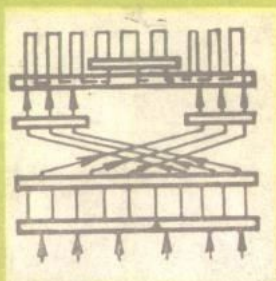


113

高等学校试用教材



锅炉水动力学 及锅内传热

哈尔滨工业大学 黄承懋 编著



机械工业出版社

高等学校试用教材

锅炉水动力学及锅内传热

哈尔滨工业大学 黄承懋 编著



机械工业出版社

本书作者黄承懋教授多年来从事锅炉水动力学及锅内传热方面的教学和科学研究工作,对我国动力事业的发展作出了应有的贡献,本书是黄承懋教授在这一领域长期工作的总结和论著。不幸的是黄承懋教授在完稿后因病去世,未能见到本书的出版。在本书出版之际,我们对黄承懋教授表示深切悼念。

锅炉水动力学及锅内传热

哈尔滨工业大学 黄承懋 编著

*

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)

北京市密云县印刷厂印刷

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 $19 \frac{1}{4}$ · 字数 468 千字
1982 年 7 月北京第一版 · 1984 年 11 月北京第四次印刷
印数 12,301—17,700 · 定价 2.00 元

*

统一书号: 15033 · 5109

前 言

本书系根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会制定的锅炉专业教学计划和同年7月锅炉专业教材会议拟定的教学大纲编写的全国试用教材。

上述天津会议中指出：为了适应四个现代化的需要，必须逐步地改造现有专业；当前，在专业和课程设置上应该做到基础好些、知识面宽些和适应性强些。

按照上述精神，编者在编写本教材时的指导思想是：尽可能加强课程的学科性，加强基础理论，减少那些在实际工作岗位上可以学到的专业知识；在内容选取上适当扩大知识面，不局限于目前我国锅炉专业所用的范围；在联系实际上，以锅炉专业的实际作为例子，使学生掌握如何应用所学的传热学和流体力学等基础知识来解决生产实际问题，培养分析问题和解决问题的能力并达到巩固和加深理论基础的目的。

本书中采用国际单位制。由于我国目前尚采用工程单位制，为了便于过渡，书中引用的原来是工程单位制的图表和部分公式，在换算成国际单位制时均直接标出换算系数。书中工质压力的单位除用 N/m^2 和 MPa 外，还用了 bar ，由于我国现有的国际单位制水蒸汽表中压力的单位为 bar ，并且它的数值与现用的工程大气压相近，因此在本书的个别章节中使用了后一单位。

本书承蒙西安交通大学陈学俊教授、陈听宽副教授和陈立勋讲师进行了认真的审阅，哈尔滨工业大学刘兴龙讲师审阅了本书第七章，他们提出了不少宝贵的意见。在此一并表示感谢。

全书由哈尔滨工业大学鲍亦令讲师校正。

本书责任编辑——郝育生。

本书常用符号表

一、符号

A —系数: 比值	M —质量, kg
a —系数;	M —流量系数
a —加速度, m/s^2	m —质量, kg
B —系数;	m —流量系数
B —代表流体物性的组合参数	m —数值
B —燃料消耗量, kg/s	N —数值
b —系数	$NPSH$ —净正吸水压头, m
b —宽度, m	n —数值
C —系数; 积分常数; 相似倍数	ONB —泡态沸腾开始点
CHF —临界热负荷, kW/m^2	p —工质的压力, N/m^2 , bar或MPa
c —系数, 份额	Δp —压差, 压降, 阻力损失, N/m^2
c —比热值, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	Q —容积流量, m^3/s
D —直径, mm或m	Q —加热量, 吸热量, W, kW, kJ/kg或 J/kg
D —锅炉负荷, 蒸汽流量, kg/s 或t/h	q —受热面热负荷, W/m^2 或kW/m ²
DNB —偏离核沸腾	R —半径, m
E —每kg工质所拥有或损失的能量, kJ/kg	R —锅炉内蒸发表面上的蒸发率, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
F —力, N	r —半径, m
F —面积, 流通截面, m^2	r —汽化潜热, kJ/kg
FDB —旺盛沸腾	S —汽水滑移比
f —流通截面, m^2	S —汽液分界面上的摩擦力, N
f —摩擦系数	S —周界长度, m
f —汽泡频率, s^{-1}	S —比值; 系数
g —重力加速度, m/s^2	S —含盐量, mg/kg
H —总高度, m	S —有效压头, N/m^2
H —比能头, m	s —节距, m
H —受热面面积, m^2	T —绝对温度, K
h —高度; 水位高度, m	T —烟气的温度, $^\circ\text{C}$
Δh —高度差, m	t —温度, $^\circ\text{C}$
i —工质的焓, kJ/kg	Δt —温度差; 过热度或欠温值, $^\circ\text{C}$
Δi —欠焓或称欠热, kJ/kg	u —工质的内能, J/kg
K —比例系数; 修正系数	u —偏差速度, m/s
K —循环倍率	V —体积, m^3
k —比例系数	v —工质的比容, m^3/kg
k —绝对粗糙度, m或mm	w —工质的流速, m/s
L —每kg工质所作的功, kJ/kg或总功, kJ	X —液相和汽相单独流过管道时的压降比
L —总长度, m	α —汽水混合物的质量含汽率, 相对焓
l —长度, m	α —角系数
M —质量流量, kg/s	z —直立度系数, m^6/kg^3

z —每 m 高度的流动阻力系数, m^{-1}

α —饱和蒸汽与饱和水的比容之比

α —水平倾角, 度

α —放热系数, $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$

β —汽水混合物的容积含汽率

β —管子外径与内径之比

γ —托姆关系式中的滑移系数

γ —液相所占流通截面的形状系数

δ —气相所占流通截面的形状系数

δ —厚度, m

ϵ —系数, 比值, 误差值

η —不均匀性系数, 相对水层高度系数

θ —角度, 度或弧度

λ —摩擦阻力系数

λ —导热系数, $kW/(m \cdot ^\circ C)$

μ —工质的动力粘度系数, $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$

μ —热量均流系数

ν —工质的运动粘度系数, m^2/s

ξ —阻力系数

ρ —密度, kg/m^3

ρ —偏差值

ρw —质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$

σ —系数

σ —表面张力系数, N/m

τ —摩擦切应力, N/m^2

τ —时间, s

Φ —两相流体与单相流体的摩擦压降比

Φ —截面含汽率

Φ —速度系数

ψ —两相流体摩擦阻力修正系数

ω —角速度, rad/s

二、上下角标

—代表平均值

'—饱和水或液相值

"—饱和蒸汽或气相值

0—原始工况或平均工况值

1, 2—对应于位置 (或状态) 1 和 2 的数值

b —管壁的, 壁面的, 表计的, 循环泵的; 当作为上角标时, 代表单位值 (即中文的“比”字)

bh —饱和的

c —出口值; 超出值

cx —储蓄的

D —管径的

d —额定值; 低位置

dl —当量值; 倒流的; 对流的

dq —带汽引起的

dx —单相的

f —沸腾的; 受辐射热的; 分配的

fj —附加值

fl —分配联箱的

ft —沸腾

g —管子的, 重力加速度的; 当作为上角标时, 代表沿高度的和燃料工作质

gd —管段的; 过渡的

gl —锅炉的

gr —过热的; 过热器的

gs —给水的; 锅水的

gt —锅筒的

gz —管组的

h —混合物的; 高度的; 汇集的

hl —汇集联箱的

j —计算值; 进口值; 金属的; 下降的

jb —局部的

js —加速的

jx —界限值; 极限值; 均相的

k —孔圈的, 空气的; 当作为上角标时, 代表沿宽度的

l —长度的; 流体的; 漏流量

ld —流动的

lj —临界值

lx —两相的; 联箱的

m —表面的, 面积的

max —最大值

mc —摩擦的

min —最小值

mk —门坎

n —内部的

nb —内壁的

p —压力的; 定压的; 水平的 (上角标)

pf —泡态沸腾

pj —平均的

q —热量的; 蒸汽或气体的; 炉墙之间的 (上角标)

<i>qd</i> —汽垫层	<i>x</i> —必需的, 循环的, 容许值, 斜的(上角标)
<i>grf</i> —欠热沸腾	<i>xd</i> —相对值
<i>r</i> —径向的, 加热的	<i>xf</i> —旋风分离器
<i>rh</i> —加热后区段	<i>xj</i> —下降的, 下降管的
<i>rq</i> —加热前区段	<i>xs</i> —吸水管的
<i>rs</i> —加热水区段	<i>yc</i> —汽水引出管
<i>s</i> —水的, 真实的, 实际的, 上面的, 上升 (管)的, 沿深度方向的	<i>yh</i> —氧化皮层
<i>sb</i> —水冷壁管	<i>yr</i> —引入管
<i>sm</i> —省煤器	<i>ys</i> —压水管
<i>ss</i> —上升的, 上升管的	<i>yx</i> —有效值
<i>t</i> —切向的, 温度的	<i>z</i> —总的, 阻力的, 轴向的, 由重力引起的, 折算值
<i>tt</i> —液相和气相均为紊流	<i>zf</i> —蒸发的
<i>tv</i> —液相为紊流而气相为层流	<i>zw</i> —重位的
<i>tz</i> —停滞的	α —倾斜角的
<i>vi</i> —液相为层流而气相为紊流	μ —动力粘度
<i>vv</i> —液相和气相均为层流	ρ —密度
<i>w</i> —外部的, 速度的	σ —表面张力
<i>wb</i> —外壁的	τ —摩擦切应力

目 录

绪论	1	§ 1-9 两相流体的局部阻力损失	57
第一章 锅炉水动力学基础	3	一、当管道截面逐渐改变时的动量守恒方程式	58
§ 1-1 流动特性参数	3	二、管道截面突然扩大时的局部阻力	58
一、流量参数	3	三、管道截面突然缩小时的局部阻力	60
二、真实流动特性参数	4	四、两相流体通过弯头时的局部阻力	61
§ 1-2 锅炉水动力学基本方程式	7	第二章 锅内传热	62
一、几个简化概念	7	§ 2-1 锅炉受热面金属的工作条件	62
二、基本方程式	8	一、锅炉受热面金属的破坏类型	62
三、动量守恒方程式和能量守恒方程式的比较	12	二、锅炉金属管壁的温度	62
§ 1-3 单相流体的水动力学	13	§ 2-2 单相流体的传热	65
一、平均比容和平均密度的选取	13	一、单相流体的放热系数	65
二、单相流体的摩擦阻力系数	16	二、在省煤器中的传热	67
三、工质与外界有热交换时的摩擦阻力损失	17	三、在过热器中的传热	67
四、单相流体的局部阻力损失	17	§ 2-3 沸腾传热的基本知识	70
五、单相流体的重位压降	19	一、汽化、蒸发和沸腾	70
六、单相流体的加速压降	19	二、加热的蒸发管内沸腾传热的类型	70
§ 1-4 两相流体在管内的流动	20	三、沸腾过程机理	73
一、两种性质的流动	20	四、大容积沸腾时的传热	75
二、两相流体在管内的流动式样	20	五、研究沸腾传热的目的	79
三、各种流动式样的出现范围和流型分布图	23	§ 2-4 管内沸腾传热	80
四、两相流体的流动结构	27	一、管内沸腾传热工况分布图	80
§ 1-5 两相流体的摩擦阻力	27	二、欠热沸腾传热	81
一、均相模型法	28	三、饱和核沸腾传热	85
二、分相模型法	30	四、两相强迫对流区段的传热	86
三、苏联水动力计算标准方法	39	五、非传热恶化区的综合计算公式	87
四、各因素对两相流体摩擦阻力的影响	39	六、管壁上的氧化皮对沸腾传热的影响	88
§ 1-6 两相流体的截面含汽率	42	§ 2-5 沸腾传热恶化区	90
一、欠热沸腾区的截面含汽率	43	一、两类沸腾传热恶化现象	90
二、在正 α 值区的截面含汽率	44	二、第一类沸腾传热恶化	91
三、流动式样模型	51	三、第二类沸腾传热恶化	96
§ 1-7 两相流体的重位压降	54	四、不均匀加热对传热恶化的影响	102
一、均相流体的重位压降计算公式	54	五、对沸腾传热恶化的防护措施	104
二、非均相流体的重位压降计算公式	55	§ 2-6 水平管内沸腾时的传热	106
§ 1-8 两相流体的加速压降	55	一、水平管内沸腾传热的特点	106
		二、水平及微倾斜蒸发管上部管壁过热度的计算	107

三、水平及微倾斜蒸发管的传热恶化区	108	校验	162
§ 2-7 超临界压力下的传热	109	§ 3-6 分配联箱和汇集联箱的水动力学	162
一、超临界压力下大比热区工质的物理性质和传热规律	110	一、联箱的联接型式	162
二、超临界压力下大比热区的放热系数	110	二、分配和汇集联箱中压力变化值的计算	164
三、超临界压力下大比热区的传热恶化范围	113	三、各型联箱联接系统的流量偏差计算	166
第三章 工质在并联管内流动时的水动力学	114	§ 3-7 减小热偏差的方法	169
§ 3-1 热偏差	114	一、容许热偏差	169
一、基本概念	114	二、减小吸热不均匀性和流量偏差的方法	170
二、吸热不均匀性	115	§ 3-8 在蒸发管内工质的脉动性流动	173
三、流量偏差	118	一、自由波动和强迫波动	174
§ 3-2 水平蒸发管的水动力特性	120	二、管间脉动	174
一、水动力特性	120	三、整个锅炉的脉动	177
二、水动力特性的多值性	120	第四章 锅炉的水动力计算	179
三、产生水动力特性多值性原因的分析	123	§ 4-1 锅炉水动力计算的基础知识	179
四、各因素对水动力特性多值性的影响	124	一、管组划分和吸热量的分配	179
五、防止水动力特性多值性的方法	125	二、管组和管段的压降计算	181
六、水动力特性的稳定区	130	三、水动力特性曲线	182
§ 3-3 垂直蒸发管的水动力特性	131	§ 4-2 自然循环锅炉的水动力计算	183
一、一次上升或一次下降的蒸发管的水动力特性	131	一、循环回路和循环倍率	183
二、二回程垂直蒸发管的水动力特性	132	二、流动压头和有效压头	184
三、三回程垂直蒸发管的水动力特性	134	三、水动力计算步骤	185
四、多回程垂直蒸发管的水动力特性	135	四、循环故障及循环可靠性的校验	195
五、超临界压力垂直“蒸发管”的水动力特性	135	五、提高循环可靠性的方法及循环回路的设计	205
六、垂直蒸发管件水动力特性单值性的校验	136	六、自然循环锅炉的循环特性	208
七、加速压降对水动力特性的多值性的影响	136	§ 4-3 强制循环锅炉和低循环倍率锅炉的水动力计算	210
八、垂直蒸发管水动力特性的稳定区	138	一、工作特点	210
§ 3-4 热流量偏差	139	二、计算方法	210
一、并联水平管的热流量偏差	140	三、循环倍率的选取	211
二、并联垂直管的热流量偏差	145	四、流量的分配	211
三、各因素对热流量偏差的影响	150	五、工作可靠性的校验	212
四、减小热流量偏差的方法	152	§ 4-4 直流锅炉的水动力计算	214
§ 3-5 垂直蒸发管的流动故障	153	一、直流锅炉水动力计算的特点	214
一、垂直上升蒸发管内流动停滞和倒流	153	二、水动力特性曲线的绘制	214
二、上升-下降管件内空气的排除	160	三、工作可靠性的校验	215
三、上升-下降蒸发管内流动停滞的		四、直流锅炉受热面系统的设计原则	216
		第五章 锅炉汽水受热面在不稳定工况下的工作过程	217
		§ 5-1 基本概念	217

§ 5-2 锅筒型锅炉的不稳定工况.....219	区段高度252
§ 5-3 不稳定工况下锅筒型锅炉中的 压力变化速度.....220	七、锅筒中真实水位的决定255
§ 5-4 自然循环锅炉的容许压力变化 速度.....223	§ 6-3 蒸汽清洗设备的水动力学.....256
一、容许升压速度223	一、平清洗孔板不漏水工况的最小流速257
二、容许降压速度224	二、水平清洗孔板上水层高度的计算258
§ 5-5 不稳定工况下锅筒型锅炉中的 水位变化.....227	三、不出现干孔板区的极限蒸汽流速260
§ 5-6 直流锅炉的不稳定工况.....229	四、清洗孔板的阻力262
一、直流锅炉在不稳定工况下的工作 特点229	§ 6-4 旋风分离器的水动力学.....262
二、不稳定工况下直流锅炉中工质质 量的变化231	一、旋风分离器中的速度分布和压力 分布262
三、不稳定工况下直流锅炉中储蓄热 的变化233	二、在旋风分离器中水滴的分离过程264
四、直流锅炉在不稳定工况下的压力 变化速度233	三、锅内旋风分离器的改进措施266
第六章 锅炉汽水分离设备的水动 力学235	四、旋风分离器的临界负荷267
§ 6-1 描述汽水分离过程的方程式和 相似准则.....235	第七章 锅炉水动力计算的电子计 算机计算方法269
一、汽相和液相的运动方程式235	§ 7-1 在水动力计算中图表数据的处 理方法.....269
二、汽相和液相的连续性方程式236	一、用最小二乘法拟合曲线269
三、两相分界面上的压差方程式237	二、锅炉水动力计算中常用图表的拟 合公式274
四、两相分界面的力平衡及速度平衡 方程式237	三、多项式函数值的计算程序276
五、描述汽水分离过程的相似准则238	§ 7-2 锅炉水动力计算程序的标识符.....277
§ 6-2 汽泡穿过水层的流动.....241	§ 7-3 锅炉水动力计算用的几个基本 过程.....279
一、浮泡流动过程机理241	一、计算各回路各区段结构特性数据 的过程279
二、单个汽泡的浮泡流动243	二、用弦截法求根的过程284
三、脱离孔板的汽泡直径247	三、用拟牛顿法求根的过程287
四、汽泡穿过孔板时的流速及形成汽 垫的流速248	四、计算单相区段和双相区段压降的 过程292
五、在水平孔板下面汽垫层的厚度251	五、计算管子压降的过程292
六、浮泡流动时的截面含汽率和过渡	六、计算回路上升部分压降的过程295
	§ 7-4 自然循环锅炉的水动力计算框图.....297
	本书中常用的国际制单位与工程制 单位换算表299
	主要参考文献299

绪 论

蒸汽锅炉的工作可以大体归纳为三个过程：一是燃料的燃烧过程，二是将火焰或烟气的热量传给工质（水或蒸汽）的过程，三是水吸收热量生成蒸汽的过程。

就传热过程来说，用锅炉的金属受热面分界，则受热面外部烟气侧的传热可以统称为炉内传热，而由受热面金属向工质的传热则称为锅内传热。锅内传热主要是对流传热，管内的工质除了单相的水或蒸汽外，还有沸腾的两相的汽水混合物。在传热学中已经学过单相传热和沸腾传热的一般知识，本课程中着重研究管内沸腾传热和锅内一些特殊的传热问题。

锅炉水动力学是研究在锅炉内部的工质（水、蒸汽和汽水混合物）流动规律的科学，它也是与锅内传热密切相关的科学，特别是在沸腾时，两相流体力学与两相传热的关系比单相流体更密切并且复杂得多。例如，从管壁传热给水使水蒸发；由于水的蒸发使两相流体的流速和流动结构改变，它们又反过来影响到传热；更由于沿管长工质的热力特性和流动特性不断变化，流动和传热之间的关系就相当复杂了。因此，在研究两相传热时必须研究两相流动，而在研究两相流动时又必须考虑到工质吸热后两相之间的转变和它们间的相互作用。

关于两相传热（沸腾传热）的问题，早在十九世纪就已经开始研究了，但是，大量的研究工作还是在本世纪三十年代以后才开展起来的。两相流体力学也是如此。在第二次世界大战以后，由于核能技术的发展，更促进了此项研究工作的开展。目前，两相流体力学和两相传热已经形成专门的学科。虽然它们至今已有四十多年的历史，并且已积累了大量的研究资料，但在许多方面仍缺乏普遍公认的公式或结论。特别是随着生产技术的发展，又提出许多新的问题。因此，目前国内外都还在大力开展这方面的研究工作。

由于锅炉是由许多受热的和不受热的管子并联或串联组成的复杂系统，因此，锅炉水动力学所研究的内容不只局限于工质流动的一般规律，还要研究在不同类型的锅炉中和在各种运行工况下的流动规律性。此外，它还包括汽水分离设备的水动力学等内容。

众所周知，衡量一台锅炉质量的指标是运行的经济性和工作可靠性。现代大容量锅炉的工作可靠性在很大程度上决定于锅内传热和水动力工况。换句话说，研究锅炉水动力学和锅内传热的目的主要是解决锅炉工作可靠性的问题。

当然，它们也关系到锅炉运行的经济性。首先，保证锅炉工作可靠就是最大的经济性。例如，一台配30万千瓦机组的锅炉如果事故停炉一天，就少发电720万度。它的损失不仅是少发电，还直接影响到工农业生产，如果将后一损失也考虑进去，则30万千瓦锅炉停炉一天所造成的总损失将超过3000万元。换句话说，停炉几天所造成的损失就相当于建设电站的总投资。再退一步说，现代大容量锅炉起停一次所多消耗的费用也是一个相当可观的数字。

为了我国早日实现四个现代化的宏伟目标，必须加速电力建设的速度。为此，需要发展高参数大容量机组。采用高参数大容量机组不仅可以提高热效率，还可以节省大量的建设投资。目前，我国的发电锅炉绝大多数是自然循环锅炉，在发展亚临界压力以上参数的大容量锅炉时，需要提高自然循环锅炉的参数或扩大容量，或是采用直流锅炉和强制循环锅炉，这时，首先碰到的就是与锅炉水动力学和锅内传热有关的问题。

本课程所研究的内容不仅适用于锅炉，而且还适用于各种蒸汽发生器、热交换器和水冷原子能反应堆等。在采用新能源发电时，例如，原子能、太阳能（直接发电除外）、地热等，除了热能的能源和个别工质不同外，它们所用的传热和流体力学知识与一般锅炉完全相同，工业余热的利用更是如此。此外，在石油、化工等部门也广泛应用这方面的知识，本课程讲述的很多科研成果也正是来源于这些部门。

建国三十年来，我国在本课程领域内已开展了大量的科研工作和积累了丰富的实践经验，在此基础上，已经制订出我国自己的技术指导性文件——电站锅炉水动力计算方法（草案）。可以预期，在实现四个现代化的新长征中，在开发新能源的战斗过程中，我国的热能工程科技人员，将为发展本门学科做出更多的贡献。

第一章 锅炉水动力学基础

§ 1-1 流动特性参数

在锅炉的汽水受热面中，工质在管内流动的同时，从管壁吸收热量，使工质的比容和流速发生变化，并且还产生相变。为了表示流动过程中这种复杂的变化和研究在相变过程中两相之间的相互作用，必须引用许多新的流动特性参数。这些参数可分为两类，第一类是可以根据物质平衡或热量平衡方程式计算的参数，称为流量参数；第二类是代表流体（包括汽相、液相或汽水混合物）流动时真实的流动特性的参数，称为真实流动特性参数。下面分别介绍这两种参数。

一、流量参数

流量参数又分为质量流量参数和容积流量参数，各种参数以不同的方式来表征流经某管道截面的工质流量或每一相的流量。所谓质量流量是单位时间内流过的工质的质量，容积流量是单位时间内流过的工质的容积。它们分别用 M [kg/s] 和 Q [m³/s] 表示，必要时还在此两符号上加角标 “'” 和 “''” 分别代表液相或气相。

在流量参数中还包括在工质总流量中气相所占份额的参数，称为含汽率，又分为质量含汽率 α 和容积含汽率 β 两种。它们都是可以通过热量平衡计算出来的。

下面分别叙述各参数的定义及其相互关系。

1. 折算速度

汽水混合物是由汽和水两相混合组成的，我们将汽水混合物中的蒸汽单独流过整个管道截面时的速度称为蒸汽的折算速度 w''_0 。设管道的流通截面积为 f [m²]，蒸汽的质量流量和容积流量分别为 M'' 和 Q'' ，蒸汽的密度为 ρ'' ，则

$$w''_0 = \frac{M''}{f\rho''} = \frac{Q''}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-1)$$

同理可得水的折算速度为

$$w'_0 = \frac{M'}{f\rho'} = \frac{Q'}{f} \quad \text{m/s} \quad (1-2)$$

在实际情况下，这两种折算速度都是不存在的，也不可能测量出来的，它们都是用来代表汽和水的流量，在两相流体力学中，有时需要分析某一相单独流过管子截面时的压降，也要用到这个速度。在受热的蒸发管内，由于相变，此两值沿管长是变化的。

2. 质量流速

通过单位流通截面的工质的质量流量称为质量流速 ρw 。

$$\rho w = \frac{M}{f} \quad \text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)} \quad (1-3)$$

对于两相流体，也可以分别定义 $\rho' w'_0$ 和 $\rho'' w''_0$ 为水和蒸汽的质量流速，它们等于该相

流体的密度和折算速度的乘积。显然

$$\rho w = \rho' w'_0 + \rho'' w''_0 \quad (1-4)$$

即汽水混合物的质量流速等于水和蒸汽的质量流速之和。对于受热的蒸发管，如果沿管长的管径不变，在稳定流动下总的质量流速不变，而水和蒸汽的质量流速则沿管长是变化的。

3. 循环速度

在锅炉水动力学中，经常用到一个专用名词“循环速度”，它的定义是：质量流量等于汽水混合物流量的饱和水流过整个管道截面时的速度称为循环速度 w_0 ，即

$$w_0 = \frac{M}{f \rho'} = \frac{\rho w}{\rho'} \quad \text{m/s} \quad (1-5)$$

由上式可见，循环速度又等于工质的质量流速与饱和水密度之比。从它的定义可以看出，如沿管长管道截面不变，则它即是开始汽化点截面上的水的流速。对于受热的蒸发管，如沿管长管径不变，在稳定流动下，沿管长此循环速度也是不变的。

由式 (1-1)、(1-2) 和 (1-5) 可得

$$w_0 = w'_0 + w''_0 \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right) \quad (1-6)$$

$$\rho w = \rho' w_0 \quad (1-7)$$

应当再一次指出，以上三个参数虽然都被称为速度，但是，它们都是代表流量的参数。

4. 质量含汽率和容积含汽率

在汽水混合物中，蒸汽的质量流量与汽水混合物的总质量流量之比称为质量含汽率 x ；蒸汽的容积流量与汽水混合物的总容积流量之比则称为容积含汽率 β 。

$$x = \frac{M''}{M' + M''} = \frac{\rho'' w''_0}{\rho' w_0} \quad (1-8)$$

$$\beta = \frac{Q''}{Q' + Q''} = \frac{w''_0 f}{w'_0 f + w''_0 f} = \frac{w''_0}{w'_0 + w''_0} \quad (1-9)$$

将式 (1-9) 右端分子分母同除以 w''_0 并应用式 (1-6) 和 (1-8)，得

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{w'_0}{w''_0} - \frac{\rho''}{\rho'}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \quad (1-10)$$

此即质量含汽率与容积含汽率的关系式。

二、真实流动特性参数

真实流动特性参数代表流体的真实流动特性。由流体力学知，即使对于单相流体，沿管道截面各点工质的流速是不相同的，在研究流动时通常引用一个平均流速的概念。当汽水混合物在管内流动时，蒸汽的平均流速并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，向下流动时则相反。由于此两者的流速不等，即使知道了每一相的流量、管道尺寸和汽水的物理特性，也无法通过计算求出两者的速度，必须借助于试验数据。下面介绍此试验参数与其他各参数的关系。

1. 截面含汽率

如果通过试验能测出在某一管道截面上蒸汽所占的截面 f'' 与总截面 f 之比，则其余各种表征真实流动特性的参数都可以计算出来。我们称上述截面比值为截面含汽率 φ ，即

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

显然，水所占的截面比为

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

此值又称为真实容积含汽率。

2. 蒸汽和水的真实速度

知道截面含汽率 φ ，即可求出蒸汽和水的真实平均流速 w'' 和 w' 。

$$w'' = \frac{Q''}{f''} = \frac{Q''}{\varphi f} = \frac{w_0''}{\varphi} \quad \text{m/s} \quad (1-13)$$

$$w' = \frac{w_0'}{(1 - \varphi)} \quad \text{m/s} \quad (1-14)$$

如果知道汽水混合物的质量流速和质量含汽率，上述两流速也可按下式计算

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

$$w' = \frac{(\rho w)(1 - x)}{\rho'(1 - \varphi)} \quad (1-14a)$$

3. 滑移速度和滑移比

由于蒸汽与水的流速不同，在两者之间存在相对速度 w_{xd} 。

$$w_{xd} = w'' - w' \quad \text{m/s} \quad (1-15)$$

此相对速度又称为滑移速度。

蒸汽的速度与水的速度之比称为滑移比 S 。

$$\begin{aligned} S = \frac{w''}{w'} &= \left[\frac{(\rho w) x}{\rho'' \varphi} \right] \left/ \left[\frac{(\rho w)(1 - x)}{\rho'(1 - \varphi)} \right] \right. \\ &= \left(\frac{x}{1 - x} \right) \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi} \right) \end{aligned} \quad (1-16)$$

关于蒸汽与水之间存在相对速度的原因，后面还要作详细的叙述。当蒸汽的真实速度大于水的真实速度时， $w_{xd} > 0$ ， $S > 1$ ；反之， $w_{xd} < 0$ ， $S < 1$ ；当两者的速度相等时 $w_{xd} = 0$ ， $S = 1$ 。

4. 汽水混合物的真实密度和真实速度

取长度为 Δl 的一小段管子，设蒸汽和水所占的截面积分别为 f'' 和 f' ，蒸汽和水的密度分别为 ρ'' 和 ρ' ，则得在此管段内的汽水混合物的真实密度 ρ_h^s 为

$$\begin{aligned} \rho_h^s &= \frac{(\rho'' f'' + \rho' f') \Delta l}{f \Delta l} = \varphi \rho'' + (1 - \varphi) \rho' \\ &= \rho' - \varphi (\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-17)$$

如以符号 w_h^s 代表汽水混合物的真实速度，

$$\text{由} \quad \rho_h^s w_h^s = \rho w = \rho' w_0$$

故得汽水混合物的真实速度计算公式

$$w_h^s = \frac{\rho' w_0}{\rho' - \varphi (\rho' - \rho'')} \quad \text{m/s} \quad (1-18)$$

如前所述,实际上汽水混合物中蒸汽和水的流速不同,因此不存在所谓真实的汽水混合物的速度,它是一个折算的概念。

5. 近似的汽水混合物的密度和速度

要计算真实的汽水混合物的密度和速度,必须首先从试验求得截面含汽率 φ 值。然而,此 φ 值(或其他的试验系数)又与汽水混合物的密度(或速度)有关,因此,通常采用一种通过流量参数可以计算出来的近似值。所谓近似值与真实值的差别就是不考虑蒸汽和水之间存在相对速度,即 $w_{sd} = 0$, $S = 1$ 。由式(1-13)得

$$f'' = \frac{Q''}{w''}$$

同理

$$f' = \frac{Q'}{w'}$$

则截面含汽率 φ 可用下式表示。

$$\varphi = \frac{f''}{f' + f''} = \frac{\frac{Q''}{w''}}{\frac{Q''}{w''} + \frac{Q'}{w'}}$$

如果蒸汽的真实速度等于水的真实速度,则上式变为

$$\varphi = \frac{Q''}{Q'' + Q'} = \beta$$

即是说相对速度为零时, $\varphi = \beta$ 。将 β 值代入式(1-17)和(1-18)中以代替 φ 值,即得近似的汽水混合物的密度 ρ_h 和速度 w_h

$$\begin{aligned} \rho_h &= \rho' - \beta(\rho' - \rho'') = \rho' - \frac{(\rho' - \rho'')}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \\ &= \frac{\rho'}{1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)} \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-19)$$

或

$$\begin{aligned} \rho_h &= \rho' - \frac{w''(\rho' - \rho'')}{w'_0 + w''_0} = \frac{\rho' w_0}{w'_0 + w''_0} \\ &= \frac{\rho' w_0}{w_0 + w''_0 \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)} \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-19a)$$

再按

$$\rho_h w_h = \rho' w_0$$

可得近似汽水混合物速度的计算公式为

$$\begin{aligned} w_h &= w_0 \left[1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] = w'_0 + w''_0 \\ &= w_0 + w''_0 \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (1-20)$$

由于在一般水蒸汽表中直接查出的是比容,故上述各式中也可以将蒸汽和水的密度 ρ'' 和 ρ' 相应代之以比容 v'' 和 v' 的倒数。在式(1-19)中的近似密度也可以按下式计算。

$$\rho_h = \frac{1}{v_h} = \frac{1}{v' + \alpha(v'' - v')} \quad (1-21)$$

§ 1-2 锅炉水动力学基本方程式

在流体动力学中, 为了研究流体的运动规律, 应用了几个基本方程式, 例如, 连续性方程式、能量守恒方程式(即伯努利方程式)、流动方程式(纳维-司托克斯方程式)等。在锅炉水动力学中, 由于工质的物理特性与各状态参数之间的关系很复杂, 特别是两相流体的流动结构也很复杂, 因此不可能直接应用理论流体动力学的数学工具来解决实际的问题。在此情况下, 必须作一些简化的假设, 再在简化假设的基础上列出基本方程式, 并且, 在使用这些方程式时还得借助于一些试验系数。

在本节中着重介绍在锅炉水动力学中的几个简化的概念和实际应用的几个基本方程式。

一、几个简化概念

第一个简化就是将管道内工质(无论是单相流体还是两相流体)的流动作为一元流动处理, 无论是对于加热管或是不加热管, 在建立上述基本方程式时都只考虑工质的流速和压力在流动方向(轴向)的变化, 而不考虑其径向的变化, 即认为在流通截面上各点的流速和压力都相同。按照这个假定, 对于一个管道截面上的上述变量必须应用一个平均的概念, 例如, 在流体力学中就用过的平均流速的概念。所谓平均流速是一个假想的流速, 如果流通截面上各点的流体均以该流速通过该截面, 则所得流量与该流通截面上实际流速分布情况下的流量相同。还有一种平均流速的定义是按两种方式计算出的流体的动能相等。

第二个简化就是将两相流体看作不可压缩流体。在锅炉蒸发受热面的水动力计算中不仅将水看作不可压缩流体, 蒸汽也被看作不可压缩流体。所谓不可压缩流体并不是说蒸汽是不可压缩的, 蒸汽的比容是与压力有关的, 当汽水混合物在管道内流动时会产生压降, 但是, 此压降与它的绝对压力相比, 还是很小的, 因此, 在计算一段管段的压降时, 蒸汽的比容(和密度)按管道的起点或终点的压力选取, 不考虑沿管长压力变化对它们的影响, 这就是不可压缩流体的概念。当然, 对于加热管道, 蒸汽的体积是随着水的蒸发而不断增加的, 但此时认为每 kg 蒸汽的比容不变。显然, 当管道的压降与工质的绝对压力的比值较大时, 就必须按可压缩流体处理。

第三个简化是在研究两相流体的流动时预先假设两相流体的流动模型, 目前已采用的简化模型主要有三种。

1. 均相流模型

这是一种最简单的处理方法, 按这种模型将两相流体看作均质的单相流体, 可以应用单相流体的各种方程式。这种均相流体具有一种假拟的特性, 这种假拟的特性是将每一相的特性通过适当的方式综合得来的。

2. 分相流模型

在这种方法中人为地将两相流体分隔开来, 此时可以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。在这种方程式中分别表示出每一相的流通截面或流速, 必要时还需要知道两相之间的相互摩擦作用力。

3. 流动式样模型