

# 章节 3.6

## 锅炉效率和燃烧

## 锅炉效率和燃烧

这部分广泛的讨论燃烧过程，这是锅炉总效率的基本部分。读者要了解更深的知识可阅读专业书籍和燃烧器制造厂的技术资料。

锅炉效率简单表示能量输出与输入的关系，用百分比表示：

$$\text{锅炉效率(\%)} = \frac{\text{输出至蒸汽的热量}}{\text{燃料提供的热量}} \times \frac{100}{1} \quad \text{公式3.6.1}$$

在下面两部分论述“蒸汽输出的热量”和“燃料提供的热量”。

### 输出至蒸汽的热量

这个计算(用蒸汽表)要知道：

- 给水温度。
- 蒸汽输送压力。
- 蒸汽流量。

### 燃料提供的热量

热值

有两种表示方法，“总热值”和“净热值”。

总热值

这是燃料中理论总能量。但燃料都含有氢与氧燃烧后生成水，以蒸汽的形式从烟道排出。燃料的总热值包括这部分水的蒸发焓。在锅炉设备里的烟气不会冷凝，因此锅炉实际得到的热量减少了。

准确控制空气量对锅炉效率至关重要。

- 太多的空气使炉膛冷却，并带走有用的热量。
- 空气量太少则燃烧不完全，未燃烧的燃料被带走并产生浓烟。

图3.6.1 燃油数据

燃油类型 - 等级	总热值(MJ/l)
轻油 - E 40.1	
中油 - F 40.6	
重油 - G 41.1	
船用油 - H	41.8

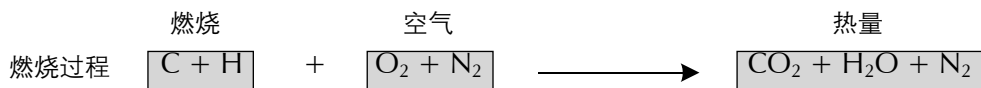
表3.6.2 燃气数据

燃气类型	总热值(MJ/m³常压下)
天然气	38.0
丙烷	93.0
乙烷	122.0

### 净热值

这个燃料热值不包括排放到烟道的蒸汽能量，该值一般用于计算锅炉效率。一般情况下：

$$\text{净热量} \approx \text{总热值} - 10\%$$



注：

C = 碳，H = 氢，O = 氧，N = 氮

准确控制空气量对锅炉效率至关重要。

- 太多的空气使炉膛冷却，并带走有用的热量。
- 空气量太少则燃烧不完全，未燃烧的燃料被带走并产生浓烟。

实际上，很难做到完全燃烧：

- 燃烧器周围的情况不理想，不可能保证碳、氢和氧分子完全匹配。
- 部分氧分子与氮分子结合形成氧化氮( $\text{NO}_x$ )。

为确保完全燃烧，必须有一定量的“过剩空气”。这对锅炉效率有影响。在很多小锅炉上空气/燃料混合比的控制是“开环”的。就是说，燃烧器有一系列的凸轮和连杆，它们已被校准对特定的燃烧率提供指定的空气量。很明显，作为机械装置将会磨损并不时需要校准。装置必须定期维护和校准。在更大的设备上，必须配备“闭环”系统，在烟道使用氧探测器以控制燃烧空气闸门。锅炉燃烧室的空气泄漏对燃烧的准确控制有副作用。

## 法规

目前，对气候变化有一个全球的承诺，160个国家签署了1997东京协议。这些国家同意采取积极措施以达到：

- 减少对大气的有害气体排放 – 尽管二氧化碳( $\text{CO}_2$ )在协议中限制最少，到现在为止，占总气体排放的80%被减少了。
- 量化每年减少的燃料使用 – 可以采用可选的，无污染能源，或者更高效的使用同样的能源。

在英国，该承诺参考“英国国家空气质量战略”，它通过一些法律法规发挥作用。其它国家有类似的策略。

## 技术

来自关于污染的法规，锅炉用户的经济性的压力，加上电脑芯片的威力，锅炉燃烧和燃烧器都已相当先进。

最新式燃烧器的现代锅炉可以做到：

- 烟气再循环以确保最合适的燃烧，最小的过剩空气量。
- 成熟的电子控制系统可检测烟气的所有成分，并调节燃料和空气流量以保持工况在指定参数范围内。
- 极大地改进了调节比（最大和最小燃烧率的比值），能在更大的运行范围内满足效率和排放参数。

## 热损失

已经讨论了炉膛燃烧，特别是准确空气比以及它对完全高效燃烧的重要性，接着要讨论热损失和低效率的其它潜在根源。

### 在烟气里的热损失

它可能是单项最大的热损失，工程管理可减少大部分的损失。该损失来源于离开锅炉烟气的温度。很明显，烟道的烟气越热，锅炉效率越低。

烟气太热可能是以下两个原因之一：

1. 在锅炉特定负荷时燃烧器产生了比需要更多的热能：
  - 这说明燃烧器和风门机构需要维护和重新校准。
2. 锅炉内的传热面功能性错误，热量不能传递给水：
  - 这说明传热面积垢，需要清洁。

必须注意：太冷的烟气可能导致温度下降到露点以下，可能形成下列物质而发生腐蚀：

- 硝酸（来自燃烧空气中的氮）。
- 硫酸（如果燃料含硫）。
- 水。

## 热辐射损失

由于锅炉比周围环境热，部分热量被传给环境。保温层的损坏或很差的保温将大大增加热损失。一个适当的保温良好的，5MW的锅壳或水管锅炉其散热损失在锅炉总能量的0.3%到0.5%之间。这个数量显然不是很多，但必须记住这是锅炉满负荷的0.3%到0.5%，而且该损失保持恒定，即使锅炉不输出蒸汽时也是如此。这表明为了运行更高效，锅炉应该运行在其最大负荷。这要求锅炉房运行人员与生产部门应紧密合作。

表3.6.3 典型的锅炉效率

锅炉型式	净效率 (%)
快装式，三回程	87
带省煤器的水管锅炉	85
经济型，二回程	78
兰开夏锅炉	65
带省煤器的兰开夏锅炉	75

## 燃烧器和控制

燃烧器的职责：

- 以正确的比例混合空气和燃料，高效完全的燃烧。
- 决定火焰的形状和方向。

## 燃烧器的调节比率

燃烧器一个很重要的功能是调节比率。通常表示为最大燃烧率与最小可控燃烧率的比值。调节比率不是简单的输送不同量的燃料进入锅炉，它在经济性和法规方面日益重要，它能使燃烧器在全运行范围内提供高效率 and 适宜的燃烧，满足日益严格的排放法规。就像已经提到的，煤作为锅炉燃料趋向于限制在专门的应用，如电站水管锅炉。下面将讨论对锅壳锅炉最普通的燃料。

## 油燃烧器

燃油的高效燃烧要求高的燃料表面积相对其体积的比值。经验表明燃油颗粒大小在20到40 $\mu\text{m}$ 是最好的。如果颗粒：

- 大于40 $\mu\text{m}$ ，将不能完成燃烧过程而被火焰带走。
- 小于20 $\mu\text{m}$ ，可能行程太快以至没有燃烧就被火焰带走。

油燃烧一个很重要的方面是黏度。油的黏度随温度变化：油越热，越容易流动。确实，大部分人都意识到重油需要加热以保证流动。不明显的是温度以及黏度的变化将影响燃烧器喷嘴产生的燃油颗粒的尺寸。基于这个原因，黏度要求准确控制以保证提供喷嘴一个稳定的工况。

## 压力喷射燃烧器

压力喷射燃烧器是将燃油喷入炉中燃烧的设备，位于压力管道末端喷嘴上有孔，如图3.6.1所示。典型的燃油压力范围是7到15 bar。在工作范围内，当燃油通过该孔喷进炉膛时产生很大的压降会造成燃油雾化。用拇指压住浇花用的软管产生同样的效果。

在孔（喷嘴）前燃油压力的即时变化控制燃烧器的燃料流量。但是，压力 (P) 和流量 (F) 之间的关系有平方根的特性， $\sqrt{P\alpha F}$ ，或  $P\alpha F^2$ 。

$$\begin{aligned} \text{例如如果: } F_2 &= 0.5 F_1 \\ P_2 &= (0.5)^2 P_1 \\ P_2 &= 0.25 P_1 \end{aligned}$$

如果燃料流量减少到50%，用于雾化的能量减少到25%。这就意味着对一个精确的喷嘴可得到的调节比被限制接近2:1。为了克服这个限制，压力喷射燃烧器提供一系列可互换的喷嘴以适合不同的锅炉负荷。

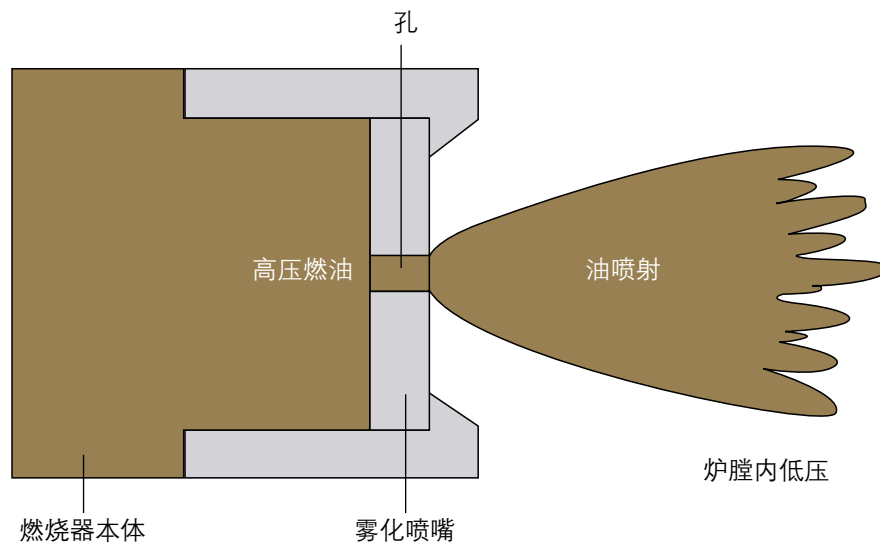


图3.6.1 压力喷射燃烧器

压力喷射燃烧器的优点:

- 成本较低。
- 容易维护。

压力喷射燃烧器的缺点:

- 如果工厂运行特性一天内的变化超过了范围，锅炉必须停炉更换喷嘴。
- 容易被杂质堵塞。因此必须有很好的维护和安装燃油细目过滤器。

转杯燃烧器

燃油通过中心管供应，并流注到一个快速旋转锥体的内表面，如图3.6.2所示。当燃油沿着转杯移动（离心力的作用），随着杯帽圆周越大，油膜变得越来越薄。最后，燃油从锥体唇缘像喷雾一样喷出。

因为是借助于转杯产生雾化，而不是依靠燃油压力，因此调节比比压力喷射燃烧器增加很多。

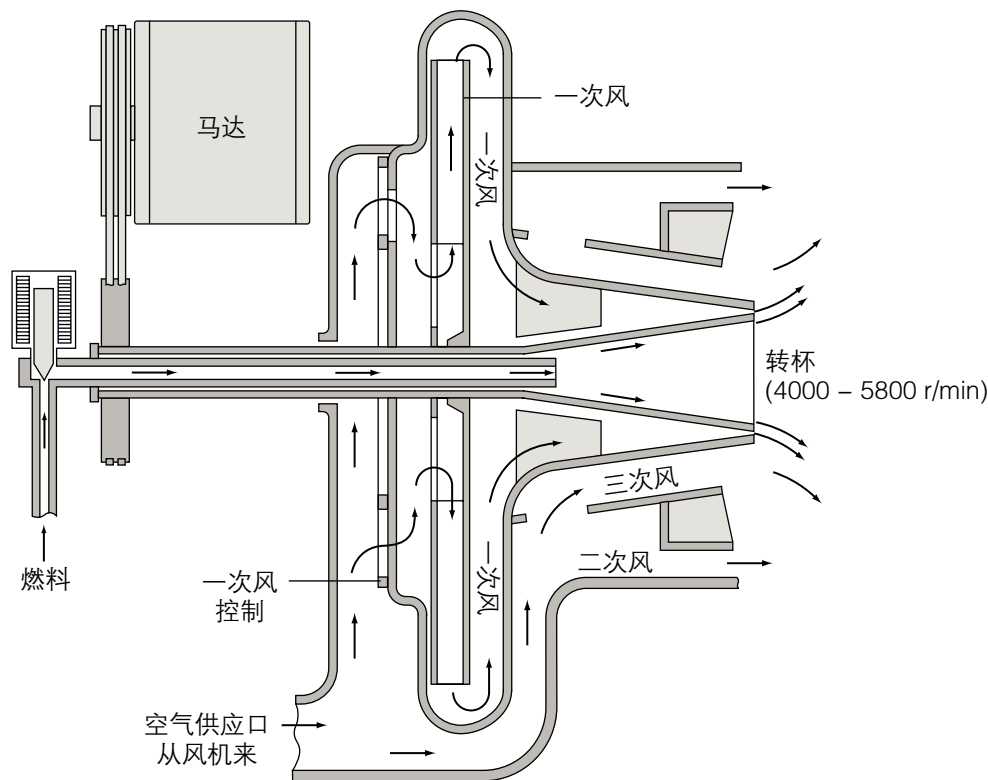


图3.6.2 转杯燃烧器

转杯燃烧器的优点:

- 坚固。
- 好的调节比。
- 燃油黏度限制小。

转杯燃烧器的缺点:

- 购买和维护较贵。

### 气体燃烧器

目前, 燃气可能成为英国最通用的燃料。作为气体, 雾化不是问题, 燃烧所需要的是将燃气与适当比例的空气混合。有两种气体燃烧器即“低压”和“高压”燃烧器。

#### 低压燃烧器

在低压运行, 通常为2.5到10 mbar之间。燃烧器是简单的文丘里装置, 如图3.6.3所示, 燃气从喉口区域进入, 燃烧空气从外围吸入。输出限制在接近1 MW。

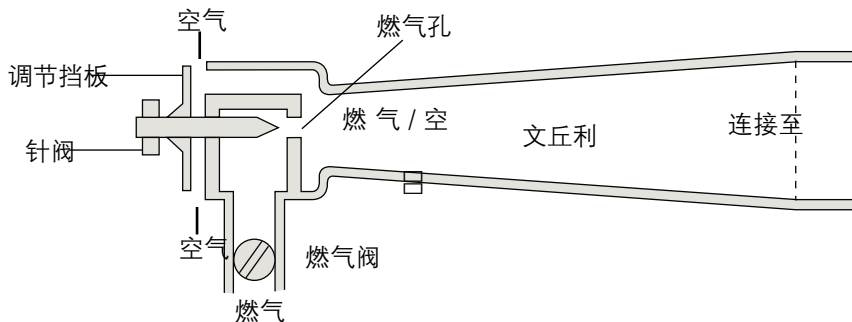


图3.6.3 低压燃烧器

#### 高压燃烧器

高压运行, 通常在12和175 mbar之间。并且可包括一些喷嘴用于产生特别的火焰形状。

#### 两用燃料燃烧器

吸引人的“可中断供应”燃气价格意味着这是英国大多数单位的选择。但是这些单位在燃气供应中断时需要继续运行。

通常的安排是在现场有燃油供应，当燃气中断时锅炉使用燃油。因此开发了两用燃料燃烧器。这种燃烧器设计用燃气为主燃料，但有一个附加装置可用于燃油，如图3.6.4所示。

燃气公司提醒注意说供气中断的时间可能很短，因此转换到燃油燃烧应尽可能容易，一般程序为：

- 切断燃气供应。
- 打开燃油供应管道，并启动燃油泵。
- 在燃烧器控制面板上选择“油燃烧”。  
(这将改变不同燃料的空气设定)
- 吹扫并启动锅炉。

这个操作进行得很快。在一些单位进行定期操练使操作人员熟悉该过程。但是，由于燃油仅仅是“备用”，可能仅用很短的时间。在更复杂的设备上，对高参数锅炉，可能要取出气体燃烧器用燃油燃烧器替换。

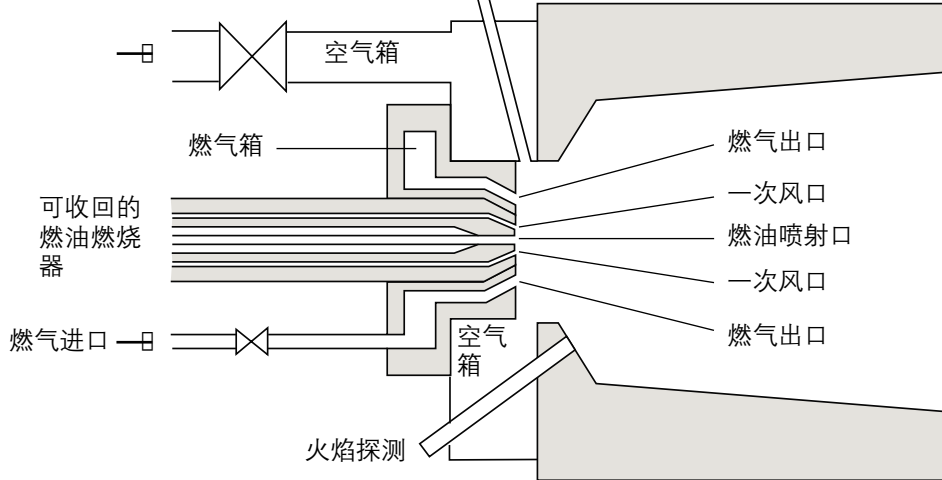


图3.6.4 两用燃料燃烧器

用”，可能仅用很短的时间。在更复杂的设备上，对高参数锅炉，可能要取出气体燃烧器用燃油燃烧器替换。

表3.6.4 各种燃烧器的典型调节比

燃烧器类型	调节比
压力喷射型	2:1
转杯型	4:1
燃气型	5:1

### 燃烧器控制系统

读者应该意识到燃烧器控制系统不能孤立的看待。燃烧器，燃烧系统和水位控制系统应兼容，并互相补充以高效率的满足工厂蒸汽需求。

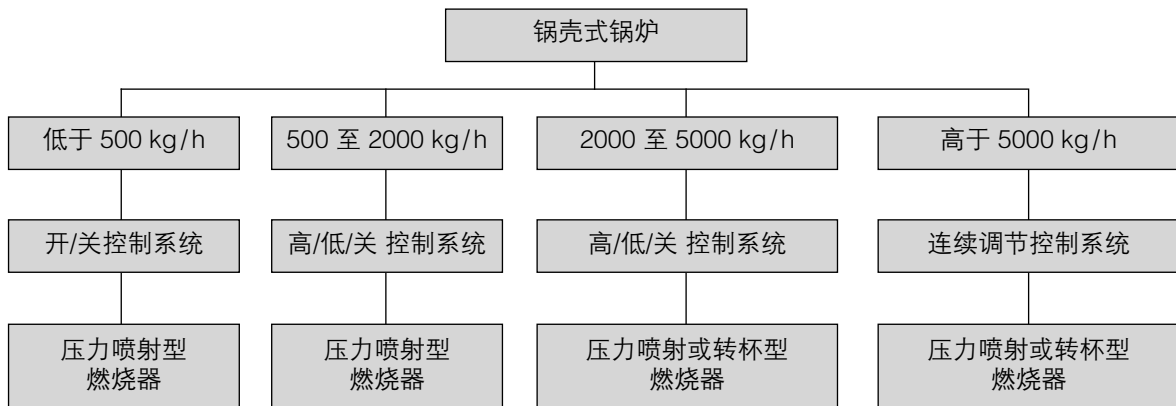


图3.6.5 控制和燃烧器形式与锅炉出力的关系

接下来概括描述基本的燃烧器控制系统。

### 开/关 控制系统

这是最简单的控制系统，燃烧器要么满负荷运行，要么关闭。这种控制方法的主要缺点是锅炉要承受每次点火带来的热冲击。因此仅用于小锅炉，最大到500 kg/h。

开/关 控制系统的优点：

- 简单。
- 成本最低。

开/关 控制系统的缺点：

- 如果燃烧器刚刚关闭高负荷出现，蒸汽可供量减少。最坏的情况是导致锅炉汽水共腾并连锁。
- 热循环。

### 高/低/关 控制系统

这是稍微复杂的系统有两个燃烧档位。燃烧器首先工作在较低的燃烧档位，然后根据需要转换到全负荷燃烧，因此避免了热冲击的影响。负荷减少时燃烧器回复到低挡，限制了锅炉内的热应力。这种系统通常配备的锅炉到5000 kg/h。

高/低/关 控制系统的优点：

- 锅炉较好的对大负荷反应，因为低档燃烧位置保证锅炉贮存更多的热量。
- 当燃烧器处于低档位时大负荷出现，锅炉能够立即反应增加燃烧到“高火”，因此省略吹扫循环。

高/低/关 控制系统的缺点：

- 比开/关控制复杂。
- 比开/关控制更贵。

### 连续调节控制系统

连续调节燃烧器控制可在全调节范围改变燃烧率与锅炉负荷相匹配。每次燃烧器停止和重启动，系统必须用冷空气吹扫锅炉回程。这样浪费能源并降低效率。完全调节意味着锅炉在整个范围内保持燃烧使热效率最大，热应力最小。这种控制形式可用于任何尺寸的锅炉，但一般用于锅炉容量超过10000 kg/h。

连续调节控制系统的优点：

锅炉可以承受大的、波动的负荷。这是因为：

- 锅炉压力维持在控制比例带的上部，储存的能量在最大水平。
- 如果在短期内要求更多的能量，控制系统能通过增加燃烧率立即反应，而不用暂停进行吹扫循环。

连续调节控制系统的缺点：

- 更贵。
- 更复杂。
- 燃烧器要求有高的调节比。

### 安全

燃料中含有大量能量、燃烧容易、快速。因此必须：

- 现场有安全程序并严格遵守。
- 安全连锁装置，例如吹扫时间控制器处于良好的工作状态。



## Questions

1. With an oil burner, what is the effect of insufficient combustion air ?
  - a| The burner turndown ratio is reduced
  - b| Excessive CO<sub>2</sub> is produced
  - c| The boiler output is reduced
  - d| All of the above
  
2. What is the likely cause of a slow increase in flue temperature with the burner at a maximum firing rate ?
  - a| High TDS
  - b| The pressure thermostats have failed
  - c| No water in the boiler
  - d| Scaling in the boiler
  
3. Which one of the following applies to a rotary cup burner ?
  - a| The fuel viscosity is less critical than with a pressure jet
  - b| They are prone to being blocked by debris
  - c| Their turndown ratio is typically 2:1
  - d| To cater for large load variations nozzle changes are required
  
4. What is the disadvantage of an on/off burner control ?
  - a| They are of complex operation
  - b| Thermal cycling
  - c| Suitable only for oil burners
  - d| Can be difficult to modulate the burner
  
5. What is the advantage of modulating burner control ?
  - a| Inexpensive
  - b| Simple
  - c| It can be applied to any size boiler
  - d| Able to tolerate large and fluctuating loads
  
6. What is the advantage of interruptible tariff ?
  - a| Quick and easy to change to heavy fuel oil when required
  - b| Price of fuel
  - c| Convenience of supply
  - d| Price of interruptible gas lower than fixed supply

## Answers

1: d, 2: d, 3: a, 4: b, 5: d, 6: d