

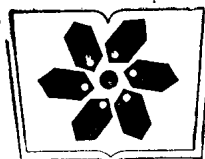
气液两相流 与传热基础

陈学俊 陈立勋 周芳德 著

科学出版社

0309
200.2

384192

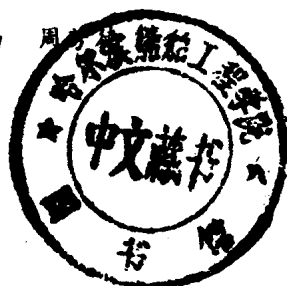


中国科学院科学出版基金资助项目

气液两相流与传热基础

陈学俊 陈立勋

周



科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

两相流与传热是近年来在流体力学、传热学、传质学基础上发展起来的一门新兴学科,它作为基础理论广泛应用于动力、化工等工程技术领域。

本书比较全面、系统地论述气-液两相流及相变传热,同时介绍国内外有关最新科研成果及其应用。全书内容包括:两相流体动力学,两相传热学及应用技术等部分。

本书可供石油、化工、核工业、航空航天以及其他动力专业的大学生和研究生作为教材和选修教材,也可供有关专业教师和科研、工程技术人员参考。

DZ72/08



中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年9月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995年9月第一次印刷 印张: 13 7/8

印数: 1—1000 字数: 357 900

ISBN 7-03-003855-X/TB·112

定价: 23.00 元

前 言

两相流与传热是工程热物理领域内的一门重要分支学科,它是在流体力学、燃烧学、传热学与传质学的基础上发展起来的一门应用基础学科。它的研究内容已在能源、动力、化工、石油、环境保护、节能技术以及各种加工工业的换热设备中得到了广泛应用。近30年来,随着火电大机组与核电站的发展,国防现代化以及高技术的开发,对从事两相流体动力学及其传热过程的研究工作者不断提出了新的研究内容,促使两相流与传热这门新学科得到了迅速的发展。因此,了解两相流与传热基础,对应用在上述各工程方面的设备优化设计、工况预测、系统控制以及保证安全运行等均具有极重要的意义。同时,为了适应在热能工程、核反应堆工程及化学工程等方面培养高层次人才的需要,我国虽开设了这方面的课程,但有系统地阐述气-液(汽-液)两相流与传热基础的教材尚属缺乏。

本书作者多年从事两相流与传热方面的科研、教学工作,曾多次参加国外有关两相流与传热的国际学术会议,作者单位西安交通大学于1984年及1989年两次主办了两相流与传热国际学术会议。1979年西安交通大学工程热物理研究所设立了多相流与传热研究室,1992年西安交通大学已建成动力工程多相流国家重点实验室。近10年来,国内其他高等学校也进行了大量两相流与传热方面的科研工作,研究工作进展迅速。中国工程热物理学会、中国力学学会、中国化学工程学会、中国核学会、中国动力工程学会以及各高等院校曾多次主办了国内、国际性的两相流与传热学术会议,学术活动活跃,发表了很多高水平的学术论文。为此,作者根据国内外近期发表的资料及作者的科研成果与教学实践撰写了本书。

本书以气-液两相流与传热为主,内容分三大部分:一、两相流体动力学,包括两相流基本特性参数、两相流流型、两相流截面

含气率、两相流动压降、两相流不稳定性及鼓泡过程水动力学;二、两相传热学,包括沸腾传热、传热恶化、干涸后传热、超临界压力下传热、凝结换热及传热强化;三、理论应用,包括工业中两相流与传热以及传热强化、动力工程中两相流与传热、沸腾与凝结换热设备设计,以及核电站、化学工业中两相流与安全。

本书第3, 4, 11章由周芳德教授执笔;第5, 6, 7, 8, 9, 16章由陈立勋教授执笔;第1, 2, 10, 12, 13, 14, 15, 17章由陈学俊教授执笔,全书由陈学俊教授总其成。

著者

主 要 符 号 表

符号	名称	单位
A	系数	
A	面积,流通截面	m^2
a	系数,热扩散系数	m^2/s
B	系数	
Bo	Bond 数	
b	常数	
C	系数,浓度	kg/m^3
C	比热	$J/(K \cdot kg)$
C_p	定压比热	$J/(K \cdot kg)$
C	盐分浓度	kg/m^3
D	直径,管径	m
d	直径,管径	m
d	液滴直径	m
D_p	静压梯度	N/m^3
E	液滴夹带率,夹带	$kg/(m^2 \cdot s)$
$Eö$	Eötvös数	
e	单位质量对流能	J/kg
e	平均误差	
e	准则数	
F	力,无量纲因子	N
Fg	准则数	
Fr	Froude 数	
f	摩擦因子	
f	管子自然频率	Hz

f	形成气泡频率	Hz
G	质量流量	kg/min, t/h
G	质量流速, 比数, 自由能	kg/(m ² ·s)
Ga	Galileo 数	
Gr	Grashof 准则数	
g	重力加速度、吉伯自由能	m/s ²
H	高度	m
H	焓	J
h	比焓	J/kg
h	传热系数	W/(m ² ·K)
$\bar{h}$	平均放热系数, 平均传热系数	W/(m ² ·K)
h^*	子通道有效的横向流的焓	J/kg
Δh	欠焓, 过冷度	J/kg
J, j	分子比率, 漂移流率	kg/s
K	准则数	
K	Boltzman 常数, 传质系数, 常数	
K	波向量	
K_u	准则数	
K_D	分配系数	
k	热传导系数	W/(m·K)
L	通道长度, 当量长度	m
l	子通道中心之间距离, 长度	m
m	指数, 系数	
m	质量	kg
$\dot{m}$	质量流率	kg/s
M	液滴质量, 分子量	kg
Ma	Marangoni 准则数	
N	系数	
N_A	Avogadro 常数	
Nu	Nusselt 准则数	

n	指数, 管数	
n, n'	分子数, 克分子数	
P	功率	W
P	压力	MPa, N/m ² , bar
Pe	Peklet 数	
Pr	Prandtl 准则数	
ΔP	压降	Pa, N/m ²
P_p	通道周界	m
P_i	界面周界	m
Q	热量	W, J, kJ
Q	容积流率	m ³ /s
q	热负荷, 热流密度	W/m ² , kJ/(m ² ·h)
R	通用气体常数	
R	两相摩擦压降与等温压降的比值	
R	半径	m
Ra	Rayleigh 准则数	
Re	Reynolds 准则数	
r	半径	m
γ	汽化潜热	J/kg
S	受热面积	m ²
Sta	Stanton 数	
S	滑速比, 速度比, 滑移比	
T	准则数	
T	温度	K, °C
t	时间	s
U	总传热系数	W/(m ² ·K)
u	速度, 流速	m/s
u	势能	J
u^*	子通道有效的横向流动速度, 摩擦速度	m/s
V	容积	m ³

Vi	粘性数	
ν	比容	m^3/kg
We	Weber 准则数	
w	子通道横向流量	kg/s
X	Lockhart-Martinelli 参数	
x	干度, 质量含气(汽)率, 坐标	
y	离开壁面的距离, 坐标	
Z	管子总阻力系数, 坐标	
z, z'	分子数	
α	截面含气率, 空泡份额	
α, β, γ	角度	rad
β	容积含气率	
γ	定压比热与定容比热之比	
δ	长度	m
δ	边界层厚度	m
δ	扁汽泡的厚度	m
ε	扩散系数, 扩散率	m^2/s
ε	使液体蒸发的热量占总热量的份额	
ζ	阻力系数, 节流圈阻力系数	
θ	管子倾斜度, 接触角度	rad
θ	无因次温度	
λ	导热系数, 波长	$W/(m \cdot K), m$
μ	动力粘性系数	$N \cdot s/m^2$
μ	单位质量流体的内能	J/kg
ν	运动粘性系数	m^2/s
ξ	阻力系数	
ρ	密度	kg/m^3
σ	表面张力	N/m
τ	切应力	N/m^2
ϕ	两相摩擦乘子, 热力学势	

ω	频率	Hz
ϕ	系数 $\left(\frac{\sigma_w}{\sigma}\right)\left[\left(\frac{\mu_L}{\mu_w}\right)\left(\frac{\rho_w}{\rho_L}\right)^2\right]^{1/3}$	两相阻力修正系数
Q	系数, $f([(\mu_L/\mu_G)^{0.2}(\rho_G/\rho_L)]^1, x)$	
下标		
A	空气, 加速	
b	界限, 流体平均, 沸腾, 气泡或汽泡, 内部	
c	临界, 螺旋管, 气芯	
$conc$	圆锥体	
cr	临界	
d	烧干点处	
D	漂移	
D	脱离	
e	有效, 平衡, 转化	
eq	热力学平衡	
F	摩擦	
f	流体	
G	气体, 汽体	
G_s	气相折算	
g	重力	
L	流体, 液体	
H, h	两相混合物, 均相	
i	界面, 内聚力	
L, G	气液间	
L_e, L_n	夹带液滴, 无夹带液滴	
L_s	液相折算	
M	动量	
m	两相混合物, 动量	
m_0	摩擦	
$\max$	最大	

<i>min</i>	最小
<i>ja</i>	极限
<i>m</i>	混合物
<i>iso</i>	等温
<i>i</i>	进口, 传质
<i>im</i>	无传质
<i>o</i>	出口, 有效, 外力
<i>o</i>	孔口, 全部是水
<i>R</i>	速度差
<i>rot</i>	转盘, 固体表面, 切向
<i>S</i>	饱和, 直管
<i>St</i>	表面张力
<i>sp</i>	两相
<i>sw</i>	切向粘性力
<i>V</i>	变物性, 产生率
<i>vert</i>	垂直平板
<i>top</i>	顶部
<i>tran</i>	转变
<i>W</i>	水
<i>w</i>	壁面
<i>Z</i>	重位
<i>Z_w</i>	重位

目 录

第一章 绪论	1
1-1 两相流的基本定义	1
1-2 两相流与传热的重要性	1
1-3 两相流特性参数	3
参考文献.....	10
第二章 两相流流型及流型转换	11
2-1 引言	11
2-2 水平流动的流型	12
2-3 垂直流动的流型	14
2-4 螺旋上升流动的流型	17
2-5 转弯流动的流型	19
2-6 流型图	22
2-7 水平流动流型图与流型转换	22
2-8 垂直流动流型图与流型转换	26
2-9 螺旋流动流型图与流型转换	29
2-10 溢流与倒流.....	32
参考文献.....	38
第三章 截面含气率	39
3-1 引言	39
3-2 一维流动计算方法	41
3-3 漂移流率模型	43
3-4 含气率的经验关系式	45
3-5 各种流型的计算模型	47
3-6 过冷沸腾中的截面含气率	57
参考文献.....	62

第四章 两相流压降	63
4-1 引言	63
4-2 基本方程	64
4-3 摩擦压降的经验关系式	71
4-4 扩口、缩口、螺旋管、弯头和阀门的压降.....	82
参考文献.....	88
第五章 鼓泡过程	90
5-1 引言	90
5-2 单个气泡的形成及上升	93
5-3 大量气泡鼓泡时的截面含气率	103
5-4 鼓泡层的不漏液工况	105
参考文献.....	108
第六章 管内沸腾传热	109
6-1 引言	109
6-2 汽泡生成	111
6-3 核态沸腾传热	127
参考文献.....	134
第七章 沸腾传热恶化	136
7-1 引言	136
7-2 圆管中的第一类传热恶化	138
7-3 圆管中的第二类传热恶化	153
7-4 非圆形通道的传热恶化	163
7-5 加热不均匀的影响	165
参考文献.....	168
第八章 传热恶化后传热	171
8-1 引言	171
8-2 经验的计算方法	173
8-3 考虑热力学不平衡的关系式	176
8-4 半理论模型	179
参考文献.....	189

第九章 超临界压力流体管内传热	190
9-1 引言	190
9-2 热物理性质	191
9-3 在圆管内传热的试验结果	195
9-4 确定是否会发生传热恶化的经验方法	202
9-5 初步分析	205
参考文献.....	208
第十章 两相流不稳定性	212
10-1 引言.....	212
10-2 两相流不稳定性研究工作的进展.....	212
10-3 两相流不稳定性分类.....	215
10-4 静力学不稳定性.....	217
10-5 动力学不稳定性.....	228
参考文献.....	241
第十一章 凝结	244
11-1 引言.....	244
11-2 表面张力.....	245
11-3 主流凝结.....	248
11-4 固体表面的珠状凝结.....	251
11-5 垂直平板上的层流膜状凝结.....	255
11-6 垂直平板上的紊流膜状凝结.....	267
11-7 圆管上层流膜状凝结.....	269
11-8 管内凝结.....	273
11-9 无重力凝结液的排除.....	275
11-10 不可凝结气体对凝结的影响	277
参考文献.....	280
第十二章 传热强化	283
12-1 引言.....	283
12-2 池沸腾.....	285
12-3 管内沸腾.....	288

12-4	汽空间凝结	294
12-5	强制对流凝结	297
	参考文献	298
第十三章	工业中的两相流与传热	301
13-1	引言	301
13-2	两相流与传热在工业中的应用	301
13-3	沸腾与凝结热交换装置的设计有关问题	309
	参考文献	323
第十四章	动力工业中的两相流与传热	324
14-1	引言	324
14-2	火电站	324
14-3	核电站	327
14-4	利用替代能源的动力站	329
14-5	动力厂设计运行中的两相流与传热	331
14-6	两相压降及截面含气率	337
14-7	核反应堆燃料元件的子通道分析	345
14-8	核反应堆设计中的两相流与传热	348
	参考文献	351
第十五章	传热强化技术的应用	353
15-1	引言	353
15-2	基本数据的选用	353
15-3	热工水力工况的评价	354
15-4	制造工艺的考虑	356
15-5	运行上的考虑	356
15-6	经济上的问题	358
15-7	传热强化技术的应用	359
15-8	商业上发展的影响因素	362
	参考文献	363
第十六章	核电两相流与安全	365
16-1	引言	365

16-2	沸水堆	365
16-3	沸水堆事故	366
16-4	压水堆	375
16-5	压水堆事故	376
	参考文献	380
第十七章	化学工业两相流与安全	383
17-1	引言	383
17-2	安全的一般原则	384
17-3	闪蒸与相分离	385
17-4	临界流	395
17-5	压力抑制	397
17-6	热量和质量传递	399
	参考文献	400
附录		402
表 1	不同温度下饱和水的性质	402
表 2	不同压力下饱和水的性质	404
表 3	过热蒸汽性质	406
表 4	液态金属性质	414
表 5	表面张力	415
表 6	大气压力下气体的热物理性质	416
表 7	饱和液体的热物理性质	424

第一章 绪 论

1-1 两相流的基本定义

同时存在着两种物质而且有明确分界面的流动着的流体，称为两相流。例如，水和冰在一起流动是两相流，空气和水在一起流动是两相流，蒸汽和水在一起流动也是两相流。另一种情况，如盐和水虽是两种物质，但它们在一起却不是两相流，而是单相流，因为盐在水中全部溶解形成均匀的流体，不存在明确的分界面。气和水在一起是双组份两相流，汽和水在一起是单组份两相流，因为蒸汽是由同一组成物质水蒸发而产生的。

气体和固体在一起流动是两相流，液体和固体在一起流动是两相流，气体和液体在一起流动是两相流，这只是一般对两相流的理解。此外，还有两种液体在一起流动的两相流，如油和水，因为它们有各自的明显分界面。因之正确地理解什么是两相流，要看流动的流体中两种物质的实际状态，即各自能独立地存在，而且有明确的分界面。同理，如同时存在两个相以上的流体，如油、气、水在一起的流动是三相流，又如海底油田输油管道中还可能出现油、气、水、沙在一起流动的四相流。凡三相及三相以上的流动我们统称之为多相流。

1-2 两相流与传热的重要性

在各种动力工业设备中，都存在着两相流与传热问题。为了使设计经济合理及评价各种安全因素有定量的资料，保证设备在最佳工况下安全运行，近 30 余年来，由于设备额定功率的增加，投资及运行费用的加大，以及对安全可靠性的重视，人们加强了这方面的研究，这一趋势可以用发电厂的锅炉与凝汽器的发展历史作