

高等学校交流讲义

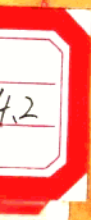
鍋 内 过 程

陳 学 俊 編

只限学校内部使用



中国工业出版社



8517958



55.17958

高等学校交流讲义



鍋 内 过 程

陳 学 俊 編

東北重型	15-842
机械学院	41
图书馆藏书印	

TK224.2/1

中国工业出版社



0660373



本書是根据1959年鍋爐制造专业指导性教育計劃中“鍋內过程”課程的教学大綱进行編写的。全書共分十六章，内容包括：双相流动結構、沸騰管中热交換过程、汽泡穿层水动力学及双相流动阻力、水循环基本原理、特性曲线分析、不稳定工况与水循环試驗、平行管圈中及联箱中水动力学、直流鍋爐不稳定工况、蒸汽清洁原理盐分溶解与沉淀、蒸汽情况与热化学試驗和鍋內过程的試驗研究方法与新技术的应用等。

本書可作为高等学校鍋爐专业四、五年制的交流講义，也可供热能专业学生及有关的工程技术人员参考。

鍋內过程

陈学俊編

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市書刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华書店科技发行所发行·各地新华書店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 12 · 字数 249,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数 0001—1737 · 定价 (10—6) 1.45 元

統一書号: 15165 · 1074 (一机-223)

前 言

鍋內过程是一門專業課，是在學習過鍋爐整體中有关鍋爐內部工作过程方面的一般知識的基礎上，進一步來闡明鍋爐內部工作过程的本質的同時，深入分析研究如何將這方面現有的最新成就應用到鍋爐工業上去，以保證鍋爐工業的安全性以及事實上也关系到經濟性的問題。此外，通過這一門課的內容學習，尚能初步了解鍋爐內部过程的發展方向和進行試驗研究的方法。鍋內过程是一門理論性較強的課程，它不同于基礎理論課，不僅具備嚴格的理論或數學分析，而且密切地與生產實踐相結合。它的內容包括熱交換过程，水動力學过程與熱化學过程三個主要方面，全部來自于生產實踐，是大量的試驗研究工作的結果。這些結果有的比較成熟，有的提高到經驗公式或得出它的規律性，有些還只是把試驗研究數據加以總結，作為生產上的參數；更有些問題還不夠成熟，尚有待進一步探討。因此本課程各章中，在闡明鍋爐的內部工作过程時，有些內容有比較嚴格的理論分析，包括數學分析；有些限于理論分析；有些只能就試驗研究結果作本質上的理解和說明。

由于編寫時間匆促，同時限于編者的水平，本講義不正確的地方在所難免，尚希讀者加以指正。

陳 學 俊

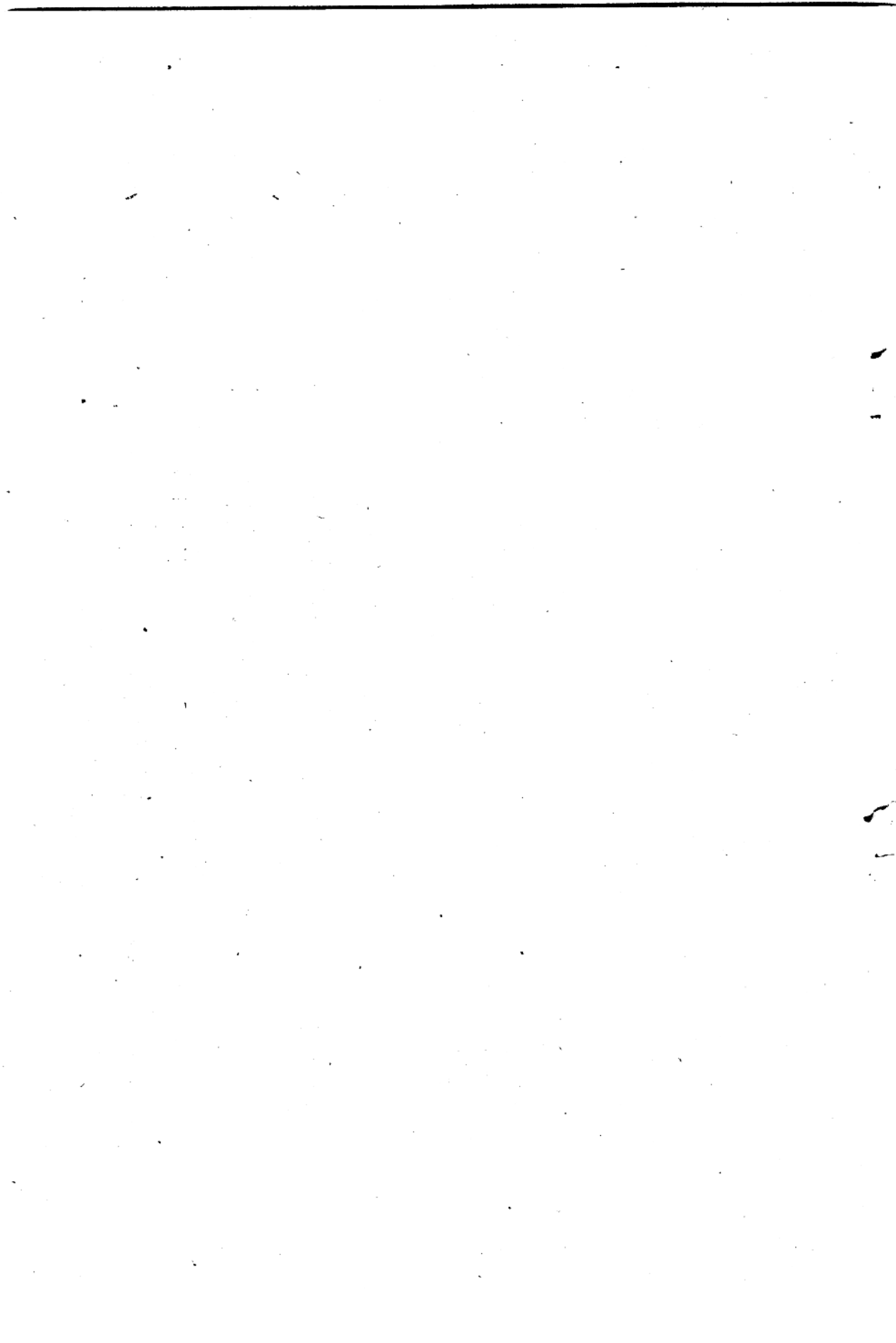
一九六一，六月五日于西安

目 次

前 言	3
第一章 概 論	7
§1-1 鍋內过程的重要意义	7
§1-2 鍋內过程的基本內容	8
§1-3 鍋內过程的研究方法	8
第二章 鍋內过程的一般特性	9
§2-1 概 論	9
§2-2 双相流体的重量特性	9
§2-3 双相流体的容积特性	11
第三章 沸騰管中的流动結構与 热交换过程	13
§3-1 受热管子的温度情况	13
§3-2 双相流体在圓管中流动时的 流动結構	15
§3-3 沸騰管中可靠性工作的条件与 热交换过程	19
1) 沸騰放热过程的一般規律	19
2) 在垂直沸騰管中的热交换过程	21
3) 在水平沸騰管中的热交换过程	25
第四章 汽泡穿层过程水动力学	31
§4-1 汽泡在水容积中的上升运动	31
§4-2 穿层过程中汽泡的大小与汽泡 穿层工况	33
1) 汽泡大小	33
2) 汽泡穿层工况	33
3) 爐水含盐量对穿层水动力学的 影响	35
第五章 汽水混合物在圓管中流动 的压头損失	38
§5-1 重量压头損失	38
§5-2 加速压头損失	38
§5-3 摩阻压头損失	39
1) 对称汽泡状流动	39
2) 对称汽柱状流动 (見圖 5-1)	40
§5-4 局部阻力損失	43
第六章 自然水循环	44
§6-1 水循环基本概念	44

§6-2 水循环綫路及其計算	44
1) 流动压头与有效压头	45
2) 循环綫路中的阻力	52
§6-3 水循环綫路設計与計算应注意 之点	55
第七章 水循环的特性曲线及循环 可靠性的分析	58
§7-1 循环綫路的全特性曲线的分析	58
1) 沸騰管中的全特性曲线	58
2) 特性曲线的进一步分析	60
§7-2 循环特性曲线的繪制	63
1) 简单綫路的循环特性曲线	64
2) 复杂綫路的循环特性曲线	64
§7-3 循环可靠性的校核	68
1) 停滞与倒轉	68
2) 汽水分层与循环倍率	68
3) 下降管汽穴現象与汽化問題	72
第八章 自然循环的不稳定工况特性	74
§8-1 概況	74
§8-2 自然循环鍋爐的不稳定工况	74
1) 压力变动下的水循环特性	75
2) 压力允許的变动速度	76
第九章 水循环試驗	79
§9-1 水循环流速的測定	79
§9-2 下降管阻力的測量	80
§9-3 管壁温度的測量	81
§9-4 水冷壁热負荷的測定	82
§9-5 測点的位置	82
1) 測量流速时測点的位置	82
2) 測量流动压头和阻力时的 測点位置 (見圖 9-9)	83
第十章 平行管圈中工質強制流动 水动力学	85
§10-1 热偏差	85
§10-2 蛇形管受热面联箱中的水动力学	88
1) 蛇形管受热面的联結系統	88
2) 汇集联箱中压力的变化	90
3) 分配联箱中压力的变化	91

4) 蒸汽分配的不均匀性.....	92	§13-6 超临界压力直流鍋爐中的盐分 沉淀.....	144
5) 过热器节流圈的近似計算.....	93	第十四章 蒸汽清洗.....	149
§10-3 垂直蛇形管中工质上下运动 水动力学.....	95	§14-1 蒸汽清洗的原理和作用.....	149
§10-4 蒸发受热面中的水动力学.....	96	§14-2 蒸汽清洗过程的本質和清洗过程 的效果.....	151
1) 水动力的不穩定特性.....	96	§14-3 直流鍋爐的清洗分离装置.....	154
2) 脉动問題.....	99	1) 清洗分离装置系统工作原理.....	154
第十一章 直流鍋爐水动力学的 有关問題.....	102	2) 清洗装置的效率.....	155
§11-1 流动不穩定性与温度偏差問題.....	102	第十五章 热化学試驗.....	159
§11-2 联箱中汽水混合物沿管圈的 分配問題.....	104	§15-1 进行热化学試驗的目的及进行 条件.....	159
§11-3 脉动的防止方法.....	107	§15-2 热化学試驗的内容.....	159
§11-4 直流鍋爐中的不穩定工况.....	113	§15-3 爐水与蒸汽清洁度的检查.....	161
第十二章 蒸汽清洁与汽水分离 装置原理.....	120	§15-4 蒸汽和爐水的取样.....	165
§12-1 蒸汽被污染的原因.....	120	第十六章 鍋内过程的研究工作与 新技术的应用.....	167
§12-2 水滴与泡沫的形成及分碎.....	121	§16-1 有效压头与真实容积汽含量的 分析与研究.....	167
§12-3 影响蒸汽中机械带出水滴与 盐分的原因.....	124	1) 有效压头的研究.....	167
§12-4 汽水分离装置.....	127	2) 真实容积汽含量的分析研究.....	172
§12-5 分段蒸发.....	129	3) 在傾斜管中的有效压头与真实 容积汽含量的研究.....	177
第十三章 蒸汽中盐分的溶解与沉淀.....	133	§16-2 放射性同位素在鍋内过程研究 工作方面的应用.....	181
§13-1 饱和蒸汽中盐分溶解度与盐分 携带問題.....	133	1) 放射性同位素应用的原理.....	181
§13-2 硅酸的选择性携带与在汽轮机中 的沉淀問題.....	135	2) 应用放射性同位素測定蒸汽清 洁度.....	181
§13-3 盐类在过热蒸汽中的溶解与沉淀.....	137	3) 应用放射性同位素研究水动力学 問題.....	186
§13-4 超临界压力下盐分在蒸汽中的 溶解度与給水品質对蒸汽品質 的影响.....	140	4) 应用放射性同位素来自動調节 水位.....	191
§13-5 各种不同組成成份給水对超临界 压力直流鍋爐蒸汽品質的影响.....	142		



第一章 概 論

§ 1-1 鍋內过程的重要意义

在党的社会主义建設总路綫、大跃进、人民公社三面紅旗的光輝照耀下，在一整套两条腿走路的方針指导下，我国工农业自1958年以来取得巨大成績。电力工业与其他工业一样，也得到了迅速的发展。1960年我国发电量約为555~580亿度。

对工业、农业、交通运输业、公用事业及日常生活供电供热，是发展国民經济的最重要工作之一。

中心热电站連續不断地供应出电能和热能，对保証国民經济各部門正常工作有很大的意义，要使中心热电站能連續的工作，首先应使它的主要設備能連續可靠地工作。根据一般統計，电站不能正常运行，往往是由于鍋爐的故障而引起的，因此使鍋爐連續可靠地工作就显得非常重要。

以往鍋爐連續工作期限的长短，往往决定于砖墙、受热面及通风机的磨損等，而在現代鍋爐中这方面已得到很大的改善，如水冷壁旋风燃烧的发展，除尘器的应用和改进，受热面的合理布置等，因此近代鍋爐的主要問題常发生在鍋爐內部工作过程方面，例如水循环的破坏，水冷壁管和过热器管的爆破等等，这都与鍋內过程的良好与否有关。可以說，鍋爐內部过程的可靠与否，对中心热电站的可靠和經濟地工作有很大的关系，特别是今天，鍋爐已发展到超高参数，超临界参数，以及单配一机一爐时，对鍋爐可靠安全工作的要求更高，問題也就显得更重要了。此外，鍋爐內部工作过程是鍋爐工业发展中需要研究的中心問題，它的发展，促进了鍋爐工业的发展，鍋爐的发展又对它提出了更高的要求。

鍋內过程对鍋爐的影响归纳起来有以下几点：

1) 鍋爐內部过程和鍋爐本身的效率直接关系不大，但严重的关系到它的可靠性，特別在向高参数发展，一方面要求高了，但另一方面鍋爐內部过程可靠性工作的条件却更差了，例如汽水分离更困难，自然循环更恶化了。

2) 鍋爐如因內部工作过程不良引起故障，則严重影响到整个电站的經濟性和可靠性，根据現有技术水平，鍋爐的連續工作期只有透平的一半，这說明我們在鍋爐內部工作过程方面必須大大努力，特别是发展到单配机组及大容量的时期，要求更高。

3) 蒸汽品質如不符合要求，如过热温度，含盐量等等，将不仅影响过热器，而且使透平的工作受到了限制。后者常因之会降低出力和經濟性，甚至被迫停机。

4) 在目前我国电力工业发展速度尚赶不上国民經济要求的时期，在某些情况下需要提高現有設備的努力，鍋爐出力的提高往往关連到內部工作过程的問題，因一般煤粉系統，风道系統等常有較大的儲备量，但提高出力将使受热面工作条件以及发生的蒸汽品質趋向恶化，因此也极需研究鍋內过程問題。

5) 鍋爐內部工作过程是鍋爐发展方向的中心問題之一，鍋爐工业的猛攻尖端、攀登

高峰必需要研究鍋內过程。

§ 1-2 鍋內过程的基本内容

鍋爐內部工作过程包括以下几个方面的内容:

- 1) 热交换过程——包括双相流动结构, 沸騰放热过程及长期可靠工作条件等問題。
- 2) 水动力学过程——包括自然循环、强制循环汽水系統中的水动力学問題及变动工况問題。

- 3) 热化学过程——包括蒸汽品質問題, 盐分沉淀問題, 受热面內部腐蝕及結垢問題。

鍋爐內部过程即是研究鍋爐內部工作中所发生的上述三个方面問題, 这些过程本身都是复杂的过程, 特別在鍋爐內又是汽水混合物, 而且这些过程又是綜合起来发生的。因此鍋爐內部过程不是简单的而是极为复杂的问题, 在这个領域內目前尚有不少問題还没有很好解决, 需要我們进行大量研究工作。

§ 1-3 鍋內过程的研究方法

研究鍋爐内部过程的方法总起来有三个方面:

- 1) 在試驗室模化設備上进行研究, 这往往是研究某一单独过程的方法, 目前我們有很多資料都是从这个方法得来的。

- 2) 在半工业的鍋爐上进行研究: 在某一个问题經过試驗室阶段已初步了解, 但又无十分把握时, 往往在半工业性鍋爐上进行, 这过程常是科学研究中不可缺少的一步, 它可使我們明确地把新成就应用到工业上的可靠程度大大提高。

- 3) 在工业鍋爐上进行: 这是把研究成果付之实践的过程, 因此也是很重要的一步, 一般常用来查明現有設備鍋內过程的工作情况, 有些时候某些鍋內过程的規律也在試驗鍋爐或工业鍋爐上进行, 不一定經过試驗室的阶段。

由以上可看出, 鍋內过程的研究和所有科学研究一样在进行方法本質上是相同的, 它是通过实践——理論——实践逐步提高的。

国外关于鍋內过程的研究工作方面, 英美等資本主义国家, 虽然鍋爐制造工业也相当发达, 但这方面的工作和鍋爐其它方面一样, 沒有进行过有系統和深入的研究。苏联在这方面的成就是很大的, 特別值得提出的是苏联科学院动力研究所, 莫斯科动力学院等机关和学校与 M. A. 斯透利特維奇等人在这方面的成就。他們的工作不仅揭示了鍋內过程的本質, 奠定了苏联鍋爐合理构造的理論基础, 并且指出了今后发展方向上应注意的問題。虽然如此, 由于問題的复杂性, 有很多問題还不够清楚, 有些問題还缺少完整的理論, 甚至还有些資料会彼此矛盾, 都須要进一步研究。在本課程中所講的内容, 大都采用苏联科学院动力研究所, 莫斯科动力学院, 全苏热工研究所以及各电站研究和运行积累的資料和成果。

我国在这方面的研究工作还只是个开始, 在过去短短的几年中, 我們一方面結合当前的生产实际, 如电站鍋爐鍋內过程調整实验, 进行了許多为解决当前生产問題和研究工作, 另一方結合我国鍋爐制造工业的发展方向作了許多理論上的准备和探討工作, 但所有这些研究工作显然还需要进一步加强, 才能够满足我国动力工业日益发展的需要。

第二章 鍋內过程的一般特性

§ 2-1 概 論

在鍋爐內部工作的工質有单相流体(水或蒸汽),也有双相流体(汽水混合物)。在各种动力鍋爐中,单相流体都是強制流动(省煤器中或过热器中)。汽水混合物的双相流动可以是自然循环(自然循环鍋爐中)也可以是強制流动(強制循环鍋爐)。关于单相流动問題比較簡單,双相流动問題則較為复杂。

双相流动有两种类型,一种是压差产生的流动,一种是汽泡穿层的流动。前一种流动是靠比重差(自然循环)或外加压头(水泵)而流动的,如沸騰管中的汽水混合物的正常流动,在双相流体流动方向汽水混合物有一定流量。后一种穿层流动,則水相固定不流动或流动极慢,汽泡在其中上升,如鍋筒水容积中的情形以及沸騰管中发生循环停止时的情形。

在沸騰管中,不仅是双相流动,而且由于发生集态变化各个相的数量也有变化的,但在稳定工况下,經過各个截面的水流量与蒸汽流量是一定的。蒸汽与水的速度彼此不同,决定于汽含量的大小,汽水混合物的流量,流动的方向和管子的位置等。

为了决定流动的结构(即沿管子截面的速度分配和相的分配),为了研究沸騰管中及穿层过程中的水动力学和热交换过程,必須要知道各相的重量流量与容积流量的流动特性。

§ 2-2 双相流体的重量特性

按稳定工况連續性的条件,单位時間內流經受热管的任意截面的汽水混合物的重量流量等于进管子时的水的重量流量

$$G_0 = G_n + G_g = G_{om}, \text{公斤/秒} \quad (2-1)$$

式中 G_0 ——进管子时水的重量流量,公斤/秒;

G_n, G_g, G_{om} ——管子中蒸汽、水、汽水混合物的重量流量,公斤/秒。

单位時間內,經過管子截面的汽水混合物所攜帶的总热量可用下式表示:

$$G_{om} i = G_0 i = G_n i' + G_g (i' + \gamma) \quad (2-2)$$

或

$$\begin{aligned} i &= \frac{i'(G_n + G_g)}{G_0} + \frac{G_g}{G_0} \gamma \\ &= i' + \gamma x, \text{大卡/公斤} \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 i ——汽水混合物的焓,大卡/公斤;

x ——蒸汽的重量干度, %;

i' ——饱和水焓,大卡/公斤;

γ ——汽化潜热,大卡/公斤。

显然,这些参数(G_n, G_g, G_0, x)只能表示流体的量及水与蒸汽的重量含量百分数,

而不能直接表示出流动的情况。

在大多数的情况下，用重量流量这一数值不方便，而系采用所谓蒸汽引用速度及水引用速度，即假定水与蒸汽占据了全部管子的流动截面积。

水引用速度（折算速度）

$$w'_0 = \frac{G_n}{f\gamma'} \text{ 米/秒}$$

蒸汽引用速度

(2-4)

$$w''_0 = \frac{G_n}{f\gamma''} \text{ 米/秒}$$

式中 f ——管子的截面积，米²；

γ' , γ'' ——水与蒸汽的比重量，公斤/米³。

循环水速，即水流量相当于流过管子截面中的汽水混合物的重量流量的水速，可用下式：

$$w_0 = \frac{G_n + G_{gn}}{f\gamma'} + \frac{G_{gm}}{f\gamma'} = \frac{G_0}{f\gamma'} \quad (2-5)$$

且

$$w_0\gamma' = w_{\text{水}}\gamma_{\text{水}} \quad (2-6)$$

沿受热管长度蒸汽引用速度与水引用速度是在变化的，当 f 不变时，则 w_0 、 w'_0 、 w''_0 之间关系由式 (2-1)(2-4)(2-5) 可以推得如下：

$$f(\gamma'w'_0 + \gamma''w''_0) = f\gamma'w_0$$

$$w_0 = w'_0 + w''_0 \frac{\gamma''}{\gamma'} \quad (2-7)$$

汽水混合物的重量干度也很容易以引用速度来表示

$$x = \frac{G_n}{G_0} = \frac{G_n}{G_n + G_{gn}} = \frac{1}{K}$$

式中 K ——循环倍率。

$$x = \frac{G_n}{G_0} = \frac{f w''_0 \gamma''}{f w_0 \gamma'} = \frac{w''_0 \gamma''}{w_0 \gamma'} \quad (2-8)$$

应当指出， w_0 、 w'_0 、 w''_0 不能直接表示沿管子截面流体的分配情况，而只是流量参数。

汽水混合物的焓也可由以下的能量平衡关系求得。

由能量平衡式：

$$\int_{i'}^i G_0 \cdot di = \int_{l_{m3}}^l q_l dl$$

式中 q_l ——单位长度热负荷，大卡/米·秒；

l_{m3} , l ——到沸腾点前长度及到所研究的管子截面的长度，米。（见图2-1）。

当热负荷 q_l 为常数时，则上面的积分式可写成如下式：

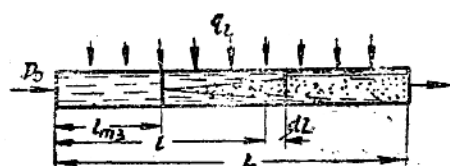


图 2-1

$$G_o(i-i')=q_l(l-l_{\pi}) \quad (2-9)$$

这个式子的关系也可应用于沿管子长度热负荷变化的情形, 这时 q_l 应取该受热管段的平均值。

由式 (2-9) 可得在该受热管段的汽水混合物的焓

$$i=i'+\frac{q_l(l-l_{\pi})}{w_o f \gamma'} \quad (2-10)$$

因此, 知道沿管长的热负荷后, 在给定的水流量下可以决定管路上任意截面处的汽水混合物的焓、蒸汽干度以及水、汽的引用速度。

§ 2-3 双相流体的容积特性

蒸汽与水的混合物沿管子截面的分配如图 2-2 所示, 这时管子容积稳定区分为二部分, 一部分中是蒸汽流过, 一部分是水流过。这种区分是按水与蒸汽容积流量平均值 (按时间及截面) 进行的。蒸汽所占的截面部分的 f_n 表示, 水所占的截面积部分以 f_a 表示,

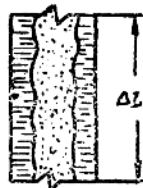


图 2-2 沿管子截面汽水混合物的分配

则

$$f_n + f_a = f$$

蒸汽所占截面的分额即真实汽含量 φ :

$$\varphi = \frac{f_n}{f} \quad (2-11)$$

蒸汽、水的容积流量与实际速度:

$$V_n = \frac{G_n}{\gamma''} = w'' f;$$

$$V_a = \frac{G_a}{\gamma'} = w' f, \text{ 米}^3/\text{秒} \quad (2-12)$$

由式 (2-12) 可以决定水与蒸汽的实际速度 (绝对速度)

$$w_n'' = \frac{V_n}{f_n} = \frac{w''}{\varphi}$$

$$w_a' = \frac{V_a}{f_a} = \frac{w'}{1-\varphi} \quad (2-13)$$

由式 (2-13) 可以得到下式:

$$\varphi = \frac{w''}{w_n''}; \quad \varphi = 1 - \frac{w'}{w_a'} \quad (2-14)$$

从上两式得到了 φ 与 w_n'' 及 w_a' 之间的关系, 例如当汽水混合物的重量流量不变时, 如实际蒸汽速度增加, 则 φ 减小, 实际蒸汽速度减小则 φ 增加。

汽水混合物的实际比重与实际速度, 按已知的 φ 可以计算。汽水混合物的实际比重 (汽水混合物的重量与容积之比)

$$\gamma_{on}'' = \frac{(f_n \gamma'' + f_a \gamma') \Delta l}{f \Delta l}$$

经过转换以后得到:

$$\gamma_{on}'' = \gamma' - \varphi(\gamma' - \gamma'') = \gamma'(1-\varphi) + \gamma''\varphi \quad (2-15)$$

由式 (2-1) 及式 (2-15) 可以得到汽水混合物的实际速度:

$$w_{cm}^2 = \frac{G_{cm}}{\gamma_{cm}^2 f} = \frac{w_o \gamma'}{\gamma' - \varphi (\gamma' - \gamma'')} = \frac{w_o \gamma'}{\gamma' (1 - \varphi) + \gamma'' \varphi} \quad (2-16)$$

以上說明了 φ 与流量参数之間的关系。用这些关系式来决定蒸汽与水的实际速度、汽水混合物比重。因此,要研究双相流体运动规律,先要在流体的不同参数下决定 φ 值。

管中汽水混合物流动时的容积汽含量:

$$\beta = \frac{V_n}{V_n + V_w} = \frac{\frac{G_n}{\gamma''}}{\frac{G_n}{\gamma''} + \frac{G_w}{\gamma'}} = \frac{w'' f}{w'' f + w' f} = \frac{w''}{w'' + w'} \quad (2-17)$$

将式(2-7)代入上式則轉換成

$$\beta = \frac{w''}{w_o + w'' \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma''}\right)} \quad (2-18)$$

因此 β 仅决定于流量参数(蒸汽、水的引用速度)。

汽水混合物的流量比重与流量速度:

汽水混合物的流量比重 γ_{cm} 可由下式表示:

$$\gamma_{cm} = \frac{G_{cm}}{V_{cm}} = \frac{G_w + G_n}{V_{cm}} = \frac{\gamma' V_n + \gamma'' V_w}{V_{cm}} = \gamma' (1 - \beta) + \gamma'' \beta \quad (2-19)$$

$$\text{或} \quad \gamma_{cm} = \frac{w_o \gamma' f}{w' f + w'' f} = \frac{w_o \gamma'}{w_o + w'' \left(1 - \frac{\gamma''}{\gamma'}\right)} = \frac{\gamma'}{1 + \frac{w''}{w_o} \left(1 - \frac{\gamma''}{\gamma'}\right)} \quad (2-20)$$

汽水混合物的流量速度:

$$w_{cm} = w_o + w'' \left(1 - \frac{\gamma''}{\gamma'}\right)$$

$$\text{或} \quad w_{cm} = \frac{V_{cm}}{f} = w' + w'' \quad (2-21)$$

其实容积汽含量 φ 与流量容积汽含量 β 之間的关系:

由式(2-14)(2-17)及(2-21):

$$\varphi = \frac{w''}{w'' + w'} = \frac{w_{cm}}{w'' + w'} \times \frac{w''}{w_{cm}} = \beta \frac{w_{cm}}{w'' + w'} \quad (2-22)$$

相对速度:

$$w_{OTH} = w'' + w' = \frac{w''}{\varphi} - \frac{w'}{1 - \varphi} \quad (2-23)$$

$$w_{OTH} \varphi^2 - (w' + w'' + w_{OTH}) \varphi + w'' = 0 \quad (2-24)$$

$$\varphi = \frac{w' + w'' + w_{OTH}}{2w_{OTH}} - \sqrt{\left(\frac{w' + w'' + w_{OTH}}{2w_{OTH}}\right)^2 - \frac{w''}{w_{OTH}}} \quad (2-25)$$

由式(2-25)当 $w'' = 0$ 时, $\varphi = 0$

由式(2-24)当 $w_{OTH} = 0$ 时,

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

由此可見, φ 与 β , γ_{cm} 与 γ'_{cm} , w_{cm} 与 w'_{cm} 的差別, 本質上是由于相对速度所引起的。

第三章 沸騰管中的流动結構与热交换过程

§ 3-1 受热管子的温度情况

受热面的安全工作决定于管子金属的温度情况，温度提高时，则材料强度降低。每一种钢有它的极限工作允许温度，超过此温度要想长期工作而不发生破坏是不可能的。温度愈高，产生破坏愈快。假如管壁强度有周期性的变化，则管子破坏也可能在低于此极限温度时发生，在此情况下将引起附加的温度应力而使管子发生疲劳破坏。因此管子的安全工作决定于温度数值和温度变动的大小。

任何一个受热面的安全工作，决定于其中所有平行管圈的安全工作，即使一根管子坏了，也影响到整个受热面的安全工作，因此每一根管子的温度工作情况愈接近平均温度愈好。

管壁温度可由传热公式来计算，如下式：

$$t_{\text{ст}}^{\text{н.п.}} = t_{\text{пр}} + q \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} \right) ^\circ\text{C}, \quad (3-1)$$

式中 $t_{\text{ст}}^{\text{н.п.}}$ ——外壁温度， $^\circ\text{C}$ ；

$t_{\text{пр}}$ ——工质温度， $^\circ\text{C}$ ；

$\delta_{\text{н}}, \delta_{\text{н}}$ ——壁及水垢厚度，米；

$\lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{н}}$ ——壁及水垢导热系数，大卡/米·时· $^\circ\text{C}$ ；

α_2 ——内壁放热系数，大卡/米²·时· $^\circ\text{C}$ ；

q ——经过单位外表面积的热流量或简称热强度，大卡/米²·时。

当经过多层筒壁传热时，更准确一些的壁温计算可按下式计算：

$$t_{\text{ст}}^{\text{н.п.}} = t_{\text{пр}} + \frac{q}{\alpha_2} \frac{d_{\text{н.п.}}}{d_{\text{н.н}}} + 0.579q \frac{d_{\text{н.п.}}}{\lambda_{\text{н}}} \lg \frac{d_{\text{н.п.}}}{d_{\text{н.н}}} + \frac{q\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} \quad (3-2)$$

式中 $d_{\text{н.п.}}, d_{\text{н.н}}$ ——管子外径、内径，米。

一般决定管壁温度采用公式(3-1)比较简单，在大多数情况下，由此式计算的误差并不大。由上两式可见，管子内外径之比愈接近于1及金属导热系数愈大，则误差愈小。

在计算高压锅炉过热器管子的壁温时，最好根据式(3-2)，因为即使温度只差几度，也要影响到金属强度。

从式(3-1)与(3-2)，管壁温度与导热系数 λ 、管壁厚度 δ 、工质温度 $t_{\text{пр}}$ 、内壁放热系数 α_2 及热强度 q 等因素有关。内壁由于积垢的热阻在大多数情况下很小，可以略而不计，因在近代锅炉中一般不允许有水垢存在。

从金属工作的观点，管壁温度过高则产生危险的工作情况，这在工质温度 $t_{\text{пр}}$ 及热强度 q 高的管段或者在内壁放热系数 α_2 及 λ/δ 小的管段中发生，特别是上述两种情况同时存在时更严重。因此，为了受热面的可靠工作，必须校核管壁温度最高的管子部分的壁温数值的大小。

工質溫度 t_{pt} 視鍋爐的參數而定，而且各個受熱面處的數值不相同，如過熱器中工質溫度較高，沸騰管中接近飽和溫度。

熱強度 q 對受熱面的可靠性影響很大，決定於受熱面所處的位置。對於粉煤爐的輻射受熱面而言，平均熱強度 $q_{cp} = 50 \sim 200 \times 10^3$ 大卡/米²·時，燃燒固體燃料的最大熱強度是在火焰中心區域，這時 $q = 250 \sim 300 \times 10^3$ 大卡/米²·時。對於液體燃料最大熱強度 $q = 500 \sim 600 \times 10^3$ 大卡/米²·時。

裝在爐壁上的水冷牆受熱面，熱強度沿管子周界的分配是不均勻的，面向爐膛的一面吸收最大的熱量，而在管子的背面只吸收來自磚工反輻射的熱量，因此沿管子周界的管壁溫度也是不同的。

雙面露光水冷牆的平均熱強度按管子全部周界計算，約為放在爐壁上水冷牆的一倍，至於最大的局部熱強度值則與一般水冷牆相差不多。

在對流受熱面中，熱強度 q 很少超過 $50 \sim 75 \times 10^3$ 大卡/米²·時，特別是離爐子較遠的受熱面，它的熱強度降低到 $2 \sim 10 \times 10^3$ 大卡/米²·時。

內壁放熱係數 α_2 當管中流動的是單相流體時，可按下式計算：

$$\alpha_2 = B \frac{(w\gamma)^{0.8}}{d_s^{0.2}} \quad (3-3)$$

式中 $B = 0.24 \left(\frac{C_p}{\mu} \right)^{0.4} \lambda^{0.6}$ —— 決定工質種類及工質溫度的一個係數。

從式(3-3)可見，放熱係數 α_2 直接與 $(w\gamma)^{0.8}$ 成比例，因此可以用於高重量速度 $w\gamma$ 來提高放熱係數。

對於水而言，表征物理參數的係數 B 是隨著壓力和溫度的變化而變化，如圖(3-1)所示。

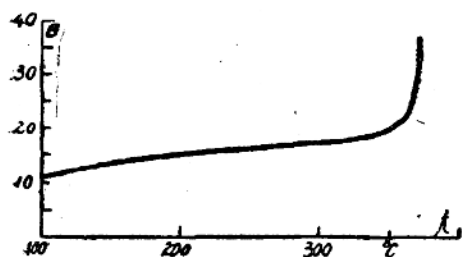


圖 3-1 係數 B 與溫度的關係

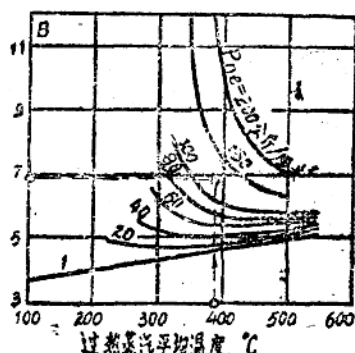


圖 3-2 係數 B 與蒸汽溫度的關係

圖中示出在飽和線上係數 B 與溫度的關係。

對於蒸汽而言，隨著壓力和溫度的不同，係數 B 的變化很大，如圖 3-2 所示。當蒸汽參數接近臨界值時，此係數大大增加。離飽和線愈遠，係數與壓力、溫度的關係愈小。

在接近臨界區域內，蒸汽的物理參數與溫度的關係愈密切，由於按壁溫度和氣流溫度所求得的物理常數的差別很大，因此根據式(3-3)計算 α_2 將帶來很大的誤差。在此情

况下，建議采用下式：

$$N_n = 0.023 R_0^{0.8} Pr_{\text{нн}}^{0.8} \quad (3-4)$$

或

$$\alpha_2 = 0.023 \frac{\lambda}{d} R_0^{0.8} Pr_{\text{нн}}^{0.8} \quad (3-5)$$

在上两式中 N_n 及 R_0 准则数中的物理常数按气流温度计算， Pr 准则数中的物理常数按气流温度或壁温度计算：

当 $Pr_{\text{нн}} < Pr_{\text{ст}}$ 时，根据气流温度；

当 $Pr_{\text{нн}} > Pr_{\text{ст}}$ 时，根据壁温度。

在管中为双流流时，内壁放热系数 α_2 一般很大，达 $10 \sim 50 \times 10^4$ 大卡/米²·时°C，并且当热强度增加时， α_2 也增加，直到 q 增加到临界热强度 $q_{\text{кр}}$ 时， α_2 将很快下降，使管壁有过热的危险。内壁放热系数何时下降及它的数值大小，均与管中流动情况有关，因此，必须深入研究管中的双相流体的流动结构及其工况及影响流动结构的因素。

§ 3-2 双相流体在圆管中流动时的流动结构

任何一种液体在管中运动，可以由一定的速度场来体现它的特征，由于粘性力的作用，沿管子截面的流速是变化的，在管壁处速度梯度最大，愈向管子中心愈减小，由动力学已知速度的外形在等温情况下是由雷诺准则数之值来决定。在不等温情况下，单相的速度外形除雷诺准则数外，还受温度梯度及流体流动方向(上升还是下降)的影响。

如图 3-3 所示。在向上流动中液体被冷却时的速度外形比等温流动还要突出，这时位于管子中心的流体热的部分具有最大的速度。

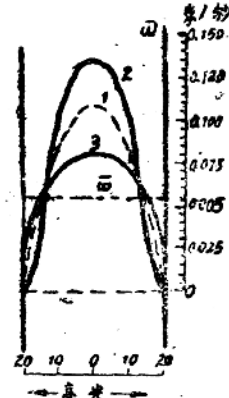


图 3-3 在层流时管内流速分布
(上升流动)

1—等温流动；2—液体的冷却；
3—液体的加热；4—介质温度变化。

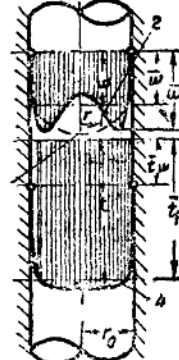
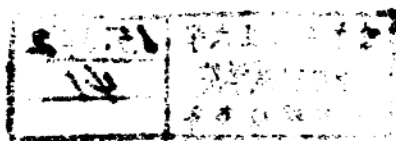


图 3-4 在紊流时管内流速分布
(下降流动)

(图注同图 3-1)

在下降流动时(图 3-4)，液体比较高温部分在管子中心，使流体具有大的比容，使流体流动迟缓了一些。

因此在上升流动中，液体较轻的部分比主流快一些，而在向下流动中比主流慢一些。这种情况对层流情况及紊流情况都是正确的。



双相流体流动沿管子截面速度变化也具有相似的特征。在双相流动中，速度场不仅决定于流动状况，尚需知道沿管子截面各相密度的分布，即流动的结构情况。

沿管子的截面，蒸汽的容积的分布，随着时间在一般情况下是不均匀的，因此，蒸汽的速度将大于或小于水的速度，决定于蒸汽泡处于何种有利情况。例如，当向上流动时（垂直管中），与液体冷却下的流动相似，液体轻的部分——即相当于蒸汽泡，它们是位于管子的中心，因此蒸汽的平均速度大于水的平均速度。当向下流动时，汽泡成环形接近管子周界，这些蒸汽的平均速度小于水的平均速度（见图3-5）。

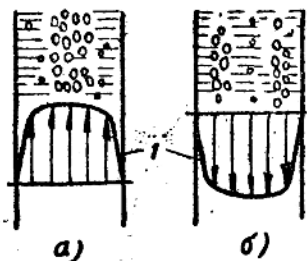


图 3-5 在垂直管中流动蒸汽相的分布
a—上升；b—下降；1—速度场。

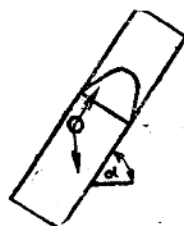


图 3-6 汽水混合物流动时
对汽泡上的作用力

管子倾斜程度很自然也影响到沿管子截面相的分布。在垂直管中，流动是对称的，在倾斜与水平管中由于重力作用，使重的相（水）下沉到下方。参见图3-6与图3-7。



图 3-7 汽水混合物的分层工况

流动结构的知識不仅是决定平均的流动特性、比重量、汽水混合物的流速及其他等等，而且在很大程度上要决定管壁冷却的安全条件。

现有的在理論上解决双相流动问题的分析，只能从流体的运动力，在質的方面判断沿管子截面蒸汽的分配情况。更具体更詳細的了解流动结构以及在量的方面的关系，主要是根据試驗数据。以前主要依靠观察的方法来研究，因此，在高压时就往往用测量管壁温度的变化间接推测其中的流动结构。近年来应用 γ ——射线探测法，使我们对于高压时的流动结构也有了进一步的認識。

1) 在垂直管中汽水混合物的流动结构 ($\alpha = 90^\circ$)。

两相流动结构与汽水混合物速度，容积汽含量，压力与管子倾斜角度等有关（当工质种类及进口条件确定后），流动情况如图3-8所示。

在上升流动中，当蒸汽量少时，蒸汽在管子中心部分流动，随着蒸汽含量增加，汽泡开始形成比较大的汽弹，几乎占据管子全部中心部分，其中尚包含小汽泡与水。当汽

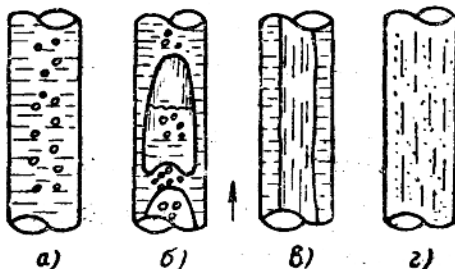


图 3-8 两相混合物在管中流动结构
a) 汽泡状；b) 汽弹状；c) 汽柱状；d) 乳状。