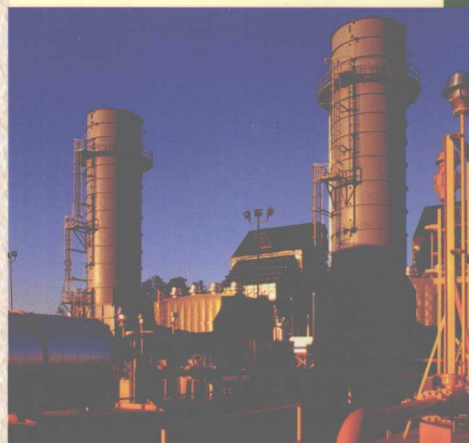


学者书屋系列

气液两相流

阎昌琪◎编著



天学出版社
ing University Press

学者书屋系列

气液两相流

编 著 阎昌琪

003
42

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书系统的介绍了气液两相流的基本原理和理论分析方法。全书共分九章,其中包括两相流基本参数、流型、基本方程、截面含气率的计算、压降计算、两相临界流、流动不稳定性和两相流参数测量等主要内容。

本书可供从事核反应堆工程及热能工程专业的技术人员使用,也可作为高等学校核动力工程及热能工程专业的本科生教材。

ISBN 978 - 7 - 81007 - 413 - 1

出版发行 哈尔滨工程大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号

邮政编码 150001

发行电话 0451 - 82519328

传 真 0451 - 82519699

经 销 新华书店

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm × 960mm 1/16

印 张 18.5

字 数 301 千字

版 次 2007 年 10 月修订

印 次 2007 年 10 月第 2 次印刷

定 价 29.00 元

[http : //press. hrbeu. edu. cn](http://press.hrbeu.edu.cn)

[E - mail : heupress@ hrbeu. edu. cn](mailto:heupress@hrbeu.edu.cn)

前 言

两相流是在流体力学与传热学基础上发展起来的一门新兴学科。它广泛应用于动力、石油、化工以及其他一些工业过程。由于核动力技术的迅速发展,这一学科引起了各国学者的重视,开展了广泛的理论研究和实验研究,取得了很多研究成果。

本书根据作者所编的核动力装置专业的两相流选修课讲义,又在教学实践和科研的基础上,补充了作者的研究成果,引用了国内外有关资料,补充改编而成。书中主要介绍了气液两相流的基本原理和基本处理方法,着重介绍管内气水两相流的机理和基本规律,并注重介绍这些基本规律与工程实际的关系。

两相流动现象在热能动力装置及核动力装置中是经常发生的,例如核动力装置中的核反应堆、蒸发器等一些主要设备中都存在着两相流动问题。两相流的汽相含量、压降及传热特性对这些设备的影响很大。掌握两相流动特性的变化规律和计算方法,就可以使所设计的设备有良好的热工和流体动力学特性,避免造成设计上和运行上的失误。因此两相流的研究在核能及热能动力工程中是非常重要的。

本书可作为高等学校核动力工程专业和热能工程专业本科生教材或研究生教材,也可供其他有关专业的师生和工程技术人员使用。

本书由黄渭堂副教授主审。郭镇明副教授为本书的出版提出了许多宝贵意见,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中可能存在不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

主 要 符 号 表

符号	单 位	名 称
A	m^2	流通面积
A'	m^2	液相所占流通面积
A''	m^2	气相所占流通面积
C	—	常数
C_p	$J/(kg \cdot ^\circ C)$	定压比热
D	m	管道直径
D_e	m	当量直径
d	m	直径
E	—	窜流比值
e	J/kg	单位质量的工质能量
f	—	摩阻系数
G	$kg/(m^2 \cdot s)$	质量流速
G''	$kg/(m^2 \cdot s)$	气相质量流速
G'	$kg/(m^2 \cdot s)$	液相质量流速
g	m/s^2	重力加速度
h_f	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	对流传热系数
i	J/kg	焓
i'	J/kg	液体在饱和温度下的焓
j_f	m/s	液相折算速度
j_g	m/s	气相折算速度
j_{gm}	$m^3/(s \cdot m^2)$	气相漂移流率
j_{fm}	$m^3/(s \cdot m^2)$	液相漂移流率
k	mm	绝对粗糙度

符号	单 位	名 称
k_f	$W/(m \cdot ^\circ C)$	导热系数
L	m	长度
M	kg/s	质量流量
M'	kg/s	液相质量流量
M''	kg/s	气相质量流量
m	—	孔板开孔截面与管道截面之比
P_h	m	周界长度
P	kW	功率
p	MPa	压力
Δp_a	MPa	加速压降
Δp_f	MPa	摩阻压降
Δp_g	MPa	重位压降
Q	J	吸热量
q	J/kg	热流量
q''	W/m^2	热流密度
R	m	半径
r	m	半径
r	J/kg	汽化潜热
S	—	滑动比
T	$^\circ C$	温度
T_s	$^\circ C$	饱和温度
T_i	$^\circ C$	入口温度
t	s	时间
U	J/kg	内能
V	m^3/s	容积流量
V'	m^3/s	液体容积流量
V''	m^3/s	气体容积流量

符号	单 位	名 称
v	m^3/kg	比容
v'	m^3/kg	液体比容
v''	m^3/kg	气体比容
v_m	m^3/kg	均质两相流的比容
v_A	m^3/kg	截面平均比容
v_M	m^3/kg	动量平均比容
v_E	m^3/kg	动能平均比容
W_o	m/s	循环流速
W'	m/s	液相流速
W''	m/s	气相流速
W_{gm}	m/s	气相漂移速度
W_{lm}	m/s	液相漂移速度
W_r	m/s	气液间相对速度
W_b	m/s	气泡速度
W_s	m/s	气泡在静止液体中的运动速度
X	—	马蒂内里参数
x	—	质量含气率(干度)
x_e	—	出口质量含气率
x_T	—	真实质量含气率
β	—	容积含气率
δ	m	液膜厚度
θ	度	水平倾角
λ	—	摩阻系数
λ_{lo}	—	全液相摩阻系数
λ_{go}	—	全气相摩阻系数
λ_l	—	分液相摩阻系数
λ_g	—	分气相摩阻系数

符号	单 位	名 称
μ	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	两相流平均动力粘度
μ'	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	液相动力粘度
μ''	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	气相动力粘度
ρ	kg/m^3	密度
ρ'	kg/m^3	液体密度
ρ''	kg/m^3	气体密度
ρ_m	kg/m^3	流动密度(均质两相流密度)
ρ_o	kg/m^3	两相流的真实密度
σ	N/m^2	表面张力系数
τ	N/m^2	切应力
τ_o	N/m^2	流体与管壁的切应力
τ_i	N/m^2	气液间的界面切应力
α	—	截面含气率(空泡份额)
α_e	—	出口截面含气率
Φ_l^2	—	分液相折算系数
Φ_g^2	—	分气相折算系数
Φ_{lo}^2	—	全液相折算系数
Φ_{go}^2	—	全气相折算系数
$\frac{dp_a}{dz}$	$\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$	加速压降梯度
$\frac{dp_g}{dz}$	$\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$	重位压降梯度
$\frac{dp_f}{dz}$	$\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$	摩阻压降梯度
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_l$	$\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$	液相单独通过管子时的压降梯度

符号	单 位	名 称
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_g$	N/(m ² · m)	气相单独通过管子时的压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{lo}$	N/(m ² · m)	全液相摩阻梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{go}$	N/(m ² · m)	全气相摩阻梯度

目 录

第一章 两相流基本参数及其计算方法	1
第一节 基本概念	1
第二节 气相介质含量	2
第三节 两相流的流量和流速	5
第四节 两相介质密度及比容	10
第五节 加热通道内沸腾段长度的确定	12
习 题	14
参考文献	15
第二章 两相流的流型和流型图	16
第一节 研究流型的意义	16
第二节 垂直上升管中的流动型式	17
第三节 垂直下降管中的气液 两相流流型及其流型图	21
第四节 水平管中的流动型式	23
第五节 倾斜管中的气液两相流流型及其流型图	27
第六节 U 型管中的气液两相流流型及其流型图	29
第七节 棒束及管束中的流型	32
第八节 气液两相流在装有孔板和 文丘利管的管道中的流型	35
第九节 管内淹没和流向反转过程的流型	37
第十节 流型之间的过渡	45
习 题	52
参考文献	53

第三章 两相流的基本方程	56
第一节 概 述	56
第二节 单相流体一元流动的基本方程	57
第三节 两相流分相流模型	
一元流动的基本方程	60
第四节 均相流模型的基本方程	66
第五节 动量方程的积分形式	69
习 题	71
参考文献	71
第四章 截面含气率的计算	72
第一节 概 述	72
第二节 滑速比模型算法	73
第三节 混合相 - 单相并流模型	74
第四节 变密度模型	77
第五节 最小熵增模型	79
第六节 漂移流模型	83
第七节 欠热沸腾区截面含汽率的计算	87
习 题	105
参考文献	106
第五章 直管的两相流压降计算	107
第一节 概 述	107
第二节 均相流模型的摩擦压降计算	108
第三节 分相流模型的摩擦压降计算	114
第四节 影响两相流摩擦压降的主要因素	131
第五节 重位压降计算	139
第六节 加速压降计算	144
第七节 环状流动的压降计算	145

习 题	157
参考文献	158
第六章 两相流局部压降计算	160
第一节 概 述	160
第二节 突扩接头的局部压降	161
第三节 突缩接头的局部压降	165
第四节 两相流通过孔板的压降	167
第五节 两相流通过弯头的压降	172
第六节 棒束定位格架的压降计算	174
第七节 阀门的局部压降	178
第八节 三通管中压降及其计算	178
习 题	185
参考文献	185
第七章 两相临界流动	187
第一节 概 述	187
第二节 压力波在流体内的传播速度	189
第三节 两相临界流的平衡均相模型	192
第四节 长孔道内两相临界流	194
第五节 短孔道内的两相临界流	207
习 题	209
参考文献	210
第八章 两相流流动不稳定性	212
第一节 概 述	212
第二节 流量漂移	214
第三节 平行通道的管间脉动	230
第四节 其他一些流动不稳定性	240
第五节 动态流动不稳定性理论分析	244

习 题	249
参考文献	249
第九章 两相流参数的测量	251
第一节 概 述	251
第二节 流型的测量	251
第三节 流量的测量	254
第四节 压差的测量	263
第五节 截面含气率的测量	265
参考文献	275
附 录	276

第一章 两相流基本参数及其计算方法

第一节 基本概念

两相流动是指固体、液体、气体三个相中的任何两个相组合在一起、具有相间界面的流动体系。可以由气体 - 液体、液体 - 固体或固体 - 气体组合构成,是自然界和工业应用中一种常见的流体流动现象。例如,液体沸腾、蒸汽冷凝、血液流动及石油输送等,都是一些普通的两相或多相流动体系。

两相流动体系可以是一种物质的两个相状态,也可以是两种物质的两相状态。因此,可以分为单组分两相流动和双组分两相流动。单组分两相流动是由同一种化学成分的物质两种相态混合在一起的流动体系。例如水及其蒸汽构成的汽水两相流动体系。双组分两相流动是指化学成分不同的两种物质同处于一个系统内的流体流动。例如空气 - 水构成的气水两相流动体系。广义上,实际中还有一些双组分流动,是由彼此互不混合的两种液体构成,例如油 - 水两相流动。

双组分两相流动与单组分两相流动定义虽有一些差异,但其流动所遵守的基本守恒方程和数学模型是相同的。在不涉及相变的情况下,可将它们按同一种物理现象处理。

流体在加热过程中会发生相变而形成两相流动。沸腾是一种很常见的物理现象,在沸腾过程中必然伴随有两相流动。这一过程中的许多两相流动特征,如流动不稳定性、空泡的分布特性、阻力特性等,对水冷

核反应堆、蒸汽锅炉、蒸馏塔、制冷设备和各种换热器等的工作过程都有重要影响。气体和液体都是流体,当它们单独流动时,其流动规律基本相同。但是,它们共同流动与单独流动有许多不同之处。这使得单相流中的许多准则和关系式不能直接用来描述两相流。

近几十年来,由于传统工业和新兴工业,如化学工程、冶金工程、核工程、航空与航天工程等的迅速发展,促进了两相流动的研究和应用,使它发展成为一个独立的研究分支,得到了广泛的重视。但是,由于固有的复杂性、多样性以及测量手段的局限性,到目前为止,无论是在理论上,还是方法上,这一研究尚处于发展阶段,而且,在今后一个较长的时间内,将继续是一个各抒己见,实验性强,充满着机会和突破的学术领域。

在气液两相流动中,两相介质都是流体,各自都有相应的流动参数。另外,由于两相介质之间的相互作用,还出现了一些相互关联的参数。为了便于两相流动计算和实验数据的处理,还常常使用折算参数(或称虚拟参数)。这使得两相流的参数比单相流复杂得多。本章就两相流中的一些主要参数予以讨论,并给出计算关系式。

第二节 气相介质含量

气相介质含量,表示两相流中气相所占的份额,它有以下几种表示方法。

一、质量含气率 x

质量含气率是指单位时间内,流过通道某一截面的两相流体总质量 M 中气相所占的比例份额。

$$x = \frac{M''}{M} = \frac{M''}{M'' + M'} \quad (1-1)$$

式中, M'' 、 M' 分别表示气相和液相的质量流量, kg/s。

$$1 - x = \frac{M'}{M} = \frac{M'}{M'' + M'} \quad (1-2)$$

称为质量含液率。

二、热力学含气率 x

在有热量输入的两相流系统中, 经常使用热力学含气率的概念。热力学含气率, 在有些文献中也称热平衡含气率, 它是由热平衡方程定义的含气率, 可根据加入通道的热量算出气相的含量。由热平衡方程

$$i = i_s' + rx \quad (1-3)$$

式中, i 是流道某截面上两相流体的焓值, 则

$$x = \frac{i - i_s'}{r} \quad (1-4)$$

在欠热沸腾的情况下, 两相流体的焓 i 小于饱和水的焓 i_s' , x 小于零。对于过热蒸汽, $i > i''$, 此时 x 大于 1。因此热力学含气率可以小于零也可以大于 1, 这是它与质量含气率的主要差别。

三、容积含气率 β

容积含气率是指单位时间, 流过通道某一截面的两相流总容积中, 气相所占的比例份额。其表达式为

$$\beta = \frac{V''}{V} = \frac{V''}{V' + V''} \quad (1-5)$$

式中, V'' 、 V' 分别表示气相和液相介质的容积流量, 而

$$1 - \beta = \frac{V'}{V} \quad (1-6)$$

称为容积含液率。

根据定义可以导出质量含气率 x 与 β 的关系