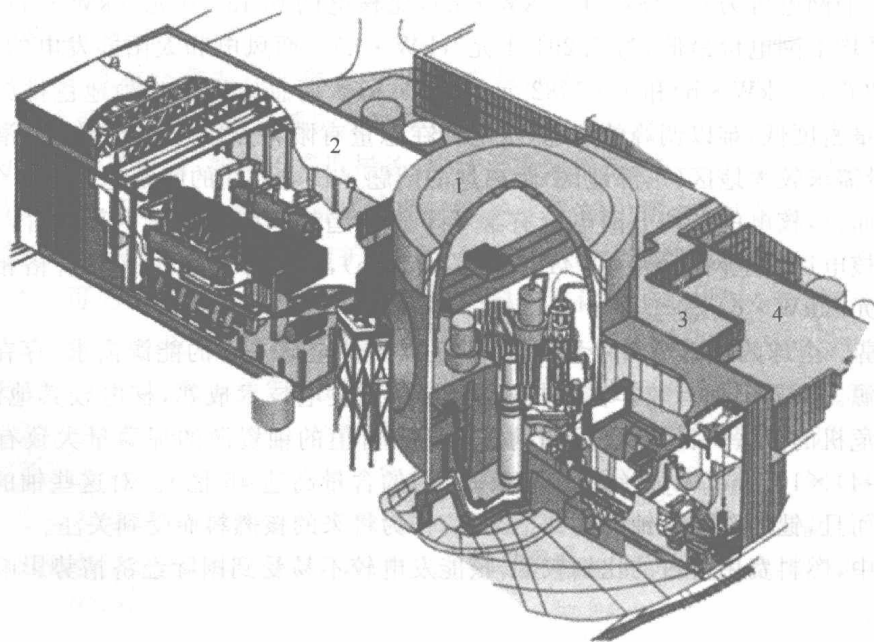


图 1-3 压水堆核电厂主要厂房

1—安全壳；2—汽轮发电机厂房；3—燃料操作厂房；4—辅助设备厂房

核反应堆有下述多种不同的分类方法:

- (1) 按用途分类,可以分为动力核反应堆、研究核反应堆、生产核反应堆(快中子增殖核反应堆);
- (2) 按照反应堆中中子的能量,可以分为快中子堆、热中子堆和中能中子堆;
- (3) 根据中子通量,分为高通量堆和一般通量堆;
- (4) 根据热工状态,分为沸水堆、非沸腾堆、压水堆;
- (5) 根据运行方式,分为脉冲堆和稳态堆;
- (6) 根据燃料类型,分为天然铀堆、浓缩铀堆、钍堆、MOX 堆;
- (7) 按照反应堆慢化剂和冷却剂的不同,可以分为轻水堆、重水堆、石墨气冷堆和快中子增殖堆。

现今正在运行的核反应堆大多按最后一种方法进行分类(表 1-1)。轻水堆可分为轻水堆与石墨轻水型核反应堆(RBMK)。轻水堆可以进一步分为压水堆(PWR)和沸水堆(BWR)。大部分正在运行的核反应堆都属于 PWR,尽管在三哩岛发生核事故的反应堆就属于这一种,一般仍认为这种反应堆最为安全可靠。中国秦山核电厂一期工程、大亚湾核电厂和中国台湾核三厂的反应堆均为 PWR;另外一种轻水堆 BWR 也占了在运行反应堆的一大部分,日本的反应堆和中国台湾核一厂、核二厂两座核电厂的反应堆均为此型,发生福岛核事故的反应堆就属于这一种;石墨轻水型核反应堆是苏联的一种设计,它在输出电力的同时还生产钷,这种反应堆用水作冷却剂并用石墨作慢化剂。切尔诺贝利核电厂拥有四台 RBMK 型反应堆,发生切尔诺贝利核事故的反应堆就属于这一种。

重水堆主要以加压重水式核反应堆(PHWR)为主,这是由加拿大设计出的一种反应堆,也叫做 CANDU(Canada Deuterium Uranium),这种反应堆使用高压重水作为冷却剂和慢化剂。大部分加压重水式核反应堆都位于加拿大,有一些出售到阿根廷、中国、印度等国家;气冷堆早期主要分为气冷式反应堆(GCR)和改良型气冷式反应堆(AGCR),这种反应堆使用石墨作为慢化剂,并用二氧化碳作冷却剂,一部分正在运行的反应堆属于这一类,大部分位于英国;高温气冷堆(HTGR)使用石墨作为慢化剂,并用氦气作冷却剂,氦气在反应堆堆芯出口温度可达  $700\sim 950^{\circ}\text{C}$ ,目前中国在高温气冷堆领域处于世界领先地位;快中子增殖堆(LMFBR)目前多采用液态金属作冷却剂,而完全不用慢化剂,并在发电的同时产生比消耗的更多的核燃料,即实现增殖。

表 1-1 目前核电厂所采用的反应堆类型

反 应 堆	反应堆种类	慢 化 剂	冷 却 剂	燃 料
轻水堆	轻水堆(BWR,PWR)	轻水	轻水	浓缩铀
	RBMK	石墨	轻水	浓缩铀
重水堆	CANDU	重水	重水	天然铀等
	新型转换堆	重水	轻水	浓缩铀;天然铀等
气冷堆	GCR	石墨	二氧化碳气体	天然铀
	AGCR	石墨	二氧化碳气体	浓缩铀
	HTGR	石墨	氦气	浓缩铀
快中子增殖堆	LMFBR	无	钠 钠钾合金	浓缩铀 钷

尽管核反应堆可按其用途、构型划分为多种不同种类,但无论是哪种核反应堆,它们都有一些共同的基本组成。以目前建造最多的热中子反应堆为例,它主要由核燃料元件、慢化剂、冷却剂、堆内构件、控制棒组件、反射层、反应堆容器、屏蔽层构成。其中前四类部件是核反应堆的心脏,组成“堆芯”;因核裂变反应就在该区域内发生,故堆芯也常称为活性区。快中子反应堆则无需慢化剂,而在堆芯与反射层之间设有包层,内装再生组件。目前,动力堆本体(或者还含有蒸汽发生器)由专设的安全壳包容。堆外还有发电和确保安全用的辅助设施,如蒸汽发生器或中间热交换器、汽轮发电机或涡轮机、凝汽器、泵以及各种连接管道等。图 1-4 为压水堆核电厂系统示意图,图中阴影部分为反应堆安全壳。