



研究生教材

# 气液两相流 和 沸腾传热

林宗虎 等编著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



研究生教材

# 气液两相流 和 沸腾传热

林宗虎 王树众 王 栋 编著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西 安 ·

## 内容简介

气液两相流是近几十年发展起来的一门新学科,是动力、化工、热能、核能、制冷、石油等专业的科技人员的必备知识。本书根据国内外的相关资料结合作者的科研成果编著而成。在气液两相流方面系统地论述了两相流流型和流型图、管内两相流动的压力降、两相流体的分配、混合和分离,流过节流元件的两相流压力降、横掠单管和管束时两相流的涡街特性以及两相流脉动及防止等专题;在沸腾传热方面,讨论了管内沸腾传热和传热恶化等问题;在气液两相流的测试技术方面介绍了近年来一些较为先进的测试方法。本书可供上述各专业作为研究生教材或本科生选修课教材,也可作为这些专业的科技工作者的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

气液两相流和沸腾传热/林宗虎等编著. —西安:西安交通大学出版社,2003.3  
ISBN 7-5605-1656-4

I. 气… II. 林… III. 两相流动-沸腾传热  
IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 005895 号

\*

西安交通大学出版社出版发行  
(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)  
西安东江印务有限公司印装  
各地新华书店经销

\*

开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:15 插页:2 字数:381 千字  
2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷  
印数:0 001~3 000 定价:28.00 元

---

发行科电话:(029)2668357,2667874

## 再版前言

近 10 多年来,多相流体力学和多相传热学随着科技进步和经济增长发展迅速。在热能、动力、化工、核能、制冷、石油、冶金、航天航空、气力输送、液力输送、叶轮机械、生物技术、电子设备冷却等领域均有重要应用。已成为研制、设计、和运转这些现代重要工业中的关键设备的必备理论知识。

要全面论述这方面的知识,由于内容过多,不是一本专著或教材所能做到的。本书专门论述其中的一个重要组成部分,即气液两相流和沸腾传热,可用于经济而可靠地设计、研究和运转上述工业中存在气液两相流和沸腾传热的设备。

本书第 1 版在 1987 年由西安交通大学出版社出版后,在西安交通大学和其他院校得到广泛应用和好评并为一系列论著所引用。不少应用过本书的读者已成为各相关领域中的著名学者、博士生导师和教授并在国内外重要岗位上发挥作用。这使作者深感欣慰。

这次再版时,本书在原有基础上结合作者科研成果和国内外有关新成就适当增加了内容。在气液两相流部分增加了第 9 章:气液两相流体横掠柱体的漩涡脱落特性;在沸腾传热方面增加了第 11 章:管道内强制对流沸腾换热的强化传热方法。此外,还增加了第 14 章:气液两相流测量技术和第 15 章:多相流研究进展。以便使读者对气液两相测试技术和多相流研究的进展有一个概略的了解。

本书共分 15 章,除上述 4 章外,其余论述的内容有:气液两相的流型和流型图;管内气液两相流的摩擦阻力压力降和加速压力降;管内气液两相流的重位压力降和截面含气率;气液两相流的局部阻力压力降和特殊管道的流动阻力压力降;气液两相流流经孔板、文丘利管和喷嘴的压力降;气液两相流的分离与混合;蒸发管

中的水动力特性和脉动问题;强制对流沸腾传热;烧损和缺液区传热等。

本书可供上述各工业领域中的相关专业作为研究生教材或本科生选修课教材,也可供这些专业的工程技术人员参考。

限于作者水平,书中可能存在不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

作 者

2003年2月

# 目 录

## 第 1 章 绪论

- 1.1 两相流及其定义 ..... (1)
- 1.2 气液两相流和传热学科的进展与工程的关系 ..... (2)
- 1.3 管内气液两相流的基本参数 ..... (5)
- 1.4 管内气液两相流的基本方程式 ..... (8)
- 参考文献 ..... (11)

## 第 2 章 气液两相流的流型和流型图

- 2.1 垂直上升管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (14)
- 2.2 垂直下降管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (17)
- 2.3 水平管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (19)
- 2.4 倾斜管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (29)
- 2.5 U 型管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (32)
- 2.6 螺旋管中的气液两相流流型及其流型图 ..... (36)
- 2.7 垂直上升狭槽中的气液两相流流型 ..... (37)
- 2.8 气液两相流纵向冲刷棒束时的流型及其流型图 ..... (38)
- 2.9 气液两相流横向冲刷管束时的流型及流型图 ..... (41)
- 2.10 气液两相流在装有孔板和文丘利管的管道中的流型  
..... (44)
- 2.11 气液两相流逆向流动时的流型(液泛和回流) ..... (48)
- 2.12 流型研究展望 ..... (56)
- 参考文献 ..... (59)

## 第 3 章 管内气液两相流的摩擦阻力压力降和加速压力降

- 3.1 计算管内压力降的基本方程式 ..... (63)
- 3.2 气液两相流体的摩擦阻力压力降计算式 ..... (65)

3.3	影响气液两相流体摩擦阻力压力降的因素	(92)
3.4	气液两相流体的加速压力降	(101)
	参考文献	(103)

#### 第4章 管内气液两相流的重位压力降和截面含气率

4.1	管内气液两相流的重位压力降计算式	(106)
4.2	管内气液两相流的截面含气率计算式	(107)
4.3	影响气液两相流体截面含气率的因素	(131)
	参考文献	(135)

#### 第5章 气液两相流的局部阻力和特殊管道的流动阻力压力降

5.1	突扩接头的局部阻力压力降	(137)
5.2	突缩接头的局部阻力压力降	(140)
5.3	管子和集箱连接时的管子入口及出口局部阻力压力降	(142)
5.4	弯头的局部阻力压力降	(144)
5.5	三通和阀门的局部阻力压力降	(152)
5.6	螺旋管中的流动阻力压力降	(154)
5.7	横向冲刷管束时的流动阻力压力降	(158)
5.8	内螺纹管和螺纹槽管中的流动阻力压力降	(160)
5.9	装有扭带管子的流动阻力压力降	(162)
	参考文献	(164)

#### 第6章 气液两相流流经孔板、文丘利管和喷嘴的压力降

6.1	概述	(167)
6.2	气液两相流流经孔板的压力降计算	(169)
6.3	气液两相流流经文丘利管和喷嘴时的压力降计算	(182)
	参考文献	(187)

<b>第 7 章 气液两相流的分离与混合</b>	
7.1 概述 .....	(189)
7.2 大容积中的汽液分离 .....	(190)
7.3 汽液分离设备 .....	(196)
7.4 分叉管中的气液混合物分配 .....	(212)
7.5 和集箱连接的并联管中的气液混合物分配 .....	(229)
7.6 气液分配器 .....	(242)
参考文献 .....	(245)
<b>第 8 章 蒸发管中的水动力特性和脉动问题</b>	
8.1 概述 .....	(247)
8.2 水平并联蒸发管中的水动力不稳定性 .....	(248)
8.3 垂直并联蒸发管中的水动力不稳定性 .....	(257)
8.4 蒸发管中脉动流动的危害及其类别 .....	(261)
8.5 各类脉动的特征及其防止方法 .....	(262)
8.6 脉动流动的分析计算方法 .....	(273)
参考文献 .....	(276)
<b>第 9 章 气液两相流体横掠柱体的旋涡脱落特性</b>	
9.1 单柱体的气液两相流体的 $St_{TP}$ 数 .....	(278)
9.2 气液两相流体涡街结构及稳定性 .....	(284)
9.3 气液两相流体横掠单根圆柱时的表面周向压力分布 .....	(287)
9.4 气液两相流体横掠单根圆柱时的流体作用力 .....	(291)
9.5 气液两相流体横向冲刷管束时的旋涡脱落特性 .....	(298)
参考文献 .....	(301)



## 第 10 章 强制对流沸腾传热

- 10.1 垂直受热管中的传热区域····· (302)
- 10.2 过冷沸腾传热····· (306)
- 10.3 过冷沸腾时的截面含汽率和压力降····· (311)
- 10.4 饱和沸腾传热与两相强制对流传热····· (315)
- 10.5 不稳定流动时的强制对流沸腾传热····· (320)
- 参考文献····· (322)

## 第 11 章 管道内强制对流沸腾换热的强化传热方法

- 11.1 管道内强制对流沸腾换热的影响因素及强化传热方法  
····· (323)
- 11.2 应用换热面表面粗糙法和表面特殊处理法以强化传热  
····· (327)
- 11.3 应用流体旋转法以强化传热····· (330)
- 11.4 应用扩展表面法以强化传热····· (347)
- 11.5 应用静电场添加剂和振动等方法强化传热····· (352)
- 参考文献····· (356)

## 第 12 章 烧损

- 12.1 烧损的定义及其同义词····· (360)
- 12.2 系统参数对烧损工况的影响····· (360)
- 12.3 临界热流密度的计算式····· (366)
- 12.4 烧损机理····· (375)
- 12.5 环状流动的临界热流密度计算····· (379)
- 参考文献····· (380)

## 第 13 章 缺液区传热

- 13.1 研究缺液区传热的目的及用途····· (383)
- 13.2 缺液区传热的物理过程····· (383)

13.3	缺液区传热计算式分类及研究概况·····	(387)
13.4	经验计算式·····	(389)
13.5	考虑热力不平衡工况的计算式·····	(397)
13.6	半理论模型计算式·····	(403)
13.7	骤冷·····	(404)
	参考文献·····	(407)

## 第 14 章 气液两相流测量技术

14.1	核磁共振测量技术·····	(409)
14.2	过程层析成像技术·····	(420)
14.3	气液两相流的流型检测技术·····	(425)
14.4	气液两相流流量测量技术·····	(431)
	参考文献·····	(443)

## 第 15 章 多相流研究进展

15.1	近期多相流基础理论研究·····	(448)
15.2	多相流的近期工程应用趋向·····	(453)
	参考文献·····	(457)

# 第 1 章

---

## 绪论

### 1.1 两相流及其定义

异质物体或系统中,各存在分界面的独立物质称之为相。众所周知,自然界常见的物质有三相:即固相、液相和气相。因此,由任意两种存在分界面的独立物质组成的物体或系统都称之为两相物体或两相系统。例如,水和冰的混合物为一种两相物体,因为水和冰都是存在分界面的独立物质。但是,盐水溶液是一种单相物体,因为在此溶液中盐和水之间无分界面,盐和水不是两种独立存在的物质。

两相物体的流动称为两相流。在两相流中,两相之间不仅存在分界面,而且这一分界面是随着流动在不断变化的。因此,两相流可定义为存在变动分界面的两种独立物质组成的物体的流动。气体和固体颗粒混合物的流动为一种两相流,因为在此流动系统中不仅存在两种独立物质,而且这两种物质之间的分界面是随流动而变化的。

根据两相流的定义,可以将两相流大致分为如下 3 类:气体和液体共同流动的气液两相流;气体和固体颗粒共同流动的气固两相流;液体和固体颗粒共同流动的液固两相流。此外,两种不同组分液体的共同流动也属于两相流范畴。

本书主要讨论气液两相流的流体动力学和沸腾传热问题。

气液两相流根据物质组分的不同又可分为两种。由同一组分的两种相组成的气流两相流称为单组分气液两相流,例如由水蒸汽和水构成的两相流。由不同组分的两种相组成的气液两相流称为双组分气液两相流,例如由空气和水构成的气液两相流。在不发生相变的流动过程中,单组分两相流和双组分两相流适用同样的物理规律,因而可通称为气液两相流。

根据换热情况的不同,气液两相流还可分为绝热气液两相流和有热交换的气液两相流。当存在热交换时,在单组分气液两相流中伴随着流动会发生工质的相变。

两相流这一术语在 20 世纪 30 年代首先出现于美国的一些研究生论文中。1943 年,苏联首先将这一术语应用于正式出版的学术刊物上。

美国、前苏联、德国在 20 世纪 20 年代已开始了气液两相流的研究工作,日本始于 20 世纪 50 年代,我国在 20 世纪 60 年代也开始了这方面的研究工作。总的来说,气液两相流的研究历史不是太长,它是一门大有发展前途的学科。

## 1.2 气液两相流和传热学科的进展与工程的关系

气液两相流体的流动工况在动力、化工、核能、制冷、石油、冶金等工业中经常遇到。在这些工业的具有热交换的设备中还存在着两相流体的传热问题。例如,在核电站和火力发电站中的各种沸腾管、各式气液混合器、气液分离器、各种热交换器、精馏塔、化学反应设备、各式凝结器以及其他设备中已广泛存在着气液两相流体的流动和传热问题。因而,要经济而可靠地研制、设计和运转这些设备必须具备气液两相流体在流动和传热方面的各种知识。

气液两相流和传热学科的形成和发展是和工程技术的进展密切相关的。自 18 世纪瓦特(Watt)发明蒸汽机以来,因缺乏气液两相流和传热方面的知识曾经发生过不少工业事故。气液两相流和

传热学科正是在不断总结经验教训、不断进行的过程中逐步形成的。

早先一些蒸汽轮船和蒸汽机车的锅炉爆炸事件促使人们去研究锅炉的水循环和传热问题。在19世纪末和20世纪初,已有一些论文论述了船用锅炉中的水循环和传热问题<sup>[1]</sup>。有的还论及了气液两相流体流动时发生的脉动问题<sup>[2][3]</sup>。但总的来说,有关的论文不多,研究工作还处于启蒙阶段。直到20世纪30年代,根据生产发展的需要,气液两相流体的流动和传热的研究工作才日益展开,发表的论文也日渐增多。

在1930~1940年期间,发表了一些研究气液两相流不稳定性<sup>[4]</sup>以及锅炉水循环中气液两相流动问题<sup>[5,6]</sup>的经典性文献。在传热方面开展了对大容积沸腾的研究工作。当时研究的参数一般都在中压以下。1940~1950年期间,不仅对双组分气液两相流的流动阻力等问题进行了研究<sup>[7]</sup>,而且还将研究工作深入到具有热交换的单组分气液两相流领域<sup>[8]</sup>。研究参数也逐渐趋向高压。

1950年以后,由于工业技术的飞速发展,例如,动力工业中高温、高压参数的引入和宇航工业及商用核电站的开始发展,促使气液两相流和传热的研究工作进一步展开。1950~1960年期间,直流锅炉开始采用。在这种锅炉的蒸发管中,进口工质为具有欠热的单相液体,出口工质为干度为1.0的干饱和蒸汽或过热蒸汽,因而其中的流动工况与换热工况和一般自然循环锅炉蒸发管中的低干度蒸汽流动工况与换热工况大不相同。在直流锅炉的高干度蒸发管中会发生传热恶化和管子烧损环象。此外,在核反应堆中的热负荷要比锅炉中的高几倍到几十倍,为了避免换热面烧损也必须深入研究高干度、高热负荷下的具有热交换的气液两相流问题。因而,对当时的工程实际而言,只考虑整根蒸发管中气液两相流的平均特性已不能满足工程发展的需要,必须掌握更详细的关于气液两相流体的流动结构以及整个干度范围内的传热特性知识以推动工业的发展。所以在此期间对于气液两相流的流动结构形式以

及传热恶化问题进行了较为深入的研究<sup>[9,10]</sup>。每年发表的有关论文达 500 篇左右。研究参数也进入高压、超高压乃至超临界压力。

近 50 年以来,美、苏、英等工业发达国家建立了一系列功率为兆瓦级的试验台。不少试验都能用实物在运行压力下进行。同时,对气液两相流和传热也进行了较为深入的理论分析。对于气液两相流体的流动和传热机理、流动结构形式及其影响因素、流动时相的分布及摩擦阻力计算、流动时的动态不稳定性及沸腾传热和强化传热等问题都作了广泛地研究和分析,并得出了许多计算式<sup>[11-14]</sup>。总结气液两相流和传热的各种研究成果的专著也大量出版<sup>[15-30]</sup>。这标志着气液两相流及其传热已发展到一个新的阶段,一个逐步形成一门新学科的阶段。

近 30 年来发生的核电站事故,例如,美国三里岛核电站事故,促使各主要工业国对与核反应堆安全问题有密切关系的核反应堆的热力、水力状况进行了大量研究工作。主要工作为应用计算机进行估计性计算。编写了大量计算机程序估算核反应堆正常运行及发生事故时的热力及水力工况。与此同时也进行少量大规模试验以资校核。在其它工业领域中,对于气液两相流动和传热的研究工作都在向着增加研究参数、扩大研究范围和进行一些全尺寸部件试验的方向努力。对于管束中的流动结构形式和流动阻力的研究也在增多,以适应废热锅炉、重沸器、列管式蒸发器以及其他的热交换设备发展的需要<sup>[31, 32]</sup>。同时,为利用海洋热能而设计的各种锅炉和凝结器也需要气液两相流和传热方面的资料<sup>[33]</sup>。随着人们对节能以及积极开发新能源问题的日益重视,气液两相流和传热的研究工作将得到进一步发展。

由上可见,气液两相流和传热学科的进展与工业的发展是密切相关的。工业的发展不断向气液两相流和传热的研究提出新课题,而气液两相流和传热研究工作的进展又进一步促进了工业的发展。

在气液两相流动中,气液两相的流速是不同的。在流动时气液两相的流动结构又是多种多样的,而且是带随机性的。因而要全面而准确地描述气液两相流体的流动状况是相当困难的。但是,研究气液两相流动必须从研究气液两相流的流动结构及掌握两相流的一些重要参数入手。

### 1.3 管内气液两相流的基本参数

在单相流体流动时,描述一种流动的最基本参数为速度、质量流量或体积流量。在气液两相流体的流动中,除这些参数外,各相的质量含量、体积含量和速度也是重要参数。描述气液两相流的基本参数如下:

#### 1. 截面含气率 $\alpha$ 及截面含液率 $(1-\alpha)$

在气液两相流作一元流动的管道中,如管道流通截面积为  $A$ ,气相及液相所占截面积分别为  $A_G$  和  $A_L$ ,则气相所占截面积和总流通截面积之比为截面含气率,用  $\alpha$  表示。液相所占截面积和总流通截面积之比为截面含液率,用  $(1-\alpha)$  表示。即

$$\alpha = A_G/A \quad (1-1)$$

$$(1-\alpha) = A_L/A \quad (1-2)$$

#### 2. 质量流量 $W$ , 气相质量流量 $W_G$ 及液相质量流量 $W_L$

每秒流过管道流通截面积的气液两相流体质量称为质量流量,用  $W$  表示。每秒流过管道的气相质量及液相质量分别称为气相质量流量及液相质量流量,分别用  $W_G$  和  $W_L$  表示。并有

$$W = W_G + W_L \quad (1-3)$$

#### 3. 质量含气率 $x$ 及质量含液率 $(1-x)$

气液两相流体中气相质量流量所占两相质量流量的份额称为质量含气率,用  $x$  表示。液相质量流量所占两相质量流量的份额称为质量含液率,用  $(1-x)$  表示。质量含气率对单组分气液两相流而言也称为干度。以数学式表示,则质量含气率和质量含液率

分别为

$$x = W_G / (W_G + W_L) \quad (1-4)$$

$$(1-x) = W_L / (W_G + W_L) \quad (1-5)$$

#### 4. 质量流速 $G$

质量流量除以管道流通截面积为质量流速,用  $G$  表示。即

$$G = W/A \quad (1-6)$$

质量流速  $G$  和气相质量流量  $W_G$  及液相质量流量  $W_L$  之间存在下列关系:

$$W_G = GAx \quad (1-7)$$

$$W_L = GA(1-x) \quad (1-8)$$

#### 5. 体积流量 $Q$ 、气相体积流量 $Q_G$ 及液相体积流量 $Q_L$

每秒流过管道流通截面积的两相流体体积称为体积流量,用  $Q$  表示。每秒流过管道的气相体积及液相体积分别称为气相体积流量及液相体积流量,分别用  $Q_G$  和  $Q_L$  表示。并有

$$Q = Q_G + Q_L \quad (1-9)$$

$Q_G$  和  $Q_L$  可分别表示为

$$Q_G = W_G / \rho_G \quad (1-10)$$

$$Q_L = W_L / \rho_L \quad (1-11)$$

式中  $\rho_G$ ——气相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_L$ ——液相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

#### 6. 体积含气率 $\beta$ 和体积含液率 $(1-\beta)$

气相体积流量和两相体积流量之比为体积含气率,用  $\beta$  表示;液相体积流量和两相体积流量之比为体积含液率,即  $(1-\beta)$  表示。即

$$\beta = Q_G / Q = Q_G / (Q_G + Q_L) \quad (1-12)$$

$$(1-\beta) = Q_L / Q = Q_L / (Q_G + Q_L) \quad (1-13)$$

由式(1-4), (1-5), (1-10)及式(1-11)可得

$$\beta = x / [x + (1-x)\rho_G/\rho_L] \quad (1-14)$$



$$(1 - \beta) = (1 - x) / [(1 - x) + x\rho_L/\rho_G] \quad (1-15)$$

### 7. 气相真实流速 $u_G$ 和液相真实流速 $u_L$

气相真实流速  $u_G$  和液相真实流速  $u_L$  可分别表示为

$$u_G = Q_G/A_G \quad (1-16)$$

$$u_L = Q_L/A_L \quad (1-17)$$

将式(1-10)和式(1-11)分别代入式(1-16)及式(1-17)可得

$$u_G = W_G/(\rho_G A_G) \quad (1-18)$$

$$u_L = W_L/(\rho_L A_L) \quad (1-19)$$

将式(1-7)和式(1-8)分别代入式(1-18)及式(1-19)可得

$$u_G = Gx/(\rho_G \alpha) \quad (1-20)$$

$$u_L = G(1 - x)/[\rho_L(1 - \alpha)] \quad (1-21)$$

### 8. 气相折算速度 $J_G$ 和液相折算速度 $J_L$

气相体积流量和管道截面积之比为气相折算速度,用  $J_G$  表示。液相体积流量和管道截面积之比为液相折算速度,用  $J_L$  表示。可表示为

$$J_G = Q_G/A \quad (1-22)$$

$$J_L = Q_L/A \quad (1-23)$$

分别应用式(1-1)和式(1-20)及式(1-2)和式(1-21)可得

$$J_G = u_G \alpha = Gx/\rho_G \quad (1-24)$$

$$J_L = u_L(1 - \alpha) = G(1 - x)/\rho_L \quad (1-25)$$

### 9. 滑动比 $S$

气相真实速度和液相真实速度之比为滑动比,用  $S$  表示。即

$$S = u_G/u_L \quad (1-26)$$

### 10. 滑动速度 $u_s$

滑动速度为气相真实速度和液相真实速度之差,用  $u_s$  表示。

即

$$u_s = u_G - u_L = J_G/\alpha - J_L/(1 - \alpha) \quad (1-27)$$