

两相流与沸腾传热

鲁钟琪 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书为编者在主讲“两相流与沸腾传热”课程 20 余年的教学经验的基础上,经过对材料的检选删汰,所编写的大学本科与研究生的教材。书中附有习题与参考文献。书的内容包括经典理论、通用公式和计算方法,以及最近本学科发展的材料。期望学生通过学习本书后,既能掌握基本理论,并能解决实际工程问题。

本书共分 15 章。第 1 章为两相流基本参量;第 2 至 4 章为两相流工程计算;第 5 至 7 章为两相流专门问题;第 8 至 9 章为沸腾传热基本概念;第 10 至 13 章为沸腾传热计算;第 14 至 15 章为沸腾传热的安全分析。全书以大型动力锅炉与轻水反应堆的热工水力问题为例,进行阐述,并旁及其他换热设备的问题。

本书可作为热能动力专业、核反应堆工程专业、石油化工专业、石油工程专业以及空调供热专业和与此有关的研究部门的本科学生和研究生在选修“两相流与沸腾传热”课程时的教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

书 名: 两相流与沸腾传热

作 者: 鲁钟琪 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市清华园胶印厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 9.875 **字数:** 245 千字

版 次: 2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04757-X/TK·19

印 数: 0001~3000

定 价: 17.00 元

光华基金会为支持学术专著和研究生教材的出版,给予我社资助,本书即为由光华基金会资助出版的研究生教材。

前 言

两相流(包括多相流)及其传热,是近年发展起来的一门新学科。它是在热力学、传热学和流体力学的基础上,针对气液、气固、液液等两相介质流动与传热进行研究的一门新学科。本教材着重讨论气(汽)液两相流。气液两相流动在人类生活和工业生产中早已出现,且在热能动力、石油化工、环境工程等领域,起着重要的作用。但只有在 20 世纪 40 年代后期轻水核反应堆开始应用于民用动力方面,为了对其进行合理设计、安全操作和事故评估与防止,气液两相流及其传热的研究方才进入蓬勃发展的阶段。截至目前为止,在这方面已积累了大量经验、数据和研究成果。本书即是在这些成果的基础上,编写的一份教材。它可作为热能专业、反应堆工程专业、石油化工专业、空调与供热专业以及从事类似专业的本科生、研究生与科研人员,在选修本课程时的教材和参考书。考虑到教材的要求,本书在选材范围和文字方面力求内容精炼、概念明确、重点突出。以期使讲课与教材密切配合,从而节约教学时间,又使学生能掌握必要的内容。其中重要而不可能包括的内容,都以作者的名字和文献发表的年限(用括号表示)提示于文字之中。需要时,可查阅 ERA 或其他索引资料,即可查出有关文献,并扩大了知识范围。另外,每章之后,均附有习题,以便学生加深概念和熟练计算。重要引用内容,也列出了参考文献。

本教材在编写过程中,得到上海交通大学徐济鋈教授、中国核动力研究设计院李忠朋教授的帮助和指导,并引用了他们的资料。在教材形成过程中,也得到我系杨瑞昌教授和施德强教授的

协助与鼓励,借此对他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中内容定有许多缺欠或错误之处。敬盼
广大学员和专家予以指正。

鲁钟琪

2000年11月

于清华大学热能系

符 号 表

符号	意义	单位	章节
A	流道截面积	m^2	1,2
	面积	m^2	9,11,12
	系数	-	14
a	压力脉冲速度	m/s	6
B	系数	-	14
b	体积中心	-	1
C	周界	m	2
	系数	-	14
	声速	m/s	6
	数组	-	14
C_0	分布系数	-	4,12
c	质量含气率	-	1
	速度	m/s	6
	波速	m/s	8
c_p	比定压热容	J/(kg · K), kJ/(kg · K)	6,10
D	直径	m	1,2
D_e	当量直径	m	1,2...
d	气泡直径	m	4
E	能量传递	kg/(m · s ³), Nm/(s · m ³), J/(m ³ · s)	2
e	比热力学能	kJ/kg	2
F	Taitel-Dukler 流型图参数	-	1
	单位质量的耗散功	kJ/kg	2
	体积力	m/s ²	2
	壁面摩擦力	N/m ³	6
	阻力头	m	7

续表

符号	意义	单位	章节
	Chen 公式系数	-	13
	F 因子	-	14
	热平衡饱和点	-	11
	F_1, F_2, F_3, F_4 系数	-	14
f	摩擦因数	-	3,13
	频率	s^{-1}	8,9
G	面积质量流速	$kg/(m^2 \cdot s)$	1,2
g	重力加速度	m/s^2	1,2
	比自由能	$J/kg, kJ/kg$	8
H	压头	m	7
	边界厚度	m	11,12
h_{tr}	传热系数	$J/(m^2 \cdot s \cdot K), kJ/(m^2 \cdot s \cdot K)$	8,10
h	比焓	J/kg	2,6,9,12
$\Delta h_{sub} = h_s - h_l$	过冷欠焓	kJ/kg	8,9,13
$\Delta h_{subi} = h_s - h_{li}$	进口过冷欠焓	kJ/kg	8,9,13
I	单位张量	-	2
	系统惯性	kg/m^2	7
J	表观速度	m/s	1
K	Taitel-Dukler 流型图参数	-	1
	Bankoff 系数	-	4
	凝结传热系数	$kJ/(m^2 \cdot s \cdot K)$	12
k	导热系数	$kJ/(m \cdot s \cdot K)$	1,9,10
	绝热指数	-	6
	压力系数	-	14
L	长度	m	3,7
M	质量流量	kg/s	1,2
	动量传递	$kg/(m^2 \cdot s^2), N/m^3$	2
	分子质量	-	8

续表

符号	意义	单位	章节
m	线速角速比值	-	8
	蒸发量	kg/h	11,12
N	分子团数	-	8
n	单位向量	-	2
	角速度	s^{-1}	8
	Jens-Lottes 公式指数	-	10,11
P	功率	kW	14
p	压力	N/m^2	2
Q	容积流量	m^3/s	1,2
	热量	kW, W	12
q	热流密度	$kW/m^2, W/m^2, kJ/(m^2 \cdot s)$	2,12
R	半径	m	2,9
	气体常数	-	8
R_p	粗糙度	μm	13
r	半径	m	1,8,9
S	滑速比	-	1,4,6,12
	气泡间隔	-	11
	Chen 公式系数	-	13
	实际饱和点	-	11
s	比熵	$J/(kg \cdot K)$	6
T	Taitel-Dukler 流型图参数	-	1
	温度	K	2,9,12
	剪应力张量	N/m^3	2
t	温度	$^{\circ}C$	8,12
	时间	s	2,9
U	表观速度	m/s	1,2,3
	隶属函数	-	1
u	速度	m/s	1,2,9

续表

符号	意义	单位	章节
V	扩散速度	m/s	1,2
	体积	m^3	1,7,9
	速度	m/s	8,9
v	速度	m/s	2
	比容,比体积	m^3/kg	8,9
W	质量传递	$kg/(m^2 \cdot s)$	2
	功	$kW/m^2, W/m^2$	2,8
w	速度	m/s	2,9
X	Martinelli 数	-	1,3,13
x	质量气流率(干度)	-	1,2,13
Y	Chisholm 数	-	3
	边界层厚度	m	11,12
Z	长度	m	7
z	长度	m	2
α	空泡率(空泡份额)	-	1,2,12
	气泡角	-	8
	热扩散系数	m^2/s	8,9
β	容积气流率	-	1,4
	压缩系数	-	5
	空穴角	-	8
	膨胀系数	K^{-1}	8
δ	厚度	m	5,8
$\Delta p = p_g - p_l$	气液压力差	N/m^2	3,4,8,10
$\Delta T_s = T_w - T_s = T_g - T_s$	气泡过热度	K	2,3,8,9,13
$\Delta T_{sub} = T_s - T_l$	过冷度	K, $^{\circ}C$	8,10,11,13
$\Delta T_{subi} = T_s - T_{li}$	进口过冷度	K, $^{\circ}C$	8,11,13,14
$\Delta \rho = \rho_l - \rho_g$	气液密度差	kg/m^3	3,4,8,10,13

续表

符号	意义	单位	章节
$\Delta v = v_{gl} = v_g - v_l$	气液比容差	m^3/kg	2,4,6,8,13
ϵ	湍流扩散系数	m^2/s	5,13
	热量分配系数	-	11,12
κ	玻耳兹曼常数	-	8
ρ	密度	kg/m^3	1,2,3,13
μ	动力粘度	kg/ms	1,2,3,12
Φ	热流密度	$\text{W}/\text{m}^2, \text{kW}/\text{m}^2$	10
	摩擦因子	-	3
ϕ	场参量	-	2
θ	接触角	-	8,9
	倾角	-	2
λ	Baker 流型图参数	-	1
	波长	m	8
	$h_{gs} - h_{ls}, h_{gl}$ 潜热	$\text{kJ}/\text{kg}, \text{J}/\text{kg}$	2,10,11
ν	运动粘度	m^2/s	2
ψ	Baker 流型图参数	-	1
	摩擦压降修正系数	-	3
	Jens-Lottes 公式系数	-	10,11
σ	表面张力系数	N/m^2	1,8
τ	剪应力	N/m^2	2,3
	时间	s	7
γ	记忆因子	-	14
ω	频率	s^{-1}	7
Ω	Baroczy 修正系数	-	3
ξ	颗粒速度	m/s	2
η	比例系数	-	6
	波函数	-	8,9
	Bowring 公式系数	-	11
Γ	质量传递	$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$	2

下角标:

b	气泡	u	均匀
bulk	主流	nu	不均匀
c, cr, crit	临界	i	界面
d	气泡脱离	r	相对
s, sat	饱和	cm	混合
sub	过冷	∞	主流, 远流场
w	水	k	相(=g, l)
	壁面	L	分液相
E, e	夹带	LO	全液相
F	摩擦	G	分气相
g	气体	GO	全气相
gj	气相漂移	TP	两相
l	液体	NB	泡核沸腾
lj	液相漂移	TB	过渡沸腾
kj	相漂移	FB	膜态沸腾
v	蒸汽		

目 录

第 1 章 两相流基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 两相流参数	2
1.2.1 质量流量和面积质量流速.....	2
1.2.2 容积流量和流速.....	2
1.2.3 相对速度和滑速比.....	3
1.2.4 扩散速度和漂移速度.....	3
1.2.5 混合速度.....	4
1.2.6 空泡率.....	4
1.2.7 质量含气率和容积气流率.....	5
1.2.8 真实密度.....	6
1.2.9 加权参数 ^[2]	7
1.3 两相流流型	8
1.3.1 流型的分类.....	9
1.3.2 流型的确定.....	9
1.3.3 流型的实验与计算	15
习题	18
参考文献	19
第 2 章 两相流基本方程	21
2.1 概述.....	21
2.2 单相流的基本方程.....	22
2.3 两相流基本方程.....	23

2.3.1	均相模型	23
2.3.2	分相模型	23
2.4	解析模型基本方程	27
2.4.1	二流体模型	27
2.4.2	混合模型	32
2.4.3	滑移模型、扩散模型、漂移模型	34
2.5	两相流的模化与准则特性方程	36
	习题	40
	参考文献	40
第3章	两相流动的压降	41
3.1	概述	41
3.2	均相模型压降计算	41
3.3	分相模型压降计算	43
3.3.1	Baroczy 方法	46
3.3.2	Chisholm 方法	47
3.3.3	Friedel 方法	49
3.3.4	Lombodi-Pedrocchi 公式	50
3.3.5	Theissing 公式	50
3.3.6	管壳式换热器中横向冲刷管束时的两相流 摩擦压降计算	51
3.4	过冷沸腾区的压降计算	51
	习题	53
	参考文献	54
第4章	两相流动空泡率	55
4.1	概述	55
4.2	Wallis 漂移模型	56

4.3	Bankoff 变密度模型	58
4.4	Zuber-Findlay 漂移流率模型	59
4.5	经验公式	60
4.6	根据流型建立的公式	61
4.7	根据滑速比 S 计算的公式	62
4.8	下降流的空泡率	64
	习题	65
	参考文献	66
第 5 章	环状流的解析分析	67
5.1	概述	67
5.2	三角关系式	68
5.3	三角关系式的简化	72
5.4	摩擦压降与空泡率的关系	73
5.5	液滴夹带	74
	习题	76
	参考文献	77
第 6 章	两相临界流	78
6.1	概述	78
6.2	单相介质的临界流动	79
6.3	两相临界流的一般关系式	82
6.3.1	两相无相变的情况	83
6.3.2	发生相变时的两相临界流动	84
6.4	两相临界流的经验模型计算	86
6.4.1	均相模型	86
6.4.2	分相模型	89

6.5	两相流压力脉冲与声速	100
6.5.1	压力脉冲传播速度的基本方程式	101
6.5.2	双组分两相流的均相模型	101
6.5.3	单组分两相流	102
6.5.4	声波传播	106
	习题	109
	参考文献	110
第7章	两相流动的不稳定性	111
7.1	概述	111
7.2	静态不稳定性	111
7.2.1	Ledinegg 流动不稳定性	111
7.2.2	流型变化不稳定性	113
7.3	动态不稳定性	114
7.3.1	声强压力波不稳定性	114
7.3.2	密度波不稳定性	114
7.3.3	压降不稳定性	115
7.3.4	热力不稳定性	116
7.3.5	自然循环不稳定性	117
7.3.6	管间脉动	117
7.4	两相流不稳定性解析分析	118
7.5	典型不稳定性分析	119
7.5.1	Ledinegg 不稳定性	119
7.5.2	自然循环不稳定性	120
7.5.3	压降振荡	122
	习题	124
	参考文献	125

第 8 章 气泡热力学	126
8.1 概述	126
8.2 气泡产生的热力平衡	127
8.3 纯液体的均相核化	133
8.4 异相核化的形成条件	136
8.4.1 介质与壁面的接触角.....	136
8.4.2 空穴的存在.....	136
8.4.3 不凝结性气体的影响.....	138
8.5 锥形空穴的有效核化	138
8.5.1 有效泡核的形成.....	138
8.5.2 边界层液体过热度与有效泡核的形成.....	139
习题.....	143
参考文献.....	144
第 9 章 气泡动力学	146
9.1 概述	146
9.2 等温气泡动力学	147
9.3 等压气泡动力学	149
9.4 气泡的脱离	153
9.5 气泡运动的临界现象	155
9.5.1 Helmholtz 失稳	155
9.5.2 Taler 失稳现象	157
习题.....	159
参考文献.....	159
第 10 章 容积沸腾	161
10.1 概述.....	161
10.2 沸腾曲线.....	162

10.3	容积沸腾传热特性·····	166
10.4	容积沸腾的临界热流密度·····	174
10.5	过渡沸腾·····	177
10.6	最小膜态沸腾热流密度·····	178
10.7	膜态沸腾·····	179
10.7.1	竖板·····	179
10.7.2	水平板·····	181
10.7.3	水平圆柱表面·····	181
	习题·····	182
	参考文献·····	183
第 11 章	强制流动沸腾 ·····	184
11.1	概述·····	184
11.2	流动沸腾分布特性·····	185
11.3	过冷沸腾起始点(ONB)的确定·····	189
11.3.1	McAdam-Bowring 热平衡分析模型·····	189
11.3.2	Hsu 模型·····	190
11.4	充分发展气泡沸腾点(FDB)的确定·····	192
11.4.1	Griffith 统计模型·····	192
11.4.2	Levy 模型·····	193
11.4.3	Saha-Zuber 模型·····	194
	习题·····	196
	参考文献·····	196
第 12 章	过冷沸腾 ·····	198
12.1	概述·····	198
12.2	高过冷区的传热特性·····	198
12.3	高过冷区的空泡率·····	200