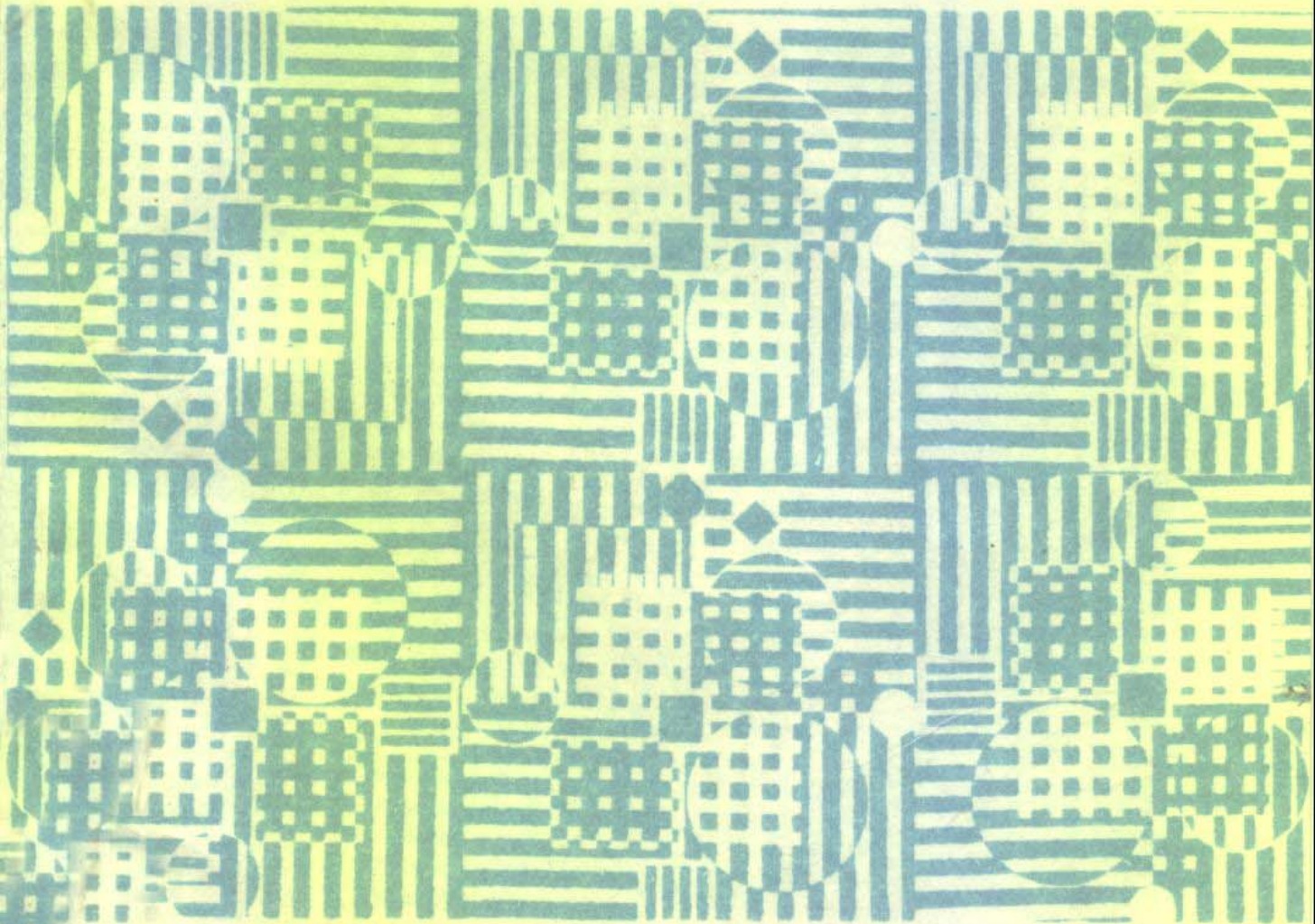


工业锅炉丛书

锅炉水动力学及锅内设备

鲍亦龄 陆慧林 编著



哈尔滨工业大学出版社

工业锅炉丛书

锅炉水动力学及锅内设备

鲍亦龄 陆慧林 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了锅炉水动力学方面的基本理论与计算方法。主要包括：锅炉水动力学基础；管内单相与汽液两相流体流动时压降的计算；自然循环蒸汽锅炉的水动力计算、循环故障及其校验；自然循环和强制循环热水锅炉的水动力问题及计算；不稳定工况对水循环的影响；蒸汽的净化等。

本书特点为：以工业锅炉为主，以实用为前提，主要介绍我国长期通用的水动力计算方法；在自然循环热水锅炉的水动力计算方法和锅内某些主要装置的设计中，还写进了“六、五”国家重点攻关项目的最新科研成果。

本书可作为高等院校大专班、业余大学、电视大学等锅炉或热能工程专业的教材；也可作为工业锅炉制造厂、锅炉安全监察部门的工程技术人员和管理人员的参考书。

工业锅炉丛书

锅炉水动力学及锅内设备

Guolu Shuidonglixue ji Guonei She bei

鲍亦龄 陆慧林 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨市新宇打字社排版

黑龙江新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 254 千字

1996年3月第2版 1996年3月第2次印刷

印数 5001—10 000

ISBN 7-5603-0075-8/TK·7 定价：11.00 元



前 言

锅炉是重要的能源转换设备。据不完全统计,我国现有工业锅炉三十万台左右,经两部定点生产工业蒸汽锅炉的厂家共 202 家,经各省定点生产热水锅炉的厂家约 500 家。这些厂家急需补充锅炉专业毕业的大专、中专毕业生,与此相应,一些院校和省市教委相继开办了工业锅炉(或热能工程)大专班、业余大学和电视大学锅炉班,因此,编写一套适用于工业锅炉专业的大专教材,已成为当务之急,另外,在编写时也考虑了提高现有工业锅炉技术人员和管理干部专业知识水平的需要。

这套丛书的内容以锅炉基本理论和应用技术为主,同时介绍了国内外工业锅炉的发展远景,并提供工业锅炉设计和运行所需要的数据。

全部丛书分以下诸册陆续出版:

锅炉燃烧技术及设备;

锅炉结构与设计;

锅炉制造工艺与检验;

锅炉水动力学及锅内设备;

锅炉辅助设备;

锅炉热工测试技术;

锅炉自动调节;

流体传输设备与运行。

本丛书可作为工业锅炉(或热能工程)大专、中专,业余大学和电视大学锅炉班的教材,也可供工业企业从事热工、锅炉和热能工程专业的工程技术人员参考。

本丛书由哈尔滨工业大学热能工程(原锅炉)教研室编写。由陈崇枢、秦裕混、杨励丹、范柏樟和李之光等同志组成编委会,负责丛书的审校工作。

《锅炉水动力学及锅内设备》是这套丛书的第四分册。锅炉本身的主要部件、蒸发受热面、过热器、省煤器、锅筒及其内部装置等设计得是否正确合理,无不与锅内水动力学和锅内设备有密切关系。因此,本书内容是正确合理地设计锅炉、确保锅炉长期安全、经济运行所必须具备的专业知识。同时对换热器,蒸发器、管道等设计也都有参考价值。

本书共分六章,第一、二、三、五、六章由鲍亦龄编写;第四章由陆慧林编写;全书由杨励丹审定。

工业锅炉丛书编委会

目 录

第一章 锅炉水动力学基础	(1)
§ 1-1 流动特性参数	(1)
§ 1-2 两相流体在管内的流型	(5)
§ 1-3 锅炉水动力学基本方程式	(8)
第二章 管内流动压降的计算	(13)
§ 2-1 单相流体压降的计算	(13)
§ 2-2 两相流体压降的计算	(19)
第三章 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算	(31)
§ 3-1 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算原理	(31)
§ 3-2 自然循环蒸汽锅炉的水动力计算	(34)
§ 3-3 循环故障和循环可靠性的校验	(52)
§ 3-4 循环回路的设计与布置	(63)
第四章 热水锅炉水动力学	(67)
§ 4-1 自然循环热水锅炉水动力学	(67)
§ 4-2 强制循环热水锅炉水动力学	(100)
§ 4-3 自然循环热水锅炉水循环计算例题	(113)
§ 4-4 强制循环热水锅炉水动力计算例题	(126)
第五章 不稳定工况对水循环的影响	(135)
§ 5-1 基本概念	(135)
§ 5-2 允许升压速度	(136)
§ 5-3 允许降压速度	(137)
第六章 蒸汽的净化	(141)
§ 6-1 蒸汽质量标准	(141)
§ 6-2 蒸汽污染的原因及其影响因素	(142)
§ 6-3 锅炉的排污与分段蒸发	(150)
§ 6-4 汽水分离装置	(152)
§ 6-5 蒸汽的清洗	(169)
主要参考文献	(172)

第一章 锅炉水动力学基础

§ 1-1 流动特性参数

在锅炉及蒸汽发生器的汽水受热面中,工质在管内流动的同时不断地被加热,因此工质的比容和流速发生变化,并且还产生相变。为了研究工质在流动过程中这种复杂的变化和在相变过程中两相之间的相互作用,以及进行水动力计算,需引用两相流体的特性参数。这些参数可分成二类:一类是可以根据热量平衡或物质平衡进行计算的参数;另一类是必须借助试验才能确定的参数。

下面分别叙述各流动特性参数的定义及相互关系。

一、流量

汽水混合物的质量流量 G_A 等于蒸汽的质量流量 G 和水的质量流量 G' 之和

$$G_A = G + G' \quad \text{kg/s} \quad (1-1)$$

汽水混合物的容积流量 V_A 等于蒸汽的容积流量 V 和水的容积流量 V' 之和

$$V_A = V + V' \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-2)$$

或

$$G_A v_A = G v + G' v' \quad (1-3)$$

式中

v_A ——汽水混合物的比容, m^3/kg

v, v' ——饱和汽及饱和水的比容, m^3/kg 。

二、折算速度

蒸汽折算速度:在汽水混合物中,假想蒸汽单独流过整个管道横截面时的速度 W'_0 ,称为蒸汽的折算速度,即

$$W'_0 = \frac{G v}{f} = \frac{V}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-4)$$

水的折算速度:在汽水混合物中,假想水单独流过整个管道横截面时的速度 W''_0 ,称为水的折算速度,即

$$W''_0 = \frac{G' v'}{f} = \frac{V'}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-5)$$

式中 f ——管道流通横截面积, m^2

实际上这两种折算速度都是不存在的,但它们能代表汽、水混合物中汽和水的多少。在受热的蒸发管内,由于水不断汽化,此值沿管长是不断变化的。

三、循环速度

质量流量等于循环流量的饱和水,流过整个管道横截面时的速度 W_0 ,称为循环速度,即

$$W_0 = \frac{G_0 v'}{f} = \frac{G_h v'}{f} \text{ m/s} \quad (1-6)$$

循环速度是锅炉水动力学中的一个重要术语。上升管中的循环速度可近似地等于上升管入口处的水速;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积(同一循环回路中所有蒸汽引出管的横截面积之和)。对于受热的蒸发管,如管径沿管长不变,在稳定流动下,沿管长此循环速度也是不变的。

四、质量流速

通过单位截面积的质量流量称为质量流速 ρW ,即

$$\rho W = \frac{G}{f} = \frac{G_h}{f} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-7)$$

汽水混合物的质量流速等于蒸汽的质量流速和水的流速之和。对于受热的蒸发管,如果沿管长的管径不变,在稳定流动下总的流速不变(而水和蒸汽的流速沿管长是变化的,但它们两者之和是不变的),所以汽水混合物的质量流速又等于工质的质量流速 ρW 。

$$\rho_h W_h = \rho' W'_0 + \rho'' W''_0 = \rho W \quad (1-8)$$

将式(1-6)、(1-7)代入式(1-8),可得

$$\rho W = W_0 \rho' = \rho_h W_h \quad (1-9)$$

所以
$$W_0 = W'_0 = W'_0 + W''_0 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right) \quad (1-10)$$

式中 ρ_h ——汽水混合物的密度, kg/m^3 ;
 W_h ——汽水混合物的速度, m/s ;
 $\rho' \rho''$ ——饱和蒸汽及饱和水的密度, kg/m^3 。

五、质量含汽率和容积含汽率

质量含汽率:汽水混合物中,蒸汽所占的质量份额,亦即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 χ ,又称为汽水混合物的干度

$$\chi = \frac{G'}{G} = \frac{W'_0 \rho' f}{W_h \rho_h f} \quad (1-11)$$

将式(1-9)代入式(1-11)可得

$$\chi = \frac{W'_0 \rho'}{W_0 \rho} \quad (1-12)$$

$$1 - \chi = \frac{G}{G_A} = \frac{W'_0 \rho' f}{W_0 \rho' f} = \frac{W'_0}{W_0} \quad (1-13)$$

容积含汽率:汽水混合物中蒸汽所占的容积份额,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

$$\beta = \frac{V'}{V_A} = \frac{W'_0 f}{W'_0 f + W_0 f} = \frac{W'_0}{W'_0 + W_0} \quad (1-14)$$

将式(1-14)右端分子分母同除以 W'_0 ,并应用式(1-10)和(1-12),可得质量含汽率和容积含汽率的换算关系式

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{W_0 \rho''}{W'_0 \rho'}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'}} \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) \quad (1-15)$$

χ 和 β 反映的是通过管子的汽水混合物中的蒸汽含量,它们不能反映存在于管内空间中的汽水混合物的蒸汽含量。由于蒸汽和水以不同的速度通过管子,确定存在于管内空间中汽水混合物蒸汽含量时要考虑汽水之间的相对速度。

六、截面含汽率

某一管道截面上,蒸汽所占的截面积 f' 与整个管道横截面 f 之比值称为截面含汽率 φ ,即

$$\varphi = \frac{f'}{f} \quad (1-16)$$

同理,水所占的截面比为

$$\frac{f}{f} = \frac{f - f'}{f} = 1 - \varphi \quad (1-17)$$

截面含汽率有时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。但 φ 值无法通过计算求出,必须借助于试验才能求得。

七、蒸汽和水的真实速度

当汽水混合物在管内流动时,蒸汽的平均流速不等于水的平均流速,在向上流动和水平流动时,蒸汽的平均流速大于水的平均流速;向下流动时,蒸汽和水的真实平均流速是不相等的。若知截面含汽率 φ ,便可求出蒸汽和水的真实平均流速 W' 和 W 。

$$W' = \frac{V'}{f} = \frac{W'_0 f}{\varphi f} = \frac{W'_0}{\varphi} \quad \text{m/s} \quad (1-18)$$

$$W = \frac{V'}{f} = \frac{W'_0}{(1-\varphi)f} = \frac{W'_0}{1-\varphi} \quad \text{m/s} \quad (1-19)$$

将式(1-9)和(1-12)代入式(1-18),可得 ρW 、 $\varphi \chi$ 等于 W' 的关系式

$$W'' = \frac{(\rho W)\chi}{\rho' \varphi} \quad (1-20)$$

式(1-19)分子分母同乘以 ρ' 并应用式(1-13)及式(1-9),得

$$W' = \frac{(\rho W)(1-\chi)}{\rho'(1-\varphi)} \quad (1-21)$$

由式(1-18)还可得到 β 与 φ 的关系式

因为
$$f' = \frac{V''}{W''}; \quad f = \frac{V_h}{W_h}$$

所以
$$\varphi = \frac{f'}{f} = \frac{W_h}{W''}; \quad \frac{V''}{V_h} = C\beta$$

式中 C ——表示汽水混物流速 W_h 与真实的蒸汽速度之比值,它反映了汽、水间由于存在相对速度而对截面含汽率的影响,它由试验求得。

在重直上升管中, $W'' > W'$, 因而 $W'' > W_h, C < 1, \varphi < \beta$; 在重直下降管中, $W'' < W'$, 因而 $W'' < W_h, C > 1, \varphi > \beta$; 当压力等于或大于临界压力时, $W'' = W', W'' = W_h, C = 1$, 此时 $\varphi = \beta$ 。

八、相对速度和滑移比

汽水两相在管内流动时,由于蒸汽与水的真实流速不同,此两速度之差称为相对速度

$$W_{zd} = W'' - W' \text{ m/s} \quad (1-23)$$

此相对速度又称为滑移速度。

蒸汽的真实流速与水的真实流速之比值称为滑移比 S

$$S = \frac{W''}{W'} \quad (1-24)$$

当 $W'' > W', W_{zd} > 0, S > 1$; 反之 $W'' < W', W_{zd} < 0, S < 1$; 当 $W'' = W', W_{zd} = 0$, 此时 $S = 1$ 。

九、汽水混合物的密度和比容

汽水混合物的密度有混合流体密度 ρ_h 和管内容积密度 $\rho_{h,}$ 两种。管内容积密度有时被称为真实密度或压头密度。

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

$$\begin{aligned} \rho_h &= \frac{G_h}{V_h} = \frac{G'' + G'}{V_h} = \frac{V'' \rho'' + V' \rho'}{V_h} = \rho' \beta + \rho(1-\beta) \\ &= \rho' - \beta(\rho' - \rho) \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-25)$$

式(1-15)代入式(1-25)得

$$\rho_h = \frac{\rho'}{1 + \chi \left(\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right)} \quad \text{kg/m} \quad (1-26)$$

汽水混合物比容 v_h 为混合流体密度的倒数,即

$$v_h = \frac{1}{\rho_h} = \frac{1 + \chi \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)}{\rho'} = v' + \chi(v'' - v') \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-27)$$

或

$$v_h = \frac{1}{\rho_h} = \frac{1}{\rho' - \beta(\rho' - \rho'')} = \frac{v'}{1 - \beta \left(1 - \frac{v''}{v'} \right)} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-28)$$

管内容积密度是按蒸汽和水在管内所占容积计算的管内汽水混合物密度。

动态平衡时取长度为 Δl 的一小段管子,蒸汽和水所占的截面积分别为 f' 和 f'' ,则在此管段内的汽水混合物的管内容积密度为

$$\begin{aligned} \rho_{h,1} &= \frac{\rho' f' \Delta l + \rho'' f'' \Delta l}{f \Delta l} = \rho' (1 - \varphi) + \rho'' \varphi \\ &= \rho' - \varphi(\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-29)$$

密度 $\rho_{h,1}$ 是按蒸汽水所占容积份额确定的,它与汽水两相之间的相对速度有关。它用来计算管道内汽水混合物的静压(如锅炉水动力计算中的运动压头就是用它来计算的),所以通常也叫做压头密度。

比较式(1-25)和(1-29),可知在垂直上升管中,由于 $W'' > W'$ 、 $\varphi < \rho$,所以 $\rho_{h,1} > \rho_h$;在垂直下降管中, $W'' < W'$ 、 $\varphi > \beta$,所以 $\rho_{h,1} < \rho_h$ 。

十、汽水混合物的速度

密度 ρ_h 用于计算汽水混合物的速度。当管径不变、流动稳定时,将式(1-26)代入式(1-9)可得汽水混合物速度的计算公式如下

$$W_h = W_0 \left[1 + \chi \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \quad \text{m/s} \quad (1-30)$$

将式(1-12)代入式(1-26),再代入式(1-9)又可得

$$W_h = W_0 + W_0' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \quad \text{m/s} \quad (1-31)$$

或

$$W_h = W_0 + W_0' \quad \text{m/s} \quad (1-32)$$

§ 1-2 两相流体在管内的流型

为了研究流体的流动特性,把单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特性的重要因素,它是研究两相流动的重要课题。由于影响两相流体流型的因素多而且复杂,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,至今尚无一个统一分类,各流型的名称也不统一。

下面仅就比较通用的几种流型作一简单介绍。

一、绝热的垂直上升管中的流型

1. 泡状流动(图 1-1a)

当气液混合物中气量较少时,气体以小气泡形式散布在液体中,管子中部气泡较多,近壁较少,这种流型称为泡状流动。

2. 弹状流动(图 1-1b)

当气液混合物中气量增多时,小气泡聚合成大气泡,在气泡直径增大到接近管子内径时,便形成弹状的大气泡,称为气弹。气弹之间是夹带着小气泡的液体。这种流型称为弹状流动。弹状流动在垂直上升管中有时也称为塞状流动。

3. 环状流动(图 1-1c)

当气液混合物中气量更大时,大气泡首尾相连而汇合成气柱在管子中部流动,四周液膜的表面上出现波浪,这些波浪被中心气流撕碎,形成许多小液滴随气流流动。随着气量的增加,液膜变薄,气柱中央带的液滴也越多。这种流型称为环状流动。

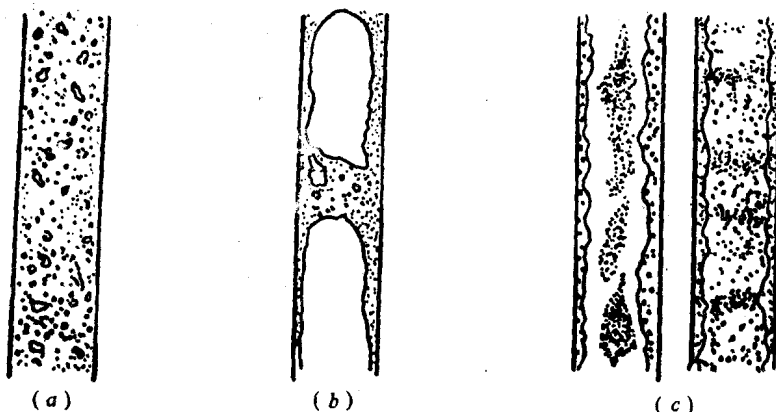


图 1-1 垂直上升管中的流型

二、加热的垂直上升管中的流型

当管子受热时,流型沿管长不断变化,均匀受热上升管中的流型沿管长的演变过程,如图 1-2 所示。在受热管中由于流体沿管截面径向的温度分度不同,它与绝热的上升管中的流型有差别。在入口为未饱和的单相水、出口为过热蒸汽的受热上升管内,若按热量平衡求得的蒸汽质量含汽率为 χ ,则沿管长存在以下几种流型。

1. 入口为单相水。

2. 泡状流动:沿着流向,液体被逐渐加热到饱和温度 t_s (此时 $\chi=0$)。在 $\chi<0$ 的某处,虽然此时液体的平均温度尚未达到饱和温度,但在内壁附近的水温已达到产生蒸汽的温度,使液体沸腾产生气泡,由于此处 $\chi<0$,管子中部还是欠热的水,故称这种沸腾为欠热沸腾。因此泡状流动可存在于 $0<\chi<1$ 区域,也可存在于 $\chi<0$ 的欠热区域。

3. 弹状流动:随着汽量的增加,小泡汇集成弹形的大气泡。

4. 环状流动:汽量更大时,汽弹连成汽柱。

5. 雾状流动:环状水膜由于不断蒸发和被中心气流带走,液膜逐渐减薄,最后完全消失,这时管内为夹带液滴的汽流,称此流型为雾状流动。雾状流动可存在于 $\chi < 1$ 和 $\chi > 1$ 区域,这也是由于沿管子截面存在温度差的缘故:当 $\chi = 1$ 时,近壁面的蒸汽已被过热,但中心蒸汽中还存在有水滴。

6. 单相的过热蒸汽

由于在受热的情况下,流型的转变需要一定距离和时间以达到流体动力平衡,而这与热负荷大小、压力高低、汽量多少等因素有很大关系,因此上述各种流型所占的区间,在不同的热负荷、汽量和压力下,可能延伸或缩短。根据试验结果,在 3MPa 时,汽水混合物的容积流量 $\beta < 80\%$ (χ 约为 0.07) 时,为泡状流动; $\beta > 80\%$ 时,为汽泡、汽弹状流动; $\beta > 90\%$ (χ 约 0.15) 时转变成环状或雾状流动。在 10MPa 时,当 $\beta < 95\%$ (χ 约 0.6) 均为泡状流动, $\beta > 95\%$ 时,则直接转变成环状或雾状流动。一般的自然循环锅炉蒸发管内, χ 多处于泡状流动工况。



图 1-2 加热的垂直上升管中的流型

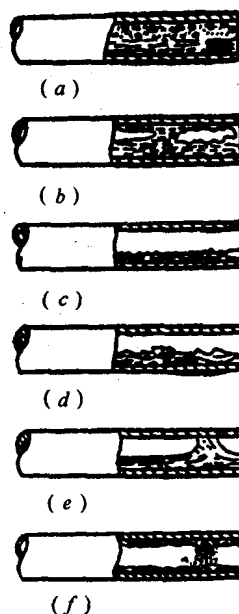


图 1-3 绝热的水平管中的流型

三、绝热的水平管中的流型

水平管中的流型与垂直上升管中的流型基本相同,所不同的是:在水平管中由于重力的影响,气相沿管子横截面的分布上下是不对称的,管子上部含气量较大。当液相速度很小时,可能出现气在上部流动、水在下部流动的所谓分层流动。但当液相速度很大时,汽相分布比较对称。水平管内的流型有以下几种(图 1-3)。

1. 泡状流动:气泡多偏于管子上部(图 1-3a)。
2. 弹状流动:气弹偏于管子上部(图 1-3b)。

3. 分层流动:气和液体的速度都很小时,二者在管内分开流动,气在上,气液相之间有比较平滑的分界面,这种流型称为气液分层(1-3c)。

4. 波浪状流动:当气速增大时,可在气液分界面上掀起波浪(图 1-3d)。

5. 块状流动:它与弹状流动的差别是,此流型中的气弹上部没有水膜,只有气弹之间被涌起的波浪,使上部管壁周期性地受到湿润(图 1-3e)。

6. 环状流动:气速更高时形成环状流动。此时管中心为气,四周为水膜,但底部水膜较厚,气中也带有水滴(图 1-3f)。

四、加热的水平管中的流型

在低热负荷下,均匀受热的入口为欠热水、出口为过热蒸汽的水平蒸发管内的流型演变过程,如图 1-4 所示。沿流向可分为:单相水、泡状流动、弹状流动、块状流动、波状流动、环状流动、单相过热蒸汽等七个区域。其特点除气相分布上下不对称外,在波状流动区,在管子上部还存在着时而被液滴湿润、时而干涸的流态,称为间歇式液态。

管子的倾斜度对流型的影响很大。在微倾斜(水平倾角 α 很小时)管中的流型与水平管相似,当流速低时易出现分层;在直流锅炉的水平或微倾的蒸发管中,一般用提高流速的方法来消除分层;在自然循环锅炉中,由于蒸发管内流速较低,所以应避免采用水平或微倾斜布置,当水平倾角 $\alpha \geq 15^\circ$ 时,一般就不会出现分层流动。当水平倾角超过 $40-60^\circ$ 时,管内的流型与垂直管相同。



图 1-4 加热的水平蒸发管中的流型

§ 1-3 锅炉水动力学基本方程式

在锅炉水动力学中,特别是在蒸发管内是两相流动时,情况十分复杂,因此不可能直接应用理论流体力学的数学工具来解决实际问题。在这种情况下,必须先作一些简化的假设,再列出基本方程式,在实际使用时还得借助于一些试验数据。

下面介绍几个简化的概念和几个基本方程式。

一、简化概念

1. 将管道内工质的流动作为一元流动处理,无论是加热管或不加热管,在建立基本

方程式时,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。

2. 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。当管道的压降与工质的绝对压力相差不大时,须考虑压降对工质比容的影响。

3. 在研究两相流体的流动时,预先假设两相流体的流动模型,目前用得最广的是以下两种模型:

(1)均相流模型

将两相流体看作均质的单相流体,因此可应用单相流体的各种方程式,这是一种最简单的处理方法;

(2)分离流模型

人为地将两相流体分隔开,并对每一相流体写出一组基本方程式,或者将两相的方程式合并在一起。

4. 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。

二、基本方程式

1. 质量守恒方程式(又称连续性方程式)

当流体沿管道流动时,由于通过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,通过管道上某两个截面 f_1 和 f_2 的流体的质量流量相等,即

$$G = \rho_1 W_1 f_1 = \rho_2 W_2 f_2 = \text{const} \quad (1-33)$$

或

$$\frac{(\rho W)_1}{(\rho W)_2} = \frac{f_2}{f_1}$$

如沿管长管道截面不变,则有

$$\rho W = \text{const}$$

对于两相流体,流体的总质量流量等于各相质量流量之和

$$\begin{aligned} G &= G' + G'' = f \rho' W' + f \rho'' W'' \\ &= f' \rho' W' + f'' \rho'' W'' = G(1 - \chi) + G\chi \end{aligned} \quad (1-34)$$

如沿管长管道截面不变时,则有

$$\rho W = \rho' W' + \rho'' W'' = \text{const} \quad (1-35)$$

$$\rho' \frac{dW'}{dl} + \rho'' \frac{dW''}{dl} = 0 \quad (1-36)$$

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

$$dG'' = -dG' \quad (1-37)$$

或

$$\frac{dG''}{dl} = -\frac{dG'}{dl} \quad (1-38)$$

2. 动量守恒方程式

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

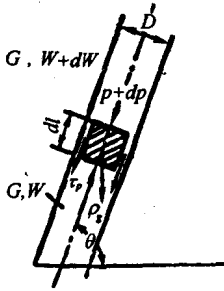


图 1-5 作用于微元流体上的力

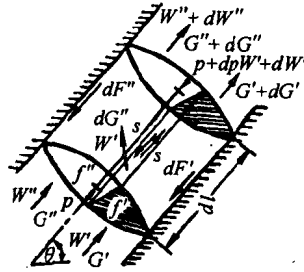


图 1-6 通过微元管段的两相流体的分离模型

作用在微元流体上的力(图 1-5)有:微元前后的压力 p 及 $p+dp$;重力和摩擦切应力。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

$$pf - (p+dp)f - \tau\pi Ddl - \rho gfdl\sin\theta = GdW \quad (1-39)$$

式中 G ——工质的质量流量,kg/s;
 p ——压力,Pa;
 τ ——摩擦切应力,Pa;
 f ——管子内截面积, m^2 ;
 D ——管子内径,m;
 ρ ——工质的密度, kg/m^3 。

上式两端同除以 f ,并且将 $f = \pi D^2/4$, $\tau = \frac{\lambda}{4} \frac{W^2}{2} \rho$ 代入上式,经整理得单相流体和均相流体的动量守恒方程式为

$$-dp = \lambda \frac{dW^2}{D} \frac{\rho}{2} + \rho gdl\sin\theta + \rho WdW \quad (1-40)$$

当管径不变时,应用分离流模型的两相流体的动量守恒方程式(图 1-6):

对于汽相,微元管段内汽相所受的力除压力、重力和汽与管子内壁之间的摩擦切应力外,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。

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

$$\begin{aligned} & pf' - (p+dp)f' - dF'' - S - \rho' g f' dl\sin\theta \\ & = [(G' + dG')(W' + dW') - (G'W' + dG'W')] \end{aligned} \quad (1-41)$$

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;
 G'' 、 G' —— 分别为汽相与液相在微元管段入口处的质量流量, kg/s。若将 dM'
 dW' 项略去不计, 则上式可简化为

$$\begin{aligned} & -dpf'' - dF'' - S - \rho' g f'' dl \sin\theta \\ & = G'' dW'' + dG'' W'' - dG'' W'' \end{aligned} \quad (1-41a)$$

同时, 液相的动量守恒方程式为

$$\begin{aligned} & pf' - (p+dp)f' - dF' + S - \rho g f' dl \sin\theta \\ & = [(G' + dG')(W' + dW') + dG' W' - G' W'] \end{aligned} \quad (1-42)$$

将 $dG' dW'$ 项略去不计, 且将 $dG'' = -dG'$ 代入上式则得

$$-dpf' - dF' + S - \rho' g f' dl \sin\theta = G' dW' \quad (1-42a)$$

将式(1-41a)和式(1-42a)相加并应用式(1-37)得

$$\begin{aligned} -dp &= \frac{1}{f} (dF' + dF'') + \frac{g}{f} dl \sin\theta (f' \rho' + f'' \rho'') \\ &+ \frac{1}{f} d(G' W' + G'' W'') \quad \text{Pa} \end{aligned} \quad (1-43)$$

由式(1-40)和(1-43)可看出, 当流体在管道内流动时, 其压降由三部分组成: 一是用于克服流动阻力的压降; 二是克服流体重力的压降, 称为重位压降; 三是克服流体的惯性力的压降, 称为加速压降。

式(1-41)和式(1-42)中作用于每一相的摩擦力还可用下式表示

$$(dF'' + S) = -f'' \left(\frac{dp}{dl} \right)'_{mc} dl \quad (1-44)$$

$$(dF' - S) = -f' \left(\frac{dp}{dl} \right)'_{mc} dl \quad (1-45)$$

根据 § 1-3 简化概念第一条, 有

$$\left(\frac{dp}{dl} \right)'_{mc} = \left(\frac{dp}{dl} \right)''_{mc} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_{mc} \quad (1-46)$$

和 $f' + f'' = f$

将式(1-44)和(1-45)相加, 则得

$$dF' + dF'' = -f \left(\frac{dp}{dl} \right)'_{mc} dl \quad (1-47)$$

式中 $(dp/dl)_{mc}$ 为在总静压梯度中用于克服摩擦的部分。

式(1-43)中右端第二项重位压降还可写成如下形式

$$\begin{aligned} -dp_{zw} &= g dl \sin\theta \left[\frac{f'}{f} \rho' + \frac{f''}{f} \rho'' \right] \\ &= g dl \sin\theta [(1-\varphi) \rho' + \varphi \rho''] \end{aligned}$$

$$=gdh[(1-\varphi)\rho' + \varphi\rho'] \quad (1-48)$$

上述动量守恒方程式对加热管和未加热管都能应用,但式中的速度都是平均速度。
按照动量守恒方程式,在锅炉水动力计算中,计算压降的基本方程式为

$$\Delta p = \Delta p_{id} + \Delta p_{zw} + \Delta p_{js} \quad (1-49)$$

- 式中 Δp ——计算管段的总压降,为计算管段入口和出口压力之差;
 Δp_{zw} ——重位压降;
 Δp_{js} ——加速压降;
 Δp_{id} ——流动阻力,它包括摩擦阻力 Δp_{mc} 和局部阻力 Δp_{jb} 两部分,即
- $$\Delta p_{id} = \Delta p_{mc} + \Delta p_{jb} \quad (1-50)$$