

第一章 燃料、燃料燃烧及燃烧室

凡在燃烧时能放出大量热，并能够有效地利用在工业和其它方面的物质统称为燃料。并且，作为工业燃料还应当满足如下几点要求：

- (1) 单位重量（体积）燃料燃烧时放出热量要大。
- (2) 燃烧产物应为气体，以便于热量的传递。也只有当燃烧产物为气体时，才可能被及时排除，使燃烧反应继续进行。
- (3) 燃烧产物必须对人体、设备及制品是无害的。
- (4) 储藏量大，便于开采。而且价格低廉。
- (5) 燃烧过程易于控制。

只有同时符合或基本上符合上述几点要求的可燃物质，才能成为工业燃料。而对于酒精、苯和其它类似的物质，因其价格昂贵，不能作为工业燃料。又如硫及硫化物，虽在燃烧时能放出热量，但其生成物为二氧化硫，对人体及设备都是有害的，因此也不能作为工业燃料。只有由有机物为来源的物质（如煤）才基本上符合上述要求，因为组成此种物质的主要元素碳、氢在燃烧时能够放出大量的热，且燃烧产物为气体，虽然由于燃料中有硫的存在，在燃烧产物中包含一定数量的二氧化硫。但因其含量少，危害性不大；又由于其储藏量大，分布广泛，便于开采，因此广泛用作工业燃料。

燃料根据来源的不同，可分为天然燃料与人造燃料两种。根据物态的不同，又可分为固体燃料、液体燃料及气体燃料。工业燃料按来源及物态的不同，可按表 1-1 进行分类。

燃料之分类 表 1-1

来源	物 态		
	固 态	液 态	气 态
天 然 的	木 柴 泥 煤 褐 煤 烟 煤 无 烟 煤 可 燃 頁 岩	石 油	天然煤气
人 造 的	木 焦 煤 磚 煤 粉	汽 油 煤 油 重 油 其它石油加工产品	高爐煤气 煉焦煤气 发生爐煤气①空气煤气 ②蒸汽空气煤气（混合煤气） ③水煤气 地下气化煤气

在建筑材料及制品工业中，广泛应用了固体燃料。如烟煤无烟煤等，近年来气体燃料应用也日益增加，由于气体燃料有很多优点，如可降低煤耗、利用劣质燃料、操作过程易于控制以及可以综合利用固体燃料等，今后将更广泛应用于建筑材料工业生产中。

我国煤的储量丰富，分布广泛，煤质优良（以烟煤、无烟煤为主）。解放以来，产量不断增长，尤其自大跃进以来，在党的总路线光辉照耀下，我国煤炭产量持续跃进，自 1957

年煤炭产量占世界第五位至 1960 年跃为世界第二位,为我国社会主义各项建设事业提供了有利条件。

燃料是现代工业和交通运输业能量主要来源,也是化学工业重要原料,在建筑材料工业的生产中同样占着重要地位,因为在建筑材料及制品的生产中,热处理过程是生产的重要环节,所选用燃料种类合理与否对热处理过程顺利进行有很大影响。而且燃料消耗量也占了建筑材料工业成本较大部分。各种建筑材料燃料消耗占成本百分数如下:

混凝土和钢筋混凝土制品 5~7%,石膏制品 8~10%,建筑砖瓦 12~18%,水泥 20~25%。

因此充分掌握燃料性能及燃烧机理,合理地综合地进行利用,对提高建筑材料及制品产量质量,节约燃料,降低成本,有着重要意义。

第一节 燃料的性能和种类

一、燃料的组成及其表示方法

1. 固体(液体)燃料的组成及表示方法

在固体(液体)燃料的化学组成中,碳和氢是燃料的主要组分,但它们并不是呈游离状态存在,而是与氧、氮、硫之间呈复杂的化合物状态存在,此外,还包含了一定量的水分和灰分。因此由于其组成的复杂,至今还未能探索出燃料中化合物的分子式和分子量。为了研究的方便,我们把固体(液体)燃料看成是由独立的元素所组成,即用所谓元素分析的方法,用此方法可以确定出燃料中碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、水分(W)、灰分(A)的百分含量,它近似地表示了燃料的一般性质,并可藉此进行燃烧计算。必须指出,元素分析未能反映出各元素之间的关系,故用它来进一步判断燃料性质和燃料过程的机构就显得不足了。

固体(液体)燃料成分系以组成物的重量百分数来表示。根据元素分析结果,实际所用的固体(液体)燃料,系由 C, H, O, N, S, W, A 所组成,此种燃料称之为实用燃料。以实用燃料上述组成物的总合为 100% 所表示出来的各组分的百分含量,称为燃料的实用成分。

$$C^{\text{用}} + H^{\text{用}} + O^{\text{用}} + N^{\text{用}} + S^{\text{用}} + W^{\text{用}} + A^{\text{用}} = 100\% \quad (1-1)$$

由于燃料中的水分受到季节及运输条件等方面的影响,在较大的范围内波动,因此实用成分不能真实地反映出燃料的本性,因此当不考虑燃料中水分而以燃料的干燥质 C, H, O, N, S, A 的总合为 100% 时所表示的各组成物的百分含量,称为燃料的干燥成分。

$$C^{\text{干}} + H^{\text{干}} + O^{\text{干}} + N^{\text{干}} + S^{\text{干}} + A^{\text{干}} = 100\% \quad (1-2)$$

燃料中的灰分为不可燃物质,其含量也可因开采及运输条件不同而在很大范围内波动,为了更确切说明燃料的化学组成,采用了不包含水分及灰分的表示方法,即以 C, H, O, N, S 之总合为 100%,如此所表示的各成分的百分含量称规定可燃成分。

$$C^{\text{燃}} + H^{\text{燃}} + O^{\text{燃}} + N^{\text{燃}} + S^{\text{燃}} = 100\% \quad (1-3)$$

还有一种表示方法,即以所谓规定有机物质 C, H, O, N 之总合为 100% 来表示燃料各成分的百分含量,此种表示法称为规定有机成分,它进一步反映燃料的本质。

$$C^{\text{机}} + H^{\text{机}} + O^{\text{机}} + N^{\text{机}} = 100\% \quad (1-4)$$

以上各种表示方法之间的关系,见表 1-2,并且由于它们是对同一种燃料而言,故各

成分之間可以互相进行換算，換算方法見表 1-3 及例所示。

表 1-2

組成						
C	H	O	N	S	A	W
規定有機成分						
規定可燃成分						
干燥成分						
實用成分						

表 1-3

已知的燃料成分	燃料成分的換算系数			
	欲換算的燃料成分			
	有機的	可燃的	干燥的	實用的
有機的	1	$\frac{100-S_{燃}}{100}$	$\frac{100-(S^{\neq}+A^{\neq})}{100}$	$\frac{100-S_{用}+A_{用}+W_{用}}{100}$
可燃的	$\frac{100}{100-S_{机}}$	1	$\frac{100-A^{\neq}}{100}$	$\frac{100-(A_{用}+W_{用})}{100}$
干燥的	$\frac{100}{100-(S^{\neq}+A^{\neq})}$	$\frac{100}{100-A^{\neq}}$	1	$\frac{100-W_{用}}{100}$
實用的	$\frac{100}{100-A_{用}+W_{用}+S_{用}}$	$\frac{100}{100-(A_{用}+W_{用})}$	$\frac{100}{100-W_{用}}$	1

例如：

$$A_{用} = A^{\neq} \frac{100 - W_{用}}{100}$$

$$C_{用} = C_{燃} \frac{100 - (W_{用} + A_{用})}{100}$$

$$H_{用} = H_{机} \frac{100 - (W_{用} + A_{用} + S_{用})}{100}$$

对于固体燃料，除采用元素分析外，还經常采用工业分析，以确定燃料中水分(W)，揮发分(V)，固定碳(C)和灰分(A)的含量，以作为评价燃料质量的标准。

煤的工业分析，是将一定重量的煤加热至 110°C 使其水分蒸发，测得水分含量，继续加热至 850°C，测得揮发分含量，再通以空气使碳完全燃烧，测得固定碳的含量，剩下的即为灰分。因此燃料工业分析的结果可表示如下式：

$$A_{用} + V_{用} + W_{用} + C_{用} = 100\% \quad (1-5)$$

式中 $A_{用}$ ， $V_{用}$ ， $W_{用}$ ， $C_{用}$ ，分别为实用固体燃料中灰分，揮发分，水分，固定碳的百分含量。

2. 气体燃料的組成及表示方法

气体燃料是由具有独立化学特性的可燃的与不可燃的化合物混合而成，其中可燃成分有 CO ， H_2 ， CH_4 ， C_2H_4 ， H_2S ……等，其中 CH_4 ， C_2H_4 ， C_nH_m 燃烧时放出热量最大，

H₂ 次之, CO 最少, H₂S 对人体及设备都有损害, 因此是气体燃料中的有害成分。气体燃料中不可燃成分有 CO₂, N₂, O₂, H₂O……等。

气体燃料成分是以体积百分数来表示, 其表示方法有湿成分与干成分两种:

湿成分表示法如下:

$$\text{CO}^{\text{湿}} + \text{H}_2^{\text{湿}} + \text{N}_2^{\text{湿}} + \dots + \text{H}_2\text{O}^{\text{湿}} = 100\% \quad (1-6)$$

干成分中不含有水分, 故其表示法如下:

$$\text{CO}^{\text{干}} + \text{H}_2^{\text{干}} + \dots + \text{N}_2^{\text{干}} = 100\% \quad (1-7)$$

气体燃料中水分含量随所处温度的变化会有所波动, 因此湿成分仅表示某一固定温度下的气体燃料的成分, 它不具有代表性, 所以一般均用干成分来表示。气体燃料干湿成分之间的关系同样可以进行换算。

二、燃料的发热量

单位重量(固体燃料, 液体燃料)或单位体积(气体燃料)的燃料, 在完全燃烧的情况下所放出热量的千卡数称之为燃料的发热量, 以 Q 表示, 单位为千卡/公斤或千卡/米³ ①。

根据燃烧产物中水的状态不同, 可将燃料的发热量分为高热量和低发热量。

高热热量 ($Q_{\text{高}}$): 当燃料完全燃烧时, 其燃烧产物的温度冷却到燃料的起始温度, 而其中的水蒸汽冷凝为 0°C 的水时, 单位燃料完全燃烧所放出的热量。

但实际上由于燃烧产物一般温度均较高, 其中水汽不可能冷凝为 0°C 的水, 因此高热热量只能作为实验室中鉴定燃料性质之指标, 而实际上不易获得。

低发热量 ($Q_{\text{低}}$): 当燃料的燃烧产物冷却到燃料的起始温度, 而其中的水汽冷却为 20°C 的水汽时, 单位燃料完全燃烧所放出之热量, 低发热量接近于应用燃料时的实际情况。由此可知, 高低发热量之间差别, 仅在于燃烧产物中水分状态不同, 前者为 0°C 的水而后者为 20°C 的水汽, 故二者之间的差值可按下述方法计算。

当燃烧产物中水蒸汽均变为 0°C 的水, 此时 1 公斤水所放出热量为:

1 公斤水蒸汽冷凝为 100°C 的水所放出的汽化潜热 539 千卡

1 公斤水由 100°C 冷却到 0°C 时所放出的热量 $\frac{100 \text{ 千卡}}{\text{共計 } 639 \text{ 千卡}}$

当 100°C 水汽转变为 20°C 水汽, 此时 1 公斤水所放出热量:

$$1 \times 0.48 \times (100 - 20) = 38.4 \text{ 千卡}$$

式中: 0.48 —— 水蒸汽比热。

所以 1 公斤 0°C 的水变为 20°C 的水汽需吸收的热量为 $639 - 38.4 \approx 600$ 千卡。

又由于燃料中水分来源有二: 一为燃料中所含之水分, 在 1 公斤燃料中含有 $\frac{W^{\text{湿}}}{100}$ 公斤,

一为氢燃烧生成之水分, 在 1 公斤燃料中有 $\frac{9H^{\text{湿}}}{100}$ 公斤。则 1 公斤燃料燃烧时其生成水分

$\left(\frac{W^{\text{湿}}}{100} + \frac{9H^{\text{湿}}}{100}\right)$ 公斤。故对 1 公斤燃料而言, 高低发热量相差为: $600 \left(\frac{W^{\text{湿}} + 9H^{\text{湿}}}{100}\right)$

$= 6(W^{\text{湿}} + 9H^{\text{湿}})$ 千卡。即

$$Q_{\text{高}} - Q_{\text{低}} = 6(W^{\text{湿}} + 9H^{\text{湿}}) \text{ 千卡} \quad (1-8)$$

① 这里所指的体积是标准状况下的体积。

燃料的发热量可由实验方法测得，也可由计算得出。对于固体燃料可用氧弹法测其发热量，其方法是取1~1.3克，预先磨成粉末，再压成块的燃料，放入氧弹中，氧弹中充以20~25大气压的氧气，并将其放入量热器中，用12~15伏特电流点火，使燃料迅速完全燃烧，测量水温之变化可计算出燃料燃烧所放出之热量。氧弹法测量装置如图1-1。

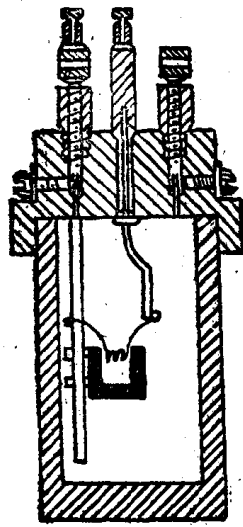


图 1-1 甲 量热弹

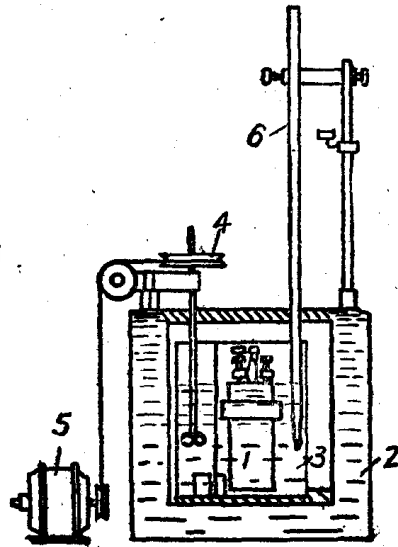


图 1-1 乙 量热装置

1-量热弹；2-量热器；3-容器；
4-搅拌水的搅拌器；5-传动搅拌器
的电动机；6-温度计

燃料的发热量也可由计算方法得出，即根据各可燃元素完全燃烧所放出的热量和该元素在燃料中的含量计算燃料的发热量。但对于固体（液体）燃料而言，各元素间呈复杂的化合物状态存在，其中氧的存在使部分组成失去了可燃作用，因而影响了燃料的发热量。但由于燃料组成复杂，不易求得影响程度，目前所采用的经验公式都在一定程度上消除误差。其中以门捷列夫公式最具有代表性。

$$Q_{\text{高}} = 81C + 300H + 26S - 26O \quad (1-9)$$

$$Q_{\text{低}} = 81C + 300H - 26(O - S) - 6(9H + W) \quad (1-10)$$

C, H, S 等前面的系数 81, 300, 26 为这些元素之燃烧热被 100 除后所得之值，O 前面之 26 即所谓氧消耗热量，也即根据门捷列夫资料，燃料中每 1% 氧与燃料中可燃元素相结合时所降低发热量的数值。

C, H, S, O 为 100 公斤燃料中各元素含量绝对值。

对于气体燃料，其发热量为各可燃组分发热量与其百分含量的乘积之总和。

$$Q_{\text{高}} = 30.5\text{CO} + 30.5\text{H}_2 + 95.3\text{CH}_4 + 152.5\text{C}_2\text{H}_4 + 60.0\text{H}_2\text{S} \quad (1-11)$$

$$Q_{\text{低}} = 80.5\text{CO} + 25.8\text{H}_2 + 85.9\text{CH}_4 + 143.0\text{C}_2\text{H}_4 + 55.2\text{H}_2\text{S} \quad (1-12)$$

式中 CO, H₂……代表 100 米³ 中燃料含量之绝对值。

为了评价燃料发热能力高低，通常选用发热量为 7000 千卡/公斤（对于气体 7000 千卡/米³）的燃料为标准燃料，任何燃料发热量与标准燃料发热量之比，称为燃料之热当量。如烟煤发热量为 5780 千卡/公斤，其热当量为 $\frac{5780}{7000} = 0.83$ ，也即 1 公斤烟煤相当于 0.83

公斤标准燃料，借此评价燃料之发热量的高低以及作为生产企业燃料消耗指标的比較。

三、各类燃料主要特性

1. 固体燃料：

1) 木柴

木柴是使用最早的燃料，在我国过去曾用木柴做燃料来焙烧陶瓷，但由于近代工业的发达，木柴已为很多工业部門（建筑材料工业，化学工业）的重要原料，又由于木柴的儲藏量及开采量也很难滿足近代工业燃料需要，因此現在已很少采用木柴作为工业燃料，一般只用来做为輔助燃料。

2) 泥煤

泥煤是由埋在地下，浸在水中的植物在隔絕空气及較大压力下經過长期的物理化学变化作用轉变而成的，是由植物刚刚轉变来的煤，也是最年輕的煤，故具有如下特点：

含有大量水分，最高可达 85~91%，經空气干燥后，仍有 30~40% 水分，因此其发热量低（2500~3500 千卡/公斤）。

机械强度小，不便于远途运输，仅可作为地方性燃料。

泥煤中灰分含量比較低（5~10%），揮发分含量較高（75%左右），故为长焰燃料，可用于煤气发生炉中产生气体燃料。

泥煤在分布較广的国家里，常用于輪窑烧砖，制造发生炉煤气。

3) 褐煤

泥煤經過岩化作用阶段，进一步放出所含的揮发分及水分，固定碳增多，而且被压实，形成褐煤，因此它比泥煤有如下特点：

揮发分及水分含量减少，灰分及含碳量增加，含硫仍很少，因此其发热量較高（3000~4000 千卡/公斤），机械强度較大。

但褐煤在长期儲存时易自燃，碎裂，且水分含量大，发热量仍不够高，因此也只能做为地方性燃料。

4) 烟煤

褐煤經過变质阶段，其揮发分及水分更进一步放出，固定碳含量增加（可达 80%），因此其发热量增加（5000~8000 千卡/公斤）。按照烟煤揮发分及固定碳含量可分为长焰煤，瓦斯煤，肥煤，結焦煤，瘦煤等。

烟煤为冶金工业，动力工业，建筑材料工业的重要燃料，故烟煤极为宝贵，应当合理加以利用。我国烟煤儲量大，分布广，质地优良，为我国发展各項工业提供了有利条件。

5) 无烟煤

烟煤繼續变化多年后，成为碳化程度最高，揮发物最少的无烟煤，无烟煤含碳量高达 90% 以上，发热量为 7000 千卡/公斤以上，燃烧时火焰短，机械强度大，便于长期儲存及运输。无烟煤在建筑材料工业中用作短焰燃料，用于立窑中煨烧水泥熟料或石灰。

6) 可燃頁岩

可燃頁岩是由某几种藻泥煤和其它类似的有机物质分解产物浸入粘土质岩石，泥灰岩，石灰岩内而生成。因此其灰分含量較大（40~70%）^①頁岩中可燃质发热量为 6500~8000 千卡/公斤，但由于有大量灰分存在，故頁岩实际发热量仅为 1500~2000 千卡/公斤，因此它

① 此处 40~70% 是以燒料的元素分析表示。

也是地方性燃料。

可燃頁岩揮发分含量高(70~80%)^①，水分含量不大(4~5%)，可用作制造液体燃料的原料。

可燃頁岩可用作煅烧水泥燃料，其中有机部分可做为燃料，而矿物部分(灰分)可作为水泥熟料的外加物。

各类固体燃料成分及发热量见表 1-4

固体燃料的成分及发热量

表 1-4

名 称	有机質的平均組成				揮发 分 量 % (W用%)	水分含量 (W用%)	发 热 量 $Q_{低}$ (千卡/公斤)	比 重 (吨/米 ³)
	C	H	O	N				
木 柴	49.7	6.1	43.6	0.6	85	60	150	0.4~0.65
泥 煤	63~64	5.0~6.6	28~38	1.5~3.8	70	85~90	5000~5700	0.5~1.0
褐 煤	64~80	3.4~6.0	14~30	0.7~2.8	49~40	8~5	6500~7000	0.8~1.25
烟、煤	76~91	3.3~6.0	2~19	1.1~2.7	45~12	1~4	7400~8300	1.26~1.35
无烟煤	90~99	1.0~3.1	0.5~5.1	0.5~1.3	4	0.4~1	7700~8000	1.36~1.5

2. 气体燃料

1) 天然煤气:

以甲烷(CH_4)为主要成分，其含量达90%以上，还有少量碳氢化合物、氢及一氧化碳，非可燃成分很少，故其发热量高(7500~9000千卡/米³)，是很好的工业燃料及化工原料。天然煤气可以经过除尘、加压，运送至较远地方使用。

2) 人造气体燃料:

①高炉煤气：是炼铁的副产品，主要成分是CO(26~30%)， H_2 含量较少，故其发热量较低(850~900千卡/米³)。

②焦炉煤气：是炼焦生产副产品，主要可燃成分为 H_2 (48~55%)， CH_4 (22~26%)，故其发热量较高(4000~4500千卡/米³)。

③发生炉煤气：以固体燃料为原料，在煤气发生炉中经气化而得。(将在第二章详述)。

3) 煤的地下气化:

煤的地下气化就是把煤在地下进行气化，然后引出使用，这样可以免去煤炭的开采过程，是煤炭工业的先进技术。地下气化早在60年前俄国科学家門捷列夫就提出来，列宁曾对煤的地下气化给予很高评价，苏联在1932年第一次实现了煤的地下气化。

气体燃料根据发热量不同，可分为高发热量煤气；中发热量煤气；低发热量煤气三种。由表1-5看出高发热量煤气主要可燃成分为碳氢化合物和 H_2 ，中发热量煤气主要可燃成分是 H_2 和CO。低发热量煤气则以CO为主要可燃成分。

3. 液体燃料:

石油是天然的液体燃料，石油经过加工后得到的一系列产物，如煤油、柴油、重油等。

石油主要成分为碳氢化合物之混合物，如烷族($C_n H_{2n+2}$)，烯族($C_n H_{2n}$)，芳香族($C_n H_{2n-6}$)等。除上述成分外，石油中尚有少量氧、氮、硫化物，而灰分与水分很少。石油发热量高(9800~10500千卡/公斤)，是一种宝贵的燃料。现在石油用作动力燃料及

① 此处70~80%是以燃料的工业分析表示。

各类气体燃料组成及发热量

表 1-5

气体名称	煤气平均成份(体积为百分数)%							发热量 (千卡/米 ³)
	CO ₂ +H ₂ S	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	CmHn	N ₂	
高发热量煤气								
①天然煤气	0.1~2	—	—	0~2	85~97	0.1~4	1.2~4.0	8000~9200
②半焦化煤气	12~15	0.2~0.3	7~12	6~12	45~62	5~8	2~10	5300~7000
③炼焦爐煤气	2~3	0.7~1.2	4~8	53~60	19~25	1.6~2.3	7~13	3700~4000
④高压气化煤气	2~4	0.2~0.3	14~22	53~58	16~20	0.5~0.7	2~6	3600~3800
中发热量煤气								
①一重水煤气	10~20	0.1~0.2	22~32	42~50	6~9	0.5~1	2~5	2700~3800
②水煤气	5~7	0.1~0.2	35~40	47~52	0.3~0.6	—	2~6	2400~2500
③蒸气—富氧煤气	16~26	0.2~0.7	27~41	34~43	2~5	—	1~2	2200~2450
低发热量煤气								
①混合煤气	5~7	0.1~0.3	24~30	12~15	0.5~3	0.2~0.4	46~55	1150~1550
②空气发生爐煤气	0.5~1.5	—	32~33	0.5~0.9	—	—	64~66	990~1030
③高爐煤气	8~14	—	23~31	10~15	0.1~2.6	—	48~60	900~1265
④地下气化煤气	16~22	—	5~10	17~25	0.8~1.1	—	47~53	740~980

化工原料,在建筑材料工业中,并未获得广泛应用,仅在个别的情况下采用重油。

除上述各类燃料外,还可将煤磨成煤粉,应用于迴轉窑或其他热工设备中。也可将碎煤压成煤砖。用于輪窑烧砖。其次如鍋炉炉渣等也可用于輪窑烧砖,在此不一一闡述。总之我們应当充分掌握各类燃料的性能,合理的运用,使燃料发挥最大效能。

第二节 燃料的燃烧机理

一、燃料的着火

燃料的燃烧过程分为着火与燃烧两个阶段,着火是燃烧的准备阶段,在此阶段内燃料进行緩慢的氧化,放出的热量一部分散失于周围介质中,一部分用来加热燃料本身使其温度升高,氧化过程加剧,放出了比开始更多的热量,结果就更加速了氧化过程的进行,最后必然达到一点,即氧化所放出的热量刚刚等于散失于外界热量,即进入了热的平衡状态,此点的温度称为着火温度。而这个热平衡是暫时的,极易破坏,只要将火花或熾热物体引入反应混合物中即能引起着火燃烧。应当指出着火温度并非常数,它与燃料受热速度、空气量、燃烧混合物性质、周围环境的换热条件及燃烧设备形式等因素有关。各类燃料和可燃物着火温度见表 1-6。

各种燃料和可燃物的着火温度

表 1-6

燃料名称	着火温度°C	燃料名称	着火温度°C	可燃物名称	着火温度°C
锯 木	225	石 油	367	H ₂	550~605
泥 煤	295	灯 油	295	CO	625~675
褐 煤	320			甲 烷 CH ₄	680~750
烟 煤	386			乙 烯 C ₂ H ₄	470~550
无 烟 煤	500			乙 炔 C ₂ H ₂	335~400

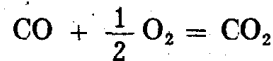
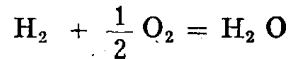
二、燃料的燃烧

从燃烧的观点出发,所有各种不同燃料可以分成几种基本可燃成分,即 CO 及 H₂ 的混合物,气态的碳氢化合物和固态的碳。而燃料的燃烧,可视为这几种基本成分燃烧的

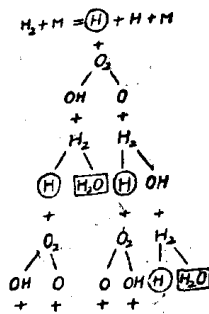
綜合。例如煤气的燃烧，可視為 CO、H₂ 和碳氢化合物的燃烧。而煤的燃烧，是揮发分的燃烧（即 CO、H₂、C_nH_m……）和固定碳燃烧。因此研究燃料燃烧的机理，可以从分別研究这几种基本燃料成分的燃烧机理着手。

1. 氢及一氧化碳的燃烧

H₂ 及 CO 的燃烧反应，可用化学反应式表示如下：



上式只是說明了反应的最后結果，而没有表明燃烧反应机构的真实情况，現今的理論和实践都已证明，反应过程按总的化学反应式一次进行的可能性是很小的，而是通过一系列的中間反应轉化为最終結果，也即燃烧过程按鏈鎖反应进行，欲使鏈鎖反应发生和进行，必須具有活泼中心。如游离的原子或游离基等，它們具有較大的活化能，促进了鏈鎖反应的开始和传递。氢的燃烧为典型的鏈鎖反应，其过程如下：



式中 M——不参加反应的催化物质；
○——鏈鎖开始的活泼中心；
□——最終生成物。

其总反应式为 $\text{H} + 3\text{H}_2 + \text{O}_2 = 3\text{H} + 2\text{H}_2\text{O}$

也就是說，一个氢原子能产生三个新的氢原子，而三个氢原子分別参加反应的结果又产生九个氢原子，这样鏈鎖反应結果，大大加速了燃烧反应的速度。

CO 的燃烧同 H₂ 的燃烧相似，也属于分枝鏈鎖反应，但較为复杂，少量的 H₂O 的存在对于 CO 的燃烧是有利的，甚至是必要的。根据实验可知，在一般的火焰情况下，绝对干燥的 CO 和空气的混合物燃烧困难，这是因为 CO 的燃烧过程所以能够进行，是由于某些活泼中心的存在，而这些活泼中心只有在 H₂ 和 H₂O 等夹杂物存在时才能产生。

当有活泼中心存在时 CO 的燃烧反应如下式：



反应式②是 CO 燃烧过程中决定着总反应速度的主要反应。因为羟基是发生鏈鎖反应

的刺激物，所以为了保证反应区域有自由羟基和氢原子，则必须有水分或氢原子参加物。

2. 气态碳氢化合物的燃烧

气态碳氢化合物的燃烧过程颇为复杂，目前尚不能充分的阐明这类反应化学动力学的机理，一般的说，烃的燃烧也属于分枝链锁反应，少量甲醛的存在，对烃类的燃烧是有利的。

3. 固态碳的燃烧

碳的燃烧反应属于多相燃烧反应。

碳与氧的反应可按下列两反应式进行：



而一氧化碳又能与过剩的氧很快按次级反应作用，



CO_2 在高温的情况下，与碳接触时又可能发生还原反应，



反应④可以在同一碳块表面上进行，也可以扩散到其他碳颗粒上去进行。在有水分存在时就会产生下面的反应，



如果氢遇到了氧气，就按下式进行反应，



所有这七个反应式除⑦式外，都得到了同样的气体产物 CO 和 CO_2 ，因此，在确定反应的最初生成物是 CO ，还是 CO_2 是一个很复杂的问题，由于试验的根据不同，得出了许多不同的见解。因此提出了关于碳燃烧的三种假说。

第一种假说认为最初生成物为二氧化碳，而一氧化碳为次级反应，即由二氧化碳进一步与碳作用还原而来。

第二种假说认为最初生成物为一氧化碳，它进一步氧化成为二氧化碳。

第三种假说是考虑到碳的吸附现象，氧被吸附在碳表面，形成结构不确定的 C_xO_y 复合物，当温度提高，在新的氧分子冲击下，这些复合物就分解，在不同的温度下，按不同比例放出二氧化碳及一氧化碳，这种假说在一定程度上已被在真空条件下所做的研究证实。

固定碳的燃烧过程当中，首先是氧通过扩散作用透过碳粒周围不动的气体层达到碳粒表面。第二步为氧与碳进行燃烧反应，第三步为反应产物通过扩散作用离开碳粒表面，因此燃烧反应的总速度，决定于反应气体的物理扩散速度与化学反应速度。

在燃料燃烧过程的低温阶段，化学反应进行比较缓慢，而气体扩散速度较大，其总速度决定于化学反应速度，此时称燃烧过程在“动力区域”内进行，过程进行速度由化学动力学因素决定（温度、压力、反应物质浓度等）。

当温度提高至 900°C 以上时，化学反应速度加剧，扩散速度相对降低，此时总速度决定于气体的扩散速度，燃烧过程进入“扩散区域”，其速度被流体动力学性质所限制，此时提高气体流动速度，将有利于加速燃烧反应的进行。

若扩散速度与化学反应速度相等，燃烧过程即在所谓：“中间区域”内进行。

第三节 块状固体燃料的烧燃过程及燃烧室

一、块状固体燃料的燃烧过程

固体燃料加热至 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 时进行预热、干燥而失去水分。继续升高温度至 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，燃料开始分解逸出挥发物，剩余下来是固体焦炭，并分别进行燃烧，最后得到气态的燃烧产物及不可燃的灰渣。所以固体燃料的燃烧过程，实质上是气态和固态分解产物（即挥发分和焦炭）的分别燃烧过程。

由此块状固体燃料在层状燃烧室中进行燃烧，按煤层高度，可分为如下各带：

①灰渣带：位于燃料层最下部与炉栅接触，有保护炉栅之作用。

②氧化带：位于灰渣带之上，厚约 $40\sim 60$ 毫米，此带温度最高，由灰坑进入的空气经灰渣带预热后至氧化带与燃料中的焦炭作用生成 CO_2 。

③还原带：位于氧化带之上，由氧化带生成的 CO_2 与焦炭作用生成 CO 。

④干馏带：位于还原带之上，新加入的煤在此带干馏并逸出挥发物，残余焦炭移至还原带，氧化带进行燃烧反应。

⑤干燥带：在燃料层最上部，煤被干燥，水分蒸发并预热。

由干馏带逸出之挥发物及由还原带形成之 CO 在燃烧空间再与空气接触进行燃烧。

由灰坑进入的首先与燃料接触的空气称之为一次空气，它是用来燃烧固定碳的，由于固定碳占了煤中可燃物的大部分，故一次空气量也占了燃烧所需空气量的大部分。由炉门及其它缝隙进入的空气或人工通入燃烧空间的空气称之为二次空气，是用来燃烧挥发分及还原带所产生的 CO 。因此二次空气是用来保证燃烧的完全程度；二次空气量占燃料燃烧所需全部空气量的 $10\sim 15\%$ 。

固体燃料的组成对燃料的燃烧过程有很大影响，其中碳是固体燃料热量的主要来源，燃料中碳含量愈多，则放出的热量愈多，燃烧时火焰短，甚至无火焰。氢在燃烧时也能放出大量热量来。但由于固体燃料中氢含量不多，其意义没有碳大；燃料中氢含量愈多，则其挥发分愈多，火焰愈长。氧和氮是燃料中的惰性物质，它们的存在会降低燃料发热量，因此要求其含量要少。硫由于燃烧时产生有害于人体及设备的燃烧产物，故也要限制其含量。灰分是燃料中不可燃的矿物杂质（其化学组成为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 等），灰分的存在降低了燃料中可燃部分的含量，从而降低燃料发热量；而且在燃烧室操作时，排除灰渣也将造成较大热损失；当灰分熔点低时会造成燃烧室堵塞，影响通风，妨碍燃烧室正常操作，并且还会对炉条及耐火材料起腐蚀作用，因此在选用燃料时要对灰分含量、熔点及性质进行检查和控制。燃料中水分之存在也会降低其发热量，而且蒸发水分也需消耗一部分热量，因此对燃料中水分也需控制，水分过大时，需先经过风干再行使用。

二、块状固体燃料燃烧室

1. 人工操作水平炉栅的燃烧室

燃烧室构造如图 1-2 所示。

炉栅是燃烧室最主要组成部分，它用于支持燃料层并使送入的空气均匀分布。炉栅通常用板状或梁状炉条组成。如图 1-3 所示，其中梁状炉条应用最广。炉条一般由铸铁做成，炉条面所有空隙面积之和称为炉栅的有效断面。根据燃料种类和性质不同炉栅有效断面在 $10\sim 30\%$ 范围内波动。

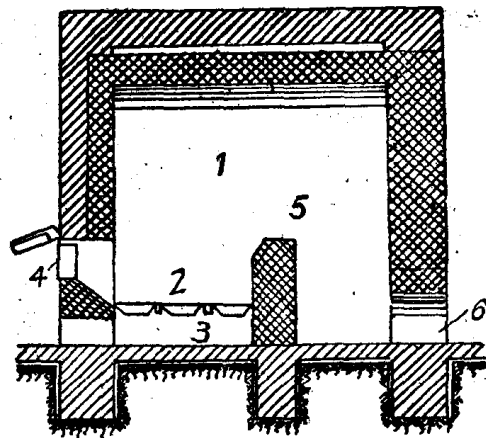


图 1-2 人工操作水平爐柵燃燒室
構造示意图
1-爐膛; 2-爐柵; 3-灰坑; 4-加煤口;
5-擋火牆; 6-燃燒产物出口

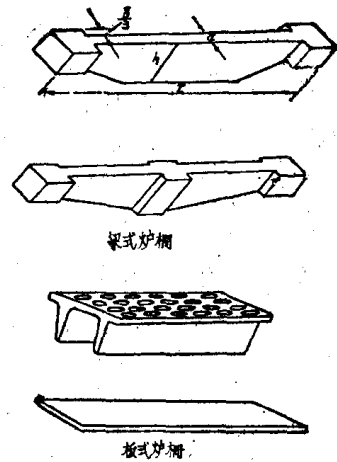


图 1-3 爐柵型式

此种燃烧室最大缺点是过程的間歇性，当燃料加入时，煤层厚，空气供給不足，造成了化学不完全燃烧。而当燃料近于烧尽时，燃料层变薄，空气供給过剩，降低燃烧溫度，在燃烧过程各阶段空气消耗量表示如图 1-4。

同时由于間歇加煤及出灰，将会由炉門漏入冷空气，降低燃烧溫度。因此为了防止燃烧室溫度波动，采取了少加煤，勤加煤的办法，如能采用机械化連續加煤，則可消除上述缺点。为了减少加煤时散热損失，可采取快加煤的办法。

間歇操作水平炉柵燃烧室热效率低，劳动强度大，但其构造簡單，因此对于一些溫度要求不高的热力設備，仍在采用。如用于轉筒干燥器，火力預热器等的燃烧室。此外在小型鍋炉上一般也采用此种燃烧設備。

2. 傾斜式炉柵燃烧室

是将炉柵做成傾斜形状，但也有做成阶梯状，如图 1-5。

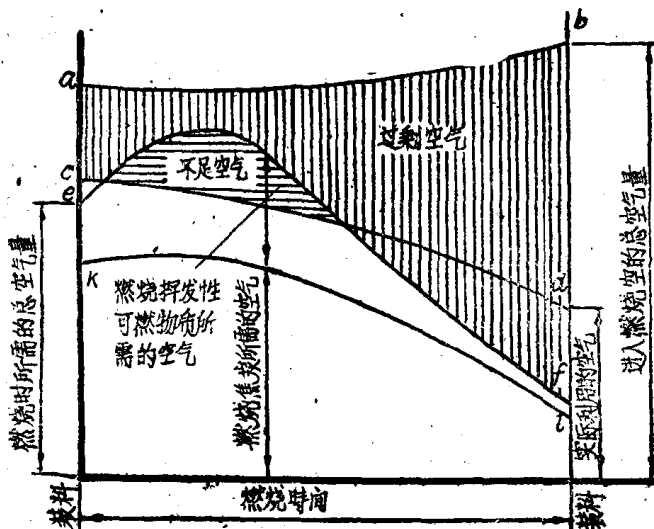


图 1-4 燃燒室中空气消耗量的图解
(按 K. B. 基尔什教授資料)

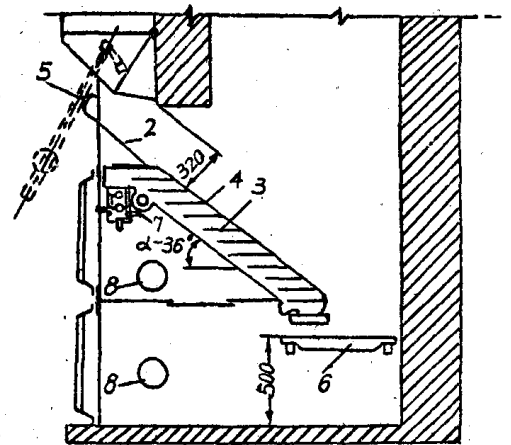


图 1-5 阶梯式爐柵燃燒室

1-貯煤槽; 2-固定爐板; 3-爐条; 4-斜梁;
5-爐門; 6-使爐渣完全燒尽的水平爐柵;
7-調正爐柵傾角設備; 8-鼓风分散口

炉栅倾斜角度 $45\sim 50^\circ$ ，在倾斜炉栅后面，往往装有水平炉栅，以保证焦炭完全烧尽，为了保证灰渣易于排除，在倾斜炉栅与水平炉栅间保持 $100\sim 250$ 毫米空隙。

采用倾斜炉栅燃烧室，燃料的下落部分依靠重力作用，故操作之劳动强度较小，燃料在倾斜炉栅上部进行预热，蒸发水分。移至下部即进行燃烧，因此燃烧过程进行迅速且经济，它特别适用于燃烧挥发分多、水分比较大的燃料，但由于炉条冷却面积较小，故不宜于燃烧发热量高的燃料。

倾斜式炉栅燃烧室，常用来半煤气操作，所谓半煤气操作就是通过于燃烧室中采用加大煤层厚度，控制一次空气量，调整炉栅角度（对机械化燃烧室）等措施，来获得不完全燃烧产物（ CO ， H_2 ， CH_4 ……），这些可燃成分可以在热力设备中进一步燃烧，并放出热量。

在建筑材料工业中，采用半煤气操作有如下优点：

①半煤气在窑的工作空间中进行燃烧，使各部分受热均匀，可以缩短烧成时间，节约燃料，减少温度波动。

②能减少热量损失，因半煤气在燃烧室中并未放出全部热量，故在输送途中损失也减少。

必须指出，当窑内温度较低（ 900°C 以下）时，不应采取半煤气操作，只有当窑温在 900°C 左右时，才宜于采用半煤气操作。

当采用发热量比较高的燃料，燃烧室铸铁炉条会被烧坏，因此可采用耐火材料做的拱形炉条，称之为陶瓷拱燃烧室如图 1-6，这种燃烧室有两个长度不同的拱，相互搭配成阶

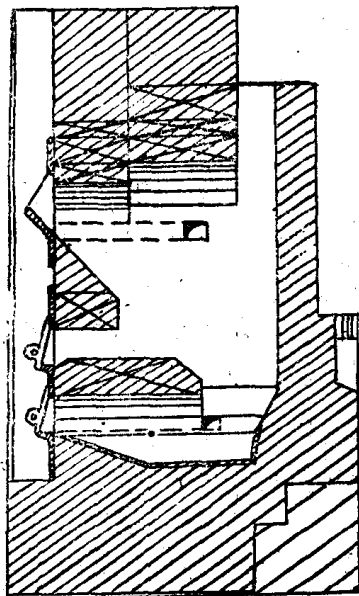


图 1-6 以陶制拱代替铸铁炉条的窑用燃烧室

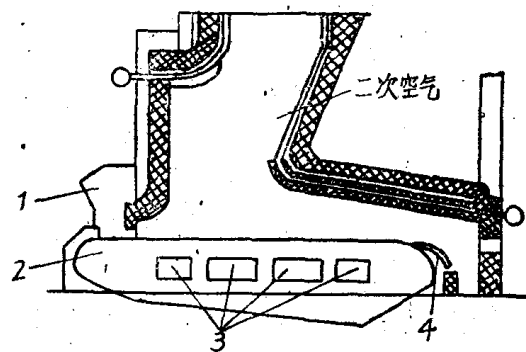


图 1-7 链条式炉栅
1-燃料仓；2-链条炉栅；3-空气进入孔；
4-消除灰渣的刮刀

梯状，炉渣由一个拱落到另一个拱上，再落到灰坑里。这种燃烧室用来燃烧灰分熔点低的烟煤，能获得较好的效果。

3. 链条式炉栅燃烧室

燃料加入炉栅后，随炉栅之移动，完成全部燃烧过程。构造如图 1-7 所示。

根据燃料在炉栅上之位置不同，分为如下各阶段，烘干和预热，逸出挥发分，焦炭燃烧和残留灰渣。链条长度与移动速度和燃料种类有关。此种燃烧室要求燃料块度均匀。

这种燃料室由于加煤均匀，厚度一致，减少了温度波动，也保证了燃烧完全，机械化程度高，节约劳动力，对于大型热工设备，如锅炉燃烧室多采用此种型式。

4. 播散式燃烧室

其构造如图 1-8，煤被播散器投到炉中，煤的细小部分在空间燃烧，较大粒子落在炉栅上燃烧，由于播散关系，煤层较松，燃烧情况较好。

煤的块度要求均匀，小于 3 毫米细粒不大于 25%，一般粒度在 20~30 毫米之间。此种燃烧室应用煤的种类广泛，但对无烟煤不适合，因煤层薄，易烧坏炉栅，此种设备可用于锅炉的燃烧室。

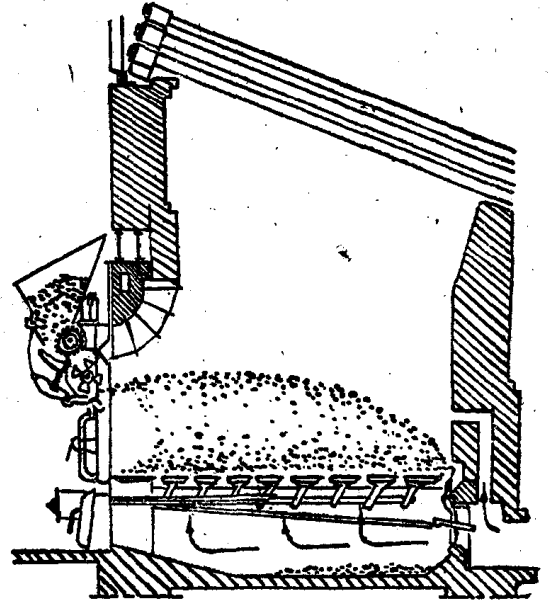


图 1-8 播散式燃烧室

三、固体燃料燃烧室的选择与计算

选择燃烧室，应满足以下几点要求：

- ① 燃烧室的热效率要高，因此应尽可能减少机械与化学不完全燃烧的热损失及散热损失。
- ② 所选择燃烧室类型，应适合于所用燃料种类。
- ③ 燃烧室应当符合热力设备的工作要求。
- ④ 操作最好能机械化，以降低劳动强度。
- ⑤ 构造简单，工作可靠，投资少，检修方便。

燃烧室的计算，主要应确定两个量，炉栅面积 R (米²) 和燃烧室容积 V (米³)，进一步确定燃烧室的具体尺寸。因此在选择与计算燃烧室时，首先要根据燃料种类，燃料用量及热力设备要求确定燃烧室类型（当温度要求不高，且为完全燃烧时可采用水平炉栅，当要求中性或弱还原气氛，可用倾斜式炉栅燃烧室），选定类型后再根据工艺过程所需的热量，并且考虑到燃烧室的热效率，以求得正确的燃料用量 B 。

$$\text{燃烧室热效率} \quad \eta = 100 - (q_{\text{机}} + q_{\text{化}} + q_{\text{散}}) \% \quad (1-13)$$

式中： $q_{\text{机}}$ 、 $q_{\text{化}}$ 及 $q_{\text{散}}$ 分别代表燃烧室中机械不完全燃烧热损失，化学不完全燃烧热损失及散热损失。

完全燃烧时，燃烧室热效率为 0.65~0.85，半煤气时为 0.75~0.85。根据下式确定炉栅面积

$$R = \frac{BQ_{\text{低}}^{\text{用}}}{q_{\text{面}}} \text{米}^2 \quad (1-14)$$

式中： R ——炉栅面积 (米²)；
 B ——燃料消耗量 (公斤/小时)；
 $q_{\text{面}}$ ——炉栅热力强度 (千卡/米²小时)。

即每小时，每米² 炉栅上所发出的热量，此数值是根据燃烧室类型，燃料种类，及操作方法来确定的，根据经验其值列于表 1-7。

炉栅面积确定后，进一步确定其长度及宽度，从而也决定了燃烧室个数。

对于人工操作水平炉栅：考虑操作方便，炉栅长 < 2 米

炉栅宽 < 1 米

链条炉栅，为保证煤完全燃烧所需之时间，链条移动速度 < 30 米/小时。

长度 > 3 米，一般 5.5~7.9 米（二链轮之中心间距）

宽度 1.56~1.42 米

播散式燃烧室：炉栅长：约 3 米

炉栅宽：视投料器个数而定，有一个投料器宽约 1 米左右。

根据下式计算燃烧室容积

$$V = \frac{BQ_{\text{煤}}^{\text{用}}}{q_{\text{容}}^3} \text{ 米}^3 \quad (1-15)$$

式中： $q_{\text{容}}$ ——燃烧室容积热力强度千卡/米³小时。即燃烧室空间每小时每米³所发出之热量，它的选择是根据燃料种类，燃烧室构造等条件所决定，其数值列于表 1-8。

对于半煤气燃烧室燃烧空间，可以由结构观点考虑确定。

根据炉栅面积及燃烧室容积，就可计算燃烧室高度。

除了按上述计算炉栅面积与燃烧室容积外，还应计算其炉栅的有效断面积，空气通过缝隙的速度（自然通风时一般采用 0.75~2.0 米/秒，机械通风时为 2.0~4.0 米/秒），炉栅有效面积可按下式计算：

$$F = \frac{BV}{3600W} \text{ 米}^2 \quad (1-16)$$

式中： B ——炉栅上每小时燃烧燃料数量（公斤/小时）；

V ——燃烧 1 公斤燃料通过炉栅空气体积（米³）；

W ——空气通过缝隙速度（米/秒）。

炉栅空隙的宽度可根据燃料块度及灰分多少来决定。

在完全燃烧的燃烧室中，炉栅上的燃料层高度按下式计算：

$$h = \frac{B}{\gamma F} \text{ 米} \quad (1-17)$$

式中： h ——燃料层高度（米）；

γ ——燃料的容重（公斤/米³）；

F ——炉栅面积（米²）。

对于半煤气燃烧室应按公式 (1-17) 所得燃料层高度增加 1~2 倍，因为在这些燃烧室中燃料数量是按同时容纳 2~3 小时所需的燃料量来计算的。

气体通过燃料层的阻力，包括燃料层，灰层和炉栅上三部分阻力的总和。它与燃料种类，块度，燃料在炉栅上的燃烧强度，炉条和炉条格子有关。

在粗略的计算时，对烟煤和褐煤在炉栅上燃烧时的阻力可依下列经验公式确定：

$$h_{\text{炉栅}} = \left(\frac{B}{50R} \right)^2 = \frac{\left(\frac{B}{R} \right)^2}{2500} \text{ 毫米水柱} \quad (1-18)$$

式中： B ——燃料平均消耗量（公斤/小时）；

R —— 炉栅面积 (米²) ;

$\frac{B}{R}$ —— 炉栅强度 (公斤/米²小时) .

较精确计算, 有下列经验公式:

$$\text{燃烧不烧烟煤时, } h_{\text{炉栅}} = 3 \left(\frac{B}{100R} \right)^2 \left(\frac{10}{\text{CO}_2} \right)^2 \quad \text{毫米水柱} \quad (1-19)$$

$$\text{燃烧烧烟煤时, } h_{\text{炉栅}} = 5 \left(\frac{B}{40R} \right)^2 \left(\frac{10}{\text{CO}_2} \right)^2 \quad \text{毫米水柱} \quad (1-20)$$

当采用人工鼓风时, 根据燃料燃烧之一次空气用量, 选择鼓风机的鼓风量; 根据空气在送入管道中之阻力及通过炉栅之阻力求出鼓风机所需之压头, 为了保证燃烧室操作正常, 鼓风机压头要增大 25% .

炉栅热力强度 (窑的燃烧室)

表 1-7

燃烧室种类	燃料种类	热力强度(千卡/米 ² 小时)
人工操作水平炉栅或 倾斜炉栅自然通风	木材及泥煤	500~700×10 ³
	褐煤	150~300×10 ³
	烟煤	300~500×10 ³
	无烟煤	400~600×10 ³
半机械化燃烧室: 具 水平炉栅及人工鼓风 或振动炉栅及人工操 作	木材及泥煤	1000~1400×10 ³
	褐煤	900~1300×10 ³
	烟煤	1200~1600×10 ³
	无烟煤	800~1100×10 ³
	①未经选择的 ②经过选择的	1000~1200×10 ³
具炉栅的机械化燃烧 室	木材	1100~1600×10 ³
	泥煤	2000~2200×10 ³
	褐煤	1000~1500×10 ³
	烟煤	1300~1800×10 ³
	无烟煤	1200~1000×10 ³

干燥器的燃烧室, 其炉栅热力强度应较上述数值减低 30~40% 即为上述数值的 60~70% .

燃烧室容积热力强度

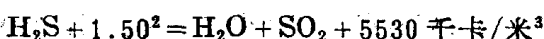
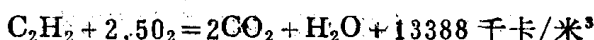
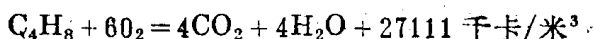
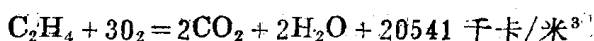
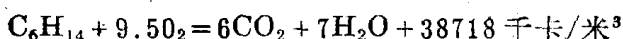
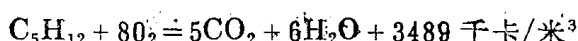
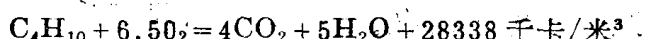
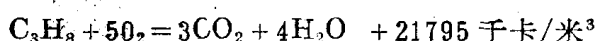
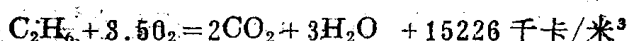
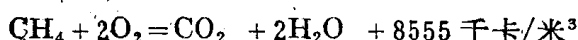
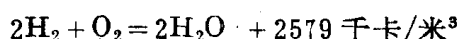
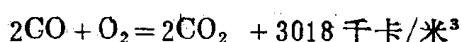
表 1-8

燃料种类	热力强度 (千卡/米 ³ 小时)	
	窑的燃烧室	干燥器的燃烧室
木材及泥煤	300~400×10 ³	200~250×10 ³
褐煤	200~350×10 ³	150~200×10 ³
烟煤	250~450×10 ³	250~300×10 ³
无烟煤	250~450×10 ³	250~300×10 ³
重油	250~500×10 ³	200~300×10 ³
气体燃料	200~350×10 ³	200~250×10 ³

第四节 气体燃料的燃烧及燃烧器

一、气体燃料的燃烧过程：

气体燃料的燃烧，是由煤气和空气的混合过程，及煤气或半煤气中可燃组分的燃烧过程所构成。而燃烧所获得温度之高低，火焰之长短，传热速率之快慢，均取决于煤气和空气的混合程度，预先经过充分均匀混合的煤气和空气混合物燃烧时，煤气中之可燃组分急剧氧化，并按下列各式进行反应。



如果煤气空气事先进行均匀混合，燃烧反应进行迅速且完全，因此获得的火焰短，温度高，一般称之为无焰燃烧。当空气煤气不进行预先混合，或没进行充分混合而直接送入燃烧室中。此时混合作用的进行，仅靠气体分子间的扩散，因此其速度很慢，此时气体可燃物处于缺氧的情况下，从而发生热分解，产生低分子的化合物和呈煤烟状态的碳粒子，其低分子化合物即行燃烧，而当炽热的碳粒子燃烧时产生强烈辐射并发光，故此时获得了发亮的长焰，其温度较低，一般称之为有焰燃烧。

煤气和空气的不同混合程度，是借助不同构造的燃烧器来实现的，且和气流的绝对速度、相对速度、交角、混合行程的长短、断面形状阻力等等因素有关。当改变空气和煤气的速度，使二者速度比大于或小于1时，混合程度就可得以改善，而最有效改善混合的方法是使二气体彼此成一定交角，交角愈大则混合愈好。混合程度也随断面比值和混合物行程的长度的增加而得到改善。

气体可燃物在燃烧时把热量向周围传递，加热周围的气体使其达到着火温度而进行燃烧；这种向周围气体可燃物传递热量，使之达到着火燃烧的速度称火焰传播速度。

影响火焰传播速度的因素有空气过剩量系数，混合物的初温和初压，燃烧温度，煤气成分及发热物等因素有关。提高混合气体初温及初压，空气过量系数略小于1，增加煤气发热量，提高燃烧温度，均可使火焰传播速度加大。

火焰传播速度对于气体燃烧和气体燃料的喷嘴设计有很大关系，如果混合气体由喷嘴流出的速度小于火焰传播速度，则燃烧作用将扩展到喷嘴中去，即发生“回火现象”。若混合气体的流速远较火焰传播速度为大时，则需在离喷嘴较远处才能燃着，此时需要较大之燃烧空间。气体燃料(600~800℃)的火焰传播速度一般不大于5米/秒，如果气流速度