

271

工业锅炉的自然循环

范柏樟 编著



国防工业出版社

工业锅炉的自然循环

范柏樟 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共两部分。在第一部分中,通过例题向读者介绍了蒸汽锅炉自然循环计算的全过程。在第二部分中,介绍了热水锅炉自然循环的简便算法。

本书可供从事工业锅炉的设计、运行、检修方面的工程技术人员、工人以及大专院校有关专业的师生参考。

工业锅炉的自然循环

范柏樟

国防工业出版社

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北涿中印刷厂印装

787×1092 $1/32$ 印张4 $1/8$ 88千字

1987年9月第一版 1987年9月第一次印刷 印数: 0,001—4,920册

ISBN7-118-00113-9/TK3 定价: 0.88元

前 言

热工、强度、水动力和烟风阻力计算是锅炉设计中的四大计算，自然循环计算是水动力计算中的核心部分。在目前从事工业锅炉设计和改装的技术人员中，相当多数的人对自然循环的机理领会不深，而掌握自然循环计算方法者为数更少。为了提高锅炉设计、改装的质量与水平，有必要对有关人员进行自然循环理论知识和计算方法的培训。

关于自然循环，社会上已出版过一些著作，如：

《锅炉水动力学及锅内传热》，黄承懋编著，机械工业出版社，高等院校教材；

《锅炉原理》（下册），陈学俊、陈听宽主编，机械工业出版社，高等院校教材；

《锅炉机组水力计算标准方法》，〔苏〕B. A. 洛克申等编，董祖康、王孟浩、李守恒译，电力工业出版社。

作为高等院校教材，侧重在理论方面，不可能详细叙述计算方法；而作为计算标准，则不包含理论上的说明，而且为了全面覆盖各种情况，内容比较庞杂。这两类著作，对读者们无疑是必要和有益的，但通过自学而要致用，则有较大难度。因此，作者立意针对工业锅炉的自然循环编写一本理论与实际相结合的、份量不多、难度不大的小册子，以简要、浅明、实用为原则，使读者有可能通过自学而掌握自然循环的计算方法。

本书分为两大部分。第一部分是蒸汽锅炉的自然循环，在这一部分中没有作者自己的创造性内容，只是根据工业蒸汽锅炉自然循环计算的需要，在作了必要的基本概念叙述的

基础上，对各计算步骤和项目进行比较具体和详细的解释，最后通过计算举例向读者显示了自然循环计算的全过程。在叙述中根据工业锅炉的实际情况对标准方法的少量内容作了无伤大局的简化。

第二部分是热水锅炉的自然循环。目前自然循环热水锅炉正在兴起，但是尚无标准的、法定的自然循环计算方法，一般是套用蒸汽锅炉的计算方法。前几年中，作者对热水锅炉自然循环的特点进行了研究、探讨，创拟了一套自成体系的、简捷的计算方法。经过在几届学生毕业设计中的试用，作者认为可以推广应用于生产设计，经受实践的检验。为使读者了解本方法的来龙去脉，对推导过程作了详细的叙述，在写法上不同于第一部分。本部分也列有计算实例，以使读者掌握计算的全过程。作者无意将本方法强加于人，也不认为本方法已趋完善，欢迎读者在应用过程中发现问题、积累经验、提出修改意见和建议，大家一起来发展和完善热水锅炉的自然循环计算方法。

为了逐步向法定计量单位过渡，同时又要避免与目前大家的习惯脱节，本书内同时用法定计量单位制和工程计量单位制进行叙述。第一部分的例题用工程单位制进行计算，第二部分则采用法定计量单位制。

作者水平有限，书中有错误不当之处，望读者不吝指正。

作 者

目 录

主要符号	1
第一部分 蒸汽锅炉的自然循环	
第一章 自然循环基本概念	3
1-1 循环回路与循环的形成	3
1-2 汽水双相流体基本特性	7
1-3 汽水混合物的流速	11
1-4 循环倍率	13
第二章 回路循环特性与循环故障	15
2-1 回路的循环特性	15
2-2 循环故障	16
2-3 全循环特性曲线	20
2-4 下降管工况对循环可靠性的影响	24
2-5 循环回路结构布置的一般原则	25
第三章 自然循环计算与循环可靠性检验	26
3-1 热工基本数据的准备	28
3-2 回路结构特性数据的准备	33
3-3 回路产汽量计算	35
3-4 下降管阻力计算	37
3-5 开始沸腾点高度的确定	38
3-6 各管段产汽量的确定	41
3-7 上升管阻力计算	42
3-8 流动压头与有效压头计算	44
3-9 工作点的确定	46
3-10 循环可靠性的检验	47
第四章 自然循环计算举例	51
4-1 热工基本数据	52

4-2 回路结构特性	53
4-3 上升管的分段	54
4-4 回路产汽量计算	55
4-5 下降管阻力计算	55
4-6 开始沸腾点位置与含汽管段高度的确定	56
4-7 各管段产汽量与汽水双相流体含汽率的确定	57
4-8 上升管阻力计算	59
4-9 流动压头与有效压头计算	60
4-10 确定工作点	62
4-11 循环可靠性的检验	63

第二部分 热水锅炉的自然循环

第五章 热水锅炉自然循环的特点	68
-----------------------	----

5-1 水的重度和重度差	68
5-2 自然循环热水锅炉的水系统	72
5-3 热水锅炉的循环倍率	73
5-4 循环回路内水的温度水平	76

第六章 简单回路的循环流量计算	83
-----------------------	----

6-1 基本公式	83
6-2 计算的简化处理	87
6-3 影响循环流量的因素	91
6-4 下降管受热的考虑	96
6-5 循环流量计算举例	98

第七章 受热不均匀与水温偏差	106
----------------------	-----

7-1 结构相同上升管的并列工作	106
7-2 结构不同上升管的并列工作	110
7-3 复杂回路	117

第八章 过冷沸腾的预防	121
-------------------	-----

8-1 避免发生过冷沸腾的条件	121
8-2 最不利位置的确定	124

主要符号

一、物理量符号

符号	物 理 量	符号	物 理 量
D	蒸汽重量流量, 产汽量	b	循环回路所占的炉墙宽度
F	辐射受热面占据的炉墙面积	c	比热容量 (比热)
G	水或汽水混合物重量流量	d	管径
H	受热面面积	e	管子中心线与炉墙内面的距离
K	循环倍率	f	管内流通截面积
Q	吸热量	g	重力加速度
S	压头	h	高度
V	体积流量	i	比焓
Z	总阻力系数	k	管内壁绝对粗糙度
α	管段的仰角; 对流换热系数	l	长度
β	汽水混合物的容积含汽率	n	并列工作管子的根数
γ	重度	p	压力 (压强)
ζ	局部阻力系数	q	热流密度
η	不均匀系数	r	汽化潜热
λ	摩擦阻力系数	s	管子中心距 (节距)
ρ	密度	t	温度
φ	汽水混合物截面含汽率	v	比容 (比体积)
ψ	双相流体摩擦阻力修正系数	w	流速
Δp	压降, 阻力	x	角系数; 汽水混合物重量含汽率
Δi	焓增, 欠热	$w\gamma$	重量流速
δt	温升		

二、下角标符号

符号	含 义	符号	含 义
	(以汉语拼音为基础的)	<i>bh</i>	饱和的
<i>b</i>	壁面的, 比的	<i>dl</i>	对流的, 当量的
<i>c</i>	超出锅筒水位的	<i>gr</i>	过热的
<i>d</i>	低于锅筒水位的, 倒流的	<i>gs</i>	给水的
<i>g</i>	锅炉的, 锅筒的, 各管子之间的	<i>hs</i>	回水的
<i>h</i>	回路的, 各回路之间的	<i>lj</i>	临界的
<i>j</i>	局部的, 加热的, 结构的	<i>rs</i>	热水的
<i>l</i>	流动的	<i>sm</i>	省煤器的
<i>m</i>	摩擦的		
<i>n</i>	内的		(以物理量符号为基础的)
<i>q</i>	汽的, 含汽的, 各墙间的	<i>G</i>	流量的
<i>s</i>	水的, 上升的, 上部的	<i>t</i>	温度的
<i>t</i>	停滞的	α	角度的
<i>x</i>	下降的, 下部的	<i>L</i>	长度的
<i>y</i>	引出的, 有效的, 压头的	<i>p</i>	压力的
<i>z</i>	自由水面的		

三、上角标符号

符号	含 义	符号	含 义
'	入口的, 饱和水的	•	停滞管的
''	出口的, 饱和汽的	••	倒流管的

第一部分 蒸汽锅炉的自然循环

第一章 自然循环基本概念

1-1 循环回路与循环的形成

锅炉中工质的自然循环是在循环回路中进行的。最简单的循环回路由上锅筒、下降管、下集箱、上升管构成，如图 1-1 所示，是一个闭合的回路。其中上升管不是单根的管子，而是并联工作的管组，例如布置在炉膛内的辐射受热面管屏（水冷壁）和布置在对流烟道中的对流受热面管束；下降管可以是单根的管子，但多数情况下也是由数根并联工作的管子以至管束构成。下集箱是连接、沟通下降管与上升管的下端结合部，一般情况下，每个循环回路具有其专用的下集箱。当上升管和下降管都是管束时，下集箱改为下锅筒。上锅筒是全锅炉所有循环回路共用的，是上升管与下降管的上端结合部。上锅筒不仅是循环回路的组成部分，而且也是连接省煤器（给水预热器）、汽化受热面和蒸汽过热器的枢纽，又是进行汽水分离过程的场所。

在有些循环回路中，上升管汇集于上集箱，再由汽水引出管将上集箱与上锅筒连接起来，如图 1-2 所示。这种循环回路仍旧属于简单循环回路。

原则上对于每一个上升管组应该建立其独立的简单循环回路。不同工况的上升管组用共同的循环回路部件（除上锅筒本属共用以外，如下降管、下集箱、上集箱或汽水引出管）连接在一起时，就构成复杂的循环回路，如图 1-3 所示。

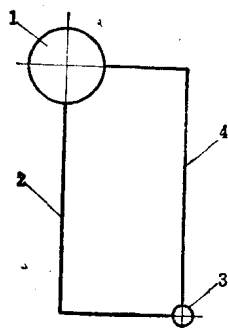


图1-1 简单循环回路

1. 上锅筒; 2. 下降管;
3. 下集箱; 4. 上升管。

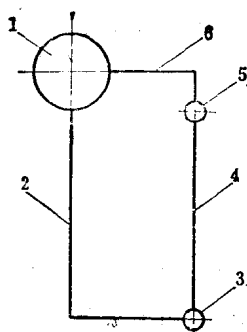


图1-2 带有上集箱的简单循环回路

1. 上锅筒; 2. 下降管;
3. 下集箱; 4. 上升管;
5. 上集箱; 6. 汽水引出管。

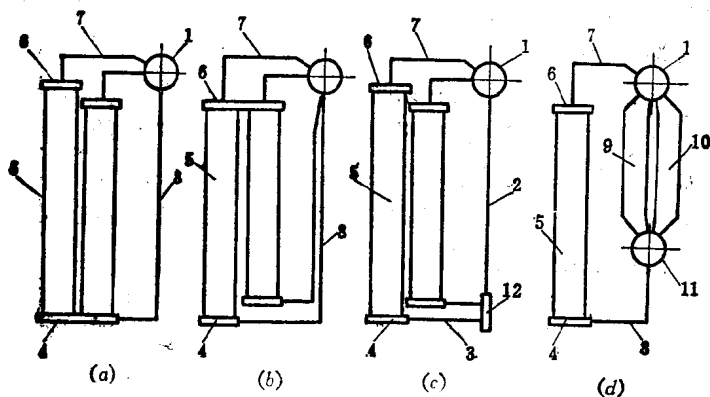


图1-3 复杂的循环回路

1. 上锅筒; 2. 集中下降管; 3. 锅水引入管; 4. 下集箱;
5. 上升管 (管屏); 6. 上集箱; 7. 汽水引出管; 8. 下降管;
9. 上升管 (管束); 10. 下降管 (管束); 11. 下锅筒;
12. 分水集箱。

在简单循环回路中，上升管组中并列工作的管子也会在不同的工况下工作（如受热状况不同，几何结构有异等），通常按管组的平均工况进行自然循环计算，而在检验可靠性时再考虑特殊因素。

工质在循环回路中自然循环的形成，取决于两个条件，

1. 上升管与下降管受热不同——上升管受热而下降管不受热（如在水冷壁循环回路中），或者上升管受热强而下降管受热弱（如在对流管束循环回路中）。

2. 由上升管进到上锅筒内的汽水混合物要经过良好的汽水分离，使进入下降管进行循环的工质只是锅水，而不含蒸汽。

图 1-4 是简单循环回路中的自然循环原理图。

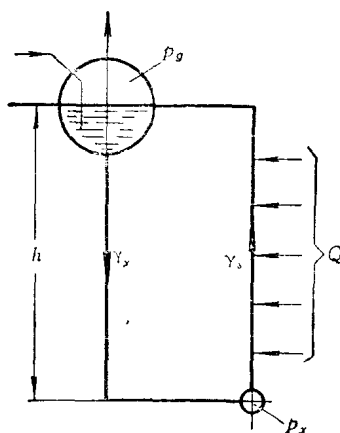


图1-4 自然循环原理图

循环回路充水后，在未进行加热时，回路内的工质是静止的。当上升管受热而下降管不受热（或上升管受热强而下

降管受热弱)时, 上升管内工质的密度小而下降管内工质的密度大, 在此密度差的作用下, 形成工质从下降管通过下集箱(或下锅筒)向上升管的定向流动。

在加热工况稳定的情况下, 流动工况也逐渐达到稳定。此时, 上升管内的工质处于汽水混合物的双相状态, 而下降管内则是单相的水(或者上升管内是含汽率较大的双相流体而下降管内是含汽率较小的双相流体)。出自上升管的双相流体经过汽水分离后, 饱和汽去到上锅筒的汽空间, 而饱和水则通过上锅筒的水空间再回入下降管, 从而形成水的循环流动。

如图 1-4 所示, 上锅筒内工质压力为 p_g , 下集箱内工质的压力为 p_x , 上升管内工质的平均重度为 γ_r , 下降管内工质的平均重度为 γ_x , 循环回路的高度为 h 。上升管中工质向上流动, 其流动阻力为 Δp_r , 下降管中工质向下流动, 其流动阻力为 Δp_x 。

下集箱内工质压力 p_x 是大于上锅筒内工质压力的, 两者间的压差为 $(p_x - p_g)$ 。

从上升管系统来看, 此压差用于承受系统内工质的静压和克服上升系统流动阻力, 即

$$p_x - p_g = h\gamma_r + \Delta p_r \quad (1-1)$$

从下降管系统来看, 此压差等于系统内工质的静压扣去下降系统流动阻力, 即

$$p_x - p_g = h\gamma_x - \Delta p_x \quad (1-2)$$

合并以上两式, 稍加整理, 即得

$$h(\gamma_x - \gamma_r) = \Delta p_r + \Delta p_x \quad (1-3)$$

式子等号左边是由工质重度差形成的自然循环动力, 称为流动压头, 用符号 S_i 表示。等号右边是整个循环回路中工

质流动的阻力。

动力克服阻力，两者相等，达到动态平衡，就形成稳定的自然循环。此时有

$$S_l = \Delta p_r + \Delta p_x = \Sigma \Delta p \quad (1-4)$$

流动压头中减去上升管阻力后，所得的叫做有效压头，用符号 S_y 表示，即

$$S_y = S_l - \Delta p_r = \Delta p_x \quad (1-5)$$

所以，有效压头是用来克服下降管阻力的那部分循环动力。

由式 (1-5) 和式 (1-2) 可得

$$S_y = h \gamma_x - (p_x - p_g) \quad (1-6)$$

由式 (1-3) 可知，循环动力（流动压头）决定于下降管与上升管中工质的重度差和循环回路高度。循环动力越大，所能克服的阻力也越大，就意味着回路内工质的流量越大，循环越强烈。

1-2 汽水双相流体基本特性

一、汽水混物流体的成分

1. 质量含汽率

当汽水混合物的质量流量为 G ，其中所含的蒸汽的质量流量为 D 时，两者之比称为汽水混合物的质量含汽率，用符号 x 表示，即

$$x = \frac{D}{G} \quad (1-7)$$

式中 x —— 汽水混合物的干度。

D 和 G 的单位是 kg/h (在采用工程单位制时， x 为重量含汽率，而 D 和 G 为重量流量，单位是 kgf/h)。

2. 容积含汽率

当汽水混合物的容积流量为 V ，其中所含的蒸汽的容积流量为 V_g 时，两者之比称为汽水混合物的容积含汽率，用符号 β 表示，即

$$\beta = \frac{V_g}{V} \quad (1-8)$$

β 与 x 之间可以互相换算：

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{V_g}{V_g + V_s} = \frac{1}{1 + \frac{V_s}{V_g}} = \frac{1}{1 + \frac{(G-D)v'}{Dv''}} \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{G}{D} - 1\right) \frac{v'}{v''}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{x} - 1\right) \frac{\gamma'}{\gamma''}} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 V_s ——汽水混合物中水的容积流量， m^3/h ；

v' ——饱和水的比容， m^3/kg ；

v'' ——饱和汽的比容， m^3/kg 。

在国际单位制中，比容是密度 ρ 的倒数，密度的单位是 kg/m^3 。而在工程单位制中，比容是重度 γ 的倒数，重度的单位是 kgf/m^3 。

这样来定义比容并确定其单位可使两种单位制中的比容在数值上是相同的。

由 β 求 x 的公式为：

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

二、动态平衡下管内所容汽水混合物的成分

汽水混合物在管内流动时，汽相和液相的流速是不一定相同的。在上升管中，汽水混合物总体是向上流动的，但是蒸汽的流速大于水的流速，两者之间存在着相对速度。

设管子的流通截面积为 f ，则汽水混合物的平均流速为

$$W = \frac{V}{3600f} \quad (1-11)$$

式中 f 的单位是 m^2 ， W 的单位是 m/s 。

蒸汽的流速为 W'' ，水的流速为 W' ，在上升管中，有 $W' < W < W''$ 。

在图 1-5 所示的模型中，假定蒸汽在管子芯部流动，水在蒸汽外侧的环状截面中流动。

蒸汽所占据的流通截面积为

$$f_q = \frac{V_q}{3600W''} \quad (1-12)$$

水所占据的流通截面积为

$$f - f_q = \frac{V - V_q}{3600W'} \quad (1-13)$$

在长度为 Δh 的管内空间容积 ($f\Delta h$) 中，蒸汽所占据的容积为 ($f_q\Delta h$)。因此，在动态平衡情况下，瞬间逗留在该空间容积中的汽水混合物的容积含汽率将为

$$\varphi = \frac{f_q\Delta h}{f\Delta h} = \frac{f_q}{f} = \frac{V_q/W''}{V/W} = \left(\frac{W}{W''}\right)\left(\frac{V_q}{V}\right) = C\beta \quad (1-14)$$

式中 C 为汽水混合物平均流速与蒸汽流速的比值。

φ 曾经被称为汽水混合物的“真实容积含汽率”，然而这个名称是不合适的，正确的名称是“截面含汽率”。

汽水混合物作上升运动时， $W'' > W$ ， $C < 1$ ，因而 $\varphi < \beta$ 。

汽水混合物作下降运动时, $W'' < W$, $C > 1$, 因而 $\varphi > \beta$ 。

φ 与 β 的不相等是由汽、水之间有相对速度引起的, 若有 $W' = W'' = W$, 则 $\varphi = \beta$ 。

C 值与较多因素有关, 需用实验所得的经验曲线求取。

需要在概念上分清 φ 与 β 。要纠正两种偏向: 一是忽视 φ 的存在, 只知道 β ; 二是过分强调 φ 的作用, 以为只有 φ 是“真实”的而 β 是“近似”的。其实 β 与

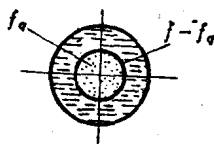
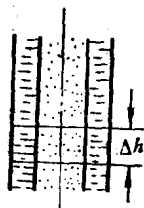


图1-5 管内流动模型

φ 两者都是真实的, 两者之所以不同, 是因为从不同的角度来考察。 β 讲的是流动着的两相流体的容积含汽率, 是容积流量之比, 而容积流量与汽、水相对速度无关。 φ 讲的是相对静止在管内空间中的汽水混合物的容积含汽率, 是容积之比, 也是所占据的截面之比, 因而与相对速度有关。这两个概念之所以都要提出来, 是因为各有各的用处。

三、两相流体的比容和重度

1. 汽水混物流体比容

$$v = \frac{V}{G} = \frac{V_v + V_l}{G} = \frac{Dv'' + (G - D)v'}{G} \\ = xv'' + (1 - x)v' = v' + x(v'' - v') \quad (1-15)$$

2. 汽水混物流体重度

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{1}{v' + x(v'' - v')} = \frac{\gamma'}{1 + x\left(\frac{\gamma'}{\gamma''} - 1\right)} \quad (1-16)$$