

锅炉水动力计算

河南省电力勘测设计院 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

锅炉水动力计算

主 编 李 宏
副主编 韦迎旭



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了我国锅炉水动力计算的通用方法,并以锅炉水动力计算的手动计算为基础,同时还结合了计算机编程的特点进行讲解。通过学习本书中锅炉水动力学方面的基本理论与计算方法后,读者首先可以掌握采用手算的方法来计算锅炉水动力特性。再通过学习“水动力计算的电子计算机方法”,读者就可以结合自己的数学与编程基础实际情况,采用计算机来处理锅炉的水动力计算。

本书共分5章,主要内容包括:锅炉水动力学基础、管内流体压降的计算、自然循环蒸汽锅炉的水动力计算、热水锅炉自然循环水动力计算以及水动力计算的电子计算机方法。另外,为使广大读者使用起来更方便,本书还包括了与锅炉水动力计算密切相关的饱和水和饱和蒸汽性质表、未饱和水与过热水蒸气的热力性质、锅炉水动力计算程序流程图和管子压降计算流程4个附录。

本书可供从事水动力计算工作的工程技术人员使用,也可供大中专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉水动力计算/河南省电力勘测设计院编. —北京:中国电力出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-5083-9842-6

I. ①锅… II. ①河… III. ①锅炉水动力-计算 IV. ①TK221

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第224880号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年12月第一版 2009年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 7.125印张 117千字

印数0001—1000册 定价20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

锅炉是一种把煤炭、石油或者天然气等能源储藏的化学能转变为水或蒸汽的热能的重要设备。高温水和蒸汽的热能可以直接应用在生活和生产中，如空气调节、纺织、化工、造纸等领域，也可以再转换成其他形式的能量而加以利用，如电能、机械能等。随着水和蒸汽的热能应用范围的扩大，锅炉逐渐成为人类社会生产和生活各个领域不可缺少的动力机械。物质生产的飞速发展，能源的消耗量日益增加，人类社会就需要更多、更先进的能源转换设备，锅炉工业在国民经济中的作用和地位也就越来越重要。

锅炉计算一般包括锅炉热力计算、锅炉水动力计算以及锅炉强度校核等项目。本书就锅炉水动力计算这部分内容做了一些阐述。

本书开始部分介绍了锅炉水动力计算的一些基础知识，其次详细描述了管内单相与汽液两相流体流动时的压降计算，再次以本文前半部的内容为基础，对自然循环蒸汽锅炉和自然循环热水锅炉的计算方法做了阐述，文中最后一章考虑到随着目前电子计算机的使用日益普及，以及锅炉水动力计算采用图解法时准确性差且费时间等诸多因素，详细介绍了利用计算机计算编写程序来实现水动力计算的方法。

本书由河南省电力勘测设计院李宏同志任主编、韦迎旭同志任副主编，第一章、第二章由陈宝同志编写，第三章、第四章由金记英同志编写，第五章由韦迎旭同志编写并负责全书统稿和校核。

由于编写人员的水平所限，书中难免存有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 11 月

目 录

前言

第一章 锅炉水动力学基础	1
第一节 锅炉水力系统基本术语	1
第二节 流动特性参数	2
第三节 两相流体在管内的流型	5
第四节 管内流体的基本守恒方程	9
第二章 管内流体压降的计算	14
第一节 单相流体压降的计算	14
第二节 两相流体压降的计算	20
第三节 内螺纹管摩擦压降的计算	26
第三章 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算	28
第一节 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算原理	28
第二节 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算	32
第三节 自然循环蒸汽锅炉循环可靠性校验	40
第四章 热水锅炉自然循环水动力计算	49
第一节 热水锅炉介绍	49
第二节 热水锅炉循环回路的循环倍率以及管内工质温度	51
第三节 自然循环热水锅炉水动力计算	54
第四节 过冷沸腾	58
第五章 水动力计算的电子计算机方法	60

第一节	弦截法计算模型	60
第二节	求解非线性方程组计算模型	61
第三节	水与水蒸气拟合公式	65
第四节	IAPWS-IF97 的补充方程	74
第五节	IAPWS-IF97 编写示例	82
附录 A	饱和水和饱和蒸汽性质表	95
附录 B	未饱和水与过热水蒸汽的热力性质	98
附录 C	锅炉水动力计算程序流程图	105
附录 D	管子压降计算流程图	106
参考文献		107

锅炉水动力学基础

第一节 锅炉水力系统基本术语

锅炉水动力计算的任务是计算锅炉受热管内的水动力特性及流动阻力，通过计算流动阻力从而确定泵的扬程。一般情况来讲，锅炉的水动力特性要保证受热管内流动介质的流动稳定，并能良好地冷却管子的金属，从而避免传热恶化、停滞或者倒流的情况，这是确保锅炉安全的条件之一。流动阻力是否合理，是衡量结构设计的指标之一，随着锅炉容量的增大及参数的提高，锅炉水动力计算尤其重要。

一、锅炉的循环方式

锅炉的蒸发系统可以分为自然循环、直流锅炉和辅助循环三种。

自然循环是靠下降管和上升管之间的密度差提供动力，从而推动水循环的蒸发系统。直流锅炉是靠水泵扬程使水和蒸汽在管内进行一次性强制流动的蒸发系统。辅助循环是在下降管和上升管之间串接再循环泵进行强制流动的蒸发系统。

二、锅炉的水力系统

电站锅炉水力系统包括加热系统、蒸发系统、过热系统和启动辅助系统四个部分。

加热系统和过热系统由连接管道、集箱和集箱间的平行连接管束（受热面）组成。在过热系统中还包含减温装置。

三、循环回路

在自然循环锅炉中，由下降管及上升管等组成的闭合蒸发系统称为回路。回路分为简单回路和复杂回路，具体区分将在以后章节中阐述。

四、管屏（管束）

在同一个进口及出口集箱间连接的辐射受热面称为管屏，连接的对流受热

面称为管束。根据每个管屏或管束中平行连接各管的结构、位置、介质的物理状态和热负荷大小等条件可划分为不同管组。

五、管屏内的区段

管屏内将水加热到饱和温度的管段称为管屏的加热水段，其相应的高度和长度称为加热水段的高度和长度。

管屏内的汽水混合物流动的区段称为含汽段，其相应的高度和长度称为含汽段的高度和长度。

管屏内从集箱出口到炉膛内辐射受热区的这一管段称为受热前管段，其相应的高度和长度称为受热前管段的高度和长度。从炉膛出来到进入集箱的管段称为受热后管段，其相应的高度和长度称为受热后管段的高度和长度。

六、水动力特性

进出口集箱间所连接管子两端的压降和流量的关系称为水动力特性，以图形表示的上述关系称为水动力特性曲线。对应于任一压降只有一个流量的水动力特性称为单值性水动力特性。对应于一个压降可能有多个流量的水动力特性称为多值性水动力特性曲线。

第二节 流动特性参数

在对锅炉进行水动力计算以前，首先要先了解流体流动的各种特性参数。对于单相流体（水或蒸汽）的流动参数，一般都可以用仪器测量实际参数。对于气体和液体具有相对运动的两相流体，其流动特性参数不但包含实际参数，而且还有抽象的虚拟参数，如折算蒸汽速度等。

下面分别叙述各流动特性参数的定义及相互关系。

一、质量流量和质量流速

质量流量等于单位时间内通过管道截面面积工质的总质量。由质量流量的定义可知，若管道内工质为单相水或蒸汽，则管内工质的质量流量等于水或蒸汽的质量流量。若管道内工质为汽液混合物，则管内工质的质量流量 G_h 等于水和蒸汽的质量流量之和

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

式中 G' 、 G'' ——汽水混合物中饱和水和饱和蒸汽的质量流量，kg/s。

通过单位截面面积的质量流量称为工质的质量流速 ρW ，即

$$\rho W = \frac{G}{A} \quad (1-2)$$

式中 ρW ——工质的质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

A ——管子横截面面积, m^2 ;

G ——管内工质的质量流量, kg/s 。

二、折算速度

汽水混合物中将水或蒸汽的容积流量折算至管子全部截面面积的流速, 分别称为水的折算速度 W'_0 和蒸汽折算速度 W''_0

$$W'_0 = \frac{V'}{A} = \frac{G'v'}{A} \quad (1-3)$$

$$W''_0 = \frac{V''}{A} = \frac{G''v''}{A} \quad (1-4)$$

式中 W'_0 、 W''_0 ——分别为水和蒸汽的折算速度, m/s ;

V' 、 V'' ——分别为水和蒸汽的容积流量, m^3/s ;

v' 、 v'' ——分别为饱和水及饱和蒸汽的比容, m^3/kg 。

水的折算速度和蒸汽的折算速度都为虚拟的流动参数, 在实际流动中并不真正存在, 此外, 对于不受热管管内的水和蒸汽的折算速度不发生变化, 对于受热管内的水和蒸汽的折算速度沿流动方向减小和变大。

由此汽水混合物的质量流速 $\rho_h W_h$ 可以表示为

$$\rho_h W_h = \frac{G_h}{A} = \frac{G' + G''}{A} = \rho' W'_0 + \rho'' W''_0 \quad (1-5)$$

式中 ρ' 、 ρ'' ——分别为汽水混合物中饱和水和饱和蒸汽的密度, kg/m^3 。

三、循环速度

当水在受热管加热至饱和状态时的流速称为循环流速 W_0 , 计算式如下

$$W_0 = \frac{Gv'}{A} \quad (1-6)$$

循环速度是锅炉水动力学中的一个术语。上升管中的循环速度可近似地等于上升管入口的水速; 当循环回路中有上联箱时, 则蒸汽引出管中的循环速度等于循环流量与饱和水比容的乘积除以蒸汽引出管的总横截面面积 (同一循环回路中所有蒸汽引出管的横截面面积之和)。对于受热的蒸发管, 如管径沿管长不变, 在稳定流动下, 沿此管长此循环速度也是不变的。

四、质量含汽率和容积含汽率

汽水混合物中, 蒸汽的质量流量与汽水混合物的质量流量之比, 称为质量含汽率 x , 又称为汽水混合物的干度, 计算式如下

$$x = \frac{G''}{G_h} = \frac{\rho'' W''_0 A}{\rho_h W_h A} = \frac{\rho'' W''_0}{\rho_h W_h} \quad (1-7)$$

容积含汽率为汽水混合物中所占的容积份额,亦即蒸汽的容积流量与汽水混合物容积流量之比,称为容积含汽率 β ,计算式如下

$$\beta = \frac{V''}{V_h} = \frac{W''_0 A}{W''_0 A + W'_0 A} = \frac{W''_0}{W''_0 + W'_0} \quad (1-8)$$

式中 V_h ——汽水混合物体积流量, m^3/s 。

质量含汽率和容积含汽率可以相互转换,其关系式为

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \quad (1-9)$$

五、截面含汽率

对于管道任一截面上,蒸汽所占的截面积 A'' 与整个管道横截面 A 之比,称为截面含汽率 φ ,即

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

同理,水所占的截面比为

$$\frac{A'}{A} = \frac{A - A''}{A} = 1 - \varphi \quad (1-11)$$

截面含汽率又称为真实容积含汽率,它反映的是存在于管内空间中的汽水混合物的蒸汽含率。

六、真实速度、相对速度和滑移比

若已知蒸汽和水的折算速度以及截面含汽率,可以求得蒸汽和水的真实速度

$$W'' = \frac{W''_0}{\varphi} \quad (1-12)$$

$$W' = \frac{W'_0}{1 - \varphi} \quad (1-13)$$

汽水两相在管内流动时,蒸汽与水的实际流速是不相同的,两者的速度之差,称为相对速度或滑移速度 W_{xd} ,即

$$W_{\text{xd}} = W'' - W' \quad (1-14)$$

蒸汽的真实流速与水的真实流速之比,称为滑移比 S

$$S = \frac{W''}{W'} \quad (1-15)$$

七、汽水混合物的密度、比容和速度

混合流体密度是由汽水混合物的质量流量和容积流量求得的汽水混合物密

度,即

$$\begin{aligned}\rho_h &= \frac{G_h}{V_h} = \frac{G'' + G'}{V_h} = \frac{V''\rho'' + V'\rho'}{V_h} = \rho''\beta + \rho'(1-\beta) \\ &= \rho' - \beta(\rho' - \rho'')\end{aligned}\quad (1-16)$$

将式(1-9)代入式(1-16)则有

$$\rho_h = \frac{\rho'}{1 + x\left(\frac{\rho''}{\rho'} - 1\right)} \quad (1-17)$$

汽水混合物的比容 v_h (kg/m^3) 为混合流体密度的倒数,即

$$v_h = \frac{1}{\rho_h} = \frac{1 + x\left(\frac{\rho''}{\rho'} - 1\right)}{\rho'} = v' + x(v'' - v') \quad (1-18)$$

当管径不变、流动稳定时,汽水混合物速度 W_h (m/s) 的计算公式如下

$$W_h = W_0 \left[1 + x\left(\frac{\rho''}{\rho'} - 1\right) \right] \quad (1-19)$$

第三节 两相流体在管内的流型

当两相流体在通道中同时流动时,每相可能有不同的几何形状,一相可能是连续的,但另一相可能是不连续(离散)的,两相也可能以相互分离的工况流动等。这些不同的流体几何形状称为流型。

汽液两相流体和单相流体相比,多出一个相和相间界面,因此,流场组成从宏观方面看包含汽相、液相和汽液界面三部分。界面对两相流的流动特性和传热特性有很大的影响。对于工程中的两相流动问题,为了研究流体的流动特性,把两相流体的流型分为层流和湍流。两相流体的流型是影响其流动和传热的重要因素,它是研究两相流动的重要课题。目前对于流型的研究主要采取试验的方法,主要有直接观察、高速摄影、射线测量、压差波动特性等方法。由于影响两相流体流型的因素多且复杂,目前所用的测定方法,都不能精确地区别出各种流型,至今尚无一个统一的分类,各流型的名称也不统一。下面仅就比较通用的几种流型做一简单介绍。

一、绝热上升管中的流型

1. 泡状流动 [图 1-1 (a)]

离散状气泡分散在连续的流体介质中,当气泡直径较小时,气泡呈球形,当气泡较大时,就偏离球状了。

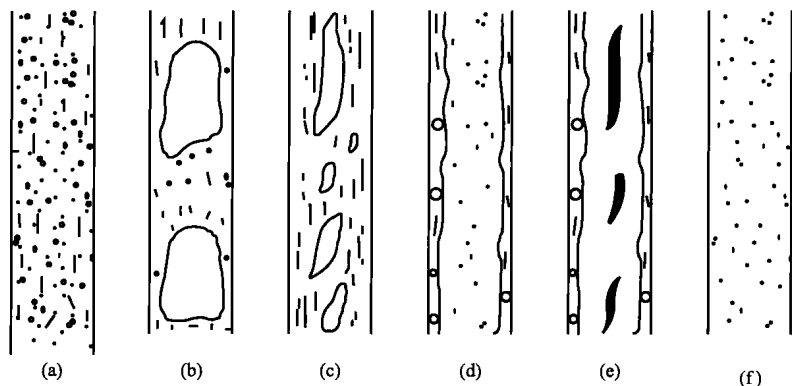


图 1-1 绝热上升管中的流型

(a) 泡状流动；(b) 弹状流动；(c) 团块状流动；(d) 环状流动；
(e) 细束环状流动；(f) 雾状流动

2. 弹状流动 [图 1-1 (b)]

当气泡数量增加时，气泡间会发生碰撞和合并。有时气泡的直径最终会接近管子的内径，子弹状气泡随之形成。汽弹之间仍为液体并有细小气泡。汽弹与管子之间有一薄层液膜，当汽弹向上流动时这层液膜向下流动。但按全部液体平均而言，流动还是向上的。

3. 团块状流动 [图 1-1 (c)]

当汽相流量增加时，汽弹的流速增加，汽弹变长，最后被破碎为汽体团块，形成一种不稳定的工况。在大口径管子中，可能发生液体的上下波动。在小管子中，这种波动不会发生，但随着汽相流量的增加，弹状流动将向环状工况过渡。

4. 环状流动 [图 1-1 (d)]

这是一种分离状流动工况。液体以液膜状在管子壁面上流动；汽体则集中在管子中心部位，形成比液膜流得更快的汽柱。通常在汽柱中还携带有部分细小液滴（输送液滴）。有些作者把环状流动称为离散环状，以区别于细束环状工况。

5. 细束环状流动 [图 1-1 (e)]

当液相流量增加时，汽柱中液滴的数量也增加，并发生液滴的合并而形成液体的束状。这种工况发生在质量通量（质量流速）很高的场合。

6. 雾状流动 [图 1-1 (f)]

汽体含量较大时发生环状流动向雾状工况的转变。在雾状流动中，汽相是

连续相，壁面上的液膜已经消失，离散状液滴分布在汽相之中。

对于加热蒸发管中两相流型的变化如图 1-2 所示，低于饱和温度的液体以固定的质量流率进入管子，当热流量（热强度）增加时，蒸发始点越来越靠近管子进口端。当热流量很小时，管子出口可能仍未产生蒸汽。当热流量稍微增加时，管子出口端的壁面上将产生少量蒸汽，但当这些蒸汽进入主液体后又被凝结。热流量较大时，管子出口端壁面上所产生的蒸汽不再凝结，而且由于汽泡数量增多，小汽泡将合并成汽弹。泡状流动向弹状流动的转变，取决于小汽泡间的相互碰撞和由此而引起的汽泡合并。

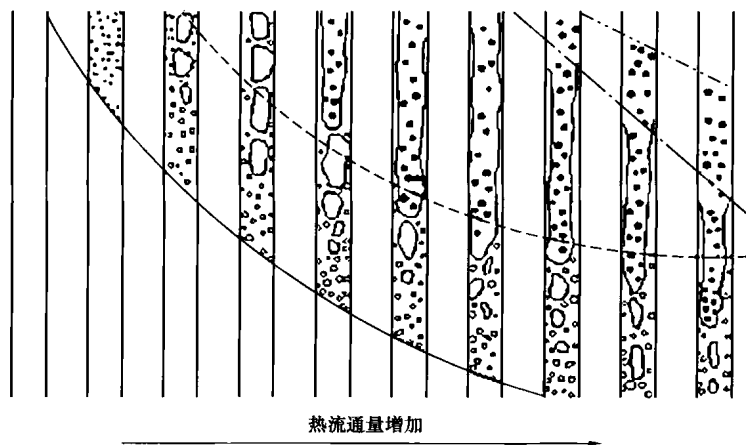


图 1-2 加热蒸发管中两相流型的变化

—— 沸腾开始 - - - 蒸发
- - - 沸腾结束 - · - · - 过热蒸汽分界线

当蒸汽含量进一步增加时，汽弹连成汽柱，形成环状流动，汽柱和液膜之间形成分界面。当热流量更大时，沿流体的流动方向，液膜的厚度越来越薄，液膜的热阻减小，壁温下降，壁面上的蒸发将受到抑制。热流将通过液膜的导热传递到汽液分界面，并在分界面上使液体蒸发。在环状流动中，液膜中的液体由于蒸发和汽流的输送而越来越少，最终导致液膜的干涸，壁温则跃升。

二、绝热水平管中的流型

对于水平管中的两相流体流型与垂直上升管中的流型基本相同，但由于重力作用的影响，水平管中的两相流体的流型要更为复杂一些。图 1-3 给出了水平管中两相流体的流动工况。

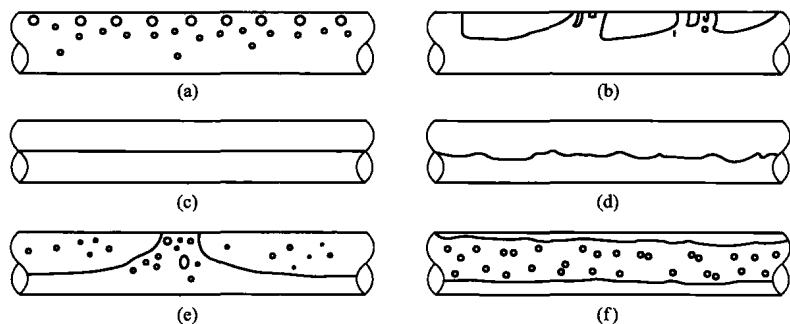


图 1-3 绝热水平管中的流型

(a) 泡状流动；(b) 塞状流动；(c) 分层流动；(d) 波状流动；
(e) 弹状流动；(f) 环状流动

1. 泡状流动 [图 1-3 (a)]

在水平管中气泡多在管子上半部运动。

2. 塞状流动 [图 1-3 (b)]

这种流动是在液相流率较泡状流动时小但又比分层流动时大的情况下发生的，这种情况下小气泡得以合并成大气泡（子弹状），在靠近管子顶部流动。

3. 分层流动 [图 1-3 (c)]

当液相和汽相流率都很低时，重力分离进行得很彻底，液相在管子下部、汽相在管子上部平滑地流动。

4. 波状流动 [图 1-3 (d)]

在分层流动中，当汽相流率增加时，在汽液分界面上会形成波浪。

5. 弹状流动 [图 1-3 (e)]

这种流动在塞状流动的汽相流率或波状流动的液相流率进一步增加时发生。这时，波峰会达到管子上部内表面。在弹状流动中，液相仍然是连续的，但其中夹带大量气泡。

6. 环状流动 [图 1-3 (f)]

当汽相流率很高、液相流率很小时，将发生环状流动。由于重力的影响，管子下半部液膜较上半部厚得多。在管子中心部位的汽柱中，常常夹带着微细的液滴。

对于水平加热蒸发管中流型的变化如图 1-4 所示，低于饱和温度的液体以较低的流速进入管子。由于工质的质量通量较低，管子上部发生周期性干涸，并导致壁温跃升。

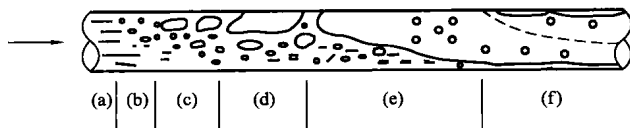


图 1-4 水平加热蒸发管中流型的变化

(a) 单相流动；(b) 泡状流动；(c) 塞状流动；(d) 弹状流动；

(e) 波状流动；(f) 环状流动

第四节 管内流体的基本守恒方程

对管内工质的力学分析，目前常用的方法有两种：一种为均相模型，即将两相流体看做均质的单相流体，这是一种最简单的处理方法；另一种为分相模型，此模型将两相流体分隔开，并对每一相流体写出一组基本方程式，或者将两相的方程合并在一起。

对于管内流体的基本方程，无论采用均相模型还是分相模型，在分析时首先将管道内工质的流动作为一元流动处理，无论是加热管还是不加热管，在建立基本方程时，只考虑工质在流动方向上流速和压力的变化，而不考虑径向的变化，即认为在流通截面上各点的流速和压力都相同。其次在蒸发受热面的水动力计算中，不考虑工质因流动产生的压降对工质（蒸汽或水）比容的影响。在锅炉中，循环系统的绝对压力比流动压降大得多，所以这样简化对计算结果影响不大。最后在计算管段内，假设沿管长热负荷均匀，即认为工质的吸热量与管长成正比，所以工质的焓和汽水混合物的质量含汽率也与管长成正比。

一、质量守恒方程（又称连续性方程）

当流体沿管道流动时，由于管道壁面无流体流进或流出，根据质量守恒定律，当稳定流动时，通过管道上某两个界面 f_1 和 f_2 的流体的质量流量相等，即

$$G = \rho_1 W_1 f_1 = \rho_2 W_2 f_2 = \text{const} \quad (1-20)$$

如沿管长截面面积不变，则有

$$\rho W = \text{const} \quad (1-21)$$

对于两相流体，流体的总质量流量等于各质量流量之和

$$\begin{aligned} G &= G' + G'' = f' \rho' W' + f'' \rho'' W'' \\ f' \rho' W' + f'' \rho'' W'' &= G(1-x) + Gx \end{aligned} \quad (1-22)$$

如沿管长截面不变时, 则有

$$\rho W = \rho' W'_0 + \rho'' W''_0 = \text{const} \quad (1-23)$$

$$\rho' \frac{dW'_0}{dl} + \rho'' \frac{dW''_0}{dl} = 0 \quad (1-24)$$

两相之间有传质过程时的质量守恒方程式为: 汽量的增多值等于水量的减少值, 即

$$dG'' = -dG' \quad (1-25)$$

或

$$\frac{dG''}{dl} = -\frac{dG'}{dl} \quad (1-26)$$

二、动量守恒方程式

如图 1-5 所示, 对于单相流体或者采用均相模型分析汽水两相流体时, 作用在微元流体上的力有: 微元前后的压力 p 、 $p+dp$ 、重力和摩擦切应力。

根据作用在流体上的力等于流体质量的动量变化率 (每秒的动量变化), 可以写出动量守恒方程式。

微元流体的动量变化率为 $G(W+dW) - GW$, 所以动量守恒方程式为

$$pf - (p+dp)f - \tau\pi Ddl - \rho g f dl \sin\theta = GdW \quad (1-27)$$

式中 G ——工质的质量流量, kg/s;

p ——压力, Pa;

τ ——摩擦切应力, Pa;

f ——管子内截面面积, m^2 ;

D ——管子内径, m;

ρ ——工质的密度, kg/m^3 。

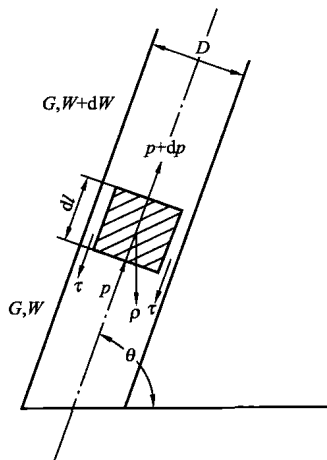


图 1-5 单相流体或均相分析
时管内工质受力分析

式 (1-27) 两端同除以 f , 并且将 $f = \pi D^2/4$ 、 $\tau = \frac{\lambda}{4} \frac{W^2}{2} \rho$ 代入式 (1-27),

经整理得单相流体和均相流体的动量守恒方程式为

$$-dp = \lambda \frac{dl}{D} \frac{W^2}{2} \rho + \rho g dl \sin\theta + \rho W dW \quad (1-28)$$

如图 1-6 所示, 对于管径不变时应用分相模型对管内工质进行受力分析。对于汽相, 作用于微元管段内汽相所受的力有: 压力、重力、汽与管子内壁之间的摩擦切应力以及汽、液相互作用力。由于汽液两相之间存在相对速度, 且

向上流动时汽速大于水速，所以在两相分界面上汽相还受到液相的摩擦力 S ，它阻碍汽相流动，所以此力的方向与流动方向相反。

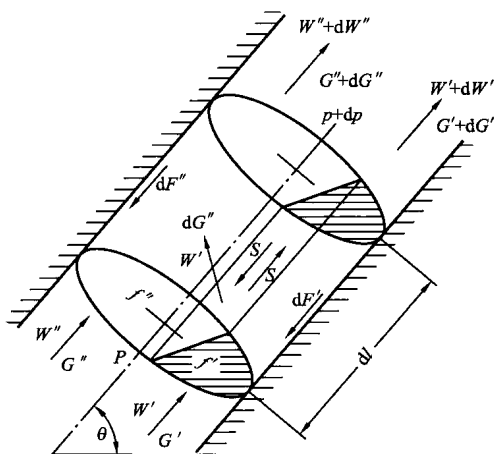


图 1-6 双相流体管内工质受力分析

微元管段内汽相的动量变化率应考虑两相之间有质量交换，所以汽相的动量守恒方程式为

$$\begin{aligned} & pf'' - (p + dp)f'' - dF'' - S - \rho'' gf'' dl \sin \theta \\ &= (G'' + dG'')(W'' + dW'') - (G''W'' + dG''W') \end{aligned} \quad (1-29)$$

式中 dF'' ——汽相与管壁接触处用于克服汽与管壁的摩擦力，N；

S ——汽相用于克服在汽液分界面上与液相摩擦的力，N；

f'' ——汽相在管内所占横截面面积， m^2 ；

G'' ——汽相在微元管段入口处的质量流量，kg/s。

若将 $dG''dW''$ 项略去不计，则式 (1-29) 可简化为

$$\begin{aligned} & -dpf'' - dF'' - S - \rho'' gf'' dl \sin \theta \\ &= G''dW'' + dG''W'' - dG''W' \end{aligned} \quad (1-30)$$

同理，液相的动量守恒方程式为

$$\begin{aligned} & pf' - (p + dp)f' - dF' + S - \rho' gf' dl \sin \theta \\ &= (G' + dG')(W' + dW') + dG''W' - G'W' \end{aligned} \quad (1-31)$$

式中 f' ——液相在管内所占横截面面积， m^2 ；

G' ——液相在微元管段入口处的质量流量，kg/s。

将 $dG'dW'$ 项略去不计，且将 $dG'' = -dG'$ 代入式 (1-31) 则得

$$-dpf' - dF' + S - \rho' gf' dl \sin \theta = G'dW' \quad (1-32)$$