

高压给水加热器

蔡锡琮 编著

水利电力出版社

目 录

前言	
第一章 高压加热器的工作原理	1
第一节 概述	1
第二节 加热器工作原理	4
第二章 高压加热器的分类和结构	11
第一节 高压加热器的分类	11
第二节 高压加热器的典型结构	20
第三节 高压加热器的典型规格	35
第四节 过热蒸汽冷却器和疏水冷却器	44
第三章 高压加热器的性能和技术特性	48
第一节 传热和端差	48
第二节 高压加热器不同传热段的特点	54
第三节 疏水	58
第四节 放空和排放空气	64
第五节 设计参数和特性	66
第六节 接管流速	75
第七节 高压加热器的试验	77
第四章 给水回热加热系统	81
第一节 回热系统中的高压加热器及实例	81
第二节 高压加热器在回热系统实例	90
第三节 给水温度选择	94
第四节 给水回热加热级数	98
第五节 回热加热抽汽份额	101
第六节 回热系统计算	104
第五章 高压加热器的热力和水力计算	110

第一节	高压加热器的热平衡	110
第二节	单纯凝结段高压加热器传热计算	112
第三节	三段式高压加热器的传热计算	130
第四节	传热校核计算	147
第五节	给水阻力计算	151
第六节	壳侧阻力损失	168
第七节	节流孔板计算	173
第六章	高压加热器的结构设计	176
第一节	零部件结构设计综述	176
第二节	管子和管板的连接	177
第三节	集箱式高压加热器的管子连接	192
第四节	管系各零部件	193
第五节	水室各零部件	221
第六节	汽侧壳体	235
第七节	接管载荷	242
第七章	高压加热器制造	249
第一节	胀管	249
第二节	管口焊接	254
第三节	管板	260
第四节	管子、隔板和集箱	262
第五节	水室和壳体	264
第六节	总装	265
第七节	防腐措施	268
第八章	高压加热器的保护、调节和附件	271
第一节	高压加热器自动保护	271
第二节	抽汽止回阀联动	286
第三节	安全阀	288
第四节	疏水调节和附件	293
第九章	高压加热器的安装、运行、检修	320
第一节	安装	320

第二节	初次启动	324
第三节	运行和维护	325
第四节	故障和检修	332
第十章	低压给水加热器	347
第一节	概述	347
第二节	低压加热器的型式	348
第三节	低压加热器的规格	354
第四节	性能和技术特性	357
第五节	结构设计	360
第六节	低压加热器制造	367
第七节	保护、调节和附件	369
第八节	低压加热器运行、故障和检修	371
附录		
一	国外一些设计、制造高压加热器的单位	375
二	高压加热器设计、制造、运行的主要规范和技术条件	378
三	高压加热器设计、制造、运行参照和参考的规范	379
主要参考文献		380

第二节	初次启动.....	324
第三节	运行和维护.....	325
第四节	故障和检修.....	332
第十章	低压给水加热器	347
第一节	概述.....	347
第二节	低压加热器的型式.....	348
第三节	低压加热器的规格.....	354
第四节	性能和技术特性.....	357
第五节	结构设计.....	360
第六节	低压加热器制造.....	367
第七节	保护、调节和附件.....	369
第八节	低压加热器运行、故障和检修.....	371
附录		
一	国外一些设计、制造高压加热器的单位.....	375
二	高压加热器设计、制造、运行的主要规范和技术条件.....	378
三	高压加热器设计、制造、运行参照和参考的规范.....	379
主要参考文献		380

第一章 高压加热器的工作原理

第一节 概 述

火力发电厂的高压给水加热器（简称高加）是利用汽轮机的抽汽加热锅炉给水的装置，它可以提高电厂热效率，节省燃料，并有助于机组安全运行。

在火力发电厂生产过程中，除了锅炉、汽轮机、发电机三大主机起着主导作用以外，还有着各种辅助设备对电厂的运行可靠性和经济性也起着非常重要的作用。高压加热器是汽轮机最重要的辅助设备之一，如果发生故障，一旦停运，给水只能通过旁路管道进入锅炉，这就会大大降低进入锅炉的给水温度，从而增加燃料耗量，增加发电成本，降低经济性。进入锅炉的给水温度降低，水在锅炉中的吸热量增加，相对于炉膛内热负荷的蒸发量就减少，蒸汽在锅炉过热器中被加热度提高，引起过热蒸汽温度过高，过热器可能被烧坏，威胁锅炉安全。高压加热器停运，没有抽汽进入高压加热器，这部分蒸汽就继续在汽轮机内流通，造成汽轮机缸体与转子间的膨胀差增大，威胁汽轮机安全。因此电厂在高压加热器停运时往往降低发电负荷约10%~15%。例如一台200MW机组可能限荷在180MW，损失20MW发电量，并降低了热效率，每天增加煤耗约42 t 标准煤。由此可见，高压加热器是汽轮机车间热力系统中不可缺少的环节，如运行中发生故障或操作失误，都会影响安全经济发电，甚至损坏设备和造成人身事故。国内高压加热器已经发生过多次人员伤亡和设备

毁坏的重大事故，所以从事高压加热器的设计、制造、检验以及安装、运行、管理、检修等人员，应引以为戒，引起重视。

随着国民经济的发展、技术经济水平的提高，把节约能源放在重要地位，且高温高压设备存在技术难度，因此电厂对高压加热器投运情况已普遍引起重视。目前大多数高压加热器都能很好地发挥工作效能，例如东方锅炉厂制造的配200MW机组的高压加热器，质量优良，1986年在国内的高压加热器中首次获得机械电子部优质产品，至今仍保持部优产品称号。但国内以至国外制造的一些高压加热器仍存在可用系数不高、频繁泄漏损坏、附件故障以及使用寿命不长等问题。电厂辅助设备出现故障的数量甚至可能超过主机，而高压加热器故障仍是电厂设备故障的一个重要方面。在高压加热器的每一个环节都做好工作，将有助于高压加热器顺利发挥效能。

图1-1是凝汽式汽轮机发电厂的热力系统简图，燃料在锅炉中燃烧，给水在锅炉中加热成蒸汽，经管道送入汽轮机内做功，从汽轮机出口排入凝汽器，被冷却水冷却后排汽（或

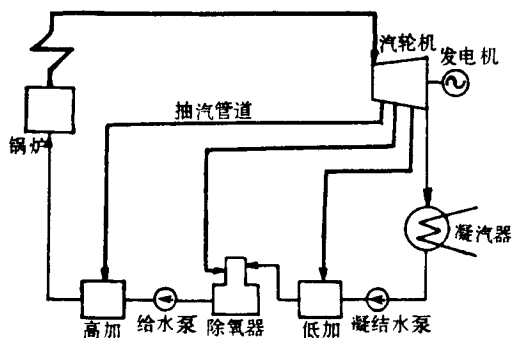


图 1-1 电厂热力系统简图

称乏汽)就冷凝成主凝结水,它被凝结水泵升压送入低压加热器等加热,再送入除氧器。热力除氧器是个混合式加热器,也加热主凝结水,从除氧器流出的给水由给水泵升至高压,经高压加热器加热后流向锅炉,形成循环。

从汽轮机中抽出一定数量的做过了一部分功的蒸汽称为抽汽,用它加热主凝结水和给水的过程称为回热过程,此过程中的汽、水的热力循环及热力系统称为回热循环或回热系统。回热系统中的热交换设备主要是给水加热器和除氧器。位于凝结水泵以后和除氧器以前的给水加热器处于凝结水泵出口压力下工作,称为低压给水加热器,简称低加。为防止给水在被加热过程中沸腾,要求给水压力大于给水加热温度所相应的饱和压力,而除氧器出水温度已达到该压力相应的饱和温度,必须经给水泵升压后才能再用蒸汽加热它,位于给水泵出口以后的给水加热器,其管内给水处于给水泵后高压下工作,称为高压给水加热器,通常就称为高压加热器,简称为高加。

从汽轮机抽出到加热器去的抽汽的压力一般是不加调节的,它随着负荷大小而改变。从汽轮机不同段位抽出的抽汽,其压力、温度等参数各不相同,所以各给水加热器的进汽参数也都不同,被加热后的给水温度也就不同,它经各级加热器逐步加热,最终达到锅炉所要求的给水温度。

最简单的回热系统只具有一台加热器,称为单级回热系统。为提高机组循环热效率,都采用多台加热器,即多级回热系统。例如有些超高压汽轮机组采用四台低加、一台除氧器和三台高加,称为八级回热系统。

回热加热设备的编号方法,在电厂往往按凝结水泵后水的流向顺次编号,如图1-2所示的八级回热系统中,1至4

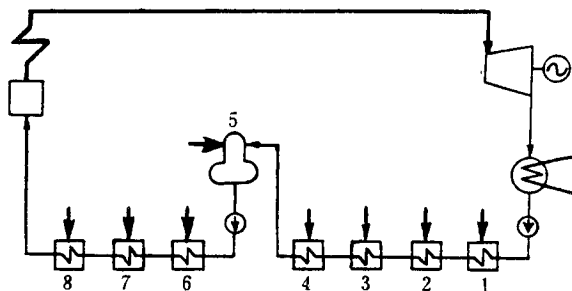


图 1-2 回热加热系统

1 ~ 4—低加；5—除氧器；6 ~ 8—高加

号为低加，5号是除氧器，6至8号为高加（也有反向而编者）。

但在制造厂，高加和低加是各自分开编号的，按机械部标准JB3342-83，高加型号用四项表示，例如JG-530-5-1，第1项JG表示高加，第2项数字530为名义传热面积 530m^2 ，第3项数字5表示该型高加是第5次更新换代设计，第4项数字1表示给水泵后按给水流向的顺序号，它是第1台，JG-530-5-2和JG-530-5-3表示给水泵后的第2台和第3台。

第二节 加热器工作原理

按热力学第二定律：热量必然自发地从高温物体转移到低温物体。高压加热器均为表面式加热器，以管子作传热面，汽轮机抽汽进入加热器壳内，在管子外面，给水在管内。蒸汽作凝结放热，蒸汽的放热量通过传热面金属管壁传递给管内给水，从而提高给水温度。

图2-3为一典型的高压加热器，其工作流程为：给水从

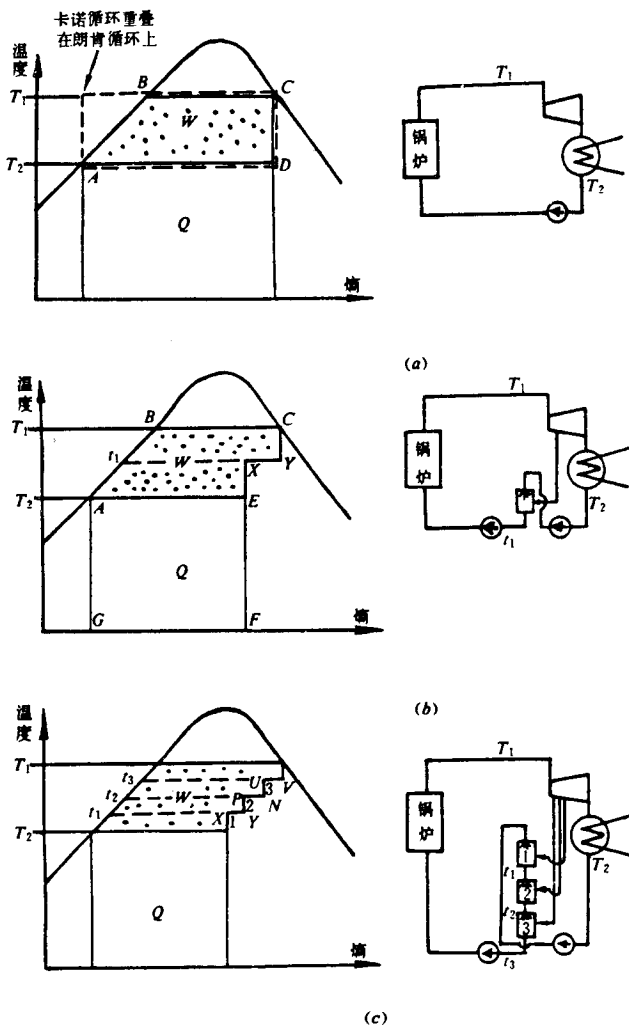
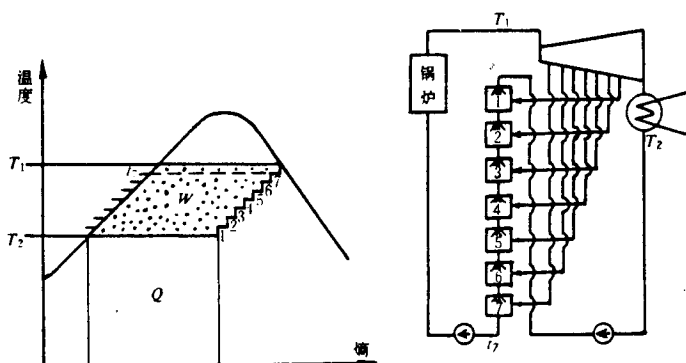
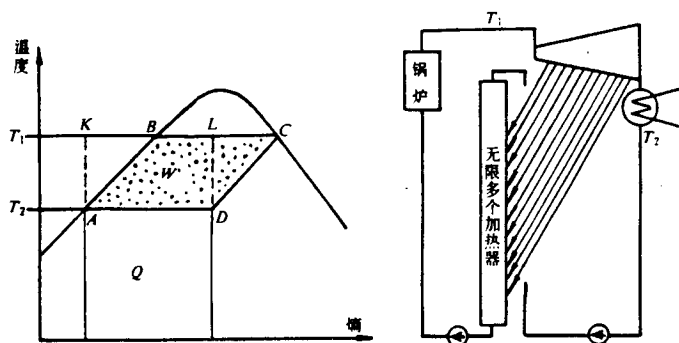


图 1-3 回热加热提高循环热效率(一)
(a) 仅由锅炉加热给水; (b) 单级给水加热; (c) 三级给水加热



(d)



(e)

图 1-3 回热加热提高循环热效率(二)

(d) 七级给水加热; (e) 无限多级给水加热

进水口进入水室, 因分程隔板的阻挡, 迫使给水转弯向下流入管板上的管口进入管子, 加热蒸汽即抽汽的热量通过管壁传给管内给水, 给水流经U形管被加热后进入水室的出口侧, 经出水口流出加热器被送往锅炉。加热蒸汽在壳体内被冷却

凝结成疏水，从壳体底部的疏水出口流出。

从汽轮机中抽出一定数量的做过一部分功的蒸汽用来加热锅炉给水的回热过程，可提高机组循环热效率。现从蒸汽循环原理说明回热给水加热如何改善循环热效率。为简洁地阐明，以饱和蒸汽循环表示在图1-3的各个温熵图上，各图形的比例是相同的。图1-3(a)所示仅由锅炉加热水（没有回热加热）产生蒸汽去做功的循环，它属基本朗肯循环，图上实线所包围的有麻点的面积表示该循环的有用功 W ，它下面的实线包围的空白面积 Q 是循环损失的能量（即在凝汽器内损失的能量），其循环热效率为 $\frac{W}{W+Q}$ 。将图1-3(a)与图

1-3(b)~(e)相比较，带有回热加热的循环比之基本朗肯循环有更高的热效率，每增加一个加热器就使热效率有一个小的增长，即有用功 W 与供给热能 $(W+Q)$ 的比数的增长。在图1-3(a)中用虚线包围的长方形面积是指在相同蒸汽条件下的卡诺循环有用功，那是工作在 T_1 和 T_2 之间任何蒸汽动力装置理论上能达到的最高的循环热效率。

图1-3(b)表示有一个加热器的回热循环。为了简化阐述，假设它是蒸汽、水直接接触加热器，抽汽已在汽轮机内做功膨胀了一半行程，给水从 T_2 （凝汽器内水的温度）加热到 t_1 （汽轮机抽汽点温度）。以抽汽流量与总流量间的比例而言，抽汽流量表示为 XY 线段，而总蒸汽流量表示为 t_1Y ，则面积 $ABCYXE$ 表示做的有用功。相类似地把 AE 表示为流入凝汽器的排汽流量，则从循环中损失的能量表示为面积 $AEFG$ 。

图1-3(c)、(d)表示工作在 T_1 和 T_2 之间有3级和7级的给水加热回热循环，图1-3(c)内蒸汽流量 XY 在1号加热

器中把给水从 T_2 加热到 t_1 , PN 在2号中把水从 t_1 加热到 t_2 , UV 在3号中把水从 t_2 加热到 t_3 , 并设各个加热器的给水温升都相等。相似的7级加热示于图1-3(d), 其每个加热器具有相等的温升, 且最终给水温度 t_7 接近于循环的饱和蒸汽温度 T_1 。度量上述各图形的面积就显示出加热器级数越多 $\frac{W}{W+Q}$

值越大, 循环排汽流入凝汽器而被损失的能量(相对于 W 的 Q)越小, 亦即循环热效率越高。

图1-3(e)示出有无限多个给水加热器的回热循环, 利用汽轮机抽汽将给水从凝汽器温度加热到锅炉汽包温度, 随着加热器级数增至无限多级, 加热蒸汽与进水间的温差也减少到零。这无限多级加热的循环热效率 $\frac{W}{W+Q}$ 相当于工作在相同温度 T_1 和 T_2 间的卡诺循环热效率, 图内线段 AB 平行于 CD , 面积 $ABCD = \text{面积} AKLD = W$, 卡诺循环是在相同的高、低温热源温度 T_1 和 T_2 间的热效率最高限的循环。以上论述说明装设足够大量的加热器可达到接近于卡诺循环, 但这在实际上是不可能的, 可能获得更大效益的实际措施是汽轮机在循环中采用过热蒸汽以及在部分的给水加热中采用过热蒸汽过程(即加热器的过热蒸汽冷却段)。

上述采用无限多级加热器回热循环的理论, 尽管是不可能实现的, 但它阐明了给水加热回热循环的极限, 它是回热循环原理的基础。

今再以机组热力循环中热能的利用和损失的情况为例子予以说明。图1-4系中压机组理论上的火电厂循环的热能分配简图。燃料具有的化学能在转变为蒸汽热能的过程中, 它在锅炉内燃烧将要损失燃料全部热能的14%左右; 蒸汽从锅炉

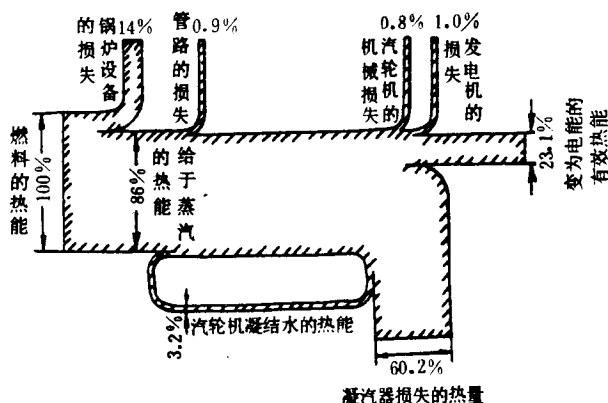


图 1-4 火电厂热能分配简图

送至汽轮机，在管道中散失热能约0.9%；蒸汽进入汽轮机内做功时也损失一点热能；做功后的排汽从汽轮机排出至凝汽器时还具有相当多的热能，这部分热能在凝汽器内传给了冷却水而白白浪费掉，图内所示这项凝汽器损失是所有损失中最主要的，约占燃料热能的60%以上。本例火电厂的燃料热能转变为电能的有效热能仅占23%左右，高压和超高压以上参数火电厂该百分比将会大一些，目前最高参数最现代化的火电厂该百分比也不过40%左右。

由此可见，热力循环中大部分热能被冷却水带走而损失掉，火电厂的热效率却很低。为了提高循环热效率，减少汽轮机排汽所损失的热量，其途径之一，就是利用在汽轮机内已经做过一部分功的蒸汽，从抽汽口抽出用以加热给水，这部分抽汽在冷凝过程中把热量传给了给水，又回到锅炉中去，它不排入凝汽器，它的热量就不被冷却水带走而由给水回收，这部分抽汽的热量就几乎全部被利用而无损失。尽管进入汽轮机的蒸汽的大部分最终被排入凝汽器，造成很大热损失，

而这小部分抽出的蒸汽却几乎没有热损失，这两部分蒸汽的热效率组成了整个循环效率，它比之没有回热过程的循环提高了热效率，该热效率相对提高值一般约10%~12%，高的可达15%左右。其中高加所占增益约3%~6%左右。

相对而言，高加不投运，加大了排汽在凝汽器中的热损失，降低了机组的循环热效率。对部分国产汽轮发电机组所做的计算，停用高加时机组热耗的增加如表1-1所示。

表 1-1 国产机组停用高加时热耗增加情况

机组功率 (MW)	100	125	200	300
热耗增加 (%)	1.9	2.3	2.6	4.6

第二章 高压加热器的分类和结构

第一节 高压加热器的分类

一、按压力分类

高压加热器按照不同的管侧（给水侧）压力可分为高压加热器以及中压的高压加热器。

在电厂，凡属给水泵出口以后的加热器都称为高压加热器。但对制造厂而言，管侧设计压力大于等于 9.8MPa 的加热器归属高压容器类，按容器分类属三类容器，在设计、制造过程中对于材料、加工、焊接、检验甚至运行、检修等的要求都较严格。这类加热器在制造厂也名副其实地称为高压加热器。

而对管侧设计压力不大于 9.7MPa 的高压加热器归属中压容器类，按容器分类属二类容器，在制造等过程中的要求比三类容器低得多。这类中压机组等的高压加热器在制造厂实际归属为中压加热器，可称为中压的高压加热器。

按我国现行蒸汽锅炉参数系列，高压锅炉蒸汽压力 9.8MPa ，相配的高压加热器的管侧设计压力比锅炉更高，因此凡属高压及以上参数机组的高加，均属一般统称的高压加热器。

中压的高压加热器有三种情况。第一种是中压机组的高加，中压锅炉蒸汽压力 3.8MPa 或更低，相配高加的管侧设计压力不超过 6MPa 。另一种为次高压机组，锅炉蒸汽压力大于 3.8MPa ，相配高加的管侧设计压力大于 6MPa 而不超

过9.7MPa。还有一种虽是高压以上机组，但采用前置给水泵，高加位于前置泵出口之后和在主给水泵之前，高加管侧设计压力不超过9.7MPa。

高压加热器和中压的高压加热器，两者不仅制造要求不同，且因压力差异较大，其构造也可能有所不同。例如高加的水室常是密闭结构，甚至整个高加也通常是全焊密闭结构，而中压的高加常采用可拆卸结构。

高压加热器按压力分类可大致归纳如表2-1。

表 2-1 高压加热器按压力分类

高压加热器分类	发电机组参数	管侧（给水侧）		壳侧（蒸汽侧）	
		设计压力 (MPa) ≤	设计温度 (°C) ≤	设计压力 (MPa) ≤	设计温度 (°C) ≤
中压的高压加热器	中 压	6.5	180	1.5	350
	次 高 压	9.7	200	2.5	380
高压加热器	高 压	19	240	4	410
	超 高 压	24	250	4.5	460
	亚 临 界	31	290	7	480

注 在超临界压力机组中，高加管侧设计压力可达38MPa，壳侧设计温度可达500℃。

二、按结构分类

在40年代以前，世界上火电机组大都是中压以下的小机组，高压加热器几乎都是U形管管板式，正置立式布置，螺栓连结可拆结构。自40年代起，锅炉、汽轮机向高压、高温、