

高职高专水利水电类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN SHUILISHUIDIANLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



发电厂动力部分

盛国林 主 编
周 皓 李 莉 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专水利水电类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN SHUILISHUIDIANLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



发电厂动力部分

主 编 盛国林
副主编 周 皓 李 莉
编 写 夏敏静 崔艳华
主 审 黄少敏 朱立强



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



林姓似赋业寺类申水保水寺高限高

IAOOAIL AUHUIU EYMAUHU EI IIAINDIUIHSHIJIUHQ IMAUHZOAG IIHZOG

内 容 提 要

本书为高职高专水利水电类专业规划教材。

本书主要介绍了火力发电的基本原理,电厂锅炉设备,汽轮机设备,汽轮机调节,汽轮机的运行,水轮机概述,水轮机的工作原理,水轮机的结构,水轮机调节,水电厂的油、水、气系统及原子能发电厂的基本知识。本书紧密结合生产实际,注重实际能力的培养。

本书可作为高职高专水利水电类专业教材,也可作为职业资格和岗位技能培训教材,还可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂动力部分/盛国林主编. —北京:中国电力出版社, 2008

高职高专水利水电类专业规划教材

ISBN 978-7-5083-8033-9

I. 发… II. 盛… III. 发电厂—动力系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第159931号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年12月第一版 2008年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.75印张 383千字

定价 26.00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

随着科学技术的不断进步与社会生产力的不断发展，电能的需求日益增长，要求广大电力工作者应该具备更高的业务能力与思想素质，为此我们组织编写了本教材。

本教材体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育课程教学的基本要求，有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术标准。

本教材结合我国电力系统的实际情况，紧密联系生产实际，注重实际动手能力的培养，内容简要、易学、易懂。整个教材突出了新知识、新技术、新方法、新工艺的引进与运用。

本书可作为职业资格和岗位技能培训教材，也可作为学历教育教学用书。

本书由三峡电力职业学院盛国林主编，周皓、李莉副主编，参加编写的还有夏敏静、崔艳华，全书由福建水利电力职业技术学院黄少敏和公安部上海消防设备研究所朱立强主审。

本教材在编写过程中还得到了许多同行的帮助与支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

编者

2008年11月

目 录

前言	1
第一篇 火电厂动力部分	
第一章 火力发电的基本原理	1
第一节 热力学基本概念	1
第二节 热力系统的能量平衡	4
第三节 水蒸气的动力循环	9
第四节 提高朗肯循环热效率的途径	14
第五节 火电厂生产流程	18
复习与思考题	21
第二章 电厂锅炉设备	22
第一节 锅炉的分类与型号	22
第二节 锅炉本体主要结构	25
第三节 锅炉主要辅助设备	48
复习与思考题	59
第三章 汽轮机设备	60
第一节 汽轮机的一般概念	60
第二节 汽轮机本体的主要结构	61
第三节 汽轮机的主要辅助设备	80
复习与思考题	84
第四章 汽轮机调节	86
第一节 汽轮机调节概述	86
第二节 汽轮机机械液压型调速器	89
第三节 汽轮机微机液压型调速器	93
复习与思考题	95
第五章 汽轮机的运行	96
第一节 汽轮机的启动和停机	96
第二节 汽轮机的正常运行维护	109
复习与思考题	112
第二篇 水电厂动力部分	
第六章 水轮机概述	113
第一节 水电站与水轮机	113
第二节 水轮机的主要类型及适用水头	114
第三节 水轮机的工作参数	118

第四节	水轮机的型号	120
第五节	水轮机的装置形式	122
第六节	水轮机发展综述	125
	复习与思考题	127
第七章	水轮机的工作原理	128
第一节	水流在反击式水轮机转轮中的运动	128
第二节	水轮机的基本方程式	131
第三节	水轮机的效率及最优工况	134
第四节	水斗式水轮机的工作原理	136
	复习与思考题	139
第八章	水轮机的结构	140
第一节	混流式水轮机转轮	140
第二节	轴流式水轮机转轮	146
第三节	反击式水轮机主轴和导轴承	156
第四节	反击式水轮机的引水部件	164
第五节	反击式水轮机尾水管	185
第六节	水轮机密封装置	189
第七节	水轮机的附属装置	192
第八节	水斗式水轮机	195
	复习与思考题	201
第九章	水轮机调节	202
第一节	水轮机调节的任务和方法	202
第二节	调速器的组成和分类	204
第三节	调速器的工作原理	207
	复习与思考题	214
第十章	水电厂的油、水、气系统	215
第一节	油系统	215
第二节	水系统	224
第三节	压缩空气系统	234
	复习与思考题	238

第三篇 原子能发电厂动力部分

第十一章	原子能发电厂	239
第一节	原子能的应用概况	239
第二节	原子能发电厂的工作原理	239
第三节	原子能电厂的燃料、安全性和经济性	243
	复习与思考题	244
参考文献		245

第一篇 火电厂动力部分

火电厂是一种将燃料的化学能通过燃烧转换成热能，并最终转换成电能的工厂。火电厂的三大主要设备为锅炉、汽轮机和发电机，当然还配备有一些维持生产过程所必需的辅助设备。本篇仅介绍火电厂中的动力装置部分。

第一章 火力发电的基本原理

燃料具有化学能，通过燃烧的形式能够将化学能转换成热能，热能根据热力学原理能够转换成机械能。热力学是研究热现象规律的学科，它主要是研究热能与机械能之间相互转换时量与质的关系，着重研究热能转换成机械能的基本规律，寻求进行这种转换的最有利条件。火力发电的任务是以合理的热力学过程，高效安全地将燃料的化学能转换成电能。由于受人们认知的限制，人类在将燃料化学能转换成电能的过程中，大部分的能量在转换过程中被消耗损失掉了，因此期望能研究出一种全新概念的过程，能将燃料的大部分化学能转换成电能，这是火力发电研究中的一个重要课题。

第一节 热力学基本概念

一、热力学的常用术语

(1) 工质：在热能和机械能转换过程中必须借助的携带热能的工作介质。水或水蒸气是携带热能最好的工质之一。

(2) 状态：在指定瞬间工质所呈现的全部宏观性质的总称。

(3) 过程：工质从一种平衡状态到达另一种新的平衡状态所经历的变化过程，也称热力过程。

(4) 热力学系统：热力学研究中作为分析对象所选取的特定范围内的物质或空间。与外界既有物质交换，也有能量交换的热力学系统称开口系。

(5) 恒定流：空间某点的工质流动速度随时间变化而保持不变的流动。实际中的工质流动大部分是非恒定流，但是在一个较短的时段内可以近似认为是恒定流。

二、工质的状态参数

工质的状态可以用六个状态参数来描述，其中三个是基本状态参数：比体积 v 、温度 t (T) 和压力 p ；三个是导出状态参数：比热力学能 u 、比焓 h 和比熵 s 。基本状态参数能直接进行测量，导出状态参数需根据基本状态参数导出或进行专门的实验测得。在工程设计中，给出工质的温度 t (T) 和压力 p ，可根据状态参数表或图线方便地查出比体积 v 、比焓 h 和比熵 s 。

(1) 比体积 v ：单位质量物质所占有的体积，也称比体积，计算公式为

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-1)$$

式中 m ——工质的质量，kg；

V ——工质的体积, m^3 。

(2) 温度 t (T): 表示物体冷热程度的参数。温度的高低与分子平均动能的大小有关。温度有两种计量标示方法, 因此有两种温度单位: 摄氏温度 t , 单位为“ $^{\circ}\text{C}$ ”(度), 以水的结冰点作为零点的温度标尺; 热力学温度 T , 单位为“ K ”(开尔文), 以水的结冰点作为 273.15 的温度标尺。

热力学温度比摄氏温度高 273.15, 即

$$T = t + 273.15 \quad \text{K} \quad (1-2)$$

即水结冰时的摄氏温度 $t=0^{\circ}\text{C}$, 热力学温度 $T=273.15\text{K}$ 。工程中为计算方便, 常取热力学温度比摄氏温度高 273。

(3) 压力 p : 固体产生的压力方向总是垂直向下的, 其大小为固体的重量除以受压面积。由于气体具有总想膨胀占据尽可能大的空间的特性, 因此气体产生的压力与固体不同, 其压力的方向为四面八方垂直作用在容器的壁面, 大小为气体分子对容器壁面频繁撞击的平均结果。在实际工程中, 一般气体重量产生的向下压力远远小于气体膨胀产生的压力, 因此在密闭容器中, 气体重量产生的向下压力常忽略不计, 认为气体对容器壁面四面八方作用的压力大小处处相等。

绝对压力等于表压力加上当地的大气压力, 当地的大气压力随海拔及气候的变化而变化, 可用气压计测定。因此, 在一定的绝对压力下, 当地的大气压力不同, 表压力也不同, 显然只有绝对压力才能真正反映工质的热力状态。所以热力学计算中所用的压力必须是绝对压力, 若被测工质压力较高时, 通常把当地大气压力近似取为 0.1MPa 。

【例 1-1】 锅炉蒸汽表压力读数 $p_e=13.2\text{MPa}$, 当地大气压力 $p_{\text{amb}}=0.09\text{MPa}$, 试计算锅炉中蒸汽的绝对压力 p_a 。

解: 锅炉中蒸汽的绝对压力

$$p_a = p_e + p_{\text{amb}} = 13.2 + 0.09 = 13.29 \quad (\text{MPa})$$

(4) 比热力学能 u : 单位工质内部所具有的分子内动能(微观动能)与内位能(与分子之间距离有关的微观位能)之和, 也常称为比热力学能。单位: “ kJ/kg ”。

(5) 比焓 h : 单位工质的比热力学能与压力位能之和, 即

$$h = u + pv \quad \text{kJ/kg} \quad (1-3)$$

(6) 比熵 s : 单位工质与外界发生微小的热交换 dq 时, 热交换量 dq 与工质的绝对温度 T 的比值等于比熵的微增量 ds , 即

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-4)$$

比熵的概念非常抽象, 但在热力学的热量计算中是非常有用的工具。

国际上规定以水的三相点(即 273.15K)作为基准点, 其液相水的比内能和比熵值均为零, 其他任何状态下的比热力学能和比熵值均是相对于基准点的数值而言。

三、工质的状态描述

在火电厂的动力设备中, 工质的状态经历周而复始的变化, 在热力学的分析时, 需对工质状态进行描述。工质状态的描述有定量描述和定性描述两种。定量描述较多地用在需要进行热力学计算的场合, 定性描述较多地用在对热力设备的热力过程进行分析的场合。

1. 定量描述

常用的描述工质状态的参数有六个, 只要其中任何两个状态参数数值确定后, 其他四个

状态参数也为一定值。实际生产中比较容易得到的状态参数是工质的压力 p 和温度 t ，所以根据工质的压力 p 和温度 t ，在水蒸气性质表或水蒸气的焓熵图中能够方便地查出工质的比体积 v 、比焓 h 和比熵 s ，而比热力学能 u 可通过计算得到 ($u=h-pv$)。

水蒸气的焓熵图就是根据水蒸气表中的数据绘制而成的平面曲线图。因为简单直观，数据查取方便，因此是热力学计算的重要工具。图 1-1 所示为水蒸气的焓熵简图 ($h-s$ 图)，实际的焓熵图曲线要更多，焓熵图的纵坐标为比焓 h ，横坐标为比熵 s ，坐标平面上任何一个点表示工质的一个状态。坐标平面有

- 等压力线 $p = f(h, s)$
- 等温度线 $t = f(h, s)$
- 等干度线 $x = f(h, s)$
- 等比体积线 $v = f(h, s)$

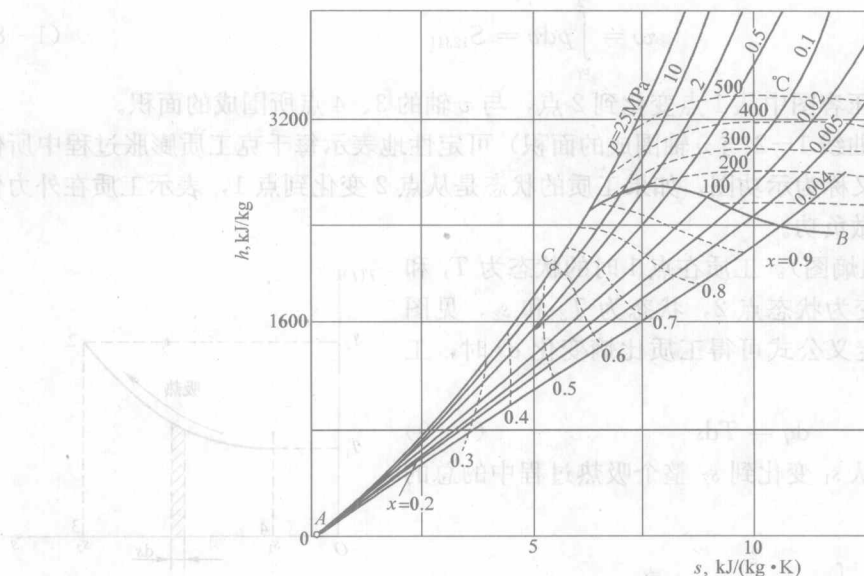


图 1-1 水蒸气的焓熵简图

根据工质的比焓 h 和比熵 s ，能方便地查出工质的压力 p 、温度 t 和干度 x 等。也可以根据工质的压力 p 、温度 t ，查出该状态点工质的比焓 h 和比熵 s 。

2. 定性描述

以工质的任意两个状态参数作为平面坐标的纵坐标和横坐标，坐标平面上任何一个点表示工质的一个状态，两个点之间的连线表示工质状态变化的过程。坐标平面图能够比较形象地表示工质状态变化的过程。

(1) $p-v$ 图 (压容图)。设在一个没有机械摩擦阻力的活塞式气缸中有 1kg 蒸汽，见图 1-2，活塞行程在 l_1 处时工质的状态为 p_1 和 v_1 ，对应在 $p-v$ 图上为状态点

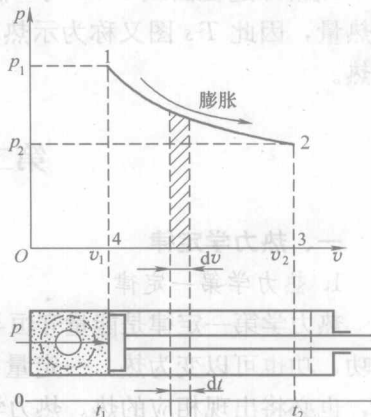


图 1-2 压容图

1, 由外界给蒸汽加热 q , 蒸汽膨胀做功使活塞移动到行程 l_2 处时工质的状态参数为 p_2 和 v_2 , 在 $p-v$ 图上为状态点 2。曲线 1-2 为蒸汽膨胀做功的过程曲线。

在面积为 A 的活塞上蒸汽作用的总推力为

$$P = pA \quad (1-5)$$

活塞移动距离为 dl 时, 蒸汽所做的微功为

$$dw = Pdl = pAdl \quad (1-6)$$

则活塞从 l_1 走到 l_2 蒸汽所做的总功

$$w = \int dw = \int_{l_1}^{l_2} pAdl \quad (1-7)$$

因为活塞移动 dl 时, 蒸汽的比体积变化 $dv = Adl$, 所以

$$w = \int_{v_1}^{v_2} pdv = S_{12341} \quad (1-8)$$

式中 S_{12341} ——在压容图中从 1 点变化到 2 点, 与 v 轴的 3、4 点所围成的面积。

S_{12341} (即过程曲线 1-2 与 v 轴围成的面积) 可定性地表示每千克工质膨胀过程中所做的功, 因此 $p-v$ 图又称为示功图。如果工质的状态是从点 2 变化到点 1, 表示工质在外力作用下被压缩, 工质做负功。

(2) $T-s$ 图 (温熵图)。工质在点 1 时的状态为 T_1 和 s_1 , 经过吸热过程变为状态点 2, 状态为 T_2 和 s_2 , 见图 1-3。根据比熵的定义公式可得工质比熵变化 ds 时, 工质的微小吸热量为

$$dq = Tds \quad (1-9)$$

则工质在比熵从 s_1 变化到 s_2 整个吸热过程中的总的吸热量为

$$q = \int dq = \int_{s_1}^{s_2} Tds = S_{12341} \quad (1-10)$$

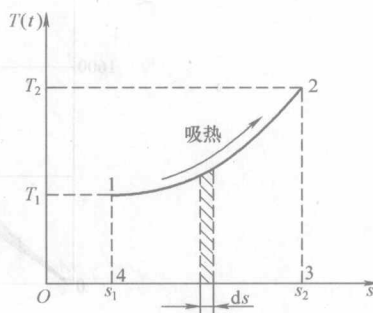


图 1-3 温熵图

S_{12341} 即过程曲线 1-2 与 s 轴所围成的面积, 可定性地表示每千克工质吸热过程中的吸热量, 因此 $T-s$ 图又称为示热图。如果工质的状态是从点 2 变化到点 1, 表示工质对外放热。

第二节 热力系统的能量平衡

一、热力学定律

1. 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力学中的具体运用, 具体表述为: 热可以变为功, 功也可以变为热。一定量的热消失时, 必产生数量与之相当的功; 消耗一定量的功时, 也必将出现相应的热。热力学第一定律确立了热能和机械能相互转换的数量关系, 自然界有关热现象的各种过程都受这一定律的约束。

2. 热力学第二定律

热力学第二定律是人们通过对自然界热现象变化规律观察得到的结论。通过观察，人们发现符合热力学第一定律的过程并不一定都能够实现。例如，一个失去动力的飞轮，其旋转机械能自发地转换成轴承摩擦的热能，直到飞轮停止转动；而对飞轮加热，热能不会自发地转换成飞轮旋转的机械能。也就是说，功向热的转化可以是自发的，而热向功的转化是非自发的，要使过程得以进行，必须付出一定的代价。

热力学第二定律揭示了自然界事物变化的不可逆性，具体表述为：不可能制成一种循环动作的热机，只从一个热源吸取热量使之完全变为有用的功，而其他物体不发生变化。

二、开口系恒定流热力学系统的能量方程

图 1-4 所示为一恒定流动开口系热力学系统，假设开口系与外界的物质交换为工质流量 m ，与外界的热交换的热量为 Q ，对外界做功为 W ，在进口断面单位工质的参数为压力 p_1 、比体积 v_1 、比热力学能 u_1 、宏观速度 c_1 、宏观位置 z_1 和断面面积 A_1 ，在出口断面单位工质的参数为压力 p_2 、比体积 v_2 、比热力学能 u_2 、宏观速度 c_2 、宏观位置 z_2 和断面面积 A_2 。根据能量守恒定律可得

$$Q - W = \frac{1}{2}m(c_2^2 - c_1^2) + mg(z_2 - z_1) + (U_2 - U_1) \quad (1-11)$$

式中 Q —— mkg 工质与外界的热交换量， $Q = mq$ ；

W —— mkg 工质在系统内对外所做的功， $W = mw$ ；

U —— mkg 工质的热力学能， $U = mu$ 。

mkg 工质在系统内外所做的功由三部分组成：

(1) mkg 工质对外所做的机械功（正功）为 W_s ，即

$$W_s = m\tau w_s \quad (1-12)$$

(2) 进口处工质以总压力 $P_1 = p_1 A_1$ 克服前面的阻力，推动工质进入系统，见图 1-5，系统内的 mkg 工质对外做负功

$$W_1 = P_1 L_1 = p_1 A_1 L_1 = p_1 V_1 = p_1 m v_1 \quad (1-13)$$

式中 L_1 ——总压力 P_1 做功所移动的距离；

V_1 ——总压力 P_1 做功移动距离 L 所形成的容积，根据比体积的定义， $V_1 = m v_1$ 。

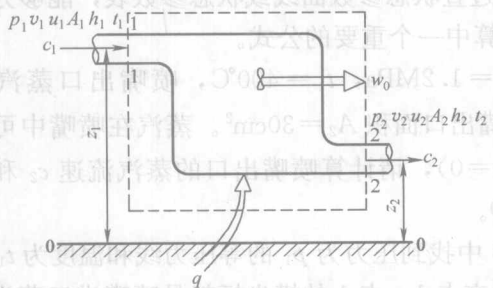


图 1-4 开口系热力学系统能量平衡模型

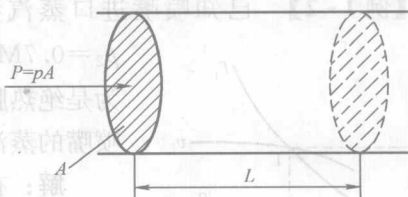


图 1-5 压力做功示意图

(3) 出口处工质以总压力 $P_2 = p_2 A_2$ 克服后面的阻力，使工质流出系统，系统内 mkg 对外做正功

$$W_2 = P_2 L_2 = p_2 A_2 L_2 = p_2 V_2 = p_2 m v_2 \quad (1-14)$$

式中 L_2 ——总压力 P_2 做功所移动的距离；

V_2 ——总压力 P_2 做功移动距离 L 所形成的容积，同理根据比体积的定义， $V_2 = mv_2$ 。

将式 (1-14) 代入式 (1-11) 得

$$mq - mw_s - p_2 mv_2 + p_1 mv_1 = \frac{1}{2} m(c_2^2 - c_1^2) + mg(z_2 - z_1) + m(u_2 - u_1)$$

最后得到开口系恒定流单位工质的能量方程为

$$q - w_s = \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + (h_2 - h_1) \quad (1-15)$$

对于汽轮机，由于汽缸的绝热性能较好，可认为与外界没有热量交换，即 $q \approx 0$ ，进出汽轮机工质的宏观动能变化和宏观位能变化较小，相对比焓的变化可以忽略不计，即 $\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$ ， $g(z_2 - z_1) \approx 0$ ，则开口系恒定流能量方程在汽轮机中的表达式为

$$w_s = h_1 - h_2 \quad (1-16)$$

即水蒸气在绝热条件下流经汽轮机时，是通过水蒸气的焓降 ($h_1 - h_2$) 来转变成机械功的。

对于回热加热器，由于对外界没有做功，即 $w_s = 0$ ，进出回热加热器工质的宏观动能变化和宏观位能变化较小，相对比焓的变化可以忽略不计，即 $\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$ ， $g(z_2 - z_1) \approx 0$ ，则开口系恒定流能量方程在回热加热器中的表达式为

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-17)$$

即锅炉给水在回热加热器中的吸热量等于水自身的比焓上升值 ($h_2 - h_1$)。

对于喷嘴，由于与外界既没有热量交换， $q \approx 0$ ，也没有做功， $w_s = 0$ ，进出喷嘴工质的宏观位能较小，变化相对比焓的变化可以忽略不计， $g(z_2 - z_1) \approx 0$ ，则开口系恒定流能量方程在喷嘴中的表达式为

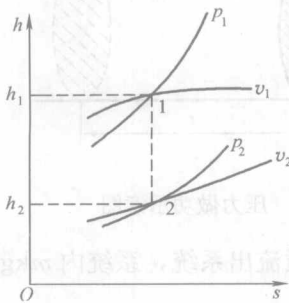
$$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = h_1 - h_2 \quad (1-18)$$

即水蒸气在绝热条件下流经喷嘴时，是通过水蒸气的焓降 $h_1 - h_2$ 来转变成水蒸气的动能增加值的。

在给定工质的压力 p 和温度 t 条件下，通过查状态参数曲线或状态参数表，能够方便地查出工质的比焓 h ，所以能量方程是热力学计算中一个重要的公式。

【例 1-2】 已知喷嘴进口蒸汽参数 $p_1 = 1.2 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 400^\circ\text{C}$ ，喷嘴出口蒸汽参数

$p_2 = 0.7 \text{ MPa}$ ，喷嘴出口面积 $A_2 = 30 \text{ cm}^2$ 。蒸汽在喷嘴中可以认为是绝热膨胀 ($ds = 0$)，请计算喷嘴出口的蒸汽流速 c_2 和通过喷嘴的蒸汽流量 D 。



解：在图 1-6 中找到压力为 p_1 的等压力线和温度为 t_1 的等温度线，得两线的交点 1，点 1 的横坐标就是喷嘴进口蒸汽的比焓 h_1 ，查得 $h_1 = 3260 \text{ kJ/kg}$ 。

因为是绝热膨胀 $ds = 0$ ，所以过点 1 作垂线与压力为 p_2 的等压力线相交，得交点 2，点 2 的横坐标就是喷嘴出口蒸汽的比焓 h_2 ，并查得 $h_2 = 3108 \text{ kJ/kg}$ ， $v_2 = 0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 1-6 [例 1-2] 焓熵图

一般喷嘴进口蒸汽流速远远小于喷嘴出口蒸汽流速，可认为进口蒸汽流速 $c_1 \approx 0$ ，则根据式 (1-18) 可得喷嘴出口的蒸汽流速为

$$c_2 = 1.414 \sqrt{h_1 - h_2} = 1.414 \sqrt{(3260 - 3108) \times 10^3} = 551.3 \text{ (m/s)}$$

通过喷嘴的蒸汽流量为

$$D = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \frac{30 \times 10^{-4} \times 551.3}{0.41} = 4.03 \text{ (kg/s)}$$

三、热量传递的基本方法

1. 导热

导热是指单一固体内部或两接触物体之间在温度差的作用下进行的热量从高温向低温传递的现象。图 1-7 (a) 中单层平面的一侧温度高，另一侧温度低，在温度差的作用下热量从温度高的一侧传递到温度低的一侧；图 1-7 (b) 中左侧一层平面的温度高，右侧一层平面的温度低，在温度差的作用下热量从温度高的一层传递到温度低的一层。导热的特点是两传热物体之间有接触，无相对运动。

2. 对流

对流是指流动着的流体和固体表面接触时，在温差作用下进行的热量从高温向低温传递的现象。图 1-8 所示的过热器，管外的高温烟气流与管外壁面 1 发生相对运动，对流换热将高温烟气流的热量传递给管外壁面，管外壁面通过导热将热量传递到管内壁面，管内的低温蒸汽流与管内壁面 2 发生相对运动，对流换热将管内壁面的热量传递给管内蒸汽流。因此，在各种热交换器的热量传递过程中，经历两次对流换热和一次导热。它的特点是两传热物体之间有接触，有相对运动。

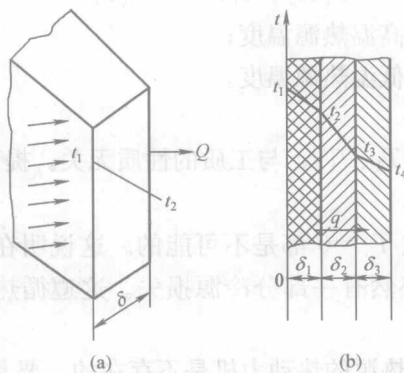


图 1-7 平面导热

(a) 单层平面导热；(b) 多层平面导热

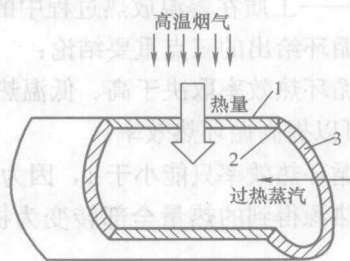


图 1-8 过热器的热交换

1—外壁面；2—内壁面；3—管壁

3. 辐射

辐射是指物体通过发射电磁波向外传递热量的现象。任何物体只要温度高于绝对零度，物体内部的带电粒子热运动都会激发出一种电磁波，不断地将热能转变成辐射能向外发射。自然界的物体都具有发射和吸收辐射的能力，不同的是，高温物体发射的热能多于吸收的热能使其温度降低；低温物体吸收的热量多于发射的热量使其温度上升，直到高温物体与低温

物体的温度趋向一致，当两物体温度相同时，辐射换热仍在进行，但换热量为零，处于热动平衡状态。锅炉炉膛中央的高温火焰对四周的水冷壁管的传热，主要是辐射换热。它的特点是两传热物体之间无接触，无相对运动。

实际的传热过程往往是三种换热方式同时存在，单一的换热方式是极少见的。

四、卡诺循环

卡诺循环是一个不计散热和摩擦等损耗的理想热力循环，由两个等温过程、两个绝热过程组成一个封闭的循环，见图 1-9。从图中看出：

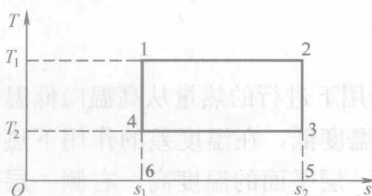


图 1-9 卡诺循环 $T-s$ 图

过程 1→2，工质等温吸热过程，工质的温度不变，比熵从 s_1 增大到 s_2 ，吸热量为

$$q_1 = S_{12561} = T_1(s_2 - s_1) \quad (1-19)$$

式中 S_{12561} ——过程 1→2 与 s 轴所围成的面积。

过程 2→3，工质绝热膨胀过程，工质的比熵不变，温度从 T_1 下降到 T_2 。

过程 3→4，工质等温放热过程，工质的温度不变，比熵从 s_2 减小到 s_1 ，放热量为

$$q_2 = S_{43564} = T_2(s_2 - s_1) \quad (1-20)$$

式中 S_{43564} ——过程 3→4 与 s 轴所围成的面积。

过程 4→1，工质绝热压缩过程，工质的比熵不变，温度从 T_2 上升到 T_1 。

每经历一个循环，单位工质所做的功为

$$w = q_1 - q_2 \quad (1-21)$$

卡诺循环的热效率为

$$\eta = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-22)$$

式中 T_1 ——工质在等温吸热过程中的温度，即高温热源温度；

T_2 ——工质在等温放热过程中的温度，即低温热源温度。

卡诺循环给出的三点重要结论：

(1) 循环热效率取决于高、低温热源的温度 T_1 、 T_2 ，与工质的性质无关。提高 T_1 或降低 T_2 都可以提高循环热效率。

(2) 循环热效率只能小于 1，因为 $T_1 = \infty$ 或 $T_2 = 0$ 都是不可能的。这说明在热机中不可能将从热源得到的热量全部转变为机械能，必然有一部分冷源损失。这遵循热力学第二定律。

(3) 当 $T_1 = T_2$ 时， $\eta = 0$ ，这说明只有单一热源的热动力机是不存在的，要利用热能产生动力，就一定要有温差。

在实际火电厂热动力机的热力循环中，工质的上限温度 t_1 是由金属材料可以长期工作的许用温度决定的，根据目前的技术水平 t_1 很少高于 600°C 。工质的下限温度 t_2 是由环境温度决定的，一般电厂周围的环境温度 t_2 为 20°C 左右。假如实际火电厂的热力循环能按卡诺循环运行，则最高的卡诺循环热效率应为

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{273 + 20}{273 + 600} = 66.4\%$$

实际火电厂热力循环的热效率远远小于 66.4%，目前最现代的大型火电厂热力循环的

热效率也很少达到 45%。

第三节 水蒸气的动力循环

一、水蒸气的形成过程

1. 常用名词

未饱和水——还没有汽化的水。

饱和水——刚开始汽化和正在汽化过程中的水。

饱和温度 t_s (汽化温度)——水刚开始汽化和正在汽化过程中的温度。

饱和压力 p_s (汽化压力)——水刚开始汽化和正在汽化过程中的压力, 饱和压力与饱和温度有一一对应的关系。

饱和蒸汽——水汽共存时的蒸汽, 蒸汽中含有水分时称湿饱和蒸汽, 简称湿蒸汽; 蒸汽中不含有水分时称干饱和蒸汽, 简称干蒸汽;

过热蒸汽——对于干饱和蒸汽进一步加热到 t (高于饱和温度 t_s), 就成为过热蒸汽, 过热度 $D=t-t_s$ 。过热蒸汽的温度与压力不再有一一对应的关系, 过热蒸汽的温度 t 完全由金属材料可以长期工作的许用温度决定。

干度 x ——表示水汽共存时饱和蒸汽中的含水量, 即

$$x = \frac{m}{m+n} \quad (1-23)$$

式中 m ——湿蒸汽中的蒸汽质量;

n ——湿蒸汽中的水分质量。

对于未饱和水和饱和水, $x=0$; 对于干蒸汽和过热蒸汽, $x=1$; 对于湿蒸汽, $0 < x < 1$ 。

2. 水蒸气的形成

工质在从水转变成过热蒸汽的过程中, 要经历预热、汽化和过热三个过程。实际火电厂水蒸气的产生是在近似定压条件下进行的。以图 1-10 所示容器为例, 水蒸气在定压条件下的形成过程如图 1-10 所示。

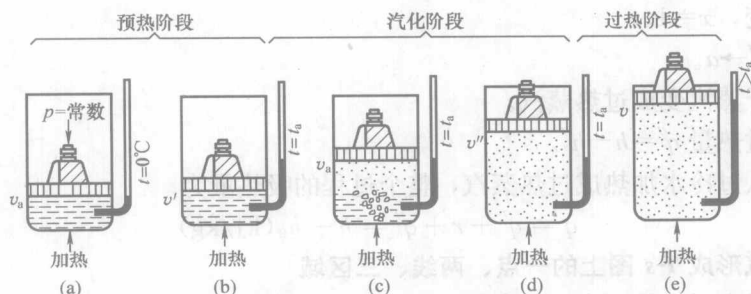


图 1-10 水蒸气在定压条件下的形成过程

(a) 未饱和水; (b) 饱和水; (c) 湿饱和蒸汽; (d) 干饱和蒸汽; (e) 过热蒸汽

容器中装有 1kg 温度为 0°C 的未饱和水 (称过冷水), 水面上压着活塞及重物, 假设活塞与容器内壁面没有摩擦阻力, 活塞及重物向下产生恒定的压力 p_a , 使工质始终处于定压

条件下 (见图 1-11 中的粗实线 p_a)。容器底部有高温热源不断地在加热。

(1) 未饱和水的定压预热过程:

温度: 从 0°C 上升到 t_{sa} 。

压力: 不变, $p=p_a$ 。

比体积: 从 v_0 增大到 v' 。

比焓: 从 h_0 增大到 h' 。

比熵: 从 s_0 增大到 s' 。

干度: 不变, $x=0$ 。

过程线: $a_0 \rightarrow a'$ 。

状态: 从未饱和水变成饱和水。

吸热量: 液体热 $q' = h' - h_0$ 。

(2) 饱和水的定压汽化过程:

温度: 不变, $t=t_{\text{sa}}$ 。

压力: 不变, $p=p_a$ 。

比体积: 从 v' 增大到 v'' 。

比焓: 从 h' 增大到 h'' 。

比熵: 从 s' 增大到 s'' 。

干度: 从 $x=0$ 增大到 $x=1$ 。

过程线: $a' \rightarrow a''$ 。

状态: 从饱和水变成干蒸汽。

吸热量: 汽化潜热 $r = h'' - h'$ 。

(3) 干蒸汽的定压过热过程:

温度: 从 t_{sa} 增大到 t (一般不大于 600°C)。

压力: 不变, $p=p_a$ 。

比体积: 从 v'' 增大到 v 。

比焓: 从 h'' 增大到 h 。

比熵: 从 s'' 增大到 s 。

干度: 不变, $x=1$ 。

过程线: $a'' \rightarrow a$ 。

状态: 从干蒸汽变成过热蒸汽。

吸热量: 过热量 $q'' = h - h''$ 。

单位工质从过冷水加热成过热蒸汽, 整个过程的吸热量为

$$q = q' + r + q'' = h - h_0 \text{ (kJ/kg)}$$

二、水蒸气形成 T - s 图上的一点、两线、三区域

如果加大活塞对水的压力, 使定压 $p_b > p_a$, 从未饱和水变成过热蒸汽同样要经历预热、汽化和过热三个过程, 见图 1-11 中 p_b 实线, 不同的是由于压力升高, 饱和温度 $t_{\text{sb}} > t_{\text{sa}}$, 汽化过程缩短, 所需的汽化潜热 r 减小; 减小活塞对水的压力, 使定压 $p_b < p_a$, 从未饱和水变成过热蒸汽同样要经历预热、汽化和过热三个过程, 见图 1-11 中 p_c 实线, 不同的是由于压力下降, 饱和温度 $t_{\text{sd}} < t_{\text{sa}}$, 汽化过程加长, 所需的汽化潜热 r 增大。

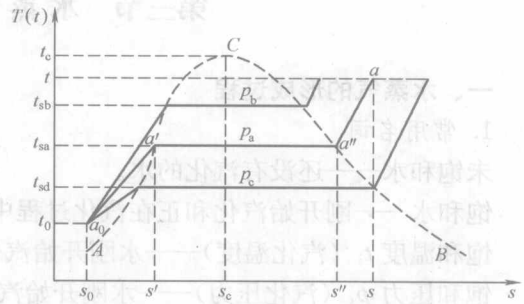


图 1-11 水蒸气形成的三阶段

将不同压力下的饱和水状态点连接起来,得 CA 线,称饱和水线;将不同压力下的干蒸汽状态点连接起来,得 CB 线,称干蒸汽线。在 $T-s$ 坐标平面图上得到一点、两线、三区域,见图 1-11 中的虚线。

一点:随着压力的升高,饱和温度升高,汽化过程缩短,所需的汽化潜热 r 减小,当压力 $p=22.129\text{MPa}$ 时,不再有汽化过程,所需的汽化潜热 $r=0$ 。该点称水的临界点 C。

两线:CA 线——饱和水线,不同压力下的饱和水状态点的连线,特点: $x=0$;CB 线——干蒸汽线,不同压力下的干蒸汽状态点的连线,特点: $x=1$ 。

三区域:CA 线的左边——未饱和水区,不同压力下未饱和水状态点的集合,特点: $x=0$;CB 线的右边——过热蒸汽区,不同压力下过热蒸汽状态点的集合,特点: $x=1$,过热度 $D=t-t_s$;CA 线与 CB 线之间——湿蒸汽区,不同压力下湿蒸汽状态点的集合,特点: $0 < x < 1$ 。

在图 1-1 的水蒸气 $h-s$ 图也可以找到对应的 A、B、C 三点,CA 线为饱和水线,CB 线为干蒸汽线,与 $T-s$ 图不同的是 C 不在正上方,而是稍偏左的中部。

在相同的压力下,工质作为过热蒸汽状态时单位工质所携带的热能要比其他状态时所携带的热能多很多,从工质的状态参数表可以看出,随着工质的压力的上升,工质的饱和温度也上升,工质所具有的比焓大大增加,工质所携带的热能大大增加。也就是说只有高压才有可能高温;只有高压高温,单位工质携带的热能才会大大增加,从而使热力设备的体积减小,投资节省,效率提高。所以现代大型火电厂锅炉和汽轮机的工作压力越来越高,最高工作压力已超过临界压力 p_c 。

【例 1-3】某密闭容器内工质的绝对压力 $p=1\text{MPa}$,温度 $t=300^\circ\text{C}$,请确定工质的状态和其他四个状态参数。

解:查表得绝对压力 $p=1\text{MPa}$ 时,工质的饱和温度 $t_s=179.88^\circ\text{C}$,因为 $t > t_s$,所以工质为过热蒸汽状态。

查表,过热蒸汽绝对压力 $p=1\text{MPa}$ 温度 $t=300^\circ\text{C}$ 时,比体积 $v=0.258\text{m}^3/\text{kg}$;比焓 $h=3051.3\text{kJ}/\text{kg}$;比熵 $s=7.1239\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

根据比焓的定义公式可得

$$\text{比热力学能 } u = h - pv = 3051.3 - (1 \times 10^3) \times 0.258 = 2793.3 \text{ (kJ/kg)}$$

三、朗肯循环

朗肯循环是一种实际的热力循环,实际火电厂的热力循环都遵循朗肯循环,并在此基础上进一步改进。

朗肯循环由 6 个过程构成一个封闭的热力循环,见图 1-12 和图 1-13。

(1) 过程 1→2,在汽轮机中绝热膨胀做功。

温度:从 t_1 下降到 t_2 (t_2 与 p_2 对应)。

压力:从 p_1 下降到 p_2 。

比体积:增大。

比焓:从 h_1 减小到 h_2 ,单位工质对汽轮机做功 $w_s = h_1 - h_2$ 。

比熵:不变,近似认为汽轮机不散热。

干度:从 $x=0$ 减小到 $0 < x < 1$ 。

状态:从高压过热蒸汽变成低压湿蒸汽。