



火力发电厂

传热原理与实践

西安交通大学

《火力发电厂传热原理与实践》编写组

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是专为火力发电厂热机工人编写的，是热机工人提高专业理论知识的一本较好的参考书。全书共分八章，有插图 200 余幅。书中结合发电厂锅炉和汽轮机等设备的生产实践介绍传热学知识，由浅入深地阐明导热、对流和辐射换热三种热传递基本方式的规律；对锅炉和汽轮机设备有关部件的传热问题进行了重点分析，阐述了强化传热的方法，简要介绍了这些部件传热计算的基本方法；扼要介绍了传热问题的实验测定方法。本书文字通俗，插图丰富，对重要公式都列有例题。书中各章都列有思考题和答案，书末还列有附录和传热学问题索引便于查阅和参考。

本书亦可供热机专业技术人员和大专院校师生参考。

火力发电厂传热原理与实践

西安交通大学《火力发电厂传热原理与实践》编写组

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

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

*

1977年8月北京第一版

1977年8月北京第一次印刷

印数 00001—19460 册 每册 1.10 元

书号 15143·3256

毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。停止的论点，悲观的论点，无所作为和骄傲自满的论点，都是错误的。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

前 言

解放后，特别是无产阶级文化大革命以来，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国人民坚持以阶级斗争为纲，认真贯彻“独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国”的方针，抓革命，促生产，使工农业各条战线都取得了伟大的胜利。电力工业也和其他部门一样正在飞速发展，一批批青年参加到电力工业的战斗行列中来，热机工人的队伍正在不断壮大。

对于青年热机工人来说，要能更好地掌握热力设备的结构原理和工作特性，提高运行和管理水平，把在生产实践中积累起来的感性知识上升到理性阶段，学习一点有关热量传递规律的基本知识是很有必要的。为此，我们在向工人师傅学习和调查研究的基础上，编写了这本《火力发电厂传热原理与实践》。

在科学技术中把专门研究热量传递规律的这门学科叫“传热学”。本书将结合火力发电厂的生产实际来介绍传热学的基本内容。我们从广大工人所熟悉的一些热传递现象出发，由浅入深地介绍几种热传递基本方式的规律（第一章到第五章），着重讲清传热学的基本概念和主要计算方法；在此基础上，再运用传热学的知识对一些较复杂的问题进行分析（第六章到第八章），旨在培养分析问题和解决问题的能力。对比较深入或较新的内容，都用小字排印，这一些章节和段落，初学时可以跳过去，不会影响以后内容的学习。

由于热传递现象的复杂性与多样性，传热学中计算公式较多。我们选择了同火力发电厂关系比较密切的几种热交换现象进行讨论与分析，较为详细地介绍了过程的物理本质，计算公式中各项的意义，指出公式的适用范围，及在一定条件下如何使公式简化等。这样做既有利于初学的同志把主要精力集中到掌握基本概

念和培养分析问题、解决问题的能力上，同时当需要解决其他传热问题时，熟悉了上面这些方法后也能起到举一反三的作用。

为适应自学的需要，本书的文字叙述比较详尽，不采用高等数学来推导或演算，对那些必须补充的数学知识则在附录中作了扼要的介绍。对重点内容，如热阻、热阻叠加原则、强化热传递的方法等，前后反复强调，多次实际应用，必要的地方还举了计算例题。同志们在阅读过程中若能结合生产实际需要进行一些传热测试（尤其在学习第八章时），将能收到更好的效果。

在编写过程中曾得到江苏望亭发电厂、上海杨树浦发电厂、吴泾热电厂、辽宁清河发电厂、陕西户县热电厂、西安坝桥热电厂、西安电力学校、北京电力学校、南京工学院、华中工学院、上海机械学院、上海锅炉厂、上海汽轮机厂、西安热工研究所等很多单位的有关同志及我校热能、锅炉、涡轮、发电专业的部分工农兵学员和教师的大力支持和热情帮助，对初稿提出了许多宝贵意见，提供了不少试验资料，我们谨向这些单位和同志表示衷心感谢。

本书编写组是由我校热工教研室和锅炉教研室教工组成的。

在编写本书时我们力图贯彻毛主席的哲学思想与教育思想，注意密切联系生产实际，使本书的内容尽可能适应火力发电厂热机工人学习的需要。但由于我们的政治水平不高，业务能力有限，实践经验欠缺，书中错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

西安交通大学《火力发电厂传热原理与实践》编写组

1976.5

常用符号

基本符号

- A 物体对热辐射的吸收率。
- a 导温系数, 米²/时; 物体的黑度。
- B 燃料消耗量, 公斤/时。
- C_0 黑体辐射系数, 千卡/米²·时·K⁴。
- c 比热, 千卡/公斤·°C。
- c_p 流体的等压比热, 千卡/公斤·°C。
- D 辐射能在物体中的穿透率; 蒸汽流量, 公斤/时或吨/时。
- d 直径, 米或毫米。
- E 物体的辐射力, 千卡/米²·时。
- F 表面积, 米²。
- f 横截面积, 米²; 作用力, 公斤。
- G 液体的重量流量, 公斤/时或吨/时。
- g 重力加速度, 米/秒²。
- H 高度, 米; 辐射受热面, 米²。
- I 电流强度, 安培。
- i 物体的焓, 千卡/公斤。
- J_λ 单色辐射强度, 千卡/米³·时。
- k 传热系数, 千卡/米²·时·°C; 气体辐射减弱系数, 1/米·绝对大气压。
- L 定形尺度, 米; 距离, 米; 有效辐射层厚度, 米。
- l 长度, 米。
- m 凝汽器冷却倍率。
- p 压力, 公斤/厘米²; 计算平均温差的无因次参数。
- Δp 压差, 公斤/厘米²。
- Q 传热量, 千卡/时。

- q 热流密度, 千卡/米²·时。
- q_l 每米长管道上所传递的热量, 千卡/米·时。
- R 传递过程的阻力(热阻、电阻); 物体对辐射能的反射率; 计算平均温差的无因次参数。
- r 半径, 米; 汽化潜热, 千卡/公斤; 气体容积百分比。
- S 节距, 毫米。
- T 绝对温度, K。
- t 摄氏温度, °C。
- Δt 温差, °C。
- δt 凝汽器的端差, °C。
- U 电压, 伏; 周界长, 米。
- V 体积, 米³; 体积流量, 米³/时。
- W 升温速度, °C/时。
- u 流速, 米/秒。
- x 汽水混合物中的蒸汽的重量百分数。
- Z 管束排数。
- α 放热系数, 千卡/米²·时·°C。
- β 体积膨胀系数, 1/°C; 气流对管束的冲刷角度。
- γ 比重, 公斤/米³。
- δ 厚度, 米或毫米。
- ε 污垢热阻, 米²·时·°C/千卡。
- η 效率。
- θ 平面角, 度。
- λ 导热系数, 千卡/米·时·°C; 波长, 微米。
- μ 动力粘性系数, 公斤·秒/米²; 电磁波波长, 微米。
- ν 运动粘性系数, 米²/秒。
- ξ 受热面利用系数。
- ρ 密度, 公斤·秒²/米⁴。
- σ 表面张力, 公斤/米。
- σ_0 黑体辐射常数, 千卡/米²·时·K⁴。
- τ 在换热器中同一流体的温度变化, °C。
- φ 辐射角系数; 圆筒壁导热简化计算式中修正系数。
- ϕ 管子直径习惯符号。

上 下 标

通 用 符 号

<i>min</i>	最小的	<i>max</i>	最大的
<i>s</i>	饱和的		

汉 语 拼 音 符 号

b	壁面 (bimian)
d	当量 (dangliang)
dl	对流 (duiliu)
dr	导热 (daore)
fs	辐射 (fushe)
g	光管 (guangguan)
gs	管束 (guanshu)
h	灰 (hui)
hy	火焰 (huoyan)
jb	局部 (jubu)
k	空气 (kongqi)
ky	可用 (keyong)
l	流体 (liuti)
lj	临界 (lingjie)
lp	肋片 (leipian)
lt	炉膛 (lutang)
n	凝结 (ningjie)
nl	逆流 (niliu)
r	热 (re)
sg	水垢 (shuigou)
tr	投入 (touru)
xt	系统 (xitong)

y 烟 (yān)
 yn 允许 (yǔnxǔ)
 yx 有效 (yǒuxiào)

相 似 准 则

雷诺准则 $Re = \frac{wL}{\nu} = \frac{\rho wL}{\mu} = \frac{\gamma wL}{\mu g}。$

普朗特准则 $Pr = \frac{\mu g c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}。$

努塞尔特准则 $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}。$

欧拉准则 $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}。$

葛拉晓夫准则 $Gr = \frac{g \beta \Delta t L^3}{\nu^2}。$

目 录

前 言

常用符号

第一章 对热传递现象的初步认识	1
第一节 发电厂中的热传递现象	1
第二节 热量传递的三种基本方式	11
第三节 传热过程和热阻	17
第四节 平均传热温差	23
第二章 导热	38
第一节 平壁和圆筒壁的稳定导热	38
第二节 导热系数	45
第三节 多层壁的导热	50
第四节 复杂形状物体的导热	58
第五节 不稳定导热的概念	61
第三章 无相变时的对流换热	71
第一节 对流换热现象浅说	71
第二节 流体的粘性及流动边界层	75
第三节 层流与紊流	81
第四节 影响对流换热的因素	89
第五节 相似理论简介	94
第六节 管槽内紊流强制对流换热的计算	102
第七节 流体横向冲刷管束的换热	113
第八节 多次折流换热概述	120
第九节 自然对流换热	123
第四章 有相变时的对流换热	133
第一节 大容器沸腾时的换热	133
第二节 管内沸腾介绍	138
第三节 凝结换热	146
第四节 影响凝结换热的因素	151

第五章 辐射换热	158
第一节 关于热辐射的基本知识	158
第二节 黑体模型及辐射四次方定律	163
第三节 对热辐射规律的进一步认识	168
第四节 物体的黑度与吸收率的关系	173
第五节 角系数	179
第六节 两固体表面间的辐射换热	186
第七节 辐射换热的增强和削弱	193
第八节 气体与火焰的辐射	198
第九节 炉内换热	207
第六章 发电厂中一些典型传热现象的分析与计算	218
第一节 复合换热及辐射放热系数	218
第二节 换热壁面温度工况的分析	228
第三节 通过圆筒壁的传热	236
第四节 锅炉各受热面及汽轮机辅机中传热过程的特点	244
第五节 肋片的作用	249
第六节 汽轮机起、停过程中的传热现象分析	256
第七节 从电机冷却技术的改进看强化热表面散热的方法	264
第八节 表面式换热器传热过程的强化	272
第九节 换热器设计计算示例	279
第七章 过热器和凝汽器传热问题的分析	288
第一节 过热器的类型及强化传热的方法	288
第二节 过热蒸汽温度的变化特性及调温措施	293
第三节 过热器管壁温度的分析	298
第四节 内肋片管为什么能降低壁温	305
第五节 凝汽器工作过程的一般介绍	310
第六节 表面式凝汽器传热过程的分析及传热计算	314
第七节 影响凝汽器真空和端差的因素	321
第八节 凝结水过冷的原因及减少过冷度的方法	327
第八章 传热问题的实验测定	334
第一节 传热系数的实验测定	334
第二节 温度测量中的传热问题	345

第三节	炉内辐射热流测定方法简介·····	355
附录	·····	363
附录一	常用材料的导热系数·····	363
附录二	干空气在压力等于 760 毫米汞柱时的物性参数·····	366
附录三	烟气在压力等于 760 毫米汞柱时的物性参数·····	367
附录四	水在一个大气压或饱和线上的物性参数·····	368
附录五	水蒸汽在饱和线上的物性参数·····	370
附录六	几种液体的物性参数·····	372
附录七	有关数学知识的复习与补充·····	373
附录八	国际单位制与工程单位制的换算·····	386
附录九	常用字母的读音及名称·····	392
火力发电厂传热问题索引	·····	394

第一章 对热传递现象的初步认识

第一节 发电厂中的热传递现象

“认识从实践始”。在生产实践和日常生活中我们会遇到大量的热传递现象。例如，用手拿冰块时会感到冻手，这是由于冰的温度比手的温度低，手上的热量传给了冰块的缘故。如果拿一根捅焦棒去捅锅炉炉膛中的焦渣，整个捅焦棒很快就会变热；这是因为捅焦棒的一端在炉中受热后温度升高，热量就从温度高的一端迅速传到了温度低的一端。冬天，在装有暖汽片的房间里感到比较暖和。当打开炉膛看火门时，会立即感到非常热……。人们把生产实践和日常生活中的许多经验加以总结，得出了这样的结论：凡有温度差的地方就一定有热量的传递、热量总是自动地由高温物体传向低温物体的。

火力发电厂是将燃料的化学能转变为电能的工厂。在其中可以遇到各种类型的热量传递现象。火力发电厂的电能生产过程如图1-1所示，现综述如下：原煤在制粉系统中被磨成煤粉后，在热空气的输送下，经燃烧器送入炉膛燃烧，在这里燃料的化学能转变成高温烟气的热能；高温烟气把一部分的热量传给炉膛四周的水冷壁，并在流过水平烟道内的过热器及尾部烟道内的省煤器、空气预热器时，继续把热量传给蒸汽、水及空气，被冷却了的烟气经除尘器除去飞灰，最后从烟囱排出。在水冷壁管子中产生的饱和蒸汽流经过热器时进一步吸收烟气的热量变成过热蒸汽，然后通过主蒸汽管道送到汽轮机中。蒸汽推动汽轮机旋转，将热能转变为机械能。汽轮机带动发电机旋转而发电，又将机械能变成电能。蒸汽在汽轮机内膨胀做功后进入凝汽器内凝结，凝结水由

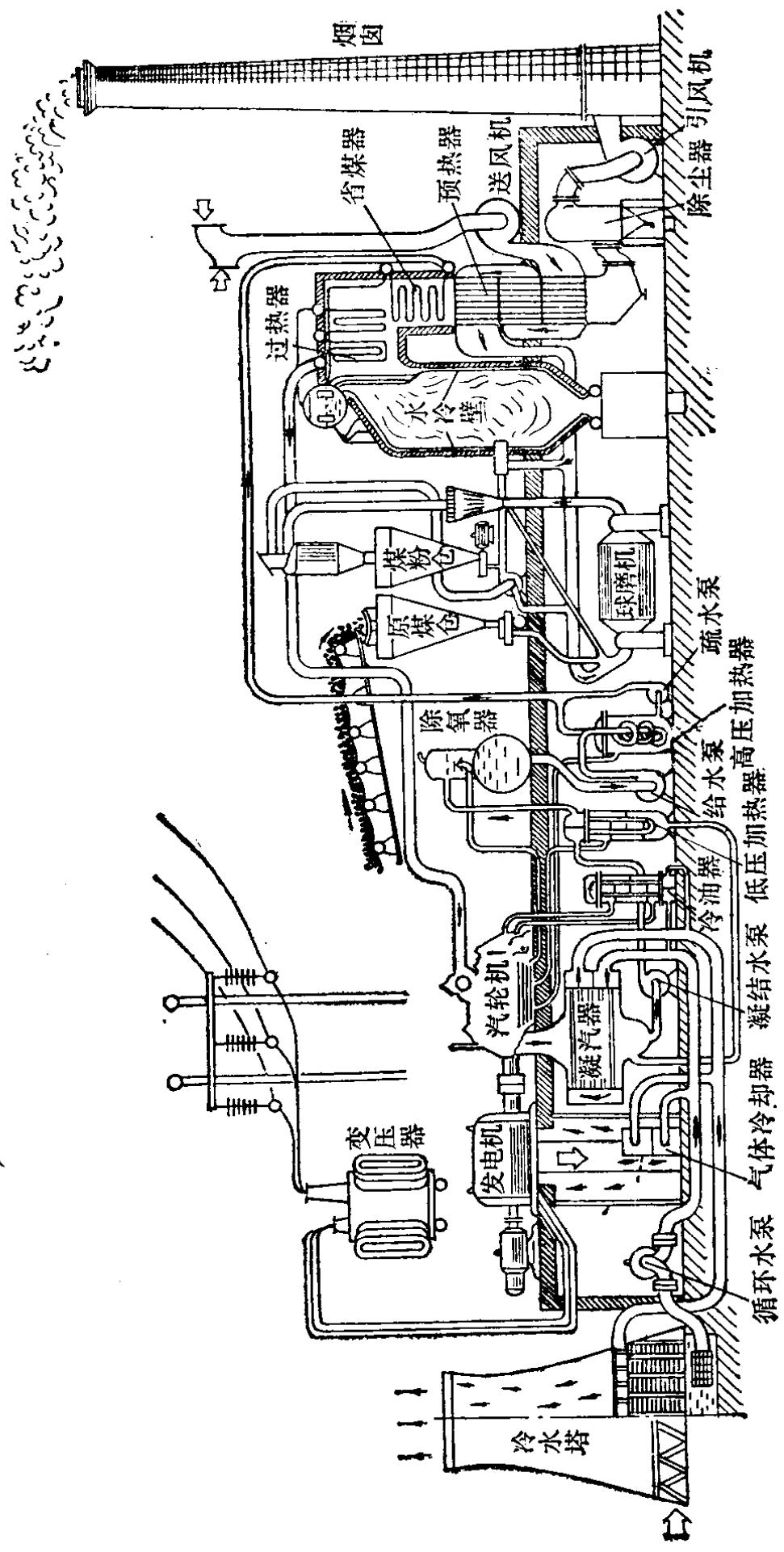


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

凝结水泵送入低压加热器，吸收热量温度升高后又进入除氧器继续受热，并除去了水中所含的气体，再由给水泵将除氧后的水经高压加热器进一步提高温度，然后送入锅炉，如此完成了一个循环。另一方面，为了使汽轮机的排汽凝结，由循环水泵把冷却水送入凝汽器，在其中受热温度升高后返回冷水塔，在那里又被冷却以供循环使用。

由上可见，发电厂的电能生产与热量传递过程密切联系在一起，发电厂的许多设备实质上都是两种流体进行热量交换的装置。工业上把这类将一种流体的热量传给另一种流体的设备统称为换热器。电厂中的过热器、省煤器、空气预热器、凝汽器、回热加热器、除氧器、冷水塔等等都属于换热器之列，甚至可以说整台锅炉就是一个组合的换热器。尽管换热器的形式繁多，功用不一，但就其工作过程的基本原理来说，可以分成三种类型，分别叙述如下。

一、表面式换热器

这种型式换热器的应用最普遍，主要的特点是冷热两种流体被壁面隔开，在换热过程中两流体互不接触，热量由热流体通过壁面传递给冷流体，如图 1-2 所示。

发电厂中的过热器、再热器、省煤器(见图 1-3 中的相应部件)、管式空气预热器(图 1-4)、凝汽器(图 1-5)、冷油器(图 1-6)、表面式加热器、表面式减温器和发电机的气体冷却器等都是表面式换热器。在过热器、再热器中蒸汽所吸收的热量是由高温烟气通过管子壁面传递给蒸汽的。同样，在省煤器中烟气热量通过管子壁面传给低

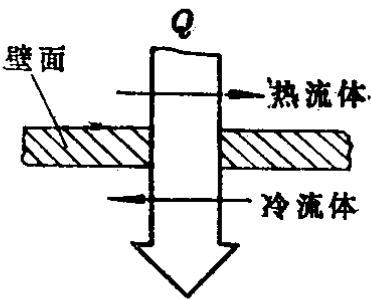


图 1-2 表面式换热器热量传递示意图

(图中的大箭头表示热量 Q 传递的方向)

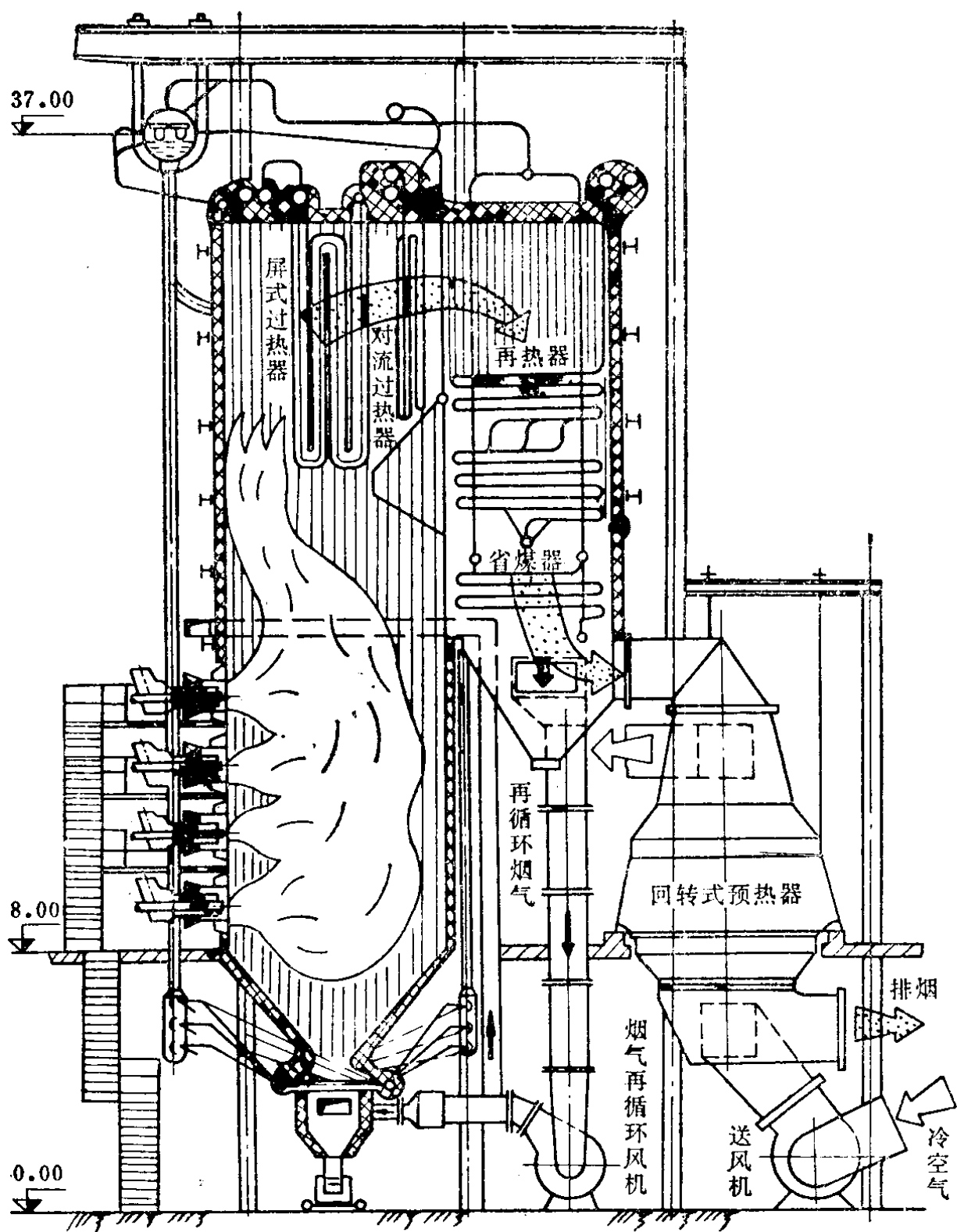


图 1-3 国产400吨/时超高压汽包锅炉简图

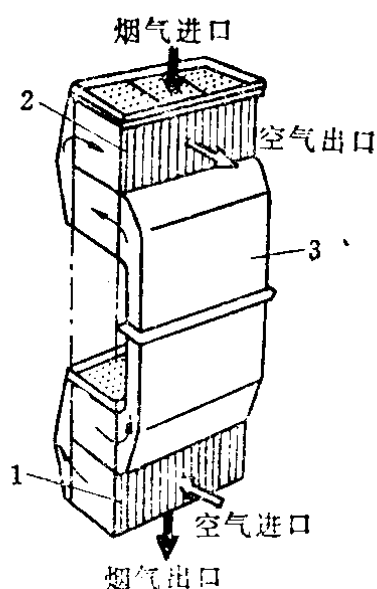


图 1-4 双级布置管式空气预热器

1—第一级空气预热器；2—第二级空气预热器；3—风道

温的给水。我们“必须提倡思索，学会分析事物的方法，养成分析的习惯。”同志们对凝汽器、冷油器等换热设备可以作同样的分析。

从结构上来说，表面式换热器又可分为壳管式、套管式、螺旋板式等数种。其中壳管式换热器应用最广。上面提到的凝汽器、冷油器、表面式加热器等都属于壳管式。其他形式的表面式换热器在以后有关的地方再予以说明。

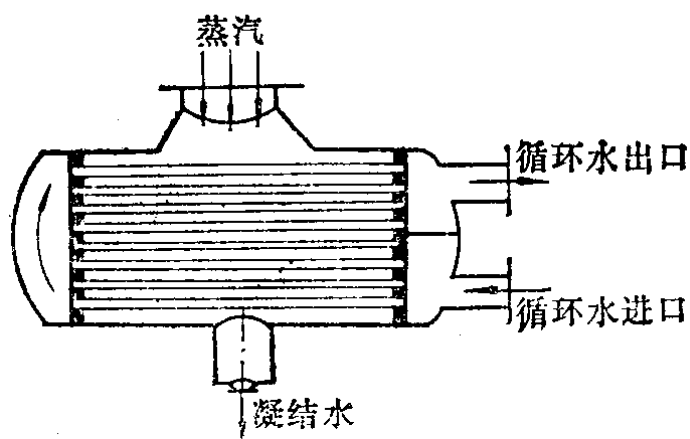


图 1-5 双流程凝汽器

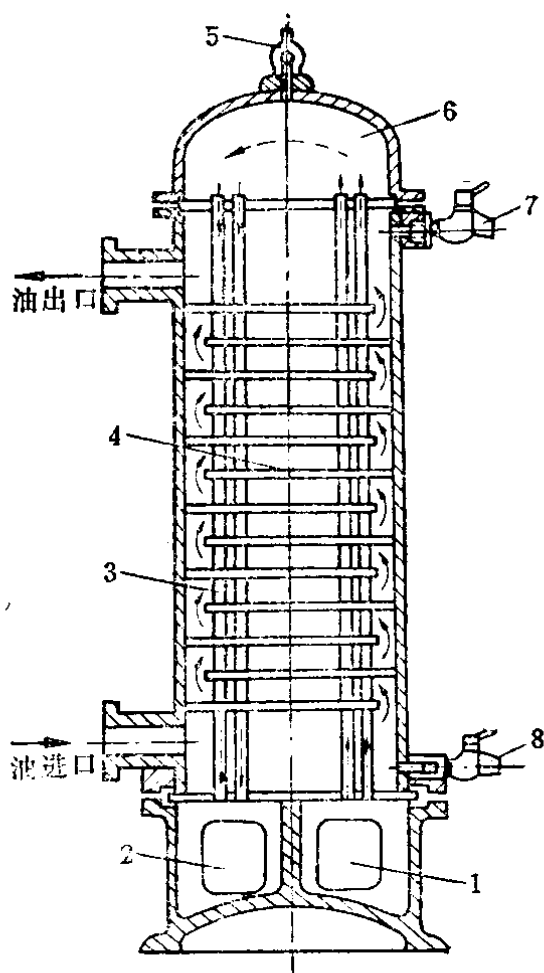


图 1-6 冷油器

1—进口水室；2—出口水室；3—管束；4—隔板；5—水侧放水旋塞；6—上水室；7—油侧放水旋塞；8—放水旋塞