



气液两相流动与沸腾传热

吕俊复 吴玉新 李舟航 宋 蕾 杨瑞昌 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

气液两相流动与沸腾传热

吕俊复 吴玉新 李舟航 宋 菁 杨瑞昌 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书分为气液两相流动和沸腾传热两部分。气液两相流动部分首先介绍气液两相流动的特点、参数和流型,以及流动压降及截面含气率的典型模型、计算方法,然后介绍热偏差和流量偏差的概念,分析蒸发管的水动力多值性问题、并联管内流动的水动力学、流动故障和联箱效应,在此基础上介绍自然循环的水动力计算和水动力故障安全性校验的基本原理和方法,探索了蒸汽净化及汽水分离原理,最后讨论气液两相流动不稳定性问题。沸腾传热部分首先以容积沸腾为对象介绍沸腾传热特性及传热危机,基于气泡热力学分析流动沸腾传热的特点与过冷沸腾的起始点,基于气泡动力学分析过冷沸腾现象及流动沸腾净蒸气产生点,以及过冷沸腾传热计算方法;介绍饱和流动沸腾特点及计算模型,分析流动沸腾传热恶化现象及防护措施,最后介绍超临界压力流体的传热。

为便于读者深入学习,每章书后附有相关的参考文献和少量习题。全书编写理论联系实际,探索基本概念和工程应用方法,对于本科生、研究生和工程技术人员有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

气液两相流动与沸腾传热/吕俊复等编著. —北京:科学出版社,2017.11
ISBN 978-7-03-055033-0

I. ①气… II. ①吕… III. ①气体-液体流动 ②流动沸腾传热
IV. ①O359 ②TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 265092 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年11月第一次印刷 印张:29 3/4 彩插:1

字数:576 000

定价:160.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

气液两相流动与沸腾传热是以热力学、传热学、流体力学及界面传递理论为基础,以气液两相介质的流动过程与传热为对象的一门科学。气液两相流动与沸腾传热广泛存在于热动力、反应堆工程、机械工程、石油开采、化学工程、航空航天、空调与供热、新能源工程、环境工程等领域。早在蒸汽发生器出现之初,由于对气液两相流动与沸腾传热缺乏了解,曾经一度影响到锅炉的发展。随着对气水两相流动及其传热过程的研究和理解,采用较大的设计裕量,保证了锅炉设备的安全性。气液两相流动及其传热的系统深入研究是由于20世纪40年代后期民用轻水核反应堆受到了广泛的重视。这些研究成果应用于其他工业过程,进一步促进了动力设备以及其他工业设备的发展。20世纪60年代以后,动力设备向高参数大容量发展,也推动了气液两相流动与沸腾传热的进步。经过数十年持续不断的研究,已经积累了大量经验、数据和理论成果,成为一门独立的学科。

本书分为气液两相流动和沸腾传热两部分。气液两相流动部分首先定义两相流特性参数和流型,然后介绍两相流动的基本模型、流动压降及截面含气率的计算方法,进而将其应用于并联管内流动的水动力学分析、自然循环锅炉的水动力计算及汽水分离设备水动力学,最后简单介绍气液两相流动不稳定性问题。沸腾传热部分首先介绍流动沸腾现象,然后从气泡的热力学和动力学性质出发,介绍过冷沸腾的真实含气率,总结分析流动沸腾传热及传热恶化,最后简单介绍超临界压力下的传热特点。为了便于读者深入学习,书后附有相关的参考文献。考虑到教材的特点,本书力求内容精炼、概念明确、重点突出。每章之后附有少量习题,以便加深概念。

气液两相流动与沸腾传热是动力工程及工程热物理专业研究生的重要技术基础课之一。本书是以杨瑞昌教授为清华大学动力工程及工程热物理、核工程等专业开设的研究生课程讲义为基础,编者经过十余个教学周期的完善编写的。本书可作为动力工程及工程热物理、反应堆工程、石油化工以及相近专业的专业基础课教材或教学参考书。

本书编写过程中,得到西安交通大学杨冬教授的帮助和指导,以及清华大学岳光溪教授的支持与鼓励;本书大量引用了哈尔滨工业大学黄承懋教授、上海交通大学徐济鋈教授、清华大学鲁钟琪教授的著作;科学出版社的刘宝莉编辑和我的博士研究生唐国力在文字润色和图表订正方面做了大量卓有成效的工作,在此向他们表示衷心的感谢。

限于水平,书中内容或有不当之处,敬请读者斧正。

符 号 表

A 变量符号表

符号	意义	单位	符号	意义	单位
a	热扩散系数	m^2/s	g	重力加速度	m/s^2
A	流通截面积	m^2		比自由能	kJ/kg
	系数	—	G	质量流速	$kg/(m^2 \cdot s)$
b	体积中心	—	h, H	高度或厚度	m
	距离	m	i	比焓	kJ/kg
B	系数	—	i_{lg}	气化潜热	kJ/kg
c	质量流含气率	—	J	判据	—
c_p	定压比热容	$kJ/(kg \cdot K)$	k	绝热指数	—
C	周界	m		系数	—
	系数	—	K	系数	—
	声速	m/s		循环倍率	—
	波传播的线速度	m/s		凝结传热系数	$kW/(m^2 \cdot K)$
C_o	分布系数	—		导热系数	$kW/(m \cdot K)$
d	气泡直径	m	L	长度	m
D	管子直径	m	m	截面比	—
D_e	当量直径	m	M	质量流量	kg/s
e	比热力学能	kJ/kg		分子质量	$kg/kmol$
	夹带率	—	n	指数	—
E	能量	—		波传播的角速度	rad/s
f	摩擦因子	—	N	分子团数	—
F	Taitel-Dukler 流型图参数	—	p	压力	N/m^2
	单位质量的耗散功	kJ/kg	P	功率	kW
	体积力	m/s^2	q	热流密度	kW/m^2
	壁面摩擦力	N/m^3	Q	体积流量	m^3/s
	F因子	—		热量	kW
	系数	—	r	半径	m

续表

符号	意义	单位	符号	意义	单位
R	半径	m	δ	厚度	m
	气体常数	—	Δ	粗糙度	μm
s	比熵	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\Delta i_{\text{sub}} = i_{\text{sl}} - i$	过冷欠焓	kJ/kg
S	滑移比	—	$\Delta i_{\text{sub, in}} = i_{\text{sl}} - i_{\text{in}}$	入口欠焓	kJ/kg
	杂质质量含量	—	$\Delta p = p_{\text{g}} - p_{\text{l}}$	气液压力差	Pa
	系数	—	$\Delta T_{\text{g}} = T_{\text{g}} - T_{\text{s}}$	气泡过热度	K
t	温度	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{s}} = T_{\text{l}} - T_{\text{s}}$	液相过热度	K
T	温度	K	$\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{s}} - T$	过冷度	K
	参数	—	$\Delta T_{\text{sub, in}} = T_{\text{s}} - T_{\text{in}}$	进口过冷度	K
	剪应力张量	—	$\Delta T_{\text{w}} = T_{\text{w}} - T_{\text{s}}$	壁面过热度	K
u	速度	m/s	$\Delta v = v_{\text{g}} - v_{\text{l}}$	气液比容差	m^3/kg
U	表现速度	m/s	$\Delta \rho = \rho_{\text{l}} - \rho_{\text{g}}$	气液密度差	kg/m^3
v	比容, 比体积	m^3/kg	ϵ	湍流扩散系数	m^2/s
V	速度	m/s		热量分配系数	—
	体积	m^3	η	Bowring 公式系数	—
w	流速	m/s		波函数	—
W	质量传递	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	η_0	波函数振幅	—
x	质量流含气率	—	θ	接触角	$^{\circ}$
	热力学平衡干度	—		倾角	$^{\circ}$
X	Martinelli 参数	—	κ	玻尔兹曼常数	J/K
Y	系数	—	λ	Baker 流型图参数	—
	边界层厚度	m		波长	m
z	长度	m	μ	动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
α	换热系数	$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$		截面比	—
	气泡角	—	ν	运动黏度	m^2/s
	流量系数	—	ξ	Baker 流型图参数	—
β	体积流含气率	—		能损系数	—
	压缩系数	—	ρ	密度	kg/m^3
	空穴角	$^{\circ}$		σ	表面张力系数
	膨胀系数	K^{-1}	截面变化率		—
γ	记忆因子	—	τ	剪应力	N/m^2
	比例系数	—		时间	s

续表

符号	意义	单位	符号	意义	单位
φ	截面含气率	—	ω	频率	s^{-1}
	流场特性参数	—		修正系数	—
ϕ	摩擦因子	—	Ω	Baroczy 修正系数	—
	摩擦压降修正系数	—			
ψ	Baker 流型图参数	—			
	Jens-Lottes 公式系数	—			
	修正系数	—			

B 下角标符号表

符号	意义	符号	意义	符号	意义
a	平均;空气;实际	F	摩擦	nu	不均匀
b	气泡	g	气体;分气相	o	折算;基准
c	极值点;中心	gO	全气相	r	相对
cal	计算值	h	能量	s	饱和
cir	循环	i	界面	SP	单相
cm	混合	in	进口	sub	过冷
cr	临界	jx	界限	sup	过热
d	脱离	J	漂移;计算	t	湍流
D	滑移	k	相(=g,l)	TP	两相
	扩散	l	液体;分液相	u	均匀
e	出口;夹带	lO	全液相	v	层数
ef	有效	m	动量	V	体积
exp	实验值	mix	混合	w	壁面;水
f	液膜	M	质量;模型	∞	主流

目 录

前言	
符号表	
第 1 章 气液两相流动的特性参数和流型	1
1.1 气液两相流动概述	1
1.1.1 火电中的气液两相流动与传热	1
1.1.2 核电中的气液两相流动与传热	2
1.1.3 太阳能热发电中的气液两相流动	3
1.1.4 化学工程中的气液两相流动	5
1.1.5 石油工程中的气液两相流动与传热	6
1.2 两相流特性参数	7
1.2.1 质量流量、质量流含气率与质量流速	7
1.2.2 体积流量和体积流含气率	10
1.2.3 速度、滑移比和截面含气率	11
1.2.4 折算速度和滑移速度	13
1.2.5 质量含气率	14
1.2.6 密度	14
1.2.7 扩散速度和漂移速度	16
1.2.8 加权参数	18
1.3 气液两相流的流动型式	19
1.3.1 流型	19
1.3.2 典型流型分析	19
1.3.3 流型的分类	22
1.3.4 流型的确定方法	25
1.3.5 流型的实验与计算	30
习题	32
参考文献	35
第 2 章 气液两相流动的基本模型及流动压降计算	36
2.1 单相流动的基本方程式	36
2.1.1 基于动量方程的压降梯度	36
2.1.2 基于能量方程的压降梯度	38

2.2	两相流体一维流动的基本方程	38
2.2.1	均相模型	39
2.2.2	分相模型	43
2.3	分相模型的流动压降计算	47
2.3.1	摩擦压降计算原理	47
2.3.2	沿程摩阻系数的计算	48
2.3.3	修正系数的计算	49
2.3.4	流动总压降计算	61
2.4	苏联及我国的水动力计算方法	62
2.4.1	摩擦压降的计算方法	62
2.4.2	加速压降及重位压降的计算方法	63
2.5	两相流动的解析模型	63
2.5.1	双流体模型	63
2.5.2	混合模型	68
2.5.3	扩散模型与漂移模型	69
2.6	两相流体的局部阻力计算	71
2.6.1	一般原理及计算方法	71
2.6.2	局部阻力件研究的应用	76
2.7	两相流的模化与准则特性方程	80
2.7.1	气液两相流动与沸腾传热的模化准则	81
2.7.2	气液两相流的准则方程	84
	习题	86
	参考文献	88
第3章	两相流的截面含气率	90
3.1	气液两相流截面含气率的确定方法	91
3.1.1	均相模型法	91
3.1.2	分相模型法	92
3.2	典型的气液两相流截面含气率模型与方法	96
3.2.1	Wallis 漂移模型	96
3.2.2	Bankoff 变密度模型	98
3.2.3	Zuber-Findlay 漂移模型	102
3.2.4	Collier 的 Lockhart-Martinelli 模型	105
3.2.5	Martinelli-Nelson 模型	108
3.3	过冷沸腾区域的截面含气率	109
3.4	倾斜管和下降管的截面含气率	110

3.4.1	倾斜管的截面含气率	110
3.4.2	下降管的截面含气率	112
3.5	两相流道内截面含气率的分布特点及测定方法	114
3.6	环状流动的解析分析	115
3.6.1	环状流流动分析	115
3.6.2	摩擦压降与截面含气率的关系	120
	习题	121
	参考文献	123
第4章	工质在并联管内流动时的水动力学	125
4.1	热偏差和流量偏差	125
4.2	水平蒸发管的水动力特性	129
4.2.1	水动力特性	129
4.2.2	水动力特性的多值性	130
4.2.3	水动力特性多值性的理论分析	133
4.3	垂直蒸发管的水动力特性	137
4.3.1	一次上升/下降蒸发管的水动力特性	138
4.3.2	一次上升/下降蒸发管的流动停滞与倒流	139
4.3.3	两回程垂直蒸发管的水动力特性	141
4.4	垂直蒸发管的流动故障	144
4.4.1	垂直上升蒸发管的流动停滞和倒流	144
4.4.2	停滞的校验	145
4.4.3	倒流的校验	149
4.5	分配联箱和汇集联箱的水动力学	150
4.5.1	联箱的联接型式与压力特性	151
4.5.2	各型联箱系统的流量偏差计算	158
	习题	163
	参考文献	163
第5章	自然循环的水动力计算	164
5.1	循环回路和循环倍率	164
5.2	简单回路水动力计算的基本原理	166
5.3	自然循环水动力计算方法	167
5.3.1	自然循环水动力计算步骤	167
5.3.2	水动力计算的有关重要参数	168
5.3.3	循环特性曲线的绘制	175
5.4	循环故障及受热管运行安全性校验	180

习题	181
参考文献	182
第 6 章 自然循环的蒸汽净化及汽水分离	183
6.1 排污及分段蒸发	184
6.1.1 排污	184
6.1.2 分段蒸发	185
6.2 汽水分离	188
6.2.1 汽水分离原理	188
6.2.2 汽水分离设备	190
6.3 蒸汽的清洗	193
6.4 汽包汽水分离内件的选择及布置	194
6.5 汽包内件的水动力	195
6.5.1 旋风分离器的水动力	196
6.5.2 汽水分离节流板的水动力	201
6.5.3 清洗装置的水动力	202
习题	202
参考文献	203
第 7 章 气液两相流动不稳定性概论	204
7.1 蒸发管内流动不稳定性的类型	204
7.2 密度波型流量脉动	205
7.2.1 密度波型流量脉动现象	205
7.2.2 密度波型流量脉动的实验研究	208
7.2.3 密度波型流量脉动的理论分析	216
7.3 压力降型脉动和热力型脉动	223
7.4 声波型脉动	226
习题	226
参考文献	226
第 8 章 容积沸腾	228
8.1 沸腾传热的特点与沸腾曲线	228
8.1.1 沸腾传热的机理	228
8.1.2 沸腾曲线	229
8.1.3 影响沸腾的因素分析	231
8.2 容积沸腾传热特性	234
8.2.1 容积泡态沸腾传热特性的 Rohsenow 关联	234
8.2.2 容积泡态沸腾传热特性的 Forster-Zuber 关联和 Forster-Greif 关联	237

8.2.3	容积泡态沸腾传热特性的 Mikic-Rohsenow 关联	242
8.2.4	容积泡态沸腾传热特性的其他关联	244
8.3	容积沸腾的传热恶化	248
8.3.1	容积沸腾的临界热流密度	248
8.3.2	过渡沸腾	253
8.3.3	膜态沸腾	255
8.4	容积沸腾中气泡运动的失稳现象	264
8.4.1	Helmholtz 失稳	264
8.4.2	Taylor 失稳现象	265
	习题	267
	参考文献	268
第 9 章	流动沸腾传热的特点与过冷沸腾的起始	270
9.1	管内流动沸腾过程	270
9.1.1	强制流动垂直上升管的气液两相流动过程分析	270
9.1.2	强制流动垂直上升管的气液两相流动的传热分析	273
9.2	气泡产生的热力学基础	276
9.2.1	等自由能定律	276
9.2.2	气泡的热力学参数	278
9.2.3	气泡的热力学条件	281
9.3	气泡形成的热力学分析	285
9.3.1	机械气泡的热力学参数	285
9.3.2	气泡的过热度分析	287
9.4	纯液体中气泡的形成过程	289
9.4.1	纯液体的均相核化	289
9.4.2	纯液体的异相核化	291
9.4.3	空穴的有效核化	297
9.5	过冷沸腾起始点	301
9.5.1	过冷沸腾起始点的热力学状态分析	302
9.5.2	过冷沸腾起始点的热力学描述	303
9.5.3	过冷沸腾起始点的 Hsu 模型预测	306
9.5.4	过冷沸腾起始点的 Bowring-Rohsenow 模型预测	307
9.6	过冷沸腾起始点的实验测量	308
	习题	309
	参考文献	311
第 10 章	过冷流动沸腾	312

10.1	气泡动力学基础	312
10.1.1	气核生长初期——等温条件下的气泡行为	312
10.1.2	气泡生成过程——等压条件下的气泡行为	314
10.1.3	气泡中期的气泡行为	316
10.1.4	气泡的脱离	316
10.2	流动过冷沸腾净蒸气产生点的确定	319
10.2.1	Griffith 统计模型	320
10.2.2	Bowring 经验模型	321
10.2.3	Levy 模型	321
10.2.4	Saha-Zuber 模型	329
10.2.5	Thom 经验模型	331
10.2.6	FDB 点的实验测定	331
10.3	过冷沸腾的截面含气率	332
10.3.1	ONB 至 FDB 之间的高过冷区的截面含气率	332
10.3.2	FDB 之后的低过冷区的截面含气率	338
10.3.3	过冷沸腾截面含气率的实验测定	344
10.4	过冷沸腾传热	344
10.4.1	ONB 至 FDB 之间的高过冷区的传热特性	345
10.4.2	FDB 之后的低过冷区的传热特性	346
	习题	346
	参考文献	349
第 11 章	饱和和流动沸腾	351
11.1	Chen 饱和沸腾传热模型	351
11.2	Shah 饱和沸腾传热模型	356
11.3	Gungor-Winterton 饱和沸腾传热模型	357
11.4	Steiner-Taborek 饱和沸腾传热模型	358
11.5	Martinelli 环状流强制对流蒸发传热分析	360
11.6	环状流强制对流蒸发传热的解析分析	362
11.6.1	不考虑膜中气泡和气芯中液滴的层流解	363
11.6.2	不考虑膜中气泡和气芯中液滴的湍流解	368
11.7	我国锅炉机组水力计算标准方法的沸腾传热系数计算	370
	习题	371
	参考文献	372
第 12 章	流动沸腾传热恶化	373
12.1	流动沸腾传热恶化现象	373

12.1.1	沸腾传热恶化的发生类型及机理	373
12.1.2	流动沸腾传热恶化特点分析	376
12.2	传热恶化的影响因素分析	379
12.2.1	L, D, p 不变条件下 G 和 $\Delta i_{\text{sub, in}}$ 对 q_{cr} 的影响	381
12.2.2	L, D, p 不变条件下 G 对 q_{cr} 与 x_{cr} 关系的影响	382
12.2.3	D, p, G 不变条件下 x_{cr} 与 L_{TP} 的关系	383
12.2.4	G, L, p 不变条件下 D 对 q_{cr} 与 x_{cr} 关系的影响	388
12.2.5	各变量对传热恶化的作用分析	388
12.2.6	两类传热恶化的关系	390
12.3	沸腾传热恶化的预测方法	391
12.3.1	局部参数模型	392
12.3.2	数据整理模型	398
12.3.3	数字骨架	400
12.3.4	低压低流速条件下的临界热流密度	404
12.4	不均匀受热管和水平管沸腾的传热恶化	405
12.4.1	水平管的传热恶化	405
12.4.2	不均匀受热管子的传热恶化	405
12.5	传热恶化区的传热计算	413
12.5.1	液滴夹带	413
12.5.2	缺液区的传热	414
12.5.3	传热恶化时的传热计算	416
12.6	对沸腾传热恶化的防护措施	421
12.6.1	保证一定的质量流速	422
12.6.2	使流体在管内产生旋转和扰动边界层	422
12.6.3	降低受热面热流密度	425
	习题	425
	参考文献	428
第 13 章	超临界压力下的传热	431
13.1	超临界压力下大比热容区工质的物理特性	431
13.2	超临界压力下大比热容区工质物性对传热的影响	434
13.3	超临界压力下工质的传热计算	435
13.3.1	超临界水管内传热研究概述	435
13.3.2	超临界水管内传热理论分析	436
13.3.3	超临界水管内传热关联式	440
13.3.4	超临界水管内传热的工程计算	446

13.4 超临界压力下大比热容区的传热恶化	447
13.4.1 超临界压力下传热恶化现象	447
13.4.2 超临界压力下传热恶化机理	448
13.4.3 超临界压力下传热恶化的判据	450
习题	454
参考文献	454

第 1 章 气液两相流动的特性参数和流型

多相流动广泛存在于自然界和我们的日常生活当中,如风雨交加(气液两相流动)、沙尘暴(气固两相流动)、泥石流(液固两相流动)、烧开的沸水(气液两相流动)、淘米(液固两相流动)、飞沙走石(气固两相流动)、火山爆发(气液固三相流动)、熬粥(气液固三相流动)等。在工业过程中有大量的多相流动现象,如粉体的气力输送(气固两相流动)、压缩空气雾化(气液两相流动)、商品混凝土输送(液固两相流动)、污水处理曝气池(气液两相流动)、水里泥沙流动(液固两相流动)、闪蒸(气液两相流动)等。核电、制冷设备、带相变的换热设备、石油开采、动力工程中都有大量的两相流动现象,因此,学习和了解气液两相流动及其传热具有重要的意义^[1]。

1.1 气液两相流动概述

1.1.1 火电中的气液两相流动与传热

人们利用工质在热力设备中完成动力循环,实现热能的转换和利用,以理想的朗肯循环为例,其主要的装置见图 1.1,该循环主要由四个热力过程组成,见图 1.2,过程 D-E-F-A 为工质吸热过程,其中 D-E 为单相水流动及吸热过程,E-F 为气液两相流动和吸热过程,F-A 为单相气体流动和吸热过程,A-B 为做功过程,B-C 为冷凝过程,是气液两相流动和放热过程。关于单相流体的流动与传热,在传热学和流体力学中已经学习过,本书研究的重点是气液两相流动及吸热过程。

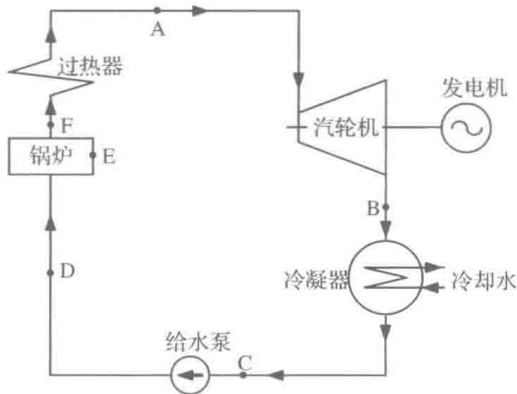


图 1.1 朗肯循环的主要装置