

鍋爐的燃燒理論及熱平衡

韓士信 黃長謙 編譯

燃料工業出版社

出版者的話

在鍋爐設備運行的管理工作中，首先要能控制燃料在燃燒室裏的燃燒程序，使燃料發揮它所具有的全部熱能，從而提高鍋爐設備的效率。燃料在鍋爐設備的燃燒室裏燃燒得是否好，也就是燃燒程序進行得是否適當，絕不是偶然的，而是有它的規律存在；能够掌握燃料的燃燒規律，就能使鍋爐設備運行得經濟、可靠。燃料燃燒的規律在熱工學裏叫做燃燒理論。

在實際運行中，燃燒理論處處可以說明那些實踐經驗的所以然。因而可進一步按照實際發生的現象採取合理的對策，改善並提高鍋爐運行中的燃燒管理工作及其技術水平。

此外，燃燒理論不祇是鍋爐設備運行中的基本知識，同時也是設計、製造、改造、試驗鍋爐設備的理論基礎。

「燃燒理論」這個名詞對於熱力工作者，尤其是火力發電廠熱源部分的工作者並不生疏，但衆所周知，蘇聯在利用劣質燃料作為熱能來源的先進經驗，絕不是以資本主義的科學技術觀點所能理解得到的，因之，蘇聯的熱工學裏，「燃燒理論」的觀點，分析和配合實踐的方法有它卓越的特點在。

這本小冊子不可能把蘇聯在這方面的輝煌成就充分表達出來，只能就我國現階段鍋爐設備中較普遍應用的鏈條式爐和煤粉爐有關燃燒理論的運行問題，配合着介紹一些，作為動力工作者，熱力工程技術幹部、工業學校和熱力工程技術訓練班的一種參考資料。

燃料工業出版社

一九五二年六月

編 譯 者 序

一、熱工學裏的熱能計算不祇是在設計熱力設備時列為設計的主要基礎，在運行時同樣是檢查、評價、改善運行情況的指針；而鍋爐設備的燃燒理論又為熱能計算的基本部分。知道了燃燒產物的容積與成分之所由來，空氣過剩量對於燃燒現象的影響，自然能根據設備情況、燃料性能尋求操縱、控制燃燒的方法。瞭解了熱平衡對於鍋爐設備效率的意義，自然能設法減少熱損失，提高鍋爐的經濟性和可靠性。這是介紹下列參考書有關這方面資料的動機。

燃料按照它的形態，分為固體、液體和氣體三大類。各種燃料的成分又各不相同，因此控制各種燃料使之在燃燒中發揮出它所具有的熱量的方法也並不完全一樣，但各種燃料產生燃燒現象的主要因素却是一致的，這些因素就是燃料所含的可燃質、所受到的溫度和接觸的氧。

劃分燃料的類別、分析燃料的成分和特性、確定它的含熱量以及根據分析出的成分計算燃料的有機質、可燃質、乾燥質和工作質各有多少和這些質別間的互相換算方法等屬於「燃料工藝學」的範圍，在這本小冊子裏不準備詳細介紹。

在這本小冊子裏只敘述燃料在燃燒過程裏的理論，以作為掌握燃料燃燒時的參考，並且只把燃料大類裏的固體燃料中的燃煤作為推論的對象，以期能廣泛的引證到實際工作上。至於液體、氣體燃料的燃燒現象，在這本小冊子裏也從略。

二、這本小冊子是選擇蘇聯下列參考書中有關資料編譯的：

1. 鐵路熱力工程 葛拉諾夫斯基著

國家鐵路運輸出版社 1950年莫斯科版

(Р. Г. Грановский: Теплосиловое хозяйство железнодорожного транспорта)

2. 鍋爐設備 第二卷 羅答啓斯等著

國家動力出版社 1946年莫斯科，列甯格勒版

(К. Ф. Роддатис, Э. И. Ромм, Н. А. Семененко, Т. Т. Усенко, В. Н. Цыганков:

Котельные агрегаты. Вспомогательные устройства и эксплуатация котельных установок)

3. 電廠鍋爐設備運行術 郭魯伯佐夫，葉利撒羅夫著

國家動力出版社 1950年莫斯科，列甯格勒版

(В. А. Голубцов и П. П. Елизаров:

Эксплуатация котельных установок электростанций)

4. 電廠熱工手冊 關馬羅夫，魯克尼次基合著

國家動力出版社 1949年莫斯科，列甯格勒版

(А. М. Комаров и В. В. Лукницкий:

Справочник для теплотехников электростанций)

5. 鍋爐設備的燃料燃燒過程 科諾烈著

國家動力出版社 1951年莫斯科，列甯格勒版

(Г. Ф. Кнорре:

Топочные процессы)

三、不過，各章的資料原著者文筆不同，譯者又願儘量保

存原著者的敘述方法與程序，所以在這本小冊子裏順序讀下去可能顯得有的問題前後不太連貫。經過考慮，覺得還是願坦負介紹的責任，保存每一位原著者的敘述方法與程序，不再顧慮一些不太重要的不連貫。這是應該聲明的。

四、希望通過這本小冊子，介紹給動力工程工作同志一些蘇聯先進經驗的參考，藉知蘇聯熱工學在鍋爐的燃燒理論和試驗、計算熱平衡方面的方式與方法。如果能因此有助於我們的鍋爐運行與試驗使之更趨向經濟、可靠，想一定也是動力工程工作同志所希望的。

五、譯者技術經驗不足，翻譯經驗更不够，術語用得未必恰當，請讀者多提意見。

韓士信

黃長謙

一九五一年十月

目 錄

出版者的話	1
編譯者序	3
第一章 燃燒理論	7
第一節 燃燒一公斤燃煤所必需的空氣量	7
第二節 完全燃燒與未完全燃燒程序中燃燒產物的 體積和成分	9
一、完全燃燒時的乾氣體體積	11
二、水蒸汽的體積	15
三、未完全燃燒時的乾氣體體積	15
四、一氧化碳的含量	18
五、 RO_2 的最大含量	27
第三節 過剩空氣係數	27
第四節 含有硫酸鹽的燃煤在燃燒過程中的特性	32
第五節 燃燒產物的含熱量	33
第二章 燃煤在鍋爐設備的燃燒室中的燃燒	39
第一節 燃煤的燃燒程序	39
第二節 燃煤在鏈條式爐排上的燃燒	41
一、燃燒程序	41
二、二次空氣(二次風)	52
三、燃燒產物裏所含二氧化碳(CO_2) 量和 燃燒現象的關係	57
四、燃燒室的及鍋爐設備各部分因漏風所增加的 過剩空氣係數表	58
第三節 煤粉在煤粉爐裏的燃燒	60
一、燃燒程序	60

二、燃用無烟煤煤粉或硬煤煤粉的燃燒室運行·····	67
三、燃用烟煤煤粉的燃燒室運行·····	72
四、燃用含灰分多的煤粉的燃燒室運行·····	78
五、煤粉爐的噴燃器·····	78
六、煤粉爐燃燒室的運行管理·····	82
第三章 鍋爐設備的熱平衡 ·····	87
第一節 鍋爐設備的熱平衡公式 ·····	87
一、排烟的熱損失·····	89
二、化學的未完全燃燒的熱損失·····	95
三、機械的未完全燃燒的熱損失·····	97
四、由鍋爐設備外壁散失的熱損失·····	107
五、利用於生產的有益熱量·····	108
第二節 鍋爐設備的技術經濟指數、特性線及熱平衡 ·····	111
一、技術經濟指數與特性線·····	111
二、鍋爐設備的熱平衡與技術經濟指數·····	118
三、鍋爐設備的試驗·····	120
第四章 鍋爐設備的效率及併行爐負荷的經濟調度法 ·····	123
第一節 鍋爐設備的效率 ·····	123
第二節 併行爐的負荷調度法 ·····	126
一、按鍋爐蒸發量比例分配負荷法·····	127
二、按鍋爐最高總效率分配負荷法·····	130
三、按相對的最小增加煤耗原則分配負荷法·····	131

第一章 燃燒理論

第一節 燃燒一公斤燃煤所必需的空氣量

在設計鍋爐設備和管理舊有鍋爐運行的工作裏，都需要用計算方法求得燃料燃燒時所需要的空氣量、產生的爐烟（燃燒產物）量和它的成分、含熱量。以便進一步求出由於未完全燃燒所招致的熱量損失和其他必需的數值。

這一章就介紹上述各項數值的計算方法。

每公斤燃煤完全燃燒時所必需的空氣量可以用下列方法求出：

在一公斤燃煤的工作質①中所包含的可燃元素②有：

$$\frac{C_p}{100} \text{ 公斤, } \frac{H_p}{100} \text{ 公斤, } \frac{S_p^n}{100} \text{ 公斤。}$$

符號 C_p 代表工作質裏的碳； H_p 代表工作質裏的氫； S_p^n 代表工作質裏可燃的揮發硫。它們的數值是燃料重量的百分數。

根據燃燒程序的公式，得出上述各種原素在完全燃燒時所需的氧量如下：

一公斤碳需要……………2.67公斤氧

一公斤氫需要……………7.95≈③ 8 公斤氧

一公斤揮發硫需要……0.998≈1公斤氧

那麼，欲使燃煤中所含的碳、氫和硫得到完全燃燒，則所需的氧量為：

- ① 把燃煤運到鍋爐場準備添到爐裏（一般叫爐前用煤），這時取煤樣化驗，所得的成分叫做燃煤的工作質。
- ② 燃煤的成分裏，有幾種是能起燃燒作用的元素，如碳、氫、硫、氧等，這些原素在燃煤裏叫可燃元素。
- ③ ≈是「近於」的符號。

$$\frac{2.67C_p + 8H_p + S_p^n}{100} \text{ 公斤(氧)/公斤(燃煤)} \dots\dots\dots (1)$$

燃料本身尚含有 $O/100$ ① 公斤的氧，這部分氧是可以利用於燃燒的，所以，應該從公式(1)裏減去這個數值(用符號 O_p 來代表)，則公式(1)改變成：

$$\frac{2.67C_p + 8H_p + S_p^n - O_p}{100} \text{ 公斤(氧)/公斤(燃煤)} \dots\dots\dots (2)$$

氧的比重 $V=1.429$ ，如果公式(2)被氧的比重除，則可得出所需氧的體積。如想把氧的體積換算為空氣的體積(燃燒一公斤燃煤所需空氣量)，則應將求得的氧的體積數值再被 0.21 除(因為照體積算，空氣中約含有 21% 的氧)，就可得出下面的公式：

$$V_o = \frac{2.67C_p + 8H_p + S_p^n - O_p}{100 \cdot 1.429 \cdot 0.21} = \frac{2.67C_p + 8H_p + S_p^n - O_p}{30}$$

$$\text{標準立方公尺} \text{ ② / 公斤(燃煤)} \dots\dots\dots (3)$$

V_o ——為一公斤燃煤完全燃燒時，所必需的空氣量，不過，這兒所說的數值是以假定空氣中所含的氧氣全部用於燃燒為條件的。

為了正確和便於互相對照，在熱力工程裏應該把空氣量的容積和燃燒室的爐烟容積都折合為標準狀態下的數值然後再計算。

公式(3)經過簡化(用分母 30 除分子中每一數值)，改成為：

$V_o = 0.089C_p + 0.266H_p + 0.033(S_p^n - O_p)$ 標準立方公尺/公斤(燃煤)；如果燃煤裏含有多量的礦物硫，並且總硫量 $S_2^{0.5} > 0.3\%$ ，則上一公式改成為：

① 這裏的 O 是代表燃煤裏所含氧的重量百分數。

② 標準立方公尺即氣壓為 760 公釐水銀柱，溫度為 0°C 時一立方尺氣體體積的單位名數。

$$V_0 = 0.089C_p + 0.266H_p + 0.0457S_{up} - 0.033O_p$$

標準立方公尺/公斤 (燃煤) (4)

理論空氣量的重量為：

$$L_0 = V_0 \cdot \gamma_0 \text{ 公斤(空氣)/公斤(燃煤) (5)}$$

公式(5)中 $\gamma_0 = 1.293$ 公斤/標準立方公尺，是當溫度為 0°C 及氣壓為760公釐水銀柱條件下的空氣比重。

實際上，燃料在燃燒室裏燃燒時，只得到理論數量的空氣是不能達到完全燃燒的（由於空氣和燃煤接觸得不够好、燃燒室構造不適當或其他原因）。所以在燃燒過程中需要加入一部分過剩空氣量。實際必需空氣量 V_{∂} 和理論必需空氣量 V_0 的比叫做燃燒室裏的過剩空氣係數 α_m 。

$$\alpha_m = \frac{V_{\partial}}{V_0} > 1 \text{ (6)}$$

所以，實際必需空氣量應為：

$$V_{\partial} = \alpha_m V_0 \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤) (7)}$$

燃燒室裏的過剩空氣係數 α_m 的大小與燃料品質、燃燒方法以及燃燒設備的運行情況有密切的關係，因此，它的數值變動很大，可以由1.1到1.5，甚至比1.5更大。

當設計新的鍋爐設備時， α_m 的數值是採用根據經驗估計出來的已知數①。運行中鍋爐的過剩空氣係數數值是可以利用公式計算出來的。下一節裏我們來談談計算 α_m 的方法和它所根據的理論。

第二節 完全燃燒與未完全燃燒程序中 燃燒產物的體積和成分

現代化的鍋爐設備利用儀器、表具直接指出或測量後算出燃燒

① 蘇聯有根據經驗所規定的L熱力計算標準。在這種文件裏指明設計需用各種數值，例如蘇聯中央鐵爐研究所就有這種文件。

產物的二氧化碳量，像 CO_2 表、氣體分析器①等。利用這類儀器、表具的目的，也就是為瞭解燃燒情況、檢查過剩空氣係數以控制燃燒。有了這類儀器、表具就不必完全按照下面所說的辦法計算各種數值。不過，這類儀器、表具的製造和應用的原理都是從下面所述的那些計算理論中演變出來的，所以，這種計算理論和計算方法仍然有介紹的必要。

燃料燃燒時進行的程序是否完全，能影響燃燒產物的成分。完全燃燒時燃燒室中燃燒產物含有下列成分：

1. 碳、氫和揮發硫充分氧化後的產物：二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)和水分(H_2O)；
2. 燃料中含有的氮(N_2)(數量甚微)；
3. 和空氣的氧同時進入燃燒室中的氮；
4. 燃料燃燒時未被利用的空氣含有的氧(O_2)；
5. 蒸發燃料和空氣中水分所成的蒸汽。

用氣體分析器分析燃燒產物時，成分中的蒸汽凝結為水。因此，分析出來的氣體只是乾燥燃燒產物的相對體積。也就是說，燃燒產物可分為乾氣體和水蒸汽兩部分。

完全燃燒時乾氣體成分的體積百分比可以寫成等式：

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\% \dots\dots\dots (8)$$

利用氣體分析器進行分析爐烟時，氣體分析器裏所用的氫氧化鉀溶液，同時吸收 CO_2 和 SO_2 ，所以在量管中僅能量出這兩種氣體的總容積。用 RO_2 代表 $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ，則公式(8)成為下面的形式：

$$\text{RO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 = 100\% \dots\dots\dots (8a)$$

① 氣體分析器是一種分析爐烟成分的儀器。最簡單的、通用的一種是奧玉露特氣體分析器，利用這種分析器可以分析出爐烟裏所含 CO_2 ， SO_2 和 O_2 的量(體積)。

在不完全燃燒情況下，燃燒產物裏包含下列可燃氣體：一氧化碳(CO)，氫(H₂)，沼氣(CH₄)；在某些情況下，還可能產生其他的碳氫化合物。爲了計算時不複雜，可假設不完全燃燒的產物僅僅爲一氧化碳(一種較難完全燃燒的氣體)，這種假設是以在燃燒室裏再沒有另外可燃的氣體，或者即使有其數量也很少的現象爲根據，所以在燃燒室實際工作中可以不計。但是，如果燃用含有大量揮發物的燃料時，那麼由這假設而得出的結果將有很大的差誤。根據以上所談的，燃燒不完全的乾氣體的成分可以用下列公式表示：

$$RO_2 + N_2 + O_2 + CO = 100\% \dots\dots\dots (9)$$

燃燒室內燃燒產物總體積是乾氣體和水蒸汽體積的和即：

$$V_z = V_{cz} + V_{en} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)} \dots\dots\dots (10)$$

公式裏：V_{cz}——乾氣體的體積，標準立方公尺/公斤(燃煤)；

V_{en}——水蒸汽的體積，標準立方公尺/公斤(燃煤)；

V_z ——燃燒室裏燃燒產物的總體積，

標準立方公尺/公斤(燃煤)。

一、完全燃燒時的乾氣體體積

利用氣體分析器可以分析出燃燒室裏乾氣體含有CO₂, SO₂, O₂的百分數；而N₂的含量，則以下列公式可以求出：

$$N_2 = [100 - (CO_2 + SO_2 + O_2)] \%$$

求出這些成分的每種含量百分數以後，根據燃煤工作質的各種元素含量，按照下面所談的方法就可以算出每公斤燃煤燃燒後所產生乾氣體的體積。

燃燒一公斤碳素，可以產生1.86標準立方公尺的二氧化碳(CO₂)。如果打算得到一標準立方公尺的CO₂，則需要燃燒的碳素應該是：

$$\frac{1}{1.86} = 0.54 \text{ 公斤}$$

既然燃燒 0.54 公斤 碳素可產生一標準立方公尺的二氧化碳，
那麼當燃燒一公斤含有 $C_p\%$ 碳素的燃煤時，所生的二氧化碳的體積應該是：

$$V_{CO_2} = \frac{C_p}{100 \cdot 0.54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤) 或}$$

$$V_{CO_2} = \frac{C_p}{54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)}$$

燃燒一公斤揮發硫 S_p^π 可得到 0.682 標準立方公尺的二氧化硫，
則爲了得到一標準立方公尺的二氧化硫，所需的揮發硫應該是：

$$\frac{1}{0.682} = 1.47 \text{ 公斤}$$

因此，燃燒一公斤燃煤時產生的二氧化硫的容積是：

$$V_{SO_2} = \frac{S_p^\pi}{100 \cdot 1.47} = \frac{S_p^\pi}{147} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)}$$

乾氣體裏的二氧化碳和二氧化硫的體積總和可以用下列公式算出來：

$$\begin{aligned} V_{CO_2} + V_{SO_2} &= \frac{C_p}{54} + \frac{S_p^\pi}{147} = \frac{1}{54} \left(C_p + \frac{54}{147} S_p^\pi \right) \\ &= \frac{C_p + 0.368 S_p^\pi}{54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)} \end{aligned}$$

因爲所得出的二氧化碳和二氧化硫的數值是包含在乾氣體 V_{C_2} 裏的容積的百分數，所以可得出下列的等式：

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{C_2}} \cdot 100(\%)$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{C_2}} \cdot 100(\%) \quad \text{或者}$$

$$CO_2 + SO_2 = RO_2 = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{C_2}} \cdot 100(\%)$$

$$V_{C2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{RO_2} \cdot 100 = (V_{CO_2} + V_{SO_2}) \frac{100}{RO_2}$$

標準立方公尺/公斤 (燃煤)

$$\text{以 } V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{C_p + 0.368 S_p^{\pi}}{54} \text{ 代入上式, 則得出}$$

$$V_{C2} = \frac{C_p + 0.368 S_p^{\pi}}{54} \cdot \frac{100}{RO_2} \quad \text{或者}$$

$$V_{C2} = \frac{C_p + 0.368 S_p^{\pi}}{0.54 RO_2} \quad \text{標準立方公尺/公斤 (燃煤)} \dots (11)$$

簡化公式(11), 用 K_p 代表公式中分子, 則可得出計算乾氣體體積的公式如下:

$$V_{C2} = \frac{K_p}{0.54 RO_2} \quad \text{標準立方公尺/公斤 (燃煤)} \dots \dots \dots (11a)$$

如果燃料中不含硫 (像木材、泥煤、石油等), 則燃燒產物裏就沒有二氧化硫氣體, 那麼公式(11)就成為:

$$V_{C2} = \frac{C_p}{0.54 CO_2} \quad \text{標準立方公尺/公斤 (不含硫的燃料)} \dots (11b)$$

二、水蒸汽的體積

燃燒室的燃燒產物裏水蒸汽是燃料所含的水分的蒸發和氫燃燒時化成的水造成的, 燃燒一公斤氫可得九公斤的水。如果燃煤中含 $H_p\%$ 的氫和 $W_p\%$ 的水, 則燃燒一公斤燃煤時所得水蒸汽重量為:

$$G = \frac{9H_p + W_p}{100} \quad \text{公斤/公斤 (燃煤)}$$

用水蒸汽的比重除它的重量就得出水蒸汽的體積 (水蒸汽的比重為 $\gamma_{en} = 0.805$ 標準立方公尺/公斤 (水蒸汽)):

$$V_{en} = \frac{9H_p + W_p}{100 \cdot 0.805} = \frac{9H_p + W_p}{80.5} \quad \text{標準立方公尺/公斤 (燃煤)} \dots \dots \dots (12)$$

既然燃燒產物包括乾氣體和水蒸汽兩部，而乾氣體的體積和水蒸汽的體積按照前面所談的方法已經能求出來，那麼，燃燒室裏燃燒產物的體積就等於：

$$V_2 = V_{C_2} + V_{H_2O} = \frac{C_p + 0.368 S_p}{0.54 RO_2} + \frac{9H_p + W_p}{80.5}$$

標準立方公尺/公斤（燃煤）……………(13)

從這個公式裏可以看出來，當爐烟成分裏包含的 CO_2 、 SO_2 百分數越大時，爐烟的體積就越小了；爐烟裏 CO_2 、 SO_2 含量越小，則爐烟體積就越大。在實際運行工作裏，根據分析出來的爐烟成分，就可以推斷當時爐烟體積的大小，也可以用來作調節鼓風、引風量的參考。

計算熱工公式的時候，是要求有相當正確的答案的，所以計算水蒸汽重量時，應把進入燃燒室的空氣所含水分蒸發成的水蒸汽計算在內。

設用字母：

L_0 代表一公斤燃煤燃燒時，所需要的理論乾空氣量（此數值以公斤為單位）；

d 代表一公斤乾空氣含有的水分量（此數值以克(1/1000公斤)為單位）；一般的每公斤空氣裏包含8—12克的水分。計算時可取其平均值10克/公斤(空氣)；

α 為燃燒室燃燒產物裏的過剩空氣係數。

則每燃燒一公斤燃煤，從進入燃燒室裏的空氣裏所蒸發出來的水蒸汽為：

$$G_{H_2O} = \frac{\alpha L_0 d}{1000} \quad \text{公斤/公斤(燃煤)}$$

而這部分水蒸汽的體積為：

$$V_{en}^{203} = \frac{\propto L_0 d}{1000 \cdot 0.805} = \frac{\propto L_0 \times 0.1d}{80.5}$$

標準立方公尺/公斤(燃煤)……………(14)

如燃用柴油時利用蒸汽噴嘴，或者用無烟煤時使用蒸汽通風，那麼，計算燃燒產物裏所含的水蒸汽體積，就要把所用的蒸汽量計算進去，所用的蒸汽體積：

$$V_{en}^{\phi} = \frac{W_{\phi}}{0.805} = \frac{100W_{\phi}}{80.5} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)} \cdots (15)$$

公式裏 W_{ϕ} 代表蒸汽噴嘴式蒸汽通風所用的蒸汽重量。從經驗得出來它們的數值如下：蒸汽噴油嘴所用的蒸汽量 0.3—0.4 公斤(蒸汽)/公斤(燃料)；燃用無烟煤以蒸汽作通風時所用的蒸汽量 0.4—0.8 公斤(蒸汽)/公斤(燃煤)。

把空氣的水分所蒸發的蒸汽量和噴嘴式通風所使用的蒸汽量都計算出來以後，則燃燒產物裏所包含的水蒸汽總體積就可以用下列公式求出來：

$$V_{en} = \frac{9H_p + W_p + \propto L_0 0.1d + 100W_{\phi}}{80.5}$$

標準立方公尺/公斤(燃煤)……………(16)

因此，在完全燃燒的情形下，並計入進入燃燒室的全部水蒸汽量，則燃燒室裏每公斤燃煤燃燒時所產生的燃燒產物體積 V_1 ，可以按下列公式計算出來：

$$V_1 = \frac{K_p}{0.54 \cdot R_{O_2}} + \frac{9H_p + W_p + \propto L_0 0.1d + 100W_{\phi}}{80.5}$$

標準立方公尺/公斤(燃煤)……………(17)

三、未完全燃燒時的乾氣體體積

設燃煤所含的碳素大部分由於完全燃燒變化為 CO_2 ，而另外一小部分未完全燃燒的變為 CO 。以 $C_{CO_2}^p$ 代表燃燒產物中 CO_2 的數值，

以 C_{CO}^p 代表燃燒產物中CO的數值，則碳素在完全燃燒中得到二氧化碳的體積為：

$$V_{CO_2} = \frac{C_{CO_2}^p}{54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)}$$

至於未完全燃燒的碳素所產生的一氧化碳量，可利用下述方法求出來：碳素未完全燃燒而成為一氧化碳時，它的化學反應是按下列公式進行的： $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ 。碳素的原子量是12而氧的原子量是16，如果把24份重量的碳素和32份重量的氧化合，則得到56份重量的一氧化碳。假設用重量單位來說，就是拿24公斤碳和32公斤氧在一起使其燃燒，就可以得到56公斤一氧化碳。也就是說，如果燃燒一公斤碳的時候，可以得到 $56/24$ 公斤的一氧化碳。設一氧化碳的比重為 $\gamma_{CO} = 1.25$ 公斤/標準立方公尺，則一公斤碳燃燒成一氧化碳的體積應為 $56/24 \times 1.25$ 標準立方公尺。因此，為了得到一標準立方公尺的一氧化碳就需要燃燒 $1 : 56/24 \times 1.25 \approx 0.54$ 公斤的碳，也就是說產生一氧化碳所需用的碳量和完全燃燒時為了得到二氧化碳所需用的量相同。

由此可知當燃燒未完全燃燒這一部分碳並變為一氧化碳時，氣體CO和CO₂的總體積照舊不變，並且可用下邊的公式求出它們的體積：

$$V_{CO} + V_{CO_2} = \frac{C_{CO_2}^p}{54} + \frac{C_{CO}^p}{54} = \frac{C_p}{54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)}$$

$$\text{把燃燒產物所含二氧化硫的體積 } V_{SO_2} = \frac{0.368 S_p^\pi}{54}$$

標準立方公尺/公斤(燃煤)加到 $V_{CO} + V_{CO_2}$ 的總合裏則得：

$$V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2} = \frac{C_p + 0.368 S_p^\pi}{54} \text{ 標準立方公尺/公斤(燃煤)}$$