



高等教育试用教材

沸腾传热和气液两相流

徐济鋈 主编

鲁钟琪 主审

原子能出版社

035
X76

368532

高等教育试用教材

沸腾传热和气液两相流

主编 徐济望
编者 徐济望
贾斗南

主审 鲁钟琪
审校 鲁钟琪
赵兆颐



原子能出版社

内 容 简 介

沸腾传热和气液两相流是近50年来在流体力学与传热传质学基础上逐步形成起来的涉及多个学科的一门新的学科分支,它已在能源和石化等许多工业部门得到了广泛应用,是当代各国学者密切关注和广为研究的领域之一。

本书系统阐述沸腾传热和气液两相流领域中的基本问题。详细地介绍两相流流型及流型图,两相流工程计算法和数学解析模型基础,空泡份额,流动压降和临界流量等的分析模型及计算方法,典型两相流不稳定性分析,沸腾传热基本原理和气泡动力学,池内沸腾,流动沸腾和传热恶化以及气液两相流主要参数的实验测量原理和方法。

本书资料丰富,系统性强,联系工程实际,比较充分地反映了该领域近期研究成果,可供核能、热能、动力、石油、化工、制冷、航天、材料等许多工业部门的科研和工程技术人员以及高等学校教师阅读,也可作为高等学校和研究所有关专业的研究生教材或本科高年级学生的选修教材。

* * * * *

本书由鲁钟琪主审,经核反应堆工程教材委员会热工课程组于1990年6月28日由赵兆颐主持召开的审稿会审定,同意作为高等教育试用教材。

高等教育出版社

沸腾传热和气液两相流

主编 鲁钟琪

主审 鲁钟琪

编者 徐济墨

审校 鲁钟琪

高 山

赵兆颐

高能出版社出版

(北京108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32·印张19·字数511千字

1993年5月北京第一版·1993年5月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN7-5022-0705-8

TL·434(课) 定价: 9.00元

前 言

半个世纪以来，随着近代工业发展，沸腾传热和气液两相流迅速地发展成一个学科分支，无论在能源、动力、化工、制冷、冶金等工业部门中，还是在核能、航天、火箭、材料等技术领域中，沸腾传热和气液两相流都得到了广泛应用。各国学者进行了大量的实验研究和理论分析，已积累了很多数据和资料。由于沸腾传热和气液两相流的多样性和复杂性，它在理论上和方法上都尚处于发展阶段，带有与生产实际紧密联系、涉及多种学科、且以实验为主的特点。要实现实践上和理论上的新突破需要各国学者继续大量地进行试验研究和理论探索。国际上自60年代以来，国内自80年代以来，出版了一些有关两相流和传热方面的专著或教材，它们都在不同程度上起到了积极推动作用。本书试图将沸腾传热和气液两相流作为一个整体，系统地阐述所涉及的主要研究课题，从基本概念、基本理论、实验研究和基本方法上对各种原理、模型、公式以及实验结果加以概括和分析，并尽可能地结合工程实际应用以及核能应用。由于学科尚具经验性和不断发展的特点，为了更好地继承、利用和发展已有研究成果，在讨论每个主要方面的问题时，尽可能从机理方面展示主要模型、方法及其发展方向。

本书是根据原核工业部教育司批准的，1983年6月于上海交通大学召开的编写讨论会所确定的大纲编写的。

本书为高等学校、科学研究所反应堆工程学科的研究生教材，或为本科高年级学生选修教材。可供能源、动力、石油、化工、制冷以及工程热物理等专业的研究生，以及有关工业部门和科研院所的研究人员和工程技术人员阅读。

本书由序言和 11 章组成。序言简述沸腾传热和气液两相流的发展过程、目前概况和研究方法。第 1 章到第 3 章是全书基础，介绍两相流主要宏观物理量、流型和两相流动基本方程式；第 4、5 两章阐述两相流动静力学中两个主要参数——空泡份额和流动压降的各种分析模型及其计算方法；第 6、7 两章为两相流体动力学，描述两相临界流动和压力脉冲传播以及典型两相流动不稳定性分析模型；第 8 章到第 10 章集中讨论沸腾传热，第 8 章介绍气泡动力学和沸腾传热基本原理；第 9 章阐明池内沸腾；第 10 章描述流动沸腾；第 11 章为两相流动主要参数的测量原理和方法。本书讲授 60 学时，其中第 3 章到第 6 章，第 8 章到第 10 章这七章是全书重点，应详细讲授。

本书是根据作者为研究生讲课的材料编写成的。上海交通大学徐济鋈为主编，西安交通大学贾斗南编写第 4 和第 11 两章，前言、绪论和其余 9 章由徐济鋈编写。上海交通大学毕浩然主持制定了本书编写大纲，阅读过初稿，并提出了宝贵意见。清华大学鲁钟琪主审，赵兆颐审校。陈叔平、裘恽椿、许镜明、花家宏、柴芳蓉等参加了审稿会。在编写大纲过程中，蒋章焰、宋清华、刘汉洲等也提出了许多宝贵意见。在此，作者一并向他们表示衷心感谢。书中错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

符 号 表

一、英文符号

A	截面积, m^2
a	热扩散系数, m^2/s , $a=h/\rho c_p$ 加速度, m/s^2
c	比热, $J/(kg \cdot K)$, $kJ/(kg \cdot K)$
c	声速, m/s
c_p	定压比热, $J/(kg \cdot K)$
c_v	定容比热, $J/(kg \cdot K)$
D	流道直径, m 气泡直径, m
D_e	水力直径, m
E	总能量, kJ
e	比能, kJ/kg
F	力, N
f	阻力系数 频率
G	质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$
H	高度, m
h	[对流]传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, $kW/(m^2 \cdot K)$ [比]焓, J/kg , kJ/kg
I	射线强度 当量惯性
J	表观速度, m/s
j_{ii}	漂移流密度, m/s , $m^3/(m^2 \cdot s)$
k	热导率, $kW/(m \cdot K)$
L	流道长度, m

M	质量, kg
P	压力, Pa, MPa
P_h	加热周界, m
P_r	湿周, m
Δp	压降, Pa, MPa
Q	热量, kJ 体积流量, m^3/s
q	热流密度, $kW/m^2, W/m^2$
q'	线功率(线热流密度), $kW/m, W/m$
q''	体积释热率, $kW/m^3, W/m^3$
R	半径, m
r	径向坐标, m
S	滑速比
S_t	界面剪力, N, kN
T	热力学温度, K
t	温度, $^{\circ}C$
U	内能, kJ, J
u	相速度, m/s
u_r	相对速度, m/s
u_{∞}	终极速度, m/s
u_{hj}	漂移速度, m/s
U_{km}	扩散速度, m/s
V	体积, m^3
v	比容, m^3/kg
v_{mon}	动量比容, m^3/kg
W	[质量]流量, kg/s
w	功, kJ
X	Martinelli 参数
x	[质量]含气率

- \vec{x} 空间坐标, m
 Z 流道轴向坐标, m

二、希文符号

- α 空泡份额
 β 流动体积份额
 β_c 接触角
 γ 比热比, $\gamma = c_p/c_v$
 δ 膜厚, m
 ϵ 介电常数, F/m
 θ 倾角
 λ 波长, m
 μ [动力]粘度, $Pa \cdot s$
 线衰减系数, $1/m$
 μ_m 质量衰减系数, $m^2/kg, cm^2/g$
 ν 运动粘度, m^2/s
 ρ 密度, kg/m^3
 σ 表面张力, N/m
 截面积比
 τ 切应力, N/m^2
 时间坐标, s
 Φ^2 两相摩擦乘子
 φ 夹带率

三、下标

- A 加速
 a 真实
 空气
 av 平均

b 气泡
沸腾
主流

c 芯部
对流
临界值

cr 热力学临界状态

CHF 临界热流密度

d 脱离

DNB 偏离泡核沸腾

dr 干涸

E 夹带

e 热力学平衡

F 摩擦

f 饱和液相
膜参数

FDB 充展沸腾

fg 饱和气液差

g 饱和气相

H 均相

h 等焓

i 交界面

in 入口

l 液相

m 混合物

mac 宏观

max 最大

min 最小

mic 微观

<i>non</i>	非均匀
0	滞止
<i>ONB</i>	泡核沸腾起始
<i>out</i>	出口
<i>p</i>	定压
<i>r</i>	对比
	辐射
<i>s</i>	静态
	分相
	等熵
	总和
<i>sub</i>	欠热
<i>sat</i>	饱和
<i>spl</i>	单相
<i>sup</i>	过热
<i>t</i>	等温
	总和
<i>tb</i>	过渡
<i>TP</i>	两相
<i>v</i>	气相
<i>w</i>	水
<i>W</i>	壁面

四、无因次数组 (准则数)

<i>Ar</i>	<i>Archimedes</i> 数
<i>Bo</i>	沸腾数
<i>Bu</i>	浮升数
<i>Fr</i>	<i>Froude</i> 数
<i>Ja</i>	<i>Jakob</i> 数

Ma Mach 数
Nu Nusselt 数
Pe Peclet 数
Pr Prandtl 数
Ra Rayleigh 数
Re Reynolds 数
So 球化数
St Stanton 数

目 录

前 言	
符号表	I
绪 论	1
第一章 两相流动概述	6
第一节 基本概念	6
第二节 基本分析方法	7
一、两相流动变量的特征	8
二、基本分析方法	9
第三节 基本宏观物理量	10
一、相标志	10
二、一维流动	10
三、基本宏观物理量	11
四、两相流动的复杂性	17
第二章 两相流流型	19
第一节 概述	19
第二节 两相流流型分类	22
一、垂直流动下的流型种类	22
二、水平流动下的流型种类	23
三、加热流道的流型分类	25
第三节 流型图	27
一、水平流动下的流型图	28
二、垂直流动下的流型图	30
三、倾斜管内的流型判别	33
四、复杂几何形状流道中的流型判别	33
五、特殊工况下的一些流型判别	35
第四节 流型过渡准则	39
一、单个气泡在滞止液体中上升运动受力分析	39

二、水平流动	41
三、垂直到动	45
第三章 两相流动基本方程式	60
第一节 概述	60
第二节 单相流动基本方程式	61
一、质量守恒方程	61
二、动量守恒方程	62
三、能量守恒方程	62
第三节 两相流动基本方程式	63
一、质量守恒方程	64
二、动量守恒方程	64
三、能量守恒方程	65
第四节 均相模型基本方程式	66
一、均相模型基本假设	66
二、基本守恒方程	66
三、动量方程讨论	68
四、能量方程	70
五、状态方程	71
第五节 分相模型基本方程式	72
一、模型基本假定	73
二、基本守恒方程	73
三、动量方程展开	79
第六节 数学解析模型	80
一、概述	80
二、局部瞬时方程	80
三、时平均守恒方程	84
第四章 空泡份额	99
第一节 概述	99
第二节 滑速比模型	101
第三节 变密度模型	102
一、基本假定	103

二、空泡份额关系式	103
第四节 漂移流模型	107
一、Zuber-Findlay方法	107
二、圆管空泡份额计算式	109
三、讨论	111
第五节 动量交换模型	114
第六节 环状流空泡份额的解析计算方法	117
一、纯环状流基本关系式	117
二、气芯夹带液滴的情况	120
第七节 最小熵增模型	127
一、不考虑壁面摩擦的情况	127
二、考虑壁面摩擦的情况	128
三、气芯有夹带的情况	129
第八节 混合相-单相并流模型	131
第九节 空泡份额的其他计算方法	133
一、Арманд方法和苏联锅炉水力计算标准方法	133
二、Холодовский方法	136
三、Hughmark方法	136
四、Thom方法	137
五、Lockhart-Martinelli方法	138
六、非圆形通道关系式	139
七、垂直下降流动下的空泡份额计算	141
第十节 欠热沸腾空泡份额计算	144
一、Bowring方法	147
二、Rouhani方法	150
三、Бартоломей等人的方法	155
四、Ahmad方法	157
五、Levy方法	161
六、Миропольский方法	164
第五章 两相流动压降	167
第一节 概述	167

第二节 均相模型的流道压降计算	172
一、简化计算式	173
二、摩擦压降计算和均相摩擦系数	174
三、计算摩擦压降梯度的通用形式	175
第三节 分相模型的流道压降计算	177
一、分相模型摩擦压降梯度表达式	177
二、流道压降简化解析式	178
三、分相模型和均相模型的加速压降梯度比较	179
第四节 分相模型的摩擦压降计算	180
一、Lockhart-Martinelli关系式	180
二、Martinelli-Nelson关系式	186
三、Thom 方法	192
四、Armand-Treshchev 关系式	192
第五节 两相流动压降其它计算方法	198
一、Baroczy 方法	199
二、Chisholm 方法	201
三、苏联锅炉机组水力计算方法	203
四、Friedel 经验式	206
五、实用推荐计算式	206
第六节 环状流解析计算法	208
一、环状流动特性	208
二、基本方程组	208
三、几个主要变量的经验关系式	212
四、摩擦压降梯度	215
第七节 欠热沸腾压降计算	217
一、欠热沸腾压降实验研究	217
二、低欠热沸腾区压降计算	221
第八节 两相流动局部压降计算	222
一、渐变接头	222
二、突变接头	223
三、孔板和管嘴	228

四、弯头	236
五、三通、阀门和其它连接管件	238
六、讨论	239
第六章 临界流动和压力波传播	246
第一节 概述	246
第二节 单相临界流动和两相临界流动	248
一、单相临界流动	248
二、两相临界流动	252
第三节 两相临界流动计算方法	256
一、均相模型的两相临界流动计算方法	257
二、分相模型的两相临界流动计算方法	265
三、短管、管嘴和孔板的临界流动计算	289
四、讨论	291
第四节 两相流动的压力脉冲传播和声速	292
一、基本方程式	292
二、双组份均相模型	295
三、单组份均相模型	296
四、动量传递效应	299
五、声波传播	301
六、影响压力脉冲传播的因素	302
第五节 两相临界流动准则	303
一、单相临界流动准则	304
二、两相临界流动数学模型	304
三、两相临界流动准则讨论	308
第七章 两相流动不稳定性	313
第一节 概述	313
第二节 两相流动不稳定性分类	315
一、各种不稳定性机理	315
二、流动不稳定性分类	324
第三节 流动不稳定性分析方法	325
一、描述系统动态特性的基本方程	326

二、线性系统动态方程稳定特性	327
三、热力系统稳定性研究的基本方法和稳定性准则	328
四、动量积分原理	331
五、推荐的分析方法	333
第四节 典型不稳定性分析	333
一、Ledinegg不稳定性	333
二、密度波不稳定性	340
三、压降振荡	345
四、并行流道不稳定性	350
五、自然循环不稳定性	352
第八章 沸腾传热基本原理	358
第一节 气液两相平衡	359
一、与液体相变有关的基本参数	359
二、气-液两相平衡条件	361
三、亚稳态平衡和不稳定平衡态	364
第二节 核化机理和蒸气形成	365
一、形成气核所需的过热度	365
二、均匀核化	366
三、非均匀核化	370
四、流动沸腾下的成核准则——沸腾起始点确定	376
第三节 泡核沸腾气泡生长循环——气泡动力学	381
一、典型气泡生长循环	382
二、等待周期	383
三、气泡长大过程	385
四、均匀介质内的气泡增长	388
五、非均匀温度场内的气泡增长	394
六、气泡脱离加热面时的直径	398
七、气泡生成频率	399
第四节 气液交界面不稳定性	400
一、Helmholtz 不稳定性	401
二、Taylor 不稳定性	405