

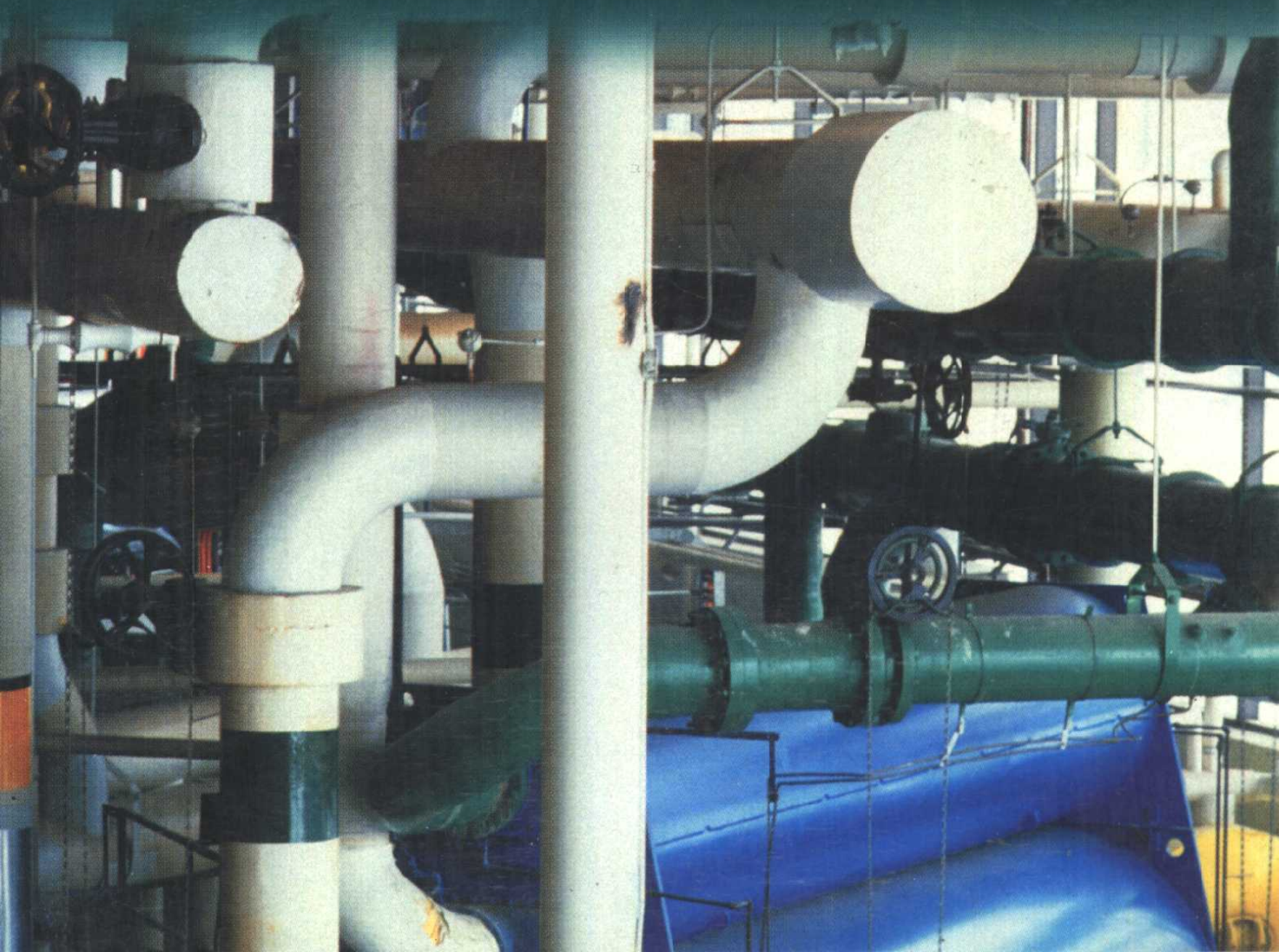
高等学校教材

工程热力学

(第三版)

华自强 张忠进 编

高等教育出版社



高等学校教材

工程热力学

(第三版)

华自强 张忠进 编

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学 / 华自强, 张忠进编. — 3 版. — 北京:
高等教育出版社, 2000 (2001 重印)
高等学校教材
ISBN 7-04-008015-X

I. 工… II. ①华…②张… III. 工程热力学—高
等学校—教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 23100 号

工程热力学(第三版)
华自强 张忠进 编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京民族印刷厂

开 本	850×1168 1/32	版 次	1980 年 1 月第 1 版
印 张	11.875		2000 年 7 月第 3 版
字 数	290 000	印 次	2001 年 5 月第 2 次印刷
插 页	1	定 价	11.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内容简介

本书根据原国家教育委员会制定的“工程热力学课程教学基本要求”(1995年修订版),在第二版的基础上,考虑到21世纪的教学需要修订而成。

全书共13章,内容包括热力学的基本概念、基本定律,气体和水蒸气的热力性质,热力过程、热力循环的分析和计算,化学热力学基础知识等。本书着重于热力学基本内容的论述及能源开发和节能基本原理的理论分析。各章末均有思考题和习题,书末附有必要的热工图表。

本书可作为高等工科院校能源动力类专业,特别是热能与动力工程专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

前 言

根据原国家教育委员会制定的“工程热力学课程教学基本要求”(1995年修订版),以及历年来工程热力学课程教学内容和课程改革的实践经验,并考虑到21世纪我国高等教育改革的趋势,对本书进行了修订。

本版仍按照第二版的编写方针,强调热力学基本理论和基本概念论述,重视教学法原则的贯彻,并根据认识规律引导学生思考。本书强调基础理论的工程应用,注意培养学生应用工程热力学理论分析和解决工程实际问题的能力,并力求简明易读、减少篇幅,以适应我国高等教育课程改革的要求。

本版对全书进行了必要的改写,根据教学的基本规律及多年教学改革的实践经验,对热力学的基本概念和定义、热力学第一定律、热力学第二定律、气体动力循环、水蒸气及蒸汽动力循环、制冷循环、湿空气等章的内容编排及阐述方法进行了改进。另外,根据当今科学技术的发展,吸收了工程热力学研究的新成果。

书中的名词术语、单位均符合国家标准。

本书由吉林工业大学热能工程系张忠进教授执笔,并经主编华自强教授审阅。此外,在本书的编写过程中始终得到陈贵堂教授的帮助。

本书修订得到了吉林工业大学教材建设基金的资助。

本书承教育部工科热工课程教学指导委员会委托哈尔滨工业

大学严家骏教授审稿,并经 1998 年 10 月教育部工科热工课程教学指导委员会会议审稿通过。

对热工课程教学指导委员会和参加审稿的同志,以及对本书的编写给予过帮助的同志,在此表示衷心感谢。由于编者水平有限,不妥之处请读者不吝指正。

编 者

1999 年 9 月

主要符号表

拉丁字母

A	面积
c	声速
c_f	流动速度
c_p	比定压热容(质量定压热容)
c_v	比定容热容(质量定容热容)
$C_{p,m}$	摩尔定压热容
$C_{v,m}$	摩尔定容热容
d	含湿量, 直径
D	过热度
e	比总能
E	总能
$e_{x,U}$	闭口系统焓参数(可用度参数)
$e_{x,H}$	开口系统焓参数
f	比亥姆霍兹自由能(比自由能)
F	力, 亥姆霍兹自由能
g	比吉布斯自由能(比自由焓)
G	吉布斯自由能
G_m	摩尔吉布斯自由能
h	比焓
H	焓
H_m	摩尔焓
K_p	平衡常数
L	汽化潜热
m	质量
M	摩尔质量
n	物质的量, 多变指数
p	压力
P	功率
P_s	轴功率
q	单位质量物质的吸热量

q_m	质量流量
Q	吸热量
$\dot{Q}$	单位时间的吸热量
R	摩尔气体常数
R_g	气体常数
s	比熵
S	熵
S_m	摩尔熵
t	摄氏温度
T	热力学温度
u	比热力学能
U	热力学能
U_m	摩尔热力学能
v	比体积(比容)
V	体积(容积)
V_m	摩尔体(容)积
w	单位质量物质作的容积变化功, 质量分数
w_0	单位质量物质作的循环净功
w_s	单位质量物质作的轴功
W	容积变化功
W_0	循环净功
W_s	轴功
x	距离
y	摩尔分数
z	离地高度, 压缩因子
Z	空气燃料比

希腊字母

α	离解度
γ	比热比(质量热容比)
τ	增温比, 时间
ε	压缩比, 制冷系数
η	效率
η_t	热效率
κ	等熵指数
λ	压力升高比

μ	回热度
ξ	喷射式与吸收式制冷装置的热量利用系数
π	增压比
ρ	密度, 预胀比
φ	相对湿度, 容积分数
ζ	热泵装置的供热系数

下角标

a	空气的
c	临界状态的, 卡诺循环的
eq	化学平衡状态的
m	平均数值的, 每摩尔物质的
n	多变过程的
p	定压过程的
P	生成物的
r	对比状态的
rev	可逆过程的
R	反应物的
s	定熵过程的
s	饱和状态的, 轴功的
T	涡轮机(透平)的
T	定温过程的
v	水蒸气的
0	周围物质的或周围物质状态的, 理想气体状态的, 滞止状态的

上角标

0	标准状态的
---	-------

目 录

主要符号表(VI)

绪论(1)

- 0-1 热能动力工程的重要地位(1)
- 0-2 能量转换装置工作过程简单介绍(2)
- 0-3 工程热力学的研究对象及研究方法(7)

第一章 基本概念及定义(10)

- 1-1 热力学系统(10)
- 1-2 热力学系统的状态及基本状态参数(12)
- 1-3 平衡状态和状态参数坐标图(16)
- 1-4 状态方程式(18)
- 1-5 热力过程和准静态过程(21)
- 1-6 准静态过程的功(23)
- 1-7 热量(27)
- 1-8 热力循环(31)

思考题(33)

习 题(34)

第二章 热力学第一定律(38)

- 2-1 热力学第一定律(38)
- 2-2 闭口系统能量方程式(40)
- 2-3 开口系统能量方程式(42)
- 2-4 稳定状态稳定流动能量方程式(45)
- 2-5 轴功(48)
- 2-6 稳定流动能量方程式应用举例(50)

思考题(54)

习 题(54)

第三章 理想气体热力学能、焓、比热容和熵的计算 (58)

3-1 理想气体的热力学能和焓 (58)

3-2 理想气体的比热容 (60)

3-3 理想气体的熵 (68)

3-4 理想气体混合物 (72)

思考题 (78)

习 题 (78)

第四章 理想气体的热力过程 (81)

4-1 热力过程分析概述 (81)

4-2 定容过程 (82)

4-3 定压过程 (84)

4-4 定温过程 (85)

4-5 绝热过程 (87)

4-6 多变过程 (94)

思考题 (99)

习 题 (100)

第五章 热力学第二定律 (105)

5-1 热力循环和制冷循环 (105)

5-2 热力学第二定律 (109)

5-3 可逆过程和不可逆过程 (111)

5-4 卡诺循环 (113)

5-5 卡诺定理 (116)

5-6 克劳修斯不等式 (119)

5-7 状态参数熵及孤立系统熵增原理 (121)

5-8 热能的可用性及烟参数 (129)

思考题 (140)

习 题 (141)

第六章 气体的流动 (147)

6-1 稳定流动时气流的基本方程式 (147)

6-2 管内定熵流动的基本特性(149)

6-3 气体的流速及临界流速(151)

6-4 气体的流量和喷管计算(156)

6-5 喷管效率(161)

6-6 绝热滞止(163)

6-7 绝热节流(167)

6-8 合流(168)

思考题(170)

习 题(170)

第七章 压气机的压气过程(173)

7-1 压气机的压气过程(173)

7-2 活塞式压气机的压气过程(178)

7-3 多级压缩(181)

7-4 压气机效率(184)

思考题(186)

习 题(187)

第八章 气体动力循环(189)

8-1 活塞式内燃机的理想循环(189)

8-2 燃气轮机装置循环(200)

8-3 增压内燃机及其循环(209)

8-4 自由活塞燃气轮机装置及其循环(210)

8-5 喷气式发动机及其循环(212)

8-6 活塞式热气发动机及其循环(214)

思考题(217)

习 题(217)

第九章 实际气体(221)

9-1 实际气体状态变化的特点(221)

9-2 范德瓦尔方程式(224)

9-3 对比状态方程式(228)

9-4 实际气体状态的近似计算(229)

9-5 热力学普遍关系式(233)

9-6 绝热节流的温度效应(242)

思考题(245)

习 题(246)

第十章 水蒸气及蒸汽动力循环(248)

10-1 水蒸气的发生过程(248)

10-2 水蒸气热力性质表和图(254)

10-3 水蒸气的热力过程(260)

10-4 朗肯循环(264)

10-5 再热循环(269)

10-6 回热循环(270)

思考题(273)

习 题(274)

第十一章 制冷循环(276)

11-1 逆向卡诺循环(276)

11-2 空气压缩制冷循环(279)

11-3 蒸气压缩制冷循环(284)

11-4 蒸汽喷射制冷循环及吸收式制冷装置(288)

*11-5 制冷剂及其热力学性质(291)

思考题(294)

习 题(295)

第十二章 湿空气(297)

12-1 湿空气的一般概念(297)

12-2 绝对湿度、相对湿度和含湿量(298)

12-3 湿空气的焓-含湿量图(302)

12-4 湿空气的热力过程(304)

思考题(308)

习 题(308)

第十三章 化学热力学基础(310)

- 13-1 化学反应的质量守恒分析(310)
- 13-2 热力学第一定律在化学反应中的应用(314)
- 13-3 理论燃烧温度(321)
- 13-4 热力学第二定律在化学反应中的应用(323)
- 13-5 化学平衡和平衡常数(326)
- 13-6 化学平衡和温度、压力及组成的关系(332)
- 13-7 离解和离解度(334)
- 13-8 绝对熵和热力学第三定律(338)

思考题(339)

习 题(340)

主要参考书(341)

部分习题答案(343)

附 录(352)

- 附表1 常用气体的热力性质(352)
- 附表2 理想气体状态下的摩尔定压热容与温度的关系(352)
- 附表3 空气的热力性质(353)
- 附表4 氧的热力性质(356)
- 附表5 氮的热力性质(357)
- 附表6 氢的热力性质(358)
- 附表7 二氧化碳的热力性质(359)
- 附表8 一氧化碳的热力性质(360)
- 附表9 水蒸气的热力性质(理想气体状态)(361)
- 附表10 各种单位的换算关系(362)
- 附图1 氨的 $\lg p-h$ 图
- 附图2 湿空气 $h-d$ 图 ($p_0 = 100 \text{ kPa}$)

绪 论

0-1 热能动力工程的重要地位

人类社会的发展是和社会生产力的发展密切相关的，而社会生产力的一个重要组成部分就是为生产过程提供原动力的动力工程。动力工程不仅应该提供数量上足够的原动力，而且所提供的原动力装置应该功率大、重量轻、体积小。只有当原动力工程能充分满足生产需要时，社会生产才能得到迅速发展，从而推动人类社会不断前进。

热能动力工程是利用热能转换成为机械能而获得生产所需原动力的。它最初出现于18世纪，当时生产规模已日趋扩大，所用机械也日益增多，而所用的原动力还停留在人力、畜力等原始水平，严重地阻碍了生产的发展。在生产发展的强烈推动下，1784年瓦特制成了一种通用的蒸汽机，为生产提供了一种强有力的动力装置，开始了热能动力工程的新纪元。蒸汽机的广泛应用推动生产飞速发展，从而掀起了历史上著名的“工业革命”，彻底改变了原来自然经济的小生产方式，奠定了工业化生产的牢固的物质基础。

在现代社会生产中，热能动力工程的地位是极为重要的。今天，工农业各部门及人民生活所消耗的电力绝大部分是由热能动力的发电厂所生产的电能提供的；各生产部门中直接用于驱动机械设备的原动机几乎全部是汽轮机、内燃机、燃气轮机等热能动力装置。在人类征服宇宙空间的伟大斗争中，也正是热能动力家族中的一员——强大的火箭发动机建立了功勋。总之，对于现代

社会生产的发展，热能动力工程起着十分重要的保证作用和积极的推动作用。

随着社会生产的发展，热能动力工程本身也在不断地发展和进步，特别是面对未来生产发展对原动力需要迅速增加的趋势，热能动力工程正在积极地向采用原子能和太阳能等新能源的方向努力前进。从20世纪50年代起，人们就开始研究利用原子核反应产生的巨大热能作为热能动力装置的能源，并且已经取得了很大的成就。现在，利用浓缩的铀235发生核反应所产生的能量为能源的核电厂，已经在许多地方建立起来和正式发电。我国已经掌握了设计、制造、运行核电厂的技术。由于热核反应可产生更巨大的能量，特别是热核反应物质氘的储量极大，可在相当长的时期内为热能动力工程提供稳定的能源，因此人们特别重视热核反应能量利用的研究，近些年来在这方面已经取得了很大的进展。另外，利用太阳能作为热能动力的新能源也具有非常大的价值。在地球表面上，按太阳光垂直照射的面积计算，在每平方米面积上太阳能提供的功率可达数百瓦至一千瓦左右。太阳能几乎是一个永远不会枯竭的能源，而且太阳能到处可取又无任何污染。因此，长期以来人们对太阳能利用进行了许多研究工作，现在已经建立了几个以太阳能为能源的试验性热能动力装置。可以预见，随着社会生产的发展，热能动力工程必将不断趋于完善并在新的领域取得成功。

0-2 能量转换装置工作过程简单介绍

本节将简单介绍蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置及蒸汽压缩制冷装置的工作过程，以便后面各章讨论这些装置中能量转换的基本规律。

一、蒸汽动力装置

蒸汽动力装置是最早得到应用的一种热能动力装置。由于它可以燃用固体燃料，甚至燃用廉价的劣质燃料，又可以制成功率很大的机组(例如：其锅炉每小时可生产数百吨甚至上千吨的高温高压水蒸气；其汽轮机的单机功率可达数十千瓦甚至上千兆瓦)，因此蒸汽动力装置现在仍然是一种极重要的动力设备，特别是在大型固定式动力设备方面。它主要用作热力发电厂的动力设备。

图0-1为简单蒸汽动力装置的示意图。它由锅炉、汽轮机、

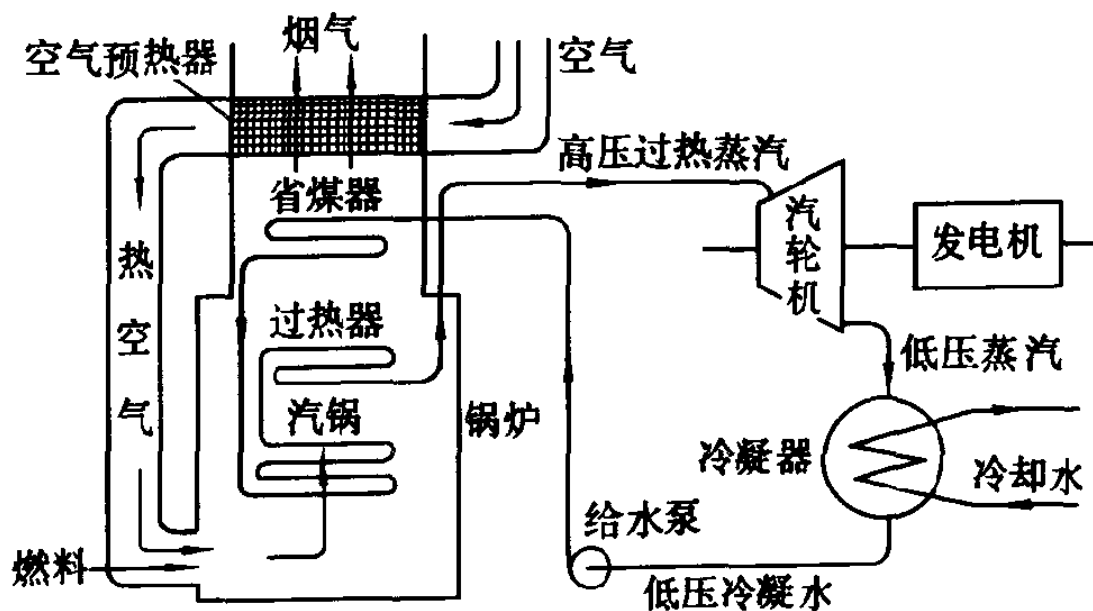


图 0-1 简单蒸汽动力装置示意图

冷凝器及给水泵四部分组成。水蒸气是蒸汽动力装置的工作物质，称为工质。锅炉是水蒸气的发生器。锅炉产生的高温高压的过热蒸汽首先送入蒸汽轮机作功。在汽轮机中(如图0-2所示)，蒸汽通过喷管提高流速后，高速流过涡轮的叶片推动涡轮转动，使汽轮机输出机械功，驱动发电机发电。从汽轮机排出的乏汽被引入冷凝器，并在其中被冷却水冷却而凝结成水。乏汽凝结时，其体积骤降为原体积的万分之一左右，因而在冷凝器中及汽轮机出口处造成很高的真空度，使蒸汽在汽轮机中得到更加充分的膨胀，从而能推动涡轮作出更多的机械功。从冷凝器出来的冷凝水经给水泵加压后重新送回锅炉，受热产生蒸汽。在锅炉中，供燃