

高等学校教学用书

鍋爐燃燒过程

上册

苏联 Г.Ф. 克諾烈著

燃料工業出版社

本書上册叙述燃燒系統內基本燃燒过程的主要理論。上册第一篇叙述燃燒靜力学，第二篇叙述燃燒動力学。

本書的編寫方式，在於使廣大的技術界人士容易理解；本書可供運行工程師、設計工程師、技術員及大学高年級學生參考。

* *

*

鍋 爐 燃 燒 过 程

ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

根據苏联國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1951年莫斯科俄文第一版翻譯

苏联 Г. Ф. КНОРРЕ 著

馬 毓 義 譯

燃料工業出版社出版 (北京廠右街26号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第012号

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：戚務範 校對：唐宝珊

書号547電237

850×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 6 $\frac{1}{2}$ 印張 * 160千字 * 定價(8)一元零八分

一九五五年十月北京第一版第一次印刷(1—2,100冊)

原 序

本書介紹給讀者的，是連續燃燒過程理論和技術方面的一些專門性的經驗。作者儘力闡述一些在複雜的科學和技術領域中完全有必要作進一步深入研究的問題。

作者所闡述的理論體系，完全依據近代的擴散動力燃燒理論；這一理論之所以能夠成爲一個最有系統和最精確的理論，應當歸功於蘇維埃科學家們的辛勤勞動。

在這方面，應當首先提出的是在 Н.Н. 謝苗諾夫、Я.В. 捷爾多維奇、Д.А. 弗蘭克-卡門涅茨基等領導下的蘇聯科學院化學物理研究所的許多研究家們的工作，他們奠定了連鎖和熱力理論的基礎，而主要是均相燃燒過程的連鎖和熱力理論的基礎；還應當提出的是以 М.В. 羅蒙諾索夫命名的國立莫斯科大学物理研究所及蘇聯科學院 Г.М. 克爾齊然諾夫斯基動力研究所和在 А.С. 卜列德沃吉切列夫、Л.Н. 希特林、О.П. 朱哈諾夫、Х.И. 柯洛德切夫等領導下的 Ф.Э. 捷爾靖斯基全蘇熱工研究所的許多研究家的工作，他們創立了關於進行非均相燃燒過程和固態碳的氣化等方面系統化的理論。我們應當感謝他們；也應當提出的是 И.И. 保爾宗諾夫中央鍋爐汽輪機研究所物理技術實驗室和物理燃燒技術實驗室以及列寧格勒林索斐特工業大學熱工教研室和列寧格勒 М.И. 加里寧多科性工業大學熱力物理教研室的研究家們的工作，在他們中間，作者要特地提及下述幾位最親近的同志和學員們：В.И. 尼柯拉葉夫、В.В. 波米蘭采夫、Н.С. 維諾格拉多夫、Д.Н. 里雅霍夫斯基、Л.А. 烏里斯、А.П. 索柯爾斯基、В.Д. 卡茨涅爾遜、Р.С. 貝恩施欽、А.П. 萬尼切夫、М.Ф. 斯特努尼柯夫、В.К. 切雷歇夫、З.И. 帕諾夫、О.В. 涅克拉索夫、

Ф.А. 齊莫非葉夫等等，他們當時在作者的領導下，在天然燃料的燃燒機構方面，進行過許多複雜的研究工作。

燃燒機構和燃料氣化理論之所以獲得發展，我們還應當多多感謝其他的蘇聯科學家們的工作，其中包括有 В.И. 布利諾夫、З.Ф. 朱哈諾夫的研究工作，至於連續燃燒過程的氣體動力學的論述方面，則應當感謝 Г.Н. 阿布拉莫維奇的研究工作。

至於物理現象的模化(моделирование)，蘇聯學派在 М.В. 基爾皮切夫、А.А. 古哈曼、М.А. 米赫葉夫等領導下起了很大的作用，模化法是一種很有成效的研究方法，近來已推廣到燃燒過程的研究工作上。

作者首先依據所有不同學派的蘇聯研究家們的成就，扼要地敘述了近代燃燒理論的主要原理，敘述的範圍限於連續過程的一些問題。隨後，作者在本書下冊中以很多的篇幅重新闡述了燃燒過程工藝學的基本原理。

作者認為，如果利用了專門論文的記述，就可以說明個別的問題和過去從未發表過的許多新原理。

燃燒過程是一個複雜的問題，所以，作者基本上只能對現象做到本質上的分析，在進行分析的時候，作者儘量使分析接近於工程實踐中的具體問題，首先是與燃燒過程最為接近的鍋爐燃燒技術上的實際問題。作者依據這些分析，儘量使業已發展了的關於組織合理的燃燒過程形式的觀念系統化，同時着重地指出了我們社會主義工業和技術這一重要部門今後發展的基本方向。今後的發展必須從三個主要方面來研究：1)對於一些難於燃燒的、性質上還不大清楚的新的工業燃料，必須掌握它們的燃燒性能；2)把供應燃料的方法改成機械化，然後把一些燃燒設備改成自動管理；3)當燃用那些已經熟悉了的、廣泛使用着的燃料時，就應設法改進燃燒過程的進行強度，使之更為強烈。

在近代的實際經驗中，所有上述三個方面往往是非常複雜地互相交錯起來的。但是，這三個方面本質上乃是燃燒技術發展的三個連續階段。儘管蘇聯也像世界上任何其他國家一樣，各種各

樣的燃料蘊藏得異常豐富（這些燃料的可燃質和雜質、在性質上是極其不同的），可是，現時我們已經可以認為，我們快要完成上述三個階段的第一階段了。我們之所以能夠如此，應當歸功於黨和政府，因為，在我們的國家內，黨和政府保證了最廣泛的科學研究工作的推行，也就推進了關於我國所特有的燃料的性質的研究工作；同時，也應當歸功於許許多多卓越的俄羅斯、蘇維埃熱力工作者們創造性的努力，在創造一些合理的燃燒方法上，他們創造了許多新穎的方法，去燃燒那些不宜於遠道運輸的、尤其是地方性的各種各樣的燃料，其中有不少的燃燒方法，在全世界的燃燒技術中是史無前例的，因為，我國燃料政策的基本原則，就是要在工業中廣泛採用地方性燃料。我們想到這些名字，像：斯薦龐諾夫、斯特羅岡諾夫、舒霍夫、洛姆沙柯夫、基爾施、馬略利葉夫、薛爾尼茲基、謝爾希涅夫等等，就深信俄羅斯和蘇維埃的燃燒工作者是何等偉大。實際上，他們已經解決了掌握許多工業燃料的最基本的問題；這些燃料包括從天然氣體到貧瘠的無煙煤、從木材到灰分最多的可燃頁岩，也就是包括各種各樣的燃料，這些燃料在我國國民經濟的燃料平衡上，是有重要意義的。

因此，我們討論的問題將會完全轉入另外一個範圍裏去，即不是去研究燃料可燃質和雜質的新性質，而是研究這些性質之間的新關係，或是研究我們已經知道的燃料，由於採用新的開採法或加工法而引起的物理狀態的特性。

作者儘可能在近代燃燒技術發展的三個方面，說明一些主要問題的現狀。對於那些給予幫助的和就本書原稿作過指示的同志們，作者致以真摯的感謝。他們根據作者的請求，供給了他們工作中的許多資料；作者是以這些資料來解釋本書某些章節中所涉及到的一些原理的。

目 錄

第一篇 燃燒靜力学

第一章 燃料和氧化劑的發熱量	1
1-1. 基本燃燒	1
1-2. 氧化劑	3
1-3. 燃料	4
1-4. 氧化劑的發熱量	5
1-5. 可燃混合物的發熱量	6
1-6. 發熱量的下限	8
1-7. 燃料的發熱量和它的成分	11
1-8. 碳氫混合物的碳數	15
1-9. 氧的吸熱率	20
1-10. 碳氫化合物及其氧化物標準(相當)發熱量的綜合公式	24
1-11. 燃料的標準(相當)發熱量的綜合公式	26
第二章 固体燃料可燃質的特性	30
2-1. 固体燃料可燃質的主要特性	30
2-2. 腐植煤和藻煤	33
2-3. 煤的瀝青質	36
2-4. 石煤的岩相變種	37
2-5. 煉焦煤的塑性計特性	38
2-6. 固体燃料揮發物的特性	40
2-7. 揮發物按加熱程度的分餾作用	44
第三章 燃料雜質的特性	47
3-1. 燃料灰分的特性	47
3-2. 灰的熔性	50
3-3. 礦物性(碳酸鹽的)二氧化碳	53
3-4. 燃料的技術水分	54
3-5. 燃料的膠質水分	55
3-6. 燃料中的硫	57

第四章 燃燒过程的物質平衡	58
4-1. 氧化劑理論消耗量的綜合公式	58
4-2. 用於燃燒的空氣容積消耗量	60
4-3. 氣態燃燒生成物的計算	61
4-4. 天然氣體燃燒時按碳數所作的物質平衡計算	64
4-5. 烟氣的特性	65
4-6. 过剩空氣	68
4-7. 过剩空氣的綜合公式	70

第二篇 燃燒動力學

第五章 普通化學動力學原理	72
5-1. 統計學的能量分配定律	72
5-2. 最簡單的化學反應的動力學	73
5-3. 活化能	76
5-4. 溫度對反應速度的影響	79
5-5. 壓力對反應速度的影響	82
5-6. 化學反應動力學觀念的發展	82
5-7. 不分枝的連鎖反應	83
5-8. 多相反應	83
第六章 燃燒反應動力學	91
6-1. 氫的燃燒	91
6-2. 一氧化碳的燃燒	95
6-3. 碳氫化合物的燃燒	97
6-4. 連鎖的自然現象	99
6-5. 固態碳的燃燒	102
第七章 擴散現象的基本原理	104
7-1. 燃燒過程中的擴散現象	104
7-2. 靜止介質中的轉移現象	107
7-3. 氣流中的轉移現象	113
7-4. 湍流的擴散現象	120
第八章 擴散燃燒過程	121
8-1. 燃燒的擴散區域	121

8-2.	外部擴散的燃燒 (多相燃燒)	123
8-3.	內部擴散的燃燒	128
8-4.	副反應的影響	134
第九章	層流中的燃燒過程	138
9-1.	均勻介質的動力燃燒過程	138
9-2.	火焰前沿擴張的法綫速度	141
9-3.	折射定律	145
9-4.	火焰前沿的穩定	146
9-5.	法綫速度與可燃混合物中燃料及氧化劑的濃度的關係	148
9-6.	溫度和壓力的影響	149
9-7.	從動力燃燒轉到擴散燃燒	151
9-8.	擴散燃燒前沿	154
第十章	湍流中的燃燒過程	159
10-1.	動力的燃燒	159
10-2.	擴散燃燒的概念	164
10-3.	碳體的氣化	168
第十一章	燃燒過程的熱力條件	171
11-1.	均相燃燒	171
11-2.	着火點	175
11-3.	可燃混合物在氣流中的着火和熄火	177
11-4.	有外部熱交換現象時的着火和熄火	182
11-5.	多相燃燒過程的着火和熄火條件	185
參考文獻		190

第一篇 燃燒靜力學

第一章 燃料和氧化劑的發熱量

1-1. 基本燃燒

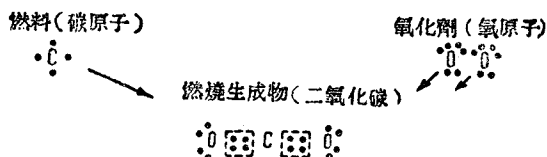
燃料和氧化劑兩種物質相化合並強烈發熱的化學過程，稱為燃燒；發熱作用使得反應混合物的溫度激烈地突然提高。

假使燃燒系統的能量勢趨向於降低的方面（即是燃燒系統的熵趨向於增加的方面）的話，那麼，燃燒過程可能自然發生（燃料和氧化劑所形成的可燃混合物的自然現象），或是在外界的熱力刺激的影響下開始燃燒，並且繼續燃燒下去，直到可燃混合物耗盡為止（受外界熱源影響的強制着火）。

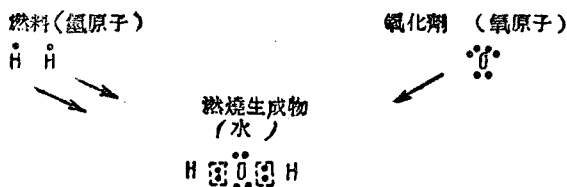
其實，燃燒現象只可能在呈原子狀態的一些單質間發生，而且，各種原子都企圖補充它自己的外圍電子層的電子，直達到八個為止，燃燒現象就是在這樣的基礎上發生的^①。因此，我們可以說，燃燒現象是一種典型的〔化學〕過程，即是一種原子—分子過程，它能夠使外圍電子在能量上更好地加以分配，而且，在其所產生的氧化物分子中，有部分電子是公有的。例如，碳和氧的燃燒反應就是這樣，碳原子有四個外圍電子，氧原子却有六個，燃燒後產生二氧化碳的分子，一共有十六個外圍電子，它們的分配形式為：

這十六個電子中，在氧和碳原子之間的八個電子是公有的。與此相似，只有一個外圍電子的氫原子被氧原子氧化時，外圍電子的分配形式為：

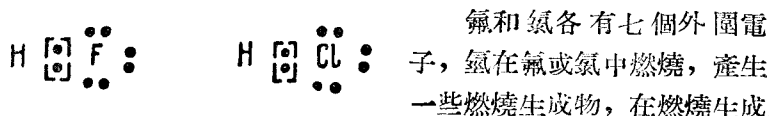
① 這裏是指繆列葉夫週期表中第二、三兩個週期的元素，本節所討論的燃燒過程，也只限於這兩個週期。氫原子一般都企圖把它自己的外圍電子層，補充為兩個電子。



在這種情況下，一共有八個外圍電子，其中四個是公有的。



氧是主要的單質氧化劑。廣義的講，在其他好些單質氧化劑中也可能有燃燒現象。在週期表內和氧同族的硫，是一種弱氧化劑。同時，鹵族元素的前兩位(氟和氯)也是極強烈的氧化劑。



物的分子中，有兩個電子是公有的。

在可燃質的氧化過程中，由於能量勢降低的結果，就使得熱能放散出來，根據其所放出熱能的多少，就可以判斷氧化過程進行的[烈]度。

按能量不滅定律，得：

$$Q_T \cdot m_T \cdot n_T + Q_O \cdot m_O \cdot n_O = \sum Q_{\Pi T} \cdot m_{\Pi T} \cdot n_{\Pi T} + Q_{\text{МОЛb}}, (1-1)$$

式中 Q_T 和 Q_O ——生成熱；

n_T, n_O ——分子數；

m_T, m_O ——燃料和氧化劑的分子量；

$\sum Q_{\Pi T} \cdot m_{\Pi T} \cdot n_{\Pi T}$ ——燃燒生成物的生成熱、分子量和分子數的相乘積之和(應當把所有參與反應的各個分子的這類數值加起來)；

$Q_{\text{МОЛb}}$ ——燃燒所放出的自由狀態的熱量，稱為[燃

燒熱] (大卡/克-摩爾)。

可是，必須根據氧化過程進行的強烈程度來判斷它的氧化[能力]。如果考慮到，氧化過程是關於燃料和氧化劑兩方面的，就可以談氧化劑的相對氧化能力，把它的作用效果，和別的氧化劑對同一燃料的作用相比較，同樣可以根據各種燃料對同一氧化劑的作用，來談燃料的相對可燃性。我們可以指出：有不少的可燃物，它們的氧化過程都能夠引起顯著的發熱現象，但是，却很不容易發生燃燒現象，並且需要預先活化（例如，石墨形式的、特別是鑽石形式的結晶碳就是這樣的）。所以，發熱率（удельное тепловыделение）只不過是一個靜力學性質的合成特性，絲毫也沒有涉及燃燒過程的動力學。

1-2. 氧化劑

在實用上，凡是含有或是能夠放出游離狀態的氧原子的物質，都叫做氧化劑（如果限於氧型的氧化劑的話）。可是，在所有可能成為氧化劑的物質中，只有那些和燃料互相作用得充分有效的、同時又是非常普遍和容易得到的氧化劑，才具有技術上的意義。就這種氧化劑來說，數量最多的，就是環繞着我們的空氣，它是一種比較弱的氧化劑（就重量說，空氣中含有 23.2% 的游離氧），由於空氣是取之不尽的，就獲得了技術上[獨佔性]的應用。另外一些更有效的氧化劑，即是含有大量游離氧的物質（例如硝酸、純氧等），現時只應用在特种技術上。當然，特种氧化劑的實際意義，會隨其產量的增加和價格的降低而增長的。

因為任何一種氧化過程，必須破壞氧化劑原來的分子^①，那麼，在計算其所放出的能量（燃燒熱）時，根據方程式(1-1)應去計算用於破壞氧化劑分子內各原子間的鍵所耗費的能量（分子的

① 在緩慢的氧化過程中（應把這種過程與急劇的氧化過程即所謂燃燒區分開），常有這樣的情況：即是整個氧分子 O_2 進到被氧化的有機分子中，可是隨後又將游離狀態的氧原子放出來，例如乙醛（ CH_3COH ）氧化成醋酸（ CH_3COOH ）時，中間經過一個過氧化物（ CH_3COOOH ）暫時形成的階段。

化合潛熱)，一般說來，這種能量可能是正的，也可能是負的。可是，通常都把氧的分子狀態，當作是開始狀態，於是，所有的能量計算，都是從這一假定的〔零能量水平〕來進行的。

1-3. 燃 料

和上面相似，凡是含有或是能夠放出可燃物的物質，都叫做燃料，而可燃物則是呈原子狀態自由形式的單質。

所有工業用的天然燃料，都是有機化合物構成的，就氧化時的發熱率來說，碳雖然次於其他許多元素，譬如某些金屬之類，但是碳在有機化合物中大量集中，就使得它成為最重要的單質可燃質。燃料可燃質中，佔第二位的就是氫，所有有機燃料都含有比較適量的氫，它的特點，是氧化時有較高的發熱率。硫被氧化時比較快，氧化別的元素則較慢，氧化時的發熱量也不大，所以，它是一種低劣的可燃質。但是，我們必須注意它，就像注意那些時常碰到的、摻雜到主要種類燃料裏的雜質一樣。從技術觀點來看，凡是具有下述三個主要特徵的可燃物，都可以算是燃料：

1) 够大的發熱率(就單位重量說，而若就單位容積說，則更好)；2) 在空氣中能夠很快地燒起來；3) 很普遍也很容易取得，以便大量使用。

在廣泛的工業實踐中，只採用一種唯一的氧化劑——空氣，這樣，就使得燃燒過程進行中的一切特點及其主要效果——發出自由熱量——都被認為只是燃料的事。在這方面的重要特性，就是所謂燃料的發熱量，而所謂發熱量，就是1公斤燃料發出的熱量(K_T 大卡/公斤)。就工業上所使用的燃料來說，發熱量的變動範圍是很大的(大約從1500到15000大卡/公斤)。

有時也把單位體積的發熱率理解為發熱量(大卡/標準立方公尺)。但是，為了更為清楚起見，以後就把這種體積的熱力特性，稱為燃料的熱密度(теплоплотность)，它是兩個特性的相乘積：即燃料的發熱量和它的比重(對於固体燃料則是容積重量或

[淨]重), 即 $\gamma_T = K_T \gamma_T$ [大卡/標準立方公尺*]。

最後, 所謂燃燒熱 (теплота сгорания), 是物理化學中一個通用的特性, 它表示 1 克-摩爾的燃料燃燒時發出的熱量 ($Q_{\text{мол}}$ 大卡/克-摩爾), 當然, 這個數值 (如果用 m_T 表示燃料分子的分子量的話) 是與發熱量有關的, 可以用下述的簡單關係表示:

$$1000 Q_{\text{мол}} = K_T m_T \text{ [大卡/公斤-摩爾]}. \quad (1-2)$$

假使考慮到上面說過的氧化劑分子的 [化合潛熱] (скрытая теплота образования) 的話, 就不應忘記, 同一種燃料在不同的氧化劑中燃燒時, 燃料發熱量 (K_T) 所有的特性中, 化合潛熱的值是不同的, 於是, 就有理由認為氧化劑有它自己的 [額外] 發熱量 (1 公斤氧化劑是 $\Delta K_{\text{ок}}$ 大卡), 對於一些主要的氧化劑, 像氧分子或空氣之類, 常假設 $\Delta K_{\text{ок}}$ 等於零 (往往是這樣做)。如果用 $\gamma_{\text{мин}}^{**}$ 表示 1 公斤燃料所需的氧化劑理論消耗量 (即相當於燃燒反應的消耗量), 則燃料發熱量的通式, 用本書的符號表示時, 將成為如下的形式:

$$K_T = K_{T_K} + \gamma_{\text{мин}} \Delta K_{\text{ок}} \text{ [大卡/公斤]}, \quad (1-3)$$

式中 K_{T_K} 是燃料在氧或空氣中燃燒時的發熱量。

1-4. 氧化劑的發熱量

曾經不止一次地企圖把一個計算特性引用到熱工實踐中, 去代替燃料的發熱量, 並表示燃燒時發出的熱量, 但該熱量並不屬於 1 公斤燃料, 而是按下述關係屬於 1 公斤參與反應的氧或空氣:

$$1000 Q_{\text{мол}} = K_{\text{о}}^{\text{нач}} m_{\text{о}} \text{ [大卡/公斤-摩爾]} \quad (1-4)$$

(氧化劑)

* 考慮到個別熱力特性的重要性, 和為了更為明顯和確切起見, 我們認為最好是用一個表示容積的符號去表示熱密度, 以區別於普通採用的、沒有直接特性意義的熱量符號 (Q , 大卡)。

** 對於淺近的燃燒過程來說, $\gamma_{\text{мин}} = \frac{m_{\text{о}}}{m_T}$, 式中 $m_{\text{о}}$ 和 m_T 代表氧化劑和燃料的分子量或原子量。

或

$$K_O^{max} = \frac{K_T}{z_{min}}.$$

這個特性，是同樣通用的，但也同樣是片面的，就像燃料的發熱量一樣（認為只是可燃混合物的成分之一會發熱），這個特性，有一個實用上的優點，就是它的數值的變化範圍較窄（例如，在碳或氫中〔燃燒〕空氣時，是 700 大卡/公斤到 1000 大卡/公斤，〔燃燒〕氧時，是 3040 到 4250 大卡/公斤）。

以後应用到這個特性時，為了便於識別起見，我們把它叫做氧或空氣的最大發熱量（ K_O^{max} 大卡/公斤）。应用時应当加上指標 max ，因為技術上的燃燒過程，是在一定的空氣和燃料的比例下進行的，這種比例不同於化學計算的比例（即是不同於理論上相當於完全燃燒的化學反應的比例）。當在空氣中進行尋常的完全燃燒過程時，1 公斤燃料實際上耗費的氧化劑 z 常多於理論消耗量 z_{min} 。這兩個數值的比，稱為过剩係數（氧化劑的），並且，在通常情況中，可能是 $\alpha = \frac{z}{z_{min}} \geq 1$ 。

當在空氣中進行尋常的燃燒過程時（ $\alpha \geq 1$ ），每 1 公斤參與燃燒的空氣，它的發熱率常小於它的最大發熱量：

$$K_O = \frac{K_O^{max}}{\alpha} [\text{大卡/公斤}]. \quad (1-5)$$

許多採用空氣作氧化劑的工業用爐子，都維持 $\alpha \geq 1$ ，這是因為空氣是很容易獲到的，取得和利用空氣時也沒有直接的花費。當利用一些難於獲得的價值昂貴的氧化劑時，雖然它們比空氣來得更有效，但根據許多原因（其中包括技術經濟方面的原因在內），上述的廣泛推行的方法是不相宜的，因此，在採用價值昂貴的氧化劑時，就不得不改變為〔氧化劑全部燒完〕的燃燒條件，即是在 $\alpha < 1$ 的條件下進行燃燒。

1-5. 可燃混合物的發熱量

最〔客觀〕的發熱率的特性，是可燃混合物（燃料 + 氧化劑）

的最大發熱量，所謂可燃混合物的最大發熱量，就是 1 公斤的可燃混合物，當氧化劑和燃料按化學計算的比例配合時（換句話說，即是當 $\alpha=1$ 時），在燃燒過程中發出的熱量（ H_{max} 大卡/公斤）。這個在動力爐子^①的計算工作中成為通用的特性，可以用下述的、和前面相似的關係表示：

$$1000Q_{mo.1b} = H_{max} m_{cp} [\text{大卡/公斤-摩爾}], \quad (1-6)$$

式中 m_{cp} 是當 $\alpha=1$ 時可燃混合物的平均分子量或燃燒生成物的平均分子量。在另外一種寫法中，即：

$$H_{max} = \frac{K_T + \alpha_{min} \Delta K_{on}}{1 + \alpha_{min}} [\text{大卡/公斤}], \quad (1-7)$$

對於在空氣或分子狀態的氧裏面燃燒的情況來說（ $\Delta K_{on}=0$ ），得

$$H_{max} = \frac{K_T}{1 + \alpha_{min}} [\text{大卡/公斤}]. \quad (1-8)$$

從上面得出的式子就可以看出，可燃混合物的最大發熱量，不僅是極顯著地隨燃料的性質而變，也隨氧化劑的性質而變；氧化劑的影響，可以用兩種方式表示：即是用 α_{min} 的值和氧化劑分子的化合熱（也就是用 ΔK_{on} 的值）表示。

在進行燃燒過程的實際情況中，1 公斤工作可燃混合物的發熱率，將隨氧化劑過剩的多少、而不同於它的最大發熱量，即：

$$H = \frac{K_T + \alpha_{min} \Delta K_{on}}{1 + \alpha_{min}}, \quad (1-9)$$

而且 $H = H_{max} \psi_{\alpha}$ ，式中因數 ψ_{α} 等於：

$$\psi_{\alpha} = \frac{1 + \alpha_{min}}{1 + \alpha_{min}}, \quad (1-10)$$

因數 ψ_{α} 可以稱為可燃混合物的稀釋係數。由此可知，當氧化劑

① 所謂動力爐子（силовая топка），就是內燃機或噴氣發動機的爐子，它和目前使用着的為各種各樣的熱交換器服務的爐子，包括蒸汽鍋爐在內的熱力爐子（тепловая топка）不同。在內燃機的理論中，常就其相似性把上述特性（ H_{max} ）叫做燃料的發熱量，這裏所謂燃料，就是按化學計算的比例來配合的可燃混合物。但是，為了避免混淆起見，必須沿用上面採用的學名。

过剩時($\alpha > 1$)，則 $\psi < 1$ ，而燃料过剩時($\alpha < 1$)，則 $\psi > 1$ 。

當 α_{min} 的值較大時，可以採用稀釋係數 $\psi \approx \frac{1}{\alpha}$ 。

1-6. 發熱量的下限

當燃燒溫度很高時，氫完全燃燒所生成的水分就轉變為蒸汽狀態。由於排烟溫度很高（蒸汽沒有凝結），以致耗費掉的汽化熱，在工業實踐中多半不能加以利用。因此，在廣泛的工程實踐中，就鞏固了關於燃料發熱量下限 K_T^H 的觀念；發熱量的下限是與它的上限 K_T^G 有關的，它們的關係可用下面的簡單等式表示：

$$K_T^H = K_T^G - 6(9H) = K_T^G - 54H^* [\text{大卡/公斤}], \quad (1-11)$$

若燃料含有摻雜的水分 W_T ，則

$$K_T^H = K_T^G - 6(9H + W_T)^* [\text{大卡/公斤}]. \quad (1-12)$$

在我們運用的所有計算中，通常都把低發熱量當作鍋爐組熱平衡的一個重要單位。因此，在這裏引用關於空氣和可燃混合物發熱量下限 ($K_O^{MHC^H}$, H_{MHC}^H) 的觀念是有用處的。

表 1-1 列出了幾種典型的燃料，當其在空氣中燃燒時燃料和氧化劑的重要特性。

應當注意這樣一件事實：對於好些有機燃料，像甲烷（發熱最少）、苯和乙炔（發熱最多）之類，可燃混合物和空氣的最大發熱量，是顯然不同的。這是因為甲烷的分子 CH_4 是在激烈的放熱效應（發熱）中產生的，苯的分子 C_6H_6 是在微弱的放熱效應中產生的，而乙炔的分子 C_2H_2 則是在吸熱效應（吸收熱量）中產生的。顯然，當這種燃料的分子燃燒時，即是當破壞這些分子時，就表現出一個相反的效應——即產生甲烷和苯的燃燒生成物時，有額外的吸熱現象（苯燃燒時吸熱較少），而產生乙炔的燃

* 使用空氣的普通爐子，維持着實際上等於 1 個大氣壓的壓力，同時，烟氣中的氣體空氣混合物的水蒸汽的分壓力也不大於 0.1—0.15 大氣壓。在這種蒸汽壓力下，蒸發 1 公斤水分所耗費的熱量，不會超過 600—610 大卡；或者是燃料所含水分的每 1% 約耗費 6 大卡的熱。

表 1-1

燃 料	元 素 成 分 %			理 論 消 耗 量 公斤 公斤	L _{MUN} 立方公尺 公斤	發 熱 量		可 燃 混 合 物 的 最 大 發 熱 量		空 氣 的 發 熱 量	
	C	H	O			K _T ⁰	K _T ^N	H _{MUN} ⁰	H _{MUN} ^N	K _{CO} ^{MUN}	K _{CO} ^{MUN} · %
大卡/公斤											大卡 立方公尺
甲烷	75	25	—	17.2	13.3	13300	11950	730	655	695	900
苯	92.5	7.7	—	15.1	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	85.6	14.4	—	14.8	11.5	10825	10050	685	635	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	57.5	12.5	50.0	6.35	4.9	5330	4055	725	634	733	950
木材	50	6	43	6.0	4.6	4800	4475	685	640	746	975