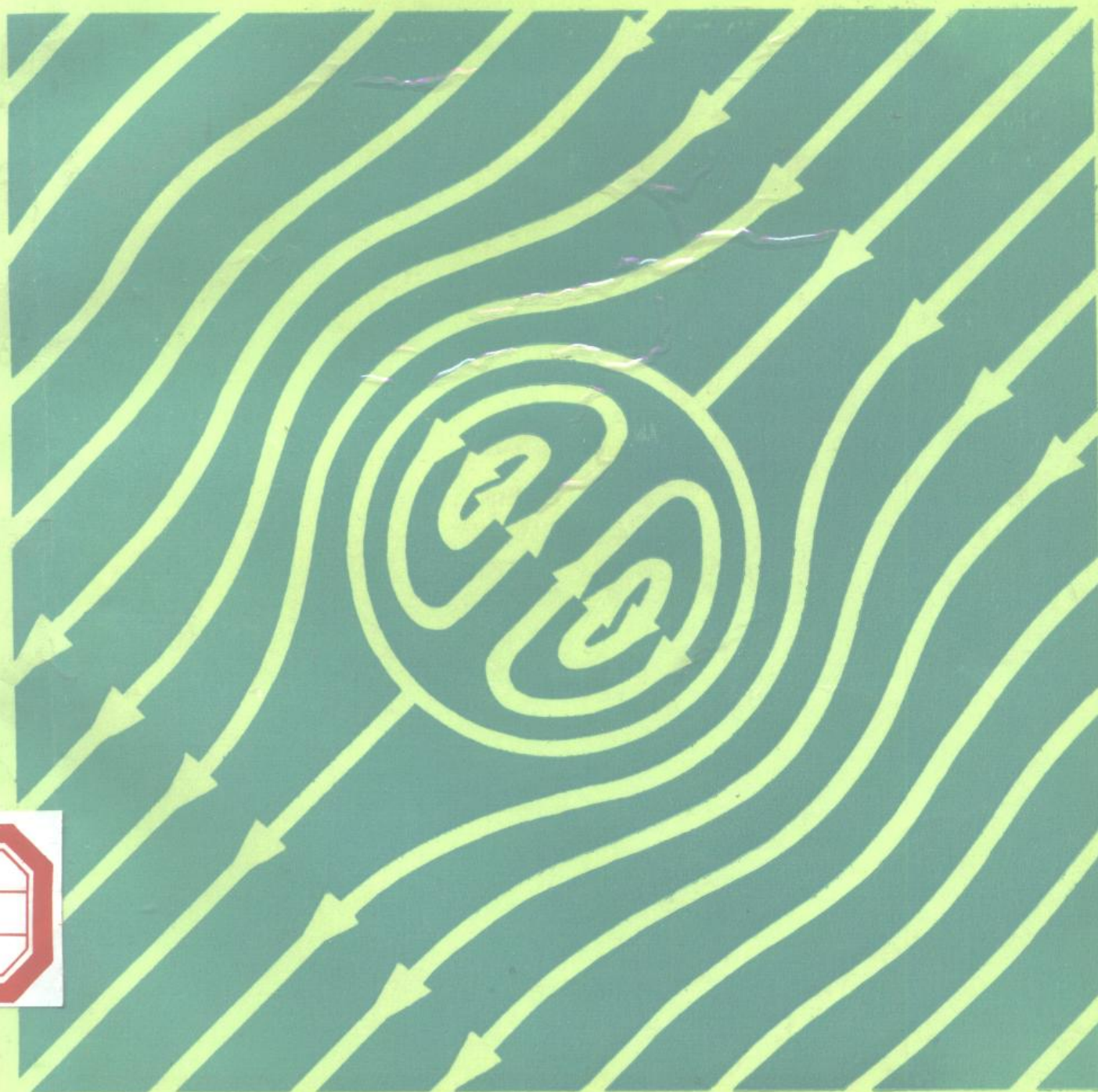


气液两相流和 沸腾传热

林宗虎 编著

西安交通大学出版社



气液两相流和沸腾传热

林宗虎 编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

气液两相流和沸腾传热是近30年发展起来的一门新学科，是动力、化工、热能、核能、制冷、石油等专业技术人员的必备知识。本书根据国内外最新资料结合作者科研成果编著而成。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。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书。

气液两相流和沸腾传热

林宗虎 编著

责任编辑 高民军

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安7226印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张13.625 字数：319千字

1987年6月第1版 1987年12月第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN7-5605-0054-4/TK-1

书号：15340·138

定价：2.70元

前 言

气液两相流和沸腾传热是动力、化工、核能、制冷、石油、冶金等工业中经常遇到的课题。要经济而可靠地设计、研制和运转这些工业中存在气液两相流和沸腾传热的设备就必须具备这方面的有关知识。

本书根据国内外最新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型和流型图、管内两相流动的压力降、两相截面含气率、流过节流元件的两相流压力降、两相流体的分配、分离和混合以及两相流体的脉动及防止等专题；在沸腾传热方面，讨论了管内沸腾传热和传热恶化等问题。可供热能工程、核能工程、石油化工等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。

本书由西安交通大学能源与动力工程系林宗虎教授编著，由浙江大学热物理工程系屠传经教授主审。

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。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 两相流及其定义.....	(1)
第二节 气液两相流和传热学科的进展与工程的关系.....	(1)
第三节 管内气液两相流的基本参数.....	(3)
第四节 管内气液两相流的基本方程式.....	(5)
参考文献.....	(7)
第二章 气液两相流的流型和流型图	(9)
第一节 垂直上升管中的气液两相流流型及其流型图.....	(9)
第二节 垂直下降管中的气液两相流流型及其流型图.....	(11)
第三节 水平管中的气液两相流流型及其流型图.....	(12)
第四节 倾斜管中的气液两相流流型及其流型图.....	(17)
第五节 U型管中的气液两相流流型及其流型图.....	(19)
第六节 螺旋管中的气液两相流流型及其流型图.....	(21)
第七节 垂直上升狭槽中的气液两相流流型.....	(22)
第八节 气液两相流纵向冲刷棒束时的流型及其流型图.....	(22)
第九节 气液两相流横向冲刷管束时的流型及其流型图.....	(24)
第十节 气液两相流在装有孔板和文丘利管的管道中的流型.....	(25)
第十一节 气液两相流逆向流动时的流型(液泛和回流).....	(28)
第十二节 流型研究展望.....	(33)
参考文献.....	(34)
第三章 管内气液两相流的摩擦阻力压力降和加速压力降	(37)
第一节 计算管内压力降的基本方程式.....	(37)
第二节 气液两相流体的摩擦阻力压力降计算式.....	(38)
第三节 影响气液两相流体摩擦阻力压力降的因素.....	(56)
第四节 气液两相流体的加速压力降.....	(61)
参考文献.....	(62)
第四章 管内气液两相流的重位压力降和截面含气率	(65)
第一节 管内气液两相流的重位压力降计算式.....	(65)
第二节 管内气液两相流的截面含气率计算式.....	(65)

第三节	影响气液两相流体截面含气率的因素	(81)
	参考文献	(82)
第五章	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	(84)
第一节	突扩接头的局部阻力压力降	(84)
第二节	突缩接头的局部阻力压力降	(85)
第三节	管子和集箱连接时的管子入口及出口局部阻力压力降	(86)
第四节	弯头的局部阻力压力降	(88)
第五节	三通和阀门的局部阻力压力降	(93)
第六节	螺旋管中的流动阻力压力降	(94)
第七节	横向冲刷管束时的流动阻力压力降	(96)
第八节	内螺纹管和螺纹槽管中的流动阻力压力降	(97)
第九节	装有扭带管子的流动阻力压力降	(99)
	参考文献	(100)
第六章	气液两相流流经孔板、文丘利管和喷嘴的压力降	(102)
第一节	概述	(102)
第二节	气液两相流流经孔板的压力降计算	(103)
第三节	气液两相流流经文丘利管和喷嘴时的压力降计算	(111)
	参考文献	(113)
第七章	气液两相流的分离与混合	(115)
第一节	概述	(115)
第二节	大容积中的汽液分离	(115)
第三节	汽液分离设备	(119)
第四节	分叉管中的气液混合物分配	(128)
第五节	和集箱连接的并联管中的气液混合物分配	(138)
第六节	气液分配器	(146)
	参考文献	(147)
第八章	蒸发管中的水动力特性和脉动问题	(149)
第一节	概述	(149)
第二节	水平并联蒸发管中的水动力不稳定性	(149)
第三节	垂直并联蒸发管中的水动力不稳定性	(155)
第四节	蒸发管中脉动流动的危害及其类别	(157)
第五节	各类脉动的特征及其防止方法	(158)
第六节	脉动流动的分析计算方法	(164)
	参考文献	(166)

第九章 强制对流沸腾传热	(169)
第一节 垂直受热管中的传热区域.....	(169)
第二节 过冷沸腾传热.....	(171)
第三节 过冷沸腾时的截面含汽率和压力降.....	(174)
第四节 饱和沸腾传热与两相强制对流传热.....	(176)
第五节 不稳定流动时的强制对流沸腾传热.....	(179)
参考文献.....	(180)
第十章 烧损	(182)
第一节 烧损的定义及其同义词.....	(182)
第二节 系统参数对烧损工况的影响.....	(182)
第三节 临界热流密度的计算式.....	(185)
第四节 烧损机理.....	(190)
第五节 环状流动的临界热流密度计算.....	(192)
参考文献.....	(193)
第十一章 缺液区传热	(195)
第一节 研究缺液区传热的目的及用途.....	(195)
第二节 缺液区传热的物理过程.....	(195)
第三节 缺液区传热计算式分类及研究概况.....	(197)
第四节 经验计算式.....	(198)
第五节 考虑热力不平衡工况的计算式.....	(204)
第六节 半理论模型计算式.....	(207)
第七节 骤冷.....	(207)
参考文献.....	(209)

第一章 绪 论

第一节 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三类：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液两相流称为单组分汽液两相流，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。

两相流这一术语在本世纪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、苏、德三国在本世纪20年代已开始了气液两相流的研究工作，日本始于50年代，我国在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较短，它是一门年轻的大有发展前途的学科。

第二节 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、

各式凝结器以及其它设备中都广泛存在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、不断进行研究的过程中逐步形成的。

早先一些蒸汽轮船和蒸器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^[1]。有的还论及了气液两相流体流动时发生的脉动问题^{[2] [3]}。但总的来说，有关的论文数量不多，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年间，发表了一些研究气液两相流不稳定性^[4]以及锅炉水循环中气液两相流动问题^{[5] [6]}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^[7]，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^[8]。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和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和换热工况大不相同。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现象。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型式以及传热恶化问题进行了较为深入的研究^{[9] [10]}。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。

近三十年来，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。对于气液两相流的流动和传热机理、流动结构型式及其影响因素、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的研究和分析，并得出了许多计算式^{[11] [12] [13] [14]}。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^{[15] [16]}。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。

近十年来，由于核电站事故的发生，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型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它热交换设备发展的需要^{[81] [82]}。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^[83]。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和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。

第三节 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 α 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 α 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分额称为质量含气率，用 x 表示。液相质量流量所占两相质量流量的分额称为质量含液率，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 ρ_G —— 气相密度 kg/m^3 ;

ρ_L —— 液相密度 kg/m^3 。

6. 体积含气率 β 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 β 表示; 液相体积流量和两相体积流量之比为体积含液率, 用 $(1-\beta)$ 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)、式 (1-5)、式 (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:

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

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

以式 (1-10) 及式 (1-11) 分别代入式 (1-16) 及式 (1-17) 可得:

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

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

以式 (1-7) 和式 (1-8) 分别代入式 (1-16) 和式 (1-17) 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)、式 (1-14) 及式 (1-2)、式 (1-15) 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:

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

11. 气液两相流体平均密度 ρ_m

气液两相流体分开流动时的平均密度 ρ_m 可用下式表示:

$$\rho_m = \rho_G \alpha + \rho_L (1 - \alpha) \quad (1-28)$$

气液两相流体均匀混合流动时的平均密度 ρ_m 可用下式表示:

$$\rho_m = W / Q = \rho_G \beta + \rho_L (1 - \beta) \quad (1-29)$$

以式 (1-14) 及式 (1-15) 代入式 (1-29) 可将式 (1-29) 改写为:

$$\rho_m = 1 / [x / \rho_G + (1 - x) / \rho_L] \quad (1-30)$$

12. 气液两相流体平均流速 u_m

气液两相流体分开流动时的平均速度 u_m 可用下式表示:

$$u_m = u_G \alpha + u_L (1 - \alpha) \quad (1-31)$$

气液两相流体均匀混合流动时的平均流速可用下式表示:

$$u_m = Q / A \quad (1-32)$$

应用式 (1-6) 一式 (1-11) 可将式 (1-32) 改写为:

$$u_m = G [x / \rho_G + (1 - x) / \rho_L] \quad (1-33)$$

13. 漂移流率 j_D

漂移流率 j_D 的概念可导出如下。气液两相之间的滑动速度 u_s 按式 (1-27), 可表示为 $u_G - u_L = J_G / \alpha - J_L / (1 - \alpha)$ 。消去分母后可定义漂移流率 j_D 如下:

$$j_D = (u_G - u_L) \alpha (1 - \alpha) = J_G (1 - \alpha) - J_L \alpha \quad (1-34)$$

上述参数为描述气液两相流的基本参数, 其它有关参数将在下面有关章节中介绍。

第四节 管内气液两相流的基本方程式

在单相流体力学中, 最常用的基本方程式为质量守恒方程式、动量守恒方程式和能量守恒方程式。在气液两相流动中, 这些方程式仍是最基本的方程式。这些方程式的应用和气液两相流体的流动结构型式有密切关系。下面以气液两相流动的两种最基本的流动模型来讨论它们的应用。

气液两相流动的两种最基本的流动模型是：两相完全分开流动模型和两相均匀混合流动模型。前者简称为分相流动模型，后者简称为均相流动模型。图1-1为单组分气液两相在倾角为 θ 的倾斜上升管中作分相流动时的示意图。在图1-1中，设气液两相流体作一元稳定流动，管子横截面上的压力是均匀分布的且在两相交界面上存在质量交换。此时质量守恒方程式可表示为：

$$W_G + W_L = W \quad (1-35)$$

$$dW_G = -dW_L \quad (1-36)$$

由于 $W_G = A_G \rho_G u_G = W x$ (1-37)

$$W_L = A_L \rho_L u_L = W(1-x) \quad (1-38)$$

因而 $d(A_G \rho_G u_G)/dZ = W dx/dZ = dW_G/dZ$ (1-39)

动量守恒方程式表明，作用于每相的合力应等于该相动量的变化率。因而对于气相可表示为：

$$\begin{aligned} & PA_G - (P+dP)A_G - dF_G - S - A_G dZ \rho_G g \sin \theta \\ & = (W_G + dW_G)(u_G + du_G) - W_G u_G - dW_G \left(u_G + \frac{d u_G}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-40)$$

式中 F_G ——管壁对气相的摩擦阻力 N；
 S ——气液两相交界面对气相的摩擦阻力 N。

式(1-40)可简化为：

$$\begin{aligned} & -A_G dP - dF_G - S - A_G dZ \rho_G g \sin \theta \\ & = W_G du_G + dW_G u_G - dW_G u_G \end{aligned} \quad (1-41)$$

同理，可求得液相的动量守恒方程式，此时 S 为两相交界面上气相对液相的摩擦阻力：

$$-A_L dP - dF_L + S - A_L dZ \rho_L g \sin \theta = W_L du_L \quad (1-42)$$

将式(1-41)和式(1-42)相加，并应用方程式(1-36)，可得：

$$\begin{aligned} & -AdP - dF_G - dF_L - g \sin \theta dZ (A_L \rho_L + A_G \rho_G) \\ & = d(W_L u_L + W_G u_G) \end{aligned} \quad (1-43)$$

式(1-43)即为图1-1所示管内一元流动的基本动量微分方程。

气液两相流的能量守恒方程式可列出如下：

$$W(\delta q - \delta w) = W di + d\left[W_G u_G^2/2 + W_L u_L^2/2 + W g \sin \theta dZ \right] \quad (1-44)$$

式中 δq ——单位质量流体自环境吸收的热量 J/kg；

δw ——单位质量流体对环境作的功 J/kg；

di ——单位质量流体的焓值变化 J/kg。

焓值变化 di 可按下列式计算：

$$di = \delta q + dE + dP(W_G/\rho_G + W_L/\rho_L)/W \quad (1-45)$$

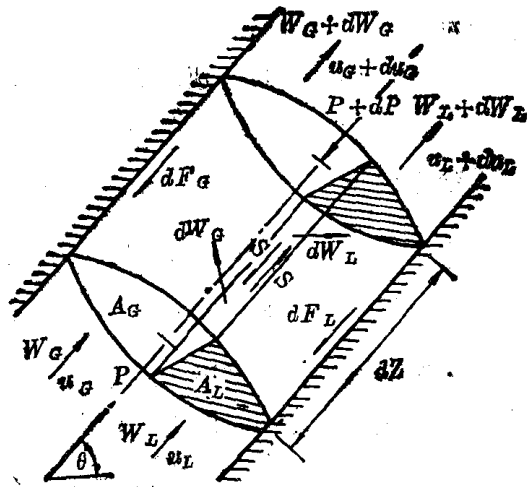


图1-1 气液两相流体在倾斜上升管中作分相流动时的流体微元段 dZ 示意图

式中 dE ——单位质量流体因机械能消耗，产生的热能J/kg。

将式(1-45)代入式(1-44)，化简整理后，再令流体对环境所作功为零($\delta w = 0$)，即得：

$$-(dP/dZ)(W_G/\rho_G + W_L/\rho_L) = W(dE/dZ) + d(W_G u_G^2/2 + W_L u_L^2/2)dZ + W g \sin\theta \quad (1-46)$$

上式经变换后可得

$$-(dP/dZ)[x/\rho_G + (1-x)/\rho_L] = dE/dZ + G^2 d\{x^3/(\rho_G^2 a^2) + (1-x)^3/[\rho_L^2 (1-a)^2]\}/2 dZ + g \sin\theta \quad (1-47)$$

式(1-47)即为气液两相作分相流动时的能量守恒方程式。

在均相流动模型中假设气液两相是以均匀混合的状态流动的，气液两相具有相同速度，气液两相之间已达到热力学平衡状态。因而对于均相流动可以看作是一种具有平均流体物理特性的单相流体的流动。

在均相流动时，上述三个基本方程式可简化：

质量守恒方程式

$$W = A\rho_m u_m \quad (1-48)$$

动量守恒方程式

$$-AdP - dF - A\rho_m g \sin\theta dZ = W du_m \quad (1-49)$$

能量守恒方程式

$$\delta q - \delta w = di + d(u_m^2/2) + g \sin\theta dZ \quad (1-50)$$

式中的工质焓值变化 di 可按式计算：

$$di = \delta q + dE + dP/\rho_m \quad (1-51)$$

以上各式中 ρ_m 、 u_m 分别代表均相流体的平均密度及平均速度， dF 表示管壁摩擦阻力。

参 考 文 献

- [1] Thorneycroft, J. T.: *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol. 36, 1985
- [2] Sauvage, E.: *Annales des Mines*, pp. 192~202, 1982
- [3] Adam, J.: *Zeitschrift des VDI*, Vol. 50, pp. 1143~1150, 1906
- [4] Ledinegg, M.: *Die Wärme*, pp. 891~898, 1938
- [5] Schmidt, E.: *Forschung Schrift, VDI*, N. 365, 1934
- [6] ЦКТИ.: *Расчет Черкуляци в Паровых Котлах*, Машгиз, 1937
- [7] Lockhart, R. W., Martinelli, R. C.: *Chemical Engineering Progress*, Vol. 45, pp. 39~48, 1949
- [8] Martinelli, R. C., Nelson, D. B.: *Transactions of the ASME*, Vol. 70, pp. 695~702, 1948
- [9] Rohsenow, W. M.: *Transactions of the ASME*, Vol. 74, pp. 969~976, 1952
- [10] Baker, O.: *Oil and Gas Journal*, Vol. 53, pp. 185~195, 1954

- [11] Telles, A. S., Dukler, A. E.: *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. Vol. 9, pp. 412~421, 1970
- [12] Levy, S.: *International J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 171~188, 1966
- [13] Bergles, A. E.: *A Paper in Progress in Heat and Mass Transfer*, Pergamon press, Oxford, Vol. 1, pp. 337~424, 1969
- [14] Stenning, A. H., Veziroglu, T. N.: *A Paper in Proceedings of the Symposium on Two-phase Flow Dynamics*, Brussels, pp. 406~427, 1969
- [15] Кутателадзе С. С., Стырикович, М. А.: *Газо-жидкостных Систем*, Госэнергоиздат, 1958
- [16] Wallis, G. B.: *One-dimensional Two-phase Flow*, McGraw-Hill, 1969
- [17] Collier, J. G.: *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill, 1972
- [18] Tong, L. S.: *Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow*, John Wiley & Sons, New York, 1965
- [19] [日]赤川浩尔: 《气液两相流》
- [20] Huhn: *Zweiphasen Stromang*
- [21] Hewitt, G. F.: *Measurement of Two-phase Flow Parameters*, Academic Press, 1978
- [22] Hsu, Y. Y.: *Transport Processes in Boiling and Two-phase Flow*, Hemisphere, Washington, D. C. 1976
- [23] Hestoroni, G.: *Handbook of Multiphase Flow Systems*, Hemisphere, 1982
- [24] Butterworth, D., Hewitt, G. F.: *Two-phase Flow and Heat Transfer*, Oxford Univ. Press, 1977
- [25] Hewitt, G. F., Hall-Taylor, N. S.: *Annular Two-phase Flow*, Pergamon press, 1970
- [26] Lahey, R. T., Moody, F. J.: *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*, The American Nuclear Society, 1977
- [27] Veziroglu, T. N.: *Multiphase Transport*, Hemisphere 1980
- [28] Bergles, A. E. et al.: *Two-phase Flow and Heat Transfer in the Power and process Industries*, Hemisphere, 1981
- [29] 陈之航等: 《气液双相流动和传热》, 机械工业出版社, 1983
- [30] Chisholm, D.: *Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers*, George Godwin, 1983
- [31] Palen, J. W., Taborek, J.: *AIChE Symposium Series*, Vol. 68, pp. 50~61, 1972
- [32] Grant, I. D. R., Chisholm, D.: *ASME paper*, No. 77-WA/HT-22, 1977
- [33] Dugger, G. L.: *Proceedings, Third Workshop on Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC)*, 1975

第二章 气液两相流的流型和流型图

气液两相流体在绝热或受热管道中流动时，因压力、流量、热流密度和管道几何形状的不同会形成各种流动结构型式，简称流型。由于不同的气液两相流流型具有不同的水动力学和传热特性，因而研究并设法预测管内气液两相流流型对于存在气液两相流的工业设备的设计和运行工作是十分重要的。本章主要讨论在各种简单和复杂管道中的气液两相流流型以及判别流型的流型图。

第一节 垂直上升管中的气液两相流流型及其流型图

图 2-1 示有气液两相流在垂直管中上升流动时的几种常见流型。现分别介绍如下：

1. 细泡状流型

细泡状流动是最常见的流型之一。其特征为在液相中带有散布在液体中的细小气泡。直径在 1mm 以下的气泡是球形的。直径在 1mm 以上的气泡外形是多种多样的。

2. 气弹状流型

气弹状流型由一系列气弹组成。气弹端部呈球形而尾部是平的。在两气弹之间夹有小气泡而气弹与管壁之间存在液膜。

3. 块状流型

当管内气速增大时，气弹发生分裂形成块状流型。此时大小不一的块状气体在液流中以混乱状态流动。

4. 带纤维的环状流型

在这种流型中，管壁上液膜较厚且含有小气泡。管子核心部分主要是气体，但在气流中含有由被气体从液膜带走的细小液滴形成的长条纤维。

5. 环状流型

在这种流型中，管壁上有一层液膜，管子核心部分为带有自液膜卷入的细小液滴的气体。环状流型都发生在较高气体流速时。

在受热管道中，当管壁温度高到足以使管壁液膜汽化时，流动结构就会发展到壁上无液膜，只有气相中还含有细小液滴的雾状流型。

图 2-2 表示有单组分气液两相流体在垂直上升受热管中的流型和管壁热流密度的关系。在图中，温度低于饱和温度的液体以固定流量进入各受热管。各受热管的热流密度依次自左

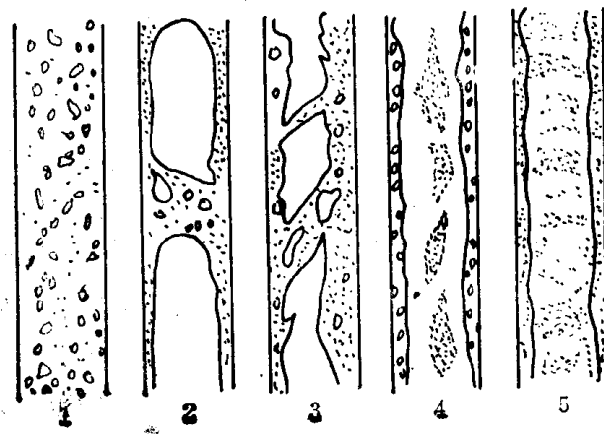


图 2-1 垂直上升管中的流型

1—细泡状 2—气弹状 3—块状 4—带纤维的环状 5—环状

右往逐渐增加。由图可见，随着热流密度的增大，各管中的沸腾点逐渐移向管子进口，各管中的流型也逐渐由单相液体、细泡状流型，气弹状流型、块状流型、环状流型、雾状流型、直至发展到干饱和蒸汽和过热蒸汽流动。

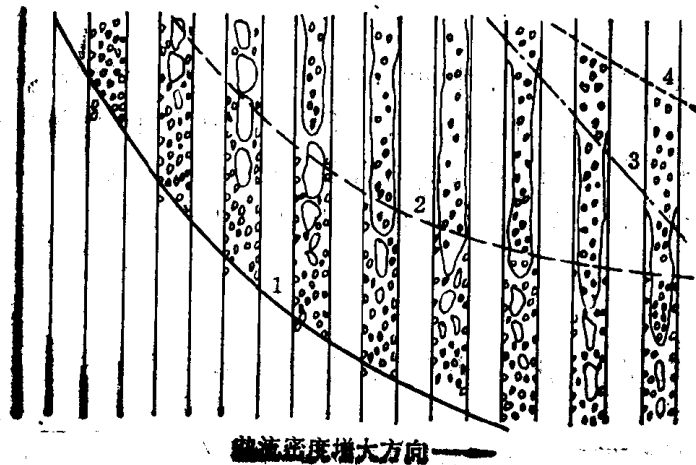


图 2-2 受热垂直上升管中沸腾时的两相流流型
随热流密度增加而变化的示意图
1—汽泡状沸腾开始线 2—汽泡状沸腾终止线
3—蒸干线 4—过热蒸汽线

在气液两相流中，在两相流量、流体的物性值（密度、粘度、表面张力等）、管道的几

何形状，管道尺寸以及热流密度确定的条件下，要判断管内气液两相流的流型可应用流型图。流型图主要是根据试验资料总结而成的，因而应用流型图时不应超出得出该流型图的试验范围。

在判断垂直上升管的流型图中，图 2-3 所示的流型图^[1]得到较为广泛的应用，此图适用于空气-水和汽-水两相流，是在管子内径为 31.2mm 的管子中用压力为 0.14—0.54MPa 的空气-水混合物为工质得出的，此图和应用压力为 3.45—6.9MPa 的汽水混合物在管径为 12.7mm 管子中得出的试验数据相符良好^[2]，所以也可适用于上述参数的汽水混合物。

图中横坐标为 $\rho_L J_L^2$ ，纵坐标为 $\rho_G J_G^2$ ，可分别按下式计算：

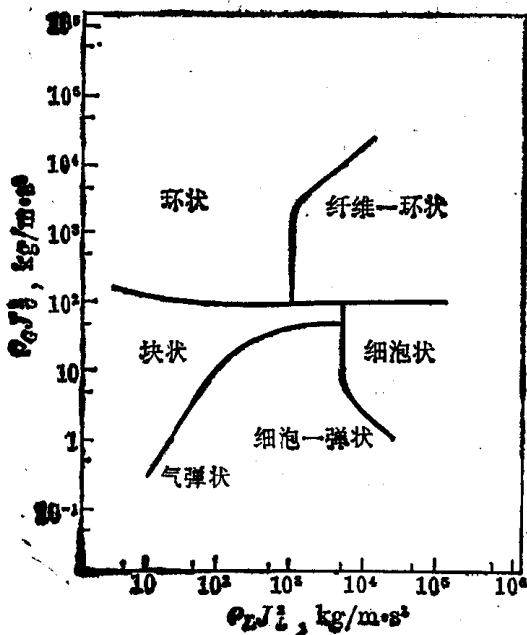


图 2-3 垂直上升管流型图^[1]

$$\rho_L J_L^2 = \frac{G^2(1-x)^2}{\rho_L} \quad (2-1)$$

$$\rho_G J_G^2 = \frac{G^2 x^2}{\rho_G} \quad (2-2)$$