



石油工业节能减排技术

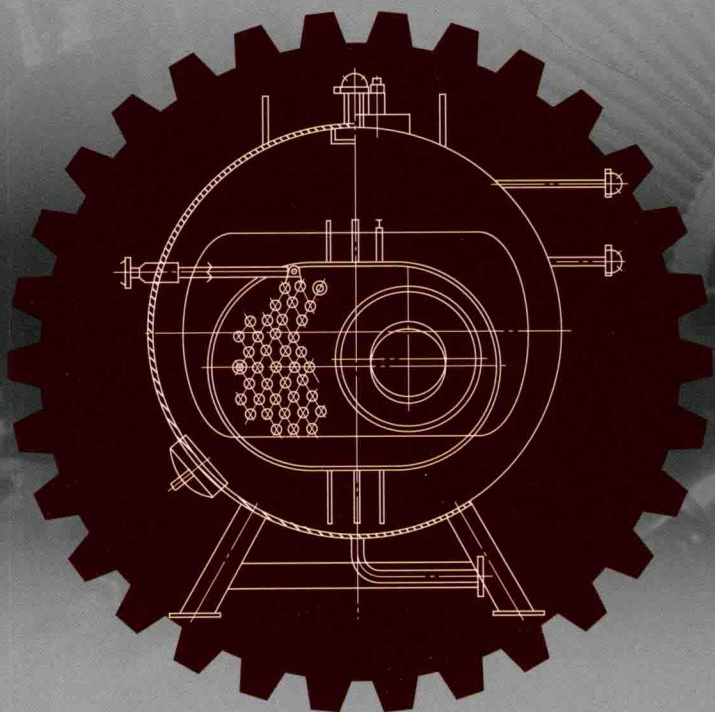
能源动力设备设计

Energy Power Equipment Design

王春华 主编

马丹竹 潘颢丹 副主编

- ▶▶ 锅炉原理与设备
- ▶▶ 热交换器原理与设备
- ▶▶ 汽轮机原理
- ▶▶ 能源动力系统设计



化学工业出版社



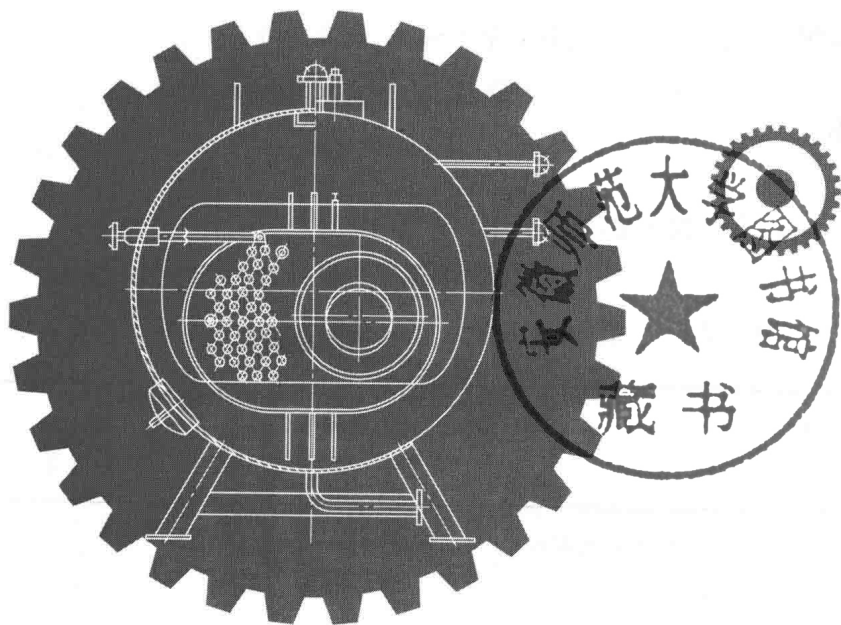
石油工业节能减排技术

能源动力设备设计

Energy Power Equipment Design

王春华 主编

马丹竹 潘颖丹 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以石油工业节能减排为主线,突出科学性、先进性、实用性,计算实例丰富,通俗易懂。

本书共分十五章,着重介绍多种型式的锅炉及换热器(受热面)的热力计算过程,并辅之以多种节能减排式炉型如煤粉锅炉、循环流化床锅炉、燃油-气锅炉热力计算实例,还有节能效果显著的燃烧新技术富氧燃烧锅炉的引入;同时加入了简单易懂的 Excel 程序和 Visual Basic (VB) 语言自行编制的计算程序以简化烦琐的人工计算过程;介绍了汽轮机的设计计算与校核计算的详细过程,辅以多级汽轮机的热力设计、变工况下汽轮机的热力校核计算实例。

本书可供能源动力系统设计人员参考使用,也可作为普通高等院校本科能源动力类专业学生能源动力设备设计教材。

图书在版编目(CIP)数据

能源动力设备设计/王春华主编. —北京:化学工业出版社, 2017.5

(石油工业节能减排技术)

ISBN 978-7-122-29583-5

I. ①能… II. ①王… III. ①蒸汽透平-热力计算
IV. ①TK14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 084158 号

责任编辑:郝英华

装帧设计:史利平

责任校对:宋 玮

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数434千字 2017年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

石化行业既是能源的直接生产者，又是能源的消耗大户、环境的污染大户。近年来，在国家节能减排压力下，我国石化行业装置通过节能技术的应用，使主要耗能产品的单位能耗有所降低，但与国外先进国家水平相比，单位产品能耗仍高 10% ~ 20%，能源利用率仍低 15% ~ 40%。在环境、能源、经济矛盾日益严重的今天，石化行业必须提升自身产业的自主创新能力，引入大量的科技人才。这就要求石油类高等院校为石化行业的发展提供人才保障，培养出适合石化行业的高质量、创新型人才，引导石化行业的绿色可持续性发展。

能源与动力工程专业的一项重要任务就是培养高效利用常规能源、开发新能源和降低污染排放的节能环保型专业技术人才，节能减排工作是能源与动力工程专业大学生不容推卸的责任与义务。

本书介绍了目前常见的能源动力类的节能减排设备，节能新技术的发展与应用，启迪学生对本专业关键设备之间的知识联系，设备的运行与社会环境的影响，拓宽学生的视野。本书取材尽量用生产中的典型实例为素材，同时又注重反映国内外该领域科学技术的新进展。

本书共分十五章：第一 ~ 三章，着重介绍能源动力设备锅炉、换热器及汽轮机的工作原理、主要结构、设备的评价指标；第四 ~ 十三章，着重介绍多种型式的锅炉及换热器（受热面）的热力计算过程，并辅之以多种炉型具体实例，使读者在使用时更容易理解，具体实例均是目前常见的节能减排式炉型如煤粉锅炉、循环流化床锅炉、燃油-气锅炉，还有节能效果显著的燃烧新技术的引入，富氧燃烧锅炉；同时加入了简单易懂的 Excel 程序和 Visual Basic (VB) 语言自行编制的计算程序以简化烦琐的人工计算过程；第十四、十五章以电厂汽轮机热力设计为核心，主要介绍了汽轮机的设计计算与校核计算的详细过程，辅以多级汽轮机的热力设计、变工况下汽轮机的热力核算实例。两种实例均是通过对机组的优化设计或改造使其达到节能效果，使节能意识深入到读者心中。

本书共十五章及一个附录，参加编写的有辽宁石油化工大学王春华、马丹竹、潘颢丹、贾冯睿和岳悦。其中，第一、七、十、十三章由王春华编写；第二、五、六、八、十二章由马丹竹编写；第三、四、十四、十五章由潘颢丹编写；第九章、附录由贾冯睿编写；第十一章由岳悦编写。

王春华担任本书主编，领导全书编写工作，马丹竹和潘颢丹担任副主编，参与重点章节的编写工作。

限于编者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2017 年 4 月

目录

Contents

第一篇

能源动力设备概述

1

第一章 ▶ 注汽锅炉

第一节 锅炉工作过程	1
第二节 锅炉系统及组成部件	2
第三节 锅炉容量、参数及型号表示	5
第四节 油田注汽锅炉的节能技术研究进展	9
第五节 注汽锅炉在油田中的应用与发展	12
第六节 注汽锅炉的其他炉型	15
参考文献	23

第二章 ▶ 换热器

第一节 传热过程在石化行业中的应用	24
第二节 石化行业的典型换热过程	25
第三节 石化行业常用的换热方法	26
第四节 传热过程的基本计算方程	27
第五节 换热器的分类、结构及特性	30
第六节 换热器传热过程的强化	40
参考文献	42

第三章 ▶ 汽轮机

第一节 汽轮机的分类和型号表示	44
第二节 汽轮机的结构及特点	45
第三节 汽轮机的工作过程	60
第四节 汽轮机排汽余热的回收利用	65
参考文献	66

第四章 ▶ 能源动力设备的评价指标

参考文献	68
------------	----

第五章 ▶ 锅炉热力计算概述

参考文献	84
------------	----

第六章 ▶ 辅助计算

第一节 锅炉燃料的燃烧计算	85
第二节 锅炉热平衡与燃料消耗量计算	88
参考文献	91

第七章 ▶ 煤粉锅炉热力计算

第一节 炉膛热力计算	92
第二节 半辐射受热面（换热器）热力计算	98
第三节 对流受热面（换热器）热力计算	102
参考文献	107

第八章 ▶ 循环流化床锅炉热力计算

第一节 燃烧脱硫计算	108
第二节 锅炉热平衡及石灰石和燃料消耗量	111
第三节 CFB 锅炉热力计算	113
参考文献	118

第九章 ▶ 燃油-气锅炉热力计算

参考文献	125
------------	-----

第十章 ▶ 富氧燃烧锅炉热力计算

第一节 富氧燃烧简介	126
第二节 燃烧气及循环烟气体积计算	130
第三节 热平衡及燃料消耗量计算	133
第四节 炉膛的热力计算	137
参考文献	143

第十一章 ▶ 锅炉整体热量平衡的校核

参考文献	145
------------	-----

第十二章 ▶ 锅炉热力计算的计算机算法

参考文献	165
------------	-----

第十三章 ▶ 锅炉课程设计计算实例

第一节 600MW 超临界压力煤粉锅炉热力计算	166
第二节 130t/h 循环流化床锅炉热力计算	208
第三节 1t/h 燃油-气锅炉热力计算	223
参考文献	229

第十四章 ▶ 汽轮机热力设计

第一节	汽轮机热力计算内容与方法	230
第二节	多级汽轮机热力计算一般原则	232
第三节	多级汽轮机初步热力设计一般程序	234
	参考文献	248
第十五章 ▶ 汽轮机热力计算实例		
第一节	汽轮机热力设计计算实例	249
第二节	汽轮机热力校核计算实例	254
	参考文献	267
附录 线算图		

第一篇

能源动力设备概述

能源与动力工程致力于传统能源的利用及新能源的开发和如何更高效地利用能源。能源既包括煤、石油、天然气、水等传统能源，也包括核能、风能、生物能、氢能等新能源。动力方面则是实现这些能源有效利用的设备。能源的形式多种多样，比如电能、热（冷）能、机械能、化学能、电磁能等。大部分一次能源须首先转换成热能再予以利用。

在石油化工行业，油田注汽锅炉是原油热采的关键设备，换热器是实现原油加热的关键设备，汽轮机是油田自备电厂将蒸汽热能转换成机械能进而发电的主要设备之一，所以这三大设备是石化行业有效转换与利用热能的主要设备，也是能源与动力工程必须掌握的设备。为了更有效地转换与利用热能，本篇将着重介绍热能转换与利用常见的锅炉、换热器和汽轮机等三种能源动力设备。

第一章 注汽锅炉

第一节 锅炉工作过程

锅炉是将燃料的化学能转换成热能的设备。它可以定义为：通过燃料的燃烧，使燃料中的化学能转变为热能，并将此热能传递给工质（如水）从而使工质升温甚至转变成具有所需要热力学参数的蒸汽的设备。锅炉是化工、石化、冶金、轻纺、造纸等工矿企业主要动力及供热设备，是火力发电站三大主机之一，在节能、环保等科技改造及研究方面具有重要地位。

注汽锅炉又称为湿蒸汽发生器，是油田开采稠油的专用注汽设备。它是利用所生产的高温高压湿蒸汽注入油井，加热油层中的原油以降低稠油的黏度，从而增加稠油的流动性，能够大幅度地提高稠油的采收率。

常见的湿蒸汽发生器是卧式直流水管锅炉，它的辐射段是单路或多路直管水平往复式布

置, 对流段为单路或多路直管往复错列排布结构, 产生湿度大于 20% 的湿饱和蒸汽或过饱和蒸汽。它是将燃料燃烧释放的热能通过受热面使给水加热成为一定压力、温度和干度的湿饱和或过饱和蒸汽的机械设备。

注汽锅炉的工作过程主要由以下几个过程组成。

1. 燃料的燃烧过程

燃料中的化学能被释放出来转化成被烟气携带的热能。

进入炉膛的燃料与空气混合, 着火燃烧后产生的高温烟气通过传热过程将热能传递给辐射段中的管束。传热方式以热辐射为主, 对流方式很少。这主要是因为炉膛内烟气温度较高 (一般 1000℃ 左右), 周围辐射管温度较低 (一般低于 400℃), 炉膛内烟气流速较低, 因此对流传热量占总传热量的比例较小, 一般小于 5%。

2. 烟气向工质的传热过程

烟气所携带的热能通过锅炉的各种受热面传递给锅炉的工质。

烟气流经辐射段和对流段的受热面 (受热管束) 时, 以辐射和对流的形式将其热能传递给受热面, 受热面吸收热量后将热量传递给受热面内的工质。工质主要是水, 水在辐射段吸收约 60% 的热量, 在对流段吸收约 40% 的热量。

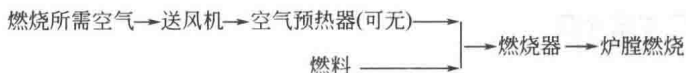
3. 工质 (水) 的加热和汽化过程

工质吸收热量后升温, 温度达到设计压力下相对应的饱和温度, 干度为 80% 的饱和蒸汽。或者汽化成为设计压力、设计温度下的过热蒸汽。

第二节 锅炉系统及组成部件

一、锅炉机组系统

1. 燃烧系统



2. 水汽系统

给水 (水处理装置来的除盐水) → 柱塞泵 → 给水预热器 → 对流段 → 辐射段升温至设计压力下的饱和温度 → 汽水分离器 → 蒸汽进入注汽管网。高参数、大容量注汽锅炉还有过热段, 即锅炉产生的饱和蒸汽进入过热段升温至设计压力下的过热蒸汽。

详细的锅炉水汽流程如图 1-1 所示。从水处理装置来的除盐水 (20℃ 左右) 进入柱塞泵升压。为保证入口和出口水的压力平稳, 一般在泵前、后装有入口和出口减震器, 给水先进入给水预热器 (水水换热器), 使给水温度提高到烟气露点以上, 以避免烟气低温腐蚀。经预热后的水进入对流低温区, 在这里吸收热量后进入辐射段低温区进一步加热, 然后再进入预热器作为热源加热给水, 经冷却后又重新进入辐射段高温区, 水在辐射段高温区经加热后进入对流段的高温区进行汽化 (或过热), 最后经取样分离器和孔板计量装置而出锅炉本体。

3. 除渣、除灰和清灰系统

燃烧产生的大块熔渣, 经水冷壁冷却形成固态渣由炉底排放 → 经碎渣机破碎; 烟气中携带的细灰粒, 经除尘器将细灰从烟气中分离出来, 由除灰系统送往灰场; 锅炉运行过程中沉

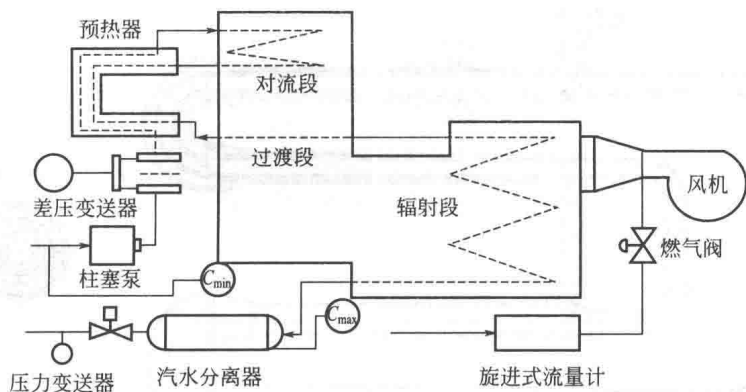


图 1-1 注汽锅炉系统流程图

积到受热面上的细灰由吹灰器清除进入除灰系统。

- 4. 烟气排放系统
为降低硫氧化物和氮氧化物对大气环境的污染，由除尘器分离出来的气体经过脱硫脱硝装置后由引风机排往烟囱。
- 5. 燃料、空气供应系统
储存、运输燃料，输送空气。
- 6. 自动控制系统
自动检测、程序控制、自动保护和自动调节。

二、锅炉的基本结构

注汽锅炉与其他类型锅炉一样，其基本结构都是由锅炉主体设备和辅助设备组成的。锅炉主体设备包括水汽系统和燃烧系统。锅炉辅助设备包括燃烧设备、供仪用风设备、锅炉附件、动力电器系统、仪表与自控系统等，详细结构如图 1-2 所示。

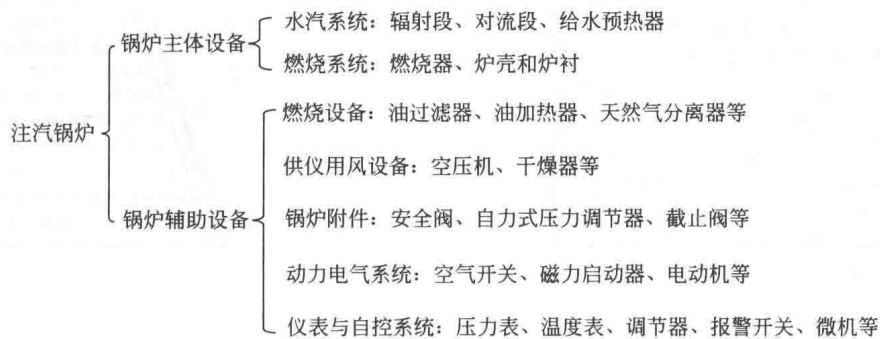


图 1-2 注汽锅炉基本结构说明

下面重点阐述注汽锅炉的主体结构。

1. 给水换热器

给水换热器是一种双管换热器结构，如图 1-3 所示，是某注汽锅炉给水预热器结构图。预热器内管流动着从对流段出来的高温水，外管内流动着从柱塞泵出来的水。两者呈逆向流动，换热效果较好。预热段出口的水也即对流段入口的水所对应的温度必须高于烟气露点，否则会导致对流段发生低温腐蚀现象。

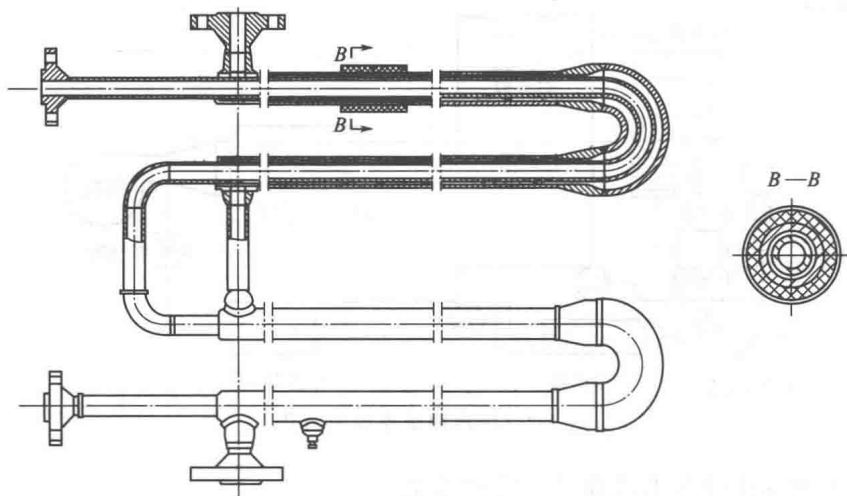


图 1-3 锅炉给水预热器

2. 对流段

对流段是烟气和给水的换热器，相对应电站锅炉的省煤器的作用。外观上看对流段有方形和梯形两种结构，如图 1-4 和图 1-5 所示。对流段内布置水平多层平行往复排列的管束。水从上部进、下部出。为了加强低温烟气与水之间的传热效果，烟气与水呈逆向流动。对流段下部三至四层一般采用光管，上部采用翅片管。翅片管增加了烟气与水的传热面积，增强了两者的传热效果。当然也可以采用其他结构如内螺纹管来加强传热效果。对流管束的布置和设计应使传热系数最高，结构紧凑，便于运输、安装等。

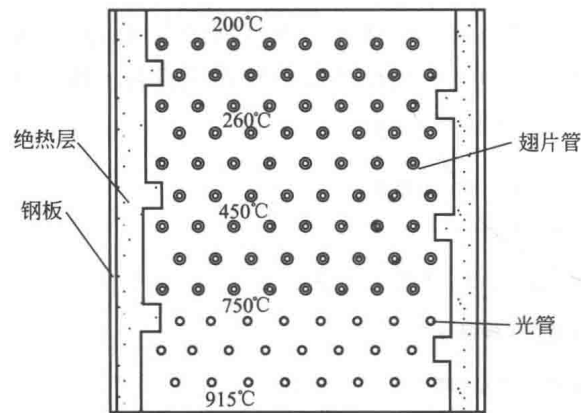


图 1-4 方形对流段剖面

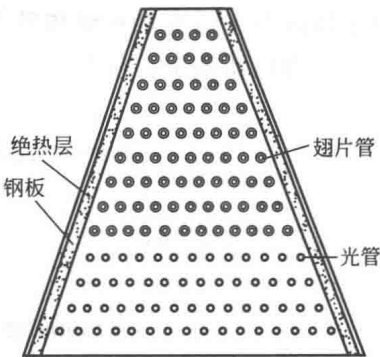


图 1-5 梯形对流段剖面

3. 辐射段

辐射段内沿炉膛内壁水平方向往复排列的管束是锅炉的蒸发受热面，如图 1-6 所示，用于吸收炉内高温火焰的辐射热，使进入管内的工质（水）产生蒸汽，相对应电站锅炉水冷壁的作用。

4. 过渡段

过渡段是连接辐射段和对流段的半圆形通道。如图 1-7 所示。

过渡段底部设有排污口，排出对流段吹灰时排放冲下的污水，以及其他原因造成的积水和积油等。

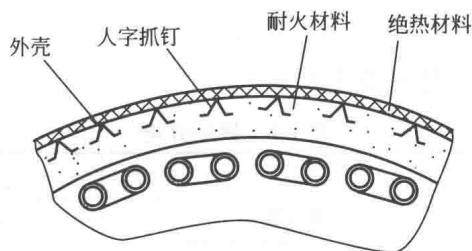


图 1-6 辐射段结构

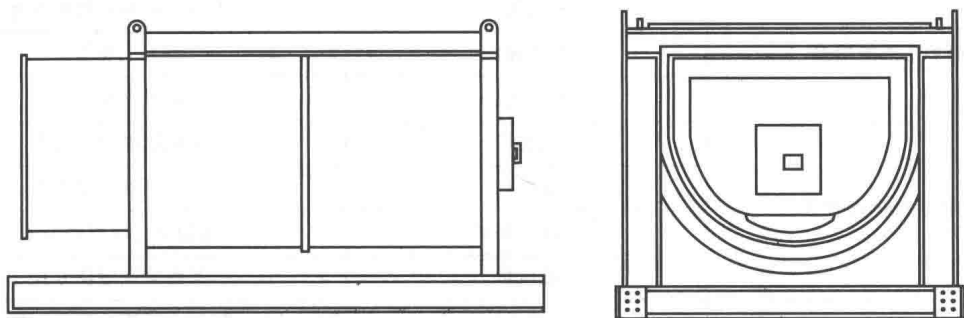


图 1-7 过渡段结构图

第三节 锅炉容量、参数及型号表示

一、锅炉容量和参数

1. 锅炉容量

额定蒸发量 (BRL-boiler rated load)：在额定压力、温度（出口蒸汽温度和给水温度），保证热效率时每小时连续最大的蒸汽产量，单位为 t/h（或 kg/s）

注：热水锅炉容量为单位时间的产热量（额定热功率），单位为 MW（或万大卡/时）

蒸汽锅炉的蒸发量与热功率之间的关系：

$$Q=0.000278D(i''_{sh}-i_{fw}) \tag{1-1}$$

式中 D ——锅炉蒸发量，t/h；

i''_{sh}, i_{fw} ——分别是蒸汽焓和给水焓，kJ/kg。

热水锅炉的热功率：

$$Q=0.000278G(i_{fw}-i_{hs}) \tag{1-2}$$

式中 G ——锅炉供水量，t/h；

i_{fw}, i_{hs} ——分别是供水焓和回水焓，kJ/kg。

2. 锅炉参数

蒸汽压力和温度：指过热器主汽阀出口处的过热蒸汽压力和温度；对无过热器，指主汽阀出口处的饱和蒸汽压力和温度。

给水温度：指进省煤器的给水温度；无省煤器的，指进汽包的水的温度。

对于生产饱和蒸汽的锅炉，蒸汽的温度和压力存在一一对应的关系；其他锅炉，不存在。

二、锅炉的分类

锅炉分类方法多种多样，详见表 1-1。

表 1-1 锅炉分类

分类方式	锅炉类型	简要说明
按出口工质物态	蒸汽锅炉	锅炉出口工质为蒸汽
	热水锅炉	锅炉出口工质为热水
	有机热载体炉	有机热载体(导热油)
锅炉工质按用途	电站锅炉	发电厂带动汽轮机发电
	工业锅炉	用于工业生产
	生活锅炉	用于日常生活
按锅炉的燃烧方式	层燃炉	采用层燃燃烧方式
	室燃炉	采用悬浮燃烧方式
	流化床锅炉	采用流化床燃烧方式
	旋风炉	采用旋风燃烧方式
按燃料的种类	燃煤锅炉	锅炉中使用的燃料为煤
	燃油锅炉	锅炉中使用的燃料为燃油
	燃气锅炉	锅炉中使用的燃料为燃气
	其他燃料	木材、垃圾
按工质循环方式	自然循环锅炉	利用不受热的下降管与受热上升管之间的工质密度差使工质在一封闭的系统中产生循环流动
	控制循环	主要依靠锅水循环泵的压头进行循环
	直流锅炉	给水靠给水泵的压头,依次通过锅炉各受热面产生蒸汽,无汽包
按燃烧室内的压力	负压燃烧锅炉	炉膛出口烟气静压小于大气压力
	压力(和微正压)燃烧锅炉	炉膛出口烟气静压大于大气压力
按排渣方式	固态排渣锅炉	燃料燃烧后生成的灰渣呈固态排除
	液态排渣锅炉	燃料燃烧后生成的灰渣呈液态从渣口流出
按锅炉的蒸汽压力	低压锅炉	不大于 2.45MPa
	中压锅炉	2.94~4.92MPa
	高压锅炉	7.84~10.8MPa
	超高压锅炉	11.8~14.7MPa
	亚临界锅炉	15.7~19.6MPa
	超临界锅炉	绝对压力超过临界压力 22.1MPa

三、锅炉的型号表示方法

1. 工业锅炉的型号表示方法

锅炉型号由三部分组成，各部分之间用短横线相连，如图 1-8 和图 1-9 所示。

第一部分：表示锅炉型号（表 1-2）、燃烧方式（表 1-3）和蒸发量（t/h）（热水锅炉为供热量，MW）

第二部分：表示蒸汽（或热水）参数，共分两段，中间以斜线分开。分额定蒸汽压力和额定蒸汽温度两段。若蒸汽为饱和蒸汽，则无斜线和第二段。若为热水锅炉，第二部分分三段，分别为额定压力、出水温度和进水温度。

第三部分：表示燃料种类（表 1-4）和设计次序（用阿拉伯数字表示）。原型设计无需写设计次序。

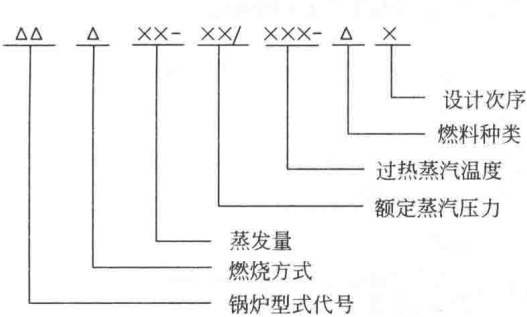


图 1-8 工业蒸汽锅炉型号表示

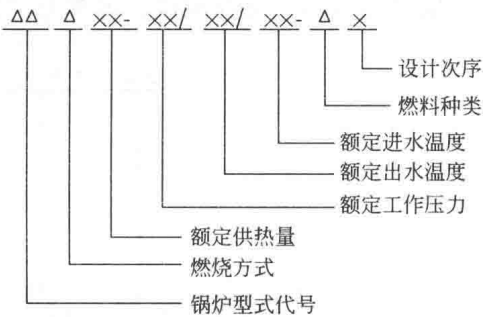


图 1-9 热水锅炉型号表示

[举例] SHL10-1.3-AⅡ：双锅筒横置式链条炉排锅炉；额定蒸发量为 10t/h；额定蒸汽压力为 1.3MPa；出口为饱和蒸汽；燃用Ⅱ类烟煤。

QXS120-0.8/130/80-Y：强制循环室燃热水锅炉；额定热功率为 120MW；允许工作压力为 0.8MPa；出水温度 130℃；进水温度为 80℃；燃料为油。

表 1-2 工业锅炉型式代号

锅炉型式	代号	锅炉型式	代号
立式水管	LS(立,水)	单锅筒横置式	DH(单,横)
立式火管	LH(立,火)	双锅筒纵置式	SZ(双,纵)
卧式内燃	WN(卧,内)	双锅筒横置式	SH(双,横)
单锅筒立式	DL(单,立)	纵横锅筒式	ZH(纵,横)
单锅筒纵置式	DZ(单,纵)	强制循环式	QX(强,循)

表 1-3 燃烧方式代号

燃烧方式	代号	燃烧方式	代号
固定炉排	G(固)	下饲炉排	A(下)
活动手摇炉排	H(活)	往复推饲炉排	W(往)
链条炉排	L(链)	沸腾炉	F(沸)
抛煤机	P(抛)	半沸腾炉	B(半)
倒转炉排加抛煤机	D(倒)	室燃炉	S(室)
振动炉排	Z(振)	旋风炉	X(旋)

表 1-4 燃料种类代号

燃烧种类	代号	燃烧种类	代号
无烟煤	W(无)	气	Q(气)
贫煤	P(贫)	木柴	M(木)

续表

燃烧种类	代号	燃烧种类	代号
烟煤	A(烟)	稻壳	D(稻)
劣质烟煤	L(劣)	甘蔗渣	G(甘)
褐煤	H(褐)	煤矸石	S(煤)
油	Y(油)	油页岩	YM(油母)

2. 电厂锅炉的型号表示方法

锅炉型号由三部分组成，各部分之间用短横线相连，如图 1-10 所示。

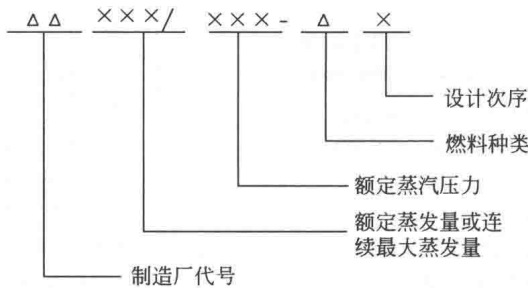


图 1-10 电厂锅炉型号表示

- 第一部分：表示锅炉制造厂家，制造厂代号，如表 1-5 所示。
 - 第二部分：表示锅炉参数，额定蒸发量（或最大连续蒸发量）和额定蒸汽压力。
 - 第三部分：表示设计燃料代号及设计次序，如表 1-6 所示。
- 例如，HG-2008/18.2-1 型锅炉，表示由哈尔滨锅炉厂制造，额定蒸发量为 2008t/h，过热蒸汽压力为 18.2MPa，第一次设计。

表 1-5 某些电站锅炉制造厂代号

锅炉制造厂名	代号	锅炉制造厂名	代号
北京锅炉厂	BG(固)	上海锅炉厂	SG
东方锅炉厂	DG	无锡锅炉厂	UG
哈尔滨锅炉厂	HG	武汉锅炉厂	WG
杭州锅炉厂	NG	济南锅炉厂	YG

表 1-6 设计燃料代号

设计燃料	代号	锅炉制造厂名	代号
燃煤	M	燃其他燃料	T
燃油	Y	可燃煤和油	MY
燃气	Q	可燃油和气	YQ

3. 注汽锅炉的型号表示方法

注汽锅炉的型号表示方法较多，这里通过几个例子说明注汽锅炉常见的表示方法。

① SG20-NDST-26，SG50-NDS-20 型锅炉。表示内容如下。

- SG——蒸汽发生器；
- 20，50——锅炉的输出热量，10⁶BTU/h（百万英热单位/h，1BTU/h=0.29307W）；
- N——燃烧器类型（北美）；

D——燃料种类，表示油气双重；

X, S——自动化程度；

T——表示拖车式（无 T 为撬座式）；

20, 26——表示工作压力为 2000Psi、2600Psi（磅力每平方英寸=6894.76Pa）。

② YZF-50-17-P 型锅炉。表示内容如下。

YZF——油田专用注汽锅炉（生产湿蒸汽）；

50——锅炉的输出热量， 10^6 BTU/h（百万英热单位/h，1BTU/h=0.29307W）；

17——锅炉蒸汽出口压力 17MPa。

③ YZG-22.5/17.2-D（G）型锅炉。表示内容如下。

YZG——油田专用注汽锅炉（生产过热蒸汽）；

22.5——锅炉蒸发量，t/h；

17.2——锅炉蒸汽出口压力，MPa；

D, G——分别表示燃料类型双燃料和天然气。

第四节 油田注汽锅炉的节能技术研究进展

影响锅炉热效率的主要因素是锅炉热损失。在锅炉六大热损失中主要有三种热损失，即排烟热损失、不完全燃烧热损失和锅炉散热损失。根据锅炉能耗特点，再针对三种主要热损失，从不同角度进行节能分析，降低这三部分热损失，才能有效提高锅炉的热效率。

一、从燃烧学角度

从燃烧学角度而言，提高锅炉热效率的基本原则就是采取措施改善燃烧效果，如强化燃油雾化、合理配风，使燃料与空气充分混合，避免或减少燃料在高温条件下生成炭黑和重质碳氢化合物。

1. 优化燃料结构改燃油为燃气

1997 年陕甘宁地区的天然气历经 860 多千米进京，标志着我国开始大力发展天然气事业。限于当前我国能源结构和生产能力，工业生产用能源多是煤，石油石化企业用能源也以煤、石油为主。经济性上使用煤的成本比石油低，石油的成本比天然气低，但是就节约性和低碳性而言，石油和天然气远比用煤节省。采用天然气替代煤、石油作为工业能源具有美好前景。对原有注汽锅炉进行系统结构改造，改燃煤、燃油为燃气。采用燃气装置后，可大大提高锅炉炉膛燃烧温度，而且安全性能和自动化技术程度高、运行成本低、维修方便、易操作。最大优点是采用燃气方式后，燃料不完全燃烧几乎可以忽略，无污水排放，烟气排放量相对燃油降低幅度可达 25%。

2. 优化燃烧方式采用富氧燃烧

提高煤、石油燃料的燃烧效率通常需要考虑两个方面因素，要有适当过量的空气及燃料与空气要充分混合。富氧燃烧技术（简称 OEC）即是利用高氧含量空气做助燃剂提高燃烧效率的。富氧燃烧技术主要特点如下。

（1）燃烧速率加快，火焰温度、强度提高，优化了传热效果。富氧助燃火焰强度增加，燃烧剧烈，不仅增强传热，而且使燃烧更为完全，消除黑烟产生，同时减少了污染物排放。

（2）降低燃点。燃料的燃点不是一个常数。例如，一氧化碳在空气中燃点为 609℃，氧