

第一章

气体燃料和液体燃料的燃烧

燃料通常是指能与氧发生激烈氧化反应、放出大量热量的一种物质，它是由多种可燃与不可燃物质组成的混合物。不同燃料，其组成成分差别很大，具有不同的燃烧特点，在锅炉上使用时需采用不同的燃烧方法。锅炉上燃用的气体燃料种类较多，而燃用的液体燃料主要是重油和渣油。

第一节 气体燃料和液体燃料

一、燃料的成分和燃烧特性

气体燃料和液体燃料都属有机燃料，即都是复杂的高分子烃类物质燃料的主要化学成分有：碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）、灰分（A）及水分（M）

碳是燃料中主要的可燃成分，一般占燃料成分的 15% ~ 90%。碳完全燃烧时生成 CO_2 ，1kg 纯碳可放出 32866kJ 热量；碳在不完全燃烧时生成 CO，此时 1kg 纯碳放出的热量仅为 9270kJ。

氢也是燃料中的可燃成分，液体燃料中的氢元素含量一般可达 15%，气体燃料中的氢含量较多，尤其是天然气。燃料中氢元素的发热量最高，1kg 氢燃烧后的低位发热量为 120370kJ，约为碳发热量的 4 倍。

硫燃烧后生成 SO_2 及少量的 SO_3 ； SO_3 使烟气中的水蒸气露点大大升高，烟气中的 SO_2 及 SO_3 能溶解于水变成 H_2SO_3 （亚硫酸）及 H_2SO_4 （硫酸），会使锅炉低温受热面（如空气预热器）金属腐蚀及堵灰。锅炉排放的烟气中，硫化物将污染环境，对人体及农作物皆有害。

氧和氮都是不可燃成分，氧已和燃料中的部分氢、碳组成 H_2O 、 CO_2 ，使燃料中的碳、氢可燃成分相对减少，氮是惰性物质，因此氧、氮元素的存在会使燃料发热量有所下降。氮和氧在高温下形成氮氧化合物 NO_x （NO 及 NO_2 ），这对生态环境极为有害。目前国内外都在研究能降低排烟中 NO_x 含量的燃烧器及燃烧设备有的已取得了较好的效果，在设计燃烧设备时应充分重视 NO_x 的排放指标

灰分是燃料中不可燃的杂质，它不仅使燃料发热量降低，而且使受热面易受污染而影响传热，降低效率。气体燃料及液体燃料基本上不含灰分。

水分也是不可燃成分，燃料燃烧时，水分吸热汽化，使燃烧室温度降低，同时还在低温受热面处溶入 SO_2 和 SO_3 后造成低温腐蚀。一般液体燃料含水分约 1% ~ 3%，气体燃料

所含水分不高，一般等于该温度下的饱和水分。

二、燃料的成分分析基础和换算

1. 气体燃料

气体燃料是由若干可燃气体（如 CO 、 H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_2 和 H_2S 等）、不可燃气体（如 CO_2 、 N_2 、 O_2 等）以及水蒸气组成的混合气体。

气体燃料的组成常表示为各气体成分的体积百分数。由于气体燃料中所含水蒸气量会随外界条件（压力、温度等）变化而变化，这对研究燃料特性很不方便。为此对气体燃料采用不计入水蒸气的所谓干气体组成，与计入水蒸气的所谓湿（全）气体组成两种表示方法，分别用下角标 g 、 s 表示干气体燃料组成及湿气体燃料组成，则有

$$\text{CO}_g\% + \text{H}_{2,g}\% + \text{CH}_{4,g}\% + \dots + \text{CO}_{2,g}\% + \text{O}_{2,g}\% + \text{N}_{2,g}\% = 100\% \quad (1-1)$$

$$\text{CO}_s\% + \text{H}_{2,s}\% + \text{CH}_{4,s}\% + \dots + \text{CO}_{2,s}\% + \text{O}_{2,s}\% + \text{N}_{2,s}\% + \text{H}_2\text{O}_s\% = 100\% \quad (1-2)$$

式（1-1）和式（1-2）中各项分别为干气体燃料及湿气体燃料中各成分的体积百分数

在进行燃烧计算时，要求以实际进入燃烧装置的气体燃料成分进行计算，为此在已知干气体燃料成分时还需换算为湿气体燃料成分，对任一成分 X ，其干成分 X_g 与湿成分 X_s 间有以下关系

$$X_s = X_g \frac{100 - \text{H}_2\text{O}_s}{100} \quad (1-3)$$

气体燃料所含水蒸气量不高，一般等于该温度下的饱和水蒸气量。设在不同温度下 1m^3 干气体所能吸收的水蒸气量为 $G_{\text{H}_2\text{O}}$ (g/m^3)，则根据下式即可求出湿气体燃料中水蒸气所占体积百分数

$$\text{H}_2\text{O}_s\% = \frac{0.00124 G_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + 0.00124 G_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-4)$$

式中 0.00124——标准状态下 1g 水蒸气的体积。

2. 液体燃料

液体燃料的组成通常用质量百分数表示，锅炉上使用的液体燃料主要是重油和渣油。

实际使用的油的成分称收到基成分，用符号表示油中各成分的质量百分数，则有

$$\text{C}_{\text{ar}} + \text{H}_{\text{ar}} + \text{O}_{\text{ar}} + \text{N}_{\text{ar}} + \text{S}_{\text{ar}} + \text{A}_{\text{ar}} + \text{M}_{\text{ar}} = 100 \quad (1-5)$$

石油从地下开采出来时，一般含水分较高，交付运输前要经过脱水处理，规定含水量应小于 2%。在贮存、装卸和运输过程中，水分有可能增加，在石油炼制过程中，水分又会有变化。所以，油中的水分是不稳定的。为了消除水分不稳定的影响，把水分除去，剩下的就构成油的干燥基成分，用符号表示时可得

$$\text{C}_d + \text{H}_d + \text{O}_d + \text{N}_d + \text{S}_d + \text{A}_d = 100 \quad (1-6)$$

油中的灰分很少，把灰分和水分都去掉，就得到油的干燥无灰基成分，即

$$\text{C}_{\text{daf}} + \text{H}_{\text{daf}} + \text{O}_{\text{daf}} + \text{N}_{\text{daf}} + \text{S}_{\text{daf}} = 100 \quad (1-7)$$

① 本章在分析气体燃料的组成、气体燃料的发热量、计算燃烧所需的空气量及燃烧产物的体积时，均为标准状态（压力为 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度为 273K ）

上述三种不同成分基础间可以相互换算，换算系数如表 1-1 所示。

表 1-1 不同成分基础间的换算系数

已知成分	脚 标	所 求 成 分		
		收到基	干燥基	干燥无灰基
收到基	ar	1	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
干燥基	d	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	daf	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

三、燃料的发热量

燃料发热量有高位发热量和低位发热量。液体燃料发热量的单位为 kJ/kg ，气体燃料发热量的单位为 kJ/m^3 。当烟气中的水蒸气完全凝结，将水蒸气的凝结潜热释放出来，这时的发热量称高位发热量，用符号 $Q_{gr,i}$ 表示；如果水蒸气没有凝结，则称低位发热量，用符号 $Q_{net,i}$ 表示。实际上，烟气离开锅炉时的温度还相当高，水蒸气基本上没有凝结，所以锅炉中实际上可以利用的是低位发热量。

1 气体燃料的发热量

气体燃料的发热量可用气体燃料量热计（容克斯量热计）测定或通过计算求出。气体燃料是由若干可燃与不可燃气体混合而成的，可燃干气体低位发热量已由实验精确测定，因此，如已知干气体体积成分，即可按混合气体的关系计算干气体低位发热量。

$$Q_{net, V, g} = \sum x_{i, g} Q_{net, V, i, g} \quad (1-8)$$

式中 —— 干气体燃料中各组成成分的体积百分数，%

$Q_{net, V, i, g}$ —— 干气体燃料中各组成成分的低位发热量， kJ/m^3

湿气体燃料的低位发热量可按下式计算

$$Q_{net, V, s} = \frac{Q_{net, V, g}}{1 + 0.00124 G_{H_2O}} \quad (1-9)$$

2 液体燃料的发热量

液体燃料的发热量通常使用氧弹量热计测定燃料油的不同成分基础下的高位发热量与低位发热量间的换算关系如下

$$Q_{ar, net, V} = Q_{ar, gr, V} - 25(9H_{ar} + M_{ar}) \quad (1-10)$$

$$Q_{d, net, V} = Q_{d, gr, V} - 226H_d \quad (1-11)$$

$$Q_{daf, net, V} = Q_{daf, gr, V} - 226H_{daf} \quad (1-12)$$

实际上使用的油的发热量是收到基低位发热量 $Q_{ar, net, V}$ ，当油中的水分、灰分变化时， $Q_{ar, net, V}$ 也发生变化，而干燥无灰基低位发热量 $Q_{daf, net, V}$ 则不随水分、灰分而变，它完全取决于油的干燥无灰基成分，两者有如下关系

$$Q_{ar, net, V} = Q_{daf, net, V} \frac{100 - A_{ar} - M_{ar}}{100} - 25M_{ar} \quad (1-13)$$

油的收到基低位发热量由于水分变化而发生的变化，可按下式计算

$$Q_{ar,net,1,2} = (Q_{ar,net,1,1} + 25M_{ar,1}) \frac{100 - M_{ar,2}}{100 - M_{ar,1}} - 25M_{ar}^2 \quad (1-14)$$

式中的下角 1 和 2 表示两种水分不同的油

油的发热量应以实测值为准，也可以按元素成分近似估算

$$Q_{daf,net,V} = 339C_{daf} + 1030H_{daf} - 109(O_{daf} - S_{daf}) \quad (1-15)$$

实测值和按上式计算值间的误差应不大于 600kJ/kg

油的密度越大，相对含氢量越少，发热量也越低所以，如果水分相同，一般汽油的发热量要高一些，而重油的发热量则要低一些

四、气体燃料

气体燃料按来源可分为天然气及人工煤气两类。人工煤气的种类很多，按获得的方法和工艺不同而异，通常有液化石油气、炼焦炉煤气、高炉煤气和发生炉煤气等。按发热量可分为低热值煤气 ($Q_{net,V,s} \leq 6000 \sim 10000 \text{kJ/m}^3$)，如高炉煤气、发生炉煤气等；高热值煤气 ($Q_{net,V,s} > 16000 \text{kJ/m}^3$)，如天然气等；介于低热值和高热值之间的煤气称为中热值煤气。不同煤气的主要成分有 H_2 、CO、 CH_4 以及其他碳氢化合物 ($C_m H_n$) 等。

1. 天然气

有纯气田煤气和油田伴生煤气两类（简称气田和油田煤气）。其主要成分是碳氢化合物 $C_m H_{n+2}$ 。气田煤气含 CH_4 更高，油田煤气含 CH_4 稍低 还含有 CO_2 。天然气的发热量较高，大约 $Q_{net,V,s} = 35500 \sim 54000 \text{kJ/m}^3$ 。

2. 高炉煤气

炼铁炉的副产品。在冶炼过程中主要生成 CO，其体积百分含量约为 20% ~ 30%。气体中含有大量惰性气体 N_2 ，其体积百分含量占 60% 左右，含尘也很高，使用前要净化，发热量较低， $Q_{net,V,s} < 4000 \text{kJ/m}^3$ 。

3 发生炉煤气

在煤气发生炉中，煤在空气不足的条件下燃烧，气化生成 CO。CO 和 N_2 的体积百分含量与高炉煤气接近， H_2 约占 10%，其发热量比高炉煤气高些， $Q_{net,V,s} < 6000 \text{kJ/m}^3$ 。

在煤气发生炉中若用水蒸气和炽热的煤反应，则可产生水煤气。由于混入的氮气较少，其可燃成分与发热量都比用空气为氧化剂的发生炉煤气高，水煤气的成分含量主要为 CO 和 H_2 ($CO = 40\% \sim 50\%$ ， $H_2 = 45\% \sim 55\%$)，其余为少量的 N_2 和 CO_2 ，其发热量较高 $Q_{net,V,s} = 8300 \sim 10500 \text{kJ/m}^3$ 。也有用空气和水蒸气混合作为氧化剂的混合煤气，其成本较高且产量低。

4 炼焦煤气

炼焦炉的副产品。炼焦过程中用少量空气使煤受热析出挥发分，主要气体成分为 H_2 (50% ~ 60%) 和 CH_4 (20%)，含 N_2 很少、其发热量较高 ($Q_{net,V,s} = 16700 \text{kJ/m}^3$)，为中热值煤气。气体中还含有少量贵重化工原料、如焦油、氨和苯等，因此作为燃料烧掉是不经济的。

我国部分煤气的成分及特性列于表 1-2

表 1-2 我国部分煤气的特性

煤气种类	煤气平均成分 (体积百分数)											发热量 (kJ/m ³)	
	CH ₄	C _m H _n				H ₂	CO	CO ₂	H ₂ S	N ₂	O ₂	Q _{gr, V, s}	Q _{net, V, s}
		C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	其他								
气田煤气	97.42	0.94	0.16	0.03	0.06	0.08		0.52	0.03	0.76		39600	35600
油田煤气	83.18		3.25	2.19	6.74			0.83		3.84		44300	38270
液化石油气		50	50									113000	104670
高炉煤气						2	27	11		60		3718	3678
发生炉煤气	1.8				0.4	8.4	30.4	2.2		56.4	0.2	5950	5650

煤气输送方便，有易着火、易燃尽、含灰量少等优点。但使用时应注意以下一些问题：

(1) 对管道的腐蚀。由于 NH₃ 在水中呈碱性，H₂S、HCN、SO₂ 及 CO₂ 在水中呈酸性，O₂ 在水中会引起氧化性腐蚀，因此，当燃料中含有上述成分并含有水分时将会腐蚀管道，为此应除去燃料中所含的水分。

(2) 对人的毒性。在气体燃料中常含有 H₂S、HCN、CO、SO₂、NH₃、C₆H₆ 等有毒成分，当其超过毒性极限时可致人死亡。

(3) 爆炸极限范围。气体燃料中某些气体成分，当它与空气达到一定的混合比例时，就可能达到爆炸极限范围。因此除了要求阀门气密以外，燃烧装置在启动点火前，应先用空气吹扫。

五、液体燃料

锅炉用的燃料油主要是原油炼制过程中的产品——各种重油。为了更好地了解锅炉燃油的性质，将石油的炼制过程简要介绍如下。

从原理上，石油的炼制主要可以分为两类：一类是利用石油中各种成分的物理特性不同，主要是沸点不同，用蒸馏的方法加以分离；一类是用各种方法将烃的分子进行改造。各类中又有各种不同的方法。

蒸馏的方法有两种，首先是常压蒸馏，然后是减压蒸馏。

常压蒸馏是在接近大气压力下用蒸馏的方法分离石油，如图 1-1 所示。石油经油泵打入加热炉，被加热到 360 左右，然后送入常压蒸馏塔，塔内的温度上面低下面高。沸点低的石油气从塔顶馏出，经冷凝形成直馏汽油。在塔身上从上到下有 3 条侧线，依次流出沸点不同的馏分，它们是：煤油、轻柴油和重柴油。剩下沸点高的重质油从塔底排出，叫常压重油。

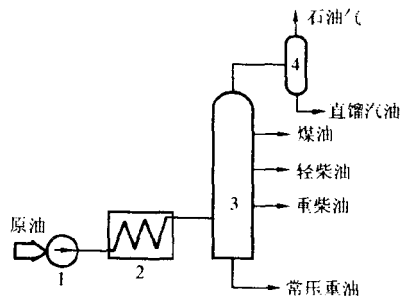


图 1-1 常压蒸馏系统示意图

1—油泵；2—常压加热炉；3—常压蒸馏塔；4—冷凝器

常压重油中还有不少有用的成分如果加热到 400 以上来蒸馏，其中的烃分子就会破裂。炼油厂根

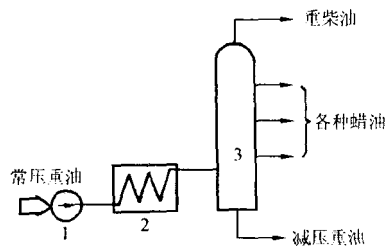


图 1-2 减压蒸馏系统示意图

1—油泵；2—减压加热炉；3—减压蒸馏塔

据气压降低、沸点下降的原理，进一步分馏重油，这就是减压蒸馏。如图 1-2 所示，减压蒸馏塔中的压力约在 0.01MPa 以下，这样重油中烃的沸点可降低 200 多摄氏度。重油加热到 400℃左右进入减压蒸馏塔，就可以把原来沸点约 700℃以下的各种烃分成重柴油和多种蜡油。塔底排出的是分子更大、沸点更高的重质油，叫减压重油（或减压渣油）。常压重油和减压重油二者又统称直馏重油。

为了增产轻质油，炼油厂还采用分子改造的方法进一步提炼，如裂化、重整等。所谓裂化就是将分子较大的烃断裂成分子较小的烃，经裂化分解后，取出气体、汽油和润滑油，残留下的高沸点的综合物称为裂化重油或裂化渣油。

重油的主要性质有黏性、密度、闪点、燃点、凝固点、静电特性、灰分、硫分等，油的运输、储存、雾化和燃烧都受这些特性的影响。

1. 黏性

黏性表示油的流动性，一般用黏度衡量黏度大则影响燃油的输送和雾化质量，也影响燃烧效率。工程上，重油黏度一般用恩氏黏度表示，恩氏黏度用恩氏黏度计测定。恩氏黏度是指在实验温度条件下，200mL 试验油从黏度计里流出的时间与 20℃的 200mL 蒸馏水流出的时间之比。相同温度下运动黏度 ν 与恩氏黏度 E 之间的换算关系式为

$$\nu = 0.0731E - 0.0631/E \quad (1-16)$$

式中 E ——恩氏黏度，°E。

油的黏度与温度、压力等有关，而温度对黏度的影响最显著。油温升高，黏度下降，如图 1-3 所示。为使雾化良好，进入油雾化器前的油黏度应不大于 3~4°E（压力雾化）；用蒸汽雾化时，可以允许油黏度大些（约 5~8°E）。

2. 闪点和燃点

油加热到一定温度会挥发出油蒸气。在大气压力下，用火焰在油面上掠过，油面出现短促的兰色闪光的最低温度，称为闪点。

油的闪点与其组成有密切关系。油中只要含有少量分子量小的成分，就会使其闪点显著降低。油的沸点越低，其闪点也越低，压力升高，其闪点也升高

测定闪点的方法有开口杯法和闭口杯法两种。开口杯法是将油样放在敞口的容器中加热进行测定，一般用于测定闪点较高的油，如重油、润滑油等。闭口杯法是将油样放在有盖的容器中加热测定，一般用于测定闪点较低油，如汽油等同一油种，测定闪点的方法不同，其闪点值也不同。开口杯法测定的闪点要比闭口杯法高，差值多半在 15~25℃

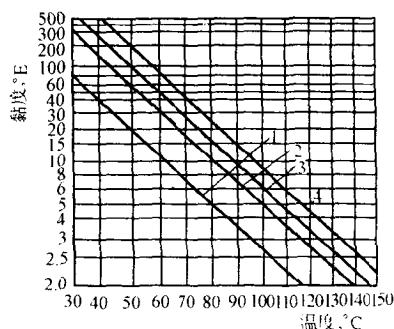


图 1-3 重油黏度与温度的关系

1—20号重油；2—60号重油；3—100号重油；4—200号重油

之间。

闪点是防止油着火的一项重要指标。敞口容器中油温接近或超过闪点，就会增加着火的危险性。在敞口容器中加热油，加热温度应低于闪点 10°C ，而在压力容器中则无此限制。

燃点是指燃油被加热到用外来火焰能点着，且能使燃烧时间持续 5s 以上的最低油温。显然燃点高于闪点。例如，试验测得某种原油的闪点为 39°C ，其燃点为 54°C ；某种重油的闪点为 222°C ，其燃点为 282°C 。

闪点和燃点都是防止火灾，鉴别油着火、燃料性能的重要指标。

表示油的着火性能还有其他一些特性，例如自燃点、油气爆炸浓度范围等，将在本章第三节中讨论。

3. 凝固点

燃料油是各种烃的复杂混合物，当温度逐渐降低时，它并不立即凝固，而是变得越来越黏直到完全丧失流动性为止。石油工业中规定：将试样油放在一定的试管中冷却，并将它倾斜 45° ，如试管中的油面经过 1min 保持不变，这时的温度称为油的凝固点。

油的凝固点与它的化学组成有关。一般油中含蜡量越高，凝固点越高。此外，油中胶状沥青状物质的含量对凝固点也有影响，因为胶状沥青状物质具有阻滞析蜡的性能。所以油经过脱蜡后，凝固点就降低；反之，除去胶状沥青状物质后，会使油的凝固点升高。

油的凝固点对油在低温下的流动性能有影响，在低温下输送凝固点高的油时应给予加热或采取必要的防冻措施。

不同产地不同种类的石油，其凝固点也不同，有的甚至差别很大。大庆石油的凝固点很高，在 $24 \sim 32^{\circ}\text{C}$ ，而克拉玛依石油的凝固点则低到 -50°C 。

4. 比热容

1kg 油温度升高 1°C 所需要的热量称为油的比热容，用符号 $c[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})]$ 表示。燃料油的比热容一般为 $2.1\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 左右。油的比热容与油温有关，可用下式计算

$$c = 1.74 + 0.0025t \quad (1-17)$$

式中 t ——油温， $^{\circ}\text{C}$ 。

5. 密度

指 20°C 时的油与 4°C 时的水在同体积下的质量比，以符号 ρ_4^{20} 表示，它是无量纲数值， ρ_4^{20} 在数值上和密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 相等重油的密度 ρ_4^{20} 值在 $0.9 \sim 1$ 之间。

6. 硫分

国产重油中含硫不等，一般在 $0.5\% \sim 3\%$ 范围内。根据硫的含量，重油可分成高硫油 ($S_{\text{ar}} > 2.0\%$)、中硫油 ($S_{\text{ar}} = 0.5\% \sim 2.0\%$) 和低硫油 ($S_{\text{ar}} < 0.5\%$) 三种。燃用高硫重油易使锅炉低温受热面腐蚀，而且排烟中含硫量增高，污染环境。

7. 静电特性

油是不良导体，它与空气、金属等摩擦，很容易产生静电。电荷在油面上积聚，能产生很高的电压。如一旦放电，就会产生火花。因此，静电是油发生燃烧和爆炸的原因之

产生静电的强弱与油的流动速度、管道的材料和粗糙度、空气湿度以及油中杂质含量

有关。油速大、湿度低、管道粗糙度大都会使产生的静电电压高。例如，某厂的一次油槽车静电试验中，大气湿度为 5.2%，装油出口速度为 4.5m/s，油面电压达 5000V 所以，输油、贮油的管线和设备都必须良好接地。

8. 残碳

表示油燃烧时积碳、结焦倾向的指标。所谓残碳是指将燃油在隔绝空气的条件下进行加热，油蒸气蒸发后所剩下的固体碳分占燃油的质量百分比。残碳量高的油燃烧时火焰黑度高，可增强火焰辐射，但在燃烧时易析出大量固体碳粒，不仅很难燃尽，而且还会导致油雾化器结焦堵塞，使雾化不良，破坏正常燃烧。我国重油残碳较高，一般在 1% 左右，所以应该特别加强对燃烧装置的维护。通常认为，当残碳不大于 0.25% 可采用压力雾化或低压空气雾化；当残碳大于 0.25% 就需采用高压空气或蒸汽雾化，否则在燃烧装置中易形成严重的积碳。

表 1-3 给出了几种燃料油的特性。

表 1-3 几种燃料油的特性

油 种	相对密度 ρ_4^{20}	黏 度 °E	凝固点 (°C)	闪点 (开口) (°C)	M_{ar} (%)	A_{ar} (%)	S_{ar} (%)
大庆原油	0.85 ~ 0.86	°E ₅₀ = 3.4 ~ 4	24 ~ 32	28 ~ 39	0 ~ 6	0.01 ~ 0.02	0.11 ~ 0.17
大庆重油	0.88 ~ 0.90	°E ₁₀₀ = 6 ~ 12	33 ~ 48	> 200	0 ~ 5	0.01 ~ 0.03	0.3 ~ 0.7
胜利原油	0.9 ~ 0.91	°E ₉₀ = 4.8 ~ 7.3	15 ~ 25	30 ~ 50	0.7 ~ 1.75	0.03 ~ 0.09	0.7 ~ 1.1
胜利重油	0.94 ~ 0.96	°E ₈₀ = 8 ~ 10	25 ~ 35	140 ~ 200	0.5 ~ 2.0	0.02 ~ 0.007	1.0 ~ 1.6
克拉玛依原油	0.86 ~ 0.87	°E ₅₀ = 2.78	~ 50	36	0.005		0.04

用于锅炉的燃料重油是由裂化重油、减压重油、常压重油或蜡油等按不同比例调和制成的。不同的炼油厂选用的原料和比例常不相同，但根据国家标准，应有一定的质量要求。按 80℃时的运动黏度分为 20、60、100和 200 等四个牌号、牌号的数目约等于该油在 50℃时的恩氏黏度°E₅₀。其质量指标见表 1-4。

表 1-4 燃料重油的质量指标

质 量 指 标	20 号	60 号	100 号	200 号
恩氏黏度 (°E ₆₀) 不大于	5.0	11.0	15.5	—
恩氏黏度 (°E ₁₀₀) 不大于	—	—	—	5.5 ~ 9.5
闪点 (开口) (°C) 不低于	80	100	120	130
凝固点 (°C) 不高于	15	20	25	36
灰 分 (%) 不大于	0.3	0.3	0.3	0.3
水 分 (%) 不大于	1.0	1.5	2.0	2.0
含硫量 (%) 不大于	1.0	1.5	2.0	3.0
机械杂质 (%) 不大于	1.5	2.0	2.5	2.5

其适用范围：20 号重油用于小型油雾化器（30kg/h 以下）；60 号重油用于中等油雾化器；100 号重油用于大型油雾化器；200 号重油用于与炼油厂有直接管线送油的大型油雾化器。

石油炼制过程中排出的残余物，不经处理，直接供给电厂作燃料，一般习惯上都称作渣油。因此，也就没有质量标准。渣油可以是常压重油、减压重油和裂化重油等。

渣油、重油的共同点是：

(1) 比重和黏度较大 比重大，脱水较困难，而黏度大，则流动性就差。为了保证顺利运输和良好雾化，必须将油加热到较高的温度。

(2) 沸点和闪点较高，不易挥发。因此，相对于轻质油和原油，火灾的危险性要小些。

某些电厂也使用部分轻柴油和重柴油。轻柴油按凝固点可分为 10、0、-10、-20、-30 等五个牌号，重柴油按凝固点可分为 RC-10、RC-20 两个牌号，其质量指标可参阅有关资料。

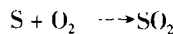
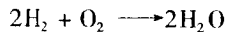
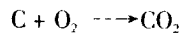
六、燃料的燃烧产物

空气和燃料的燃烧产物都是各种气体的混合物，在计算空气量和烟气量时，认为混合气体的组成成分都是理想气体，其体积均为标准状态下的体积。

1. 理论空气量

当燃料中的可燃成分完全燃烧，而空气中的氧全部用完，这种理想情况下燃烧所需的空气量称理论空气量，以 V^0 表示。对液体和气体燃料，其单位分别为 m^3/kg 及 m^3/m^3 。

(1) 液体燃料可根据油的元素成分分析进行计算。燃料中可燃元素 C、H、S 燃烧反应方程式为



则 1kg 燃料中 C、H、S 完全燃烧时所需要的氧的体积分别为

$$\text{对碳} \quad \frac{22.4}{12} \times \frac{C_{\text{ar}}}{100} = 1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100}$$

$$\text{对氢} \quad \frac{22.4}{4 \times 1.008} \times \frac{H_{\text{ar}}}{100} = 5.55 \frac{H_{\text{ar}}}{100}$$

$$\text{对硫} \quad \frac{22.4}{32} \times \frac{S_{\text{ar}}}{100} = 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100}$$

1kg 燃料中本身含有的氧的体积为

$$\frac{22.4}{32} \times \frac{O_{\text{ar}}}{100} = 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100}$$

则 1kg 燃料完全燃烧所需的空气量为

$$V^0 = \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 5.55 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} - 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100} \right) \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

化简得

$$V^0 = 0.0889 (C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) + 0.265H_{\text{ar}} - 0.00333O_{\text{ar}} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-18)$$

作为近似估算，可以利用以下经验公式，这时只须知道油的发热量，就可以算出理论空气量

$$V^0 = 2.63 \times 10^{-3} Q_{\text{af, net, v}} \quad (1-19)$$

对于燃料油， $Q_{\text{af, net, v}}$ 约为 41870kJ/kg，因此 1kg 油的理论空气量约为 11m³/kg。

(2) 气体燃料。气体燃料的成分用体积百分数表示，因此各可燃成分所需氧的体积可由化学平衡式直接求出。气体燃料燃烧所需的理论空气量为

$$V^0 = \frac{1}{21} \left[0.5\text{CO} + 0.5\text{H}_2 + 1.5\text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m \text{H}_n - \text{O}_2 \right] \quad (1-20)$$

式中 CO、H₂、H₂S、C_mH_n、O₂——煤气中各可燃成分及氧的体积百分含量，%。

在式 (1-20) 中如果代入气体燃料的全气体成分（即计入气体燃料中的含湿量），则计算出来的是对应 1m³ 湿气体燃料的理论空气量，如代入的是干气体成分，则计算出来的是对应 1m³ 干气体燃料的理论空气量。

若已知气体燃料的发热量，则理论空气量也可按以下经验公式进行估算。

当燃气的低位发热量小于 10500kJ/m³ 时

$$V^0 = 2.1 \times 10^{-4} Q_{\text{net, v, s}} \quad (1-21)$$

当燃气的低位发热量大于 10500kJ/m³ 时

$$V^0 = 2.6 \times 10^{-4} Q_{\text{net, v, s}} - 0.25 \quad (1-22)$$

对烷烃类燃气（天然气、油田伴生气、液化石油气）可采用下式计算

$$V^0 = 2.7 \times 10^{-4} Q_{\text{net, v, s}} \quad (1-23)$$

以上理论空气量计算中都为不含水蒸气的干空气量，空气中水蒸气的多少会因季节天气不同而改变。在锅炉热力计算中，一般采用 1m³ 干空气带入 0.0161m³ 的水蒸气，或者 1kg 干空气带 10g 水蒸气。

2. 燃烧所需的实际空气量

实际上，在锅炉的炉膛内，由于燃料中的可燃物不可能和空气中的氧绝对均匀混合，所以，为了保证完全燃烧，必须多供应一些空气。这多供应的一部分空气量叫做过剩空气量。理论空气量加上过剩空气量就是实际空气量，用 V 表示，对液体和气体燃料， V 的单位分别为 m³/kg 及 m³/m³。实际空气量和理论空气量之比叫做过量空气系数，用 α 表示，即

$$\alpha = V/V^0 \quad (1-24)$$

过量空气系数是锅炉运行中非常重要的指标之一。随着 α 的增大，烟气量增加，排烟热损失增加，同时也使风机耗电量增加。但如果 α 太小，则不能保证完全燃烧。因此，要求在保证完全燃烧的前提下，应尽量减少过量空气系数。

除微正压锅炉以外，一般锅炉烟道内的压力低于大气压力，外界空气经人孔门、看火孔以及炉墙不严密处漏到烟道中去。所以，越到烟道后部，烟气中的过剩空气量越大。

对燃烧有影响的是炉膛出口处的过量空气系数。对于燃油、燃气锅炉，在一般情况下，炉膛出口过量空气系数可控制在 1.05 ~ 1.1 左右。近年来，采用低氧燃烧，已可将炉膛出口过量空气系数降低到 1.05 以下。当然，这将对燃烧过程的组织提出新的要求，特别是要求炉膛内燃料和空气混合得非常均匀。

3. 燃烧产物的体积计算

燃料在理论空气量 ($\alpha = 1$) 条件下完全燃烧, 生成的烟气容积称理论烟气容积, 用符号 V_y^0 表示; 在过量空气系数 $\alpha > 1$ 时, 完全燃烧的燃烧产物容积称实际烟气容积; 用符号 V_y 表示。实际烟气容积比理论烟气容积增加的量应为过剩空气量和它带入的水蒸气量。对液体燃料, V_y^0 、 V 的单位为 m^3/kg ; 对气体燃料, 则为 m^3/m^3 。

(1) 液体燃料的烟气容积。由前述的燃料中可燃元素的燃烧反应方程式可得 1kg 燃料中 C、S 燃烧时所生成的烟气容积。

$$\text{对碳 } V_{\text{CO}_2} = \frac{22.4}{12} \times \frac{C_{\text{ar}}}{100} = 1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100}$$

$$\text{对硫 } V_{\text{SO}_2} = \frac{22.4}{32} \times \frac{S_{\text{ar}}}{100} = 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100}$$

为表达简便, 用 $V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$ 则有

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100}$$

$$\text{或 } V_{\text{RO}_2} = 0.01866(C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) \quad (1-25)$$

理论氮气容积 $V_{\text{N}_2}^0$ (对应理论空气量 v^0 , $V_{\text{N}_2}^0$ 来自燃料中的氮和理论空气量中的氮, 即

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2}^0 &= \frac{22.4}{28} \times \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79 v^0 \\ &= 0.8 \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79 v^0 \end{aligned} \quad (1-26)$$

式中 28 为氮分子量; 0.79 为干空气中氮的容积份额。

理论水蒸气容积 $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ (对应理论空气量) $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 通常来自三个方面: 即燃料中的水分; 燃料中氢燃烧反应生成的及理论空气量中带入的水分; 如果燃油炉采用蒸汽雾化, 还需另外加入一部分水蒸气量。现分别计算如下

1kg 燃料中水分蒸发的水蒸气容积

$$\frac{22.4}{18} \times \frac{M_{\text{ar}}}{100} = 0.0124 M_{\text{ar}}$$

1kg 燃料中氢燃烧生成的水蒸气容积

$$\frac{2 \times 22.4}{2 \times 2.016} \times \frac{H_{\text{ar}}}{100} = 0.111 H_{\text{ar}}$$

理论空气量带入的水蒸气容积

设 1kg 干空气中含有水蒸气 d 克 (一般 $d = 10\text{g/kg}$), 干空气的密度为 1.293kg/m^3 , 水蒸气的密度为 0.804kg/m^3 则 1m^3 干空气含水蒸气的容积为

$$\frac{d}{1000} \times \frac{1}{0.804} \div \frac{1}{1.293} = 0.00161 d = 0.0161$$

故 1kg 燃料的理论空气量 v^0 带入的水蒸气容积为 $0.0161 v^0$ 。

若 1kg 油的雾化蒸汽耗量为 $G_{wh}(\text{kg/kg})$ ，则这部分水蒸气的体积为

$$G_{wh}/0.804 = 1.24 G_{wh}$$

将上述四项水蒸气体积相加，得

$$V_{H_2O}'' = 0.0124 M_{ar} + 0.111 H_{ar} + 0.0161 V'' + 1.24 G_{wh} \quad (1-27)$$

综上所述，1kg 燃料在理论空气量下完全燃烧所得的理论烟气容积 V_v'' 为

$$V_v'' = V_{RO_2}'' + V_{N_2}'' + V_{H_2O}'' \quad (1-28)$$

不计入水蒸气的烟气称干烟气，其容积为

$$V_{gv}'' = V_{RO_2}'' + V_{N_2}'' \quad (1-29)$$

故有

$$V_v'' = V_{gv}'' + V_{H_2O}'' \quad (1-30)$$

液体燃料实际烟气容积计算如下。

过剩空气量为

$$\Delta V = V - V'' = (\alpha - 1) V''$$

增加的水蒸气量为

$$0.0161(\alpha - 1) V''$$

则实际烟气容积 V_v 为

$$\begin{aligned} V_v &= V_v'' + (\alpha - 1) V'' + 0.0161(\alpha - 1) V'' \\ &= V_{RO_2}'' + V_{N_2}'' + V_{H_2O}'' + (\alpha - 1) V'' + 0.0161(\alpha - 1) V'' \end{aligned}$$

实际烟气容积也可分为干烟气容积和水蒸气容积两部分，即

$$V_v = V_{gv} + V_{H_2O} \quad (1-31)$$

其中，干烟气容积 V_{gv} 按下式计算

$$V_{gv} = V_{RO_2}'' + V_{N_2}'' + V_{O_2}'' = V_{RO_2}'' + V_{N_2}'' + (\alpha - 1) V'' \quad (1-32)$$

(2) 气体燃料的烟气容积。参照液体燃料烟气容积的计算方法，计算 1m^3 湿气体燃料完全燃烧时所产生的烟气体积。

CO 、与 SO_2 的体积 V_{RO_2} 为

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= V_{CO_2} + V_{SO_2} \\ &= \frac{1}{100}(\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m C_m H_n + \text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2) \end{aligned}$$

理论水蒸气的体积 V_{H_2O}'' 为

$$V_{H_2O}'' = \frac{1}{100} \left(\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + \text{H}_2\text{S} \right) + 0.0161 V''$$

理论氮气的体积 V_{N_2}'' 为

$$V_{N_2}'' = N_{2,N}/100 + 0.79 V''$$

故理论烟气量 V_v'' 为

$$V_v'' = V_{RO_2}'' + V_{H_2O}'' + V_{N_2}'' \quad (1-33)$$

而理论干烟气量 V_{gy}^0 为

$$V_{gy}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 \quad (1-34)$$

气体燃料的实际烟气容积计算如下

实际烟气量 V_y 为理论烟气量 V_y^0 加上过剩空气量，即

$$V_y = V_y^0 + (\alpha - 1)(1 + 0.00161d) V^0 \quad (1-35)$$

实际干烟气量 V_{gy} 则为

$$V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha - 1) V^0 \quad (1-36)$$

气体燃料的理论烟气容积也可按发热量作近似估算

对烷烃类燃气

$$V_y^0 = 2.4 \times 10^{-4} Q_{net, y, s} + m' \quad (1-37)$$

式中 m —— 系数，对天然气 $m' = 2$ 对油田伴生气 $m' = 2.2$ 对液化石油气 $m' = 4.5$

对炼焦煤气

$$V_y^0 = 2.72 \times 10^{-4} Q_{net, y, s} + 0.25 \quad (1-38)$$

对低位发热量小于 12600 kJ/m^3 的燃气

$$V_y^0 = 1.73 \times 10^{-4} Q_{net, y, s} + 1 \quad (1-39)$$

第二节 影响燃烧速度的因素

了解影响燃烧速度（化学反应速度）的因素，对合理组织和控制燃烧过程有重要意义。燃料在炉膛中燃烧时，燃烧速度一般与以下一些因素有关

1. 温度

温度对燃烧速度的影响极为显著。实际上即使在常温下，燃料中的可燃元素与氧也进行着氧化反应，但是速度很慢，析出的热量很少，并且很快散失掉，感觉不出温度升高，这是一种缓慢的氧化过程。但是，如果温度比较高，化学反应速度很快，析出热量很多，不断产生高温烟气，这就是燃烧。燃烧速度与温度成指数函数关系。例如，氢燃烧时，当温度从 727°C 升至 872°C 时，燃烧速度增加了 2.7 倍。在温度更高的情况下，温度升高一点，燃烧速度可以增加很多。

因此，炉膛内温度越高，燃烧就越剧烈；炉膛温度较低，则燃烧进行得较缓慢，甚至不能保证稳定燃烧，引起灭火。在炉膛出口，烟气温度也不应低于 1000°C 左右。如果温度过低，这部分炉膛空间对燃烧的作用不大。在燃烧中心，温度一般可达 $1500 \sim 1600^\circ\text{C}$ 左右，甚至更高一些。

2. 浓度、压力

液体燃料和气体燃料在炉膛中燃烧时，均属于均相化学反应过程，当反应物（燃料和空气）浓度增加时，由于分子间的碰撞次数增加，化学反应速度加快。另外，在气相化学反应中，压力的改变也会引起反应物浓度的变化，因此压力对化学反应速度有直接影响，实践也证明了提高压力可以强化燃烧。例如，燃烧低热值高炉煤气时，在高压下燃烧时的

不完全燃烧产物 CO 的含量要比低压燃烧时低得多，其主要原因就是在高压下加快了 CO 的燃烧速度。

3. 燃料与氧化剂的混合比

浓度对化学反应速度的影响还通过混合气体中燃料与氧化剂的混合比反映出来，当可燃混合气体中仅含有氧化剂（即燃料浓度为零）或燃料（即氧化剂浓度为零），化学反应速度都将为零。在上述两种极限混合比之间，必然存在某一混合比，使化学反应速度达到最高值。实验证明这一混合比大致相当于化学当量比。由于燃烧温度也与混合物的混合比有关，因此更增大了混合比对化学反应速度的影响。

4 混合气体中惰性成分

燃料燃烧时，氧化剂来自空气，其中含有氮等惰性气体成分。惰性气体成分的存在不仅降低了反应物的浓度，而且由于惰性气体成分的掺入减少了有效碰撞次数，因此导致化学反应速度的下降，故惰性气体含量越高，反应速度下降越厉害。如果再考虑到由于惰性气体的加入，引起燃烧温度的下降，这将使化学反应速度进一步降低。根据以上分析，不难理解如采用富氧（向空气补氧）甚至纯氧燃烧将可大大提高化学反应速度

第三节 气体燃料的燃烧

一、预混可燃气体的着火

燃烧过程存在两个最基本的阶段：着火阶段和着火后的燃烧阶段。着火阶段是燃烧的准备阶段，在这一阶段，可燃物质与氧化剂在缓慢氧化的基础上，不断地积累热量和活性粒子，到一定时候，燃料就会着火燃烧。从工程应用角度看，着火的方式有两类：自燃和点燃。以下简单讨论一下这两种情况

（一）自燃

所谓自燃，就是在一定条件下，燃料和空气的混合物在缓慢氧化放热反应的基础上，不断地积累热量和活性粒子，随着混合物温度升高，在没有明火接近的条件下，自动着火燃烧。例如，日常生活中常见的煤堆自燃；电厂煤粉仓中的煤粉有时也会自燃；在燃油锅炉的空气预热器上如果有较多炭黑或油垢黏附，可能着火燃烧，这时在空气预热器区域没有明火接近，也属于自燃。因此，了解自燃过程的机理有很大的实际意义

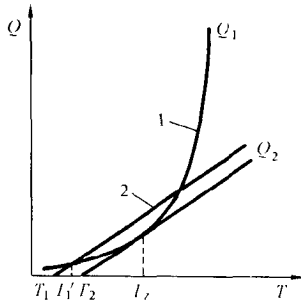


图 1-4 着火时的析热和散热情况

有关自燃的起因可作如下分析：

如图 1-4 所示，空气中的燃料，一方面和氧不断反应，析出热量，用 Q_1 表示；另一方面又不断向周围散热，用 Q_2 表示。当温度升高时，化学反应速度增加，析出的热量和反应速度成正比，因此析热量 Q_1 和温度的关系如图 1-4 中的曲线 1 散热量和燃料与周围介质之间的温度差成正比，随着燃料温度的升高，散热量 Q_2 直线增加，如图 1-4 中的曲线 2 显然，当燃料温度和介质温度相等时，散热量为零，所以 Q_2 和横坐标的交点，表示介质温度。当介质温度比较低，为 T_1 时，燃料也

进行缓慢的氧化反应，但是析出热量很少，很快散失，燃料温度只是略高于周围介质温度，为 T'_1 ，此时析热就和散热平衡了，在图中也就是 Q_1 和 Q_2 两根线相交，燃料的温度保持在 T'_1 ，不再升高，这是属于缓慢氧化的情况。逐渐提高介质温度，燃料温度也随着逐渐升高，在图中也就是 Q_2 线往右移，两根线的交点也往右移。最后，当介质温度达到 T_2 时，两根线相切，切点的温度为 T_2 ，也就是燃料的温度保持在 T_2 。如果介质的温度再增加，也就是 Q_2 线再往右移，两根线不能相交， Q_1 将大于 Q_2 不能平衡 此时 温度将不断上升 达到很高的水平而着火燃烧，这就是自燃的过程。 T_2 是没有产生自燃以前燃料的最高温度，或者也可以说是极限温度，高于这个温度就要自燃，因此把 T_2 称为自燃温度、自燃点或着火温度。

表 1-5 列出了一些燃料的自燃温度，供参考。

特别值得注意的是：

(1) 不仅煤会自燃，油也会自燃。例如，某厂汽轮机检修时，将供油区加热用的蒸汽改为由锅炉过热蒸汽经减温减压器供给，而当时又未投减温水，使高温蒸汽供入油区，在蒸汽管道保温层脱落处烤着了散在油区地面上的残油，引起着火。又如，某厂油沟内有蒸汽管道 (0.8 ~ 1.3MPa 抽汽) 通过，油沟上有水泥盖板，上面还有土覆盖在夏季，当时油沟的油是停滞的，由于有蒸汽管道通过，油沟内的温度比较高，而油沟的散热条件又比较差，引起自燃。

(2) 一般容易着火的燃料其自燃点并不一定低。这里所谓容易着火，一般指的是容易点燃。例如，氢气显然比褐煤容易着火，但氢气的自燃点却较高，如表 1-5 所示；虽然重油的闪点比原油高，但重油的自燃点却比原油低，渣油的自燃点只有 230 ~ 270℃。因此，油区加热蒸汽温度不宜过高，否则有可能引起自燃。

表 1-5 燃料的自燃温度

燃 料	自燃温度 (℃)
氢	530 ~ 590
一氧化碳	610 ~ 658
天 然 气	530
原 油	380 ~ 530
汽 油	415 ~ 430
轻 柴 油	350 ~ 380
重 油	300 ~ 350
渣 油	230 ~ 270
褐 煤	250 ~ 450
贫 煤	600 ~ 700

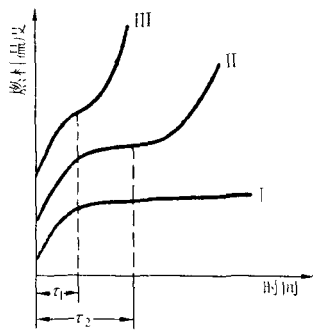


图 1-5 着火前后燃料温度的变化

重油的自燃温度比轻质油低，这主要是因为轻质油中的分子含碳原子数目比较少，它比较稳定，不容易氧化；而重油的分子中含碳原子数目比较多，比较容易和氧化合

轻质油的闪点比重质油低，则是因为轻质油的沸点比较低，在较低温度下，油面上的油气浓度就可以达到相当大的数值，以致可以被明火点燃；而重油的沸点比较高，必须在较高的温度下，油面上的油气浓度才可以达到能被点燃的数值。

(3) 发生自燃往往需要经过一定时间，图 1-5 表示燃料进入不同温度的介质后燃料温度的变化 当介质温度较低时，燃料温度稳定在一个较低的水平上（图中的曲线 I）；如果介质温度比较高，燃料温度已高于自燃点，则它的温度将继续升高（图中曲线 III）到燃料温度发生明显变化，需要一定的时间，叫做诱导时间。介质温度越高，诱导时间越短（曲线 III 的 τ ），温度较低，虽然也能着火，但诱导时间可能很长（曲线 II 的 τ_2 ）。例

如，煤堆的自燃常常需要几天或更长；燃油锅炉的尾部再燃，有时发生在停炉几个小时以后。从这里也可以看出，虽然重油的自燃点在 $300 \sim 350$ 左右，但是，如果炉温仅保持这样的水平，将重油喷入，是不能正常着火燃烧的。因为重油的喷出速度很高，它在炉内的停留时间很短，不允许有很长的诱导时间，必须保持更高的炉温才可能及时着火。但是，如果炉温在着火温度以上，将重油喷入，事先又没有投入点火装置，重油将不能及时着火而黏在水冷壁或炉墙上，逐步蒸发成油气和炉膛内的空气混合在一起，经过一些时间后可能会突然着火，引起炉膛爆炸。因此，锅炉点火时，必须先开风、投入点火装置，然后再喷油，严禁误操作。

(4) 自燃点（或称自燃温度、着火温度）不是一个常数，它不仅和燃料本身的性质有关，还和散热条件等有关。而且，往往更有实际意义的不是自燃温度，而是能引起自燃时的介质温度。只要达到这一温度，燃料会自动升温到着火温度，引起自燃。表 1-5 中所给出的数据是在试验室条件下测得的，只能作为参考，不能认为低于表中所给的温度就不能

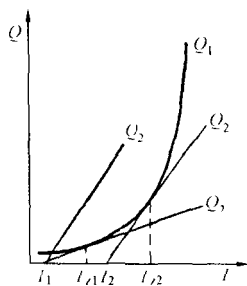


图 1-6 散热条件对自燃的影响

引起自燃例如，表中给出褐煤的自燃温度是 $250 \sim 450^{\circ}\text{C}$ ，而它在贮煤场贮存时，只是一般气温，却常常引起自燃此外，如果将燃油锅炉空气预热器上黏附的炭黑取出试验，它并不是很容易着火的；但是，在锅炉内，尾部烟道的烟温并不很高，却可能着火燃烧

图 1-6 表示了散热条件对自燃的影响。散热条件越好，在同样的温度下，散热量越大， Q_2 线越陡。当介质温度为 T_1 时，如果散热条件较好，这时不能着火；如果散热条件变坏， Q_2 线的斜度减小，则可能引起自燃从图中也可以看出当 Q_2 线的斜率不同时，它和 Q_1 线的切点也不同这就是说，当散热条件变化时，着火温度也要变化；散热条件越差，着火温度越低

(二) 点 燃

所谓点燃，是指利用具有较高能量的外部能源去接触可燃混合物，使之在靠近外部能量传入的部分先行发生剧烈的氧化反应而着火，然后火焰传播到整个混合物中去 这种方法也称强迫着火。

1. 火焰的传播

可燃混合物的局部先行着火后，其他地方的混合物是怎样着火的呢？这里有一个火焰的传播过程。实际提出的许多问题均需要了解火焰传播问题 例如，控制和预防充满可燃混合气体的矿井和坑道中的爆炸、锅炉燃烧中的火焰稳定问题等

在火焰传播过程中，若可燃混合物气体处于静止或层流状态时，称层流火焰传播；若可燃混合物气体处于湍流状态时，称湍流火焰传播

工程中的火焰传播基本上都是湍流火焰传播，但由于层流火焰传播相对比较简单，故以下简单介绍一下层流火焰传播的基本概念。

如图 1-7 所示，在一根管内充满可燃气体混合物，如果将它的一端点燃，混合物不是全部着火，而只有一小部分着火，在管道内出现一薄层火焰；由于燃烧，温度升高，火焰

中析出的热量将传递给邻近的一层未燃气体，把它加热到着火温度。这样，火焰就一层层地向另一端传去。如果在一个容器内充满可燃气体混合物，一点着火以后，火焰就可能向四面传去，使整个容器内的气体着火

层流火焰传播速度 u_0 (m/s) 是指层流火焰前锋法线方向上火焰前锋位移动速度和可燃混合物流动速度之间的相对速度。火焰传播速度与以下一些因素有关

- (1) 温度的影响。实验表明，火焰传播速度随火焰温度的增加而增大。
- (2) 压力的影响。实验表明，对大多数碳氢燃料，在其他参数不变时，随着压力的增大，火焰传播速度减小。
- (3) 气体成分（燃料与氧化剂混合比）的影响。图 1-8 为几种气体燃料的混合气体成分变化对火焰传播速度 u_0 影响的实验结果。可见，

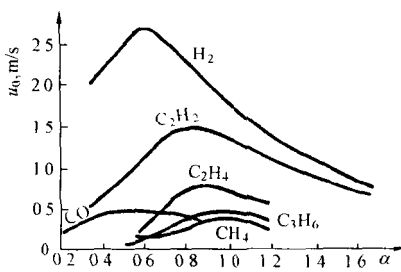


图 1-8 火焰传播速度和过量空气系数的关系

u_0 有一极大值，此极大值一般处于空气稍不足的情况下，即这时的过量空气系数略小于 1，因为只有在这时，混合物燃烧的火焰温度才能达到最大值此外，实验还证明，只有在一定的浓度范围内，火焰才能传播，如果超过这个范围，燃烧只能局限在点火火源附近，而不能传播；也就是存在火焰传播的上限和下限。所谓火焰传播的上限，就是混合物中气体燃料的最高浓度，高于这个浓度火焰不能传播

所谓火焰传播的下限，就是混合物中气体燃料的最低浓度，低于这个浓度火焰也不能传播。

火焰传播极限存在的原因是：当气体燃料的浓度太低时，混合物的发热值太低，反应析出的热量不足以将邻近一层气体加热到着火温度，所以火焰不能传播；而当气体燃料的浓度太高时，氧气的浓度太低，这样的混合物不能充分燃烧，不能析出很多热量，所以火焰也不能传播。

所以，如果容器内有气体燃料和空气的混合物，而且浓度处在火焰可以传播的范围内，当有明火接近时，一处着火，火焰就可以很快传播到整个容器中去，使整个容器内的气体都着火。如果容器内的气体浓度处在火焰传播的范围以外，即使用明火接近，火焰也不会传播到整个容器中去，就不会引起火灾和爆炸。所以火焰传播的浓度范围又叫做着火浓度范围，有时也叫做爆炸浓度范围。

表 1-6 给出了某些气体燃料的着火浓度范围

另外，着火范围还随混合物的温度和压力而变，当混合物的温度升高时，着火范围扩大，特别是上限变化比较大，而当压力比较低时，着火范围会缩小

在可燃气体混合物中增加惰性气体可以缩小着火范围。图 1-9 所示为几种惰性气体对甲烷空气混合物着火范围的影响。可见，增加惰性气体量对着火上限的影响更大，因为上限是处于空气不足的状态，在气体燃料浓度不变的情况下，增加惰性气体量会使空气更



图 1-7 火焰传播过程