



# 凝汽器 腐蚀与结垢 控制技术

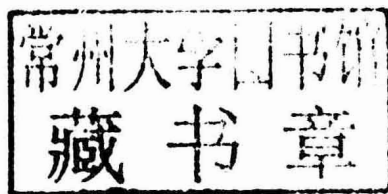
吴文龙 张小霓 张春雷 李献敏 编著



 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 凝汽器 腐蚀与结垢 控制技术

吴文龙 张小霓 张春雷 李献敏 编著





## 内 容 提 要

本书介绍了火电机组凝汽器的组成、结构、功能及相关技术指标；对凝汽器常见的腐蚀类型、原理、危害和防止进行阐述；对凝汽器产生污垢的原因和危害进行讨论和分析，并分别对无机污垢和生物污垢防止的多种方法进行了详细的分析，介绍了污垢清洗的方法；给出了凝汽器腐蚀和结垢的分析与处理的案例；介绍了凝汽器腐蚀和结垢的监测、日常监督方法和防腐防垢效果的评价方法。

本书重视实用性，信息量大、深入浅出、图文并茂，许多案例来自于生产实践，可供电厂化学、汽轮机等专业人员使用，也可以作为电力院校师生的教学参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

凝汽器腐蚀与结垢控制技术/吴文龙等编著. —北京：中国电力出版社，2011.12

ISBN 978-7-5123-2515-9

I. ①凝… II. ①吴… III. ①火力发电-发电机组-蒸汽冷凝器-防腐 ②火力发电-发电机组-蒸汽冷凝器-结垢-防治 IV. ①TK264.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 267293 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 342 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

随着水资源的日益紧缺和水污染的日趋严重，火电厂凝汽器管结垢和腐蚀现象时有发生，严重影响机组的安全经济运行。为了减少和杜绝此类事故的发生，2011年7月，能源部颁布了DL/T 300—2011《火电厂凝汽器管防腐防垢导则》。导则汇集了国内外相关的最新科研成果和经验，使得火电厂凝汽器防腐防垢技术的应用更加系统、全面和合理。为使相关技术人员对标准有更深刻、更准确的理解，执行更加有效，标准起草人编著了本书。

本书第一章介绍了火电机组凝汽器的组成、结构和功能，相关技术指标；第二章对凝汽器常见的腐蚀类型、原理、危害和防止进行阐述；第三章对凝汽器产生污垢的原因和危害进行描述，并对污垢影响凝汽器经济性的定量方法进行讨论；第四、五、六章分别对无机污垢和生物污垢防止的多种方法进行详细的分析，并介绍了污垢的清洗方法；第七章介绍了凝汽器腐蚀和结垢监测、日常监督方法和防腐防垢效果的评价方法；第八章给出了凝汽器腐蚀和结垢分析与处理的案例。

防止火力发电厂凝汽器管腐蚀和结垢是一个系统工程。它涉及冷却水水源的选择与处理，管材的选择和安装，循环冷却水处理、日常监督与控制，停运时的维护等各个环节，贯穿了电厂基建、安装、运行的全过程。对于采用循环冷却方式的电厂，防腐防垢的重点是对循环水进行处理，保证系统没有明显污垢是循环水处理的目标之一；控制系统中所有材质的腐蚀速率在标准范围内，使其使用寿命达到设计年限，是循环水处理的另一目标；控制局部腐蚀（点蚀）是循环水处理的难题和重点。对使用天然水作为循环水的浓缩倍率应以不低于3、不高于6为宜，使用再生水的循环水浓缩倍率应以不低于2、不高于5为宜，并根据具体情况选择最佳浓缩倍率。现行成熟有效的循环水防垢方法有水质调整（去除水中的钙、镁硬度和降低碱度、碳酸根浓度）处理和药剂阻垢分散处理，对于其他未成熟的处理方法要经过充分的技术经济论证后，才能使用；防腐控制应通过选择合适的材质、控制微生物、保证管材表面的清洁度、添加缓蚀剂、控制pH值等水质条件、做好停运保护等综合措施来实现防止管材腐蚀的目的。凝汽器管特别是以黄铜为材质时，汽测腐蚀时有发生，其防止方法是选择在空抽区和过渡区使用白铜管或不锈钢，防止振动，同时注意控制氨浓度；微生物的存在和繁殖会引起循环水系统的众多故障。循环水的主要生物是菌类和藻类，加入杀生剂控制微生物的数量在一定的限度内，就能防止由微生物引起的循环水故障风险。凝汽器选材时，天然水可使用铜管，



再生水原则上不使用铜管，并按最恶劣的水质选材，辅机冷却水管材宜选择不锈钢管，并选用更高等级（耐氯离子浓度）的材质。应对防腐防垢的效果进行日常监督和监测，及时调整工艺和参数，停机检修时进行检查并根据相关标准做出评价，对出现的问题应进行科学分析，采取相应措施。

本书重视实用性，信息量大、深入浅出、图文并茂，许多案例来自于生产实践，可供电厂化学、汽轮机等专业人员使用，也可以作为电力院校师生的教学参考书。

本书引用了许多作者的论文和著作的相关内容，在此对他们的杰出工作表示感谢！本书在编制过程中得到了河南电力试验研究院环保所同仁的大力支持和协助，在此也表示感谢。

尽管我们做出了很大努力，但由于时间和水平有限，错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011年11月7日

# 目 录

## 前言

<b>第一章</b>	<b>火电机组凝汽器</b> .....	1
第一节	凝汽设备组成和材质 .....	1
第二节	凝汽器类型及常用技术要求 .....	8
第三节	凝汽器的原理和功能 .....	11
第四节	凝汽器的热力计算 .....	14
第五节	凝汽器的运行维护 .....	20
<b>第二章</b>	<b>凝汽器的腐蚀与防护</b> .....	28
第一节	腐蚀类型和危害 .....	28
第二节	材质的选择和质量保证 .....	45
第三节	缓蚀处理 .....	54
第四节	镀膜 .....	70
第五节	阴极保护 .....	77
第六节	涂层 .....	79
第七节	停运保护 .....	81
<b>第三章</b>	<b>凝汽器的污垢</b> .....	83
第一节	污垢的种类和组成 .....	83
第二节	无机垢的形成 .....	85
第三节	生物污垢的特征和形成 .....	89
第四节	污垢的危害 .....	98
<b>第四章</b>	<b>无机盐垢的防止</b> .....	107
第一节	冷却水水质及处理 .....	107
第二节	循环水阻垢分散处理 .....	125
第三节	电磁防垢 .....	133
第四节	日常监测和监督 .....	144

<b>第五章</b>	<b>生物污垢的防止</b>	156
第一节	化学法	156
第二节	物理法	162
第三节	日常监测和监督	163
<b>第六章</b>	<b>清洗</b>	167
第一节	化学清洗	167
第二节	不停机化学清洗	177
第三节	凝汽器胶球清洗技术	181
<b>第七章</b>	<b>防腐、防垢的监督和效果评价</b>	188
第一节	防腐、防垢的日常监督	188
第二节	凝汽器检查	193
第三节	效果评价	200
<b>第八章</b>	<b>故障的诊断与处理</b>	203
第一节	结垢	203
第二节	腐蚀	205
第三节	腐蚀处理	220
<b>参考文献</b>		222

# 第一章

## 火电机组凝汽器

### 第一节 凝汽设备组成和材质

#### 一、凝汽设备的组成

火力发电机组的凝汽设备是重要的热交换设备，作用是将汽轮机排气冷凝成水的一种换热器，并形成和保持所需要的真空。凝汽设备包括凝汽器、抽气器、凝结水泵和循环水泵，其中凝汽器是最主要的组成部分。凝汽器是整个热力循环中的冷源。其主要作用是：在汽轮机排汽口形成较高真空，使蒸汽在汽轮机中膨胀到最低压力，增大蒸汽在汽轮机中的可用焓降，提高循环热效率；将汽轮机的排汽凝结成水，重新送回锅炉循环；汇集各种疏水，减少汽水损失。图 1-1 所示为凝汽设备示意图。

凝汽设备运行时，建立并维持如下三个平衡：

- (1) 质量平衡，进入蒸汽量等于抽出凝结水量；
- (2) 热量平衡，蒸汽放出的热量等于冷却水（循环水）带走的热量；
- (3) 空气平衡，漏入空气量等于抽出空气量。

运行流程为：汽轮机排出的蒸汽→凝汽器汽测，与凝汽器管接触→凝结→放出潜热→凝结水沿管壁→热井→加热器。

#### 二、凝汽设备的作用

在凝汽设备中，蒸汽和凝结水两相共存的，蒸汽压力是凝结温度所对应的饱和压力。正常条件下，蒸汽凝结的温度一般约为  $30^{\circ}\text{C}$ 。 $30^{\circ}\text{C}$  左右的蒸汽凝结温度所对应的饱和压力为  $4\sim 5\text{kPa}$ ，远远低于大气压力，形成高度真空。此时，处于负压的凝汽设备及管道接口并非绝对严密，外界空气会漏入。为了避免这些在常温条件下不凝结的空气在凝汽器中逐渐累积造成凝汽器中压力升高，一般采用抽气器不断地将空气从凝汽器中抽出以维持凝汽器内真空。

由此可知，凝汽设备的主要作用有两个：①在汽轮机排气口建立并维持真空；②将汽轮机排汽凝结成凝结水作为锅炉给水循环使用。

各凝汽设备的作用如下所述。

##### 1. 凝汽器

将汽轮机排汽凝结成凝结水并在汽轮机排汽口建立高度真空；进行真空除氧，提高凝

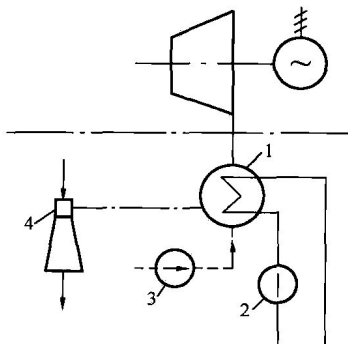


图 1-1 凝汽设备示意图

1—凝汽器；2—循环水泵；  
3—凝结水泵；4—抽气器



水的品质。

## 2. 抽气设备

在机组启、停时，抽出凝汽器内空气，建立凝汽器内真空；机组运行时，连续不断地抽出凝汽器内漏入的空气等不凝结气体和蒸汽，维持凝汽器内真空。

## 3. 凝结水泵

将凝汽器中的凝结水升压后，送至除氧器。

## 4. 循环水泵

将循环水升压后送入凝汽器水侧并维持循环水在凝汽器管内的流动。

## 三、凝汽器组成

凝汽器是凝汽设备中的重要组成设备。凝汽器本体由喉部、壳体、水室、冷却水管、热水井组成，以 N-7100 型凝汽器为例，结构见图 1-2。

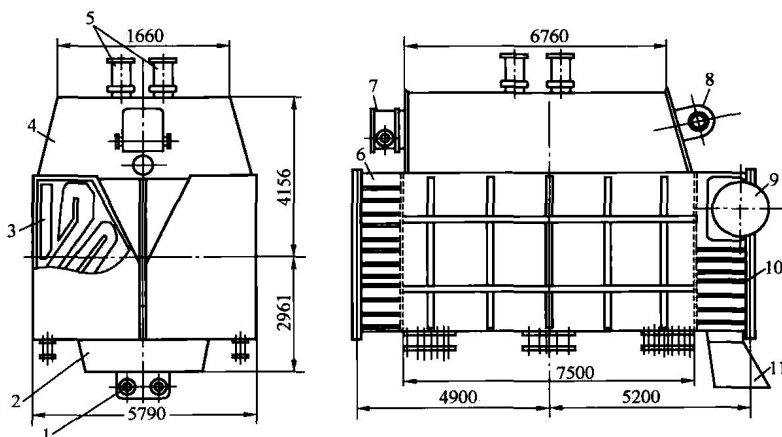


图 1-2 N-7100 型凝汽器结构

1—凝结水出口；2—热井；3—管束；4—喉部；5—抽汽进口；6—后水室；7—低压加热器；8—减温减压装置；9—冷却水出口；10—前水室；11—冷却水进口

### (一) 喉部

汽轮机排汽缸与凝汽器本体间有一过渡的部分，称为喉部。大型凝汽器的喉部进汽截面尺寸为凝汽器进汽截面尺寸的 70%~90%。喉部起到连接凝汽器壳体和汽轮机排气口，接受、组织、分配蒸汽的作用。

喉部通常布置有低压加热器、加热器抽汽管组。汽轮机排汽以及低压旁路的排汽装置等排入凝汽器的蒸汽，可按其流量和参数分成不同的能级。

对于排入凝汽器的低能级蒸汽，可采用简单的分配与扩散结构；对于排入凝汽器的中、高能级蒸汽，通常采用多级多孔节流分配集管装置并在某一级内喷水减温，然后排入凝汽器。

### (二) 壳体和水室

#### 1. 壳体

大型凝汽器壳体的截面形状，通常为矩形。凝汽器壳体，除防冲挡板和导流元件采用不锈钢外，其余均采用碳素钢。整个壳体采用焊接结构。为保证刚度要求，大型凝汽器多采用内置式支撑钢管支撑。

## 2. 水室

水室一般采用钢板焊接结构，小型凝汽器的水室也可用铸铁铸造。筋板加强的水室平板结构如图 1-3 所示。

水室装在壳体两端，其中设横隔板以隔分流程，设对分竖隔板将管束分为左右两半，以便在不停机时，进行凝汽器半边清洗。

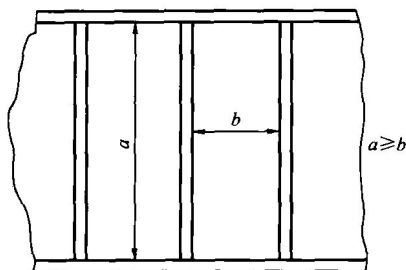


图 1-3 筋板加强的水室平板结构

大型凝汽器水室尺寸很大，容积可达  $30\sim 50\text{m}^3$ ，循环水接管直径达  $1.5\sim 2.0\text{m}$ 。水室结构应尽可能减少循环水的阻力损失，并使水均匀分配至冷却管内。如采用胶球清洗时，应力求避免涡流区和死角。每个水室设置两个人孔，以便清理和检修。水室的每个流道设置放水、放气接口。当循环水为海水时，为避免海水对水室的腐蚀，目前采用橡胶衬里或环氧树脂涂层。

## 3. 冷却管及管束布置

### (1) 冷却管。

1) 管径和壁厚。随机组容量增加，凝汽器冷却面积成比例地增大，冷却管尺寸也逐渐增大，尺寸为  $\phi 16\times 1$ 、 $\phi 19\times 1$ 、 $\phi 22\times 1$ 、 $\phi 25\times 1$ 、 $\phi 28\times 1.2$ 、 $\phi 30\times 1.2$ 、 $\phi 32\times 1.5$ （单位：mm）。从减小水阻和抗震性能考虑，大功率汽轮机的凝汽器趋向于采用大直径的冷却管。

随着管径的增加，壁厚也从 1mm 增大至 1.2mm 或 1.5mm，凝汽器传热系数降低约 1.6%。因此，只在受到汽流直接冲刷的周边和进口处的冷却管才选用厚壁管。对于钛和不锈钢管，由于抗腐蚀，壁厚可取 0.5~0.7mm。

2) 冷却管长度。冷却管长度的选择与冷却水流程数、管内水速以及喉部扩散角有关。如采用单流程，冷却管长度大；对多流程，相应管长度小。

对每种冷却管管材，从使用寿命考虑，都有最高允许流速。水速太低，不仅传热系数下降，而且管内易堆积和附着沉积物，加速冷却管的结垢和腐蚀。

### (2) 管束布置。

冷却管在管板上的布置直接影响凝汽器的工作，它是影响传热效果、汽阻和凝结水过冷度的一个重要因素。凝汽器管束的布置应以提高传热效果、减小汽阻和降低凝结水过冷度为基本原则。

1) 凝汽器进口到抽气器的途径应力求短而直，且有足够的通道面积，使蒸汽进入管束时的平均速度不超过  $50\text{m/s}$ ；为了使蒸汽能深入内层管束，保证冷却管的负荷均匀，沿汽流方向的管子排数尽可能减小，以降低汽阻。

2) 为便于利用排汽加热凝结水，应有一定的通道使蒸汽能自由地流向热井，抽气口的位置应离凝结水远一些，借以减小凝结水的过冷度。

3) 合理地安排空气冷却区的位置、设置适当的挡板，并使空气蒸汽混合物具有较高的流速（不超过  $50\text{m/s}$ ），以提高空气冷却区的传热效果。

管束的排列方式有三角形、正方形、辐向排列三种方式，如图 1-4 所示。

一般冷却管用扩管或焊接连接在管板上，为了保证凝结水的质量，在运行时应保证连接处有较高的严密性。由于两管板之间的冷却水管长而细，为了避免管子振动和减小管子的扰

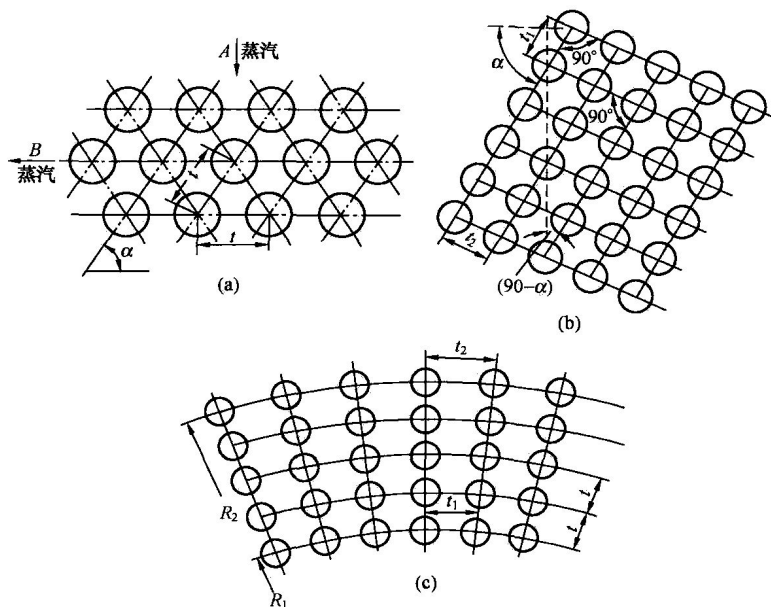


图 1-4 管束排列方式

(a) 三角形排列法；(b) 斜放正方形排列法；(c) 辐向排列法

度，在两管板之间装有若干中间隔板，如图 1-6 所示。一般情况下，中间隔板上孔的中心比管板上孔的中心抬高 5~10mm，以确保管子与隔板间紧密接触，改善管子的振动特性；同时，由于管子向上弯曲，也减小了热膨胀时所产生的弯曲应力，并能使凝结水沿弯曲的冷却水管表面向两端流下，减薄管子外层的水膜，提高传热效率。

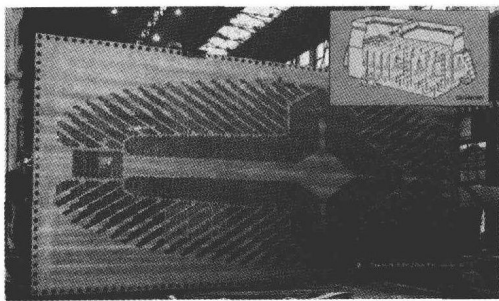


图 1-5 管束布置图

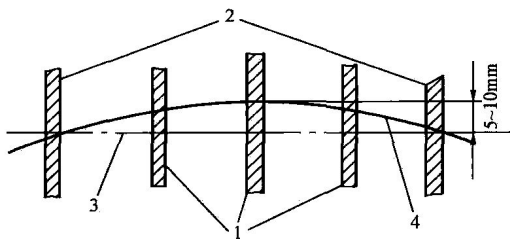


图 1-6 凝汽器中的中间隔板结构

1—中间隔板；2—前后管板；3—管板管孔中心线；  
4—冷却水管中心线

#### 4. 热水井

热水井是凝汽器底部汇集凝结水的水箱，热水井储存一定量的凝结水，保证甩负荷时不使凝结水泵马上断水。热水井的容积一般要求相当于满负荷时为 0.5~1min 内所聚集的凝结水流量。

一般热水井的水位应保持在水井的 1/3~2/3，如果水位过高，淹没部分管束，汽轮机排汽凝结的空间和换热空间减小，排汽温度升高，真空下降，机组的经济性降低。如果水位过低，凝结水泵耗电较少，但是容易使水泵产生汽蚀，损坏叶轮，运行时使水泵产生一定的

振动及出口压力摆动的现象。

#### 四、材质

##### (一) 凝汽器常用材质

凝汽器常用材料见表 1-1。

表 1-1 凝汽器常用材料

零部件名称		材料名称	材料牌号	技术标准	适用条件
蒸汽侧	壳体、喉部、 中间支撑隔板	碳钢板	Q235-A Q235-A·F	GB 3274	
			20g 22g	GB 713	
	防冲板、补偿器	不锈钢板	1Cr13 0Cr18Ni9 1Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti	GB 4237	
冷却水侧	管板	碳钢板	Q235-A	GB 3274	适用于淡水
			20g 22g	GB 713	适用于淡水
		锡黄铜板	HSn62-1 HSn6-1	GB 2041	适用于海水
		镍白铜板	BFe10-1-1 BFe30-1-1	GB 2050	适用于海水
		钛板	TA2 TA3	GB 3621	适用于海水
	水室	碳钢板	Q235-A	GB 3274	适用于淡水，用于海水时应衬橡胶或环氧树脂
			20g 22g	GB 713	
	冷却管	黄铜管	H68A	GB 8890	适用于淡水
		锡黄铜管	HSn70-1A		适用于海水
		铝黄铜管	HA177-2A		适用于微咸水
镍白铜管		BFe10-1-1	GB 8890	适用于海水	
		BFe30-1-1			
钛管		TA1 TA2	GB 4368	适用于海水	
不锈钢管	1Cr18Ni9 0Cr18Ni9Ti	GB 2270	适用于淡水		
螺栓	碳素钢	Q235-A	GB 700		
		35, 45	GB 699		
	低合金钢	35CrMoV	GB 3077		



## (二) 冷却管管材性能

### 1. 冷却管管材的耐蚀能力 (见表 1-2 和表 1-3)

表 1-2 各种管材的耐蚀能力

腐蚀种类	冷却管材料					
	HSn70-1A	HAl77-2A	B10	B30	不锈钢	TA
一般性腐蚀	2	3	4	4	5	6
冲击腐蚀	2	2	4	5	6	6
点蚀 (运行状态)	4	4	6	5	4	6
点蚀 (积滞状态)	2	2	5	4	1	6
高水速冲击	3	3	4	5	6	6
进口腐蚀	2	2	3	4	6	6
蒸汽热点腐蚀	2	2	3	4	6	6
应力腐蚀	1	1	6	5	1	6
氧化物腐蚀	3	5	6	5	1	6
氨蚀	2	2	4	5	6	6

注 6 表示抗蚀能力最强; 1 表示抗蚀能力最差。

表 1-3 几种管材在海水中的抗蚀能力

海水种类	冷却管材料			
	HAl77-2A	B10	B30	TA
标准海水	1	2	3	4
海水与淡水混合 (海水倒流)	1	2	3	4
污染海水	不能用	不能用	3	4

注 数值大表示抗海水腐蚀能力强。

### 2. 冷却管管材的性能

凝汽器冷却管管材的物理、机械性能见表 1-4。

表 1-4 冷却管管材的物理、机械性能

材料牌号	状态	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 $\delta_{10}$ (%)	弹性模量 (GPa)	密度 (20℃) (kg/dm <sup>3</sup> )	热导率 (20℃) [W/(m·℃)]	线膨胀系数 (20~100℃) ( $\times 10^{-6}/\text{℃}$ )	比热容 (20℃) [J/(kg·℃)]
H68A	半硬(Y <sub>2</sub> ) 软(M)	$\geq 320$ $\geq 295$	$\geq 412$ $\geq 118$	$\geq 35$ $\geq 38$	103	8.60	121	19.9	376
HSn70-1	半硬(Y <sub>2</sub> ) 软(M)	$\geq 320$ $\geq 295$	$\geq 147$	$\geq 35$ $\geq 38$	108	8.54	109	20.2	376
HAl77-2	半硬(Y <sub>2</sub> ) 软(M)	$\geq 370$ $\geq 345$	$\geq 412$ $\geq 137$	$\geq 40$ $\geq 45$	108	8.40	100	18.5	376
HSn70-1B	半硬(Y <sub>2</sub> )	$\geq 295$		$\geq 38$		8.54			376
HSn70-1AB	半硬(Y <sub>2</sub> )	$\geq 320$	$\geq 128$	$\geq 35$		8.53	120		376

续表

材料牌号	状态	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 $\delta_{10}$ (%)	弹性模量 (GPa)	密度 (20℃) (kg/dm <sup>3</sup> )	热导率 (20℃) [W/(m·℃)]	线膨胀系数 (20~100℃) ( $\times 10^{-6}/\text{℃}$ )	比热容 (20℃) [J/(kg·℃)]
BFe30-1-1	半硬(Y <sub>2</sub> ) 软(M)	≥490 ≥370	≥167	≥6 ≥25	118	8.90	46	17.8	376
BFe10-1-1	半硬(Y <sub>2</sub> ) 软(M)	≥345 ≥300	≥195 ≥137	≥8 ≥25	118	8.90	46	16.2	376
TA0	退火(M)	280~420	≥170	≥24	110	4.51	17	9.0	500
TA1	退火(M)	370~530	≥250	≥20					
TA2	退火(M)	440~620	≥320	≥18					
TP304	退火	≥515	≥205	≥35	193	8.03	13.8	15.1	502
TP304L		≥485	≥170	≥35					
TP316	退火	≥515	≥205	≥35	193	8.03	13.4	16.2	500
TP316L		≥485	≥170	≥35					
TP317	退火	≥515	≥205	≥35	200	8.03	13.4	16.2	500
TP317L		≥515	≥205	≥35					

## (三) 冷却管材质检验

冷却管材质的检验。冷却管材质的检验见表 1-5。

表 1-5

冷却管材质的检验

项目名称	取样数量	检验方法	检 验 项 目		
			钛管 (GB/T 3625)	黄铜管 (GB 8890)	白铜管 (GB/T 8890)
化学成分分析		钛管 GB/T 4698.1~25 铜合金管 GB/T 5121.1~23	√	√	√
拉伸试验	每批 2 根、每根 1 个试样	GB/T 228	√	√	√
压扁试验	每批 2 根、每根 1 个试样	GB/T 246	√	√	√
扩口试验	每批 2 根、每根 1 个试样	GB/T 242	√	√	√
水压试验	逐根	GB 241	√	√	√
超声波检验	逐根	GB/T 12969	√		√
尺寸公差	逐根	量具	√	√	√
表面质量	逐根	目视	√	√	√
内应力测量		硝酸亚汞或氨熏法		√	

## 第二节 凝汽器类型及常用技术要求

### 一、凝汽器分类

凝汽器可按汽轮机排汽的凝结方式、冷却水流程数等进行分类，凝汽器分类见表 1-6。

表 1-6 凝汽器分类

分类原则	分 类	特 点
凝结方式	表面式	排汽在冷却管外凝结，冷却水在管内流动
	混合式	排汽与冷却水直接接触并被凝结
	空气冷却式	排汽在冷却管内凝结，空气在管外横掠流过
凝汽器壳体数	单壳体	采用一个壳体
	多壳体	采用两个及以上壳体
供水方式	直流供水	冷却水一次性使用
	循环供水	冷却水循环使用
冷却水流程	单流程	冷却水在管内流过一个流程就排出凝汽器
	双流程	冷却水在管内流过两个流程再排出凝汽器
	多流程	冷却水在管内流过多个流程再排出凝汽器

#### (一) 混合式凝汽器

在混合式凝汽器中，排气与冷却水直接混合接触而使蒸汽凝结。冷却水由凝汽器顶部经喷嘴洒在凝汽器的空间，排气由上部进入与冷却水直接接触而凝结。凝结水与冷却水一起用水泵抽走，空气用抽气器排除。这种凝汽器结构简单、冷却效果好、制造成本低，且形成和保持真空的能力强、效果好，缺点是对冷却水水质要求高，否则凝结水与不洁净的冷却水混合，不能再作锅炉的给水使用，故现代汽轮机装置中一般不采用混合式凝汽器。混合式凝汽器结构见图 1-7。

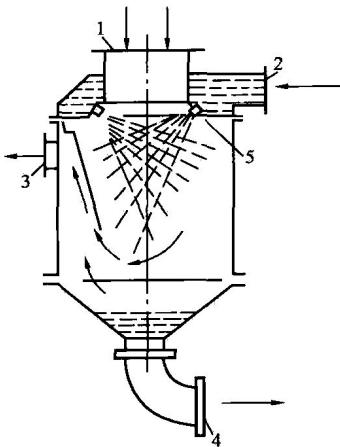


图 1-7 混合式凝汽器结构

1—排汽进口；2—冷却水进口；3—空气抽出口；4—冷却水和凝结水出口；5—喷嘴

#### (二) 表面式凝汽器

在表面式凝汽器中，冷却工质与蒸汽被冷却表面隔开互不接触。根据所用的冷却工况不同，又分为空气冷却式和水冷却式，水冷却式简称表面式凝汽器。由于用水做冷却工质时，凝汽器的传热系数最高，又能在保持洁净和含氧量极小的凝结水的条件下，获得和保持高真空，因此是现代电厂汽轮机装置中采用的主要形式。只有在严重缺水的地区，才选用空气冷却式，空气冷却式凝汽器的传热系数较表面式凝汽器低，因此，空气冷却式凝汽器体积庞大。

表面式凝汽器结构示意图见图 1-8。

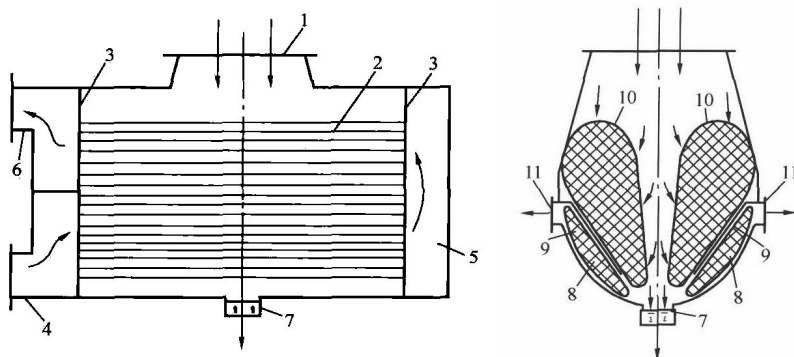


图 1-8 表面式凝汽器结构

1—蒸汽入口；2—冷却水管；3—管板；4—冷却水进水管；5—冷却水回流室；6—冷却水出水管；7—凝结水集水箱（热井）；8—空气冷却区；9—空气冷却区挡板；10—主凝结区；11—空气抽出口

凝汽器运行时，冷却水从进水管进来，通过冷却水管进入回水室，向上折转，再经上半部分冷却水管流向出水室，最后排出。低温蒸汽则由进口进来，经过冷却水管之间的缝隙往下流动，向管壁放热后凝结为水。

空冷式凝汽器如图 1-9 所示，空气凝汽器系统示意图如图 1-10 所示。

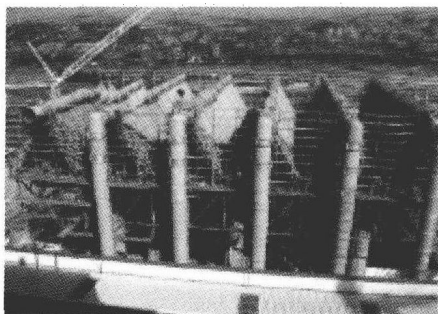


图 1-9 空冷式凝汽器

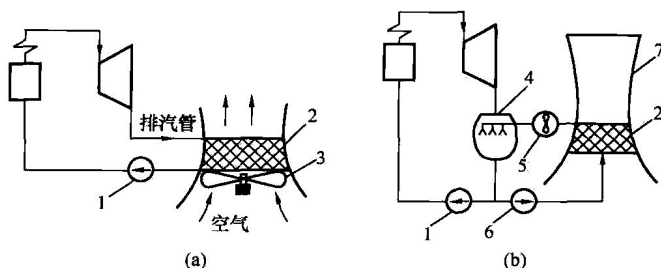


图 1-10 空气凝汽器系统示意图

1—凝结水泵；2—热交换器；3—风扇；4—喷射凝汽器；5—水轮机；6—出水泵；7—干冷却塔

## 二、凝汽器常用技术指标

### (一) 凝汽器压力

结合我国气象条件、供水方式和凝汽设备技术数据，归纳出南方、北方地区的供水方式、冷却水温和凝汽器压力范围，见表 1-7。

表 1-7 冷却方式、冷却水温与凝汽器压力的匹配

地 区	项 目	单 位	直流供水	循环供水
南方地区	冷却水温	℃	20~25	25~28
	凝汽器压力	kPa	4.9~5.9	5.9~7.4
北方地区	冷却水温	℃	15~20	20~22
	凝汽器压力	kPa	4.4~4.9	4.9~5.4



## (二) 真空系统

### 1. 真空的定义

凝汽器的真空即汽轮机的排汽压力，是蒸汽在凝汽器内凝结时造成的。排汽在恒压下将汽化潜热传给冷却水，蒸汽凝结为水。凝汽器内真空的形成是由于在凝汽器内蒸汽和凝结水汽液两相之间存在着一个平衡压力，这个平衡压力与蒸汽凝结时的温度有着单值的——对应关系。蒸汽凝结时的温度越低，该平衡压力也越低，这个平衡压力就代表着凝汽器内的绝对压力，凝汽器内蒸汽凝结时的温度决定冷却条件，在极限情况下，即冷却水流量很大时，对应凝汽器压力下的最低饱和温度值就等于冷却水的温度。例如，在凝汽器内冷却水温度为20℃左右时，它的极限压力为0.0023MPa(绝对)；当凝汽器中饱和蒸汽的温度为32℃时，对应凝汽器的压力为0.0049MPa(绝对)。此时，凝汽器内将得到远比大气压低的平衡压力。

### 2. 真空形成的原理

蒸汽在冷却水(循环水)冷却下，放出汽化潜热，凝结成凝结水，体积骤然缩小，形成真空，抽气器将不凝结的空气抽出，维持真空。

### 3. 真空下降速度

真空系统进行严密性检查试验时，机组负荷应稳定在额定负荷的80%或以上，并在关

表 1-8 真空系统严密性要求

机组容量 (MW)	真空下降速度 (Pa/min)
<100	<400
100~200	<270
≥300	<200

闭抽气出口门后3~5min内测量真空下降速度。

真空下降速度应符合表1-8真空系统严密性要求。

### 4. 真空系统漏气量

凝汽器在稳定工况下运行时，抽气量近似等于漏气量。通过测量抽气量，便可从定量角度确定真空系统的严密性。测量时，应在凝汽器蒸汽负荷为40%~100%额定值范围内进行。真空系统漏气量限值见表1-9。

表 1-9 真空系统漏气量限值

机组容量 (MW)	漏气量 (kg/h)	机组容量 (MW)	漏气量 (kg/h)
≤25	5	250	25
50	10	300	30
100	15	500	40
200	20	800	60

## (三) 清洁系数

凝汽器清洁系数 $\beta_c$ 可参照表1-10选取。

表 1-10 清洁系数 $\beta_c$

项 目	$\beta_c$	项 目	$\beta_c$
直流供水和清洁水	0.80~0.85	新管	0.80~0.85
循环供水和化学处理(氯化、二氧化碳)的水	0.75~0.80	具有连续清洗的凝汽器	0.85
污水水和可能形成矿物沉淀的水	0.65~0.75	钛冷却管	0.90