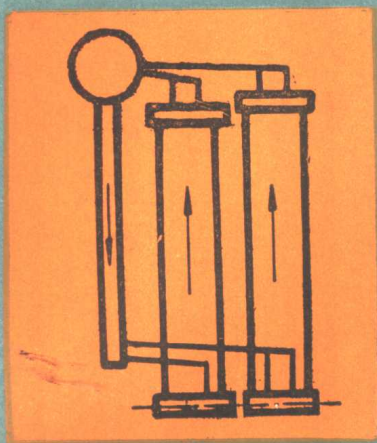


F 923028



锅内过程

林宗虎 陈立勋 编著

西安交通大学出版社

锅 内 过 程

林宗虎 陈立勋 编著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书论述了锅炉管内压力降计算, 并联管组的水动力学, 自然循环锅炉及直流锅炉的水动力计算; 并介绍了锅炉管内传热、受热面壁温计算、蒸汽洁净及锅炉水处理等内容。书中内容反映了我国锅炉工业最新科研成果和国外最新技术。

本书可作为高等院校锅炉专业和热能专业的教材, 也可供从事锅炉科研、设计、制造和运行工作的工程技术人员参考。

锅 内 过 程

林宗虎 陈立勋 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)

西安电子科技大学印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 17.25 字数: 417 千字

1990 年 7 月第 1 版 1990 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—4 000

ISBN 7-5605-0352-7/TK·34 定价: 3.50 元

前 言

锅内过程是锅炉专业的一门主要专业课，其研究内容包括受热面金属与工质之间的传热过程，工质的蒸发与过热过程，工质在锅炉内的流动过程和工质的热化学过程，诸如汽水品质，盐分沉淀和管内结垢、腐蚀等问题。缺乏锅内过程的知识将难以进行锅炉受热面与整体的正确设计与布置，不能保证锅炉的安全经济运行。

本书论述内容主要包括：锅炉管内压力降计算；并联管组的水动力学；自然循环锅炉的水动力计算；直流锅炉的水动力计算；锅炉管内传热；受热面壁温计算；蒸汽洁净和锅筒内件以及锅炉水处理。积盐、结垢与腐蚀问题分别插在蒸汽洁净和水处理有关章节中论述。

本书采用我国的法定计量单位。在编著中力求反映我国锅炉工业的最新科研成果并注意介绍国外最新技术。每章设有例题、习题和参考文献，以供读者阅读时参考。

本书的第1章、第2章、第3章、第5章、第8章和第9章由林宗虎教授编著；其余三章由陈立勋副教授编著；全书由林宗虎教授统稿，由陈学俊和章燕谋教授主审。我们对两位教授的认真审阅和宝贵意见深表感谢。

本书可作为高等院校锅炉专业和热能专业的教材，也可供从事锅炉设计、制造、科研和运行工作的工程技术人员参考。

限于我们的水平，书中缺点错误在所难免，请读者批评指正。

西安交通大学锅炉教研室

林宗虎 陈立勋

1989年8月

CA 195/07

目 录

前言

第1章 绪 论

§ 1-1 锅内过程研究的意义、对象及方法	1
§ 1-2 汽液两相流体的主要特性参数	2
§ 1-3 汽液两相流体的主要流型	6
习题	14
参考文献	14

第2章 锅炉管内压力降

§ 2-1 工质在管内流动时的压力降	15
§ 2-2 单相流体的管内压力降	17
§ 2-3 汽水混合物的摩擦阻力压力降	23
§ 2-4 汽水混合物的截面含汽率	34
§ 2-5 汽水混合物的重位压力降	45
§ 2-6 汽水混合物的加速压力降	45
§ 2-7 汽水混合物的局部阻力压力降	49
习题	50
参考文献	51

第3章 并联管组的水动力学

§ 3-1 并联管组型式	52
§ 3-2 热偏差、流量偏差及其对策	52
§ 3-3 水平蒸发管组的水动力学	73
§ 3-4 垂直蒸发管组的水动力学	80
§ 3-5 蒸发管的脉动性流动	87
习题	92
参考文献	92

第4章 锅炉水循环原理及计算

§ 4-1 自然循环回路的工作原理	94
§ 4-2 自然循环锅炉压差特性曲线	95
§ 4-3 自然水循环的可靠性	104

§ 4-4 多次强制循环锅炉的水动力计算	115
§ 4-5 自然循环锅炉水循环计算示例	118
习题	135
参考文献	135

第 5 章 直流锅炉的水动力计算和工作特点

§ 5-1 直流锅炉的水动力计算特点	136
§ 5-2 直流锅炉的水动力可靠性校验	139
§ 5-3 直流锅炉的水动力计算示例	140
§ 5-4 直流锅炉中工质在并联管中的分配	151
§ 5-5 直流锅炉汽水系统的改进	158
习题	158
参考文献	159

第 6 章 受热面壁温工况

§ 6-1 受热面壁温及其影响因素	160
§ 6-2 圆管沿圆周不均匀受热时的管壁温度	161
§ 6-3 膜式水冷壁的壁面温度	165
§ 6-4 壁温校核点工质温度	170
§ 6-5 壁温校核点最大热负荷	174
§ 6-6 受热面壁温计算示例	178
习题	184
参考文献	184

第 7 章 锅炉管内传热

§ 7-1 锅炉管内的流动工况及传热工况	185
§ 7-2 单相流体强迫对流传热	186
§ 7-3 过冷沸腾	187
§ 7-4 核态沸腾传热	189
§ 7-5 传热恶化时的含汽率	194
§ 7-6 传热恶化后的传热	201
§ 7-7 超临界压力时管内传热	203
§ 7-8 强化传热的措施	210
习题	213
参考文献	214

第 8 章 蒸汽洁净和锅筒内件

§ 8-1 锅炉的蒸汽质量标准	215
-----------------	-----

§ 8-2 蒸汽污染的原因及其带盐机理·····	215
§ 8-3 盐分在锅炉部件中的沉积·····	223
§ 8-4 一次汽水分离装置的工作原理和设计要点·····	224
§ 8-5 二次汽水分离装置的工作原理和设计要点·····	234
§ 8-6 蒸汽清洗装置的工作原理和设计要点·····	238
§ 8-7 锅筒内件的布置方式·····	241
习题·····	249
参考文献·····	249

第 9 章 锅炉水处理

§ 9-1 水中杂质及水质标准·····	251
§ 9-2 受热面的结垢与腐蚀·····	254
§ 9-3 锅炉水处理及其系统·····	257
习题·····	267
参考文献·····	267

第1章 绪 论

§ 1-1 锅内过程研究的意义、对象及方法

锅炉是一种生产蒸汽或热水的换热设备，广泛应用于火力发电厂和工业企业。用于发电的锅炉称为电站锅炉，用于工业动力设备或供热的锅炉称为工业锅炉。在电站锅炉中，燃料燃烧后释放出的热量通过管壁传给在管内流动的工质使之转变为过热蒸汽再通过汽轮发电机发电。在工业锅炉中，燃料燃烧后生成的热量通过管壁传给在管内流动的工质使之成为过热蒸汽、饱和蒸汽或热水供工业企业或日常生活应用。由于电能和热能的连续供应对于工业、农业、交通运输业、公用事业以及日常生活均有重要影响，因而确保锅炉能可靠而经济地运行不仅对锅炉本身而且对国民经济各部门的安全工作和经济性也是至关重要的。

锅炉的工作过程大体可分为两大过程：即炉内过程和锅内过程。前者包括燃料的燃烧过程和受热面外部烟气侧的炉内传热过程；后者包括受热面金属与工质之间的传热过程，工质的蒸发与过热过程，工质的流动过程和工质侧的热化学过程诸如蒸汽品质、盐分沉淀和管内结垢腐蚀等问题。要使锅炉可靠而经济地运行，必须合理地设计好炉内过程和锅内过程。锅内过程的好坏对锅炉效率本身关系不大，对锅炉经济性有一定影响，严重影响的是锅炉的可靠性。因而研究锅内过程的目的是解决锅炉工作可靠性问题。随着锅炉向大容量，超高参数或超临界参数的发展，锅炉锅内过程的工作条件日益恶化，研究锅内过程已成为发展现代大型高参数锅炉的关键问题。

锅内过程的研究对象大致可分为三类：一为研究工质在管内流动时的水动力学问题，亦即研究各种受热管或不受热管中的水、汽单相流体的流动阻力，汽水混合物在流动过程中的流动型式、流动阻力、流动的稳定性、汽水分离过程以及汽水两相的混合与分配等问题；二是研究水、汽单相流体在受热管内流动时的热交换过程以及管内汽水混合物的沸腾换热过程和传热恶化条件；三是研究工质侧的热化学问题。锅炉受热面工作的可靠性首先取决于管壁金属的温度工况。对于在正常壁温下具有足够强度的锅炉钢管，当因水动力学问题或传热恶化问题而使管壁温度超过容许值或使管壁温度长期波动时，锅炉钢管会因金属强度下降或金属疲劳而破裂。此外，由于热化学问题造成管内结垢或腐蚀而导致爆管或漏泄事故的也为数不少。因此在锅炉发展历程中，各主要工业国家都曾对锅内过程进行过一系列研究以便设计制造出合理的锅炉结构。

研究锅内过程的方法一般有三种。第一种为在试验室模化设备上进行研究，此法一般用于研究锅内过程中某一单独过程。研究时可以采用模化方法，去除众多次要的影响因素，得出此过程的主要规律。这种方法所用设备简便，研究费用较少。第二种为在半工业性锅炉上进行研究工作，此法用于已经过试验室研究但把握不大尚需在较大设备上进一步验证的情况。通过半工业性试验可以使研究成果在实际锅炉上应用的可靠程度大为提高。第三种为直接在实际锅炉上进行研究工作。此法用于将研究成果付之实际验证的情况或用来查明现有锅炉的锅内过程工作状况。采用何种研究方法应依研究项目的重要性、研究经费的多少以及

人员及设备的状况而定。

锅内过程研究工作的发展和工程技术的进展密切相关的。自 18 世纪发明锅炉以来,因缺乏两相流体动力学和传热方面的知识而曾经发生过不少工业事故,锅内过程的各种科研成果正是在不断总结经验教训、不断进行研究的进程中逐步得到的。

早先一些蒸汽轮船和蒸汽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。有的论文还论及了汽液两相流体流动时的不稳定性问题。但总的来说,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,锅内过程研究工作才日益展开。在 1930~1940 年间,发表了一些研究汽液两相流不稳定性以及锅炉水循环问题的经典性论文,在传热方面开展了火管锅炉的大容积沸腾研究工作,但研究参数一般都在中压以下。1940~1950 年期间,研究工作深入到汽液两相流的阻力和沸腾换热领域,研究参数也逐渐趋向高压。

1950 年后,电站锅炉开始采用高温高压参数,直流锅炉也开始发展。在直流锅炉中,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,因而其中的工质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的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。为了避免受热面烧损,故对汽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。研究参数也进入高压、超高压乃至超临界压力。

近 30 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大型试验台,不少试验都用实物在实际运行压力下进行。同时,由于计算机技术的发展,对于锅内过程中的水动力学和传热问题可以应用数值计算方法进行较为深入的理论分析。对于汽液两相流体的流动和传热机理、流动结构型式及其影响因素、流动时相的分布及各种阻力计算、流动时的动态不稳定性、沸腾传热和强化传热以及热化学等问题都作了广泛的研究和分析,将锅内过程研究工作推向了一个新的阶段。

建国 40 年来,我国在锅内过程领域内开展了大量科研工作并积累了丰富的实践经验,在此基础上,制订出我国自己的技术性指导文件——《电站锅炉水动力计算方法 (JB/Z201-83)》。近 10 余年来,我国的电力工业和发电设备制造业有了大的发展。解放初期,我国自制的的第一台汽轮发电机组为 6MW 的中压机组,目前我国已批量生产 200MW 和 300MW 的汽轮发电机组,并引进国外先进技术积极设计制造 600MW 和更大容量的汽轮发电设备以满足所急需的动力。锅炉的工作参数也由中压逐渐发展到高压、超高压、近临界压力。在近几年内,还将投入引进的超临界压力大型机组,并积极设计研制大型超临界压力机组。可以预期随着客观工程实际要求的提高,我国广大工程科技人员一定会为锅内过程研究工作作出更多的新贡献。

§ 1-2 汽液两相流体的主要特性参数

在锅炉省煤器中流动的工质为水,在锅炉过热器内流动的工质为蒸汽,这些都是单相流体。描述单相流体流动的最基本流动特性参数为速度、质量流量或体积流量。

在锅炉蒸发受热面中,工质一面在管内流动一面自管壁吸热,在达到工质沸点后即发生相变产生蒸汽形成汽水混合物(汽液两相流体)。在汽液两相流动中,汽液两相的流速是不同

的, 流动时两相的流动结构型式又是多种多样的, 而且是带随机性的, 因而要全面描述汽液两相流体的流动状况必须引用许多新的流动特性参数。其中除了总流体的参数外, 汽液两相中各相的速度、质量含量或体积含量也是十分重要的参数。汽液两相流体的流动特性参数可分为两类: 第一类是可以由物质平衡或热量平衡方程式算得的参数, 称为流量参数; 第二类是表示流体流动时真实的流动特性参数, 称为实际流动特性参数。实际流动特性参数的值需由试验确定。

1. 流量参数

流量参数可以由质量平衡或热平衡方程式算得, 计算时认为汽水流速相同。

(1) 汽水混合物的质量流量 G_h

每秒流过管道流通截面积的汽水混合物质量称为汽水混合物的质量流量, 其值等于每秒流过管道的汽相质量 G_g 和液相质量 G_s 之和, 即

$$G_h = G_g + G_s \quad \text{kg/s} \quad (1-1)$$

(2) 汽水混合物的容积流量 Q_h

每秒流过管道流通截面积的汽水混合物容积称为汽水混合物的容积流量, 其值等于每秒流过管道的汽相容积 Q_g 和液相容积 Q_s 之和, 即

$$Q_h = Q_g + Q_s = G_g v' + G_s v'' \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-2)$$

式中 v' 及 v'' ——分别为饱和水及饱和汽的比容, m^3/kg

(3) 循环流速 w_o

质量流量等于管内汽水混合物流量的饱和水流量 G_o , 流经整个管子截面 f 时的流速称为循环流速, 即

$$w_o = \frac{G_o v'}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-3)$$

在各种蒸汽锅炉中, 进入水冷壁蒸发管的水接近于饱和水, 一般认为蒸发管入口流速即等于循环流速。

(4) 质量流速 ρw

每秒流过单位流通截面积的工质质量称为质量流速:

$$\rho w = \frac{G_o}{f} = \frac{G_h}{f} \quad \text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (1-4)$$

根据质量不变定律, 在稳定流动时, 如管子直径不变, 流经管子任一截面的质量流速不变。

(5) 折算汽速 w''

在汽水混合物中, 假设蒸汽占据整个管子流通截面积流动时的流速称为折算汽速:

$$w'' = \frac{G_g v''}{f} = \frac{Q_g}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-5)$$

(6) 折算水速 w'

在汽水混合物中, 假设水占据整个管子流通截面积流动时的流速称为折算水速:

$$w' = \frac{G_s v'}{f} = \frac{Q_s}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-6)$$

(7) 质量含汽率 x

在汽水混合物中，蒸汽质量流量所占混合物质量流量的分额称为质量含汽率，也称为蒸汽干度：

$$x = \frac{G_q}{G_q + G_s} = \frac{w''_o \rho''}{w'_o \rho' + w''_o \rho''} \quad (1-7)$$

式中 ρ' 及 ρ'' ——分别为饱和水及饱和汽的密度， kg/m^3 。

(8) 容积流量含汽率 β

汽水混合物中，蒸汽容积流量所占混合物容积流量的分额称为容积流量含汽率：

$$\beta = \frac{Q_q}{Q_h} = \frac{w''_o}{w'_o + w''_o} \quad (1-8)$$

(9) 汽水混合物密度 ρ_h

汽水混合物的质量流量与容积流量的比值称为汽水混合物密度：

$$\begin{aligned} \rho_h &= \frac{G_h}{Q_h} = \frac{\rho'' Q_q + \rho' Q_s}{Q_h} = \rho'' \beta + \rho' (1 - \beta) \\ &= \rho' - \beta(\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-9)$$

(10) 汽水混合物流速 w_h

每秒流过单位流通截面积的汽水混合物容积称为汽水混合物流速：

$$w_h = \frac{Q_h}{f} = \frac{Q_s + Q_q}{f} = w'_o + w''_o \quad \text{m/s} \quad (1-10)$$

应用上列各式，可将这些参数表达为其它关系式。

例 1-1 试证明 $\rho_h = \rho' / [1 + x(\rho' / \rho'' - 1)]$ 。

证：

$$\because x = G_q / G_h = w''_o \rho'' / \rho' w_o \text{ 以及 } 1 - x = G_s / G_h = w'_o / w_o$$

$$\therefore w''_o = x \rho' w_o / \rho'' \text{ 及 } w'_o = w_o (1 - x)$$

将此两式代入式(1-8)，可得

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

将 β 这一表达式代入式(1-9)可得

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

例 1-2 试用循环流速 w_o 和干度 x 表达汽水混合物流速 w_h 的计算式。

解：

根据质量不变定律，在同一根等截面管中质量流速守恒，即 $\rho' w_o = \rho_h w_h$ ，或 $w_h = \rho' w_o / \rho_h$ 。

将例 1-1 中导得的 ρ_h 式代入上式，可得

$$w_h = w_o \left[1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]$$

2. 实际流动特性参数

实际流动特性参数是考虑了汽水混合物中汽水流速不同的实际情况而确定的参数。这些参数反映了汽水混合物的真实流动特性，其值需用试验方法确定。

(1) 截面含汽率 ϕ

截面含汽率反映蒸发管某截面上工质的真实含汽率。在蒸发管任一截面上设总截面积为 f ，此截面上蒸汽所占的截面积为 f'' ，水所占的截面积为 f' ，则蒸汽所占截面积与总截面积之比称为截面含汽率，即

$$\phi = \frac{f''}{f} \quad (1-11)$$

(2) 蒸汽的实际流速 $w'_{s,i}$

蒸汽容积流量与蒸汽所占管子截面积之比称为蒸汽的实际流速：

$$w'_{s,i} = \frac{Q_g}{f''} = \frac{Q_g}{\phi f} = \frac{w'_0}{\phi} \quad \text{m/s} \quad (1-12)$$

(3) 水的实际流速 $w'_{w,i}$

水的容积流量与水所占管子截面积之比称为水的实际流速：

$$w'_{w,i} = \frac{Q_w}{f'} = \frac{Q_w}{(1-\phi)f} = \frac{w'_0}{1-\phi} \quad \text{m/s} \quad (1-13)$$

(4) 蒸汽对水的相对速度 w_{sd}

蒸汽的实际流速与水的实际流速之差称为蒸汽对水的相对速度：

$$w_{sd} = w'_s - w'_{w,i} = \frac{w'_0}{\phi} - \frac{w'_0}{1-\phi} \quad \text{m/s} \quad (1-14)$$

(5) 滑动比 S

蒸汽实际流速与水的实际流速之比称为滑动比：

$$S = \frac{w'_s}{w'_{w,i}} \quad (1-15)$$

(6) 汽水混合物的实际密度 $\rho_{h,i}$

设在一长为 Δl 的微元管段上，管子总截面积为 f ，蒸汽所占截面积为 f'' ，水所占截面积为 f' ，则此微元管段中的汽水混合物实际密度为

$$\begin{aligned} \rho_{h,i} &= \frac{(f''\rho'' + f'\rho')\Delta l}{f\Delta l} = \phi\rho'' + (1-\phi)\rho' \\ &= \rho' - \phi(\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-16)$$

(7) 汽水混合物的实际流速 $w_{h,i}$

由于在管径不变的蒸发管中 $\rho'w_0 = \rho_{h,i}w_{h,i}$ ，所以

$$w_{h,i} = \frac{\rho'w_0}{\rho_{h,i}} = \frac{\rho'w_0}{\rho' - \phi(\rho' - \rho'')} \quad \text{m/s} \quad (1-17)$$

应用上列各式，也可将这些实际流动特性参数表达为其它关系式。

例 1-3 试证 $\phi = 1/[1 + S(1-\beta)/\beta]$ 。

证：

$$\because \beta = w'_0/(w'_0 + w'_s) \text{ 及 } 1-\beta = w'_s/(w'_0 + w'_s)$$

$$\therefore w'_0 = \beta(w'_0 + w'_s) \text{ 及 } w'_s = (1-\beta)(w'_0 + w'_s)。$$

将式(1-12)及式(1-13)代入式(1-15)可得

$$S = \frac{w''_0}{w'_0} \frac{(1-\phi)}{\phi}$$

将上面得出的 w''_0 及 w'_0 计算式代入上式, 移项化简后可得

$$\phi = \frac{1}{1 + S \frac{(1-\beta)}{\beta}}$$

§ 1-3 汽液两相流体的主要流型

在锅炉受热面内流动的工质有单相流体也有两相流体, 前者如省煤器或下降管中流动的水及过热器或再热器中流动的蒸汽, 后者如蒸发受热面中的汽水混合物。在锅筒水容积或蒸汽清洗装置中还有一种特殊的工质运动方式, 即汽泡穿过水层的流动或简称穿层流动。

单相流体的流动结构型式在普通流体力学中已进行过广泛的研究, 其主要流动型式为层流和紊流两种。汽水混合物的流动结构型式则比较复杂。因压力、流量、热负荷、管子几何形状及流动方向等的不同, 汽水混合物会形成各种流动结构型式, 简称流型。由于不同的汽液两相流型具有不同的水动力学特性和传热特性, 因而研究并设法预测管内汽液两相流型对于锅炉、核电站蒸发器以及其它汽液两相流的工业设备的设计和运行工作是十分重要的。汽液两相流体的流动一般为汽液两相均有各自的流量和流速, 两相共同流动。穿层流动则是汽液两相流动的一种特例, 其特点为汽泡穿过一定高度的液层向上流动, 在液层任一截面上汽相有一定的流量而液相的平均流量近乎为零。

1. 垂直上升管中汽液两相流型

垂直上升管是最常见的锅炉蒸发管, 因而对于其中的汽液两相流型研究较多。图 1-1 示有垂直上升管中的几种常见流型。

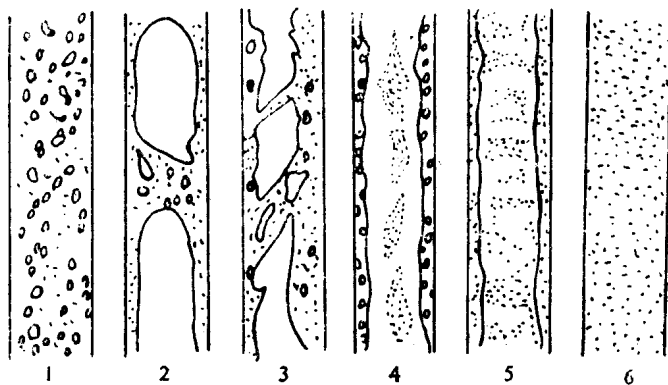


图 1-1 垂直上升管中的流型

1—汽泡状; 2—汽弹状; 3—块状; 4—带纤维的环状; 5—环状; 6—雾状

(1) 汽泡状流型

汽泡状流动是最常见流型之一, 出现于含汽率较低的流动工况, 其特征为在液相中带有散布在液体中的细小汽泡。直径在 1mm 以下的汽泡是球形的, 直径大于 1mm 的汽泡外形是

多种多样的。

(2) 汽弹状流型

汽弹状流型由一系列汽弹组成。随着含汽率增大，气泡聚合成汽弹，其端部呈球形而尾部是平的。在两汽弹之间夹有小气泡而汽弹与管壁之间存在液膜。当汽水混合物压力大于3MPa时，汽弹尺寸随压力增高而减小，到压力大于10MPa时，这种流型不再出现。

(3) 块状流型

当管内汽速增大时，汽弹分裂形成块状流型。此时大小不一的块状蒸汽团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细小气泡，管子核心部分主要为蒸汽，但在汽流中含有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，管壁上有一层环状液膜，管子核心部分为带有自液膜卷入的细小液滴的蒸汽。环状流型都发生在较高蒸汽流速时，含汽率增高，液膜厚度减小。

(6) 雾状流型

雾状流型发生于受热管子中，当工质含汽率高时，管壁液膜不断减薄，如管壁温度高到足以使管壁液膜汽化时，汽液两相流动结构就会发展到壁上无液膜，只有蒸汽流中还含有细小液滴的雾状流型。这种流型对于受热蒸发管而言是一种不安全的流型，由于管壁上无冷却液膜而蒸汽导热性能差，因而如热负荷较高或工质流速不够高时易引起管壁温度超过金属容许温度而导致爆管。

上述各种流型在受热蒸发管中往往是沿着管子长度依次出现的。图1-2示有垂直上升受热蒸发管中汽水混物流型和管壁热流密度的关系。在图中，温度低于饱和温度的水以固定流量进入各受热蒸发管。各蒸发管的热流密度依次自左往右逐渐增加。由图可见，随着热流密度的增大，各管中的工质沸点逐渐移向管子进口，各管中的流型也逐渐由单相水、气泡状流型、汽弹状流型、块状流型、环状流型，雾状流型一直发展到干饱和蒸汽和过热蒸汽流动。

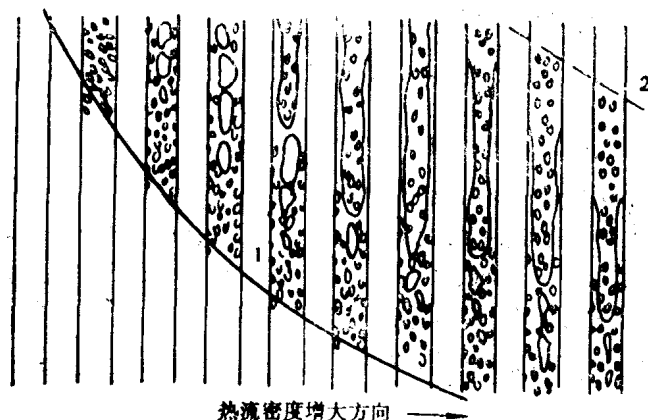


图1-2 受热垂直上升管中沸腾时的两相流流型
1—沸腾开始线；2—过热开始线

流型的变化反映了进入管内的汽水混合物中水及蒸汽含量沿管子截面上的分布状况。汽水混合物在管内流动时,混合物中的水流量一部分在管子内壁上流动,另一部分随蒸汽在管子核心部分流动。由于水的传热性能远比蒸汽好,因此管壁上保持较厚的水膜,亦即保持较多的水流量,在其它情况相同的条件下对于受热锅炉蒸发管的安全运行是十分重要的。

管子内壁上的水流量或管子核心部分的水流量的多少是和汽水混合物中蒸汽干度 x 、质量流速 ρw 和受热面热负荷 q 有关。图 1-3 中示有试验得出的不受热工况下,管内汽水混合物在管子核心部分的水流量和混和物流量之比 G'_i/G_h 和干度 x 的关系曲线。

图 1-3(a)所示为质量流速一定时($\rho w = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)不同压力下的 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线。图中曲线 I 为管内汽水混合物的湿度和干度的关系曲线,湿度与干度之和应等于 1.0。由图可见,在相同干度下,压力增高则管子核心部分相对水量增多,亦即管壁上相对水量减少,这是因为压力增高后汽水密度及物性趋向接近,核心部分汽水混合物动量增大,易于将管壁的水膜表面上的水卷走造成的。

图 1-3(b)所示为压力一定时($p = 7.0 \text{ MPa}$),质量流速不同时的 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线。由图可见,在相同干度下质量流速增大则管壁相对水流量减少,亦即为水膜变薄,这也是由于质量流速增高后,管子核心部分汽水混合物动量增大而卷走壁上水膜上的水量多造成的。

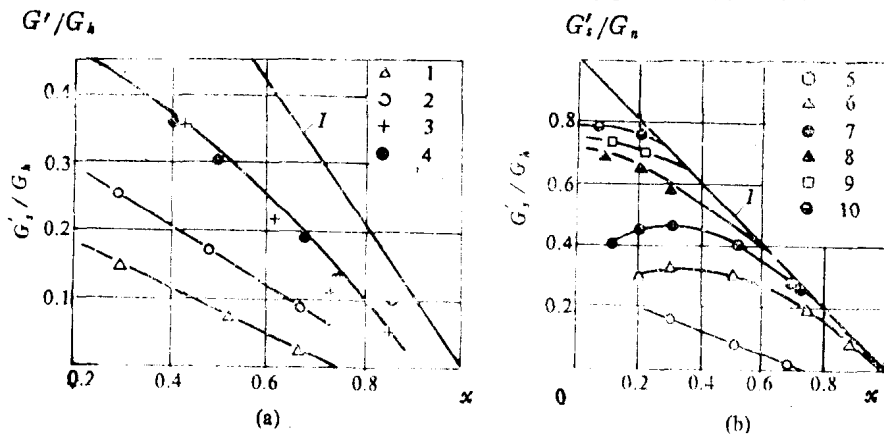


图 1-3 不受热垂直上升管中汽水混合物的 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线

(a) $\rho w = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时不同压力下的 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线

(b) $p = 7.0 \text{ MPa}$, 不同质量流速下的 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线;

1 及 2—相应为 $p = 6.85$ 及 9.80 MPa 时的试验点(管内径 $d = 13.4 \text{ mm}$);

3 及 4—相应为氟利昂-12 试验点($p = 1.06 \sim 1.5 \text{ MPa}$, $d = 14 \text{ mm}$);

5~10—相应为 $\rho w = 500, 1000, 2000, 3000$ 及 $4000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的试验点(管内径 $d = 13 \text{ mm}$)

热负荷 q 对 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线的影响示于图 1-4。图 1-4 为在 $p = 1.06 \text{ MPa}$ 下用氟利昂-12 为工质得出的试验曲线,由于氟利昂-12 和水在流动特性和传热特性上的相似性,也可以定性反映热负荷对汽水混合物的 $G'_i/G_h = f(x)$ 特性曲线的影响。

图 1-4(a) 表示较低质量流速时($\rho w = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)热负荷的影响,图 1-4 (b) 表示 $\rho w = 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时热负荷的影响作用。由图可见,当 ρw 及干度 x 相同时,受热管的

G'_i/G_h 值总比不受热管的高, 且 q 值愈大, 比值愈高, 亦即管子核心部分的相对水量愈高。这是由于在受热条件下, 一方面管壁水膜受热蒸发, 另一方面沸腾所产生的汽泡逸出时易将水膜中的水带入管子核心部分。

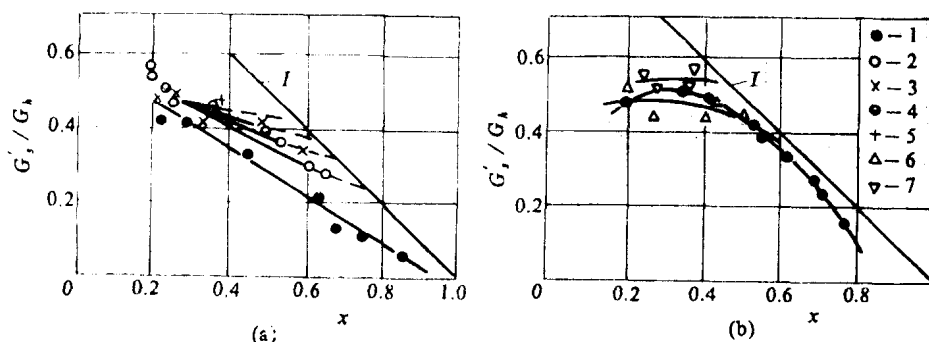


图 1-4 热负荷对 $G'_i/G_h = f(x)$ 曲线的影响(氟利昂-12, $p = 1.06 \text{ MPa}$)

(a) $\rho w = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $d = 14.6 \text{ mm}$;

(b) $\rho w = 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $d = 8 \text{ mm}$;

1— $q = 0$; 2— $q = 0.0765 \text{ MW}/\text{m}^2$; 3— $q = 0.103 \text{ MW}/\text{m}^2$;

4— $q = 0.13 \text{ MW}/\text{m}^2$; 5— $q = 0.171 \text{ MW}/\text{m}^2$; 6— $q = 0.078 \text{ MW}/\text{m}^2$;

7— $q = 0.137 \text{ MW}/\text{m}^2$

在设计受热的锅炉蒸发管时, 应注意压力、管内蒸汽干度、质量流速和热负荷之间的配合以免管内壁发生无水膜冷却而使金属过热损坏。

在汽液两相流中, 在两相流量、流体的物性值、管道几何形状及热流密度已知的条件下, 其流型可应用流型图确定。流型因主要是根据试验资料总结而成的, 因而使用流型图时不应超出得出该流型图的试验范围。

在判断垂直上升管流型的流型图中, 图 1-5 所示的休惠特流型图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 31.2 mm 的管子中用压力为 $0.14 \sim 0.54 \text{ MPa}$ 的空气-水混合物为工质得出的。此图和压力为 $3.45 \sim 6.9 \text{ MPa}$ 的汽水混合物在内径为 12.7 mm 管子中得到的试验数据相符良好, 所以也可适用于上述参数或与之相近的汽水混合物流动工况。

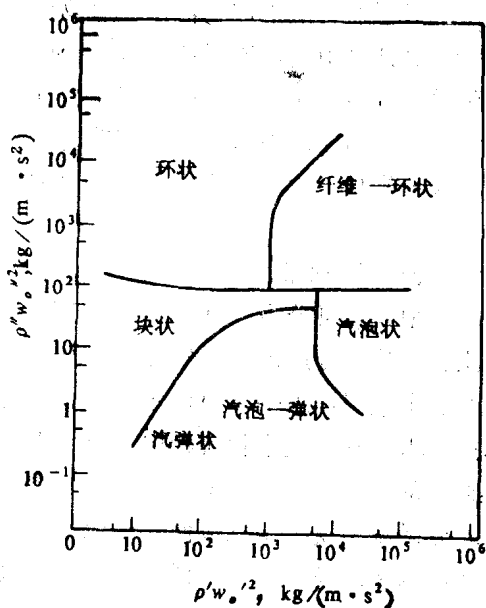


图 1-5 休惠特的垂直上升管流型图

图中横坐标为 $\rho' w'^2$, 纵坐标为 $\rho'' w''^2$, 其中 ρ' 为水的密度, ρ'' 为空气或蒸汽的密度, w' 为水的折算速度, w'' 为空气或蒸汽的折算速度。

在垂直下降管中气液两相一起往下流动时的流型示于图 1-6。当气相含量较小时呈现气

泡状流型，但此时气泡较多集中于管子核心部分而在前述上升管中的汽泡状流型中，汽泡散布在整个管子截面上。图 1-6 是根据空气-水混合物为工质得出的。

如液相流量不变而使气相流量增大，则出现弹状流型。下降流动时的环状流动有几种流型，在气相和液相流量小时，有一层液膜沿管壁下流，核心部分为气相，称为下降液膜流型。当液相流量增大，气相将进入液膜，这称为带气泡的下降液膜流型。当气液两相流量都增大时会出现块状流型。在气相流量较高时可出现管子核心部分为雾状流动，壁面存在液膜流动的雾式环状流型。这些试验都是从空气-水或空气与其它液体的混合物作工质得的，尚无汽水混合物的试验数据。根据空气及多种液体混合物的试验数据也可制成垂直下降管的流

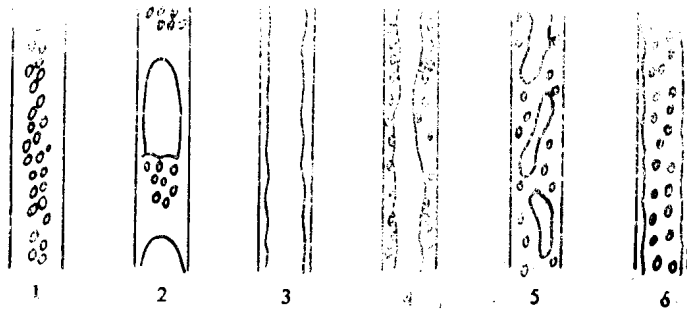


图 1-6 垂直下降管中气液两相流型

1—气泡状；2—气弹状；3—下降液膜状；
4—带气泡的下降液膜状；5—块状；6—雾式环状

型图，但不适合于锅炉中汽水混合物的工况，故介绍从略。但根据垂直上升管中的对比试验经验，锅炉中汽水混合物作垂直下降流动时的流型应包括图 1-6 中所示的几种。

气液两相流体在水平管中流动时的流型种类比垂直管中的多，这主要是由于重力作用使气液两相有分开流动的倾向造成的。

根据空气-水混合物的试验，气液两相流体在水平管中流动时的流型大致可分为 6 种，即：气泡状流型；气塞状流型；分层流型；波状分层流型；气弹状流型及环状流型。图 1-7 为这些流型的示意图，水平管中汽水混合物的流动也存在这些流型。

在水平管的气泡状流型中，由于重力的影响，细泡大都位于管子上部。当气相流量增加时，小气泡集成气塞形成气塞状流型。分层流型发生于气液两相的流量均小时，此时气液两相分开流动，两相之间存在一平滑分界面。当气相流量较高时，两相分界面上出现流动波，形成波状分层流型，气相流量再增大会形成气弹状流型，但此时气弹偏向管子上部。当气相流量很高而液相流量较低时就出现环状流型。

图 1-8 示有受热水管内沿管长汽水混合物的流型变化，由图可见，由于蒸汽较轻，水较重，所以流型总是不对称的，汽相

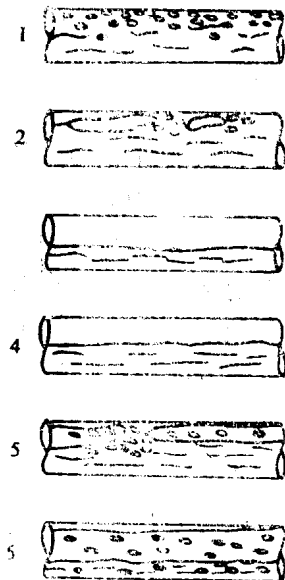


图 1-7 水平管中的气液两相流型

1—气泡状流型；2—气塞状流型；3—分层流型；
4—波状分层流型；5—气弹状流型；6—环状流型