



数据加载失败，请稍后重试！

053434

TK222
4039

电站锅炉汽水分离装置 的原理和设计

李守恒 杨励丹 王振文 董祖康 编著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书详细地阐述了电站锅炉汽水分离装置的设计原则和设计方法；汽水分离元件的工作原理，汽水分离装置的安装、验收、检修和试验方法；并对汽水分离装置的工作过程进行了必要的理论分析。书中收集了丰富的试验数据和设计资料，汇集了国内多年来试验研究的成果及国外的一些先进经验。

本书是从事电站锅炉的设计、制造、安装、运行的工程技术人员，科研单位的技术工作者，以及大专院校热动专业师生的一本有用的参考书。

电站锅炉汽水分离装置的原理和设计

李守恒 杨励丹 王振文 董祖康 编著

水利电力出版社出版

(北京三里河路6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 16开本 13.75印张 308千字
1986年1月第一版 1986年1月北京第一次印刷
印数0001—3440册 定价3.25元

书号 15148·5844

前 言

电站锅炉、工业锅炉和核电站的蒸汽发生器等都要向用户提供一定纯度的蒸汽。如水处理条件已定，这个任务主要靠汽水分离装置来承担。本书阐述了汽水分离装置的工作原理、运行特性并提供了设计数据和试验方法，可作为设计和改进汽水分离装置的依据。

本书是在“电站锅炉汽包内部装置设计方法”（水利电力部西安热工研究所、哈尔滨锅炉厂、哈尔滨工业大学共同编写，刊登于《热力发电》1974年第6期）的基础上，增添了汽水分离装置的工作原理、运行特性及近期取得的试验数据等内容编写而成。论述的范围以电站锅炉为主，但并不局限于此，工业锅炉、核电站蒸汽发生器等也被扩充进去。可供热力工程、石油化学工程、核动力工程等方面的设计、研究、运行及检修人员使用，并可供大专院校热动专业的师生参考。

本书共分十二章，其中：第一、二章由哈尔滨工业大学动力系杨励丹副教授编写；第三、六、七、八（不包括取样装置）、九、十章由水利电力部科学技术情报研究所李守恒高级工程师编写；第四、五章由无锡锅炉厂董祖康高级工程师编写；第八章的取样装置部分，第十一、十二章由水利电力部西安热工研究所王振文工程师编写。全书由李守恒主编。

本书采用法定单位制。常用的分离元件、蒸汽清洗装置等各部流速采取统一编号，以便于查阅。主要参数的符号沿用惯例，角标使用汉语拼音。

本书蒙南京工学院动力系范从振教授、周强泰副教授认真地审阅，并提出很多宝贵意见；各有关电厂、电力试验研究所提供了试验条件并积极配合，在此表示深切的谢意。

限于编写人员的水平，书中会有很多错误，请读者批评指正。

编 者

一九八五年

常用符号表

一、基本符号

A	系数
a	分配系数
b	宽度
C	系数; 常数
D	锅炉负荷、蒸汽量, t/h; 锅筒直径, m
d	水滴直径, μm ; 管径, m或mm
E	工质所具有的或失去的能量
F, F_0	穿过水和蒸汽的截面积, m^2
F	面积, m^2
f	流通截面积, m^2
g	重力加速度, m/s^2
H, h	高度, m
Δh	高度差, m
h	工质的焓, kJ/kg
K	携带系数, 循环倍率
k	系数
L	长度, m
l	长度, m或mm
m	流量系数
p	工质的压力, N/m^2 或MPa, 排污率
Δp	压差、压降、阻力损失, N/m^2
Q	容积流量, m^3/s
R	负荷强度
R	半径
r	汽化潜热, kJ/kg
s	间距, m或mm
S	含盐量, mg/kg 或 $\mu\text{g/kg}$
t	温度, $^{\circ}\text{C}$
x	汽水混合物中的含汽率
w	流速, m/s
β	清洗不完全程度
μ	工质动力粘度系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
ν	工质运动粘度系数, m^2/s

δ	厚度, m或mm
ε	系数
ξ	阻力系数
ρ	密度, kg/m^3
σ	表面张力系数, N/m
ω	湿分; 角速度
τ	时间
φ	容积含汽率
ψ	系数
二、上下角码	
—	代表平均值
'	饱和水
"	饱和蒸汽
by	百叶窗
bq	饱和蒸汽
fx	缝隙挡板
gt	锅筒
gou	锅水
jl	节流板
jqb	均汽板
jqg	均汽管
sw	钢丝网
wk	蜗壳
jx	极限值
lj	临界值
mk	门槛
max	最大
min	最小
n	内部的
nj	凝结
qxb	清洗板
qxs	清洗水
q	汽, 前
s	水
n	混合, 后

目 录

前 言

常用符号表

第一章 饱和蒸汽的带盐和锅筒内部装置的任务	1
第一节 蒸汽的产生及其流程.....	1
第二节 蒸汽净化的必要性.....	1
第三节 蒸汽质量标准.....	2
第四节 蒸汽被污染的原因.....	2
第五节 蒸汽携带水滴（机械携带）的过程.....	3
一、锅筒汽空间中水滴的形成；二、水滴的带出过程；三、影响机械携带的因素	
第六节 蒸汽的溶解携带盐分.....	9
一、饱和蒸汽溶解携带盐分的特点；二、饱和蒸汽对硅酸的溶解携带；三、饱和蒸汽对其他类盐的溶解携带	
第七节 锅筒内部装置的任务.....	11
第二章 汽水分离装置的工作过程	13
第一节 锅筒内旋风分离器的工作过程.....	13
第二节 水下孔板的工作过程.....	16
一、水下孔板的作用；二、形成稳定汽垫时水下孔板小孔中蒸汽平均流速的确定；三、水下孔板下面汽垫层厚度的确定	
第三节 钢丝网分离器的工作过程.....	21
第四节 百叶窗分离器的工作过程.....	23
一、百叶窗分离器的作用；二、水平式百叶窗的临界蒸汽流速；三、立式百叶窗的临界蒸汽流速	
第五节 汽水分离装置工作过程的模化.....	25
第三章 一次分离（粗分离）元件的原理和设计	29
第一节 旋风分离器.....	29
一、旋风分离器的分离过程；二、影响分离过程的主要因素；三、旋风分离器的适用范围和分类；四、锅筒内立式旋风分离器；五、卧式（水平式）旋风分离器；六、涡轮式旋风分离器；七、旋风分离器实际负荷的计算	
第二节 挡板.....	45
第三节 弧形缓冲罩.....	46
第四节 缝隙挡板.....	47
第五节 立式节流板.....	49
第六节 水下孔板.....	51
第七节 钢丝网分离器.....	52
第四章 二次分离（细分离）元件的原理和设计	54
第一节 均汽板.....	54

一、均汽板的计算方法；二、不均匀开孔的均汽板的计算方法；三、结构尺寸及布置方式	
第二节 集汽管	60
一、多孔式集汽管；二、缝隙式集汽管；三、结构尺寸及布置原则	
第三节 蜗壳式分离器	63
第四节 百叶窗分离器	64
第五节 丝网分离器	67
一、铜丝网细分离器；二、丝网除沫(除雾)器(Mesh Demister)	
第六节 反转式分离器	69
第五章 其他类型的分离元件	73
第一节 外置式旋风器	73
第二节 双级外置式旋风器	75
第三节 直流锅炉的离心分离器	78
一、同向流动离心式分离器；二、异向流动离心式分离器	
第四节 核电站蒸汽发生器的汽水分离元件	82
一、一次分离元件；二、二次分离元件；三、三次分离元件；四、其他分离元件	
第六章 蒸汽清洗装置的原理和设计	91
第一节 蒸汽清洗的机理	91
第二节 影响蒸汽清洗效果的主要因素	91
一、清洗后的蒸汽携带硅酸系数 $K_{qxs}^{SiO_2}$ ；二、清洗水硅酸含量 $S_{qxs}^{SiO_2}$ ；三、清洗不完全程度 β	
第三节 蒸汽清洗方式的分类	92
一、三种清洗方式的简介；二、单级和多级清洗；三、全部或部分蒸汽清洗	
第四节 蒸汽清洗装置的设计和布置原则	96
一、保证清洗前蒸汽得到充分的分离；二、保证蒸汽得到较好的清洗；三、保证洗后蒸汽得到充分的分离	
第五节 蒸汽清洗装置的计算步骤和方法	101
一、清洗水比例 z 的计算；二、清洗水层厚度 H_{qx} 的计算；三、清洗装置上部蒸汽折算速度 w_{01}'' 的计算；四、确定清洗装置上部空间高度的计算；五、孔板开孔总面积 F_{10} 的计算；六、平孔板式清洗装置不出现干孔板区工况的核算	
第六节 蒸汽清洗装置的使用前景	122
第七章 分段蒸发系统的原理和设计	125
第一节 分段蒸发的原理	125
第二节 影响分段蒸发效果的主要因素及初步分析	126
一、主要影响因素；二、初步分析	
第三节 锅内盐段的布置原则	128
一、对盐段的要求；二、布置原则	
第四节 外置盐段的布置原则	130
一、适用范围；二、外置盐段的连接系统；三、外置盐段受热面的选择；四、盐净段间水连通的布置方式；五、外置旋风器的布置方式；六、外置旋风器中的水位应符合规定	
第五节 盐净段间水位差的计算	134
一、串联系统的水位差的计算方法；二、并联系统的水位差的计算方法；三、三段蒸发系统的水位差的计算方法	

第六节 分段蒸发系统的使用前景	135
第八章 锅筒内部的辅助装置	136
第一节 给水分配装置	136
一、压力配水管；二、清洗水配水装置；三、配水喷嘴	
第二节 排污装置	140
第三节 磷酸盐加药管	142
第四节 水位计保护装置	142
第五节 下降管入口保护装置	143
第六节 事故放水管	145
第七节 汽水取样装置	146
一、饱和蒸汽取样器；二、过热蒸汽取样器；三、水的取样器；四、锅内取样装置	
第九章 汽水分离系统的选择和典型的锅内装置	154
第一节 汽水分离系统的选择	154
一、规定的排污率；二、给水品质概况；三、汽水分离系统的选择原则；四、汽水分离系统的选择	
第二节 汽水分离系统的水工况计算	160
第三节 典型的锅筒内部装置	165
一、国产锅炉典型的锅内装置；二、拔柏葛型锅炉的锅内装置；三、F.W型锅炉典型的锅内装置；四、C.E型锅炉典型的锅内装置；五、余热锅炉的锅内装置；六、工业锅炉的锅内装置；七、直流锅炉与低倍率复合循环锅炉的立式汽水分离器；八、核电站的汽水分离装置	
第十章 运行工况对锅内装置的影响	175
第一节 滑压启停过程对锅内装置工况的影响	175
第二节 锅筒的水位工况及其对蒸汽品质的影响	179
一、锅筒的实际水位；二、运行中的锅筒水位工况；三、水位工况对汽质的影响	
第三节 负荷对锅内装置工况的影响	184
一、负荷波动对锅内装置工况的影响；二、低倍率复合循环锅炉的立式分离器的负荷特性	
第十一章 锅筒内部装置的制造、装配和验收	189
第一节 制造、装配质量的重要性	189
第二节 常见的制造和装配缺陷及防止对策	189
一、常见的制造和装配缺陷；二、防止对策	
第三节 制造和装配的允许偏差	191
一、旋风分离器；二、缝隙挡板和立式节流板；三、水下孔板和均汽板；四、百叶窗分离器；五、蜗壳式分离器；六、铜丝网分离器；七、蒸汽清洗装置	
第四节 锅内装置的检查与验收	193
一、检查与验收的准备工作；二、新安装锅炉锅内装置的检查和验收程序；三、大修停炉后，锅内装置的检查	
第十二章 锅筒锅炉的热化学试验	195
第一节 热化学试验的目的	195
第二节 热化学试验的准备工作	195
一、掌握设备情况；二、建立锅炉和化学共同负责的试验组织；三、检查和加装测点；四、检查和校验运行仪表；五、准备测试仪表和药剂；六、绘制必要的系统图及数据综合表；七、制定安全措施	

第三节 热化学试验方法	196
一、热化学试验内容；二、试验方法	
第四节 试验的总结	202
第五节 对热化学试验方法的建议	202
附录 I 主要分离元件的流速编号 (m/s)	204
附录 II 常用的阻力系数	206
主要参考文献	211

第一章 饱和蒸汽的带盐和锅筒内部装置的任务

第一节 蒸汽的产生及其流程

给水进入锅炉后，由于吸收燃料燃烧所放出的热量，而生成具有一定压力、温度和纯度的蒸汽。一般给水要经过三个加热阶段，即：给水被加热成饱和水；饱和水受热蒸发成为饱和蒸汽；饱和蒸汽加热成为具有一定温度的过热蒸汽。具体来说，在锅筒式锅炉中给水首先在省煤器中加热到一定的温度后，送入锅筒与锅水混合，通过下降管进入循环回路；水在上升管中受热达到饱和温度并部分蒸发而形成汽水混合物，再凭借上升管与下降管中工质的密度差或强制循环泵，而使汽水混合物上升进入锅筒。锅筒是圆柱形的承压容器，它接受由省煤器来的水，向循环回路供水并向过热器输送饱和蒸汽，所以是水被加热、蒸发和过热三个过程的连接枢纽。汽水混合物在锅筒中进行分离后，水通过下降管进入循环回路，而饱和蒸汽则进入过热器系统，加热成具有一定过热度的蒸汽。

水蒸汽是动力工业中常用的热载体。蒸汽在汽轮机中膨胀作功推动汽轮机转动，使热能转换成机械能，汽轮机又带动发电机将机械能转换成电能而输出。从图1-1热电厂的原则性汽水流程来看，大部分蒸汽在汽轮机中作功后进入凝汽器，被冷却成水，再由凝结水泵送回除氧器；另一部分蒸汽在汽轮机中膨胀（作功）到一定压力后，抽出送到给水加热系统或蒸汽用户。用户用过的蒸汽中，可能只有部分回收，返回到除氧器；也可能完全不回收，造成工质的损失。此外，在汽水系统中因排污、泄漏及厂用汽等还要损失掉一些工质。损失掉的这部分水一般是用经化学处理过的水来补充。化学处理水中总是含有一些杂质的，成为汽水系统杂质的主要来源。此外，凝汽器汽、水侧的压力低于循环水侧的压力，如果凝汽器管有不严密处，循环水要漏入。循环水是生水，硬度和杂质含量很高，因此，凝汽器泄漏也是杂质进入汽水系统的原因之一。

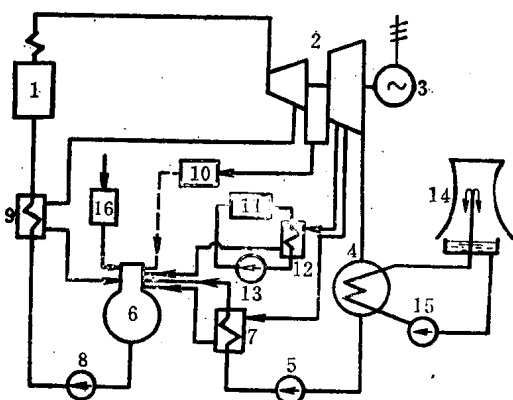


图 1-1 热电厂的原则性汽水流程图

1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—除氧器；7—低压给水加热器；8—给水泵；9—高压给水加热器；10—蒸汽用户；11—热水用户；12—热交换器；13—热网循环水泵；14—冷却塔；15—循环水泵；16—水处理设备

第二节 蒸汽净化的必要性

锅炉的任务是提供一定数量和质量的蒸汽。蒸汽的质量包括压力、温度和品质。所谓

蒸汽品质就是指蒸汽中杂质含量的多少。而合格的蒸汽品质是保证锅炉和汽轮机安全经济运行的重要条件。

由锅筒送出的饱和蒸汽中总是含有一些杂质的，有些杂质以液体状态存在，有些杂质可溶解于蒸汽中，也可能有少量气体杂质混在蒸汽中，这些杂质主要是钠盐、硅酸、二氧化碳和氨等。含有杂质的蒸汽通过过热器时，可能有部分杂质沉积在管内壁上，形成盐垢，使壁温升高，加速钢材蠕变，甚至产生裂纹而爆破。剩余的杂质则随蒸汽进入汽轮机。蒸汽在汽轮机中膨胀作功，随着蒸汽压力的降低，杂质被析出并沉积在汽轮机的通流部分，致使叶片表面粗糙、线型改变和蒸汽通流截面减小，导致汽轮机出力和效率降低。严重时，可能造成调速机构卡涩，轴向推力增大，甚至破坏转子两端的止推轴承。如叶片上结盐垢严重，还可能影响转子的平衡而造成重大事故。另外，沉积在主汽门上的盐分将使阀门开启困难，关闭不严。对于制药及食品等工业，生产用汽与产品是直接接触的，如蒸汽携带的杂质超过规定值，将影响产品质量及工艺条件。所以锅炉送出的蒸汽品质应符合规定的质量标准，为此必须进行蒸汽净化。

第三节 蒸汽质量标准

如前所述，蒸汽质量包括蒸汽参数（压力和温度）和品质。蒸汽的参数应与汽轮机（或生产用汽）规定的标准值相应。至于蒸汽品质，电站锅炉目前是按水利电力部1975年颁发的《火力发电厂水、汽监督规程》中规定的蒸汽质量标准执行，见表1-1。

表 1-1 电站锅炉饱和和过热蒸汽质量监督标准*（1975年）

蒸汽压力 (MPa)	含 钠 量 Na^+ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		二 氧 化 硅 SiO_2 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
	凝 汽 式 电 厂	热 电 厂	
< 6	≥ 15	≥ 20	≥ 25
6~17	10		≥ 20

* 通过将近十年的实践检验，特别是考虑到机组的腐蚀问题，蒸汽质量标准将进一步提高，水利电力部已指定有关部门着手修订汽水质量标准。

由于具体使用条件很复杂，对工业锅炉汽质的要求各不相同，现行的规定如下：

对有过热器的工业锅炉：饱和蒸汽的湿度 $\geq 1\%$ ；

对无过热器的工业锅炉：饱和蒸汽的湿度 $\geq 3\%$ ；

对无过热器的工业用锅壳式锅炉：饱和蒸汽的湿度 $\geq 5\%$ ；

工业用的过热蒸汽含钠量 $< 300\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

第四节 蒸汽被污染的原因

所谓蒸汽污染，是指蒸汽中含有杂质的现象。蒸汽被污染的原因有二：一为饱和蒸汽携带含盐的水滴，即水滴状带盐，称为机械性携带；另一原因为饱和蒸汽溶解携带某些杂

质。随着压力的升高，蒸汽溶解盐的能力加大，某些杂质（对于电站锅炉，主要是硅酸）能溶解于压力较高的蒸汽中，称为溶解性带盐。由于蒸汽对不同杂质的溶解能力不同，蒸汽的溶盐具有选择性，故又称为选择性携带。

饱和蒸汽机械携带的盐分 S_{bq}^I

$$S_{bq}^I = \frac{\omega}{100} S = KS \quad (1-1)$$

式中 ω ——饱和蒸汽的湿分百分数；

S ——产生蒸汽的水（例如某一段的锅水或清洗水）的含盐量；

K ——机械携带系数。

对于中、低压锅炉来说，机械携带几乎是蒸汽带盐的唯一方式。

饱和蒸汽中溶解携带某种杂质的量 S_{bq}^{RM}

$$S_{bq}^{RM} = \frac{a_M^R}{100} S^M \quad (1-2)$$

式中 S^M ——与蒸汽接触的水（锅水或清洗水）中该物质的含量；

a_M^R ——某种物质的分配系数，%。

分配系数是某种物质溶解在蒸汽中的量与它在和蒸汽相接触的水中含量之比，以百分数表示：

$$a_M^R = \frac{S_{bq}^{RM}}{S^M} \times 100\% \quad (1-3)$$

饱和蒸汽中溶盐的总含量 S_{bq}^R 为各种盐类溶解量的总和，即：

$$S_{bq}^R = \sum S_{bq}^{RM} = \sum \left(\frac{a_M^R}{100} S^M \right) \quad (1-4)$$

为了便于现场使用，常用硅酸的溶解系数来表示蒸汽对它的溶解能力。所谓硅酸的溶解系数是指蒸汽溶解的硅酸和水中的硅酸与硅酸盐的总浓度之比。因在现场试验和日常的化学监督中，都是测量蒸汽和水中的硅酸根，也就是相当于蒸汽中的硅酸浓度（因蒸汽只能溶解携带分子状态的硅酸）和水中的硅酸与硅酸盐的总浓度。硅酸的溶解系数与水的pH值有关。当 $pH < 7.5$ 时，溶于水中的硅酸盐几乎全部水解为硅酸，此时硅酸的分配系数与溶解系数相同。

由上述可知，饱和蒸汽携带某种杂质的量，应为机械携带与溶解携带之和。这些杂质是随给水进入锅炉的。因此蒸汽被污染的根本原因在于给水中含有杂质，或者说蒸汽中的杂质主要来源于补充水及由于凝汽器泄漏而漏进的未经处理的循环水。

第五节 蒸汽携带水滴(机械携带)的过程

一、锅筒汽空间中水滴的形成

如上所述，蒸汽的机械携带主要是携带锅水滴，故首先对水滴的形成过程加以阐述。汽空间中水滴的形成过程有二：液流被机械打碎和因汽泡在蒸发表面破裂而形成水滴。具体形成过程如下：

(一) 因机械打碎而形成的水滴

由上升管来的汽水混合物具有很大的动能。当上升管由锅筒的汽空间引入时，如汽水流与蒸发面、挡板或锅筒壁相碰撞或汽流相互冲击时，水流被打碎形成水滴。此外，当锅筒水面激烈波动所溅起的大水滴回落到水面时，又被打碎形成二次水滴。水滴的直径直接影响到机械携带，以下为对机械打碎形成的水滴直径进行的分析。

设有一质量为 m 的液团，以均方根速度 $\bar{w}$ 与一挡板相撞击，液团的动能 E_d 将转化为破碎形成的小水滴的表面能 E_b ，液团的动能

$$E_d = \frac{1}{2} m \bar{w}^2 = \frac{1}{2} n \frac{\pi}{6} d_s^3 \rho' \bar{w}^2 \quad (1-5)$$

破碎小水滴所消耗的表面能

$$E_b = n \pi d_s^2 \sigma \quad (1-6)$$

若全部动能都转化为小水滴的表面能，即式(1-5)等于式(1-6)，则求得的水滴直径 d_s 将为机械打碎时能形成的最小水滴平均直径

$$d_s^{min} = \frac{6\sigma}{\frac{\bar{w}^2}{2} \rho'} = \frac{12\sigma}{\bar{w}^2 \rho'} \quad (1-7)$$

上三式中 d_s ——水滴的平均直径；

d_s^{min} ——可能形成的最小的水滴平均直径；

σ ——饱和水（锅水）的表面张力系数；

ρ' ——饱和水的密度；

n ——小水滴的数目；

$\bar{w}$ ——相遇液流的均方根速度。

由式(1-7)可见，汽水混合物的动能愈大，碰撞时被打碎而形成的水滴愈小，压力愈高锅水的表面张力愈小，机械打碎所形成的水滴直径也愈小。

(二) 汽泡在蒸发表面破裂时形成的水滴

当汽泡从水室内上浮到蒸发表面时，汽泡的上半部突出于汽空间，水膜减薄以至于破裂，破裂的水膜形成一些细小的水滴。然后，由于汽液两相的压力差及液膜的表面张力的作用，汽泡周围的水急剧向中心集聚以填补空虚部位，形成一个波峰。以一定速度向上升起的峰顶断成几个大水滴，抛向汽空间（见图1-2）。

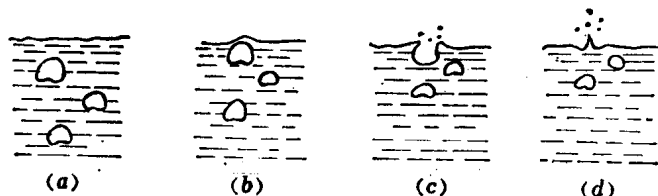


图 1-2 汽泡在蒸发表面破裂的过程

(a) 汽泡在水内上浮；(b) 汽泡到达水面；(c) 水膜破裂形成小水滴；(d) 汽泡破裂处液体向中心集中，形成波峰，峰顶断裂形成几个大水滴

设汽泡破裂后其表面能全部转换为抛出水滴的动能, 可得出产生的水滴的直径 d_{s1}

$$d_{s1} = C \left(\frac{\sigma d_q^3}{\rho' g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-8)$$

式中 d_q ——汽泡的直径;

C ——与水滴的数量及初动能有关的系数。

随着压力的升高, 水的表面张力和汽泡的直径都变小, 所以汽泡破裂时形成的水滴直径变小。

试验证明: 汽泡在蒸发表面上破裂所形成的水滴直径最小, 液流撞击水面所产生的水滴次之, 撞击挡板所形成的水滴较大。

二、水滴的带出过程

飞溅入汽空间的水滴虽然具有一定的初速, 但因水滴与蒸汽之间有相对运动, 它的动能很快就因摩擦或转换为位能而消耗掉。在向上流动的蒸汽流中, 水滴受到蒸汽的浮力、曳力(摩擦力)及其自身的重力作用。一粒静止的水滴在上升蒸汽流中所受的力为:

$$\text{水滴自身的重力} \quad G = \frac{\pi d_s^3}{6} \rho' g \quad (1-9)$$

$$\text{蒸汽对水滴的浮力} \quad F_t = \frac{\pi d_s^3}{6} \rho'' g \quad (1-10)$$

$$\text{蒸汽对水滴的曳力(摩擦力)} \quad F_y = C_y \frac{\pi}{4} d_s^2 \frac{w''^2}{2} \rho'' \quad (1-11)$$

上三式中 d_s ——水滴的直径;

ρ'' ——饱和蒸汽的密度;

w'' ——蒸汽的上升速度;

C_y ——蒸汽对水滴的曳力(摩擦)系数。

对于较大的水滴, 其重力大于蒸汽对它的浮力及曳力(摩擦力)之和, 故水滴随蒸汽向上运动到某一高度后, 又回落到水面, 这种作用称为重力分离。对于较小的水滴, 其自身重力小于蒸汽对水滴的浮力及摩擦力, 如锅筒汽空间未装设汽水分离装置, 这些水滴将随蒸汽流飞升而不会回落下来。

水滴随汽流飞升的临界情况是水滴的重力等于蒸汽对它的浮力及曳力之和, 即:

$$G = F_y + F_t \quad (1-12)$$

把式(1-9)~(1-11)代入式(1-12), 可得出飞升速度 w_{ts} 及飞升直径 d_{ts} 。飞升速度 w_{ts} 是指当水滴直径一定时, 能将此水滴带到任意高度的最小蒸汽上升速度。飞升直径 d_{ts} 是指当蒸汽上升速度一定时, 能被此蒸汽流带至任意高度的水滴的最大直径。能被蒸汽流带至任意高度的水滴称为输送水滴或传送水滴。

$$w_{ts} = \sqrt{\frac{4g(\rho' - \rho'')}{3C_y \rho''}} d_s \quad (1-13)$$

$$d_{ts} = \frac{3C_y \rho'' w''^2}{4g(\rho' - \rho'')} \quad (1-14)$$

式中 C_y 为曳力系数。对于球形粒子, 在不同的雷诺数范围内, C_y 的计算公式如下:

$$C_r = \frac{24}{Re}, Re < 0.4 \quad (1-14a)$$

$$C_r = \frac{10}{\sqrt{Re}}, 0.4 < Re < 500 \quad (1-14b)$$

$$C_r = 0.43, 500 < Re < 200000 \quad (1-14c)$$

$$Re = \frac{d_{ts} w''}{\nu''} \text{ 或 } Re = \frac{d_s w_{ts}}{\nu''}, \nu'' \text{ 为蒸汽的运动粘度系数。}$$

锅筒内产生的水滴的Re一般在0.4~500之间,曳力系数可取 $C_r = \frac{10}{\sqrt{Re}}$ 。代入式(1-13)及(1-14)并简化为:

$$w_{ts} = A d_s \quad \text{m/s} \quad (1-15)$$

$$d_{ts} = \frac{1}{A} w''_0 \quad \text{m} \quad (1-16)$$

$$A = \sqrt[3]{\frac{4(\rho' - \rho'')^2 g^2}{225 \rho''^2 \nu''}} \quad (1-17)$$

由式(1-17)可以看出, A的数值只与压力有关,电站锅炉常用压力下的 A值见表1-2。

表 1-2 不同压力下的 A 值

锅筒压力	MPa	4.41	7.84	10.88	15.29
A	1/s	1367.53	995.5	779.9	448.3

由式(1-15)、(1-16)可以看出:当蒸汽上升速度提高时,水滴的飞升直径 d_{ts} 增大,也就是被带到任意高度的水滴的数量增多。随着压力的升高,汽水密度差减小,而蒸汽密度增大。对于同样直径的水滴,高压下的飞升速度比中压时要小。在相同的蒸汽上升速度下,高压时能输送的水滴的直径比中压时要大,而且高压时所形成的水滴直径也比中压时为小,所以高压下蒸汽传送能力较大,因而汽空间允许的蒸汽上升速度应比中压时小得多。

综上所述,在锅筒汽空间中形成的水滴的数量愈多,直径愈小,蒸汽的上升速度愈大;锅筒的压力愈高,则蒸汽带水愈多。

三、影响机械携带的因素

饱和蒸汽带水量与蒸汽空间高度、蒸发面负荷、锅水含盐量、蒸汽压力及锅内装置的形式等有关。锅筒内蒸汽的带水过程较为复杂,可用圆柱形浮泡筒做试验以分析各因素的影响。浮泡筒如图1-3所示,在汽空间装有可改变位置的抽汽顶板,水室中装有水下孔板。用这种试验装置来研究重力分离的作用,其工况与只装有水下孔板及均汽板的中低压锅炉的锅筒相近,与具有平孔板蒸汽清洗装置的锅筒中由清洗孔板到均汽板之间的汽水分离情况也是相近的。但与装有其他类型汽水分离装置的锅筒的工况不尽相同。其他汽水分离装置对机械携带的影响将在以后各章中分析。

(一) 蒸汽空间高度对机械携带的影响

保持浮泡筒压力和蒸发面的蒸汽负荷一定，利用浮泡筒，测得蒸汽湿分与汽空间高度的关系如图1-4所示。蒸汽空间高度是指实际水位到抽汽顶板之间的距离。当抽汽顶板位置高于A时，蒸汽湿分很小，如再提高抽汽顶板的位置，所测得的蒸汽的湿分变化很微小。如抽汽顶板降低到A以下时，测得的蒸汽湿分则不断增加；一旦降到B以下，蒸汽湿分则急剧增加。

按水滴带出的规律，当蒸发面负荷一定时，直径小于 d_{rs} 的水滴将被向上流动的蒸汽带到任意高度；直径大于 d_{rs} 的水滴，按水滴直径的大小，将被蒸汽传送到不同的高度。直径比较大的水滴，蒸汽对它们的传送作用很小，只是靠汽泡破裂时，因水膜表面张力作用，将水滴射向上方，水滴靠此初动能喷溅到某一高度。所以，沿浮泡筒的高度可划分为

四个区段。高于A的一段空间称为第I区段，是细水滴的传送区，重力分离的作用很小。A到B之间的一段高度称为第II区段，是粗水滴的非传送区。B到实际水位之间的一段高度称为第III区段，是大水滴的喷溅区。实际水位以下为第IV区段，也就是含有汽泡的水室。各区段间虽然很难找到非常明确的分界面，但各个区段中蒸汽的湿分与汽空间高度的关系显然是不同的。第II与第III区段的分界面B称为喷溅前沿。喷溅前沿以下，蒸汽湿分急剧增加。

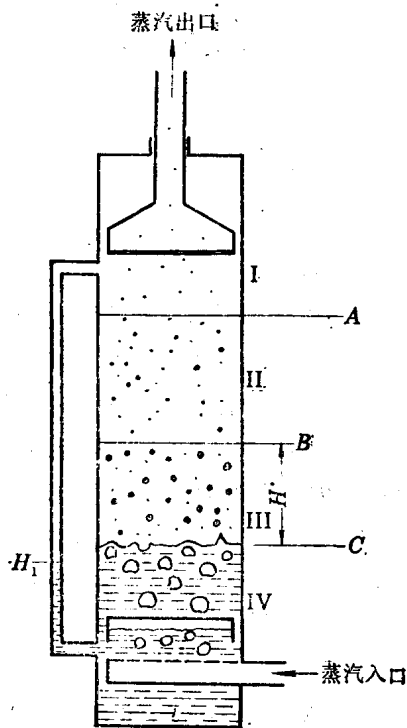


图 1-3 浮泡筒示意图

I—第一区段细水滴传送区；II—第二区段粗水滴非传送区；III—第三区段大水滴喷溅区；IV—第四区段含汽泡的水空间

H_1 —可见水位；A—第一、二区段的分界面；B—喷溅前沿；C—实际水位； H^* —汽空间临界高度

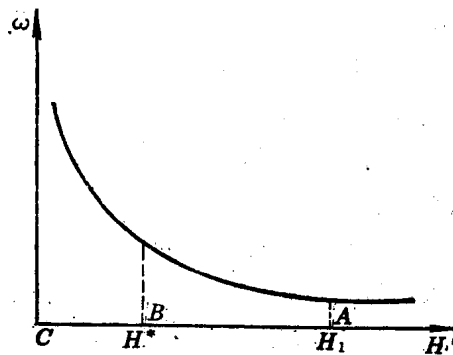


图 1-4 蒸汽湿分 ω 与蒸汽空间高度 H 的关系

从以上分析可见，当抽汽顶板位置高于A以后，再用增加汽空间高度的办法来降低蒸汽湿分已没有意义。而汽空间高度低于喷溅前沿，则蒸汽将大量带水，因此实际水位到喷溅前沿的距离又称为蒸汽空间的临界高度 H^* 。

(二) 蒸发面负荷对机械携带的影响

单位时间内通过锅筒单位蒸发面的蒸汽流量称为蒸发面负荷。当蒸汽流量用容积流量

来表示时,称为蒸发面容积负荷,以 R_s 表示。

$$R_s = Dv''/F_{st} \quad \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (1-18)$$

式中 D ——蒸汽流量, t/h;

F_{st} ——锅筒的蒸发面面积, m^2 。

蒸发面负荷反映了通过锅筒蒸发面的汽泡频率,也反映了汽空间蒸汽上升速度。如汽空间高度不变,随着蒸发面负荷的增加,水室含汽量增加,实际水位将提高;由于通过蒸发面的汽泡增多,汽泡破裂时形成的水滴数量也增多。蒸发面的负荷增加,也就意味着蒸汽上升的速度增大,对水滴的传送作用加强,使图1-3中的A和B都相应增高,蒸汽湿分增加。

当蒸发面面积为一定值时,可以用蒸汽量 D 来表示蒸发面负荷。则蒸汽湿分 ω 与 D 的关系可以式(1-19)及图1-5来表示。

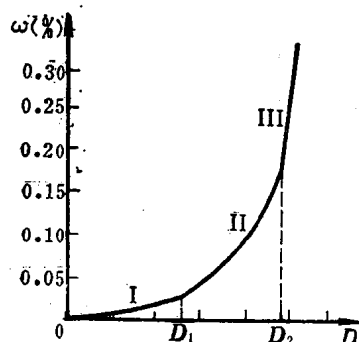


图 1-5 蒸汽湿分 ω 与负荷 D 的关系

第I负荷区 $n=0.5 \sim 1.5$; 第II负荷区 $n=3 \sim 4$,
第III负荷区 $n=7 \sim 20$

$$\omega = AD^n \quad (1-19)$$

式中 A ——系数;

n ——与 D 有关的指数。

当通过蒸发面的蒸汽量小于 D_1 时,抽汽顶板处于细水滴传送区,这时只能带出细小的水滴。随着 D 的增加,飞升直径 d_{ts} 增大,蒸汽传送水滴的数量增加。当 D 增大到 D_1 时,细水滴传送区与粗水滴传送区的分界面提高到抽汽顶板的位置,这时将带出粗水滴,蒸汽湿分增加很快。当 D 增大到 D_2 时,则抽汽顶板处于喷溅前沿。继续增大负荷则蒸汽湿分急剧增加。蒸汽负荷小于 D_1 的范围称为第I负荷区,在此负荷区内,蒸汽湿分为 $\omega \leq 0.03\%$,指数 n 为 $0.5 \sim 1.5$; D_1 与 D_2 之间称为第II负荷区,湿分为 $0.03\% \sim 0.20\%$, n 为 $3 \sim 4$; 蒸汽负荷大于 D_2 时为第III负荷区,湿分大于 0.20% , n 为 $7 \sim 20$ 。各负荷区的划分点的蒸汽湿分及各区段的 n 值的变化范围都较大,这与测试方法等因素有关。

(三) 锅水含盐量对机械携带的影响

锅水含盐量影响水的表面张力和动力粘度。锅水含盐浓度增大,水分子的结合力增强,小汽泡不易合并成大汽泡。而且随着锅水含盐浓度的增大,汽泡间的液体粘度增大,沿汽泡表面水层的流动摩擦阻力也增大,因而浮到水面上的汽泡不易破裂,要在水面上停留一段时间,待水膜减薄后才破裂。因此水面上形成泡沫层,使蒸汽空间高度减小。汽泡直径愈小,它在炉水中上浮的速度也愈慢,因而水室中含汽量增多,水位膨胀加剧。此外汽泡直径越小,内部过剩压力愈大,破裂时抛出的水滴直径减小,数量增多;汽泡液膜强度大,则只能在液膜很薄时才会破裂,液膜破裂时生成的水滴更细小,这些水滴都容易被蒸汽带走。

蒸汽含盐量 S_{bq} 与锅水含盐量的关系如图1-6所示。在锅水含盐量较低条件下,蒸汽含盐量随着锅水含盐量的增加而按比例增加,亦即蒸汽的机械携带系数不变。但当锅水浓度增大到某一数值时,蒸汽含盐量急剧增加,此时的锅水含盐量即为锅水临界含盐量 S_{lj} 。