

燃油燃气锅炉实用技术

RAN YOU RAN QI GUOLU SHIYONG JISHU

秦裕琨 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

燃油燃气锅炉实用技术

秦裕琨 主编

朱群益 李瑞扬 吕微 参编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是为适应我国燃油、燃气锅炉的发展而编写的。共分七章，重点介绍液体燃料、气体燃料的特性及其燃烧过程，油雾化器和调风器的原理、结构和计算，气体燃料燃烧器的原理、结构及计算，燃油、燃气锅炉炉膛及对流受热面设计方法，燃油、燃气锅炉的整体布置方案推荐，燃油、燃气锅炉的燃烧调整，过热蒸汽温度特性及调整方法；阐述了燃油、燃气锅炉常见事故的预防措施，受热面的积灰和腐蚀原因及其防止措施。

本书理论联系实际，针对性强，图例、例题详尽，文字通俗易懂，适合于从事锅炉设计、运行的技术人员及大、中专院校师生参考

图书在版编目 (CIP) 数据

燃油燃气锅炉实用技术/秦裕琨主编. —北京: 中国电力出版社, 2000
ISBN 7-5083-0418-7

I. 燃… II. 秦… III. ①燃气锅炉②燃油锅炉 IV. TK229

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 45689 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 3 月第一版 2001 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 357 千字

印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

随着我国现代化建设的进展，在一些地区发展燃油、燃气锅炉对环境保护、提高人民生活水平，具有重大的社会、经济和环境效益。近年来，国外燃油、燃气锅炉大量涌向国内市场，同时国产燃油、燃气锅炉也得到了很大的发展。编写本书的主要目的就是为适应燃油、燃气锅炉的发展需要并为有关设计和运行人员提供相应的参考资料。

本书在兼顾液体燃料和气体燃料燃烧的基础理论知识的同时，主要侧重于油、气体燃料燃烧器设计和燃油、燃气锅炉的运行。

本书共分七章，重点介绍了液体燃料及气体燃料的特性及其燃烧过程，油雾器及调风器的原理、结构和计算，气体燃料燃烧器的原理、结构和计算，燃油、燃气锅炉的燃烧调整，过热蒸汽温度特性及调整方法；阐述了燃油、燃气锅炉常见事故的预防措施，受热面积灰和腐蚀的原因及防止措施。

本书图例及例题详尽，文字力求通俗，可供从事锅炉设计、运行的技术人员及大、中专院校师生参考。

全书由秦裕琨主编，第一、二、四、六章由朱群益执笔；第三章由吕微执笔，第五、七章由李瑞扬执笔。

编 者

2000年2月

目 录

前 言

第一章 气体燃料和液体燃料的燃烧 (1)

第一节	气体燃料和液体燃料	(1)
第二节	影响燃烧速度的因素	(13)
第三节	气体燃料的燃烧	(14)
第四节	液体燃料的燃烧	(20)
第五节	火焰的稳定	(22)
第六节	混合及其对燃烧的影响	(26)
第七节	低 NO_x 燃烧技术	(28)

第二章 油雾化器的原理、结构和计算 (34)

第一节	油雾化器的分类	(34)
第二节	简单机械式雾化器	(35)
第三节	影响简单机械式雾化器雾化质量的因素	(42)
第四节	简单机械式雾化器的计算原理	(48)
第五节	回油式机械雾化器	(55)
第六节	回油式雾化器的理论计算	(64)
第七节	蒸汽式雾化器	(72)

第三章 调风器的原理、结构和计算 (80)

第一节	调风器的分类	(80)
第二节	调风的基本原则	(85)
第三节	气体流动的基本概念	(92)
第四节	蜗壳式调风器	(99)
第五节	切向叶片式调风器	(105)
第六节	轴向叶片式调风器	(110)
第七节	四角布置的直流式调风器	(120)
第八节	平流式调风器	(123)
第九节	燃烧器的计算及布置	(131)
第十节	调风器计算举例	(135)

第四章	气体燃料燃烧器	(142)
第一节	火炬长度和燃烧室容积热负荷	(142)
第二节	扩散式燃烧器	(146)
第三节	部分预混式燃烧器	(153)
第四节	全预混式燃烧器	(164)
第五节	低 NO_x 燃烧器	(171)
第六节	双燃料燃烧器	(174)
第五章	燃油、燃气锅炉的整体布置	(177)
第一节	燃烧器的布置	(177)
第二节	燃油、燃气锅炉的整体布置	(180)
第六章	受热面的积灰和外壁腐蚀	(191)
第一节	积灰	(191)
第二节	高温腐蚀	(193)
第三节	低温腐蚀	(195)
第四节	钢珠除灰	(202)
第七章	燃油、燃气锅炉的运行和调节	(208)
第一节	锅炉的启动和停运	(208)
第二节	燃烧调整	(214)
第三节	燃油、燃气锅炉的运行事故及故障	(224)
第四节	几个燃烧运行问题	(234)
参考文献	(246)

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。一般液体燃料含水量分约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 、 CH_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

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

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

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

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

石油从地下开采出来时，一般含水量较高，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，把灰分和水都去掉，就得到油的干燥无灰基成分，即

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

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/m³。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 $Q_{gr,v}$ 表示；如果水蒸气没有凝结，则称低位发热量，用符号 $Q_{net,v}$ 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 $x_{i,g}$ —— 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/m³。

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 $C_m H_n$ 。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%~50%, H_2 = 45%~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, 有着着火、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料油的性质, 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。

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

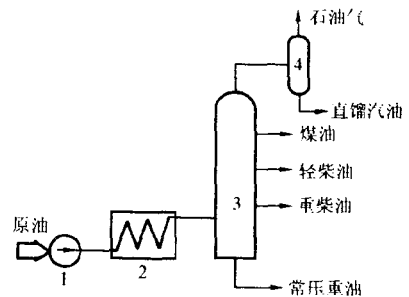


图 1-1 常压蒸馏系统示意图
1—油泵; 2—常压加热炉; 3—常压蒸馏塔;
4—冷凝器

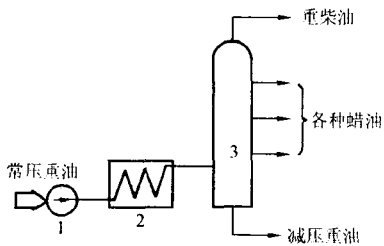


图 1-2 减压蒸馏系统示意图

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℃

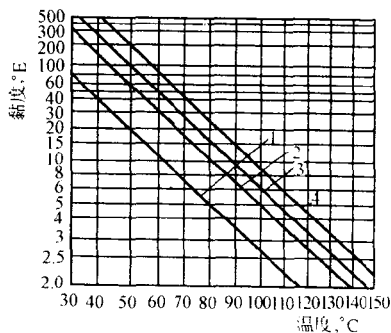


图 1-3 重油黏度与温度的关系

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,就会增加着火的可能性。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 ρ (kg/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 ($S_w > 2.0\%$)、中硫油 ($S_w = 0.5\%\sim 2.0\%$) 和低硫油 ($S_w < 0.5\%$) 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一。

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_r (%)
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°C 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°C 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 ₈₀) 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。

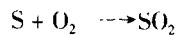
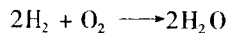
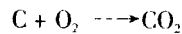
六、燃料的燃烧产物

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

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

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

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

1kg 燃料中本身含有的氧的体积为

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

则 1kg 燃料完全燃烧所需的空气体积为

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

化简得

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

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。

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

对于燃料油， $Q_{\text{ar.net.v}}$ 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

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

当燃气的低位发热量大于10500kJ/m³时

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

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

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

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^o 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^o 、 V_y 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

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

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

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

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

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 $V_{\text{H}_2\text{O}}^o$ (对应理论空气量)。 $V_{\text{H}_2\text{O}}^o$ 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 $d = 10\text{g}/\text{kg}$), 干空气的密度为 $1.293\text{kg}/\text{m}^3$, 水蒸气的密度为 $0.804\text{kg}/\text{m}^3$, 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^o 带入的水蒸气容积为 $0.0161 V^o$ 。