

# 工业锅炉安全

刘清方 编

北京经济学院安全工程系

一九九〇年二月

...构对...工...  
...国家有关部门颁发

及工业热水锅炉。由于各种用  
户，未突出工业锅炉的字样。

# 绪 言

作为提供蒸汽或热水介质及提供热能的设备，锅炉广泛应用于电力、机械、化工、轻工、纺织、造纸等工业部门、交通运输部门和日常生活中。由于各种工业企业的生产性质和规模不同，所用蒸汽的数量和参数不同，相应锅炉的容量、结构、性能也各不相同。

电力工业是为发展工农业生产提供电能的先行工业，火力发电是目前世界上所采用的各种发电方式中的主要方式，锅炉则是火力发电的三大主机之一。火力发电厂所用的锅炉通常称作电站锅炉，一般容量较大，蒸汽参数高，结构比较复杂，性能也比较完善。

其他工业企业利用锅炉产生的蒸汽来加热、干燥其他物料或驱动其他设备，这些工业企业使用的锅炉叫作工业锅炉。工业锅炉的容量相对小些，蒸汽参数较低，结构比较简单，性能常较电站锅炉为差，但数量巨大，在国民经济中占据着重要的地位。

公共设施及日常生活中，也到处涉及到锅炉。城乡居民供暖、服务行业使用蒸汽热水以致公众饮水，都离不开锅炉。除供暖锅炉外，生活中使用的锅炉一般是不承压的。值得注意的是，生活使用的不承压锅炉在一定条件下也有爆炸的可能。

锅炉的工作条件恶劣，影响安全的因素复杂，容易产生缺陷和事故：

## 一、承受温度压力。

锅炉的汽水系统由密闭的容器、管道组成。在工作中承受一定的温度和压力，属于受火加热的压力容器，比常温下的压力容器更易损坏。

## 二、接触腐蚀性的介质。

锅炉金属表面一侧要接触烟气、灰尘，另一侧要接触水或蒸汽，有腐蚀、磨损及油污堵塞的可能，使锅炉设备比其他机械设备更容易损坏。

## 三、维持连续运转。

无论电站锅炉还是工业锅炉，一旦投入运行，就要维持连续运转，不能任意停炉，如果发生事故被迫停炉，就会影响正常的生产和生活，造成很大的损失。因而锅炉常有带“病”运行并把小“病”拖成大“病”的可能。

## 四、复杂系统的协同动作。

一台锅炉是一个复杂的系统。锅炉本体一般包括很多部件、零件，此外还有很多辅机、附件，锅炉的运转需要整个系统的协调动作，其中任何环节发生故障，都要影响锅炉的安全运行。

锅炉爆炸是灾难性的。锅炉受压元件的损坏，特别是锅炉筒体的爆炸，具有巨大的破坏力，不仅毁坏设备本身，而且损坏周围的设备建筑，并常常造成人员伤亡，造成严重的后果。

综上所述，锅炉用得普通，容易损坏，损坏后果严重，对锅炉安全决不能等闲视之。因此，我国同世界上其他国家一样，把锅炉作为一种特殊设备，由各级专门机构对其安全进行监督。锅炉的设计、制造、安装、运行、维修、改造、检验等都必须依据国家有关部门颁发的规范、标准进行。

本书主要讨论工业蒸汽锅炉的安全问题，在有些章节也涉及工业热水锅炉。由于各种用途锅炉在结构、工作原理等方面接近，因而在讨论中泛称锅炉，未突出工业锅炉的字样。

# 工业锅炉安全

## 目 录

绪言	
第一章 锅炉基础	( 1 )
第一节 锅炉基本概念和术语	( 1 )
第二节 水和水蒸汽的热力学性质	( 3 )
第三节 锅炉燃料及其燃烧	( 5 )
第四节 锅炉通风	( 11 )
第五节 锅炉中的传热	( 12 )
第六节 锅炉热平衡	( 15 )
第七节 锅炉水循环	( 17 )
第二章 锅炉结构	( 23 )
第一节 锅炉分类及结构概述	( 23 )
第二节 锅壳式锅炉	( 28 )
第三节 小型水管锅炉	( 32 )
第四节 卧式水火管锅炉	( 40 )
第三章 锅炉安全附件	( 42 )
第一节 安全阀	( 42 )
第二节 压力表	( 45 )
第三节 水位表和水位报警器	( 47 )
第四章 锅炉受压与安全	( 52 )
第一节 锅炉中压力的产生	( 52 )
第二节 锅炉元件的承压能力	( 53 )
第三节 锅炉受压元件的水压试验	( 70 )
第五章 锅炉受热与安全	( 73 )
第一节 温度对钢材机械性能的影响	( 73 )
第二节 高温蠕变	( 76 )
第三节 锅炉构件的热膨胀和热应力	( 78 )
第六章 锅炉水质与安全	( 83 )
第一节 水中杂质及其对锅炉的危害	( 83 )
第二节 水质指标及水质标准	( 85 )
第三节 炉外水处理	( 89 )
第四节 炉内水处理	( 95 )
第五节 给水除氧	( 97 )

第六节	除垢	(100)
第七章	锅炉安全运行与管理	(102)
第一节	锅炉启动与停炉	(103)
第二节	锅炉正常运行中的监督调节	(107)
第三节	锅炉事故	(111)
第四节	锅炉停炉保养	(118)
第八章	锅炉检验	(120)
第一节	运行中锅炉受压元件的常见缺陷	(120)
第二节	锅炉检验	(126)
附录	饱和水蒸汽表	(127)

# 第一章 锅炉基础

## 第一节 锅炉基本概念和术语

### 一、锅炉及锅炉规格

锅炉是一种能量转换设备。在锅炉中通过燃料燃烧，将燃料的化学能转变为燃烧产物的热能，再通过传热将热能传给载热工质——水，并使水的状态发生改变，成为满足工业或生活需要的蒸汽或较高温度的水。简言之，锅炉是生产蒸汽或加热水的设备。生产蒸汽的锅炉叫蒸汽锅炉，加热水而不把水转变成蒸汽的锅炉叫热水锅炉。

锅炉中的工作过程，包括燃料燃烧排放热量的化学过程，燃烧产物通过金属壁向水汽传热的过程及水汽流动中吸热变态的过程，是一个包括物理化学变化的综合过程。

顾名思义，锅炉包括“锅”和“炉”两大部分，工程上的锅炉比起生活中的简单锅灶来，尽管本质上没有什么不同，但从结构形状、尺寸和技术要求来说，二者已有巨大差异。

“锅”发展成为锅内系统或水汽系统，由一系列容器和管道组成，盛装水汽并使水汽不断吸热流动。这些容器管道因功用、结构不同而专门命名，分别叫作锅筒、水冷壁、对流管束、省煤器、过热器等。“炉”发展成为炉内系统或风煤烟系统，由送煤送风装置、炉膛、燃烧装置、烟道、排烟除渣装置等组成，是燃料燃烧、烟气流动并向水汽传热的场所。一台锅炉工作时，锅炉本身是固定不动的（机车船舶锅炉例外），但锅炉中烧着火加热着水，锅炉内发生着复杂的化学反应和物理变化，锅炉中的煤、渣、风、烟、水、汽都在不停地运动。因而锅炉中还有一系列附件、仪表、辅机以维持锅炉正常运转。

锅炉规格指锅炉提供蒸汽或加热水的能力，以产生蒸汽的数量及参数表示。

锅炉单位时间内产生蒸汽的数量，称作锅炉的蒸发量，也称锅炉的容量或出力，通常以吨/时表示。

锅炉铭牌上标写的蒸发量是锅炉的额定蒸发量。即在规定的蒸汽参数和给水温度下，锅炉连续运行所必须保证的最大蒸发量。

热水锅炉的容量以单位时间中水在锅炉内的吸热量表示。

锅炉蒸汽参数，通常以锅炉主汽阀出口处蒸汽的压力和温度表示。

目前用以表示蒸汽压力的单位是MPa（表压），用以表示温度的单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

送入锅炉中水的温度叫给水温度。给水温度也是确定锅炉内工质吸热量的基本参数。我国规定，工业锅炉的给水温度应分别为 $20^{\circ}\text{C}$ ， $60^{\circ}\text{C}$ 及 $105^{\circ}\text{C}$ 。

锅炉的容量和参数是特定的，互相匹配的，而不是任意的。一般是容量越大，参数也越高。锅炉的容量参数已经系列化，并已纳入国家标准。

### 二、常用的锅炉专业术语

#### （一）、受热面与受压元件

受热面是指把燃烧产物与水汽工质隔开的金属壁面。受热面把燃烧产物的热量传给水汽

工质并承受工质的压力，既受热又承压，工作条件极其恶劣，是完成锅炉工作职能的基本结构。

受压元件是锅炉中按几何形状划分的基本承压单元。如一个封闭的承压圆筒，就可以分为圆筒形的筒身及凸形封头两大承压元件，圆筒上的接管、人孔及人孔盖则又是另外的受压元件，即一个封闭的承压结构往往包括不止一个受压元件。结构的承压能力与结构的几何形状有很大关系，所以受压元件是以几何形状为基础划分的。

承压锅炉的受热面包含的都是受压元件，但受压元件不一定都直接受热，所以不都是受热面。

## （二）、火焰与烟气

燃料在锅炉中燃烧后，主要形成气体燃烧产物。燃料燃烧放出的热量首先加热气体燃烧产物本身，使之升温到很高的温度，然后燃烧产物通过受热面把热量传给水汽，而燃烧产物本身的温度不断降低。

通常把温度高于 $900^{\circ}\text{C}$ 的燃烧产物叫做火焰，也叫高温烟气；把温度小于或等于 $900^{\circ}\text{C}$ 的燃烧产物叫做烟气。

## （三）、炉膛与烟道

锅炉中用砌砖或金属形成的供燃料燃烧的空间，叫炉膛，也叫燃烧室。现代锅炉炉膛中一般贴壁布置受热面，使火焰与受热面进行辐射换热，所以严格说来，炉膛是燃料燃烧及火焰与受热面进行辐射换热的场所。

燃烧产物离开炉膛后，经过烟道流向烟囱。烟道中通常也布置有受热面，燃烧产物流经烟道时，将热量继续经过受热面传给工质，本身的温度继续不断降低。所以烟道是燃烧产物流动及与受热面进一步换热的通道。一般说来，燃烧产物的温度从炉膛到烟道是逐次降低的，在炉膛内是火焰，出了炉膛进入烟道就很快降温成烟气，所以烟道是烟气流通及换热的通道。

## （四）、蒸发与沸腾

二者都是指液体的汽化现象，但基本含意不同。

蒸发是指在各种温度下液体表面的汽化现象，如晒干或晾干衣服，雨后地面上水的逐步干燥等都属于蒸发现象。

沸腾是指在特定温度下主要发生在液体内部的强烈汽化现象。这个特定温度叫液体的饱和温度。饱和温度随液面上气压的高低而升降，如水在大气压力下的饱和温度大约是 $100^{\circ}\text{C}$ 。

在锅炉技术中，习惯于把蒸发与沸腾混用，并用蒸发代替沸腾。如把布置在炉膛四周的受热面称作蒸发受热面，实质上是沸腾受热面。

## （五）、锅炉热效率

锅炉中水汽工质吸收的热量占送入锅炉总热量的百分数，称作锅炉的热效率。热效率是反映锅炉性能的一个主要指标，取决于锅炉的设计结构、制造安装质量及运行管理水平。

## （六）、锅炉容水量

锅炉水汽系统在正常水位时容纳的水量与锅炉蒸发量之比，称作该锅炉的容水量或者相对容水量。

锅炉容水量实际上是一个时间概念，与锅炉的安全运行有密切关系。如甲乙两台锅炉都

容纳2吨水，但甲炉的蒸发量是10吨/时，乙炉的蒸发量是1吨/时，则对甲炉来讲，如不加水，它容纳的水1/5小时即12分钟能烧干；而对乙炉来讲，它容纳的水2小时才能烧干。一旦供水出现故障，两炉产生缺水烧干事故的危险是显著不同的，从这个角度讲，容水量大的锅炉似乎好些。但容水量大时，锅炉的筒体体积必然大，需要耗费更多钢材；调节压力要慢一些，一旦破裂造成的危害也更严重。

## 第二节 水和水蒸汽的热力学性质

### 一、水的基本性质和热力参数

水是无色，无味、无嗅的液体，化学性质稳定，在自然界含量丰富，价格低廉，易于获得。水具有良好的载热性能，在受热或失热过程中，随温度和压力的变化而分别呈现液态、固态及气态三种形态。在大气压力下，水降温至 $0^{\circ}\text{C}$ 时就结成冰，呈固态，其中在 $-4^{\circ}\text{C}$ 时的冰体积最大；而升温至 $100^{\circ}\text{C}$ 时沸腾汽化，变成水蒸汽。水和水蒸汽是锅炉及其他动力设备中的基本载热质，在热力学中，通常将他们合称为工质。反映水和水蒸汽热力学性质的基本参数是温度、压力、比容、比热、焓等。

压力严格讲指的是压强，即单位承载面积上受到的液体或气体的压力。液体内部某一点的压力，取决于液面上气（汽）体的压力及所在点距液面的高度，即液体内某一点的压力等于液面气压与液柱压力之和。值得注意的是，在液体内部某一点，对各个方向的压力都是相等的。

比容是单位质量的水或水蒸汽所占据的体积，即 $\text{米}^3/\text{千克}$ ，通常以 $v$ 表示。水在不同温度和压力下的体积变化很小，因而水的比容随温度及压力的变化幅度不大；但水变成水蒸汽时，体积要增大几百倍甚至上千倍，比容变化十分显著；水蒸汽的比容因温度及压力的不同也要发生显著变化。

比热是单位质量或体积的物质温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ 所需要的热量，即千焦/千克 $^{\circ}\text{C}$ 或千焦/米 $^3$  $^{\circ}\text{C}$ 。比热通常以 $C$ 表示。不同物质的比热不同，同一物质在不同状态、不同温度下的比热也不同。平常说到比热，往往是某种物质在某一温度范围内平均比热的概念。另外，比热的大小通常与加热过程的特点有关，同一种物质在定压情况下加热或定容情况下加热，比热是不相同的，前者叫定压比热，以 $C_P$ 表示，后者叫定容比热，以 $C_V$ 表示。

焓又称热焓，是单位质量的工质在加热过程中吸收的总能量，单位是千焦/千克，通常以 $i$ 或 $h$ 表示。工质在受热过程中，温度、压力、比容都可能变化，工质温度的变化体现了工质内能 $u$ 的增加，工质压力、比容的变化体现了工质压力能 $PV$ 的增加。工质的焓是其内能与压力能的总和。可记作 $i = u + PV$ 。

### 二、工质的定压加热过程

在锅炉正常运行中，锅炉内工质受热汽化的过程近似于一个定压加热过程，即工质的压力基本不变（实际上因存在流动阻力工质边流动边降压），而温度、比容及状态不断变化的过程。这个过程可以分为三个阶段：

（一）水的预热阶段：如前所述，水的沸腾是在特定温度下进行的，这个温度叫水的饱和温度，水的饱和温度随水面上的汽压而改变，水承受的压力越高，相应的饱和温度也越

高，加入锅炉中水的温度一般低于所受压力之下的饱和温度，这样的水叫未饱和水，未饱和水在锅炉中逐步受热升温，直至升到饱和温度。水在这个阶段吸收的热量叫予热热。水的初始温度距饱和温度越远，水的过冷度越大，则水达到饱和需要吸收的予热热就越多。

(二) 饱和水的沸腾汽化阶段：水升温至一定压力下的饱和温度以后，即不再继续升温，此时的水如继续吸热，则就部分转变为蒸汽，这部分蒸汽的温度与水的温度相同，是饱和温度下的蒸汽，做饱和蒸汽，水吸热越多，转变成蒸汽的份额就越多。在水全部转变成蒸汽之前，不管蒸汽的份额多少，都是饱和蒸汽与饱和水共存的状态，此时的饱和蒸汽叫湿饱和蒸汽。换言之，湿饱和蒸汽是饱和蒸汽与饱和水的混合物。湿饱和蒸汽中蒸汽重量占汽水混合物总重量的比例，叫湿蒸汽的干度，以 $x$ 表示。

在饱和温度下，如果饱和水全部转变成了蒸汽，其干度 $x = 1$ ，则这样的饱和蒸汽叫干饱和蒸汽。

一千克饱和水全部转变为饱和蒸汽需要吸收的热量，叫汽化潜热。汽化潜热随压力的升高而减小，即在低压下把一千克饱和水完全汽化比着在高压下将一千克饱和水完全汽化需要加入更多热量。

(三) 饱和蒸汽的过热阶段：很多工业锅炉是向外界用户提供饱和蒸汽的，对这些工业锅炉而言，不存在饱和蒸汽的过热阶段。但饱和蒸汽遇冷就要液化成水，使其在工业生产中的应用受到限制，所以一些工业锅炉及绝大多数电站锅炉都要生产过热蒸汽，即对饱和蒸汽继续加热，使其温度高出相应蒸汽压力下的饱和温度。高出饱和温度的多少叫蒸汽的过热度，过热度因工程需要而异，可以从几十度到数百度。具有一定过热度的蒸汽叫过热蒸汽，在锅炉中工质由饱和蒸汽转变为过热蒸汽吸收的热量，叫过热热。

### 三、水蒸汽爆炸

如前所述，锅炉爆炸具有巨大的破坏力，但这种爆炸和炸药的爆炸不同，不是化学能的释放，而是热能的释放，与工质的热力学特性密切相关。

经验证明，锅炉中容纳水及水蒸汽较多的大型部件、元件，如锅筒、封头、管板、炉胆、集箱等，破裂时才会导致爆炸。正常工作时，这些容器中或者是水汽两相共存的饱和状态，或者是充满了饱和水，容器内的压力则等于或接近锅炉的工作压力，水的温度则是该压力对应的饱和温度。一旦该容器破裂，器内液面上的压力瞬即下降为大气压力，大气压力相对应的饱和温度是 $100^{\circ}\text{C}$ ，原工作压力下高于 $100^{\circ}\text{C}$ 的饱和水此时成了极不稳定、在大气压力下难于存在的“过饱和水”，其中的一部分即瞬时汽化，体积骤然膨胀许多倍，在容器周围空间形成爆炸。计算表明，这样的爆炸主要是由水的瞬时汽化形成的，原来水面之上水蒸汽的膨胀仅是次要因素，所以通常称作“水蒸汽爆炸”，属于物理型爆炸的范围。

换言之，水的饱和温度取决于水面上的气压，对敞口的盛水器皿加热，水在 $100^{\circ}\text{C}$ 就汽化逸出，水的温度不会超过 $100^{\circ}\text{C}$ ，承受一定压力的水受热，水的温度才会超过 $100^{\circ}\text{C}$ ，承压且温度超过 $100^{\circ}\text{C}$ 的水，不论是否达到饱和状态，在突然卸压至大气压时都会造成瞬时汽化，引起水蒸汽爆炸。也就是说，热水锅炉虽然不生产蒸汽，但只要热水锅炉是承压的，水温又超过 $100^{\circ}\text{C}$ ，就有爆炸的危险，值得注意。



## 第三节 锅炉燃料及其燃烧

### 一、锅炉燃料

燃料是能够燃烧并释放出热量的物质。燃料在锅炉中燃烧并放出热量，是锅炉工作的首要环节。燃料性能的好坏对锅炉结构及工作性能，对锅炉的安全经济运行有直接的影响。要真正了解锅炉，首先必须了解锅炉燃料及其燃烧的基本性能及特点。

锅炉燃料按其物理形态可分为固态燃料、液态燃料、气态燃料等三大类。

固态燃料包括煤、页岩、木柴、甘蔗渣及可燃垃圾等。

液态燃料包括重油、渣油等。

气态燃料包括天然气、煤气及其他工业可燃废气等。

锅炉是燃料消耗量非常巨大的设备。锅炉可以燃用何种燃料或不宜燃用何种燃料，因国家和地区的资源情况及其他条件而异，不同国家往往有不同的燃料及能源使用方针，但有一点是相同的，即尽量不让锅炉直接燃用优质燃料，所以汽油煤油等轻质油不属于锅炉燃料之列。

我国锅炉以煤为主要燃料，且一般燃用劣质或中等质量的煤，而优先保证冶金、化工等行业使用优质煤，这对我国锅炉设备的设计、制造及运行技术提出了更高的要求。

### 二、煤的成份和煤质分析

#### (一)、煤的成份

煤是古代森林长期深埋于地下形成的矿石燃料，其成份非常复杂，通常可分为碳、氢、氧、氮、硫、水分、灰分七大部分。其中碳、氢、硫是可燃成份，氧、氮是参与燃烧的成份，水份是化合物，灰分则是成份复杂的混合物。

1、碳(C)：是煤的主要可燃成份，占煤中可燃物含量的50~90%。煤在地下埋藏的年代越长，其含碳量就越高。煤中的碳以两种形态存在，一是与氢化合形成碳氢化合物( $C_mH_n$ )，形成煤的挥发性成份(挥发份)，易于着火燃烧并放出大量热量；二是固定碳(纯碳)，不易着火燃烧，但燃烧后能放出大量热量。实验测定，一千克固定碳完全燃烧，全部生成 $CO_2$ 时可放出32866千焦的热量。但当固定碳燃烧不完全时，生成CO，放出的热量少得多。

2、氢(H)：作为煤的成份之一的氢，不包括煤中水份所含的氢，而是指以碳氢化合物形态存在的可燃氢，煤中含氢量只有2~8%，但氢燃烧时能放出大量的热量。一千克氢燃烧后可放出大约142300千焦热量，由于燃烧生成的水呈蒸汽状态，蒸汽携带的汽化潜热约21930千焦，所以燃烧一千克氢实际放出的热量约为120370千焦。煤被加热时，碳氢化合物以气体形态挥发出来，构成煤的挥发份。煤中含氢越多，挥发份越高，就越易着火和燃烧。

3、硫(S)：作为煤的成份之一的硫，不包括灰份中硫酸盐形态的硫，而是指可燃硫。可燃硫由两部分组成，一部分是有机硫，即与C、H、O等元素形成化合物的硫；另一部分是黄铁矿( $FeS_2$ )中包含的硫。煤中含硫量通常不高，约为1~2%，有些贫煤、无烟煤和劣质煤含硫量可达3~5%甚至更高。硫燃烧时一般生成 $SO_2$ ，在氧气充足温度不高时也生成少量 $SO_3$ 。硫燃烧时的发热量不大，一千克硫燃烧可放出9050千焦热量。

硫的燃烧产物 $SO_2$ 及 $SO_3$ 与烟气中的水蒸汽化合，形成亚硫酸及硫酸蒸汽，使烟气的露点

显著升高，造成锅炉低温烟道内金属结构的腐蚀和堵灰。排放到大气中的硫化物，会污染环境，对人体和动植物造成危害。

硫是煤中的有害元素，含量越少越好。煤中硫含量超过2%时，就应在设计锅炉时采取相应的技术措施。

4、氮(N)和氧(O)：二者都是不可燃成分，但参与燃烧化学反应。一般说来，煤中含氮量较少，氮对煤的性能影响很小。煤中含氧量因煤种不同而有很大差异，埋藏年代越长久的煤含氧量越低，反之越高。含氧量过高的煤，可燃元素相对减少，发热量较小。

5、水分(W)：煤中的水分包括结晶水分和工作水分两部分。结晶水分是煤中结晶化合物包含的水分，当煤受热达800°C时才释放出来；工作水分则是存在于煤的内部或表面的自由水分。不同的煤含水多少差异很大，少的仅有0.5%，多的高达40~50%。

煤中水分是不可燃成分，含水分多的煤，可燃物含量及发热量较低；而且水分在烟气中汽化时还要吸收一部分热量，进一步降低煤放出的热量。水分影响煤的着火燃烧，增大烟气体积，降低炉膛温度，增加排放烟气的损失，并加剧锅炉后部低温烟道腐蚀与堵灰。另外水分还影响煤的输送、破碎与粉化。

6、灰分(A)：灰分是煤中不能燃烧的固体矿物杂质，是在煤的形成、开采或运输过程中进入的。不同煤种，含灰量差异很大，高者可达40%甚至更高，低者仅有5%左右。灰分本身的成分异常复杂。

煤中灰分是有害成分。煤中灰分多，发热量就低；燃烧时灰分容易隔绝可燃质与氧气的接触，因而多灰的煤不易燃烧及燃尽；灰分积存和粘结在锅炉受热面上，影响传热，降低锅炉的热效率；随烟气流动的飞灰常使锅炉受热面磨损或堵塞；排入大气的灰尘则污染环境，危害人类。

## (二)、煤的性能指标

1、发热量：一千克煤完全燃烧能够发出的热量，叫煤的发热量，单位为千焦/千克。

发热量可分为高位发热量及低位发热量两种，其区别在于是否把燃烧产物中水分汽化消耗的热量计入燃料的发热量。

高位发热量是指燃烧产物中的水蒸汽全部凝结为水时一千克燃料燃烧全部放出的热量，即发热量包含了燃烧产物中水蒸汽的汽化潜热。高位发热量以符号 $Q_{gw}$ 表示。英美等国习惯于采用高位发热量。

实际上，燃烧产物在离开锅炉时的温度仍然很高，其中的水蒸汽不会凝结，水蒸汽的汽化潜热不可能体现为可用的燃料发热量。高位发热量除去燃烧产物水蒸汽汽化潜热后，即为低位发热量，以符号 $Q_{dw}$ 表示。锅炉中能利用的燃料热量就是低位发热量，我国即以低位发热量计算煤的发热量。

为便于比较耗煤量，工程上还采用了“标准煤发热量”的概念。规定发热量为29308千焦/千克(7000大卡/千克)的煤为标准煤。比较不同煤种煤耗时，应把各种煤折算成标准煤进行比较。

2、挥发份：在规定的实验条件下，将煤隔绝空气加热至900°C，煤中挥发分解出的气体除去水蒸汽，剩余部分统称挥发份。

挥发份主要由可燃性气体 $C_mH_n$ 、 $H_2$ 、CO等组成，也含少量的 $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 。挥发份是表征煤的燃烧性能的重要指标，也是对煤分类的主要依据。挥发份的数量和性质对燃烧过程影响

很大，一般说来，挥发份多的煤，容易着火和燃烧。挥发份少的煤，着火困难，燃烧也不容易稳定和完全。

煤析出水分和挥发份的残留物叫焦炭，其成分是纯碳和灰分。煤在受热形成焦炭过程中，有胶质体析出、分解并固化。胶质体的多少用胶质层最大厚度表示，反映了煤的焦结性。焦结性对层燃炉的燃烧有显著影响，不焦结呈粉状的焦炭及熔融粘结的焦炭，都不利于空气流通和燃烧。

3、灰熔点：灰熔点是煤的重要性能指标之一，关系到锅炉运行的安全可靠。锅炉炉膛温度很高，灰熔点低的煤燃烧后形成的灰渣可能呈熔化或粘结状态，附着在受热面、炉墙或炉排上，造成结渣，影响锅炉的正常运行，严重时甚至导致被迫停炉。

煤灰成分十分复杂，没有明确固定的熔化温度，工程上规定用三个特征温度  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  来表示灰熔点。即按规定的“角锥法”，将灰粉末制成确定尺寸的角锥，置于半还原性气氛的电炉中加热。把角锥尖端开始变圆或弯曲时的温度称为变形温度  $t_1$ ，把角锥尖端弯曲到和底盘接触或呈半球时的温度称为软化温度  $t_2$ ，把角锥熔融到底盘上开始流溢或平铺在底盘上显著熔融时的温度称为流动温度  $t_3$ 。

为避免在锅炉炉膛中结渣，通常在设计锅炉时通过调节炉膛中受热面的多少来调节锅炉中的换热量及烟气温度水平。对中小型锅炉来说，规定炉膛出口的烟气温度不得超过燃料灰分的变形温度  $t_1$ ，并不得超过  $1100^\circ\text{C}$ 。

### (三)、煤质分析

煤质分析是正确指导锅炉设计和运行的一项基础工作，通常分元素分析和工业分析两种。

1、元素分析：即对煤中各种成分的重量百分含量进行分析，通常可以根据需要在不同的基础上进行分析：

(1)、应用基（工作基）分析：以运行中正在燃用的煤为基础进行分析，分析结果体现为下式：

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y = 100\%$$

式中左边各项是煤中相应成分的百分含量数（%），角码“y”表示应用基。

(2)、分析基分析：以实验室条件下自然风干以后的煤为基础进行分析，体现为：

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S^f + A^f + W^f = 100\%$$

角码“f”表示分析基。分析基成分可以避免煤在开采、运输、贮存堆放中水分变化造成的影响。

(3)、干燥基分析：以去掉全部水分，完全干燥态的煤为基础进行分析，结果为：

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g = 100\%$$

角码“g”表示干燥基。

(4)可燃基分析：煤中灰分也不是一成不变的，在开采、运输堆放中常因土石等的掺入而改变灰分，并导致其他成分百分含量的改变。为避免这种影响，可对除去全部水分和灰分的煤进行分析，即对煤中参与燃烧化学反应的各元素进行分析，叫可燃基分析：

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100\%$$

角码“r”表示可燃基。

显然，由于上述分析的基础各不相同，所以同种成分在不同基中所占百分数不同，基础

越小, 该成分的百分含量越大, 如  $C^r > C^s > C^t > C^y$ 。

元素分析用于锅炉的设计计算。锅炉燃烧需要的风量, 产生的烟量及锅炉风机的容量等, 都得以元素分析为基础确定。

2、工业分析: 用以确定煤中水分、灰分、挥发分、发热量, 以鉴定煤的质量, 正确进行锅炉的燃烧调整。因而工业分析常用于中大型锅炉运行调整之中。并习惯于测定应用基水分  $W^y$ , 应用基灰分  $A^y$ , 可燃基挥发分  $V^r$  及应用基发热量  $Q_{dw}^y$ 。

### 三、煤的分类

煤的分类方法很多。煤炭行业根据煤的挥发份和焦结性对煤进行分类。锅炉行业习惯于主要根据煤中挥发份的含量, 将煤分成无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤四大类。近年来, 我国锅炉行业又将工业锅炉用煤分成石煤与煤矸石、褐煤、无烟煤、贫煤、烟煤五大类, 如表 1—1 所示。

表 1—1 工业锅炉用煤分类

煤 种	可燃基挥发份 $V^r$ (%)	应用基低位发热量 $Q_d^y$ , 千焦/千克 (大卡/公斤)
石煤及 煤矸石	I I类 III	$\leq 5443$ (1300) 5443~8374 (1300~2000) $> 8374$ ~11304 (2000~2700)
褐 煤	$> 40$	8374~14654 (2000~3500)
无烟煤	I I类	$> 14654$ ~20934 (3500~5000)
	III	$> 20934$ (5000)
	5~10	$> 20934$ (5000)
贫 煤	$> 10$ ~20	$\geq 18841$ (4500)
烟 煤	I I类	$> 11304$ ~15491 (2700~3700)
	III	$> 15491$ ~19678 (3700~4700)
	$\geq 20$ $\geq 20$ $\geq 20$	$> 19678$ (4700)

石煤是一种劣质无烟煤, 外观象褐色石头, 比重大, 质硬, 含灰量高, 挥发份及发热量低, 难于点燃及燃烧。

煤矸石是采煤时带出的废料或原煤筛选后的副产品, 发热量很低, 难于单独燃烧。

石煤和煤矸石可用作沸腾炉的燃料。

褐煤呈棕褐色, 挥发份  $V^r$  高达 40% 或更高, 水分约在 20% 以上, 发热量低, 容易着火, 但有时并不容易燃烧。

无烟煤质硬, 色黑, 有光泽, 挥发份含量少, 着火困难, 燃烧时有短蓝色火焰。其焦炭呈粉末状, 焦结性差, 且灰熔点一般较低, 燃烧不容易完全。

无烟煤含碳量很高但含氢较少, 因而发热量较高。

贫煤的挥发份含量及发热量介于烟煤与无烟煤之间。贫煤较难着火与燃烧, 燃烧时火焰

短，焦结性差。

烟煤的挥发份及含碳量都高，因而容易着火与燃烧。但也有灰分高、发热量低的所谓劣质烟煤，其着火燃烧都较困难，一般中小型锅炉难于燃用。

#### 四、煤的燃烧

##### (一)、煤的燃烧过程

煤的燃烧过程是煤中的可燃成分与空气中的氧剧烈化合并放出热量的过程。煤在燃烧中通常经历以下四个阶段：

##### 1、准备阶段

即煤被预热干燥和干馏的阶段。煤被加热到 $100^{\circ}\text{C}$ 以上时，煤中水分即汽化析出，煤被加热到 $130\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时，即分解析出可燃性挥发分，并形成焦炭。

##### 2、挥发分着火和燃烧阶段

当挥发分被析出并被加热到一定温度时，它就着火燃烧，形成黄色明亮的火焰。

不同煤种，挥发分着火的温度也不相同。褐煤的着火温度为 $250\sim 450^{\circ}\text{C}$ ，烟煤为 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，无烟煤为 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。

挥发分燃烧时，放出大量的热，焦炭被加热到赤红程度，但此时焦炭并未燃烧。

##### 3、焦炭燃烧阶段

焦炭（含灰的固定碳）是煤中的主要可燃质，燃烧时放出大量的热量，但焦炭是固体，它的燃烧是在表面上进行的，是固态的碳与气体的氧之间的反应，所以反应速度很慢，反应时间较长，且内层焦炭的燃烧还受外层灰壳的包围和阻碍，需要合理地组织送风，加强空气向焦炭表面的扩散，以加快焦炭的燃烧。

##### 4、燃尽阶段

燃尽阶段通常进行得很慢，放热不多，需要的空气也不多，但需要维持较高炉温和维持一定时间，对层燃炉则应加强拨火，除去灰壳，以利燃尽。

##### (二)、燃烧需要的条件

通过上述燃烧过程的分析不难看出，为使燃烧过程进行得迅速而完全，需要三个条件：

##### 1、足够高的炉温

温度是燃烧的首要条件。炉温的高低对于煤的预热、干燥和着火有直接的影响。温度高，着火快，焦炭与氧的反应速度也快，燃烧得也更完全。

无烟煤的挥发分少，着火温度高，着火困难。褐煤虽然挥发分很多，着火温度低，但由于水分大，干燥需要吸收的热量多，本身发热量又低，所以也会发生着火困难的情况，因此，对于无烟煤和灰分多、水分大、发热量低的劣质煤，维持较高的炉温更是必要的。

##### 2、适量的空气，并使空气与燃料充分地接触与混合。

在炉温足够高的情况下，燃烧反应速度很快，空气也很快消耗掉，所以供给的空气必须足够。实际送入炉中的空气是过剩的，但不能太多，而要适当，以避免降低炉温。

在炉温足够高和空气适量的情况下，关键就在于如何使空气与燃料很好地接触及与可燃气体良好混合了，为此，提高空气冲刷碳粒的速度及加强气流的混合、扰动，可以提高燃烧速度，确保燃烧完全。

##### 3、保证燃烧所需要的时间和空间

燃烧需要一定的时间，如果燃烧速度快，则燃烧时间可以短一些，否则时间就长一些。

烟气中的可燃物质，包括可燃气体与细煤屑，一边随烟气移动一边燃烧，如果炉膛容积太小，烟气流动太快，烟气在炉内停留时间太短，就不能使可燃物充分燃烧，所以保证燃烧时间就反映为需要足够的炉膛容积——燃烧空间。另外，还应注意需要充分利用炉膛容积，要使烟气在炉膛内有较好的充满度，避免出现死角。

对移动式炉排，则要保证煤在炉排上有足够的停留时间，以使灰渣中的碳充分燃尽。

燃烧设备的任务，就是为燃烧创造上述三个条件。

## 五、燃烧的空气供应

### (一)、理论空气量

以一千克煤燃烧为基础，依据化学反应方程式，算出其可燃成分碳(C)、氢(H)、硫(S)完全燃烧所必需的氧气量和空气量，这样的空气量叫理论空气量。理论空气量可以用标准状态下空气的体积来表示。不同成分的煤，所含可燃物的多少不同，因而理论空气量也不同。

理论空气量可按下式计算：

$$V^{\circ}_K = 0.0889(Cy + 0.375Sy) + 0.265Hy - 0.0333Oy$$

(标准米<sup>3</sup>/千克)

(1-1)

式中Cy、Sy、Hy、Oy是燃料应用基元素分析的成分百分含量数。

### (二)、过剩空气系数

在燃烧过程中，煤中的可燃物不可能和空气中的氧气百分之百接触和反应，按照理论空气量供应空气，实际上不能保证燃烧完全。为保证燃料完全燃烧，必须多供应空气，多供应的这部分空气叫过剩空气量。理论空气量加上过剩空气量，就是一千克燃料完全燃烧所需要的空气量，叫实际空气量，以V表示。实际空气量与理论空气量之比，叫过剩空气系数，或过量空气系数，以α表示。即：

$$V = \alpha V^{\circ}_K$$

过剩空气系数是锅炉运行中重要的技术经济指标之一，它的大小与锅炉结构、燃料种类、燃烧方法及锅炉负荷的大小有关。过剩空气系数太小，燃烧不完全，烟囱冒黑烟，锅炉效率降低；过剩空气系数太大，炉膛温度就要降低，影响燃烧，烟气量也相应增多，排烟热损失和引风机电耗都增加。因此，要求在保证燃烧的前提下，尽量减小过剩空气系数。

通常控制的过剩空气系数是炉膛出口的过剩空气系数，其数值对室燃炉一般在1.10~1.50之间，对层燃炉一般在1.3~1.6之间，煤质越差，过剩空气系数就越大。

由于多数锅炉炉膛采用负压燃烧，所以炉膛和烟道不可避免地要由周围漏进空气，使得烟气在流动中，过量空气不断增加，这对传热和排烟都有重要影响。

### (二)、空气预热

保证炉膛有足够高的炉温和适量的空气，二者往往是矛盾的，但二者恰恰又都是燃烧所需要的基本条件。

为什么说二者是矛盾的呢？显而易见，要使炉膛中燃料迅速充分燃烧，就得有适量的空气，就得向炉膛中鼓风，而环境温度下的风吹进炉膛，就要大大降低炉膛温度，不利于燃料

着火燃烧。这实际上也是着火与继续燃烧之间的矛盾。

解决这个矛盾的主要措施之一，就是在锅炉尾部烟道中装置空气预热器，用烟气的余热把进入炉膛之前的空气加热到适当的温度。这样既有利于燃烧，又降低了排烟温度，提高了热效率。

锅炉容量大于6吨/时，燃用无烟煤、劣质烟煤的层燃炉及各种室燃炉，都可以在尾部烟道布置空气预热器，但层燃炉的热风温度不需要也不易太高，一般不超过 $150^{\circ}\text{C}$ 。

## 第四节 锅炉通风

锅炉运行过程中，必须连续不断地将空气送入炉膛，并将燃烧产物排出炉膛和烟道，这种连续地输入空气及排除燃烧产物的过程叫通风过程。通风不仅是维持燃烧的基本条件，也对传热有重要影响，因而通风是锅炉正常工作必不可少的环节之一。

空气及烟气在锅炉中流动要克服一定的阻力，其动力来自烟囱或是通风机械。单纯依靠烟囱的抽力进行通风的，叫自然通风。主要依靠通风机械进行通风的，叫强制通风。

### 一、自然通风

锅炉烟囱具有一定的吸风和排烟作用，如图1-1所示。烟囱内部是温度较高的烟气，重度小，烟囱外部是温度较低的空气，重度较大，在烟囱内的烟气柱及烟囱外等高的空气柱之间，就有一个因重度差形成的压差，这个压差 $\Delta P$ 就是烟囱的抽力或通风力。

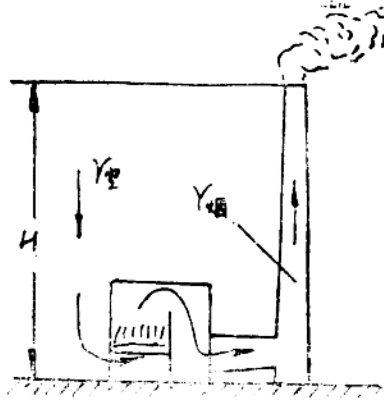


图1-1 自然通风系统

烟囱的抽力取决于烟温、大气温及烟囱高度，烟温越高，周围大气温度越低，烟囱抽力越大；烟囱高度越高，其抽力越大。

确定烟囱高度不仅应考虑排烟能力，还应考虑环境保护的要求。

锅炉的烟囱不能无限制地高，烟囱增高时烟气流经烟囱的阻力也相应增加，排烟温度也不宜过高，否则会明显降低锅炉经济性。因而自然通风的通风力是有限的，自然通风适用于小型、结构简单、无尾部受热面的锅炉。

### 二、强制通风

强制通风又分为机械引风、机械送风和平衡通风三种（图1-2）。

**机械引风：**也叫负压通风，主要利用烟囱前的引风机来克服烟、风道的阻力，烟气和空气都处于被抽吸状态，炉膛和烟、风道中都呈负压。这种方式只适用于烟风道阻力不太大的小型锅炉。如烟风道阻力很大，采用这种方式必然在炉膛或烟风道中造成较高的负压，从而使漏风量增加，降低锅炉效率。

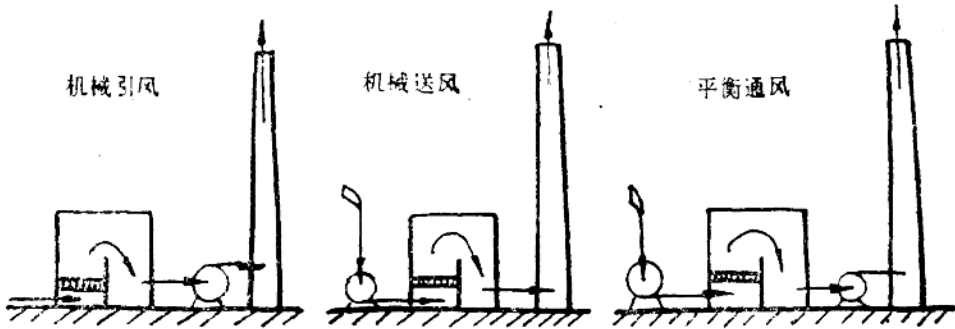


图 1—2 强制通风系统

机械引风时，引风机输送的是温度较高的烟气，工作条件恶劣，磨损严重，较易损坏。

**机械送风：**也叫正压通风，在锅炉烟风系统中只装送风机，靠送风机压头来克服烟风道的全部阻力。这种通风方式的优点是消除了漏风，提高了燃烧强度和锅炉效率，送风机输送的是低温洁净的空气，工作条件较好。但炉膛和烟风道都在正压下工作，要求炉墙烟道必须有严格的密封，否则漏烟造成热损失，污染运行场所，甚至喷火伤人。

正压通风仅用在需要强化燃烧的场合，国内在少数燃油、燃气锅炉中采用正压通风。

**平衡通风：**在锅炉烟风系统中同时装置送风机和引风机。利用送风机克服风道、燃烧器或燃料层的阻力，把风送入炉膛，使风道在正压下工作；利用引风机克服全部烟道、受热面、除尘设备的阻力，使炉膛和烟道在负压下工作。

平衡通风既能有效地送风和排烟，又能使炉膛和烟道处于合理的负压之下（炉膛出口负压 2~3 毫米水柱），比起正压通风来，锅炉房的安全和卫生条件较好；比起负压通风来，漏风量又较小，因而是采用得最为普遍的通风方式。

## 第五节 锅炉中的传热

传热过程是锅炉工作的主要过程之一，传热过程的正常与否，对锅炉的安全经济运行有直接的影响。

### 一、三种传热方式

众所周知，自然界中的热量总是自发地不断地由高温热源传向低温热源，由高温物体传给低温物体，而不会反向传播。热量的传播方式有传导（导热）、对流、辐射三种，三种传



热方式的机理和规律各不相同。

(一) 传导: 物体直接接触的各部分之间由高温部分向低温部分的热量传递, 叫热传导, 简称传导或导热。日常生活中, 人们手拿锅铲、饭勺或饭盒感到烫手, 就是热量从铲、勺的一端传导至另一端、从饭盒的一侧传导到另一侧的缘故。

不同物质传导热量的能力不同, 比如各种金属的导热能力一般比非金属强烈。物质导热能力的大小常用导热系数表示。导热系数的概念是, 在单位温差下, 经过单位厚度的某种物质在单位时间内传导的热量。导热系数常以符号 $\lambda$ 表示, 单位是瓦/米 $\cdot$ °C。烟灰导热系数大约是钢材导热系数的 $1/400\sim 1/800$ , 水垢导热系数是钢材导热系数的 $1/10\sim 1/760$ , 即烟灰、水垢的导热能力显著低于钢材。如果受热面钢材上积有烟灰或结有水垢, 就会明显降低热量传播, 影响锅炉的安全性及经济性。

通过平板导热时, 导热量可按下式计算:

$$Q = \frac{\lambda F (t_1 - t_2)}{S} \quad (1-2)$$

$$\text{或者 } q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda (t_1 - t_2)}{S} = \frac{\lambda \Delta t}{S} \quad (1-3)$$

式中 $Q$ ——单位时间内传过给定平板的热量, 瓦;

$F$ ——垂直于热量传导方向的平板面积, 米<sup>2</sup>;

$q$ ——单位时间传过单位面积的热量, 瓦/米<sup>2</sup>;

$S$ ——平板厚度, 米;

$t_1, t_2$ ——平板两面的温度, 其差值 $\Delta t$ 即平板两面的温差, °C;

$\lambda$ ——平板的导热系数, 瓦/米 $\cdot$ °C。

不难看出, 通过平板导热时, 单位时间通过单位面积的导热量与导热系数、导热温差成正比, 与导热平板的厚度成反比。

锅炉中的受热面绝大部分是圆筒或圆管金属壁面。当圆筒或圆管直径较大、壁厚较薄时, 可以近似地看成平板导热, 用公式(1-2)或(1-3)计算导热量。

精确计算时, 通过圆筒或圆管壁的导热量用下式计算:

$$q = \frac{\lambda \Delta t}{R_w \ln \beta} \quad (1-4)$$

式中 $q$ ——以圆筒外表面计, 单位时间通过单位面积的导热量, 瓦/米<sup>2</sup>;

$\lambda$ ——圆筒金属导热系数, 瓦/米 $\cdot$ °C;

$\Delta t$ ——圆筒内外壁面的温度差, °C;

$R_w$ ——圆筒外半径, 米;

$\beta$ ——圆筒外半径与内半径的比值。

## (二)、对流放热

流体(气体或液体)流动中与它直接接触的固体壁面间进行的热量传递, 叫对流放热, 简称对流或者放热。夏季吹电风扇或游泳感到凉快, 就是人体与空气或水之间进行对流放热最简单的例子。

对流放热量可以按照下式计算:

$$q = \alpha \Delta t \quad (1-5)$$