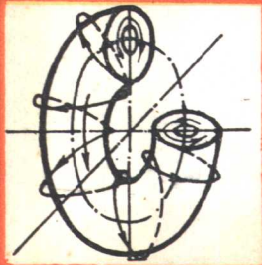
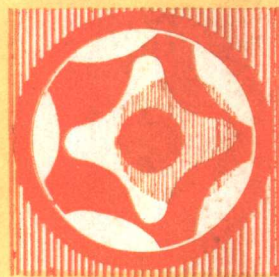


高等学校试用教材



气液双相流动 和传热

陈之航 曹柏林 赵在三 编



机械工业出版社

124

11

高等学校试用教材

气液双相流动和传热

陈之航 曹柏林 赵在三 编



机械工业出版社

气液双相流动和传热

陈之航 曹柏林 赵在三 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 13 · 字数 307 千字

1983 年 11 月北京第一版·1983 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,600 · 定价 1.65 元

*

统一书号: 15033·5459

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划编写的,在内容上着重讲述气液两相流体动力学和沸腾传热的基本原理,而不强调提供工程计算的具体方法。

本书为高等工科院校热能工程专业选修课或研究生的试用教材,也可供核动力工程、化学工程等专业的师生和工程技术人员参考。

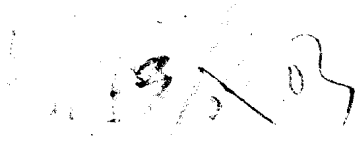
陈之航教授编写第一章至第十章的气液两相流体动力学部分。清华大学曹柏林副教授编写第十一章到第十四章的沸腾传热部分。上海机械学院赵在三同志编写第十五章两相流的流量测量。全书由陈之航教授统稿。

本书由西安交通大学陈听宽和章燕谋副教授主审。

本书责任编辑为机械工业部教材编辑室郝育生同志。

由于编者水平有限,书中可能存在不少缺点和错误,请读者批评指正,以便再版时改进。

1982 · 2



主要符号表

符号	单位	名称	符号	单位	名称
A	m^2	流通面积	v'	m^3/kg	液体比容
A'	m^2	液相所占流通面积	v''	m^3/kg	气体比容
A''	m^2	气相所占流通面积	v_o	m^3/kg	均质两相流的比容
d	m	直径	w	m/s	流量速度 (两相混合物的速度)
E	—	窜流比值	w'	m/s	液相流速
e	$J/kg (N \cdot m/kg)$	单位质量的工质能量	w''	m/s	气相流速
F	N	力	w'_o	m/s	液相折算流速
f	—	摩阻系数	w''_o	m/s	气相折算流速
G	kg/m^2s	质量流速	w_{gm}	m/s	气相漂移速度
g	m/s^2	重力加速度	w_{lm}	m/s	液相漂移速度
i	J/kg	焓	w_r	m/s	气液间相对速度
i'_s	J/kg	液体在饱和温度下的焓	w_b	m/s	气泡速度
J_{gm}	m^3/sm^2	气相漂移流率	w_s	m/s	气泡在静止液体中的运动速度
J_{lm}	m^3/sm^2	液相漂移流率	X	—	马蒂内里参数
k	mm	绝对粗糙度	x	—	质量含气率 (干度)
L	m	长度	x_s	—	出口质量含气率
M	kg/s	质量流量	β	—	容积含气率
M'	kg/s	液相质量流量	δ	m	液膜厚度
M''	kg/s	气相质量流量	θ	度	水平倾角
m	—	孔板开孔截面积与管道截面积之比	λ	—	摩阻系数, 导热系数
P	m	周界长度	λ_{lo}	—	全液相摩阻系数
	kW	功率	λ_{go}	—	全气相摩阻系数
p	$bar (N/m^2)$	压力	λ_l	—	分液相摩阻系数
Q	$J (N \cdot m)$	吸热量	λ_g	—	分气相摩阻系数
q	$J/kg (N \cdot m/kg)$	热流量	μ	$N \cdot s/m^2$	动力粘度
R	m	半径	μ'	$N \cdot s/m^2$	液体动力粘度
r	m	半径	μ''	$N \cdot s/m^2$	气体动力粘度
r	J/kg	汽化潜热	ν	m^2/s	运动粘度
s	—	滑动比	ρ	kg/m^3	密度
U	$J/kg (N \cdot m/kg)$	内能	ρ'	kg/m^3	液体密度
	m	湿周长度	ρ''	kg/m^3	气体密度
V	m^3/s	容积流量	ρ_o	kg/m^3	流动密度 (均质两相流密度)
V'	m^3/s	液体容积流量			
V''	m^3/s	气体容积流量			
v	m^3/kg	比容			

符号	单位	名称
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	气液间的切应力
φ	—	空隙率 (截面含气率)
φ_e	—	出口空隙率
ϕ_l^2	—	分液相折算系数
ϕ_g^2	—	分气相折算系数
$\phi_{l_o}^2$	—	全液相折算系数
$\phi_{g_o}^2$	—	全气相折算系数
$\frac{dp_e}{dz}$	$N/m^2 \cdot m$	加速压降梯度
$\frac{dp_g}{dz}$	$N/m^2 \cdot m$	重位压降梯度

符号	单位	名称
$\frac{dp_f}{dz}$	$N/m^2 \cdot m$	摩阻压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_l$	$N/m^2 \cdot m$	液相单独通过管子时的压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_g$	$N/m^2 \cdot m$	气相单独通过管子时的压降梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{l_o}$	$N/m^2 \cdot m$	全液相摩阻梯度
$\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{g_o}$	$N/m^2 \cdot m$	全气相摩阻梯度

目 录

前言

主要符号表

第一章 概论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 两相流的处理方法	1
§ 1.3 两相流的特性参数	2
习题	5
第二章 两相流在管内的流型	7
§ 2.1 流型的分类	7
§ 2.2 流型图	8
§ 2.3 阻液和回流现象	11
习题	12
第三章 两相流的基本方程	14
§ 3.1 单相流体一元流动的基本方程	14
§ 3.2 两相流体一元流动的基本方程	15
§ 3.3 均相流动模型的基本方程	19
§ 3.4 两相流体动量方程和能量方程的对比	20
§ 3.5 动量方程的积分形式	21
§ 3.6 在两相流中机械能的散失	22
习题	23
第四章 确定摩阻压降的经验方法	25
§ 4.1 依据均相模型的摩阻压降的经验关系式	25
§ 4.2 依据分相模型的摩阻压降的经验关系式	27
§ 4.3 质量流速对两相流摩阻折算系数的影响	34
习题	39
第五章 确定重位压降和空隙率的经验方法	41
§ 5.1 重位压降梯度	41
§ 5.2 均相流动模型	41
§ 5.3 将空隙率表示成容积含气率与经验系数的乘积关系式	42
§ 5.4 分相流动模型	42
§ 5.5 确定滑动比的经验关系式	44
习题	46
第六章 加速压降	47
§ 6.1 加速压降梯度的基本表达式	47
§ 6.2 分相流和均相流加速压降的比较	47
§ 6.3 加速压降同摩阻压降的比较	49

习题	51
第七章 局部阻力	52
§ 7.1 突扩接头	52
§ 7.2 突缩接头	54
§ 7.3 弯头	56
§ 7.4 三通、阀门和其他管件	57
习题	58
第八章 垂直上升泡状流和弹状流	59
§ 8.1 简化的两相一元流动模型	59
§ 8.2 变密度流动模型	61
§ 8.3 漂移流动模型	63
§ 8.4 弹状流动	65
习题	66
第九章 环状流动	68
§ 9.1 气流中不夹带液滴的环状流动	68
§ 9.2 雾环状流动	73
习题	76
第十章 临界流	77
§ 10.1 单相流体的临界流	77
§ 10.2 两相临界流的平衡 均相模型	78
§ 10.3 长管中的临界流	79
§ 10.4 短管中的临界流	82
习题	84
第十一章 管内过冷沸腾与传热	85
§ 11.1 两相传热工况概述	85
§ 11.2 过冷核态沸腾	87
§ 11.3 流动过冷沸腾传热	88
习题	99
第十二章 流动过冷沸腾的空隙率与压降	100
§ 12.1 概述	100
§ 12.2 流动过冷沸腾空隙率	100
§ 12.3 流动过冷沸腾空隙率计算的“机理模型”	107
§ 12.4 流动过冷沸腾空隙率的“分布-拟合”模型	112
§ 12.5 过冷沸腾压降	113
习题	117
第十三章 流动饱和沸腾、两相强制对流与烧毁后传热	119
§ 13.1 流动饱和（核态）沸腾	119
§ 13.2 饱和（核态）沸腾的抑制	119
§ 13.3 两相强制对流区的传热	120
§ 13.4 烧毁后传热计算	127
§ 13.5 水平管内的沸腾传热	136
习题	137

第十四章 烧毁	138
§ 14.1 烧毁的定义	138
§ 14.2 烧毁机理	139
§ 14.3 影响烧毁诸因素的分析	142
§ 14.4 垂直均匀加热管的烧毁关系式	146
§ 14.5 不均匀加热时的烧毁关系式	154
§ 14.6 复杂几何结构时的烧毁关系式	158
§ 14.7 水平管的烧毁	161
§ 14.8 锅炉管烧毁的估计与改善锅炉管烧毁的措施	162
§ 14.9 上海锅炉厂对亚临界参数直流炉烧毁问题的研究	166
§ 14.10 超临界压力下的烧毁	169
习题	169
第十五章 两相流体流量的测量	171
§ 15.1 概述	171
§ 15.2 皮托管	172
§ 15.3 涡轮流量计	176
§ 15.4 靶式流量计	177
§ 15.5 孔板流量计	179
§ 15.6 椭圆齿轮流量计	185
§ 15.7 各种流量计和其它测量方法的组合进行双参数测量	187
习题	190
附录	193

第一章 概 论

§ 1.1 引 言

两相或双相混合物有气液、气固和液固三大类,有时也把两种液体的混合物,如油水混合物包括在内。气液混合物又可分为单工质和双工质两类,前者是气液两相都具有相同的化学成分(如水和水蒸气的混合物);后者是两相各具有不同的化学成分(如空气和水的混合物)。

气液两相流动和传热在现代科学技术中有着广泛的应用,如:锅炉、核反应堆、油田及气田的开采、化工设备、制冷和低温、钢厂中的汽化冷却等。近年来,两相流动甚至已进入人体血液循环的研究领域[1.1, 1.2, 1.3]。

以高压直流锅炉为例(图 1-1),为了分析其性能,评定其安全性和经济性,都须要计算蒸发管两相区的阻力 Δp 、相的分布、传热恶化处的含汽率 x_c 、壁温等。

由于两相流应用广泛,近二十年来受到了世界各国研究者的高度重视并取得了许多成果。这些成果不仅解决了有关的工程技术问题,而且为建立和发展两相流体动力学和传热这门学科奠定了基础。近年来,系统讲述气液两相流的著作大量出版[1.4~1.12],这标志着它已从对个别问题的研究而演变为具有比较完整体系的新兴学科。

本书并不打算涉及到各个科学技术领域的两相流,而只希望读者通过本书获得气液两相流动和沸腾传热的基本知识,为今后了解和分析各种科学技术领域,特别是动力工程中的有关两相流问题提供一个基础。

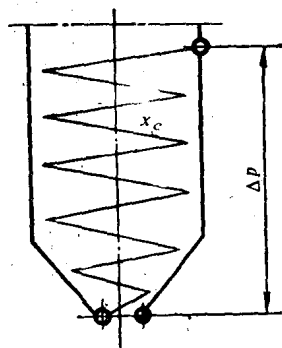


图 1-1

§ 1.2 两相流的处理方法

流体力学的基本方程也适用于两相流动,不过在两相流动中,一般应对各相列出各自的守恒方程,而且还要考虑两相间的作用,故描述两相流的方程组要比单相流的复杂得多。因此,两相流的处理方法与单相流的有共同之处,但也有其特点。

大家知道,气液两相流在管内的流动存在着各种不同的流型,而气液界面又很复杂和多变,因此,按适当边界条件求解气液两相流的微分方程组是很困难的。

与处理单相流动一样,对于两相流动也可以从物理概念出发,或者用因次分析法,或者从基本微分方程中得到描述某一特定两相流动过程的一些无因次参数,然后根据试验数据得出经验关系式。

另一种处理方法就是根据所研究的过程的特点采用适当简化假设,再从两相流的基本方程求得描述该两相流过程的函数形式,然后用试验方法定出方程中的经验系数,这就是所谓的半经验方法。

按上述经验或半经验处理方法所得到的关系式或曲线,一般都便于工程的实际应用,而当用于与试验条件相同或相似的情况时更具有较大的可靠性,自然也有其局限性。

第三种处理方法就是首先分清两相流的流型(主要指管内流动),然后根据各种流型的特点分析其流动特性并建立关系式。这种分析方法也有人称为两相流的流体力学分析法。显然,采用这一方法,能更深入地探究两相流的实质,并具有更普遍的意义。近年来,这种分析方法受到了广泛重视,并取得了不少进展,特别是对于工程技术中常见的环状流动流型。但因两相流的流型分界目前还不能严格确定,故将这种分析方法所得结果用于实际还不普遍。

§ 1.3 两相流的特性参数

对气液两相流的描述,除了要引用单相流的参数外,还要利用一些两相流所特有的参数。显然,在讨论两相流的规律以前,应对这些参数有个初步了解。

一、气相和液相速度

在图 1-2 中分别示出在绝热和受热条件下气体和液体在管内的上升流动。图中的两相区都表示成环状流,这只是为了分析问题方便和清楚,并不代表两相区的实际流型。设 A' 和 A'' 分别表示液相和气相所占管子的横截面积,则:

$$\text{气相速度} \quad w'' = \frac{V''}{A''}, \text{ m/s} \quad (1-1)$$

$$\text{液相速度} \quad w' = \frac{V'}{A'}, \text{ m/s} \quad (1-2)$$

式中 V'' 和 V' 分别表示气体和液体的容积流量 (m^3/s)。

上述速度常称为各相的实际速度,然而事实上它们是各相所占截面的平均速度,真正的实际速度应当是各点的局部流速。

二、折算速度

为了便于研究,在两相流体力学中常采用折算速度。所谓折算速度就是假定管子全部截面只被两相混合物中的一个相占据时的流速,如图 1-3 所示。即:

$$\text{气相折算速度} \quad w''_0 = \frac{V''}{A}, \text{ m/s} \quad (1-3)$$

$$\text{液相折算速度} \quad w'_0 = \frac{V'}{A}, \text{ m/s} \quad (1-4)$$

显然,折算速度必小于相应各相的速度,即:

$$w''_0 < w''; \quad w'_0 < w'$$

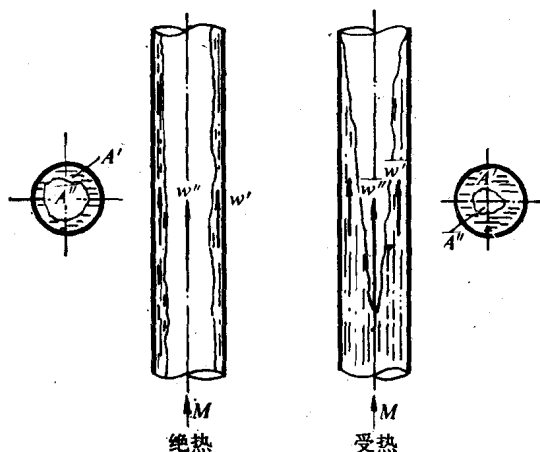


图1-2 上升两相流示意图

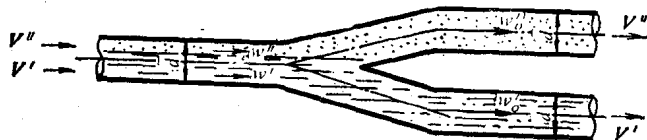


图1-3 折算速度示意图

三、两相混合物速度

两相混合物速度又称流量速度，它表示两相混合物在单位时间内流过截面的总容积与流通截面之比，即

$$w = \frac{V' + V''}{A}, \text{ m/s} \quad (1-5)$$

从折算速度的定义可知，

$$w = w'_0 + w''_0, \text{ m/s} \quad (1-6)$$

虽然混合物速度和折算速度都是实际上并不存在的假想速度，但引入这些参数将为两相流的计算和数据处理提供方便。

四、滑动比

一般情况下，在两相流中气速和液速是不相等的，两者的差别程度可用滑动比来表示，即

$$s = \frac{w''}{w'} \quad (1-7)$$

五、空隙率

空隙率又称为截面含气率或真实含气率，它表示两相混合物在任意流通截面中气相所占总截面的份额，其定义为

$$\varphi = \frac{A''}{A} \quad (1-8)$$

六、质量含气率

质量含气率又称为两相混合物的干度，它表示单位时间内流过某一流通截面的两相流总质量 M 中气相质量所占的份额，其定义为

$$x = \frac{M''}{M} = \frac{M''}{M' + M''} \quad (1-9)$$

式中 M'' 和 M' 分别表示气相和液相的质量流量 (kg/s)。

根据上述定义，假定两相混合物处于热力学平衡状态，按热平衡式可得干度的表达式为

$$x = \frac{i - i'_s}{r} \quad (1-10)$$

式中 i ——两相混合物的焓, J/kg;

i'_s ——液体在饱和温度下的焓, J/kg;

r ——汽化潜热, J/kg。

若按上式算得的干度值为负，这就意味着工质为过冷液；若 $x > 1$ ，一般表示工质成为过热蒸气。

七、容积含气率

它表示单位时间内流过某一流通截面的两相流总容积中气相所占的份额，即

$$\beta = \frac{V''}{V} = \frac{V''}{V' + V''} \quad (1-11)$$

以上介绍了三种含气率。为了更清楚地理解这三个参数意义，以下将讨论它们之间的联系和区别。

因:

$$V' = Aw'_0; V'' = Aw''_0; M' = \rho' Aw'_0; M'' = \rho'' Aw''_0$$

代入式 (1-11) 及式 (1-9) 后得:

$$\beta = \frac{w''_0}{w'_0 + w''_0} \quad (1-12)$$

$$x = \frac{\rho'' w''_0}{\rho' w'_0 + \rho'' w''_0} \quad (1-13)$$

合并以上二式即得质量含气率与容积含气率的关系式:

$$\beta = \frac{\frac{\rho'}{\rho''}}{\frac{1}{x} + \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)} \quad (1-14)$$

或

$$x = \frac{\frac{\rho''}{\rho'}}{\frac{1}{\beta} + \left(\frac{\rho''}{\rho'} - 1 \right)} \quad (1-15)$$

从上式可以看出, 对一定的工质, 当压力已知时便可很容易从已知的 x 或 β 值求得另一个含气率值。按上式绘成了 x 与 β 的关系曲线 (图 1-4)。从其中可以看出, β 随 x 的增大而增大, 但两者只在临界压力时才成正比。在其他压力下, 尤其是在低压下, 在低 x 区 β 增长极快, 例如在 20 巴压力下, $x = 0.1$ 时, β 即超过 0.9。这是因为在低压下, 蒸气比容比水大许多。

为了说明 β 与 φ 的区别, 先举一个简单的例子。在图 1-5 中, 设流入管内的气体容积流量与液体容积流量相同, 即 $V'' = V'$ 。在这种条件下, 若气相速度等于液相速度, 则各相所占的流通截面积必然相等, 即 $A'' = A'$, 因而 φ 和 β 都等于 0.5。可是实际上 $w'' > w'$, 故气相所占流通截面必然小于液相截面, 故 $\varphi < \beta$ 。

β 和 φ 的数学表达式可改写成:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{1 + \frac{V'}{V''}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{A' w'}{A'' w''}} \end{aligned}$$

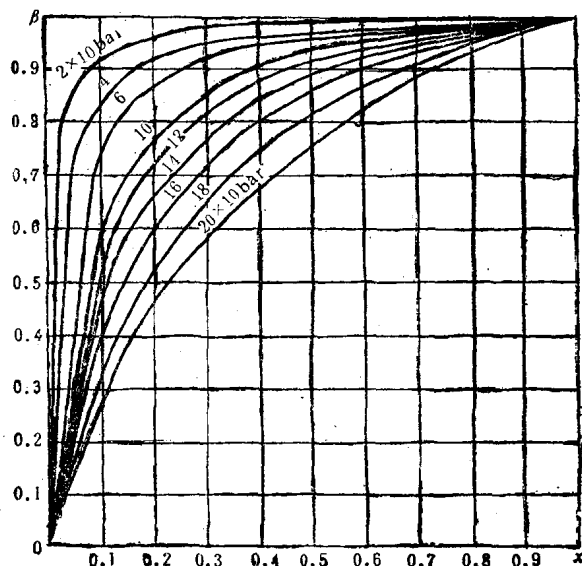


图 1-4 x 与 β 的关系

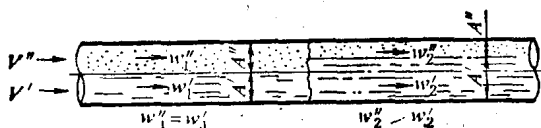


图 1-5

$$\varphi = \frac{A''}{A' + A''} = \frac{1}{1 + \frac{A'}{A''}}$$

从上式可看出：当 $w' = w''$ 时， $\varphi = \beta$ ；当 $w'' > w'$ 时（对于上升流及水平流）， $\varphi < \beta$ ；当 $w'' < w'$ 时（对于下降流）， $\varphi > \beta$ 。气相与液相间存在相对运动的主要原因是浮力和由于压降引起的气相膨胀。试验研究〔1·13〕表明，只要液相速度不太低，在相同条件下水平管中 φ 值与上升管中的 φ 值大致相同。这就说明，压降引起的气相容积变化起着相当显著的作用。

合并上述两式即得 φ 与 β 的关系式为

$$\varphi = \frac{1}{1 + s \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)} \quad (1-16)$$

由于 φ 与 β 的关系式中包含了两相滑动比 s ，而影响 s 的因素很多而且复杂，因此已知 β 或 x 值求取 φ 值是比较困难的。

八、两相混合物的密度

两相介质的密度有两种表示法：

1. 流动密度

它表示单位时间内流过截面的两相混合物的质量与容积之比，即

$$\rho_o = \frac{M}{V} \quad (1-17)$$

因 $M = M' + M'' = \rho' V' + \rho'' V''$ ，故

$$\rho_o = \beta \rho'' + (1 - \beta) \rho' \quad (1-18)$$

2. 真实密度

设在管道某一截面上取一微段 Δl ，则此截面上两相介质的密度应为此微段中两相介质的质量与其容积之比，即

$$\rho = \frac{\rho'' \varphi A \Delta l + \rho' (1 - \varphi) A \Delta l}{A \Delta l}$$

整理后得

$$\rho = \varphi \rho'' + (1 - \varphi) \rho' \quad (1-19)$$

当两相间无相对速度时，即当 $w' = w''$ 时，则 $\varphi = \beta$ ，在这种条件下，流动密度才等于真实密度。

习 题

1. 试推导用 φ 和 x 表示的滑动比表达式。

答： $s = \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi} \right) \left(\frac{x}{1 - x} \right) \left(\frac{v''}{v'} \right)$

2. 有一内径为 38.5 mm 的垂直上升蒸发管，该管段进口为饱和水，进口水速 $w_o = 1 \text{ m/s}$ 。设此管段沿长度均匀受热，其总吸热量为 75366 kJ/kg，管内工质的绝对压力为 66 bar，试求该蒸发管段出口和平均的蒸气折算流速和汽水混合物流速。

答： $w''_o = 0.356 \text{ m/s}$ ； $\bar{w}''_o = 0.178 \text{ m/s}$

$w = 1.34 \text{ m/s}$ ； $\bar{w} = 1.17 \text{ m/s}$

3. 根据上题的数据, 试求该管段出口和平均的汽水混合物干度和容积含汽率。

答: $x_e = 1.56\%$; $\bar{x} = 0.78\%$

$\beta_e = 0.266$; $\bar{\beta} = 0.152$

4. 试证明: $x = \frac{\rho''}{\rho_0} \beta$

参 考 文 献

- [1.1] Young, W. J. "Dynamics of Gas Bubbles in Whole Blood and Plasma", 《Jol. of Biomechanics》, Vol. 4. pp. 119~125, 1971.
- [1.2] Young, W. J., et al., "Experimental Study of the Dissolution of Gas Bubbles in Whole Blood and Plasma-I. Stationary Bubbles", 《Jol. of Biomechanics》, Vol. 4. pp. 275~281, 1971.
- [1.3] Shima, A., et al., "The Behaviour of Gas Bubbles in the Casson Fluid", 《Jol. of Applied Mechanics. Trans. ASME》, No. 1, 1978.
- [1.4] Кутателадзе, С. С. и Стрыкович, М. А., "Гидравлика Газо-жидкостных Систем", ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1958.
- [1.5] 汤烺孙, "沸腾传热和两相流动"(王孟浩、徐仁德译), 机械工业出版社, 1980.
- [1.6] Wallis, G. B., "One-dimentional Two-phase Flow" McGraw Hill Book Co., 1969.
- [1.7] 赤川浩爾, "気液二相流", コロナ社, 1974.
- [1.8] Hewitt, G. F., "Annular Two-phase Flow", Pergamon Press, 1974.
- [1.9] Govier, G. W., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Van Nostrand Reinhold Co. 1972.
- [1.10] Butterworth, D. and Hewitt G. F., "Two-phase Flow and Heat Transfer", Oxford Univ. Press. 1978.
- [1.11] Ginoux, J. J., "Two-phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems", Hemisphere Publishing Corporation, 1978.
- [1.12] Collier, J. G., "Convective Boiling and Condensation", McGRAW-Hill Book Co. 1972.
- [1.13] Дворина, Г. М., "К Вопросу об Относительном Движении Паровой Фазы Адиабатическом Течении Двухфазного Потoka В Трубах", 《Теплоэнергетика》, No. 6. 1965.

第二章 两相流在管内的流型

§ 2.1 流型的分类

对单相流体, 为了研究其流动特性, 把流型分成层流和湍流。同样对于两相流, 流型也是影响其流动及传热特性的重要因素, 不过由于两相流中存在气液界面而使问题大为复杂化。一般情况下, 表面张力效应力图使气泡呈球形, 但当气泡增大时, 由于管壁的限制和气泡头尾的压差而使气泡变形。因为影响流型的因素很多而复杂, 目前所用的测定方法, 如直接观察、高速摄影、射线测量、压差波动特性等都不能精确地区别出各种流型, 自然也很难有一个对流型的统一分类, 甚至流型的名称也不尽统一。以下仅就比较通用的各种流型作一介绍。

一、垂直上升绝热两相流的流型 (图 2-1)

1. 泡状流动

这种流型的特点是大量小气泡散布在水中, 在管子中部气泡的密度较大。

2. 弹状流动

当两相流中含气量增大时, 小气泡结合成大气泡, 而当气泡直径增大到接近管子内径时便形成弹形大气泡。这时气弹之间为含有小气泡的水层。弹状流动在垂直上升流中有时也称为塞状流动。

3. 混块状流动

当管内气速增大时, 大气泡发生分裂, 而四周的水膜发生忽上忽下的波动。但管径很小时, 液膜波动可能不出现。

4. 环状流动

当含气量进一步增大时, 大气泡首尾相接而形成气柱, 这时管子中部为夹带水滴的气流, 而液膜波动消失并形成随气流向上升流动的水环。

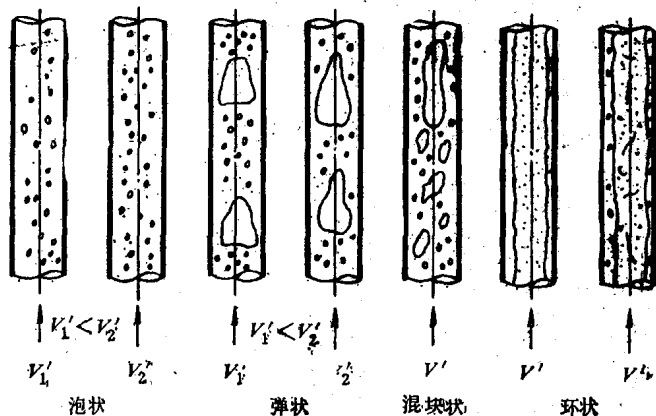


图2-1 垂直上升管中的流型

二、水平管中绝热两相流的流型 (图 2-2)

从图 2-2 可以看出, 水平管内两相流动的流型基本上同上升管内相同, 两者的区别主要在于: 在水平管中由于重力的影响, 气相沿管子横截面的分布是不对称的, 管子上部的含气量较大; 另一特点是在水平管中可能出现气水分层流动。但当液相速度很大时, 重力对流型的影响显著减小, 则气相分布变得比较对称, 也就是更接近垂直管中的流型。

三、受热管中的流型

当管子受热时, 流型沿管长不断变化。图 2-3 所示, 为均匀受热的垂直管中上升流的流

型演变过程。图中所示的干度 x 是按热平衡求得的。液体进入管子时的温度低于该处压力下的饱和温度 t_s 。沿着流向，液体逐渐被加热到饱和温度 t_s ($x = 0$)。在 $x < 0$ 的区域内的某个位置上，虽然流体平均温度低于饱和温度，但因存在径向温度梯度，管子内壁温度可能超过饱和温度而使近壁的液体沸腾。因此，泡状流动可能存在于 $x < 0$ 和 $x > 0$ 的区域。沿流向，含气量不断增加，气泡逐渐合并，流型则依次从泡状过渡到弹状和环状。环状液膜由于不断蒸发和被中心气流带走液滴而逐渐减薄，最后完全消失。这时便进入了气流夹带液滴的雾状流动。但在不受热的管子中，液体多少都会附于管壁，故不会出现真正的雾状流动。

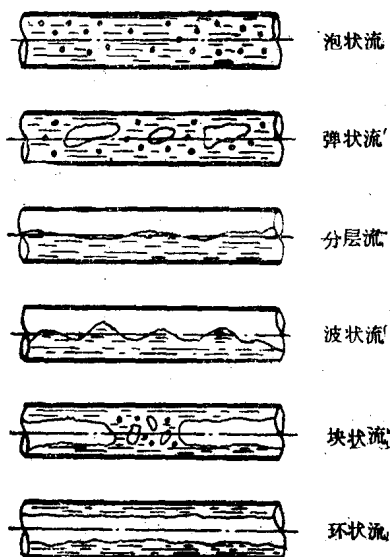


图2-2 水平管中的流型

因为在受热情况下流型的演变需要一定的时间和距离以达到流体动力平衡，而这与热负荷、压力等因素有很大关系。因此，上述各种流型所占的区间，在不同热负荷和压力下，可能延伸或缩短，例如在高压下，弹状流动就很短，甚至不出现。

图 2-4 为水平蒸发管内的流型演变过程。其特点除了气相分布不对称以外，还在波状流动区可能发生管子上部时而而被液体冲刷、时而干涸的流态，即管壁上部的间歇式干涸流态。

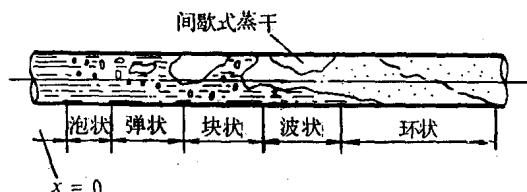


图2-4 水平蒸发管中的流型

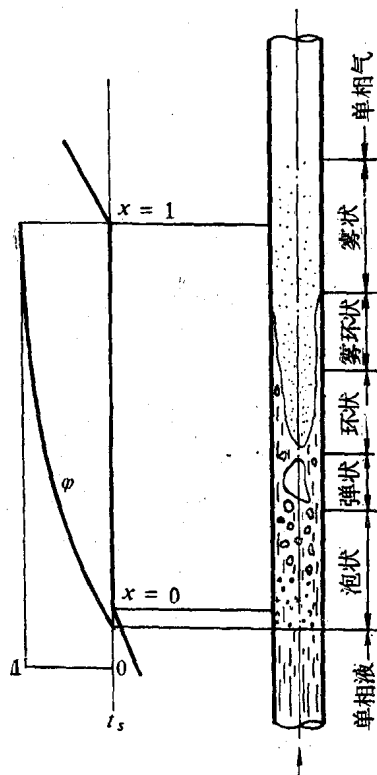


图2-3 直立蒸发管中的流型

§ 2.2 流 型 图

气液两相流的流型对其流动及传热特性有很大关系，所以，如何确定流型一直是两相流研究中的一个重要课题。近 30 年来，各国学者根据对流动机理的分析和试验提出了许多用来