



高等学校重点规划教材  
核科学与核技术系列

# 气液两相流

(第二版)

阎昌琪 编著



NUCLEAR  
SCIENCE  
AND

=2

HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



高等学校重点规划教材  
核科学与核技术系列

0359  
Y086=2

# 气液两相流

(第二版)

阎昌琪 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

## 内 容 简 介

本书系统地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。

## 图书在版编目(CIP)数据

气液两相流/阎昌琪编著. -2版. -哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.11

ISBN 978-7-81133-583-5

I. ①气… II. ①阎… III. ①气体-液体流动-研究  
IV. ①O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 196773 号

---

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 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 12  
字 数 277 千字  
版 次 2010 年 1 月第 1 版  
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 23.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

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

---

# 修订前言

本书出版发行后,经过十几年的教学使用,效果良好。在本书的使用过程中,许多任课教师对本书的内容提出了一些意见和建议,特别是哈尔滨工程大学的黄渭堂教授、曹夏昕副教授等提出了许多具体的修改意见,在此向他们表示衷心地感谢。

根据读者和教师反馈的意见和建议,本次修订对原书部分内容进行了修改和重新安排。考虑到内容安排的合理性,删去了第一章第五节的内容,在第四章中增加了第八节,该节涵盖了原书第一章第五节的内容,并对原内容有所补充。将原书第二章中的部分内容调整到了第五章,这样有利于教学内容的循序渐进,使内容编排更加合理,减少了原书的错误和纰漏,但由于时间仓促,难免还存在错误和不当之处,希望读者给予批评指正。

编者

2009年8月

# 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,开展了广泛地理论研究和实验研究,取得了很多研究成果。

本书依据作者所编的核动力装置专业的两相流选修课讲义,并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。

两相流动现象在热核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。两相流的气相含量、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核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

1995年2月

# 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
$i'$	$J/kg$	单位质量液体在饱和温度下的焓
$i''$	$J/kg$	单位质量饱和蒸汽焓
$j_l$	$m/s$	液相折算速度
$j_g$	$m/s$	气相折算速度
$j_{gm}$	$m^3/(s \cdot m^2)$	气相漂移通量
$j_{lm}$	$m^3/(s \cdot m^2)$	液相漂移通量
$k$	$mm$	绝对粗糙度
$k_f$	$W/(m \cdot ^\circ C)$	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
$\Delta p_a$	$MPa$	加速压降
$\Delta p_f$	$MPa$	摩擦压降
$\Delta p_g$	$MPa$	重位压降

符号	单 位	名 称
$Q$	J	吸热量
$q$	J/kg	热流量
$q''$	W/m <sup>2</sup>	热流密度
$R$	m	半径
$r$	m	半径
$i_{fg}$	J/kg	汽化潜热
$S$	—	滑速比
$T$	℃	温度
$T_s$	℃	饱和温度
$T_i$	℃	入口温度
$t$	s	时间
$U$	J/kg	内能
$V$	m <sup>3</sup> /s	容积流量
$V'$	m <sup>3</sup> /s	液体容积流量
$V''$	m <sup>3</sup> /s	气体容积流量
$v$	m <sup>3</sup> /kg	比容
$v'$	m <sup>3</sup> /kg	液体比容
$v''$	m <sup>3</sup> /kg	气体比容
$v_m$	m <sup>3</sup> /kg	均质两相流的比容
$v_A$	m <sup>3</sup> /kg	截面平均比容
$v_M$	m <sup>3</sup> /kg	动量平均比容
$v_E$	m <sup>3</sup> /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
$W_{fm}$	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
$\beta$	—	容积含气率
$\delta$	m	液膜厚度
$\theta$	度	水平倾角
$\lambda$	—	摩阻系数

符号	单 位	名 称
$\lambda_{lo}$	—	全液相摩阻系数
$\lambda_{go}$	—	全气相摩阻系数
$\lambda_l$	—	分液相摩阻系数
$\lambda_g$	—	分气相摩阻系数
$\mu$	$N \cdot s/m^2$	两相流平均动力黏度
$\mu'$	$N \cdot s/m^2$	液相动力黏度
$\mu''$	$N \cdot s/m^2$	气相动力黏度
$\rho$	$kg/m^3$	密度
$\rho'$	$kg/m^3$	液体密度
$\rho''$	$kg/m^3$	气体密度
$\rho_m$	$kg/m^3$	流动密度(均质两相流密度)
$\rho_o$	$kg/m^3$	两相流的真实密度
$\sigma$	$N/m^2$	表面张力系数
$\tau$	$N/m^2$	切应力
$\tau_o$	$N/m^2$	流体与管壁的切应力
$\tau_i$	$N/m^2$	气液间的界面切应力
$\alpha$	—	截面含气率(截面含气率)
$\alpha_o$	—	出口截面含气率
$\Phi_l^2$	—	分液相折算系数
$\Phi_g^2$	—	分气相折算系数
$\Phi_{lo}^2$	—	全液相折算系数
$\Phi_{go}^2$	—	全气相折算系数
$\frac{dp_a}{dz}$	$N/(m^2 \cdot m)$	加速压降梯度
$\frac{dp_g}{dz}$	$N/(m^2 \cdot m)$	重位压降梯度
$\frac{dp_f}{dz}$	$N/(m^2 \cdot m)$	摩擦压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_l$	$N/(m^2 \cdot m)$	分液相摩擦压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_g$	$N/(m^2 \cdot m)$	分气相摩擦压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{lo}$	$N/(m^2 \cdot m)$	全液相摩擦压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{go}$	$N/(m^2 \cdot m)$	全气相摩擦压降梯度



# 目 录

<b>第一章 两相流基本参数及其计算方法</b> .....	1
第一节 基本概念 .....	1
第二节 气相介质含量 .....	1
第三节 两相流的流量和流速 .....	4
第四节 两相介质密度及比容 .....	7
习题 .....	8
<b>第二章 两相流的流型和流型图</b> .....	9
第一节 研究流型的意义 .....	9
第二节 垂直上升管中的流动型式 .....	9
第三节 垂直下降管中的气液两相流流型及其流型图 .....	12
第四节 水平管中的流动型式 .....	13
第五节 倾斜管中的气液两相流流型及其流型图 .....	16
第六节 U型管中的气液两相流流型及其流型图 .....	17
第七节 棒束及管束中的流型 .....	18
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 .....	21
第九节 管内淹没和流向反过程的流型 .....	23
第十节 流型之间的过渡 .....	25
习题 .....	29
<b>第三章 两相流的基本方程</b> .....	30
第一节 概述 .....	30
第二节 单相流体一元流动的基本方程 .....	30
第三节 两相流分相流模型一元流动的基本方程 .....	32
第四节 均相流模型的基本方程 .....	36
第五节 动量方程的积分形式 .....	38
习题 .....	39
<b>第四章 截面含气率的计算</b> .....	40
第一节 概述 .....	40
第二节 滑速比模型计算法 .....	40
第三节 混合相-单相并流模型 .....	41

第四节	变密度模型 .....	43
第五节	最小熵增模型 .....	45
第六节	漂移流模型 .....	47
第七节	欠热沸腾区截面含气率的计算 .....	50
第八节	饱和沸腾通道内截面含气率 .....	61
习题	.....	63
<b>第五章</b>	<b>直管的两相流压降计算 .....</b>	<b>64</b>
第一节	概述 .....	64
第二节	均相流模型的摩擦压降计算 .....	64
第三节	分相流模型的摩擦压降计算 .....	68
第四节	影响两相流摩擦压降的主要因素 .....	80
第五节	重位压降计算 .....	85
第六节	加速压降计算 .....	87
第七节	环状流动的压降计算 .....	88
习题	.....	100
<b>第六章</b>	<b>两相流局部压降计算 .....</b>	<b>101</b>
第一节	概述 .....	101
第二节	突扩接头的局部压降 .....	101
第三节	突缩接头的局部压降 .....	103
第四节	两相流通过孔板的压降 .....	105
第五节	两相流通过弯头的压降 .....	108
第六节	棒束定位格架的压降计算 .....	109
第七节	阀门的局部压降 .....	112
第八节	三通管中压降计算 .....	112
习题	.....	116
<b>第七章</b>	<b>两相临界流动 .....</b>	<b>117</b>
第一节	概述 .....	117
第二节	压力波在流体内的传播速度 .....	118
第三节	两相临界流的平衡均相模型 .....	120
第四节	长孔道内的两相临界流 .....	121
第五节	短孔道内的两相临界流 .....	130
习题	.....	131

<b>第八章 两相流流动不稳定性</b> .....	132
第一节 概述.....	132
第二节 流量漂移.....	133
第三节 平行通道的管间脉动.....	143
第四节 其他一些流动不稳定性.....	150
第五节 动态流动不稳定性理论分析.....	152
习题.....	155
<b>第九章 两相流参数的测量</b> .....	156
第一节 概述.....	156
第二节 流型的测量.....	156
第三节 流量的测量.....	158
第四节 压差的测量.....	163
第五节 截面含气率的测量.....	164
<b>附录</b> .....	171
<b>参考文献</b> .....	176

# 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的两种相态混合在一起的流动体系。例如水及其蒸气构成的汽-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,得到了广泛地重视。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  $M'', M'$ ——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

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

可得

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

式中  $i$ ——流道某截面上两相流体的焓值;

$i'$ ——饱和水的焓。

在欠热沸腾的情况下,两相流体的焓  $i$  小于饱和水的焓  $i'$ ,  $x$  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 $\beta$

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  $V'', V'$ ——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  $\beta$  的关系, 即

$$x = \frac{M''}{M'' + M'} = \frac{\beta \rho''}{\beta \rho'' + (1 - \beta) \rho'} \quad (1-7)$$

$$\beta = \frac{x / \rho''}{x / \rho'' + (1 - x) / \rho'} \quad (1-8)$$

式中  $\rho'', \rho'$ ——气相和液相密度。

#### 四、截面含气率 $\alpha$

截面含气率也称空泡份额,是指两相流中某一截面上,气相所占截面与总流道截面之比。其表达式为

$$\alpha = \frac{A''}{A} = \frac{A''}{A' + A''} \quad (1-9)$$

式中  $A'', A'$ ——气相和液相所占的流道截面积。

同样

$$(1 - \alpha) = \frac{A'}{A} \quad (1-10)$$

称为截面含液率。

在两相绝热的稳定流动情况下,两相质量流量是不变的,所以在等截面流道的任意截面中, $\alpha$ 均相等,即  $A$  不变, $A', A''$ 也为常数。于是有

$$\alpha = \frac{A''}{A} = \frac{A'' \Delta L}{A \Delta L} = \frac{\Delta V''}{\Delta V} \quad (1-11)$$

式中  $\Delta L$ ——一小段管长, m;

$\Delta V''$ ——存在于  $\Delta L$  管长中气相的容积,  $m^3$ ;

$\Delta V$ ——存在于  $\Delta L$  管长中两相流总容积,  $m^3$ 。

从这里可以看出  $\beta$  与  $\alpha$  的区别,  $\beta$  表示流过通道的气相容积份额,而  $\alpha$  则表示存在于流道中的气相容积份额,两者的意义是不同的,由于气相介质密度比液相介质密度小,所以  $\alpha$  越大则存在于流道中的两相介质密度越小;反之密度越大。 $\beta$  不能表示出这种特性,由于气液两相介质的流速并不相同,所以流过某一截面的气相体积流量和总体积流量之比,并不等于存在于流道内的气相介质容积和流道内两相介质总容积之比。这一点可以由  $\beta$  和  $\alpha$  的定义直接导出。

$$\beta = \frac{\frac{M''}{\rho''}}{\frac{M''}{\rho''} + \frac{M'}{\rho'}} = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)\rho''}{x\rho'}} \quad (1-12)$$

$$\alpha = \frac{A''}{A'' + A'} = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)\rho''W''}{x\rho'W'}} \quad (1-13)$$

式中  $W'', W'$ ——气相和液相的流速。

比较式(1-12)和式(1-13)可以看出,如果两相流体中气相速度  $W''$  等于液相速度  $W'$ , 亦即两相之间没有相对滑动时,则  $\alpha$  等于  $\beta$  值,否则两值不等。在两相流系统中,由于两相的密度不同,其受力情况也不同,因此都不同程度地存在滑动。两相之间滑动的大小用滑速比  $S$  来表示,  $S = W''/W'$ 。引入滑速比的概念后,可以把式(1-13)改写成为

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)\rho''}{x\rho'}S} \quad (1-14)$$

而  $\beta$  与  $\alpha$  之间的关系为

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \frac{1}{S}} \quad (1-15)$$

在两相流通道中求出  $\alpha$  后,可利用(1-8)式很容易求出相应的  $\beta$  值。但是,截面含气率  $\alpha$  的计算,涉及到气液两相真实速度的比值  $S$ ,这就给  $\alpha$  的计算带来很多困难,在后面我们要专门讲  $\alpha$  值的计算问题。

### 第三节 两相流的流量和流速

两相流的流量和流速的表达形式较多,有各相的流量和流速、两相混合物的流量和流速、还定义了一些折算流量和流速。这使得两相流的流量和流速的表达形式很复杂,容易混淆,下面分别给出一些主要的定义和表达式。

#### 一、质量流量和质量流速

两相流的总质量流量为  $M$ ,它表示单位时间流过任一流道横截面的气液混合物的总质量,单位  $\text{kg/s}$ 。每一相的质量流量与总质量流量的关系为

$$M = M' + M'' \quad (1-16)$$

流道单位横截面通过的质量流量,称为质量流速,或质量流密度,单位  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,用  $G$  表示为

$$G = \frac{M}{A} \quad (1-17)$$

每一相的质量流速与总质量流速的关系为

$$G = G' + G'' \quad (1-18)$$

式中

$$G' = M'/A$$

$$G'' = M''/A$$

#### 二、容积流量、相速度和折算速度

##### 1. 容积流量

两相流的总容积流量  $V$ ,定义为单位时间内流经通道任一流道横截面的气液混合物的容积,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。总容积流量为每一相容积流量之和,即

$$V = V' + V'' \quad (1-19)$$

$$V' = \frac{M'}{\rho'} \quad (1-20)$$

$$V'' = \frac{M''}{\rho''} \quad (1-21)$$

##### 2. 各相的平均速度

液相的真实平均速度定义为

$$W' = \frac{V'}{A'} = \frac{M'}{\rho' A'} = \frac{G'}{\rho'(1-\alpha)} \quad (1-22)$$

气相的真实平均速度为

$$W'' = \frac{V''}{A''} = \frac{M''}{\rho'' A''} = \frac{G''}{\rho'' \alpha} \quad (1-23)$$

### 3. 折算速度

折算速度  $j$  又称容积流密度, 定义为每单位流道截面上的两相流容积流量,  $\text{m/s}$ , 它也表示两相流的平均速度。

$$j = \frac{V}{A} = \frac{V' + V''}{A} = j_g + j_l \quad (1-24)$$

$j_g = V''/A$  称为气相折算速度, 它的意义是假定两相介质中的气相单独流过同一通道时的速度。 $j_l = V'/A$ , 称为液相折算速度, 它表示两相介质中的液相单独流过同一通道时的速度。由折算速度的定义

$$j_l = \frac{V'}{A} = \frac{V'}{A'}(1 - \alpha) \quad (1-25)$$

式中,  $V'/A' = W'$  是液相的真实速度, 所以有

$$W' = \frac{j_l}{1 - \alpha} \quad (1-26)$$

同理

$$j_g = \frac{V''}{A} = \frac{V''}{A''} \alpha = \alpha W'' \quad (1-27)$$

$$W'' = \frac{j_g}{\alpha} \quad (1-28)$$

### 三、漂移速度和漂移通量

在解决两相流动问题时, 经常要用到漂移速度和漂移通量的概念。漂移速度是指各相的真实速度与两相混合物平均速度的差值。气相漂移速度为

$$W_{gm} = W'' - j \quad (1-29)$$

式中,  $j$  表示两相混合物的平均速度。液相漂移速度为

$$W_{lm} = W' - j \quad (1-30)$$

漂移通量表示各相相对于平均速度  $j$  运动的截面所流过的体积通量。气相漂移通量为

$$j_{gm} = \frac{A''}{A}(W'' - j) = j_g - \alpha j \quad (1-31)$$

液相漂移通量为

$$\begin{aligned} j_{lm} &= \frac{A'}{A}(W' - j) = (1 - \alpha)(W' - j) \\ &= j_l - (1 - \alpha)j = \alpha j - j_g \end{aligned} \quad (1-32)$$

由式(1-31)和式(1-32)可以看出

$$j_{gm} = -j_{lm} \quad (1-33)$$

即气相漂移通量与液相漂移通量大小相等、方向相反。



#### 四、循环速度和循环倍率

##### 1. 循环速度

循环速度是指与两相混合物总质量流量  $M$  相等的液相介质流过同一截面的通道时的速度。根据质量守恒原理,入口为欠热水或饱和水的沸腾通道,进口处水的质量流量等于汽水混合物的质量流量。因此,对于这样的等截面通道,循环速度在数值上等于通道入口处的水速。由定义可得

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{M}{\rho' A} = \frac{M'' + M'}{\rho' A} \\ &= \frac{\rho'' V''}{\rho' A} + \frac{V'}{A} = \frac{\rho''}{\rho'} j_g + j_t \end{aligned} \quad (1-34)$$

于是有

$$\begin{aligned} j &= j_t + j_g = j_g + (W_0 - \frac{\rho''}{\rho'} j_g) \\ &= W_0 + (1 - \frac{\rho''}{\rho'}) j_g \end{aligned} \quad (1-35)$$

##### 2. 循环倍率

循环倍率是指单位时间内,流过通道某一截面的两相介质总质量与其中气相质量之比,也就是质量含气率的倒数。

$$K' = \frac{M}{M''} = \frac{1}{x} \quad (1-36a)$$

上式亦可写成

$$K' = \frac{W_0 \rho'}{j_g \rho''} \quad (1-36b)$$

#### 五、滑速比

由于气体和液体的流速不同,在两相之间存在相对速度  $W_{xd}$ ,且

$$W_{xd} = W'' - W' \quad (1-37)$$

相对速度又称为滑移速度。

气体的速度与液体的速度之比称为滑速比  $S$ ,且

$$S = \frac{W''}{W'} = \frac{\frac{(\rho W)x}{\rho'' \alpha}}{\frac{(\rho W)(1-x)}{\rho'(1-\alpha)}} = \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right) \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \quad (1-38)$$

关于气体与液体之间存在相对速度的原因,后面还要进行详细讨论。当气体的真实速度大于液体的真实速度时,  $W_{xd} > 0, S > 1$ ; 反之,  $W_{xd} < 0, S < 1$ ; 当两者的速度相等时,  $W_{xd} = 0, S = 1$ 。

影响  $S$  值的因素非常多,无法直接从流动参数计算来确定,目前多是根据实验得到的经验公式来确定。当两相流体垂直上升流动时,由于浮力的作用,使  $W'' > W', S > 1$ , 则  $\beta > \alpha$ ; 下降流动时一般  $W'' < W', S < 1$ , 则  $\alpha > \beta$ 。