

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GUOLU YUANLI TONGBU DAOXUE

# 锅炉原理同步导学

王世昌 编著



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GUOLU YUANLI TONGBU DAOXUE

# 锅炉原理同步导学

编 著 王世昌  
主 审 樊泉桂

工业学院图书馆  
藏书章



中国电力出版社

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

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书的体系参照了樊泉桂主编的《普通高等教育“十一五”国家级规划教材 锅炉原理》。

本书共 16 章,其中炉内过程 5 章、锅内过程 3 章、热力计算 2 章、水循环 2 章、总体布置 2 章、锅炉运行调节 2 章。本书对每一章内容进行了知识体系、重点、难点、关键词的归纳与整理,并配套编写了相关章节的例题、思考题、习题、复习题共约 650 余道,并提供了相应的参考答案。

本书可作为普通高等院校本科热能动力工程专业“锅炉原理”专业课的同步学习辅导教材,是“锅炉原理”课程的延伸阅读资料,也可作为硕士研究生入学考试复习资料,还可供热能动力工程领域从事设计、制造、运行、调试的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉原理同步导学/王世昌编著. —北京:中国电力出版社,  
2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8958 - 5

I. 锅… II. 王… III. 锅炉—高等学校—教学参考资料  
IV. TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 096186 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 408 千字

定价 28.00 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

“锅炉原理”是本科热能动力工程专业的必修专业课之一，也是众多院校热能动力工程或者热能工程专业硕士生入学考试的必考科目之一。学习“锅炉原理”需要将工程热力学、传热学、工程流体力学、高等数学、材料力学等先修课程的内容进行综合应用，其特点是概念繁多、系统复杂。本书为樊泉桂主编《普通高等教育“十一五”国家级规划教材 锅炉原理》（以下简称《锅炉原理》）的同步辅导教材。目的在于使本科生在听课的基础上，通过必要的练习，尽量系统、全面、准确地掌握“锅炉原理”的知识体系，掌握初步分析问题和解决问题的能力。

《锅炉原理》逻辑严谨、表达流畅、内容新颖。该书在原理方面重点介绍了亚临界压力锅炉、超临界压力锅炉、低倍率循环锅炉、复合循环锅炉；在结构方面重点介绍了水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器、磨煤机、制粉系统、燃烧器等内容；在性能方面重点介绍了汽包锅炉、直流锅炉的汽温特性与调节方法；在计算方面重点介绍了锅炉的热力计算、水动力计算等内容。

与《锅炉原理》相对应，本导学教材分为16章。每一章的结构包括知识体系、重点、难点、关键词、相关章节的关键词、例题、思考题、习题、复习题。为了便于理解，思考题和习题的编号前两位是和《锅炉原理》的章节相对应的，由于解决问题的方法并不限于一种，本书提供的例题、思考题、习题、复习题参考答案是众多答案中的一种，欢迎读者对本书内容提出意见和建议。

本书由樊泉桂教授主审，在本书的编写过程中，得到了阎维平、闫顺林、王军、李斌等老师的大力帮助，在此深表感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在不足之处，欢迎读者批评指正。

E-mail: wangsc@ncepu.edu.cn

华北电力大学（102206，北京 昌平 朱辛庄）

能源与动力工程学院 热能动力工程教研室

王世昌

2009年7月

## 目 录

## 前言

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第一章 概述             | 1  |
| 知识体系               | 1  |
| 重点                 | 1  |
| 难点                 | 1  |
| 关键词                | 1  |
| 相关章节关键词            | 1  |
| 例题                 | 1  |
| 思考题                | 6  |
| 习题                 | 7  |
| 复习题                | 13 |
| 第二章 燃料及其燃烧特性       | 16 |
| 知识体系               | 16 |
| 重点                 | 16 |
| 难点                 | 16 |
| 关键词                | 16 |
| 相关章节关键词            | 16 |
| 例题                 | 16 |
| 思考题                | 19 |
| 习题                 | 20 |
| 复习题                | 31 |
| 第三章 燃料燃烧计算和锅炉机组热平衡 | 35 |
| 知识体系               | 35 |
| 重点                 | 35 |
| 难点                 | 35 |
| 关键词                | 35 |
| 相关章节关键词            | 35 |
| 例题                 | 35 |
| 思考题                | 42 |
| 习题                 | 42 |
| 复习题                | 54 |
| 第四章 煤粉制备及系统        | 57 |
| 知识体系               | 57 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 重点 .....                      | 57         |
| 难点 .....                      | 57         |
| 关键词 .....                     | 57         |
| 相关章节关键词 .....                 | 57         |
| 例题 .....                      | 57         |
| 思考题 .....                     | 61         |
| 习题 .....                      | 62         |
| 复习题 .....                     | 70         |
| <b>第五章 燃烧理论基础 .....</b>       | <b>73</b>  |
| 知识体系 .....                    | 73         |
| 重点 .....                      | 73         |
| 难点 .....                      | 73         |
| 关键词 .....                     | 73         |
| 相关章节关键词 .....                 | 73         |
| 例题 .....                      | 73         |
| 思考题 .....                     | 77         |
| 习题 .....                      | 78         |
| 复习题 .....                     | 86         |
| <b>第六章 燃烧设备和煤粉燃烧新技术 .....</b> | <b>89</b>  |
| 知识体系 .....                    | 89         |
| 重点 .....                      | 89         |
| 难点 .....                      | 89         |
| 关键词 .....                     | 89         |
| 相关章节关键词 .....                 | 89         |
| 例题 .....                      | 90         |
| 思考题 .....                     | 93         |
| 习题 .....                      | 95         |
| 复习题 .....                     | 102        |
| <b>第七章 过热器和再热器 .....</b>      | <b>104</b> |
| 知识体系 .....                    | 104        |
| 重点 .....                      | 104        |
| 难点 .....                      | 104        |
| 关键词 .....                     | 104        |
| 相关章节关键词 .....                 | 104        |
| 例题 .....                      | 104        |
| 思考题 .....                     | 107        |
| 习题 .....                      | 109        |
| 复习题 .....                     | 115        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第八章 省煤器和空气预热器</b>        | 118 |
| 知识体系                        | 118 |
| 重点                          | 118 |
| 难点                          | 118 |
| 关键词                         | 118 |
| 相关章节关键词                     | 118 |
| 例题                          | 118 |
| 思考题                         | 122 |
| 习题                          | 123 |
| 复习题                         | 130 |
| <b>第九章 锅炉炉膛换热计算</b>         | 132 |
| 知识体系                        | 132 |
| 重点                          | 132 |
| 难点                          | 132 |
| 关键词                         | 132 |
| 相关章节关键词                     | 132 |
| 例题                          | 132 |
| 思考题                         | 135 |
| 习题                          | 136 |
| 复习题                         | 146 |
| <b>第十章 对流受热面的换热计算</b>       | 149 |
| 知识体系                        | 149 |
| 重点                          | 149 |
| 难点                          | 149 |
| 关键词                         | 149 |
| 相关章节关键词                     | 149 |
| 例题                          | 149 |
| 思考题                         | 152 |
| 习题                          | 154 |
| 复习题                         | 162 |
| <b>第十一章 电站锅炉的受热面布置和优化设计</b> | 165 |
| 知识体系                        | 165 |
| 重点                          | 165 |
| 难点                          | 165 |
| 关键词                         | 165 |
| 相关章节关键词                     | 165 |
| 例题                          | 165 |
| 思考题                         | 168 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 习题                         | 169        |
| 复习题                        | 174        |
| <b>第十二章 自然循环蒸发系统及安全运行</b>  | <b>177</b> |
| 知识体系                       | 177        |
| 重点                         | 177        |
| 难点                         | 177        |
| 关键词                        | 177        |
| 相关章节关键词                    | 177        |
| 例题                         | 177        |
| 思考题                        | 179        |
| 习题                         | 180        |
| 复习题                        | 193        |
| <b>第十三章 强制流动锅炉</b>         | <b>196</b> |
| 知识体系                       | 196        |
| 重点                         | 196        |
| 难点                         | 196        |
| 关键词                        | 196        |
| 相关章节关键词                    | 196        |
| 例题                         | 196        |
| 思考题                        | 198        |
| 习题                         | 199        |
| 复习题                        | 215        |
| <b>第十四章 电站锅炉蒸汽品质及其污染防治</b> | <b>221</b> |
| 知识体系                       | 221        |
| 重点                         | 221        |
| 难点                         | 221        |
| 关键词                        | 221        |
| 相关章节关键词                    | 221        |
| 例题                         | 221        |
| 思考题                        | 223        |
| 习题                         | 224        |
| 复习题                        | 233        |
| <b>第十五章 电站锅炉的运行与调节</b>     | <b>235</b> |
| 知识体系                       | 235        |
| 重点                         | 235        |
| 难点                         | 235        |
| 关键词                        | 235        |
| 相关章节关键词                    | 235        |



|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 例题·····                     | 235        |
| 思考题·····                    | 238        |
| 习题·····                     | 239        |
| 复习题·····                    | 246        |
| <b>第十六章 锅炉动态特性</b> ·····    | <b>252</b> |
| 知识体系·····                   | 252        |
| 重点·····                     | 252        |
| 难点·····                     | 252        |
| 关键词·····                    | 252        |
| 相关章节关键词·····                | 252        |
| 例题·····                     | 252        |
| 思考题·····                    | 253        |
| 习题·····                     | 255        |
| 分析题·····                    | 257        |
| <b>附录 《锅炉原理》常用数据表</b> ····· | <b>259</b> |
| <b>参考文献</b> ·····           | <b>260</b> |

## 第一章 概 述



### 知识体系

- (1) 电站锅炉机组由锅炉本体和锅炉辅机组成，是火力发电厂的蒸汽发生装置。
- (2) 煤粉炉是电站锅炉的主要形式。
- (3) 目前国内的主力发电厂锅炉为亚临界和超临界参数锅炉。
- (4) 锅炉按照压力的分类体现了锅炉蒸汽参数变化对锅炉结构、容量设计带来的影响。
- (5) 锅炉的蒸发受热面分类体现了汽包锅炉、直流锅炉、低倍率锅炉、复合循环锅炉的受热面结构变化历程。



### 重 点

- (1) 锅炉的压力分类、蒸发受热面流动形式分类、燃烧方式分类。
- (2) 锅炉机组的工作原理和过程。



### 难 点

- (1) 直流锅炉可以用于一切压力。
- (2) 直流锅炉是超临界锅炉的唯一形式。
- (3) 再热器的布置方式与再热蒸汽温度调节的关系。



### 关键词

锅炉机组 直流锅炉 汽包锅炉 超临界压力锅炉 制粉系统  
煤粉燃烧器 给水泵 锅筒（汽包） 汽水分离器 本生点



### 相关章节关键词

送风机 引风机 循环泵 复合循环锅炉 脱硫脱硝装置  
除尘器 OFA

## 例 题

**【例题 1-1】** 简述燃煤电站锅炉机组的构成及工作原理。

答：(1) 电站锅炉机组的构成。电站锅炉由锅炉本体和锅炉辅机构成。锅炉本体包括：燃烧器、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器。锅炉辅机包括：给煤系统、制粉系统、除尘除灰系统、脱硫脱硝系统、送风引风系统、吹灰系统等。

(2) 电站锅炉机组的工作原理。

1) 原煤经过制粉系统破碎成粒径约  $60\sim 80\mu\text{m}$  的煤粉, 经过一次风、三次风喷嘴送入炉膛与二次风混合燃烧, 形成  $1500^{\circ}\text{C}$  左右的高温烟气。

2) 高温烟气依次经过炉膛水冷壁、屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温再热器、低温过热器、省煤器、空气预热器, 烟气与受热面换热降温, 约在  $120\sim 140^{\circ}\text{C}$  排出锅炉。

3) 冷空气经过空气预热器加热到  $80\sim 320^{\circ}\text{C}$ , 经过一次风管道、二次风道进入炉膛参与煤粉气流的燃烧反应。

4) 燃烧中形成的灰渣包括飞灰、沉降灰和炉底灰渣。

5) 烟气中的二氧化硫和氮氧化物被脱硫、脱硝装置脱除。

6) 燃煤电站锅炉机组由自动控制系统进行运行控制和管理, 汽温、汽压、水位等控制过程的自动化程度较高。

**【例题 1-2】** 计算 1 台  $1025\text{t/h}$  亚临界压力自然循环锅炉的年耗煤量、灰渣排放量。已知, 锅炉每年的运行小时数为  $6000\text{h}$ , 每小时耗煤  $128\text{t}$ , 煤的收到基灰分为  $A_{\text{ar}}=8\%$ 。

解: (1) 每年的煤耗量

$$B_{\text{a}} = 6000 \times 128 = 76.8 \times 10^4 (\text{t/a})$$

(2) 每年的灰渣 (飞灰、沉降灰、底渣之和) 排放量

$$M_{\text{hz}} = B_{\text{a}} \frac{A_{\text{ar}}}{100} = 76.8 \times 10^4 \times \frac{8}{100} = 6.144 \times 10^4 (\text{t/a})$$

计算结果分析与讨论:

(1) 燃煤锅炉是一种煤炭消耗量很大的发电设备。

(2) 1 台  $300\text{MW}$  机组每年排放的灰渣总量达到  $6.144$  万  $\text{t}$ , 应当对电厂燃煤锅炉排放的固体废弃物进行资源化利用, 以便降低对环境的污染。

**【例题 1-3】** 计算 1 台亚临界压力  $300\text{MW}$  机组 ( $1025\text{t/h}$  亚临界压力自然循环锅炉) 的供电煤耗 [每  $\text{kW} \cdot \text{h}$  消耗的标准煤,  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ] 并对计算结果进行分析和讨论。已知, 煤的收到基低位发热量  $Q_{\text{ar,net}}=21\,440\text{kJ/kg}$ , BRL 工况的燃煤消耗量  $B=125.11\text{t/h}$ 。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量为  $Q_{\text{s}}=29\,310\text{kJ/kg}$ ;

(2) 每小时的发电量  $P_{\text{e}}=300 \times 10^3 \text{kW} \cdot \text{h}$

(3) 每小时消耗的标准煤

$$B_{\text{s}} = \frac{Q_{\text{ar,net}}}{Q_{\text{s}}} \times 1000B = 91\,517 (\text{kg})$$

(4) 供电煤耗

$$g = \frac{1000B_{\text{s}}}{P_{\text{e}}} = 305 [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

计算结果分析与讨论:

(1) 目前全国的供电煤耗平均值大约为  $356\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 如果亚临界参数  $300\text{MW}$  机组工作在 BRL 工况, 其供电煤耗  $305\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  大大低于全国平均值, 运行  $300\text{MW}$  亚临界压力火电机组是经济的。

**【例题 1-4】** 计算 1 台亚临界压力  $600\text{MW}$  机组 ( $1913\text{t/h}$  超临界压力锅炉) 的供电煤耗, 并对计算结果进行分析和讨论。已知, 煤的收到基低位发热量  $Q_{\text{ar,net}}=21\,981\text{kJ/kg}$ , BRL 工况的燃煤消耗量  $B=243.12\text{t/h}$ 。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量  $Q_s = 29\,310\text{kJ/kg}$ ;

(2) 每小时的发电量  $P_e = 600 \times 10^3\text{kW} \cdot \text{h}$

(3) 每小时消耗的标准煤

$$B_s = \frac{Q_{ar,net}}{Q_s} \times 1000B = 182\,319(\text{kg})$$

(4) 供电煤耗

$$g = \frac{1000B_s}{P_e} = 304[\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

计算结果分析与讨论:

(1) 目前全国的供电煤耗平均值大约为  $356\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 如果超临界压力 600MW 机组工作在 BRL 工况, 其供电煤耗为  $304\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , 大大低于全国平均值, 因此, 运行 600MW 超临界压力火电机组是经济的。

(3) 超临界压力 600MW 火电机组的供电煤耗低于 300MW 亚临界压力火电机组的供电煤耗, 运行经济性更好。

**【例题 1-5】** 计算 1 台亚临界压力 1000MW 机组 (2953t/h 超临界压力锅炉) 的供电煤耗, 并对计算结果进行分析和讨论。已知, 煤的收到基低位发热量  $Q_{ar,net} = 22\,760\text{kJ/kg}$ , BRL 工况的燃煤消耗量  $B = 357\text{t/h}$ 。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量  $Q_s = 29\,310\text{kJ/kg}$ ;

(2) 每小时的发电量  $P_e = 600 \times 10^3\text{kW} \cdot \text{h}$ ;

(3) 每小时消耗的标准煤

$$B_s = \frac{Q_{ar,net}}{Q_s} \times 1000B = 277\,220(\text{kg})$$

(4) 供电标准煤耗率

$$b_s = \frac{1000B_s}{P_e} = 277[\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

计算结果分析与讨论:

(1) 目前全国的供电煤耗平均值大约为  $356\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 如果超临界压力 1000MW 机组工作在 BRL 工况, 其供电煤耗率为  $277\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , 大大低于全国平均值, 运行 1000MW 超临界压力火电机组是经济的。

(3) 供电煤耗的排序: 超临界压力 1000MW 火电机组供电煤耗率小于超临界压力 600MW 火电机组的供电煤耗率小于 300MW 亚临界压力火电机组的供电煤耗率。

**【例题 1-6】** 假定全国的火电装机容量为  $P = 6.2 \times 10^8\text{kW}$ , 年利用小时数为  $n = 5100\text{h}$ , 平均供电煤耗率  $b = 353\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , 燃煤平均发热量  $Q_{ar,net} = 21\,050\text{kJ/kg}$ 。燃煤的平均灰分含量  $A_{ar} = 11\%$ , 飞灰份额  $a_{fh} = 0.9$ 。计算全国每年排放的飞灰总量, 并对计算结果进行分析和讨论。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量  $Q_s = 29\,310\text{kJ/kg}$ ;

(2) 全国火电机组每年消耗的煤炭总量

$$B = Pnb \frac{Q_s}{Q_{ar,net}} \times 10^{-6} = 1.55 \times 10^9 (\text{t/a})$$

(3) 全国火电机组每年排放的灰渣总量

$$G_{\text{hz}} = B \frac{A_{\text{ar}}}{100} = 1.71 \times 10^8 (\text{t/a})$$

(4) 全国火电机组每年排放的飞总量

$$G_{\text{fh}} = G_{\text{hz}} a_{\text{fh}} = 1.539 \times 10^8 (\text{t/a})$$

计算结果分析与讨论:

(1) 全国每年的煤炭产量大约为 24 亿 t, 其中 15 亿 t 用于燃煤发电, 因此, 国内火电机组是中国煤炭的最大用户群。

(2) 全国火电机组每年排放的飞灰量约为 1.5 亿 t, 如果火电生产中的固体废弃物没有加以资源化利用, 将对全国的自然环境造成严重污染。因此, 必须强化飞灰回收利用的技术措施, 使电力生产成为循环经济的一部分。

**【例题 1-7】** 假定全国的火电机组飞灰排放量  $G_{\text{fh}} = 1.539 \times 10^8 \text{ t/a}$ , 静电除尘器的效率  $\eta = 99.8\%$ 。地球的直径  $d = 12\,732 \times 10^3 \text{ m}$ , 海平面的大气压  $p = 101\,325 \text{ Pa}$ 。重力加速度  $g = 9.806 \text{ m/s}^2$ 。计算全国每年排放的可吸入颗粒物总量, 并对计算结果进行分析和讨论。

解: (1) 全国火电机组每年排放的可吸入颗粒物总量

$$G_{\text{kx}} = G_{\text{fh}} (1 - \eta_{\text{ESP}}) = 307\,727 (\text{t/a})$$

(2) 大气的质量

$$G_{\text{air}} = \pi d^2 \frac{p}{1000g} = 5.262 \times 10^{15} (\text{t})$$

(3) 全国火电机组排放的可吸入颗粒物在大气中的质量浓度为

$$c_{\text{kx}} = \frac{G_{\text{kx}}}{G_{\text{air}}} = 5.848 \times 10^{-11} (\text{kg/kg})$$

计算结果分析与讨论:

(1) 全国每年的煤炭产量大约为 30 万 t, 在大气中的质量浓度约为  $5.848 \times 10^{-11} \text{ kg/kg}$ 。

(2) 可吸入颗粒物是一种对人体非常有害的固体物质, 可以通过呼吸系统被人体吸收。因此要加快火电厂除尘设备技术更新的步伐, 尽可能降低可吸入颗粒物的排放总量。

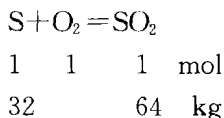
**【例题 1-8】** 假定全国的火电装机容量为  $P = 6.2 \times 10^8 \text{ kW}$ , 年利用小时数为  $n = 5100 \text{ h}$ , 平均供电煤耗为  $b = 353 \text{ g/(kW} \cdot \text{h)}$ , 燃煤平均发热量为  $Q_{\text{ar, net}} = 21\,050 \text{ kJ/kg}$ 。燃煤的平均含硫量为  $S_{\text{ar}} = 0.5\%$ 。计算全国火电机组的  $\text{SO}_2$  原始排放总量, 并对计算结果进行分析和讨论。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量为  $Q_s = 29\,310 (\text{kJ/kg})$

(2) 全国火电机组每年消耗的煤炭总量

$$B = Pnb \frac{Q_s}{Q_{\text{ar, net}}} \times 10^{-6} = 1.55 \times 10^9 (\text{t/a})$$

根据硫燃烧的化学方程式



可知, 1kg 硫燃烧生成 2kg 的  $\text{SO}_2$ 。

(3) 全国火电机组每年排放的  $\text{SO}_2$  总量

$$G_{\text{SO}_2} = B \frac{S_{\text{ar}}}{100} \times 2 = 2.176 \times 10^7 (\text{t/a})$$

计算结果分析与讨论:

(1) 1995 年, 全国火电机组排放的  $\text{SO}_2$  达到 2370 万 t, 本题的估算结果基本上接近这个数字。

(2) 由于全国大部分火电机组都安装了锅炉尾部烟气脱硫装置, 全国火电机组的  $\text{SO}_2$  实际年排放量大约在 200~300 万 t, 大大低于原始排放总量, 火电机组脱硫装置的运行对于治理环境, 净化空气有很大贡献。

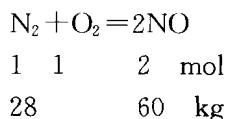
**【例题 1-9】** 假定全国的火电装机容量为  $P=6.2 \times 10^8 \text{ kW}$ , 年利用小时数为  $n=5100 \text{ h}$ , 平均供电煤耗为  $b=353 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , 燃煤平均发热量为  $Q_{\text{ar,net}}=21\,050 \text{ kJ/kg}$ 。燃煤的平均含氮量为  $N_{\text{ar}}=0.09\%$ 。计算全国火电机组的 NO 原始排放总量, 并对计算结果进行分析和讨论。

解: (1) 标准煤的收到基低位发热量为  $Q_s=29\,310 \text{ kJ/kg}$ ;

(2) 全国火电机组每年消耗的煤炭总量

$$B = Pnb \frac{Q_s}{Q_{\text{ar,net}}} \times 10^{-6} = 1.55 \times 10^9 (\text{t/a})$$

根据氮燃烧的化学方程式



可知, 1kg 硫燃烧生成  $60/28=2.14 \text{ kg}$  的 NO。

(3) 全国火电机组每年排放的 NO 总量

$$G_{\text{NO}} = B \frac{N_{\text{ar}}}{100} \times \frac{60}{28} = 2.997 \times 10^6 (\text{t/a})$$

计算结果分析与讨论:

(1) 全国火电机组 NO 原始排放量约为 300 万 t/a, 由于尾部烟气脱硝装置的运行, 实际 NO 原始排放量大约为 20~30 万 t/a, 大大低于原始排放总量。火电机组脱硝装置的运行对于治理环境, 净化空气有很大贡献。

(2) 脱硫、脱硝、除尘装置的运行, 会增加初投资和厂用电, 但这些技术措施是建设绿色电力工业的必备措施。

**【例题 1-10】** 分析降低火力发电厂供电煤耗和提高环保效果的技术措施。

答: (1) 提高蒸汽压力;

(2) 提高蒸汽温度;

(3) 提高蒸汽流量 (锅炉容量);

(4) 采用再热循环; 如果蒸汽压力足够高, 可以采用二次中间再热技术;

(5) 采用回热循环;

(6) 采用高效燃烧、低污染技术;

(7) 安装新型除尘、脱硫、脱硝装置;

(8) 回收二氧化碳气体;

(9) 回收凝汽器排出的低温废热;

(10) 回收锅炉排放的飞灰、沉降灰和底渣等固体废弃物。

## 思 考 题

**【思考题 1-1-1】** 简述将原煤磨制成煤粉再进行燃烧的原因。

答：原煤的颗粒直径太大，单位质量的煤的表面积有限，不能进行大功率燃烧。因此必须将原煤破碎成粒径为  $60\sim 80\mu\text{m}$  的颗粒，即将原煤磨制成煤粉，从而大大增加煤的比表面积，加快煤的燃烧速度。

**【思考题 1-1-2】** 简述锅炉给水必须经过加热才能送入水冷壁的原因。

答：水冷壁的主要作用是将接近饱和的水加热蒸发成蒸汽。对于亚临界压力以下的锅炉，蒸发是一个持续的过程。对于超临界压力锅炉，蒸发是一个瞬间即可完成的过程。无论任何压力，进入水冷壁前必须达到足够高的温度，才能在水冷壁中顺利蒸发，而且压力越高，水的饱和温度和拟临界温度越高。因此，随着锅炉压力的提高，给水必须加热到合适的温度才能送入锅炉水冷壁。

**【思考题 1-1-3】** 再热器中的水蒸气是否过热？说明其原因。

答：再热器是锅炉受热面的名称。再热器中流动的是低压过热蒸汽，所谓再热蒸汽参数指的是再热器中流动的、被加热的低压过热蒸汽。

**【思考题 1-2-1】** 简述锅炉机组的构成。

答：锅炉机组包括锅炉本体和锅炉辅机。构成锅炉机组的系统包括：输煤系统、制粉系统、燃烧系统、汽水系统、除渣除灰清灰系统、烟气排放系统、脱硫脱硝系统等。

**【思考题 1-2-2】** 简述锅炉本体的构成。

答：锅炉本体包括：燃烧器、炉膛、空气预热器、水冷壁、过热器、再热器、汽包或者启动分离器。

**【思考题 1-2-3】** 简述锅炉辅机的构成。

答：锅炉辅机包括：给煤机、磨煤机、煤粉管道、送风机、引风机、给水泵、吹灰器、碎渣机、除尘器、灰浆泵、脱硫装置、脱硝装置、烟囱等。

**【思考题 1-3-1】** 简述锅炉按照蒸汽压力分类的原因。

答：电站锅炉容量都比较大，蒸汽压力越高，容量越大。蒸汽压力越高火力发电厂的水蒸气热力循环热效率就越高，因此锅炉的蒸汽压力分类是常用的锅炉分类方法之一。

**【思考题 1-3-2】** 简述锅炉按蒸发受热面循环方式的分类。

答：临界压力以下的锅炉可以是汽包锅炉也可以是直流锅炉。超临界锅炉只能是直流锅炉，而临界压力以下的锅炉又可以细分为自然循环锅炉、强制循环锅炉、低倍率循环锅炉、复合循环锅炉。

**【思考题 1-4-1】** 简述控制循环锅炉一般都在 300MW 以上机组的原因。

答：300MW 电站机组对应的控制循环锅炉的蒸发量为  $1025\text{t/h}$ ，亚临界压力。只有在亚临界压力附近，自然循环的水动力才会显得不足，有必要在下降管中增加循环泵。此外，为了保证水冷壁不因热负荷沿着水平方向上的分布不均发生传热恶化，须将工质质量流量与所在回路的水冷壁的热负荷对应，因此需要在水冷壁入口加装节流圈。只有  $1025\text{t/h}$  以上的锅炉使用循环泵才在经济上合算，因此控制循环锅炉一般都在 300MW 以上机组。

【思考题 1-4-2】简述 W 火焰锅炉的特点。

答：W 火焰锅炉是燃烧无烟煤等劣质煤的煤粉炉的主要形式。W 火焰锅炉可以用于亚临界 300MW 火电机組，也可以用于 600~1000MW 级超临界火电机組。W 火焰锅炉的  $\text{NO}_x$  排放量比较高。W 火焰锅炉是煤粉锅炉，厂用电率低于相同容量的循环流化床锅炉 (CFBB)。

## 习 题

【习题 1-1-1】设有 1kg 的原煤，密度为  $1100\text{kg/m}^3$ ，经过制粉系统破碎成为粒径为 70 微米的颗粒群。计算原煤与煤粉的比表面积，分析其结果。

解：假设煤为实心固体。1.0kg 原煤为一个球形颗粒，则球形颗粒的体积为

$$V = \frac{\pi}{6} d_p^3 = \frac{m}{\rho} = \frac{1}{1100} (\text{m}^3)$$

式中  $d_p$ ——原煤颗粒的直径。

则原煤颗粒的直径

$$d_p = \left( \frac{6}{1100\pi} \right)^{1/3} (\text{m})$$

原煤颗粒的比表面积

$$s_0 = \frac{\pi d_p^2}{m} = \pi \left( \frac{6}{1100\pi} \right)^{2/3} = 0.0454 (\text{m}^2/\text{kg})$$

设煤粉颗粒的数量为  $n$ ，粒径为  $d_{pl}$ ，

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 = n \frac{\pi}{6} d_{pl}^3$$

因此，煤粉颗粒的数量  $n$

$$n = d_p^3 / d_{pl}^3 = 5.062 \times 10^9$$

煤粉的比表面积

$$s_1 = \frac{n \pi d_{pl}^2}{m} = 77.9 (\text{m}^2/\text{kg})$$

由于原煤的破碎过程，煤的比表面积增加了  $n_1$  倍

$$n_1 = s_1 / s_0 - 1 = 1716 (\text{倍})$$

计算结果分析与讨论：

(1) 由于原煤在制粉系统中经过破碎过程，煤的比表面积增加了 1716 倍。对于气固两相燃烧反应而言，增加煤的比表面积，可以增加燃烧反应速度。因此，将原煤破碎成煤粉颗粒群是加快煤粉燃烧速度的关键性措施之一。

(2) 本题的计算过程假设煤为实心固体。实际上煤是一种内部充满了空隙的固体介质，但是煤的破碎过程主要是增加了煤的外比表面积，内部比表面积基本上没有变化。

【习题 1-1-2】根据省煤器出口水温查阅各种压力下省煤器中的出口水焓，分析其结果。



解：表 1-1 所示为不同压力下省煤器出口水温、压力与出口水焓。

表 1-1 省煤器出口水温、压力与出口水焓

| 蒸汽压力<br>(MPa) | 给水温度<br>(℃) | 给水焓<br>(kJ/kg) | 省煤器出口水温<br>(℃) | 省煤器出口水焓<br>(kJ/kg) | 饱和温度<br>(℃) |
|---------------|-------------|----------------|----------------|--------------------|-------------|
| 9.9           | 215         | 923.53         | 256            | 1114.6             | 318.08      |
| 13.8          | 235         | 1016.08        | 285            | 1258.18            | 344.79      |
| 17.7          | 265         | 1157.81        | 304            | 1355.98            | 363.63      |
| 25.4          | 286         | 1259.42        | 366            | 1738               | 384.4*      |

\* 拟临界温度。

计算结果分析与讨论：

(1) 压力越高的锅炉蒸发吸热量在工质总吸热量中的比例越小，因此，必须提高省煤器出口水温，以便使水冷壁的吸热量能产生足量的蒸汽。

(2) 临界压力以下的锅炉，省煤器出口水温按照距离饱和温度 60℃ 的原则确定。

(3) 超临界压力锅炉的省煤器出口水温按照比拟临界温度对应的焓小 380kJ/kg 确定。

【习题 1-4-1】 已知某电厂 1025t/h 锅炉燃用的煤种为太原西山贫煤。 $Q_{\text{ar,net}} = 21\,440$  kJ/kg。BRL 工况燃煤消耗量为  $B = 125.11$  t/h。计算该电厂一台 1025t/h 锅炉每小时消耗的标准煤质量。

解：标准煤的发热量为  $Q_{\text{ar,net}}^s = 29\,310$  kJ/kg，则该电厂每小时消耗的标准煤质量

$$B^s = B \frac{Q_{\text{ar,net}}}{Q_{\text{ar,net}}^s} = 125.11 \times \frac{21\,440}{29\,310} = 91.52(\text{t/h})$$

燃煤消耗量按照每秒钟计算

$$B = 125.11 \times \frac{1000}{3600} = 34.75(\text{kg/s})$$

燃煤消耗量按照每年计算

$$B = 125.11 \times 24 \times 365 = 1\,095\,964(\text{t/a})$$

标准煤消耗量按照每秒钟计算

$$B^s = 91.52 \times \frac{1000}{3600} = 25.42(\text{kg/s})$$

标准煤消耗量按照每年计算

$$B^s = 91.52 \times 24 \times 365 = 801\,687(\text{t/a})$$

计算结果分析与讨论：

(1) 1 台 1025t/h 锅炉 BRL 工况的标准煤消耗量为 91.52t/h (合 25.42kg/s)。

(2) 1 台 1025t/h 锅炉 BRL 工况的西山贫煤消耗量为 34.75kg/s。

(3) 1 台 1025t/h 锅炉 BRL 工况的标准煤年消耗量为 801 687t/h，西山贫煤年消耗量为 1 095 964t/h。实际上，电站锅炉一般每年运行不超过 7000h，按照每年运行 7000h 计算，1 台 1025t/h 锅炉 BRL 工况的西山贫煤年消耗量为 875 770t/h，即 87.58 万 t，因此电站锅炉对于煤炭资源的消耗量极大。