

# 第四章 燃料与燃烧

凡在燃烧时能放出大量热，并且此热量能有效地利用在工业或其他方面的物质，统称**燃料**。

- ❖ 1982-1990年期间世界能源需求总量年均增长率为**2.6%**
- ❖ 国际能源署(IEA)预测在近30年间一次能源需求增幅为**1.7%/年**，到2030年一次能源年需求量将达到**153亿吨石油当量**。
- ❖ 2006年在**石油进口国家和地区**中，欧洲低于平均水平，亚太地区其他国家、北美洲等均出现了负增长。只有**中国是大幅上涨且高于10年的平均水平**。
- ❖ **中国的煤炭消费增长占全球消费增长的72%**。全球三分之一初次能量的增长来自中国的需求。

按形态划分：气体燃料、液体燃料和固体燃料

按来源划分：天然燃料和人造燃料

表4.1 燃料的一般分类

来 源	物 态		
	气 态	液 态	固 态
天然原料	天然气	石 油	泥煤，烟煤，无烟煤， 褐煤，页岩
人造原料	高炉煤气、 焦炉煤气、 发生炉煤气	汽油、煤油、 柴油、 重油等	焦炭、煤粉等

## 1. 气体燃料：天然气，高炉煤气，焦炉煤气，发生炉煤气

- 1) 天然气：主要成分为可燃烃类，其中以甲烷为主；
- 2) 高炉煤气：炼铁的副产品，主要成分为CO，热值低；
- 3) 焦炉煤气：炼焦副产品，含碳、氢化合物，热值高，燃烧速度快；
- 4) 发生炉煤气：以固体燃料为原料，经气化后的人造气体。

## 2. 液体燃料

主要指石油及其加工产品，在窑炉中主要是重油。重油组成平均范围：(碳氢含量高，粘度大)

$C^r\%$ : 85-88%;  $H^r\%$ : 10-13%;

$N^r\%+O^r\%$ : 0.5 - 1;  $S^r\%$ : 0.2 - 1。

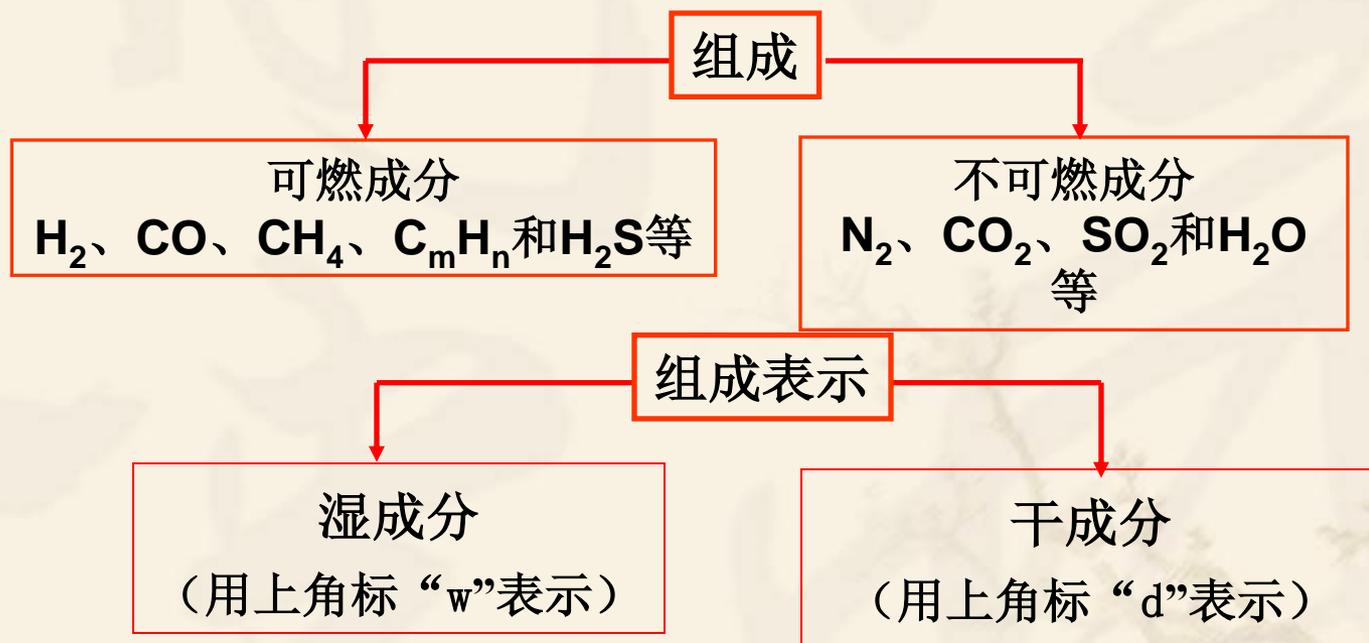
## 3. 固体燃料

天然固体燃料是煤：泥煤，褐煤，烟煤，无烟煤

# 第一节 燃料特性及各类燃料

## 一、燃料组成

### 1. 气体燃料组成



# 第一节 燃料特性及各类燃料

## 1.2. 气体湿组成和干组成 (体积组成)

湿组成：包括水蒸汽

$$\text{CO}^{\text{w}\%} + \text{H}_2^{\text{w}\%} + \text{C}_n\text{H}_m^{\text{w}\%} + \dots + \text{H}_2\text{O}^{\text{w}\%} = 100\%;$$

干组成：不包括水蒸汽

$$\text{CO}^{\text{d}\%} + \text{H}_2^{\text{d}\%} + \text{C}_n\text{H}_m^{\text{d}\%} + \dots = 100\%。$$

## 干、湿煤气组成的换算：

已知在湿煤气中水分含量为 $H_2O^w\%$ ，干、湿煤气组成之间换算如下进行：  
取 $100m^3$ 湿煤气、其中CO含量为 $CO^w\%$ ，则

$$V_{CO} = CO^w,$$

干煤气中CO含量为 $CO^d\%$ ，则CO体积可表示为：

$$V_{CO} = (100 - H_2O^w) CO^d\%$$

因此

$$CO^w = (100 - H_2O^w) CO^d \%$$

1kg水汽的体积为 $22.4/18=1.24(m^3/kg)$

饱和水蒸气标态含量 $G \text{ g}/m^3$ ， $100m^3$ 干煤气相应的水汽质量为  
 $100 \times G/1000(kg)$ ，标态水汽体积则为 $0.124G \text{ m}^3$

$$V_{CO} = (100 + 0.124G) CO^w \quad \%;$$

$$(100 + 0.124G) CO^w\% = 100 CO^d \%$$

$$CO^w\% = 100 CO^d / (100 + 0.124G)$$

例1 已知发生炉煤气组成

%  $\text{CO}^d$ ,  $\text{H}_2^d$ ,  $\text{CH}_4^d$ ,  $\text{O}_2^d$ ,  $\text{N}_2^d$ ,  $\text{CO}_2^d$

% 29.8, 15.4, 3.7 0.2 43.2 7.7

煤气温度为 $26^\circ\text{C}$ , 求该煤气的湿组成百分含量?

解: 查附录8, 当煤气温度 $26^\circ\text{C}$ 时,

其饱和水蒸气标态含量 $G=27.60\text{ g/m}^3$ ,

根据上述公式, 换算系数为:

$$100/(100+0.124\times 27.60)=0.967$$

湿煤气组成:  $\text{CO}^w\% = 29.8\times 0.967 = 28.82\%$ ,

$\text{H}_2^w\% = 15.4\times 0.967 = 14.89\%$ ,

$\text{CH}_4^w\% = 3.7\times 0.967 = 3.58\%$ ,

$\text{O}_2^w\% = 0.2\times 0.967 = 0.19\%$ ,

$\text{N}_2^w\% = 43.2\times 0.967 = 41.77\%$ ,

$\text{CO}_2^w\% = 7.7\times 0.967 = 7.45\%$

## 2. 固体、液体燃料组成

其基本组成元素有：

碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）五种元素，除此还有含有一定数量的灰分（A）和水分（W）。

- ❖ 碳。碳在燃料中与氧、氢、硫组成各种有机化合物。当燃料受热时，这些有机化合物首先分解，然后碳再进行燃烧，放出大量的热。热值约 **339KJ/Kg**。煤中碳含量**53~99%**(50-70%褐煤、70-85%烟煤、85-95%无烟煤)，重油：**86%**。碳是固体和液体燃料的主要热能来源。
- ❖ 水。燃料中水是指自然水分而不包括化学结合水。水不燃烧，升温吸热，降低燃料的品质。少量水对燃料着火、燃烧、传热等方面有益。固体燃料：**4~35%**，液体燃料：**1~4%**。

# 硅酸盐工业用固体燃料

## 1. 褐煤

**性质：** 刚开采出的褐煤的水分约为20%~40%，风干后为12~3%，灰分 $A_d=0.5\%~50\%$ ，发热量约为1300~17000 kJ/kg。

**用途：** 制造煤气

## 2. 烟煤

**性质：** 挥发物10%~45%，固定碳35%~75%，灰分7%~30%；水分3%~18%；发热量21000~29000 kJ/kg；着火温度400~500℃。

**用途：** 适合于水泥回转窑作燃料。

## 3. 无烟煤

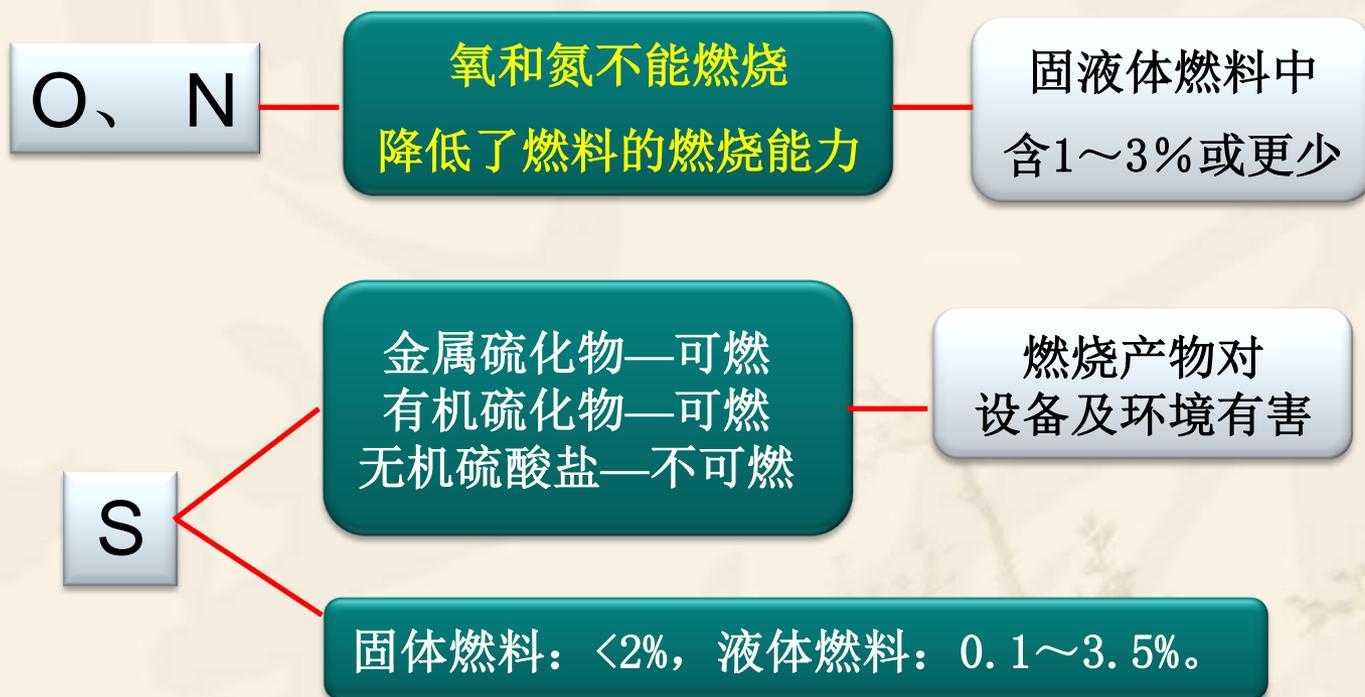
**性质：** 含固定碳高，可达90%以上；挥发分少，一般小于10%；水分和灰分一般也较低；发热量一般为25000~29000 kJ/kg；着火温度较高（一般为650~700℃）。

**用途：** 适用于水泥立窑作燃料。

## 2. 固体、液体燃料组成

其基本组成元素有：

碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）五种元素，除此还有含有一定数量的灰分（A）和水分（W）。



## 2. 固体、液体燃料组成

其基本组成元素有：

碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）五种元素，除此还有含有一定数量的灰分（A）和水分（W）。

❖ 灰分。灰分是指**燃料中不能燃烧的矿物杂质**。

化学成分： **$\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_3$** 。矿物组成：硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐等。固体燃料的灰分可达**20%**以上，而液体燃料中一般不超过**0.3%**。

灰分的有害作用：

- i ) 灰分↑，可燃成分↓，燃料发热量↓，燃烧速度及燃烧温度↓。
- ii ) 灰分在高温下形成液相，在窑炉内结皮、结渣，排渣时造成机械不完全燃烧损失，灰分↑，排渣困难。灰渣破坏炉内耐火材料和堵塞炉栅。
- iii ) 灰分造成制品污染，影响制品成分及质量。

燃料根据所选用的基准不同，表示煤的四种基准：

(1) **应用基组成**（收到基），实际使用的煤的组成（燃烧计算的原始数据）

$$C_y\% + H_y\% + O_y\% + N_y\% + S_y\% + A_y\% + W_y\% = 100\%$$

(2) **分析基组成**（空气干燥基），指分析实验室里所用的空气干燥煤样的组成（实验室常用）

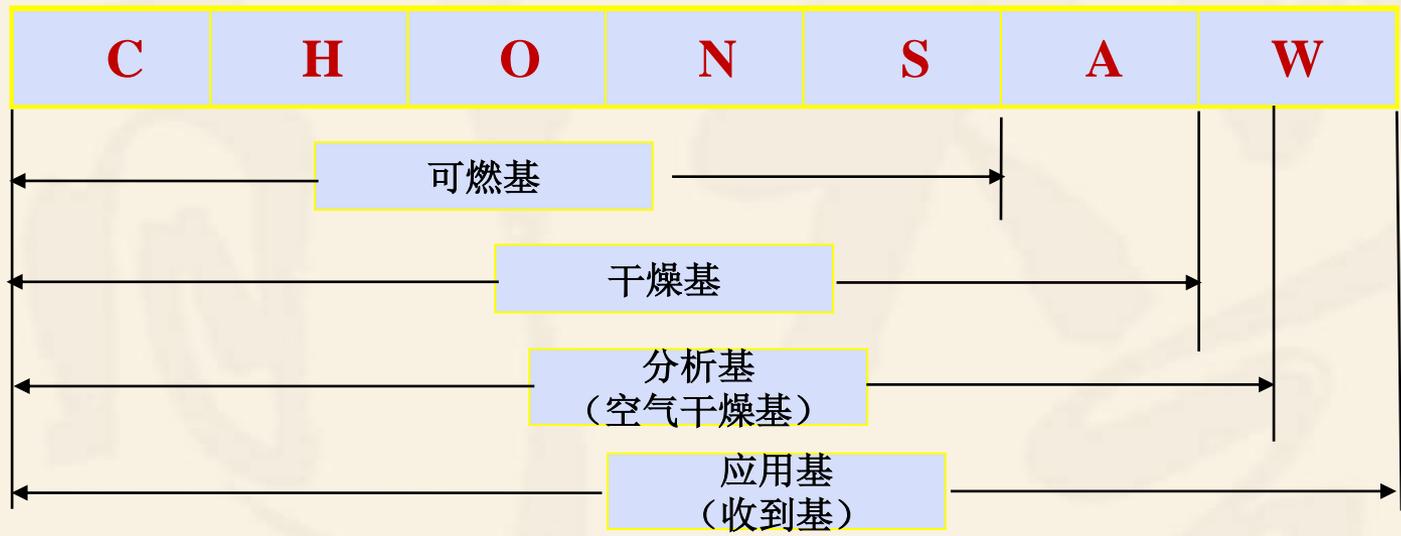
$$C_f\% + H_f\% + O_f\% + N_f\% + S_f\% + A_f\% + W_f\% = 100\%$$

(3) **干燥基组成**，绝对干燥的煤的组成（用于生产控制）

$$C_g\% + H_g\% + O_g\% + N_g\% + S_g\% + A_g\% = 100\%$$

(4) **可燃基组成**，是假想的无水无灰的煤的组成（煤矿常用）

$$C_r\% + H_r\% + O_r\% + N_r\% + S_r\% = 100\%$$



## 基准换算：绝对物料平衡

无论何种基准表示，燃料中某种成分的绝对量是不变的。

可得到：

$$C_r\% = 100 C_y\% / (100 - W_y - A_y)$$

$$C_y\% = C_f\% (100 - W_y) / (100 - W_f)$$

$$A_y\% = A_g\% (100 - W_y) / 100$$

例2 已知烟煤组成如下，将其换算成应用基表示的燃料组成？

$C_r\%$	$H_r\%$	$O_r\%$	$N_r\%$	$S_r\%$	$A_g\%$	$W_y\%$
80.67	4.85	13.10	0.8	0.58	10.92	3.20

解：由干燥基换算成应用基的换算系数：

$$(100 - W_y)/100 = (100 - 3.2)/100 = 0.968$$

以应用基表示的灰分组成成为：

$$A_y\% = A_g\% \times 0.968 = 10.92\% \times 0.968 = 10.57\%$$

由可燃基换算为应用基的换算系数为：

$$[100 - (A_y + W_y)]/100 = [100 - (10.57 + 3.20)]/100 = 0.86$$

以应用基表示的其它成分为

$$C_y\% = C_r\% \times 0.86 = 80.67\% \times 0.86 = 69.38\%$$

$$H_y\% = H_r\% \times 0.86 = 4.85\% \times 0.86 = 4.17\%$$

$$O_y\% = O_r\% \times 0.86 = 13.10\% \times 0.86 = 11.27\%$$

$$N_y\% = N_r\% \times 0.86 = 0.80\% \times 0.86 = 0.69\%$$

$$S_y\% = S_r\% \times 0.86 = 0.58\% \times 0.86 = 0.5\%$$

所以，此烟煤的应用基组成为：

$C_y\%$	$H_y\%$	$O_y\%$	$N_y\%$	$S_y\%$	$A_y\%$	$W_y\%$
69.38%	4.17%	11.27%	0.69%	0.50%	10.57%	3.20%

## 二、燃料的热值（发热量）

### 1. 热值的定义

单位质量或体积的燃料完全燃烧，燃烧产物冷却到**参加燃烧反应物质的起始温度**（室温）时所放出的热量，称为**热值**，以 $Q$ 表示。

热值分为**高位热值**( $Q_{GW}$ )和**低位热值**( $Q_{DW}$ )。

- ❖ **(1) 高位发热量 $Q_{GW}$** ：单位燃料完全燃烧后，其燃烧产物中的**水蒸气全部凝结为 $0^{\circ}\text{C}$ 水**，其余产物冷却到反应前的室温时所放出的热量。
- ❖ **(2) 低位发热量 $Q_{DW}$** ：单位燃料完全燃烧后，燃烧产物冷却到反应前的室温，而燃烧产物中的**水蒸气冷却为 $20^{\circ}\text{C}$ 的水蒸气**时所放出的热量。

根据反应式  $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 == \text{H}_2\text{O}$  ,

1千克燃料共计含水量为  $(W_y/100 + 9H_y/100)$  kg水/kg

0°C水与20 °C的水蒸气的热焓差值: 2500kJ/kg

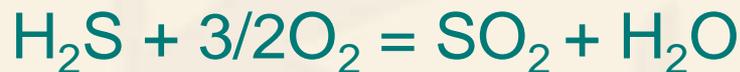
因此: 对于1千克燃料高、低位热值之差为:

$$Q_{yGW} - Q_{yDW} = 25(W_y + 9H_y) \quad \text{kJ/kg}$$

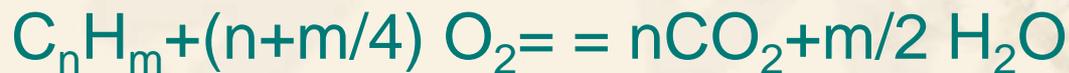
$$Q_{fGW} - Q_{fDW} = 25(W_f + 9H_f) \quad \text{kJ/kg}$$

$$Q_{rGW} - Q_{rDW} = 225H_r \quad \text{kJ/kg}$$

若考虑可燃气体:



水汽体积1.24m<sup>3</sup>/kg



$$Q_{GW}^w - Q_{DW}^w = 20.1(\text{H}_2^w + \text{H}_2\text{S}^w + m/2 \text{C}_n\text{H}_m^w + \text{H}_2\text{O}^w) \quad \text{kJ/m}^3$$

## 2. 热值计算

$Q = \sum x_i Q_i$ ,  $Q_i$  为可燃组分热值,  $x_i$  为组分含量。

例3 发生炉煤气的干组成如下

$\text{CO}_2^{\text{d}\%}$	$\text{CO}^{\text{d}\%}$	$\text{H}_2^{\text{d}\%}$	$\text{O}_2^{\text{d}\%}$	$\text{CH}_4^{\text{d}\%}$	$\text{H}_2\text{S}^{\text{d}\%}$	$\text{N}_2^{\text{d}\%}$
5.5	28.0	13.4	0.4	0.5	0.2	52.0

水分含量  $\text{H}_2\text{O}^{\text{w}\%} = 3.13\%$ 。试计算该煤气以湿组成表示的低位热值。

解：将干组成换算为湿组成，其换算系数：

$$(100 - \text{H}_2\text{O}^w)/100 = (100 - 3.13)/100 = 0.969$$

$$\text{CO}_2^w\% = 5.5\% \times 0.969 = 5.33\%$$

$$\sqrt{\text{CO}^w\% = 28\% \times 0.969 = 27.13\%}$$

$$\sqrt{\text{H}_2^w\% = 13.4\% \times 0.969 = 12.98\%}$$

$$\text{O}_2^w\% = 0.4\% \times 0.969 = 0.39\%$$

$$\sqrt{\text{CH}_4^w\% = 0.5\% \times 0.969 = 0.48\%}$$

$$\sqrt{\text{H}_2\text{S}^w\% = 0.2\% \times 0.969 = 0.19\%}$$

$$\text{N}_2^w\% = 52\% \times 0.969 = 50.39\%$$

$$Q_{Dw}^w = 0.2713 \times 12648 + 0.1298 \times 10806 +$$

$$0.0048 \times 35960 + 0.0019 \times 23170 = 5051 \text{kJ/m}^2$$