

锅炉燃烧过程

(苏联) Г. П. 瓦西里夫

曹毓文译

中国工业出版社

72.55
259.2)

锅炉燃烧过程

根据原著增订第二版翻译

〔苏联〕Г. Ф. 克诺烈著

馬毓义译

中国工业出版社

本书共包括“燃烧静力学”、“燃烧动力学”、“燃烧过程的气力学基础”、“混合过程”和“燃烧工艺学”五篇。

本书根据第一篇所阐述的理论概念对燃烧过程的工艺进行了分析。

本书的编写方式便于广大的技术界人士理解。本书可供从事热工程的工程技术人员、有关院校的研究生及高年级学生参考。

Г.Ф.Кворре

ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

(второе издание, переработанное и дополненное)

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1959

* * *

鍋 炉 燃 烧 过 程

馬毓义 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部編輯(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $28^{1/8}$ ·插頁 2·字数609,000

1966年3月北京第一版·1966年3月北京第一次印刷

印数0001—2,660·定价(科五)3.80元

*

統一书号: 15165·4310(水电-588)

431011

原文第二版序

自从本书初版問世以来，已經过去将近七年了，在这七年中，有关本书所有各篇几乎都积累了一些新資料。因此，作者不仅应当采用比較近代的解释去刷新本书初版中的資料，而且还得将本书的編排方式作些改动。

七年来积累下来的資料和一些数据，都使得作者不得不在固体燃料燃烧过程的見解方面发展一下，某些部分还要改变观点；只是在某些个别情况下才保留了过去的論述方式。

作者在近年来的研究活动中，与作者早年的学生和老同事以及新一代的研究工作者們合作得特別密切。属于前者的是 М.А.納日阿洛夫、Н.С.維諾格拉多夫、В.Л.卡茨涅尔逊；属于后者的是 Е.А.納哈佩强、В.И.赫沃斯托夫、Л.И.卡利謝夫斯基、В.М.沙哈罗夫、В.М.米罗諾夫、С.И.依沙耶夫、М.В.波利亚科娃、А.И.魯什帕等等。他們基本上是在莫斯科包曼工学院的試驗台旁成长起来的。在他們直接参加下所进行过的一些研究工作，主要是关于燃料的最强烈燃烧法方面的。

作者也非常感謝其他許多研究工作者們，他們允許作者利用他們的新資料，本书中需要引証这些資料的次数相当多。

由于研究燃烧室內輻射換热这一問題頗具特殊性，也有其独具一格的作用，因此作者决定将它另列一章，并商請作者的老友、早年的学生、技术科学博士 А.М.古尔維奇教授执笔。

Г.Ф.克諾烈

Г.Ф.克諾烈

目 录

原文第二版序

第一篇 燃烧静力学

第一章 燃料和氧化剂的

发热量 1

1-1 基本燃烧 1

1-2 氧化剂 3

1-3 燃料 3

1-4 氧化剂的发热量 4

1-5 可燃混合物的发热量 5

1-6 发热量的下限 6

1-7 燃料的发热量和它的成分 8

1-8 碳氢混合物的碳数 10

1-9 氧的吸热率 13

1-10 碳氢化合物及其氧化物相当发热的
量的综合公式 16

1-11 燃料的相当发热的综合公式 17

第二章 燃料可燃质的特性 20

2-1 固体燃料可燃质的主要特性 20

2-2 腐植煤和藻煤 22

2-3 煤的瀝青质 24

2-4 烟煤的岩相变种 24

2-5 炼焦煤的塑性计特性 25

2-6 固体燃料挥发物的特性 26

2-7 挥发物按加热程度的分馏作用 29

2-8 液体及气体燃料 31

第三章 燃料杂质的特性 32

3-1 燃料灰分的特性 32

3-2 灰的熔化性 34

3-3 粘性特性 36

3-4 矿物性(碳酸盐的)二氧化碳 38

3-5 燃料的技术水分 38

3-6 燃料中的硫 40

第四章 燃烧过程的物质平衡 42

4-1 氧化剂理论消耗量的综合公式 42

4-2 用于燃烧的空气容积消耗量 43

4-3 气态燃烧生成物的计算 44

4-4 天然煤气燃烧时按碳数所作的物
质平衡计算 46

4-5 烟气的特性 48

4-6 过剩空气 49

4-7 过剩空气的综合公式 50

第二篇 燃烧动力学

第五章 普通化学动力学原理 52

5-1 统计学的能量分配定律 52

5-2 最简单的化学反应的动力学 52

5-3 活化能 55

5-4 温度对反应速度的影响的例子 57

5-5 压力对反应速度的影响 59

5-6 化学反应动力学观念的发展 59

5-7 不分枝的连锁反应 61

5-8 多相反应 64

第六章 燃烧反应动力学 66

6-1 氢的燃烧 66

6-2 一氧化碳的燃烧 68

6-3 碳氢化合物的燃烧 69

6-4 连锁的自燃现象 72

6-5 固态碳的燃烧 74

第七章 扩散现象的基本原理 75

7-1 燃烧过程中的扩散现象 75

7-2 静止介质中的转移现象 77

7-3 气流中的转移现象 80

7-4 湍流的扩散现象 84

第八章 扩散燃烧过程 85

8-1 燃烧的扩散区域 85

8-2 外部扩散的燃烧(多相燃烧) 86

8-3 内部扩散的燃烧 89

8-4 副反应的影响 92

第九章 层流中的燃烧过程 95

9-1 均匀介质的动力燃烧过程·····95	13-4 燃烧加强程度·····163
9-2 火焰前沿扩张的法线速度·····97	13-5 几种典型燃烧设备的平均比较特性·····164
9-3 折射定律·····99	13-6 动力型炉子的总阻力·····167
9-4 火焰前沿的稳定·····100	第十四章 湍流的基本规律·····170
9-5 动力火炬的着火区域·····102	14-1 流入阻塞空间的自由气流的性质·····170
9-6 法线速度与可燃混合物中燃料及氧化剂的浓度的关系·····105	14-2 二次气流透入“承载”主气流的深度·····174
9-7 分子结构的影响·····110	14-3 湍流的基本特性·····176
9-8 从动力燃烧转到扩散燃烧·····111	第十五章 燃烧室的气体动力学结构·····180
9-9 扩散燃烧过程稳定法·····115	15-1 燃烧室中烟气-空气气流的单向流动·····180
第十章 湍流中的燃烧过程·····116	15-2 循环区域波及范围很小的燃烧方案·····186
10-1 动力的燃烧·····116	15-3 波及面很大的循环旋风区域的燃烧方案·····188
10-2 湍流火焰前沿扩张的速度·····119	15-4 有强力循环区域的燃烧方案·····191
10-3 扩散燃烧的概念·····121	15-5 旋风炉的气体动力特性对气流的非等温性及固态颗粒杂质的影响·····196
10-4 碳体的气化·····125	
第十一章 燃烧过程的热力条件·····127	第四篇 混合过程
11-1 均相燃烧·····127	第十六章 混合过程是燃烧原理的基础·····201
11-2 着火点·····129	16-1 燃烧的动力原理·····201
11-3 可燃混合物在气流中的着火和熄火·····130	16-2 燃烧的扩散原理·····202
11-4 有外部换热现象时的着火和熄火·····134	16-3 扩散火炬的浓度场·····203
11-5 多相燃烧过程的着火和熄火条件·····136	16-4 碳氢化合物的“气化”过程·····204
参考文献·····138	16-5 火焰前沿单位表面的单位发热量·····206
第三篇 燃烧过程的气体动力学基础	第十七章 燃用液体燃料时可燃混合物的构成情况·····207
第十二章 燃烧设备中烟气-空气气流流动的一般特性·····143	17-1 液体燃料的放热分解·····207
12-1 燃烧过程初步分类的气体动力学基础·····143	17-2 液体燃料的雾化·····209
12-2 层烧过程·····144	17-3 冷空气流截面上燃料的分布情况·····211
12-3 火炬燃烧过程·····147	17-4 喷散后的液体燃料的汽化·····217
12-4 旋风燃烧过程·····150	17-5 液体燃料质点周围的微观温度场和浓度场·····219
12-5 燃烧设备的阻力·····152	第十八章 连续原理·····221
第十三章 燃烧设备的燃烧强度·····157	18-1 稳定燃烧过程的连续方案·····221
13-1 炉子的气体动力质量准则·····157	
13-2 气流加热程度和炉子通道变窄程度·····159	
13-3 炉子-烟道系统的总流动阻力·····161	

18-2 层烧的連續方案：相向、平行、 相交及綜合方案·····	225	22-3 扩散型和綜合型噴燃器·····	279
18-3 层烧过程的空气分配·····	229	22-4 火炬燃烧过程的特点·····	280
18-4 激烈鼓风·····	231	第二十三章 液体燃料的火炬燃 烧过程·····	283
18-5 燃烧中心的阶段·····	234	23-1 着火前准备阶段进行的特性·····	283
第十九章 固体燃料混合及燃烧过 程微观現象的性质·····	239	23-2 使气化区域强化的特殊情况·····	284
19-1 固体燃料燃烧的碳理論·····	239	23-3 鍋炉燃烧室的空气旋流器·····	286
19-2 碳理論的綜述·····	242	23-4 航空噴气发动机燃烧室的工况 特性·····	287
19-3 揮发物的影响·····	244	23-5 最佳工况的概念·····	289
19-4 碳反应面附近发生的若干現象·····	245	23-6 液体燃料在气流中燃烧的試驗 研究·····	291
19-5 由碳产生的气体在空間中的燃烧·····	246	第二十四章 粉状固体燃料的火炬 燃烧过程·····	293
19-6 热及物质交換的真实系数·····	249	24-1 煤粉炉的一般特性·····	293
参考文献·····	251	24-2 溫度区域分布的性质；燃尽 曲线·····	294
第五篇 燃烧工艺学		24-3 粉状燃料燃烧机理的概念的 发展·····	298
第二十章 完全燃烧原理·····	255	24-4 碳粒燃尽和气化的性质·····	302
20-1 燃烧过程的平均特性和局部特性·····	255	24-5 一般性結論·····	304
20-2 烟气的有用能·····	255	24-6 气体动力因素对火炬燃烧过程 的影响·····	306
20-3 燃烧过程的溫度区域·····	257	24-7 煤粉火炬着火的条件·····	307
20-4 发热完全程度·····	259	24-8 固态除渣和液态除渣·····	309
20-5 发热率曲线·····	260	第二十五章 固体燃料在旋风炉中 的燃烧·····	312
20-6 理論单位引力·····	261	25-1 固体燃料旋涡炉的一般特性·····	312
20-7 燃烧强度和烟气流速·····	261	25-2 固态除渣旋风炉·····	314
20-8 烟气流的速度和溫度·····	262	25-3 液态除渣旋风炉·····	316
第二十一章 噴燃器、燃烧室及燃 烧設備·····	263	25-4 旋风室中燃烧过程进行的机理·····	321
21-1 量的特性和质的特性·····	263	第二十六章 固体燃料的层式燃烧·····	324
21-2 噴燃器和燃烧室·····	264	26-1 层烧炉的一般特性·····	324
21-3 燃烧强度和燃烧室容积热力强度·····	266	26-2 燃料层和燃烧室的工作·····	326
21-4 燃烧空間的几个区域·····	268	26-3 鏈条炉排上燃料层的燃烧特性·····	328
21-5 燃烧室对燃烧过程的影响·····	270	26-4 鏈条炉排上燃料层的燃烧方案·····	334
21-6 一次、二次及三次空气的送风 方式·····	272	26-5 其他相交供应方案中燃料层上 气体分析的特性·····	337
21-7 热力型炉子中火炬燃烧过程的 性质·····	273	26-6 使层烧过程着火前沿稳定的方法·····	339
第二十二章 气体燃料火炬燃烧过程 的性质·····	274	26-7 平行供应方案着火前沿的稳定·····	343
22-1 气体燃料在技术上的应用·····	274		
22-2 以动力燃烧原理为依据的噴燃器·····	275		

26-8 鏈条炉排燃料层着火前沿 稳定.....	349	第二十九章 炉內結渣.....	393
26-9 阶梯式前置炉.....	352	29-1 結渣的因素.....	393
26-10 强化上部引燃的方法.....	355	29-2 溫度特性.....	395
第二十七章 燃燒过程的热平衡	357	29-3 液态除渣的条件.....	396
27-1 燃燒过程的热平衡和效率.....	357	29-4 燃燒室中熔渣的分离.....	400
27-2 化学不完全燃燒热損失.....	359	29-5 液态除渣的結渣区域.....	402
27-3 机械不完全燃燒热損失.....	360	29-6 固态除渣的結渣区域.....	403
27-4 灰渣物理显热損失.....	363	29-7 层烧炉的結渣.....	406
27-5 外部冷却損失.....	363	第三十章 燃燒过程机械化的原則	409
27-6 炉子的直接放热.....	365	30-1 燃燒設備操作机械化的問題.....	409
第二十八章 燃燒室內的换热过程	366	30-2 机械式层烧炉.....	413
28-1 炉內换热的一般情况.....	366	30-3 火炬炉.....	425
28-2 輻射介质的性质.....	375	30-4 旋风炉.....	430
28-3 受热面的性质.....	381	30-5 自动控制的問題.....	436
28-4 炉內换热計算.....	387	参考文献	438

第一篇 燃燒靜力学

第一章 燃料和氧化剂的发热量

1-1. 基本 燃 燒

燃料和氧化剂两种物质相化合、在其进行过程中会强烈发热、反应生成物的温度和浓度也将同时突然提高而原来的反应物质的浓度却相应降低的现象，通常叫做燃烧（图 1-1）。

假使燃烧系统的能量势趋向于降低的方面（即燃烧系统的熵趋向于增加的方面）的话，那末燃烧过程可能自然发生（燃料和氧化剂所构成的可燃混合物在产生了一定条件时的自燃现象），或者是在外界热力刺激的影响下开始燃烧，并且继续燃烧下去，直到可燃混合物的储备耗尽为止（受外界热源影响的强制着火）。

基本燃烧过程是在呈原子状态的一些单质之间发生的；发生这种燃烧过程的基本原理是：这类原子都企图补充它们自己的外围电子层的电子、直到电子层完全被电子所饱和为止。这种典型的化学过程，也就是说这种原子-分子过程，能够使外围电子在能量上更经济地加以分配，而且在其所产生的氧化物分子中，有部分电子好象是化合后的两种原子所共有的。

例如，碳原子的外层有四个电子，氧原子却有六个，碳与氧起反应产生出二氧化碳的分子，所有这十六个电子则按图 1-2 所示的假想的平面式进行分配，而且其中八个电子是氧原子和碳原子所共有的（用虚线圈起来的那八个电子）。

氢原子被氧原子氧化时的情况也与此相似，但氢原子的外层只有一个电子（图 1-3）。

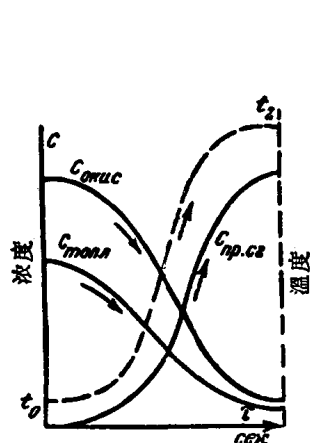


图 1-1 燃料的燃烧和发热现象与时间的关系

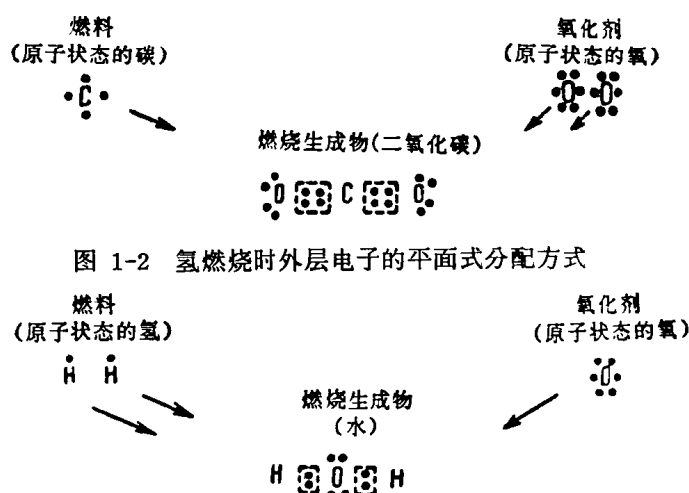


图 1-3 氢燃烧时外层电子的平面式分配方式

在这种情况下，氧原子的八个外围电子中，有四个电子是共有的。

氧是重要的单质氧化剂。广义地说，在其他好些单质氧化剂中也可能有燃烧现象。在周期表中与氧同族的硫，是一种弱氧化剂。但卤族元素的前两位（氟和氯）却是极强烈的氧化剂。

氟和氯各有七个外围电子，氢在氟或氯中燃烧所产生的燃烧生成物的分子中，有两个电子是共有的（图 1-4）。可燃质受氧化时，由于能量水平降低的结果，将有部分能量放出来，表现为自由热量，根据其所放出热量的多少，就可以判断氧化过程所达到的“热力”深度。

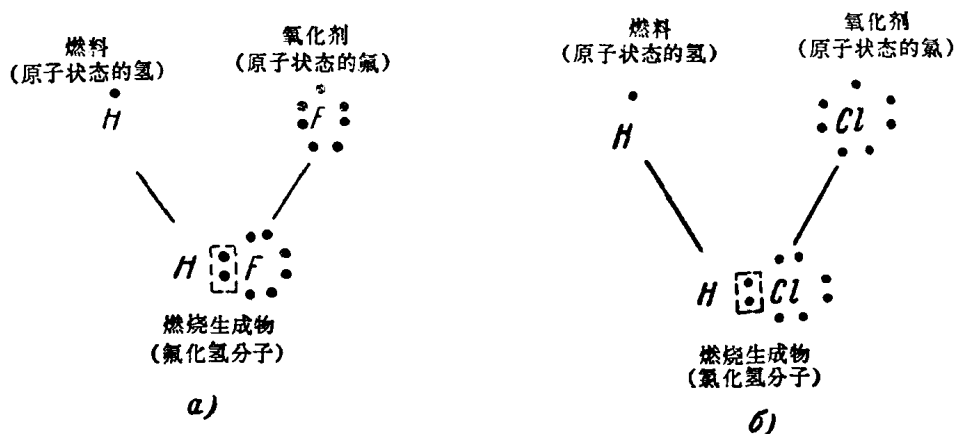


图 1-4

a—氢在氟中燃烧；b—氢在氯中燃烧

根据能量不灭定律，得：

$$Q_r m_r n_r + Q_0 m_0 n_0 = \sum Q_{n_z} m_{n_z} n_{n_z} + Q_{M.O.L.}, \quad (1-1)$$

式中 Q_r 及 Q_0 ——燃料及氧化剂的生成热；

n_r 及 n_0 ——燃料及氧化剂的分子数；

m_r 及 m_0 ——燃料及氧化剂的分子量；

$\sum Q_{n_z} m_{n_z} n_{n_z}$ ——燃烧生成物的生成热、分子量和分子数的相乘积之和（应当把所有参与反应的各个分子的这类数值加起来）；

$Q_{M.O.L.}$ ——燃烧所放出的自由状态的热量，称为“燃烧热”（大卡/克-分子）。

可是，必须根据氧化过程进行的强烈程度来判断它的氧化“能力”。如果考虑到氧化过程关系着燃料和氧化剂两方面，才可以谈氧化剂的相对氧化能力，把它的作用效果，与别的氧化剂对同一燃料的作用相比较，同样可以根据各种燃料对同一氧化剂的作用，来谈燃料的相对可燃性。我们可以指出，有不少的可燃物，它们的氧化过程都能够引起显著的发热现象，但是却很不容易发生燃烧现象，而需要预先活化（例如，石墨状，特别是钻石状的结晶碳就是这样的）。所以，发热率只不过是一个静力学性质的合成特性，丝毫也没有涉及燃烧过程的动力学。

1-2. 氧化剂

在实用上，凡是含有或是能够放出游离状态的氧原子的物质，都叫做氧化剂（如果限于氧型的氧化剂的话）。可是在所有可能成为氧化剂的物质中，只有那些和燃料互相作用得充分有效的，同时又是非常普遍和容易得到的氧化剂，才具有技术上的意义。就这种氧化剂来说，数量最多的，就是环绕着我们的空气，它是一种比较弱的氧化剂（就重量说，空气中含有23.2%的游离氧），由于空气是取之不尽的，就获得了技术上“独占性”的应用。另外一些更有效的氧化剂，即是含有大量游离氧的物质，例如硝酸（含有63.4%的游离氧）或纯氧，现时只应用在特种技术上。当然，特种氧化剂的实际意义，会随其产量的增加和价格的降低而增长。

因为任何一种氧化过程都必须破坏氧化剂原来的分子^①，所以在计算其所放出的能量（燃烧热）时，应根据方程式（1-1）去计算用于破坏氧化剂分子内各原子间的键所耗费的能量（分子的化合潜热），一般来说，这种能量可能是正的，也可能是负的。可是通常都把氧的分子状态当作是开始状态，于是所有的能量计算都是从这一假定的“零能量水平”来进行的。

1-3. 燃料

与上面相似，凡是含有或是能够放出可燃物的物质，都叫做燃料，而可燃物则是呈原子状态自由形式的单质。

所有工业用的天然燃料，都是有机化合物构成的，就氧化时的发热率来说，碳虽然次于其他许多元素，但是碳在有机化合物中大量集中，就使得它成为最重要的单质可燃质。燃料可燃质中，占第二位的就是氢，所有有机燃料都含有比较适量的氢，它的特点是氧化时有较高的发热率。硫在氧化时的发热量并不大，所以它是一种低劣的可燃质。加之硫的氧化生成物对周围的自然环境是有害的，而在一定的条件下，对其氧化生成物所通过的设备的金属结构也同样有害。可是在许多工艺过程中，硫仍可以用作燃料[例如生产群青、炼铜时生产出半成品（冰铜）等等]。但也必须注意它，就象注意那些时常碰到的、掺杂到几种主要燃料（某些产区的褐煤、烟煤和石油）里的杂质一样。

从技术观点来看，凡是具有下述几个重要特征的可燃物都可以算是燃料：（1）有够大的发热率（指单位重量而言，若指单位容积而言则更好）；（2）在空气中能够很快地烧起来；（3）燃烧生成物呈气态；（4）很普遍也很容易取得，便于大量采用。

在广泛的工业实践中，只采用一种唯一的氧化剂——空气，这样就使得燃烧过程进行中的一切特点及其主要效果（发出自由热量）都被认为只是燃料的事（虽然进行燃烧过程的一般只是可燃混合物、即燃料和氧化剂两种工质）。在这方面的主要特性，就是所谓燃料的发热量，而所谓发热量，就是1公斤燃料在完全燃烧时发出的热量 K_r （大卡/公斤）。

① 在缓慢的氧化过程中（应把这种过程与急剧的氧化过程即所谓燃烧区分开），常有这样的情况：即整个氧分子 O_2 进到被氧化的有机分子中，可是随后又将游离状态的氧原子放出来，例如乙醛(CH_3COH)氧化成醋酸(CH_3COOH)时，中间经过一个过氧化物(CH_3COOOH)暂时形成的阶段。

就工业上所使用的各种燃料来说，发热量的变动范围是很大的（大约从1500到15000大卡/公斤）。

时常也把单位容积的发热率理解为发热量（大卡/标准米³）。但是为了更为清楚起见，以后就把这种容积的热力特性称为燃料的热密度[文献1、2]。它是两个特性的相乘积：即燃料的发热量和它的重度（对于固体燃料则是容积重量或“净”重），即 $\gamma_r = K_r \gamma_r$ [大卡/标准米³①]。

最后，所谓燃烧热，是物理化学中一个通用的特性，它表示1克-分子的燃料燃烧时发出的热量（ $Q_{\text{燃烧}}$ 大卡/克-分子），而燃烧热（如果用 m_r 表示燃料分子的分子量的话）与发热量的关系，可以用下述简单式子表示：

$$1000Q_{\text{燃烧}} = K_r m_r \text{ [大卡/公斤-分子]}. \quad (1-2)$$

假使考虑到上面说过的氧化剂分子的“化合潜热”的话，就不应忘记，同一种燃料在不同的氧化剂中燃烧时，燃料发热量（ K_r ）所有的特性中，化合潜热的值是不同的，于是就有理由认为氧化剂有它自己的“额外”发热量（1公斤氧化剂是 ΔK_{ok} 大卡），对于一些主要的氧化剂，象氧分子或空气之类，常假设 ΔK_{ok} 等于零（往往是这样做）。如果用 $\kappa_{\text{氧化}}$ ②表示1公斤燃料所需的氧化剂理论消耗量（即相当于燃烧反应的消耗量），则燃料发热量的通式用本书的符号表示时，将成为如下的形式：

$$K_r = K_{rk} + \kappa_{\text{氧化}} \Delta K_{ok} \text{ [大卡/公斤]}, \quad (1-3)$$

式中 K_{rk} ——燃料在氧或空气中燃烧时的发热量。

1-4. 氧化剂的发热量

曾经不止一次地企图把一个计算特性引用到热工实践中以代替燃料的发热量，并表示燃烧时发出的热量，但该热量并不属于1公斤燃料，而是按下述关系属于1公斤参与反应的氧或空气：

$$1000Q_{\text{燃烧}} = K_o^{\text{max}} m_o \text{ [大卡/公斤-分子]} \quad (1-4)$$

（氧化剂）

或

$$K_o^{\text{max}} = \frac{K_r}{\kappa_{\text{氧化}}}. \quad (1-5)$$

这个特性是同样通用的，但也同样是片面的，就象燃料的发热量一样（认为只是可燃混合物的成分之一会发热），但这个特性却有一个实用上的优点，就是它的数值的变化范围较窄（例如，在碳或氢中“燃烧”空气时，是700大卡/公斤到1000大卡/公斤，“燃烧”氧时，是3040到4250大卡/公斤）。

以后应用到这个特性时，为了便于识别起见，我们把它叫做氧或空气的最大发热量

① 考虑到各个热力特性均有其重要性，以及为了更为明显和确切起见，最好是用一个表示容积的符号去表示热密度，以区别于普通采用的热量符号（ Q ，大卡）。

② 对于浅近的燃烧过程来说， $\kappa_{\text{氧化}} = \frac{m_o}{m_r}$ ，式中 m_o 和 m_r 代表氧化剂和燃料的分子量或原子量。

(K_o^{max} 大卡/公斤)。应用时应当加上上标 макс, 因为技术上的燃烧过程, 是在一定的空气和燃料的比例下进行的, 这种比例不同于化学计量的比例, 也就是不同于理论上相当于完全燃烧的化学反应的比例。当在空气中进行通常的完全燃烧过程时, 1 公斤燃料实际上耗费的氧化剂 κ 常多于理论消耗量 $\kappa_{\mu\mu}$ 。这两个数值的比, 称为氧化剂过剩系数, 并且在通常情况下, 可能是 $\alpha = \frac{\kappa}{\kappa_{\mu\mu}} \geq 1$ 。

当在空气中进行通常的燃烧过程时 ($\alpha \geq 1$), 每 1 公斤参与燃烧的空气, 其发热率常小于它的最大发热量:

$$K_o = \frac{K_o^{max}}{\alpha} [\text{大卡/公斤}] \bullet. \quad (1-6)$$

1-5. 可燃混合物的发热量

最客观的发热率的特性, 是可燃混合物 (燃料+氧化剂) 的最大发热量, 所谓可燃混合物的最大发热量, 就是 1 公斤的可燃混合物在燃烧时发出的热量 (H_{max} , 大卡/公斤, 即在氧化剂和燃料按化学计量比例时, 换句话说就是当 $\alpha=1$ 时发出的热量)。可燃混合物的最大发热量已经成为动力炉子[●]计算工作中的一个通用特性, 可用如下的与前面相似的关系表示:

$$1000Q_{\mu\mu} = H_{max} m_{cp} [\text{大卡/公斤-分子}], \quad (1-7)$$

式中 m_{cp} ——当 $\alpha=1$ 时可燃混合物的平均分子量或燃烧生成物的平均分子量。

在另外一种写法中, 即:

$$H_{max} = \frac{K_r + \kappa_{\mu\mu} \Delta K_{ok}}{1 + \kappa_{\mu\mu}} [\text{大卡/公斤}], \quad (1-8)$$

对于在空气或分子状态的氧里面燃烧的情况来说 ($\Delta K_{ok}=0$), 得

$$H_{max} = \frac{K_r}{1 + \kappa_{\mu\mu}} [\text{大卡/公斤}]. \quad (1-9)$$

从上面二式可以看出, 可燃混合物的最大发热量, 不仅显著地随燃料的性质而变, 而且也随氧化剂的性质而变; 氧化剂的影响可以用两种方式表示: 即用 $\kappa_{\mu\mu}$ 的值和氧化剂分子的化合热 (也就是用 ΔK_{ok} 的值) 表示。

在进行燃烧过程的实际情况下, 1 公斤工作可燃混合物的发热率, 将随氧化剂过剩的多少而不同于它的最大发热量, 即:

$$H = \frac{K_r + \kappa_{\mu\mu} \Delta K_{ok}}{1 + \alpha \kappa_{\mu\mu}}, \quad (1-10)$$

而且 $H = H_{max} \Psi$, 式中因数 Ψ 等于:

$$\Psi = \frac{1 + \kappa_{\mu\mu}}{1 + \alpha \kappa_{\mu\mu}}, \quad (1-11)$$

-
- 在采用有效的价格昂贵的氧化剂时, 燃烧过程常在 $\alpha < 1$ 的情况下进行。这时也可以得到最好的效果。
 - 此处动力炉子一词, 是对内燃机或蒸气发动机提出的, 它与目前使用的为各种各样的换热器服务的炉子, 包括蒸汽锅炉在内的热力炉子不同。在内燃机的理论中, 常就其相似性把上述特性 (H_{max}) 叫做燃料的发热量, 这里所谓燃料, 就是按化学计量比例来配合的可燃混合物。但是为了避免混淆起见, 必须沿用上面采用的学名。

因数 Ψ 可以称为可燃混合物的稀释系数。由此可知,当氧化剂过剩时($\alpha > 1$),则稀释系数 $\Psi < 1$,而燃料过剩时($\alpha < 1$),则 $\Psi > 1$ 。

当 $\kappa_{\text{мин}}$ 的值较大时,可设稀释系数 $\Psi \approx \frac{1}{\alpha}$ 。

1-6. 发热量的下限

当燃烧温度很高时,氢完全燃烧所生成的水分将转变为蒸汽状态。由于排烟温度很高(蒸汽没有凝结),以致耗费掉的汽化热在工业实践中多半不能加以利用。因此,在广泛的工程实践中,就巩固了关于燃料发热量下限 K_T^H 的观念;发热量的下限与发热量上限 K_T^Q 的关系,可用下面的简单式子表示[●]:

$$K_T^H = K_T^Q - 600(9H) = K_T^Q - 5400H [\text{大卡/公斤}], \quad (1-12)$$

若燃料含有掺杂的水分 W_r ,则

$$K_T^H = K_T^Q - 600(9H_r + W_r) [\text{大卡/公斤}], \quad (1-12a)$$

式中 H_r 和 W_r ——1公斤燃料中氢和水分所占的重量份额,公斤/公斤。

在我们运用的所有计算中,通常都把低发热量当作锅炉机组热平衡的一个重要单位。因此,在这里引用关于空气和可燃混合物发热量下限($K_o^{\text{макс.н}}$, $H_{\text{макс}}^H$)的观念是有好处的。表1-1中列出了几种典型燃料在空气中燃烧时燃料和氧化剂的上述几个重要特性。

应当注意这样一个事实,即对于许多燃料,象甲烷(发热最少)苯,特别是乙炔(发

表 1-1

燃 料	元 素 成 分 (%)			理 論 空 气 消 耗		发 热 量		可燃混合物的 最大发热量		空 气 的 发 热 量	
	C	H	O	$\kappa_{мин}$ ($\frac{\text{公斤}}{\text{公斤}}$)	$L_{мин}$ ($\frac{\text{米}^3}{\text{公斤}}$)	K_T^Q	K_T^H	$H_{макс}^Q$	$H_{макс}^H$	$K_O^{макс}$	$K_O^{макс.γ}$
大卡/公斤											大卡 米 ³
甲烷	75	25	—	17.2	13.3	13300	11950	730	665	695	900
苯	92.3	7.7	—	13.1	10.1	10000	9585	710	680	730	950
乙炔	92.3	7.7	—	13.1	10.1	11900	11485	845	815	888	1135
氢分子	—	100	—	34.5	26.4	34150	28750	962	810	835	1090
氢原子	—	100	—	34.5	26.4	90700	85500	2550	2410	2470	3230
碳(石墨)	100	—	—	11.5	8.9	7850	7850	630	630	685	890
汽油	85	15	—	15.0	11.6	11200	10390	700	650	692	895
煤油	86.6	14.4	—	14.8	11.5	10825	10050	686	636	676	870
石油	87.0	12.5	0.5	14.3	11.0	10700	10025	700	655	700	910
乙醇	52.2	13.0	34.8	9.0	6.9	7140	6440	714	645	715	935
甲醇	37.5	12.5	50.0	6.35	4.9	5330	4655	725	634	733	950
木柴	50	6	43	6.0	4.6	4800	4475	685	640	746	975

● 普通炉子中所维持的压力实际上等于1个大气压,这时烟气的气体空气混合物中水蒸汽的分压力也不大于0.1~0.15大气压。在这种蒸汽压力下,蒸发1公斤水分所耗费的热量,不会超过600~610大卡;或者是燃料所含水分的每1%约耗费6大卡的热。

热最多)之类,可燃混合物和空气的发热量显然不同。这是因为甲烷的分子 CH_4 是在激烈的放热效应(发热)中产生的(+17.89大卡/克-分子),苯的分子 C_6H_6 是在较适中的吸热效应中产生的(-19.82大卡/克-分子),而乙炔的分子 C_2H_2 则是在强烈的吸热效应(吸收热量)中产生的(-54.23大卡/克-分子)。显然,当这几种燃料的分子燃烧时,即当破坏这些分子时,就会出现一个相反的效应,即产生甲烷的燃烧生成物时有额外的吸热现象,而产生苯、特别是产生乙炔的燃烧生成物时,则有额外的发热现象。苯和乙炔含有同样的原素成分(即1公斤的苯或乙炔中各含有0.923公斤的碳和0.077公斤的氢),把它们对比一下是很有意思的。

当设法提高发热率或提高燃烧过程的温度水平时,诸如此类的额外放热效应非常重要。同时,重要的不仅是燃料发热量增加,燃烧生成物的数量也同样重要,因为发出的热量是分布在燃烧生成物里面的。因此,氧化剂被惰性杂质(例如氮)冲淡的程度越小,发热率($H_{\text{макс}}$)就越大。此外,根据同一理由,即使同是一种氧化剂,当它使不同的燃料氧化时,将会放出不同数量的热量;同是一种燃料,当它在不同的氧化剂中燃烧时,也会随氧化剂分子化合潜热的数值和正负号的不同而放出不同的热量。例如,煤油在臭氧中燃烧比在氧里面燃烧时能够放出更多的热,这是因为在产生臭氧(O_3)●时所耗费的化合潜热都放散出来了。

某些燃料在不同的氧化剂中燃烧时的热力特性,依次列在表1-2中,以资比较。

表 1-2

燃 料	元 素 成 分 (%)			发 热 量 K_T^H (大卡/公斤)	氧 化 剂	元 素 成 分 (%)				ΣQ_0	燃 烧 特 性	
	C_T	H_T	O_T			C_0	H_0	O_0	N_0		$\kappa_{\text{мун}}$ (公斤/公斤)	$H_{\text{макс}}$ (大卡/公斤)
煤油	85.6	14.4	—	10050	空气	—	—	23.2	76.8	—	14.8	635
					硝酸	—	1.6	76.2	22.2	+660	5.4	1400
					过氧化氢	—	5.9	94.1	—	+1308	7.3	1560
					四硝基甲烷	6.1	—	65.3	28.6	+25.5	7.0	1670
					氧	—	—	100.0	—	—	3.43	2260
乙醇	52.2	13.0	34.8	6440	空气	—	—	23.2	76.8	—	9.0	645
					氧	—	—	100.0	—	—	2.08	2090
乙炔	92.3	7.7	—	11485	氧	—	—	100.0	—	—	1.58	1890
					氧	—	—	100.0	—	—	8.0	3200
氢(分子)	—	100.0	—	28750	氧	—	—	100.0	—	—	—	—

上面列出的确凿例证指出,要想获得热效应,重要的将不仅是燃料的质量,氧化剂的质量也是重要的,因为两者均能决定工作可燃混合物的性质。燃料与空气的混合物、发热量是最低的,但不应忘记,燃烧设备的热能生产量,并非决定于参与燃烧过程的两种工质(燃料和氧化剂)的静力学特性,而是决定于燃烧过程的动力学,以后我们就要把主要的注意力放在动力学上。

● 氧,尤其是臭氧与油脂的混合物,是有爆炸危险的。

1-7. 燃料的发热量和它的成分

关于燃料燃烧时所发生的热效应与燃料成分之间的关系，是一个很有趣的问题。

想把燃料的发热量和它的成分联系起来的意图由来已久了。当年究洛克在制定公式时（1819~1838年）曾经想考虑燃料中氧的负作用，于是他提出过一个假定，即燃料中所有的氧都是和氢相化合的。根据这个假定，则能够氧化因而能够发热的，仅仅是那些多余的、呈“游离”状态的氢，从化学计量关系可以看出，游离氢量等于 $\left(H - \frac{O}{8}\right)$ 的差。究洛克根据纯碳、氢和硫的发热量，提出了一个计算公式：

$$K^* = 80.8C + 344.6\left(H - \frac{O}{8}\right) + 25S \text{ [大卡/公斤]}. \quad (1-13)$$

这个公式在许多情况下都产生出一些显著的和没有规律的偏差。以后，这种制定公式的方法，虽然根据氧与碳和氢按不同比例相结合的各种假定屡次加以修正，但是所得到的公式，在广泛应用性上，对于一些成分不同的燃料，从来也没有得出过令人满意的结果 [文献1及3]。大部分研究工作者（緬杰耶夫、兰格别英、馬列尔等）都摒弃了这种没有前途的工作方向，而采用选择经验系数的方法，但尽可能在数字上接近纯净元素的发热量的值。对各种燃料的广泛适用性来说，最成功的是緬杰耶夫公式（1897年）：

$$K^* = 81C + 300H + 26S - 26O \text{ [大卡/公斤]}. \quad (1-14)$$

最近，比其他研究工作者晚一些的馮德拉切克 [文献4]，曾经得出这样一个见解（1922~1927年），即用一次函数去表示发热量与燃料成分的关系是不可能令人满意的，于是他提出一个凭他的经验精选过的公式：

$$K^* = (78.6 + 2.8\sqrt{100 - C'})C + 270(H - 0.10) + 25S \text{ [大卡/公斤]}, \quad (1-15)$$

燃料可燃质中含碳范围 $C' = 90 \sim 45\%$ 时，他认为可以把上式简化为：

$$K^* = (89.1 - 0.062C')C + 270(H - 0.10) + 25S \text{ [大卡/公斤]}, \quad (1-15a)$$

式中 C' 和 C ——燃料可燃质和工作质中含碳的百分数。

在核驗这个公式时 [文献5]，可以看出，这个公式和緬杰耶夫公式是相似的，对于种类繁多的天然燃料来说，这个公式得出的结果，多半还能圆满地与用测热器测出的结果相符。可惜，从认识燃料的本性方面来说，这个公式在整个实际意义上很少有参考价值。

研究发热量与燃料成分的关系的意图，也曾经完全改变为另一种性质。例如，许多研究工作者都作出过好些计算公式，其所根据的原则，是不把所有的发热现象归之于燃烧着的燃料，而是归之于使燃料氧化的氧 [如魏立荐尔、别尔契叶、柯諾瓦洛夫、尤普特聶尔等]。柯諾瓦洛夫在本世纪20年代里，根据

$$K_{\kappa u c A} = \frac{K_r^*}{O_o} \text{ [大卡/公斤]}$$

的原理，研究出一个特性值 $K_{\kappa u c A}$ ，以应用于各种碳氢化合物。式中 K_r^* 大卡/公斤 是燃料的发热量（按“下限”计算，即是减去了汽化潜热的），而 O_o 公斤/公斤则是按完全燃烧时化学计量比例的氧的消耗量

$$O_o = 8/3C_r + 8H_r - O_r \text{ [公斤/公斤]}.$$

但是柯諾瓦洛夫未能把這項研究工作進行到得出明確的結果來。他把燃料的發熱量定為“氧化勢” $K_{\kappa u c A}$ 與氧的消耗量 O_o 的相乘積，于是他得出一個結論：即特性 $K_{\kappa u c A}$ 的值之所以不夠穩定，是因為能量水平不同的有機化合物各有其結構上的特點。他還把 $K_{\kappa u c A}=3050$ 的某些有機化合物，當作是“標準能量水平的有機化合物”，這個數值相當於“煤狀”●純碳的 $K_{\kappa u c A}$ 值。其他有機化合物的 $K_{\kappa u c A}$ 值，常大於或小於這個標準值。

但是我們知道， $K_{\kappa u c A}$ 這一特性值不穩定的主要原因，是沒有很好地考慮到碳氫氧化物形成的歷史（實際上，天然燃料就是碳氫氧化物構成的），在某些時期內，它們與分出水分子有關，以致引起碳和氫之間的關係發生突變和分子內部鍵的重新調整。尤普特聶爾作出了最後的修正，對於焦炭狀的碳，他採用 $K_{\kappa o \kappa c}=7630$ 大卡/公斤，並提出了如下的公式：

$$K^s = 76.3C_{\kappa} + K_{o\kappa} \frac{O^{Aer}}{100} [\text{大卡/公斤}]; \quad (1-16)$$

式中 $K_{o\kappa}$ ——經驗係數，決定於揮發物和焦炭燃燒時理論上所需氧量之比($O^{Aer}/O^{\kappa o \kappa c}$)。

某些研究工作者曾經設法把燃料的發熱量和揮發物的生成率($J\%$)直接聯繫起來。古塔立公式就是這種形式：

$$K^s = 82C_{\kappa o \kappa c} + aJ [\text{大卡/公斤}], \quad (1-17)$$

公式中的係數 a ，隨揮發物含量的不同而有不同的數值。施米特也提出過一個二次方程式：

$$K^s = 8100 + 2.95J(40 - J) [\text{大卡/公斤}]. \quad (1-18)$$

表 1-3

元 素	原 子 量	燃 燒 熱 (大卡/克-分子)	發 熱 量 (大卡/公斤)	
		Q_{Mol}	k^s	k^H
碳(石墨)	12.01	94.24 ± 0.10	7850	—
碳(金剛石)	12.01	94.46 ± 0.10	7865	—
氫	1.007	68.31 ± 0.01	33885	28485
鋁	26.97	190.4①	7050	—
硫	32.06	70.94	2210	—
鋰	6.94	70.5	10200	—

① 對 1 克-原子來說。

計算燃料發熱量的公式發展的歷史，同時也是對燃料本性的見解發展的歷史。為了制定一些計算公式，曾經利用過所有關於天然燃料複雜成分中個別組成部分的許多新穎而細緻的見解。但是直到現在，這個問題還不能認為已經得到解決，因為最可靠的結果，都是在採用經驗係數的基礎上得到的，而這些經驗係數，都缺乏明確的、在邏輯上經過証實的物理解釋。

關於好些純淨元素的發熱量的最新數據，列在表1-3中，以資比較[文獻 6 和 7]。

● 同時，他還採用“煤狀”純碳的發熱量等於 $K_r = 3050 \times \frac{8}{3} = 8140$ 大卡/公斤。