

锅内过程

华北电力学院 马建隆 主编

水利电力出版社

锅 内 过 程

华北电力学院 马 建 隆 主 编

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书着重阐述现代大、中型火力发电厂锅炉内部工作过程的本质。全书共分六章，内容包括：两相流体的流体动力特性；锅炉蒸发管内的沸腾传热；自然循环锅炉水循环计算和试验方法；强制循环锅炉和低循环倍率锅炉的水动力计算；直流锅炉的水动力计算；蒸汽净化等。

本书可作为“电厂热动力”专业的教材，也可供有关的工程技术人员参考。

锅 内 过 程

华北电力学院 马建隆 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.5印张 231千字

1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷

印数0001—2610册 定价2.50元

书号 15143·5930

前 言

本书系根据1982年在武汉召开的高等学校水利电力类专业座谈会制定的电厂热能动力专业教学计划和1983年3月昆明会议讨论通过的编写大纲编写的全国试用教材。

上述武汉会议指出：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；在内容上适当扩大知识面，不局限于目前我国热能动力工程专业所用的范围；在联系实际上，以电厂热能动力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。

本书中采用我国法定计量单位。由于我国目前尚采用工程单位制，为了便于过渡，书中引用了原来是工程单位制的图表，在换算成法定单位时均直接标出换算系数。为便于应用，本书还附有常用物理量的单位换算表。

本书由华北电力学院马建隆同志主编，其中绪论、第二、四、五章由马建隆同志编写，第一、三、六章由华北电力学院邓诗哲同志编写。

本书承蒙南京工学院范从振教授进行了认真的审阅，并提出了不少宝贵的意见。在此表示感谢。

编 者

1985年5月

本书常用符号

一、符 号

A、*B*、*C* 系数。

CHF 临界热负荷，
 kW/m^2 。

C 系数，份额。

c 比热， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

D 锅炉负荷、蒸汽
流量， kg/s 或
 T/h 。

d 直径， m 或 mm 。

DNB 偏离核沸腾。

FDB 旺盛沸腾。

f 流通截面积，
 m^2 。

G 给水流量， kg/s 或 T/h 。

H 总高度， m ；受
热面面积， m^2 。

h 高度， m 。

i 工质的焓， kJ/kg 。

\Delta i 欠焓， J/kg ；
欠热， kJ/kg 。

K 循环倍率，修正系
数。

L 总长度， m 。

l 长度， m 。

NPSH 净正吸水压头，
 m 。

ONB 泡态沸腾开始点。
始沸点。

\Delta p 压降，阻力损失，
 N/m^2 。

Q 吸热量， kW 或
 kJ/kg 。

q 受热面热负荷，
 W/m^2 或 kW/m^2 。

R 总折算阻力系数。

S 汽水滑移比；有效
压头 N/m^2 ；含盐
量 mg/kg 。

V 体积， m^3 ；容
积流量， m^3/s 。

x 汽水混合物的质量
含汽率。

Y 工质的压差，
 N/m^2 。

Z 每米高度的流动阻力系数, m^{-1} 。
 α 水平倾斜角, $^{\circ}$; 放热系数 $kW/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。
 β 汽水混合物的容积含汽率; 管子外径与内径之比。
 η 不均匀性系数。
 λ 摩擦阻力系数; 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 $Pa \cdot s$ 。
 ν 工质的运动粘度系数, m^2/s 。
 ξ 局部阻力系数。
 ρw 质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$ 。
 σ 表面张力系数, N/m 。
 Φ 两相流体与单相流体的摩擦压降比。
 φ 截面含汽率。
 Ψ 两相流体摩擦阻力修正系数。
 ω 湿分。

二、上 下 角 标

0 原始工况或平均工况。
 b 管壁的, 壁面的; 作为上角标时代表单位值。
 bh 饱和的。
 bn 循环泵的。
 c 出口值。
 d 额定值; 低位置。
 dl 对流的; 倒流的。
 dq 带汽引起的。
 dx 单相的。
 fj 附加值。
 fl 分配联箱的; 分离器的。
 ft 沸腾。
 g 管子的; 作为上角标时代表沿高度的。
 gd 管段的; 过渡的。
 gl 锅炉的。
 gr 过热的; 过热器的。
 gs 给水的。
 gz 管组的。
 hu 混合物的。
 j 计算值; 进口值; 金属的。
 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; 沿宽度的(上角标)。
 ld 流动的。

lj 临界值。
mc 摩擦的。
n 内部的。
nb 内壁的。
p 定压的；水平的（上角标）。
pf 泡态沸腾。
pj 平均的。
q 蒸汽或气体的；炉墙的（上角标）。
qb 汽包的。
rh 加热后区段。
rq 加热前区段。
rs 加热水区段。

slb 水冷壁的。
sm 省煤器。
ss 上升的；上升管的。
tz 停滞的。
w 外部的。
xd 相对的。
xj 下降的；下降管的。
xs 吸水管的。
yc 引出管的。
yh 氧化层。
ys 压水管的。
yx 有效值。
zf 蒸发的。
zw 重位的。

绪 论

蒸汽锅炉的工作可以大体归纳为三个过程即：燃料在炉膛内的燃烧过程，火焰和烟气的热量传给工质（水或蒸汽、空气）的过程与水吸收热量生成蒸汽和进一步过热的过程。

就传热过程来说，以锅炉的金属受热面为分界，则受热面外部烟气侧的传热（辐射和对流）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。锅内传热以对流传热为主，金属管内的工质除了单相的水或蒸汽外，还有沸腾的两相混合物。

通常把燃料的燃烧过程和炉内传热过程称为炉内过程，而把锅内传热过程和水的蒸发与过热过程以及蒸汽带盐过程称为锅内过程。

在研究锅内过程时，除须掌握单相传热和沸腾传热的知识外，还要掌握锅炉内部工质（水、蒸汽和汽水混合物）的流动规律，即锅炉水动力学的知识。在传热学中已经学过单相传热和沸腾传热的一般知识，故本课程着重研究管内沸腾传热和锅内一些特殊的传热问题。

在沸腾时，两相流体的结构与两相传热的关系比单相流体更密切并且复杂得多，例如：从管壁传热给水并使之蒸发；由于水的蒸发使两相流体的流速和流动结构发生变化，它们又反过来影响传热；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更加复杂了。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的转变和它们的相互作用。

关于两相传热（沸腾传热）的问题，早在十九世纪就已有人开始研究了，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，两相流体力学也是这样。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迅速发展。目前，两相传热和两相流体力学已经形成专门的学科。虽然它们已有近五十年的历史，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，又提出许多新的课题。因此，目前国内外都还在大力开展这方面的研究工作。

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，还需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，研究锅内过程的目的主要是解决锅炉工作可靠性的问题。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，而正常的金属工况决定于三个条件：一是保证有足够的机械强度；二是金属不因温度过高而在管壁表面生成氧化层；三是不容许金属壁温长期波动。当金属的温度升高时，它的持久强度下降，如果金属温度超过按强度计算容许的温度值，则锅炉受热面长期工作的可靠性就不能保证。当锅炉钢管的外壁温度升高到某一数值时，管子外壁面上将形成氧化层，甚至使金属的结构发

生改变从而使其强度下降。当金属管壁温度长期波动时，即使金属温度并未超过上述容许温度，也会导致由于氧化层脱落和金属疲劳破坏。这种受热面的金属温度波动主要是由于管内工质的冷却条件变化而引起的。

此外，研究锅内过程也关系到锅炉运行的经济性，例如净化蒸汽、防止蒸汽的机械性和选择性携带盐分以避免在过热器管及汽轮机叶片上的结垢等。另外，在保证锅炉水循环的安全运行条件前提下，改变锅炉受热面的结构和金属材质以节省金属消耗量以及使其便于快速启停以减少锅炉启停时的消耗费用等，均影响到锅炉运行的经济性。

自从党的十一届三中全会以来，在党中央的正确领导下，我国的工、农、商等各行各业均有大的发展，从而使我国的电力工业和发电设备制造业有了更快的发展。目前我国已批量生产200MW和300MW的汽轮发电机组，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实现四个现代化所亟需的动力。为此，就需要设计制造高参数、大容量、高效率的电站锅炉。目前我国的电站锅炉绝大多数是自然循环锅炉，也有不少亚临界压力以上参数的大容量直流锅炉和强制循环锅炉。

建国三十多年来，我国在锅内过程领域内已开展了大量的科学研究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）》。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必将为发展本门学科做出更多的贡献。

目 录

前 言

本书常用符号

绪 论

第一章 两相流体的流体动力特性 1

§ 1-1 流动特性参数 1

§ 1-2 两相流体在管内的流动 6

§ 1-3 两相流体的截面含汽率和滑动比 15

§ 1-4 两相流体的流动压降 33

第二章 锅炉蒸发管内的沸腾传热 56

§ 2-1 概述 56

§ 2-2 垂直管内的沸腾传热 66

§ 2-3 沸腾传热恶化区 82

§ 2-4 水平管内的沸腾传热 111

§ 2-5 超临界压力下的传热 118

第三章 自然循环锅炉水循环计算和试验方法 128

§ 3-1 概述 128

§ 3-2 复杂回路的水循环计算 141

§ 3-3 循环可靠性的校验和提高循环可靠性的措施 154

§ 3-4 压力变动速度对循环可靠性的影响 191

§ 3-5 水循环试验方法 201

第四章 强制循环锅炉和低循环倍率锅炉的水动力计算 215

§ 4-1 强制循环锅炉的水动力计算和可靠性的检验 215

§ 4-2 低循环倍率锅炉的水动力计算和可靠性的检验 225

第五章 直流锅炉的水动力计算 231

§ 5-1 直流锅炉的水动力计算	231
§ 5-2 直流锅炉的不稳定工况	269
第六章 蒸汽净化	278
§ 6-1 概述	278
§ 6-2 蒸汽溶盐的规律和蒸汽流程中盐类的沉淀	280
§ 6-3 蒸汽清洗	298
§ 6-4 热化学试验	313
附录 常用物理量的单位换算表	322
主要参考文献及资料	324

第一章 两相流体的流体动力特性

§ 1-1 流动特性参数

在锅炉水动力计算中，引用了许多流动特性参数。这些参数可分为两类：一类是由质量平衡或热量平衡方程式计算的参数——流量参数；另一类是流体流动时真实的流动特性参数——真实流动特性参数。下面简要的介绍各参数的定义、以及各参数之间的关系。

一、流量参数

1. 质量流速 ρw

流经单位截面的工质质量流量称为工质的质量流速，可用下式计算

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

式中 G —— 工质的质量流量， kg/s ；

f —— 流通截面积， m^2 ；

ρ 、 w —— 工质的密度 (kg/m^3) 和流速 (m/s)。

当蒸发管中稳定流动时，流经任何截面的质量流量是不变的。

$$G = G_{hu} = (G - D) + D \quad \text{kg/s} \quad (1-1a)$$

式中 G_{hu} 、 D —— 混合物和蒸汽的质量流量， kg/s 。

如果蒸发管的管径不变，在稳定流动时，流经任何截面的质量流速也不变，即

$$\rho' w_0 = \rho_{hu} w_{hu} = \rho' w'_0 + \rho'' w''_0 = \rho w \quad \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-1b)$$

式中 ρ' 、 ρ'' ——汽包压力下饱和水和饱和蒸汽的密度， kg/m^3 ；

ρ_{hu} 、 w_{hu} ——汽水混合物的密度 (kg/m^3) 和流速 (m/s)；

w'_0 、 w''_0 ——水和蒸汽的折算流速， m/s 。

2. 循环流速 w_0

质量流量等于管内汽水混合物流量的饱和水，流经整个管截面的速度称为循环流速

$$w_0 = \frac{G}{\rho' f} = \frac{\rho w}{\rho'} \quad \text{m/s} \quad (1-2)$$

在自然循环锅炉中，由于锅水欠焓不大，一般可用蒸发管入口处水的流速代替循环流速 w_0 。

3. 折算流速（或引用流速、假想流速）

在两相流体中，假设蒸汽占据整个管截面流动时的流速称为蒸汽的折算流速 w''_0

$$w''_0 = \frac{D}{\rho'' f} = \frac{V''}{f} = w_{hu} - w'_0 = \frac{w_{hu} - w_0}{1 - \frac{\rho''}{\rho'}} \quad \text{m/s} \quad (1-3)$$

同理，可得水的折算流速 w'_0

$$\begin{aligned} w'_0 &= \frac{G-D}{\rho' f} = \frac{V'}{f} = w_0 - w''_0 \frac{\rho''}{\rho'} = w_{hu} - w''_0 \\ &= \frac{w_0 \rho' - w_{hu} \rho''}{\rho' - \rho''} \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (1-4)$$

上述两式中 V'' 、 V' ——蒸汽和水的容积流量， m^3/s 。

4. 质量含汽率 x

在两相流体中，蒸汽的质量流量与汽水混合物质量流量的比值称为质量含汽率 x

$$x = \frac{D}{G} = \frac{w_0'' \rho''}{w_0' \rho' + w_0'' \rho''} \quad (1-5)$$

5. 容积含汽率 β

在两相流体中，蒸汽的容积流量与汽水混合物容积流量的比值称为容积含汽率 β

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{V''}{V_{hu}} = \frac{V''}{V' + V''} = \frac{w_0''}{w_0' + w_0''} = \frac{w_0''}{w_0' + w_0'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \left(\frac{1}{x} - 1\right)} = \frac{(w_{hu} - w_0) \rho'}{w_{hu} (\rho' - \rho'')} \quad (1-6) \end{aligned}$$

式中 V_{hu} ——汽水混合物的容积流量， $V_{hu} = V' + V''$ ， m^3/s 。

6. 汽水混合物密度 ρ_{hu}

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 ρ_{hu}

$$\begin{aligned} \rho_{hu} &= \frac{\rho' V' + \rho'' V''}{V_{hu}} = \frac{w_0' \rho' + w_0'' \rho''}{w_{hu}} = (1 - \beta) \rho' + \beta \rho'' \\ &= \rho' - \beta (\rho' - \rho'') = \frac{\rho'}{1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)} \quad \text{kg/m}^3 \end{aligned} \quad (1-7)$$

7. 汽水混合物流速 w_{hu}

流经单位截面的汽水混合物容积流量称为汽水混合物流速

$$w_{hu} = \frac{V_{hu}}{f} = \frac{V' + V''}{f} = w_0' + w_0'' = w_0' + w_0'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)$$

$$\begin{aligned}
 &= w_0 \left[1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \\
 &= \frac{w_0}{1 - \beta \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)} \quad \text{m/s} \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

以上几个参数，都是由质量平衡或热平衡方程式计算得到的，没有考虑两相流体中汽、水流速不同，属于流量参数。

二、真实流动特性参数

1. 截面含汽率 φ

在蒸发管某截面处，蒸汽所占的截面积 f'' 与管子截面积 f 的比值称为截面含汽率 φ

$$\varphi = \frac{f''}{f} \quad (1-9)$$

水所占的截面比应为

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

上述两式中 f'' 、 f' —— 两相流体中蒸汽和水所占的管截面积， m^2 。

2. 蒸汽和水的真实流速 w'' 和 w'

蒸汽的真实流速 w'' 应为蒸汽容积流量 V'' 与蒸汽所占管截面积 f'' 的比值

$$w'' = \frac{V''}{f''} = \frac{V''}{\varphi f} = \frac{w_0''}{\varphi} = w_{hu} \frac{\beta}{\varphi} \quad \text{m/s} \quad (1-10a)$$

同理，水的真实流速 w' 应为

$$w' = \frac{V'}{f'} = \frac{w_0'}{1 - \varphi} = w_{hu} \frac{1 - \beta}{1 - \varphi} \quad \text{m/s} \quad (1-10b)$$

3. 蒸汽对水的相对流速 w_{xq}

蒸汽的真实流速与水的真实流速之差称为蒸汽对水的相对流速 w_{sd} 。

$$w_{sd} = w'' - w' = \frac{w_0''}{\varphi} - \frac{w_0'}{1-\varphi} = w_{hu} \left(\frac{\beta}{\varphi} - \frac{1-\beta}{1-\varphi} \right) \quad \text{m/s} \quad (1-11)$$

4. 滑动比 S

蒸汽的真实流速 w'' 与水的真实流速 w' 的比值称为滑动比 S 。

$$\begin{aligned} S = \frac{w''}{w'} &= \left(\frac{x}{1-x} \right) \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) \\ &= \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) \end{aligned} \quad (1-12)$$

5. 汽水混合物的真实密度 $\rho_{hu.s}$

按汽、水所占管截面计算的汽水混合物密度称为汽水混合物的真实密度 $\rho_{hu.s}$ 。

$$\rho_{hu.s} = \varphi \rho'' + (1-\varphi) \rho' = \rho' - \varphi(\rho' - \rho'') \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-13)$$

6. 汽水混合物的真实流速 $w_{hu.s}$

$$\text{因} \quad \rho w = \rho' w_0 = \rho_{hu.s} w_{hu.s}$$

$$\text{所以} \quad w_{hu.s} = \frac{\rho' w_0}{\rho_{hu.s}} = \frac{\rho' w_0}{\rho' - \varphi(\rho' - \rho'')} = \frac{w_0}{1 - \varphi \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)} \quad \text{m/s} \quad (1-14)$$

以上几个参数，考虑了两相流体中汽、水的流速不同，属于真实流动特性参数，