

清华大学能源动力系列教材

热能工程基础

Fundamental of Thermal Engineering

李清海 张衍国 编著
Li Qinghai Zhang Yanguo



清华大学出版社

清华大学能源动力系列教材

热能工程基础

Fundamental of Thermal Engineering

李清海 张衍国 编著
Li Qinghai Zhang Yanguo

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书基于课堂教学和工程实践,介绍了热能工程领域锅炉的基本构成和设计原则,包括燃烧设备、锅炉部件、热力计算、烟风阻力计算、锅内过程与安全、锅炉应用等方面的基础知识以及一些概念的诠释。为读者提供了一个系统的关于锅炉的历史、发展、基本原理、设计准则等方面的认识。每一章后均附有思考题和习题,书后附有参考答案,便于教学中掌握要点和读者自学,从而更好地了解锅炉原理、设计、运行和应用等。

本书可作为高等学校能源动力类专业高年级本科生的教材,也可供能源利用等领域相关专业工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

热能工程基础/李清海,张衍国编著. —北京:清华大学出版社,2016
(清华大学能源动力系列教材)
ISBN 978-7-302-45461-8

I. ①热… II. ①李… ②张… III. ①热能—教材 IV. ①TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274724 号

责任编辑:袁琦
封面设计:常雪影
责任校对:刘玉霞
责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:26

字 数:627千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:58.00元

产品编号:054121-01

前言

FOR E W O R D

进入 21 世纪,人类对能源的需求和利用已经达到一个新的阶段,人们日常的衣食住行以及国民经济的各行各业都已离不开由化石能源转化而成的蒸汽、热水等热能的综合利用。

为了适应宽口径教学的需求,兼顾从热能设备基本原理到工程应用的过渡,本书系统整合了锅炉原理、燃料与燃烧概论、燃烧理论与燃烧设备、炉内传热、锅炉设备水动力学等课程内容,为读者提供一个系统的关于锅炉的历史、发展、基本原理、设计准则等方面的基本认识,扩展读者的知识面。

本书构建了一个新的视角来阐述锅炉原理和设备,即以燃料燃烧特性、燃烧设备特点、受热面布置、热力计算、烟风计算、锅内安全、锅炉应用为坐标横轴,以电站、工业、燃煤、燃油、燃气、大中小型锅炉等为坐标纵轴,纵横交叉系统,全面介绍锅炉的构成和设计原则。本书主要介绍了煤粉锅炉、层燃锅炉、循环流化床锅炉、WNS 燃油燃气锅炉,同时也介绍了余热锅炉、有机热载体炉和热风炉等。还以专题的形式,为读者呈现了关于锅炉应用、运行、安全等方面的内容。每一章后均附有思考题和习题,便于教学中掌握要点,也便于读者自学。当然,这种尝试也存在一些不足,例如同一部分内容过多,甚至变得有些凌乱,有些描述也不够严谨。此外,限于篇幅,有些内容介绍不够系统,等等,还请读者见谅。

本书由清华大学李清海和张衍国等编写,李清海编写了第 2 章、第 3 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章第 1~3 节、附录 A 和附录 B,张衍国编写了第 1 章、第 4 章、第 5 章以及第 8 章锅炉发展趋势部分,杭州伯勒计算机技术有限公司侯士杰参与编写了附录 A,向杰参与了校稿,全书由李清海统稿。

在本书编写过程中,得到了清华大学热能系佟会玲、杨瑞昌、吕俊复等老师的大力支持,在此向他们表示由衷的感谢。本书引用了一些书籍中的图、表等,在文中均注明了引用来源,也引用了一些锅炉厂或其他公司近期产品的图纸和资料,在此谨致以诚挚的谢意。本书还获得了“清华大学教学改革项目”资助。

根据作者的专业实践,本书融入了作者的一些经验和见解。限于作者水平,书中难免有粗疏错漏之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2016 年 12 月于清华园

主要符号表

- a 拱的长度, m; 份额; 黑度; 分配系数
- A 灰分, %; 面积, m^2 ; 吸收率
- b 宽度, mm; 当地大气压
- B 燃料消耗量, kg/s
- Bo 玻耳兹曼准则数
- c 质量热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; 体积热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$
- C 修正系数
- d 空气中水蒸气含量, g/Nm^3 干空气; 直径, 粒径, m
- D 煤样通过标准筛百分比, %; 蒸汽流量, 出力, kg/s (或 t/h); 厚度, m
- DT 变形温度, $^\circ C$
- E 恩氏黏度, $^\circ E$; 活化能, kJ/mol ; 能量; 炉排面上各通风间隙截面积和, m^2
- F 炉膛截面积, m^2
- f 通风截面比, %
- FT 流动温度, $^\circ C$
- FC 固定碳质量分数, %
- g 重力加速度, m/s^2
- G 飞灰质量分数, kg/kg 燃料; 每千克燃料消耗的蒸汽量, kg/kg 燃料; 质量流量, kg/s ; 质量流率, $kg/(m^2 \cdot s)$
- h 高度, m; 换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 压力, Pa
- H 传热面积, m^2
- i 工质焓值, kJ/kg
- I 焓值, kJ/kg 燃料
- k 阿累尼乌斯系数; 化学反应速率, $g/(cm^2 \cdot s)$; 碳酸盐分解系数; 火焰辐射减弱系数, $(m \cdot MPa)^{-1}$
- K 当量碳, %; 可磨度; 传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 积灰导致的阻力修正系数; 循环倍率; 机械携带系数; 碳或者氧的消耗速率, $g/(cm^2 \cdot s)$
- K_m 选择性携带系数, %
- l 长度, m
- L 每千克燃料燃烧所需要的空气质量, kg/kg 燃料; 火焰长度, m
- m 质量, kg
- M 水分质量分数, %; 计算无因次炉膛温度的系数
- n 转速, r/min
- N 功率, kW
- Nu 努塞尔数

- p 压力, Pa; 排污率, %
- Pr 普朗特数
- q 热量百分比, %; 热流密度, 面积热负荷, kW/m^2 ; 容积热负荷, kW/m^3 ; 流量, m^3/s ;
氧扩散速率, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; 配风量
- Q 热量, kJ; 热值, kJ/kg
- r 份额; 半径, m
- R 气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 在标准筛上煤样残留百分比, %; 炉排总面积, m^2
- Re 雷诺数
- s 管束节距, m; 有效辐射层厚度, m
- S 熵, kJ/C ; 含盐量, mg/kg
- ST 软化温度, C
- S_m 谢苗诺夫准则数
- t 温度, C
- T 热力学温度, K
- u 速度, m/s
- U 气流冲刷的周界长度, m
- v 比体积, m^3/kg
- V 挥发组分质量分数, %; 燃料燃烧需要的空气体积, m^3/kg ; 燃料燃烧产生的烟气体积, m^3/kg ; 燃料燃烧产生的气体体积, m^3/kg ; 体积流量, m^3/s ; 容积, m^3
- \overline{VC} 以每千克燃料为基准的烟气平均热容量, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C})$
- W 功, J
- x 水冷壁角系数; 角系数(与角系数 φ 相同); 水冷系数; 份额; 质量含气率
- Z 管排数
- α 烟气侧过量空气系数; 倾角, ($^\circ$); 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$
- α_D 传质系数, cm/s
- β 空气侧过量空气系数; 备用系数; 管子外径和内径之比
- χ 水冷壁的平均有效角系数(水冷系数)
- θ 烟气温度, C
- Θ 无因次温度
- μ 烟气中飞灰质量分数; 均流系数
- ν 运动黏度, cm^2/s ; 化学反应速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
- η 效率, %
- ω 流速, m/s ; 炉排片冷却度; 湿度, %
- τ 时间, s
- ϕ 份额; 保热系数
- φ 角系数
- ψ 热有效系数; 温压修成系数
- ζ 灰污系数; 阻力损失系数
- ξ 利用系数

- σ 相对节距
 σ_0 黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 ρ 密度, kg/m^3
 ϵ 空隙率; 灰污系数, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{kW}$; 热阻, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{kW}$
 δ 覆盖率; 厚度, mm
 λ 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 沿程摩擦阻力系数
 Δ 差值符号

上标

- 0 理论
 ' 入口; 饱和水
 " 出口; 饱和蒸汽
 E 经济
 - 平均

下标

- 0 理论; 无穷远; 平均工况
 1 高温热源; 前; 一次风; 横向; 烟气侧
 2 低温热源; 后; 二次风; 纵向; 排烟; 工质侧
 3 气体
 4 固体
 5 冷却
 6 灰渣
 a 实际; 绝热; 加速; 空气
 ad 空气干燥基
 ar 收到基
 as 附加
 b 炉壁; 壁面; 水冷壁
 bq 饱和蒸汽
 by 壁面有效
 bz 标准
 c 对流; 颗粒团; 换算值; 侧管; 错列
 ck 出口
 ch 传热
 crit 临界
 d 干基; 分散相; 对流; 大; 管径
 D 扩散
 daf 干燥无灰
 dl 当量
 dmmf 干燥无矿物质基
 dis 分散相

- f 炉膛; 火焰; 辐射
- fh 飞灰
- fl 分流
- F 燃料; 摩擦
- g 气相; 重力; 固体; 锅水
- gb 管壁
- gd 给定
- gl 锅炉
- gk 干空气
- gq 过热蒸汽
- gr 高位; 过热
- gs 给水; 管束
- gt 固体; 锅筒
- gy 干烟气
- gz 管束; 管组
- h 灰污; 汽水混合物; 火焰(烟气)
- hb 灰壁; 火焰对水冷壁
- hl 汇流
- hq 混气
- HR 燃烧器区
- hy 火焰; 火焰有效
- hz 灰渣
- H₂O 水
- i 固有; 点火; 内在
- j 计算; 金属; 集流
- jb 局部
- jw 减温
- k 空气
- K 动力
- kl 颗粒
- km 可磨
- ky 空预器
- l 炉膛; 液相
- L 层燃
- lq 冷却
- lk 冷空气
- lm 漏煤
- lz 炉渣
- m 工质; 某种盐类

mf	煤粉
n	内
nb	内壁
net	低位
nl	逆流
nz	凝渣
o	外在; 有机
p	恒压
p	屏; 颗粒
pb	屏壁
ph	平衡
pc	煤粉
pj	平均
pw	排污
py	排烟
q	蒸汽; 气体
qb	炉墙对水冷壁
qt	气体
r	燃烧器; 入炉; 燃料; 辐射
rk	入口; 热空气
rq	燃气
rs	燃烧
R	护排
s	固体; 表面; 节距; 管束
sg	水垢
sh	顺列
sm	省煤
ss	上升
sy	试样
t	湍流; 终端; 温度
tp	两相
tsy	碳酸盐
T	总的
v	恒容
V	容积
w	壁面; 外; 温度; 水
wb	外壁
wr	外热
x	小; 引风

xj	下降
xt	系统
y	烟气
yc	沿程;引出
yx	有效
z	自生
zf	制粉;总辐射
zh	直管
zq	蒸汽
zr	再热
zs	折算
∞	无穷

本书单位用法说明

遵从行业习惯,本书使用一些非标准单位制单位,说明如下。

符 号	说 明
Nm^3	标准状态(101.325kPa, 0℃)条件下,气体体积单位
MW _{th}	电力行业常用功率单位,th表示发热功率
MW _e	电力行业常用功率单位,e表示发电功率
MPa _G	压力单位,G表示表压,以示和绝对压力的区别
MPa _A	压力单位,A表示绝对压力,以示和表压的区别
/kg 燃料	在锅炉设计中,热量、烟气量、空气量等通常折算到每千克燃料

锅炉设计计算中一些符号的用法说明

行业习惯上,C、H、O、N、S、Cl等元素符号在锅炉设计计算中直接用来分别表示碳、氢、氧、氮、硫和氯元素在燃料中的质量百分数;Al₂O₃、SiO₂等分子式在锅炉设计计算中用来分别表示三氧化二铝、二氧化硅等在灰中的质量百分数;O₂、N₂、H₂、CO、CO₂、H₂O、R₂O等在计算中用来表示氧气、氮气、氢气、一氧化碳、二氧化碳、水蒸气、三原子气体等在烟气或者空气中的体积百分数。

单位换算

$$1\text{atm}=101325\text{Pa}$$

$$1\text{mmHg}=133.3\text{Pa}$$

$$1\text{kgf}=9.807\text{N}$$

$$1\text{lb}=0.4536\text{kg}$$

本书中凡涉及热量单位换算均采用国际蒸汽表卡 $1\text{cal}=4.187\text{J}$ 。

第 1 章 锅炉与能源利用	1
1.1 能源及其消耗现状	1
1.1.1 全球化石能源的储量	1
1.1.2 化石能源消耗状况	2
1.1.3 我国面临的能源挑战	2
1.2 锅炉发展简史	4
1.2.1 早期锅炉	4
1.2.2 现代锅炉	6
1.2.3 我国锅炉发展历程	8
1.3 锅炉的分类与系列	8
1.3.1 锅炉的分类	8
1.3.2 锅炉的系列和经济指标	12
1.4 锅炉的典型应用	14
1.4.1 民用供热	15
1.4.2 工业供热	15
1.4.3 热力发电	16
1.5 阅读本书可能的收获	19
思考题和习题	20
参考文献	20
第 2 章 燃料与燃烧	22
2.1 燃料	22
2.1.1 气体燃料	22
2.1.2 液体燃料	24
2.1.3 固体燃料	25
2.1.4 燃料的成分	27
2.2 燃料的成分分析基础和换算	30
2.2.1 燃料的成分分析基础	30
2.2.2 煤的工业分析	31
2.2.3 成分基础换算	33
2.2.4 发热量及其换算	34
2.3 燃料燃烧的空气量	36
2.3.1 燃料燃烧的理论空气量	36
2.3.2 燃料燃烧的实际空气量	38

2.4	燃料燃烧的产物	39
2.4.1	燃烧产物的理论体积	39
2.4.2	燃烧产物的实际体积	40
2.4.3	烟气成分与过量空气系数测试	41
2.5	焓温表	43
2.5.1	燃烧产物的焓	43
2.5.2	焓温表编制	45
	本章结语	48
	思考题和习题	48
	参考文献	49
第3章	燃料燃烧与设备	51
3.1	燃烧过程的化学反应原理	51
3.1.1	燃烧化学反应速率	51
3.1.2	燃烧形式的分类	52
3.2	流体燃料燃烧	53
3.2.1	气体燃料燃烧原理	53
3.2.2	气体燃料的燃烧设备	58
3.2.3	液体燃料燃烧原理	59
3.2.4	液体燃料的燃烧设备	61
3.3	固体燃料燃烧	64
3.3.1	固体燃料燃烧气体动力学分类	64
3.3.2	固体燃料燃烧机理	67
3.4	火室燃烧及设备	73
3.4.1	煤粉的制备及系统	73
3.4.2	煤粉在燃烧设备中燃烧	80
3.4.3	煤粉燃烧器	83
3.5	层燃设备	99
3.5.1	炉排	99
3.5.2	炉拱和二次风	103
3.5.3	燃料特性对层燃的影响	105
3.6	循环流化床燃烧设备	107
3.6.1	循环流化床的发展与特点	107
3.6.2	循环流化床基本原理	110
3.6.3	循环流化床内物料流动	111
3.6.4	循环流化床燃烧	112
专题1	废弃物的燃烧原理与设备	114
	本章结语	118

思考题和习题	118
参考文献	120
第 4 章 锅炉燃烧部件与受热面布置	122
4.1 锅炉及其系统的主要部件概述	122
4.1.1 锅炉本体主要部件	122
4.1.2 锅炉辅助装置	124
4.2 锅炉受热面整体布置	126
4.2.1 锅炉受热面布置的要求	126
4.2.2 烟气侧流程	127
4.2.3 工质侧流程	127
4.2.4 蒸汽参数影响锅炉循环方式及受热面布置	128
4.2.5 锅炉热力系统的选择	133
4.3 燃烧方式选择与燃烧设备布置	135
4.3.1 煤粉炉总体布局及燃烧设备布置	136
4.3.2 层燃锅炉整体布置与燃烧设备布置	145
4.3.3 循环流化床锅炉的燃烧设备	147
4.3.4 油气锅炉设备与布置	151
4.4 受热面的结构和布置	157
4.4.1 水冷壁	157
4.4.2 锅炉管束和凝渣管	159
4.4.3 过热器	159
4.4.4 再热器	166
专题 2 过热器和再热器汽温的调节	168
4.4.5 省煤器	175
4.4.6 空气预热器	178
专题 3 受热面磨损与腐蚀的工艺考虑	183
本章结语	188
思考题和习题	188
参考文献	189
第 5 章 锅炉设计与热力计算	191
5.1 锅炉热平衡	191
5.1.1 正平衡效率	192
5.1.2 反平衡效率	193
5.1.3 锅炉效率估算	197
5.1.4 锅炉热效率限定值	198
5.2 室燃炉炉膛结构与传热计算	198

5.2.1	炉膛容积热负荷和截面热负荷	200
5.2.2	煤粉炉炉膛结构设计	203
5.2.3	煤粉炉炉膛传热计算	205
5.2.4	炉内传热相似理论解法	208
5.2.5	燃油、气锅炉的炉膛结构与传热计算	211
专题 4	锅炉设计的一些系数的选取和计算	213
5.3	层燃炉炉膛结构与传热计算	217
5.3.1	层燃炉的炉膛结构设计	217
5.3.2	层燃炉炉膛传热计算	218
5.4	循环床炉膛结构与传热计算	222
5.4.1	循环床炉膛结构设计	222
5.4.2	循环床炉膛传热计算	224
专题 5	炉膛出口烟温	226
5.5	对流受热面的设计与传热计算	227
5.5.1	对流受热面的结构	227
5.5.2	基本传热方程	232
5.5.3	换热系数的计算	239
5.6	锅炉设计和热力计算的基本步骤	245
5.6.1	设计计算与校核计算	245
5.6.2	热力计算的基本步骤	246
专题 6	煤粉锅炉燃烧调整	251
	本章结语	253
	思考题和习题	253
	参考文献	256
第 6 章	锅炉烟风阻力计算与风机选用	258
6.1	概述	258
6.1.1	烟风阻力计算的目的	258
6.1.2	烟风阻力计算的原则和方法	259
6.2	锅炉烟风道的流阻计算	259
6.2.1	沿程摩擦阻力	260
6.2.2	局部流阻计算	260
6.3	锅炉受热面的流阻计算	262
6.3.1	气流横向冲刷光管管束	263
6.3.2	管式空气预热器的阻力计算	264
6.3.3	回转式空气预热器的阻力计算	265
6.4	自生通风力计算	266
6.5	风机的选择与调节	267

6.5.1	风机的选择	267
6.5.2	风机的调节	270
专题 7	炉膛外爆与内爆	273
	本章结语	274
	思考题和习题	274
	参考文献	275
第 7 章	锅内工质流动、传热与安全	276
7.1	锅炉水循环的方式	276
7.1.1	自然循环	276
7.1.2	强制循环	278
7.1.3	直流型式	281
7.1.4	复合循环	283
7.2	自然循环回路内的水循环及计算	284
7.2.1	自然循环回路	284
7.2.2	自然循环的水循环计算	284
7.3	自然循环锅炉蒸汽品质的净化	288
7.3.1	蒸汽中杂质的来源及危害	288
7.3.2	排污及锅水品质	290
7.3.3	蒸汽净化的措施	293
专题 8	锅筒内的水位与安全	297
7.4	锅内工质的传热	299
7.4.1	流动的流型	299
7.4.2	锅内传热	301
7.5	流动、传热安全问题及其对策	304
7.5.1	流动过程安全问题及对策	304
7.5.2	传热过程的安全及对策	307
	本章结语	310
	思考题和习题	310
	参考文献	310
第 8 章	其他类型锅炉和应用	312
8.1	余热锅炉	312
8.1.1	余热利用	312
8.1.2	余热锅炉应用案例	315
8.1.3	余热锅炉设计及结构	318
8.2	有机热载体炉	323
8.2.1	有机热载体炉发展简述	323

8.2.2	有机热载体炉的基本原理及分类	323
8.2.3	有机热载体炉的结构	324
8.2.4	有机热载体炉的工作系统	330
8.3	热风炉	333
8.3.1	热风炉分类	333
8.3.2	热风炉的特性	333
8.3.3	几种热风炉介绍	336
	结语: 锅炉的发展趋势	339
	思考题和习题	340
	参考文献	341
附录 A	锅炉热力计算的软件实现	342
A.1	计算机算法的基本方法和步骤	342
A.2	传统计算使用的图表的处理	343
A.3	工业锅炉设计计算软件 B-BDCs	343
A.4	热力计算程序	344
A.4.1	热力计算基本方法	344
A.4.2	软件使用基本过程	344
A.4.3	项目参数设置	345
A.4.4	燃料参数设置	346
A.4.5	热平衡参数设置	346
A.4.6	锅炉模型构造	346
A.4.7	输入部件数据	347
A.4.8	进行热力计算	347
A.4.9	查看初步计算书	347
A.4.10	烟气焓温特性表	348
A.4.11	计算结果汇总表	348
A.4.12	输出正式计算书	349
A.5	计算过程软件实现方法	349
A.5.1	锅炉模型构造	350
A.5.2	部件参数输入	351
A.5.3	参数设置	352
A.5.4	部件的计算	353
A.5.5	部件参数输出	355
A.5.6	文件存储	356
A.5.7	图表处理和 Excel 导出	356
A.6	热力计算框图汇总	357
A.6.1	热力计算总框图(图 A.18)	357

A. 6. 2	燃料计算总框图(图 A. 19)	357
A. 6. 3	热平衡计算总框图(图 A. 20)	358
A. 6. 4	炉膛热力计算框图(图 A. 21)	358
A. 6. 5	对流受热面热力计算框图(图 A. 22)	359
A. 6. 6	空预器热力计算框图(图 A. 23)	359
A. 7	130t/h 煤粉炉计算示例	360
A. 8	习题	372
	参考文献	373
附录 B	思考题和习题参考答案要点	374
后记	395