

# 电站锅炉性能试验原理 方法及计算

华北电力科学研究院有限责任公司 赵振宁 张清峰 | 编著  
河海大学 赵振宙



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

要 容 内

本书主要介绍电站锅炉性能试验原理、方法及计算。全书共分4章，第1章介绍电站锅炉性能试验的基本概念、试验目的、试验项目及试验程序；第2章介绍电站锅炉性能试验的原理；第3章介绍电站锅炉性能试验的方法；第4章介绍电站锅炉性能试验的计算。本书可作为从事电站锅炉性能试验工作的工程技术人员、管理人员、研究人员及高等院校相关专业师生的参考书。

# 电站锅炉性能试验原理 方法及计算

华北电力科学研究院有限责任公司 赵振宁 张清峰 | 编著  
  河海大学 赵振宙

ISBN 978-7-5123-1119-0  
1. 电站性能试验 Ⅱ. 赵... 张... 赵... Ⅲ. 电站性能试验 Ⅳ. TM621.4  
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第101000号

中国电力出版社  
2010年11月第1版  
2010年11月第1次印刷  
787mm×1092mm 1/16  
28.5印张 675千字  
定价：43.00元

营销中心：北京南礼部路20号  
发行部：北京南礼部路20号  
电话：(010) 63416688  
http://www.cepp.com.cn

 中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

当今, 电站锅炉性能试验更重要的功能是指导节能减排生产实践。这就要求我们对电站锅炉的性能及性能试验本质有充分的了解, 只有测得准、算得对, 才能把生产实践引向正确的方向。本书以我国电站锅炉性能试验标准体系与 ASME 蒸汽锅炉性能试验系列标准作为研究重点, 介绍了电站锅炉性能试验原理, 以及这两个性能试验标准体系在应用性能试验原理时所采取的具体思路、计算模型、细节处理及应用条件等, 解释了各标准、各版本之间的差异, 并配备了典型的计算程序样例及计算框图, 以便使读者对此有彻底的了解, 可以根据自己的不同需求, 灵活应用。

本书可供电站锅炉性能试验人员、电厂节能管理人员及电厂运行人员使用, 也可供高等院校热能与动力工程相关师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电站锅炉性能试验原理、方法及计算/赵振宁, 张清峰, 赵振宙编著. —北京: 中国电力出版社, 2010  
ISBN 978-7-5123-1119-0

I. ①电… II. ①赵…②张…③赵… III. ①火电厂-锅炉-性能试验 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 227097 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.125 印张 483 千字  
印数 0001—3000 册 定价 43.00 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

在全球常规能源逐步走向枯竭、环保呼声日益高涨的背景下，开发清洁能源和实施节能减排已成为全球能源界的共识。我国“十一五”规划明确提出了节能减排的目标，这一目标的提出不仅是我国自身可持续发展的内在要求，也为全球减缓气候变化作出了重要贡献。截至2009年12月，我国年平均GDP增长率为11.4%，而能源消耗率只增长了6.8%，节约标准煤4.9亿t，CO<sub>2</sub>减排11.3亿t。

然而，我国以煤炭为主的能源结构短期内难以根本改变。煤炭占常规能源消费量的比例一直在70%左右。火力发电是我国煤炭消费大户，2009年火电占总发电容量的百分比超过了70%，烧掉的煤占全国产煤量的50%~70%，产生的灰渣量约占全国灰渣总量的70%，烟尘排放占工业排放的33%。由此可见，火电能源消耗基数较大，即使有百分之零点几的改进，都可为节能减排作出重要贡献。

欲深入地对火电开展节能工作，一个重要的环节就是确定和剖析电站锅炉的性能，找出其性能最薄弱的环节并加以改进。确定设备性能，预估改造、改进效果，监督持续改进过程等工作，恰恰是设备性能试验所为。因此，电站锅炉性能试验在节能工作中有很重要的意义。

电站锅炉性能的测试和计算要求设计者、制造者、使用者及试验者等多方人员对其每一个细节都非常熟悉。然而，目前我们仅限于GB 10184—1988《电站锅炉性能试验规程》中公式的套用，很少注意公式的假定条件、理论基础及使用范围，而对特别重要的ASME标准也了解甚少，更谈不上区分ASME标准系列中不同版本、不同内容之间的联系与差异。若仅简单地套用标准中的个别公式，则很难得出有益结论，甚至会产生错误。

基于上述原因，作者编写了本书，以献给一线的广大工作者，为他们全面学习这一系列标准提供参考。本书用更简单、浅显的语言，更接近实际工作的思路，深入剖析了各标准的工作原理，并将标准中的结果与实际设备的表现联

系起来，以培养读者灵活应用的能力。因此，本书内容是标准的诠释与拓展，更有助于读者理解和学习。

本书第一、二章由华北电力科学研究院有限责任公司赵振宁与张清峰合作编写，第四、六章由赵振宁与河海大学赵振宙博士合作编写，其余部分由赵振宁编写。此外，在开发软件的过程中，还得到了赵振宇技术总监（计算机专业）的大力支持。

全书由山东电力科学研究院丁立新教授级高级工程师审阅，丁教授提出了很多宝贵的意见，在此对他的辛勤劳动表示衷心的感谢！在本书的编写过程中，华北电力科学研究院有限责任公司提供了大力支持，家人给予了无微不至的关怀，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2010年9月

# 目 录

## 前言

## 第一章 锅炉性能试验原理 ..... 1

- 第一节 性能试验相关的背景知识 ..... 1
- 第二节 电站锅炉的性能 ..... 11
- 第三节 锅炉热效率的不同表述及其含义 ..... 18
- 第四节 各国锅炉性能试验标准现状及特点 ..... 24

## 第二章 我国锅炉性能试验标准 (GB 10184—1988) ..... 27

- 第一节 标准反平衡计算方法 ..... 27
- 第二节 正平衡法热效率计算及其与反平衡热效率的关系 ..... 50
- 第三节 燃用其他燃料的锅炉性能计算 ..... 52
- 第四节 简化热效率计算 ..... 56
- 第五节 换算到保证条件下的热效率 ..... 58
- 第六节 循环流化床锅炉的性能计算 ..... 62
- 第七节 锅炉净效率 ..... 72
- 第八节 标准反平衡方法的测试工作 ..... 74
- 第九节 锅炉性能试验常用的测量仪器及使用注意事项 ..... 94
- 第十节 其他性能的测试 ..... 105

## 第三章 ASME 蒸汽锅炉性能试验标准 (PTC 4—1998/2008) ..... 107

- 第一节 ASME 反平衡试验的计算模型 ..... 107
- 第二节 ASME 标准中灰平衡相关的计算 ..... 139
- 第三节 ASME 标准中烟气产物成分及生成量的确定 ..... 154
- 第四节 ASME 标准中焓值的确定 ..... 164
- 第五节 ASME 标准中效率试验结果修正方法 ..... 175
- 第六节 ASME 标准中锅炉效率以外的其他运行参数 ..... 180
- 第七节 试验测量要求与我国标准的异同点 ..... 188
- 第八节 ASME PTC 4—2008 的改进 ..... 204

<b>第四章 ASME 余热锅炉性能试验标准 (PTC 4.4—1981/2008)</b> .....	206
第一节 余热锅炉简介 .....	206
第二节 烟气流量的计算 .....	210
第三节 烟气流量的测量 .....	226
第四节 锅炉效率的测量方法 .....	234
第五节 试验测试要求 .....	241
<b>第五章 ASME 空气预热器性能试验标准 (PTC 4.3—1968)</b> .....	243
第一节 空气预热器漏风性能试验要求及计算方法 .....	243
第二节 空气预热器的热力性能试验要求及计算方法 .....	249
第三节 阻力特性的修正算法 .....	255
<b>第六章 性能试验程序的编制</b> .....	256
第一节 计算机编程语言、技术的发展 .....	256
第二节 通用化的性能试验计算机程序示例 .....	261
第三节 企业级的计算机系统设计 .....	295
<b>附录 A 比热容的一致性</b> .....	301
<b>参考文献</b> .....	315

# 第一章

## 锅炉性能试验原理

性能试验的最初目的是验收设备的性能是否达到厂家的设计值或合同的规定值，因而要求相关人员（包括试验者、卖家及接受者）都应非常熟悉性能试验标准中相关的各种规定，以保证试验结果的正确性和公平性。但对于大量其他目的性能试验，特别是为节能而进行的性能试验来说，仅了解性能试验标准中的条文已不能满足要求，而需要深刻了解锅炉性能试验的原理（包括算法原理、假定及应用条件等）。为达到此目的，本章为读者准备了很多预备知识，包括专业术语含义、锅炉的类型、设计的思路与理念、化学知识、工程热力学知识、传热学知识，以培养读者适当的想象、抽象、质疑与分析综合能力。

### 第一节 性能试验相关的背景知识

#### 一、能源与能量转化

##### 1. 能量、热量及其度量

能有多种形式，如化学能、光能、原子能、电能、机械能、热能等。各种形式的能量之间可以相互转化，且转化完成后总量不变，这就是著名的能量守恒定律，热力学中称为热力学第一定律，流体力学中称为伯努利方程。锅炉性能试验的本质是研究锅炉的能源转化率，所以能量守恒定律是本书研究的基石。

由于能量可以转化且转化后总量不变，因此，各种能本质上是一种东西，可以用一种单位系统进行度量。物理学中最早研究的能量是机械能，所以把能及能量定义为“物理系统做功的容量与能力”，度量能的国际单位是  $\text{N} \cdot \text{m}$ ，即“焦耳”（J），含义为“用 1N 的力作用于物体，使其移动 1m 的距离所做的功”。另一种度量能量的方法是热能单位，在热力学（物理学的一个分支）研究的早期，人们还不知道热能与机械能间存在转换关系时，热量度量的单位为“卡路里”（cal），简称卡，表示 1g 纯水在标准大气压下温度升高  $1^\circ\text{C}$  所需的热量，两种单位之间的转换关系称为热功当量。

##### 2. 能量的转移

相同的能量是可以转移的。以热能为例，若两个冷热状况不同的物体放在一起，则冷的物体将变热，热的物体将变冷。在没有其他外来影响的情况下，两物体终将达到相同的冷热状况，能量就从热的物体转移到了冷的物体中。这就是著名的热力学第零定律，它是温度的测量基础，具有非常重要的意义。



驱动相同类型的能量转移的动力往往称为“××差”，如上述实例中的温差，以及常说的电压差、压力差等。

### 3. 热功当量

由于纯水在不同的温度下升高 1℃ 所需的热量不完全相同，因而出现了各种定义的卡，也就出现了各种各样的热功当量值，这给电厂的节能工作者带来了困扰。

几种典型的热量单位的定义如下：

(1) 热化学卡 ( $\text{cal}_{\text{th}}$ )。科学家焦耳最早用实验确定了这种关系，1956 年被热化学界以国际标准的形式规定下来，称为“热化学卡”， $1\text{cal}_{\text{th}}=4.184\text{ J}$ 。

(2) 20℃ 卡 ( $\text{cal}_{20}$ )。20℃ 卡是指在标准气压下，1g 纯水温度从 19.5℃ 升高至 20.5℃ 所需要的热量。GB 2589—1981《设备热效率计算通则》中附录第一条规定，“燃料发热量”所用卡为 20℃ 卡， $1\text{cal}_{20}=4.181\ 68\text{ J}$ 。这种热量单位在我国电力行业颇为流行，如 DL/T 904—2004《火力发电厂技术经济指标计算方法》中就采用了该热功当量，标准煤发热量为 292 71kJ。

(3) 国际蒸汽表卡 ( $\text{cal}_{\text{IT}}$ )。1948 年第 9 届国际计量大会通过用焦耳作为能量单位后，1956 年伦敦第五届国际水蒸气大会规定了“水蒸气卡”。“1 水蒸气卡”的热量表示在标准气压下，1g 纯水温度从 14.5℃ 升高至 15.5℃ 所需要的热量，也称 15℃ 卡， $1\text{cal}_{\text{IT}}=4.186\ 8\text{ J}$ 。

目前国际上多采用  $\text{cal}_{\text{IT}}$ ，GB 2589—2008《设备热效率计算通则》也采用了  $\text{cal}_{\text{IT}}$ ，此时标准煤的发热量为 29 310kJ。所以，在计算煤耗，特别是要与国外标准进行比较时，应把国际标准单位 kJ 除以 4.186 8 转化为标准煤的质量。这些都是人为的规定，与试验的精度无关。

### 4. 能源及其与能的区别

能源的物理定义为能量的来源，如煤、石油、天然气及经过加工，以商品形式出现的焦炭、汽油、电力、蒸汽等。现实生活中最为常见的能源形式为电力、石油及其二次产品、天然气、煤等。

能与能源有时可以通用，如电能和蒸汽所携带的热势能（本书中把有压力、有直接做功能力的热能称为热势能，而把没有压力、没有做功能力或需转换才有做功能力的热能，如锅炉排烟带走的废热称为热能），既可以看作是能，也可以看作是能源，能的转化往往也可说成是能源的转化；但大部分情况下，能与能源必须加以区别，如节能减排实际上是节省能源，因为能的总量是不变的，不存在节省的问题。

### 5. 能的品质

各种能之间的转化具有一定的方向性，如煤炭中的化学能很容易转化为热能，反过来把热能转化为化学能的过程则相当困难；机械能、电能也可以完全转化为热能，而热能转化为机械能、电能则无论如何都不可能达到 100%。

热力学认为能量基本可以分三类：第一种能量是机械能、化学能、电能等高级能源，可以百分之百地转换为其他形式的能量，能量的“量”和“质”完全统一，如 1L 汽油，尽管所含总能量不大，但却可以非常方便地用它来取暖、驱动汽车；第二种能量是完全不能转换的能量，如环境内能，大气环境中所蕴含的热量其实是特别大的，烧光一个煤矿都未必能把地球上的大气温度升高 1℃，但这么多能量却无法推动一根毛发，这种能量只有“量”，没

有“质”；第三类能量是大部分能量中可部分转换的能量，如热势能等，这种能量的“量”和“质”不完全统一，转换能力受到热力学第二定律的约束。

发电厂的能源流程中除化学能向热能的转化（燃烧）外，整体上是一个由低级能源（热能）向高级能源（电能）转化的过程，因此，在研究电站锅炉的性能时，一般要尽可能地考虑汽轮机的性能，尽可能地采用“分级利用”的方法，以获得最大的能源利用率。

## 二、热力系统及热力过程

能量在转换时，在“量”与“质”两个方面遵循不同的客观规律。热力学第一定律从能量的“量”出发，指出在能量转换过程中能量的总量守恒；热力学第二定律从能量的“质”出发，指出在能量转换过程中，能量的质要贬值，即能量的品质要降低、要贬值。这两个定律从“量”与“质”两个方面揭示了能量在转换及传递过程中的客观规律，是热力学研究的理论基础。

### 1. 热力系统

在热力学中，研究能量转换问题的基础是热力系统（简称系统，见图 1-1），即把所要研究的对象用一个虚拟或实际的边界与周围环境分隔开来。系统通过边界与外界进行功、能量和物质交换，边界不同，交换大小相差很大。

进行电站锅炉性能试验时，锅炉系统就是一个开口热力系统。不过对性能试验来说，为了加强对比性，相关的标准原则上已经把系统的边界确定了下来。但是，如果两个标准的边界不同，则两个标准的结果是不具可比性的。同时，锅炉性能试验的主要目的不在于测量，更重要的是改进，有时需要根据不同的运行情况，选择不同的边界进行分析。

### 2. 热力过程与状态参数

系统与外界传递能量的同时，系统工质的热力状态必将发生变化。例如，锅炉中高温烟气由于与水发生热交换，温度由高温降到低温；又如进入汽轮机的高温、高压水蒸气，由于对外做功而变为低温、低压的蒸汽流出等。工质从某一状态过渡到另一状态所经历的全部状态变化称为热力过程，某瞬间工质热力性质的总状况称为热力状态（简称为状态），而描述这些状态的物理参数称为工质的状态参数。

当工质状态发生变化时，初、终状态参数的变化值仅与初、终状态有关，而与状态变化的途径无关，这称为状态参数的路径无关性。如图 1-2 所示，工质的状态由 1 变到 2，可沿 a 路径，也可以沿 b 路径或 c 路径，某种状态参数的变化量都可表示为

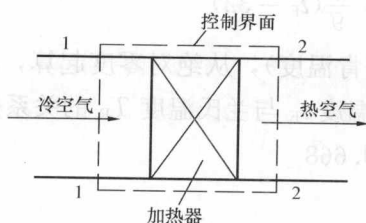


图 1-1 热力系统示意

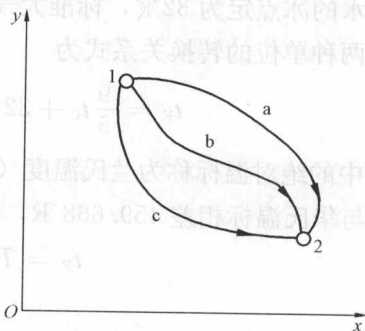


图 1-2 热力过程路径

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——工质的某一状态参数。

热力过程的路径无关性使得确定某些状态参数的变化量时，只要确定开始点、结束点的状态即可，而不用研究过程线的路径，从而把研究大大简化。锅炉性能试验中大量使用状态参数来确定能量的变化，如工质蒸汽的吸热量、排烟所携带的能量等，都是式(1-1)的应用，因而，状态参数的理解对本书的理解非常重要。

### 三、常用的状态参数

热力学中常见的状态参数有温度、压力、比体积（或密度）、焓、熵等。其中，温度、压力、比体积或密度可以直接或间接地用仪表测量出来，称为基本状态参数。温度、压力等参数与质量多少无关，没有可加性，称为强度性参数。强度性参数在热力过程中起着推动力作用，一切实际热力过程都是在某种势差的推动下进行的，当强度性参数不相等时，便会发生能量的传递，如在温差作用下发生热量传递，在力差作用下发生功的传递。另一种参数为广延性参数，如系统的容积、内能、焓等；整个系统的某广延性参数值等于系统中各单元体该广延性参数值之和，它们与系统中的质量多少有关，具有可加性。在热力过程中，广延性参数的变化起着类似力学中位移的作用，称为广义位移，是强度性参数改变的对象。

性能试验中，除了解状态参数的含义，为性能计算提供基础外，还要了解国际单位制与英制单位之间的差别及其转换：同样的计算对象、同样的公式，所采用的单位不同，则公式中的常数项就不同。只有熟练应用两种体系下的应用公式，才能保证计算过程准确。

#### 1. 温度

温度是使用最频繁的物理量。国际单位制(SI)中规定温度用字母  $T$  表示，单位代号为 K (Kelvin)，规定纯水三相点温度（即水的汽、液、固三相平衡共存时的温度）为基本定点，并指定为 273.15K，每 1K 为水三相点温度的 1/273。实用温标温度用字母  $t$  表示，单位代号为摄氏度  $^{\circ}\text{C}$  (Celsius)，每  $1^{\circ}\text{C}$  与每 1K 相同，其定义式为

$$t = T - 273.15 \quad (1-2)$$

式中，273.15 是国际计量会议规定的数值，当  $t=0^{\circ}\text{C}$  时， $T=273.15\text{K}$ 。

英制单位广泛使用的温标是华氏温标，单位为  $^{\circ}\text{F}$ ，它把水、冰和海盐混合物的温度定为  $0^{\circ}\text{F}$ ，把健康人的血液温度（正常体温为  $35.56^{\circ}\text{C}$ ）定为另一固定点，期间分为  $4 \times 24 = 96$  等份，这样，水的冰点定为  $32^{\circ}\text{F}$ ，标准大气压下水的沸点就是  $212^{\circ}\text{F}$ ，其间相差  $180^{\circ}\text{F}$ ，即  $1^{\circ}\text{C} = 1.8^{\circ}\text{F}$ 。两种单位的转换关系式为

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t_{\text{C}} + 32 \text{ 或 } t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (1-3)$$

英制单位中的绝对温标称为兰氏温度（也称朗肯温度），从绝对零度起算，单位可以用  $^{\circ}\text{F}$  或  $^{\circ}\text{R}$  表示，与华氏温标相差 459.668  $^{\circ}\text{R}$ ，即华氏温度  $t_{\text{F}}$  与兰氏温度  $T_{\text{R}}$  的关系是

$$t_{\text{F}} = T_{\text{R}} - 459.668 \quad (1-4)$$

#### 2. 压力

与温度类似，压力也是性能试验中使用较为频繁的参数。SI 中规定的压力单位为 Pa ( $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ )，工程上应用最多的压力单位为 kPa、atm、mmH<sub>2</sub>O 等，英制单位中最常见

的是 psi (磅力/平方英寸), 最常用的转换关系为:  $1\text{kPa}=0.145\text{psi}$ ;  $1\text{inHg}=3386.39\text{Pa}$ ;  $1\text{psi}=6.895\text{kPa}$ ;  $1\text{atm}=101.325\text{kPa}=14.696\text{psi}$ 。

相对压力与绝对压力的测量与含义如图 1-3 所示。当用 U 形压力计测量风机出、入口压力时, 压力计指示的压力是气体的绝对压力与外界大气压力的差值, 称为相对压力。相对压力与绝对压力之间的关系如图 1-4 所示。绝对压力小于外界大气压力时, 相对压力为负压 (有时称真空); 反之为正压。相对压力又称表压。

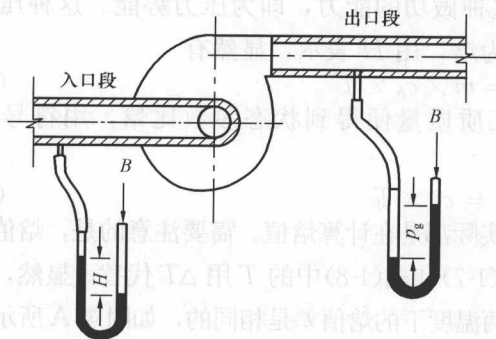


图 1-3 相对压力与绝对压力的测量与含义

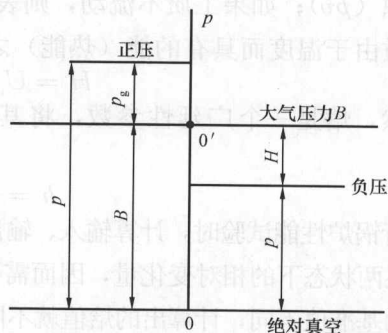


图 1-4 相对压力与绝对压力之间的关系

由于大气压力随地理位置及气候条件等因素而变化, 因此, 绝对压力相同的工质, 在不同的大气压力条件下, 压力表指示的相对压力并不相同, 必须将其换算成绝对压力, 只有绝对压力才是状态参数。

### 3. 比体积和密度

工质所占有的空间称为工质的容积, 单位质量工质所占有的容积称为工质的比体积 (“比”表示单位质量的基准)。工质的容积为  $V$ , 质量为  $m$ , 那么比体积则为

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-5)$$

单位容积的工质所具有的质量称为工质的密度, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-6)$$

显然, 工质的比体积与密度互为倒数, 它们不是两个独立的状态参数, 如二者知其一, 则另外一个也就确定了。

### 4. 比热容与焓

在分析热力过程时, 常常涉及气体的内能、焓、熵及热量的计算, 这都要借助于气体的比热容。单位物量的物体温度升高或降低 1K 所吸收或放出的热量, 称为该物体的比热容。

比热容的单位取决于热量单位和物量单位。物量的单位不同, 比热容的单位也不同。对于固体和液体而言, 物量单位常用质量单位 (kg); 对于气体而言, 除用质量单位外, 还常用标准容积 ( $\text{m}^3$ ) 和千摩尔 (kmol) 作单位。因此, 相应应有质量比热容、容积比热容和摩尔比热容之分。

(1) 比定容热容。气体加热在容积不变的情况下进行, 加入的热量全部用于增加气体的

内能,使气体温度升高。所以,比定容热容可定义为:在定容情况下,单位物量的气体温度变化 1K 所吸收或放出的热量用  $c_v$  表示。

(2) 比定压热容。气体加热在压力不变的情况下进行,加入的热量部分用于增加气体的内能,使其温度升高,部分用于推动活塞升高而对外做膨胀功,这种比热容称为比定压热容,用  $c_p$  表示。

工质在进出系统时向流动的前方传递的功称为流动能或推动功,数值上等于其压力与体积之积 ( $pv$ );如果工质不流动,则表示有这种做功的能力,即为压力势能。这种压力势能与工质由于温度而具有的能(热能)之和即为焓,用  $H$  表示,显然有

$$H = U + pv = m \times c_p \times T \quad (1-7)$$

显然,焓是一个广延性参数,将其除以工质质量便得到状态参数比焓,用符号  $h$  表示,有

$$h = u + pv = c_p \times T \quad (1-8)$$

进行锅炉性能试验时,计算输入、输出的能实际都是在计算焓值。需要注意的是,焓值计算只关心某两状态下的相对变化量,因而需要把式(1-7)和式(1-8)中的  $T$  用  $\Delta T$  代替。显然,如果比热容的基准值不同,计算出的焓值就不同,但两温度下的焓值差是相同的,如附录 A 所示。

#### 四、理想气体、混合气体及其特性

##### 1. 理想气体与状态方程

理想气体是一种经过科学抽象的假想气体模型,它被假设为:气体分子是一些弹性的、不占有体积的质点,分子相互之间没有作用力(引力和斥力)。在这两个假设条件下,气体分子运动规律大大简化,把复杂的分子间热运动转化为温度、压力、比体积这三个基本状态参数之间的函数关系,称为状态方程,写作

$$pv = RT \quad (1-9)$$

锅炉燃烧的燃烧风及燃烧后的烟气都可视为理想气体,因此只要记住标准状态下的空气密度为 1.293,就可以根据状态方程推导出任何温度与压力下空气的密度,推导公式如下

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15 \times (p_a + p_{st})}{101325 \times (273.15 + t)} \quad (1-10)$$

式中  $p_a$ ——大气压力, Pa;

$p_{st}$ ——测量的静压(表压), Pa;

$t$ ——测量的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

如果气体不能当作理想气体,则称其为实际气体,锅炉内生成的水蒸气就是典型的实际气体。但空气及烟气中的水蒸气,因其含量少、比体积大,故均可当作理想气体看待。

##### 2. 混合物气体的热力性质

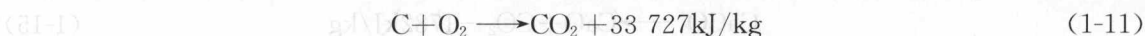
锅炉燃烧时烟气与空气都是混合气体,因此必须研究混合气体的表示方法。多种气体混合在一起时,所有成分的温度是相同的,第  $i$  种成分所具有的容积称为分容积,所贡献的压力称为分压力。对理想气体来说,分压力之比等于分容积之比。这样,烟气/空气中的比热容、焓等广延性参数均可用分容积或分压力进行加权平均计算所得。

#### 五、锅炉中的化学反应

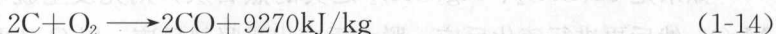
##### 1. 燃烧反应

锅炉中的燃烧主要是碳元素、氢元素、硫元素与空气中的氧气发生化学反应,可燃物质

全部燃烧,生成二氧化碳、水蒸气、二氧化硫,同时放出相应的反应热,主要反应式如下



如果燃烧中空气不足或混合不好,则燃料中的碳元素不完全燃烧会生成一氧化碳,所放出的反应热也相应减少,即



锅炉中的燃烧反应是连续不断的,因此需要连续不断地往锅炉中送入燃料、空气,并把废物排出锅炉。这样,燃料在锅炉内的停留时间就很短,往往难以完全燃烧。为了保证燃料燃烧完全,锅炉运行中往往通入比实际需要更多的空气(氧化剂),这就是过量空气。过量空气的加入使得烟气组成成分中多了  $O_2$ 。

为了保证燃烧稳定,也使  $NO_x$  的生成量减少,锅炉往往通过分级配风把氧化剂送入炉膛,这样,燃烧空气就有了一次风、二次风和三次风之分。

一次风:英文称“primary air”,主要提供着火初期所需要的氧化剂,在煤粉锅炉中,还具有将煤粉干燥、分离并从磨煤机送至燃烧器的功能;在循环流化床锅炉中,一次风是从燃烧室底部送入并使床料流化;燃油和燃气燃烧速度快,通常没有一次风。

二次风:英文称“secondary air”,使燃料完全燃烧的空气。在煤粉炉和流化床锅炉中,指除一次风以外的燃烧用空气;在燃油和燃气锅炉中,空气预热器出口的全部燃烧空气通常称为二次风。

三次风:不同情况下,三次风的定义不同。在中贮式系统的锅炉中,煤粉分离完成后,还有一部分极细的煤粉混在干燥、输送磨煤机煤粉到粉仓的空气中,这部分空气一般由单独的燃烧器送入锅炉,称为三次风,也称为乏气(exhaust air);在中速磨、高速磨制粉系统中,为了实现空气分级配风,二次风中又分出一部分用作顶部风,或称压火风等,但大部分称为三次风。在旋流燃烧器燃烧方式中,还把最外侧的二次风称为三次风,但除中贮式系统中的三次风外,其他情况下的三次风都与二次风没有本质上的区别。

现在大型锅炉中,往往采用三分仓回转式空气预热器来把一次风与二次风分开,一次风量占总风量的比例为 25%~30%。

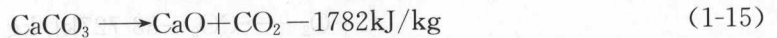
## 2. 炉内脱硫反应

在锅炉的燃烧产物中,  $SO_2$  和  $NO_x$  是环境污染的罪魁祸首,因而需要将其脱去。由于煤粉在炉内的停留时间很短,因此绝大部分煤粉锅炉不采用炉内脱硫,而采用尾部湿法脱硫系统。对于循环流化床锅炉来说,情况恰好相反,有良好的炉内脱硫的条件,因而循环流化床锅炉都采用炉内脱硫。

所谓炉内脱硫,是指把石灰石或熟石灰等脱硫剂与燃料一同送入锅炉,这些脱硫剂先吸收热量,产生  $CaO$ 、 $MgO$  等碱性氧化物,然后与高温烟气中的  $SO_2$  和  $O_2$  发生化学反应,生成  $CaSO_4$  等硫酸盐,从而把烟气中的  $SO_2$  固化,硫酸钙与灰分一起排出锅炉,完成炉内脱硫的过程,实现脱除  $SO_2$  的目的。

以石灰石(主要成分为  $CaCO_3$ )为例,其在炉膛内受热分解生成  $CaO$  的过程称为石灰

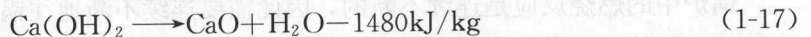
石的煅烧反应 (calcination), 是个吸热化学反应过程, 同时释放出  $\text{CO}_2$  气体, 方程式为



煅烧形成的  $\text{CaO}$  颗粒与燃烧烟气中的  $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$  气体形成硫酸钙的放热化学反应称为硫化反应, 方程式为



如果是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  之类的熟石灰, 则先发生脱水反应 (dehydration) 生成  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ , 然后再进行硫化反应。脱水反应也是吸热反应, 以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为例, 化学反应式为



炉内脱硫是有控制的化学反应, 加入的吸收剂量必须与燃料中的硫含量相符才能既保证脱硫效率, 又保证经济性不受很大的影响。根据燃料中的硫分含量来确定脱硫剂的参数称为钙硫摩尔比 (calcium to sulfur molar ratio), 即送入的脱硫剂中钙的总摩尔数与送入燃料中硫的总摩尔数的比值, 是一个非常重要的参数。

相比锅炉尾部脱硫来说, 尽管炉内脱硫相对简单, 但在锅炉性能试验时, 会使计算、试验的复杂性大大增加, 增加了发热与损失的来源, 还在灰平衡中增加了脱硫过程中产生的灰渣 (spent sorbent), 这也是为什么 ASME PTC 4—1998 非常难懂的重要因素之一。相反, 锅炉尾部脱硫尽管生产上相对复杂, 但对性能试验本身毫无影响, 所以本书所介绍的脱硫, 都指炉内脱硫。

### 3. 脱硝反应

$\text{NO}_x$  主要通过在大 气中形成硝酸雨而危害环境, 脱除  $\text{NO}_x$  也称脱硝技术。脱硝技术分为两大派, 即催化剂脱硝反应技术 SCR (Selective Catalytic Reduction) 及无催化剂反应技术 SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction)。

SCR 用钒作为催化剂, 其反应原理如图 1-5 所示: 氨或氨水通过多个喷嘴以雾化的方式喷入热烟气中, 并快速地蒸发, 和烟气充分混合后, 通过富含 SCR 催化剂的反应器后, 烟气中的  $\text{NO}_x$  即分解为  $\text{N}_2$  与水蒸气。还原反应式为

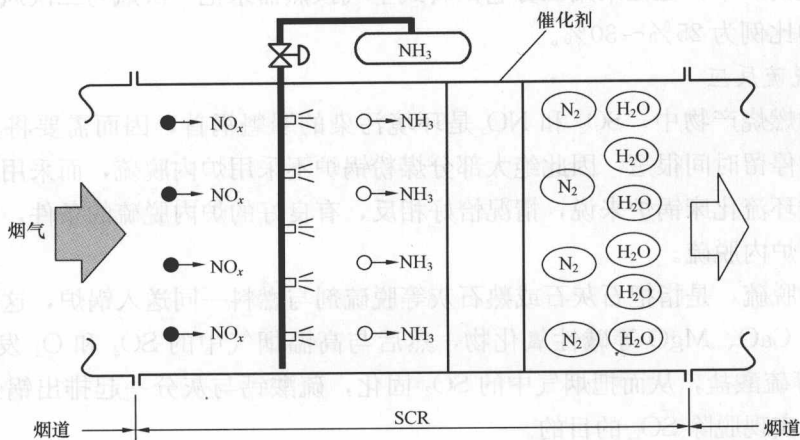


图 1-5 SCR 反应原理示意



SNCR 技术所发生的化学反应与此相同,但由于没有催化剂,因此需要在温度更高的区域中进行。一般 SCR 反应可以设置在空气预热器入口  $300\sim 400^\circ\text{C}$  的区间内,而 SNCR 反应则必须设置在  $800\sim 1200^\circ\text{C}$ ,甚至更高的区域内反应,因此反应产物往往在屏底送入。

与脱硫反应相同,脱硝反应也使得锅炉中的化学反应发生了变化,但  $\text{NO}_x$  含量一般比  $\text{SO}_2$  小很多(通过低  $\text{NO}_x$  燃烧后一般只有  $300\sim 800\text{mg}/\text{m}^3$ ),所以添加剂相对较少,目前所有的标准都还没有考虑这部分的影响,不过根据 SCR 运行电厂的情况,投与不投 SCR 排烟温度也有一些变化,意味着锅炉效率存在一些变化。

#### 4. 添加剂

在锅炉不同位置加入的非燃料、非空气的物质统称为添加剂 (additive),脱硫反应中加入的石灰石、脱硝反应中加入的氨水等都是添加剂。添加剂对锅炉性能的影响如下:

- (1) 添加剂中的惰性成分,增加了灰渣质量和灰渣显热损失。
- (2) 添加剂中的水分,增加了烟气中的水分损失并且改变了烟气比热容。
- (3) 添加剂可发生化学反应,从而改变烟气的组成或改变所需空气量。
- (4) 吸热反应需要热量,从而造成额外损失。
- (5) 放热反应可放出热量,从而成为额外的外来热量。

ASME 标准中的石灰石计算示范了大多数添加剂对效率和燃料产物的影响所需要遵循的计算原则。如果考虑其他添加物质,如考虑脱硝剂的影响,可按相同的原则进行计算。

### 六、分子量在单位转化中的作用

由于化学反应中原子没有改变,只是重新组合,因而可以用分子或原子的个数来度量反应前后物质的变化。由于一个分子的量太小,物理学上用 mol (摩尔) 来表示组成物质的分子或原子的量。1mol 含有  $6.02 \times 10^{23}$  个分子或原子,它所具有的质量称为摩尔质量,单位为  $\text{g}/\text{mol}$ ,数值上恰好等于它们的分子量或原子量。

通过摩尔质量就可以进行各种计量单位的转化,具体关系式为:

- (1) 物质量向质量转化

$$\text{质量} = \text{摩尔质量 (分子量)} \times \text{摩尔数}$$

- (2) 质量向摩尔数转化

$$\text{摩尔数} = \frac{\text{质量}}{\text{摩尔质量 (分子量)}}$$

分子量等于各个组成原子的原子量之和,而所有物质的原子量都可以通过元素周期表(见图 1-6) 查到。

### 七、锅炉中传热

传热的基本方式有热传导、热对流和热辐射三种。热传导是指在不涉及物质转移的情况下,热量从物体中温度较高的部位传递给相邻的温度较低的部位,或从高温物体传递给相接触的低温物体的过程,简称导热。热对流是指不同温度的流体各部分由相对运动引起的热量



### 元素周期表

周期	元素周期表																		电子壳层		
	IA																	0	电子壳层	电子数	
1	1 H 氢 1.008																	2 He 氦 4.003	K	2	
2	3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9.012																	10 Ne 氖 20.18	L K	8
3	11 Na 钠 22.99	12 Mg 镁 24.31																	18 Ar 氩 39.95	M L K	8
4	19 K 钾 39.10	20 Ca 钙 40.08	21 Sc 钪 44.96	22 Ti 钛 47.87	23 V 钒 50.94	24 Cr 铬 52.00	25 Mn 锰 54.94	26 Fe 铁 55.85	27 Co 钴 58.93	28 Ni 镍 58.69	29 Cu 铜 63.55	30 Zn 锌 65.39	31 Ga 镓 69.72	32 Ge 锗 72.61	33 As 砷 74.92	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.90	36 Kr 氪 83.80	N M L K	8 18 8 2	
5	37 Rb 铷 85.47	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88.91	40 Zr 锆 91.22	41 Nb 铌 92.91	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 [99]	44 Ru 钌 101.1	45 Rh 铑 102.9	46 Pd 钯 106.4	47 Ag 银 107.9	48 Cd 镉 112.4	49 In 铟 114.8	50 Sn 锡 118.7	51 Sb 锑 121.8	52 Te 碲 127.6	53 I 碘 126.9	54 Xe 氙 131.3	O N M L K	8 18 18 8 2	
6	55 Cs 铯 132.9	56 Ba 钡 137.3	57-71 La-Lu 镧系 [261]	72 Hf 铪 178.5	73 Ta 钽 180.9	74 W 钨 183.8	75 Re 铼 186.2	76 Os 锇 190.2	77 Ir 铱 192.2	78 Pt 铂 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 汞 200.6	81 Tl 铊 204.4	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 209.0	84 Po 钋 [209]	85 At 砹 [210]	86 Rn 氡 [222]	P O N M L K	8 18 32 18 8 2	
7	87 Fr 钫 [223]	88 Ra 镭 226.0	89-103 Ac-Lr 锕系 [261]	104 Rf 钨 [261]	105 Ha 铪 [262]	106 Hs 钨 [263]	107 Ts 钨 [264]	108 Og 钨 [265]	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118			

72 Hf 铪 178.5	73 Ta 钽 180.9	74 W 钨 183.8	75 Re 铼 186.2	76 Os 锇 190.2	77 Ir 铱 192.2	78 Pt 铂 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 汞 200.6	81 Tl 铊 204.4	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 209.0	84 Po 钋 [209]	85 At 砹 [210]	86 Rn 氡 [222]
89 Ac 锕 [261]	90 Th 钍 [262]	91 Pa 镤 [263]	92 U 铀 [262]	93 Np 镎 [263]	94 Pu 钚 [264]	95 Am 镅 [265]	96 Cm 锔 [265]	97 Bk 锫 [267]	98 Cf 锿 [268]	99 Es 镄 [269]	100 Fm 镆 [269]	101 Md 鐳 [270]	102 No 铹 [270]	103 Lr 铷 [270]

注：1. 相对原子质量  
    录自1995年国际原子量表，并全部取4位有效数字。  
    2. 相对原子质量  
    加括号的为放射性元素的半衰期最长的同位素的质量数。

图 1-6 元素周期表

交换。热辐射是指物体因自身具有温度而辐射出能量的现象，特点是可以在没有中间介质的真空中不接触地直接传递。

锅炉炉膛中的传热以辐射为主，尾部受热面对流换热为主，分别是热辐射和热对流与金属受热面的导热综合作用的结果。锅炉性能试验研究中研究的是传热的结果，所以对传热过程本身不作具体研究。如果能理解这些传热过程的特点，并根据实际情况把传热过程及路径进行适当的划分，将对理解书中的某些内容很有帮助。例如，在研究锅炉散热损失的热量时，即可把传热过程分为两个部分：第一部分为受热面管通过导热并透过保温层将热量传递给保温层外表面的热量；第二部分为保温层外表面向环境辐射与对流时传递给环境而损失的热量。在整个过程中，显然第一部分导热传递的热量等于第二部分两种传热方式所传递的热量的总和，可以用第一部分来估算第二部分的热量，这就是 ASME PTC 4—1998 Fired Steam Generators Performance Test Code 中关于散热损失修正的理论基础。

### 八、锅炉辅机

除了锅炉本体以外，锅炉还有一些重要的辅机与锅炉性能相关，这些辅机分别为：

(1) 空气预热器。空气预热器是锅炉中把空气加热到一定温度，以保证锅炉着火并回收烟气中废热的重要辅机，它对锅炉效率有很重要的意义。试验时，离开锅炉的烟气温度取为空气预热器出口的烟气温度。空气预热器本身的性能也很重要，直接关系到锅炉的效率，本书第五章将专门对此进行介绍。与排烟温度相关的一个概念是烟气的酸露点，它表示烟气中的酸性物质（如 SO<sub>2</sub>）在烟气变冷时凝结成酸，并对受热面造成危害的温度。锅炉运行中一