



反应堆 热工水力学

(第3版)

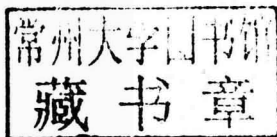
俞冀阳 编著

清华大学出版社

反应堆 热工水力学

(第3版)

俞冀阳 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要叙述了核反应堆热工水力学分析的基础理论和一些主要的分析方法。由于考虑到与先修课程的衔接,本书也介绍了一些热力学和传热学的基本知识和分析方法。

本书的主要内容包括核能系统中的基本热力过程、核反应堆内材料的选择、堆芯内的热量产生、燃料元件内的导热过程、燃料元件和冷却剂之间的传热过程、流动系统的水力和输热分析等,并在此基础上,进一步介绍了核反应堆稳态热工设计原理。

本书可作为高等院校核反应堆工程专业高年级本科生的专业基础课教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

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

图书在版编目(CIP)数据

反应堆热工水力学/俞冀阳编著. —3版. —北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-49952-7

I. ①反… II. ①俞… III. ①反应堆—热工水力学 IV. ①TL33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 066120 号

责任编辑:朱红莲
封面设计:傅瑞学
责任校对:王淑云
责任印制:宋 林

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 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.75 字 数:454千字

版 次:2003年3月第1版 2018年5月第3版 印 次:2018年5月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:49.80元

产品编号:078295-01

随着人们对核电安全需求的不断提高,核反应堆热工水力学的理论和分析方法也在这种需求的推动下不断地改进和提高。现在人们已经可以用各种各样的计算机程序相当准确地预计和模拟核反应堆内发生的热工水力过程。本书的目的就是使读者全面地掌握现代核反应堆热工水力学分析的基础理论和计算分析方法。

本书主要介绍了核反应堆热工水力学分析的基础理论和一些主要的分析方法。热工水力学包括两大部分的内容,即热工学和水力学。热工学是研究核反应堆中的热量产生和传递的科学,水力学是研究核反应堆系统中流动规律和流动稳定性的科学。本书主要叙述了核能系统的基本热力过程、核反应堆堆芯材料以及热物性、燃料棒内的释热和导热,并对单相流和两相流分别进行水力学分析和传热分析,在此基础上进一步介绍了核反应堆稳态热工设计原理。

全书共分8章。第1章叙述了核反应堆的发展概况,扼要介绍了各种类型动力堆的结构和原理,并在此基础上介绍了核反应堆热工水力学分析的目的和任务。写这部分内容的目的是:一方面为了给后续部分的分析打好基础;另一方面还为了避免非核工程专业人员在阅读本书时发生困难。

第2章主要讲述了核能系统中的基本热力过程,包括基本的热力参数、水物性查表计算、蒸汽动力循环和核电厂普遍采用的回热式蒸汽动力循环。这章我们只是对本书中将要涉及的一些热力学基本概念进行了必要的阐述。

第3章阐述了堆芯内材料的选择方法和堆芯内热源的计算方法,在此基础上,第4章重点对燃料元件内的传热进行了深入的分析,包括芯块内的导热、芯块和包壳之间的气隙传热等。

第5章与第6章分别介绍了单相流和两相流的分析方法。为便于理解和掌握,把单相流的流动和传热放在一起进行阐述。对于沸腾两相流引入了与单相流分析不同的一些方法和基本概念,对两相流压降和沸腾传热进行了深入的介绍,逐步建立起沸腾临界的概念和计算方法。

第7章介绍了核反应堆稳态热工设计的方法——单通道分析方法和子通道分析方法。

第8章介绍了一些特殊的热工水力现象,包括临界流、自然循环、流动不稳定性等。

本书第3版的修订反映了反应堆热工流体分析领域最新的进展,是针对48~64学时的课程编写的,对于学时数量较少的课程设置,第6章的两相流摩擦压降、第7章的子通道分析方法和第8章的内容可以选择性地使用。

本书的重点是核反应堆的稳态热工设计原理,包括燃料元件内的传热过程、单相流和两相流的热工水力分析、单通道分析方法和子通道分析方法。为了知识体系的完整,最后还介绍了一些诸如临界流、流动不稳定性等特殊的热工水力现象。

本书对单相流和两相流的分析方法进行了新的探索,由浅入深,推理严谨,并将热力学、传热学、水力学与实际的核反应堆工程密切结合起来进行阐述,因此是一本理论性和工程性都很强的教材。

本书要求读者具备一定的核反应堆物理、传热学和水力学的基础知识。本书在内容安排上,力求体系完整、由浅入深。通过本课程的学习,学生能获得全面的热工水力学分析基础知识,并为以后的科研和工程实践打下一定的理论基础。

随着开设核专业的院校逐渐增多,本书被广大兄弟院校采用的同时,也得到了来自各方面的宝贵反馈意见。为了适应新形势下的教学需要,此次修订进行了较大的调整,在内容的选取、内容讲解的深度、推导的过程、习题的设置等方面均进行了优化。然而,由于各种原因,书中难免还会有片面、不足甚至错误之处,诚望读者和使用本教材的广大师生提出宝贵意见,不胜感激。

编著者

2018年1月于清华园

符 号 表

符 号	名 称	单 位
A	面积	m^2
Br	布林克曼数	—
c	比热容	$J/(kg \cdot K)$
C	核素的丰度	—
d, D	直径	m
D_e	水力直径	m
D_h	热力直径	m
e	富集度	—
E	能量	J
f	摩擦阻力系数	—
f	质量力矢量	N/kg
F	释热份额 力	— N
F	矢量力	N
g	重力加速度	m/s^2
g	重力加速度矢量	m/s^2
Gr	格拉晓夫数	—
h	换热系数 比焓	$W/(m^2 \cdot K)$ J/kg
H	焓 高度	J m
i, j, k	单位矢量	—
I_k	积分热导率	$W \cdot m^{-1}$
I	单位张量	—
j	体积流密度	$m^3/(m^2 \cdot s)$
J	通量	—
k	热导率	$W/(m \cdot ^\circ C)$
K	局部阻力系数 临界 Weber 数	— —
Ku	Kutateladze 数	—
l	长度	m
L_e	外推高度	m
m	质量	kg

续表

符 号	名 称	单 位
Ma	马赫数	—
M	摩尔质量	g/mol
n	法向向量	—
N	核子密度	1/cm ³
Nu	努塞尔数	—
p	棒间距 压力	m Pa
P	功率	W
Pe	贝克来(Peclet)数	—
P_h	流道热周	m
Pr	普朗特数	—
P_s	汽液界面周长	m
P_w	流道湿周	m
Q	热量 体积流量	J m ³ /s
q	单位工质吸热量 热流密度	J/kg W/m ²
q_l	线功率密度	W/m
q_m	质量流量	kg/s
q_v	体积释热率	W/m ³
r	空间向量	—
r, x, y, z	空间坐标	m
R	热阻 裂变率 半径	°C m ² /W 1/(cm ³ ·s) m
R_e	外推半径	m
Re	雷诺数	—
s	比熵 复变量	J/(kg·K) —
S	滑速比 表面 熵	— — J/K
t	温度 时间	°C s
t_F	温度	°F
T	温度 振荡环节的时间常数	K —

续表

符 号	名 称	单 位
u	比内能	J/kg
U	内能	J
v	速度	m/s
v^+	无量纲速度	—
v	比体积	m^3/kg
V	体积 控制体 特征速度	m^3 — m/s
w	比功,单位质量工质做的功	J/kg
W	功	J
y^+	无量纲距离	—
α	抽汽率,单位质量工质的抽汽 体积份额,空泡份额	—
β	固体的线膨胀系数 流体的体膨胀系数 流动体积含汽率	$1/^\circ\text{C}$ $1/^\circ\text{C}$ —
χ	蒸汽干度,质量含汽率	—
ε	燃料空隙率 表面灰体辐射系数 截面比	— — —
γ	比定压热容和定体积比热容的比值	—
Γ	相变率,汽化率	$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
η	效率 空隙修正系数	— —
φ	中子注量率	$1/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
λ_{tr}	中子的输运平均自由程	m
μ	动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	运动黏度	$\text{N} \cdot \text{m}$
θ	空间坐标	rad
ρ	密度	kg/m^3
σ	微观截面 斯蒂芬-玻耳兹曼常数	cm^2 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Σ	宏观截面	$1/\text{cm}$
τ	切应力张量	N/m^2
ω	角速度	rad/s

下角标表

符 号	含 义
1 ϕ	单相
2 ϕ	两相
a	实际值(actually)
acc	加速(accelerate)
b	汽泡(bubble) 弯曲变形
c	包壳(cladding) 堆芯(core) 导热(conduction)
cir	圆管
cl	中轴线
cs	包壳外表面
E	工程因素
eu	用平均温度作为定性温度
f	饱和液 裂变(fission) 流体(fluid)
fg	汽化
fric	摩擦
form	局部形状
g	气体(gas) 气隙(gap) 饱和汽
gen	热源的
grav	重力
h	热的(hot)
<i>h</i>	比焓
i	内侧
iner	惯性(inertia)
L	液(Liquid) 轴向
Lo	折算液相(Liquid only)
m	质量(mass) 平均(mean)

续表

符 号	含 义
max	最大
mf	质量力
min	最小
mix	两相混合物
n	法向 名义值
N	核的因素
o	外侧
p	泵(pump)
p	压力或定压过程
q	热流密度
r	可逆过程(reversible) 热辐射(radiation) 相对(relative)
ref	参考
s	表面(surface) 饱和状态
sc	欠热区
sh	轴(shaft)
st	静态的
sub	欠热度
T	汽轮机(Turbine) 总的(Total)
TP	两相
u	可用的 铀(uranium)
un	不可逆的
v	容积或定容过程 汽(vapor)
vo	折算汽相(Vapour only)
w	壁面(wall) 湿的(wet)

缩略语表

符 号	含 义
BWR	沸水堆
CANDU	CANDU 型重水堆
CHF	临界热流密度
CHFR	临界热流密度比
DNB	偏离泡核沸腾
DNBR	偏离泡核沸腾比
HGTR	高温气冷堆
IAPS	国际水蒸气性质协会
IAPWS	水和水蒸气性质国际联合会
IFC	国际公式化委员会
MCHFR	最小临界热流密度比
MDNBR	最小偏离泡核沸腾比
PHWR	加压重水堆
PWR	压水堆

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 核反应堆分类	2
1.1.1 压水堆	3
1.1.2 沸水堆	8
1.1.3 重水堆	10
1.1.4 高温气冷堆	14
1.1.5 钠冷快堆	19
1.2 核反应堆热工水力学分析的目的和任务	25
参考文献	28
习题	28
第 2 章 核能系统中的热力过程	29
2.1 状态参数	29
2.1.1 压力	30
2.1.2 温度	31
2.1.3 比体积	32
2.1.4 比内能、比焓与比熵	32
2.1.5 水的物性	32
2.1.6 水的热力学性质图	34
2.2 蒸汽动力循环	39
2.3 蒸汽再热循环与回热循环	41
参考文献	43
习题	43
第 3 章 材料与热源	45
3.1 核燃料	45
3.1.1 UO_2 的密度	47
3.1.2 UO_2 的熔点	48
3.1.3 UO_2 的热导率	48

3.1.4	UO ₂ 的比定压热容	50
3.1.5	UO ₂ 的线膨胀系数	51
3.2	包壳材料	52
3.2.1	包壳的作用	52
3.2.2	包壳材料的选择	52
3.2.3	Zr-4 合金的热导率	53
3.2.4	Zr-4 合金的比定压热容	53
3.3	冷却剂和慢化剂	54
3.4	堆热源及其分布	55
3.4.1	压水堆裂变能分配	55
3.4.2	核裂变截面	56
3.4.3	裂变率与体积释热率	59
3.4.4	均匀堆释热率空间分布	61
3.4.5	功率分布与展平	62
3.4.6	停堆后核反应堆的功率	64
	参考文献	65
	习题	66
第4章	燃料元件传热分析	67
4.1	燃料元件导热过程	67
4.1.1	傅里叶导热定律	67
4.1.2	定常热导率法	69
4.1.3	积分热导率法	73
4.2	气隙导热	75
4.2.1	气隙导热模型	76
4.2.2	接触导热模型	77
4.3	燃料元件传热分析	78
	参考文献	79
	习题	80
第5章	单相流分析	82
5.1	单相流输运方程	82
5.1.1	引言	82
5.1.2	集总参数质量控制体	87
5.1.3	集总参数体积控制体	90
5.1.4	分布参数积分法	94
5.1.5	分布参数微分法	98
5.1.6	微分方程的一般形式	108
5.1.7	湍流微分方程简述	108

5.2	单相流体力学分析	110
5.2.1	无黏流动	110
5.2.2	黏性流动	116
5.2.3	管内层流	120
5.2.4	管内湍流	123
5.2.5	单相流压降	127
5.3	单相流传热分析	131
5.3.1	准则数	132
5.3.2	层流传热	135
5.3.3	湍流传热	138
5.3.4	金属流体传热	144
5.3.5	自然对流传热	145
	参考文献	146
	习题	148
第6章	两相流分析	151
6.1	描述两相流的物理量	151
6.1.1	描述两相流的方法	152
6.1.2	体积平均量	153
6.1.3	面积平均量	155
6.2	两相流输运方程	159
6.2.1	一维混合流方程	159
6.2.2	三维两流体输运方程	161
6.2.3	一维两流体输运方程	167
6.3	两相流水力学分析	171
6.3.1	流型判别	171
6.3.2	两相流分析模型	176
6.3.3	均匀流模型两相流压降	180
6.3.4	漂移流模型两相流压降	183
6.4	两相流传热分析	193
6.4.1	沸腾曲线与传热分区	193
6.4.2	两相对流换热	197
6.4.3	核态沸腾起始点	200
6.4.4	核态沸腾传热	202
6.4.5	沸腾临界点	203
6.4.6	临界热流密度	203
6.4.7	沸腾临界后传热	207
	参考文献	210
	习题	212

第 7 章 核反应堆稳态热工设计	214
7.1 热工设计准则	214
7.2 热通道因子	216
7.2.1 核热通道因子	217
7.2.2 工程热通道因子	218
7.2.3 降低热通道因子的途径	225
7.3 单通道分析方法	225
7.3.1 一维流动方程	225
7.3.2 加热通道内单相流	228
7.3.3 加热通道内的两相流分析	234
7.4 子通道分析方法简介	244
7.4.1 子通道间的交混	246
7.4.2 子通道分析的守恒方程	246
参考文献	250
习题	250
第 8 章 一些特殊的热工水力现象	252
8.1 临界流	252
8.1.1 现象	252
8.1.2 分析方法	253
8.1.3 临界流模型	255
8.2 自然循环	259
8.2.1 现象	259
8.2.2 自然循环流量	259
8.3 流动不稳定性	261
8.3.1 概述	261
8.3.2 静态不稳定性	262
8.3.3 动态不稳定性	266
8.3.4 流动不稳定性分析方法	268
附录 A 核燃料的热物性	272
附录 B 包壳材料的热物性	273
附录 C 冷却剂的热物性	274
附表 C-1 饱和水热物性	274
附表 C-2 饱和水蒸气热物性	275

附表 C-3	水和水蒸气在不同压力和温度下的比焓 h	276
附表 C-4	水和水蒸气在不同压力和温度下的比体积 $v \times 10^3$	277
附表 C-5	水和水蒸气在不同压力和温度下的比定压热容 c_p	278
附表 C-6	水和水蒸气在不同压力和温度下的动力黏度 $\mu \times 10^6$	279
附表 C-7	水和水蒸气在不同压力和温度下的热导率 $k \times 10^3$	279
附录 D	一些固体材料的热物性	280

提供丰富的电力是任何一个国家发展经济的重要基础,电力是经济发展的牵引力。人们常用人均电力消费来度量一个国家或地区的电力发展水平。所谓的人均电力消费,是指一个国家或地区的总发电装机容量除以人口基数。目前,全世界还有约 1/3 的人生活在人均电力消费不足 100W 的环境中,在人均电力消费不足 100W 的地区,洗衣机和冰箱还属于电力消费的奢侈品。与此相比,日本、法国等经济发达国家的人均电力消费在 800W 以上,美国的人均电力消费在 1500W 以上。

电力,在所有的能源形式中,是使用最普遍、最方便的能源形式之一。生活中大量使用的电器、电子设备,一旦缺乏了电力的供应,就会成为一堆废物。因此人们对于电力的需求与日俱增是可以理解的。

根据国际原子能机构的预测,20 年后的电力需求将是现在的 2 倍,50 年后将达到现在的 3 倍。这种电力需求的巨大增加,给世界各国提出了一个重要问题:用什么能源来补充新的电力需求呢?生产电力的方法是多种多样的,常见的有水力发电、火力发电、核能发电、太阳能发电、风力发电等。

现在,世界上有 400 多座发电用核反应堆,向世界提供着约 16% 的电力。随着核能工业开发的不断成熟,人们逐渐认识到核能是经济的、安全的,并且是一种没有暖化气体释放的、环境友好的、可大规模开采的优质电力源。为了解决能源引起的大气环境污染的各个国家,都纷纷开始考虑加大核电的份额。在未来的世界能源需求中,核能必将发挥巨大的作用;而且,作为不会排放暖化气体、能进行大规模开发的唯一的技术,其作用将越来越重要。

本书将着重讨论与核反应堆热工水力学分析有关的基本理论,核反应堆内的热工水力过程的基本规律及其特点,并在此基础上介绍稳态分析中经常采用的单通道分析模型。由于不同的核反应堆堆型的结构形式、冷却剂特性、运行参数和安全要求等方面都有很大差异,考虑世界各国核反应堆发展的现状和我国的实际情况,本书选择压水堆作为主要讨论对象,同时也适当介绍沸水堆、重水堆、高温气冷堆、钠冷快堆等堆型中热工水力学分析的一些特点。

知识点:

- 什么是人均电力消费?
- 当前我国的人均电力消费是多少?
- 核能发电有什么优点和缺点?