

舰用蒸汽锅炉 理論及計算基础

〔苏联〕Г. А. 阿巴江茨 主編



國防工業出版社

舰用蒸汽锅炉理論及計算基础

[苏联] Г. А. 阿巴江茨 主編

馬 华 譯



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

本书是苏联捷尔任斯基高等海军工程学院的教学用书。书中讲述了与舰用鍋炉工作有关的理論基础問題，同时也讲述了热力計算及結構計算的方法及步骤。全书分六篇，共二十二章。主要内容包括：燃料、空气及燃燒产物；舰用鍋炉的炉內过程；蒸汽鍋炉的热平衡及傳热；蒸汽鍋炉中水的自然循环；舰用蒸汽鍋炉的水状况及其中的蒸汽分离；鍋炉零件的强度計算以及有关的附录等。

本书适用于有关院校师生，也可供造船工业部門的設計研究人員和生产技術人員参考。

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА КОРАБЕЛЬНЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

〔苏联〕 Г. А. Абагянн 主編

ЗОЕНИЗДАТ 1959

舰用蒸汽鍋炉理論及計算基础

馬 华 譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

850×1168 $1/32$ 印張 12 $3/16$ 312千字

1965 年 11 月第一版 1965 年 11 月第一次印刷 印数：001—800 册

統一书号：N15034·1019 定价：（科六）1.80 元

目 录

第一篇 燃料、空气及燃烧产物

第一章 燃料	7
§1 燃料简述	7
§2 燃料的成分及对其元素的评价	8
§3 舰用锅炉的燃料	10
第二章 空气及燃烧产物	14
§4 确定燃烧 1 公斤燃料所需的空气量	14
§5 燃烧产物	16
§6 确定干烟气的体积	18
§7 确定水蒸汽的体积	21
§8 不完全燃烧的公式	22
§9 确定 RO_2 (max) 及 N_2	24
§10 α 和燃烧产物成分之间的关系	25
§11 烟气的焓。I-t 图的绘制	28

第二篇 舰用锅炉的炉内过程

第三章 离心式喷射器	31
§12 对舰用锅炉的要求及炉膛热强度	32
§13 喷射器及其特性	36
§14 调节方法及被调节离心式喷射器工作的比较分析	49
第四章 旋转式喷射器	56
§15 旋转式喷射器的近似理论及其特性	56
第五章 混合过程	64
§16 在平行平面空气流中的混合过程	65
§17 在涡流空气中的混合过程	71
§18 在混合空气流中的混合过程	73

第六章 普通化学动力学概述	76
§ 19 基本概念及定义	76
§ 20 质量作用定律	78
§ 21 反应速度常数	79
§ 22 燃烧反应动力学	81
第七章 炉内混合及燃烧	84
§ 23 液体燃料液滴燃烧的理想图	84
§ 24 单个火炬的燃烧	85
§ 25 相互作用的火炬组的燃烧	90

第三篇 蒸汽锅炉的热平衡及传热

第八章 锅炉的热平衡	93
§ 26 蒸汽锅炉热平衡的编制方法	93
§ 27 确定锅炉热损耗值	98
§ 28 锅炉各部件的局部热平衡	102
第九章 炉膛热交换	106
§ 29 辐射热交换的基本规律性	107
§ 30 苏联中央锅炉透平研究所 (ЦКТИ) 计算炉膛热交换的方法	110
§ 31 苏联科学院动力研究所 (ЭНИН АН СССР) 计算 炉膛热交换的方法	115
§ 32 辐射受热面的计算	121
第十章 对流蒸发管及蒸汽过热管束的传热	137
§ 33 计算锅炉对流热交换的原始方程式	137
§ 34 计算受热面 H	141
§ 35 计算传热系数及放热系数	144
§ 36 确定蒸发管束及过热管束的平均对数温差	162
§ 37 对流受热面的计算	164
第十一章 舰用锅炉的尾部受热面	168
§ 38 尾部受热面概述	168
§ 39 省煤器	172
第十二章 舰用锅炉中的空气及烟气运动阻力	177
§ 40 基本计算公式	178
§ 41 烟气通道的阻力计算	190

§ 42 空气通道的阻力計算	193
§ 43 烟气及空气通道的全部压降	195
第十三章 鍋炉在各种稳定工况的工作	197
§ 44 燃料消耗量 B 是一个变量	198
§ 45 RO_2 的含量是一个变量	212
§ 46 給水温度对于鍋炉蒸汽产量、过热蒸汽温度及 省煤器出口給水温度的影响	220
§ 47 蒸汽干度 x 改变的影响	222
§ 48 饱和蒸汽撤汽量变化的影响	224
§ 49 鍋炉蒸汽压力改变的影响	224

第四篇 蒸汽鍋炉中水的自然循环

第十四章 鍋炉蒸发部分安全性的保証	227
§ 50 决定鍋炉蒸发部分安全性的因素	227
§ 51 水在鍋炉中的循环方法	228
§ 52 在循环迴路中上升及下降部分的流动过程	233
第十五章 自然循环迴路的計算原理及步驟	236
§ 53 計算任务	236
§ 54 术语及表示符号	237
§ 55 确定循环运动压头	242
§ 56 确定自然循环迴路中的运动阻力	253
§ 57 鍋炉水循环的計算步驟	259
第十六章 根据計算結果估計水循环的可靠性	266
§ 58 循环可靠性估計方法概述	266
§ 59 循环的停滯及反轉	267
§ 60 受热鍋炉管子内表面的盐分沉淀	271
§ 61 鍋炉受热管中的汽水混合物分层	272
§ 62 下降管中的沸騰	273
§ 63 下降管中的抽空	274
§ 64 向下降管中引入蒸汽	275
§ 65 在变动負荷下的循环可靠性	275
第十七章 循环計算的补充参考材料	279
§ 66 确定个别管排的热負荷	279
§ 67 关于确定某些計算数据的意見	282

§ 68 压力的影响及循环迴路的布置	285
--------------------------	-----

第五篇 舰用蒸汽锅炉的水状况及其中的蒸汽分离

第十八章 舰用蒸汽锅炉的给水	293
§ 69 舰上的水处理	293
§ 70 锅炉给水及决定其质量的指标	294
§ 71 给水、补水及炉水的标准	300
第十九章 腐蚀以及防止锅炉腐蚀的方法	303
§ 72 腐蚀理论基础	305
§ 73 腐蚀因素	307
§ 74 防止锅炉腐蚀的方法	314
第二十章 水垢的形成及防止蒸汽锅炉中水垢的形成	320
§ 75 形成水垢及泥渣的条件	320
§ 76 防止蒸汽锅炉中的水垢形成	322
§ 77 锅炉排污及排污计算	328
第二十一章 获得干燥及清洁的蒸汽(水从蒸汽中的分离)	332
§ 78 影响汽筒分离特性的因素	334
§ 79 汽筒内部设备系统的选择	338

第六篇 锅炉零件的强度计算

第二十二章 锅炉零件的强度计算	343
§ 80 在运行条件中的锅炉材料特性	343
§ 81 锅筒包板及管板的计算	350
§ 82 锅筒端板的计算	360
§ 83 锅炉管的计算	368
§ 84 锅炉骨架计算	373
§ 85 加强孔及非加强孔的计算	374
§ 86 法兰联接的计算	377
附录 1 空气及燃烧产物的平均体积比热	380
附录 2 根据烏卡洛維奇(М. В. Вукалович) (1953年)的数据編制的循环计算水蒸汽表	381
附录 3 锅炉钢计算特性表	384
附录 4 炉外水处理简述	386
参考文献	389

第一篇 燃料、空气及燃烧产物

第一章 燃 料

§1 燃 料 簡 述

在燃燒过程中能放出大量热能的可燃物质称为燃料。

各种燃料都是有机生成的碳化物和碳氢化合物，并可分为天然燃料及人造燃料。

表 1

沒有預先进行热处理或化学处理，而以天然状态燃燒的燃料称为天然燃料。属于这种燃料的有木材、煤、泥煤、頁岩、石油及天然气等。

人造燃料是由天然燃料加工而成的。属于人造燃料的有重油、汽油、拖拉机油[●]、煤油、发生炉煤气及焦炭等。

由于聚集状态的不同，燃料又可分为固体、液体和气体三种。

聚集状态	天然燃料	人 造 燃 料
固体燃料	木材 泥煤 褐煤 煤 无烟煤 頁岩	木炭 泥煤焦炭 煤焦炭 煤磚 煤粉
液体燃料	石油	胶体燃料 重油 汽油 拖拉机油 煤油
气体燃料	石油燃气 煤气	发生炉煤气 照明气 焦炉煤气 高炉煤气 加工石油的燃气产物

表1所列举的燃料是按其聚集状态及起源进行分类的。

- 拖拉机油又叫里格罗茵，是在石油蒸馏中介于汽油及煤油之間的一种油类——譯者注。

§2 燃料的成分及对其元素的評價

蒸汽鍋炉中所燃燒的液体燃料或其他各种燃料的化学成分或元素成分，都是以其所含的碳 (C), 氢 (H), 硫 (S), 氧 (O), 氮 (N), 灰分 (A) 和水分 (W) 来表示的。

如果用上述符号表示在每公斤固体和液体燃料中或 1 立方米气体燃料中某元素百分比的含量，則可写成

$$C + H + S + O + N + A = 100\%。$$

燃料的成分是以下列方法評價的：

工作质 实际进入炉膛的某种燃料称为工作成分；它的元素成分由下式表示：

$$C_p + H_p + S_p + O_p + N_p + A_p + W_p = 100\%。$$

干质 从燃料中除去水分，則得到干质成分。此成分用下式表示：

$$C_o + H_o + S_o + O_o + N_o + A_o = 100\%。$$

可燃质 无机物杂质和水分在开采和运输过程中会在很大范围内发生变化。为了闡明真正的燃质，引用〔可燃质〕或〔无灰无水质〕的概念，其成分由下列等式表示：

$$C_r + H_r + S_r + O_r + N_r = 100\%。$$

有机质 为表示燃料有机物的主要构成，引用了〔有机质〕的概念。C、H、N 和 O 是代表燃料有机质的元素。所以将燃料列入有机质时，可得出：

$$C_o + H_o + N_o + O_o = 100\%。$$

燃料的工作质和工作成分是用于鍋炉装置的热力計算和整理其試驗結果的。在进行燃料試驗分析、分类及研究其一般性质时，应用燃料有机质、可燃质及干质的概念。从詞义上来理解， C_p 、 H_p 和 S_p 是燃燒元素。 A_p 和 W_p 通称为外部不燃成分，而 N_p 和 O_p 为内部不燃成分。为了将某种燃料的成分从某一种燃料质換算成另一种燃料质，可引用表 2 所列的系数。例如，如果已知 C_o ，需

要确定 C_p 时，则按下式换算

$$C_p = C_o \frac{100}{100 - (S_p + A_p + W_p)} \circ$$

表 2

已知 燃料 质	被 换 算 的 燃 料 质			
	有 机 质	可 燃 质	干 质	工 作 质
有机质 o	1	$\frac{100 - S_r}{100}$	$\frac{100 - (S_c + A_c)}{100}$	$\frac{100 - (S_p + A_p + W_p)}{100}$
可燃质 r	$\frac{100}{100 - S_p}$	1	$\frac{100 - A_c}{100}$	$\frac{100 - (A_p + W_p)}{100}$
干 质 c	$\frac{100}{100 - (S_c + A_c)}$	$\frac{100}{100 - A_c}$	1	$\frac{100 - W_p}{100}$
工作质 p	$\frac{100}{100 - (S_p + A_p + W_p)}$	$\frac{100}{100 - (A_p + W_p)}$	$\frac{100}{100 - W_p}$	1

从燃烧中的放热作用观点来研究燃料元素时，需要指出如下諸点：

碳(C) 碳是燃料中最重要的部分——燃料的主体。它在燃料中不是呈自由状态存在，而是同碳、氧、氮、硫等组成的复杂的化合物。因为在大多数的燃料中，碳的百分比含量最多，所以碳是燃料发热量的主要代表者。

氢(H) 氢也是燃料最重要的燃烧部分，它的发热量比碳大 3 倍。由于氢与燃料的其他元素化合在一起，它可能全部燃烧，也可能部分燃烧。如果在燃料成分中有氧，则认为全部氧完全与氢化合，所以这时燃料中的氢在燃烧时所得到的热量，要比氢处于自由状态时所得到的热量少。

硫(S) 在燃料中硫以有机硫化化合物及金属硫化物的形式存在，这些硫化物不参与燃烧。无机硫以矿物杂质中的硫酸盐的形式包含在燃料中；在燃烧时它变成灰分 (A_p)。硫（甚至是可燃硫）属于不良杂质，因为它的燃烧产物对于锅炉元件起着有害的

作用。

氮(N) 氮是惰性元素，不参与燃烧，并且它与参加燃烧空气中的氮混合，变成烟气。

氧(O) 氧是燃料中的有机不燃成分，正如上面指出的，它存在于有机化合物中，它使燃料的发热量降低。

灰分(A) 灰分是燃料中的无机部分，是由碱土金属和碱金属、氧化铝、硅、铁的盐类和硫酸盐组成的。灰分是不燃成分，它使燃料质量变坏。

水分(W) 水分在燃料燃烧中起负作用。它使燃料发热量降低。因为用于蒸发水分的一部分燃料热量实际上得不到利用，而且加热到排烟温度的水蒸汽却随时排入大气中去了。

燃料所含的水分与其开采、输送及储藏的方法有关。

§3 舰用锅炉的燃料

除去一些舰队的辅助船舶还在烧煤之外，石油渣油或重油已成为舰用锅炉的主要液体燃料。

在直接蒸馏石油或在裂化时所得到的剩余高树脂（35~85%树脂）和高粘度的产品称为重油或称液体锅炉燃料。

从化学成分来说，重油是液体和固体的碳氢混合物。除此之外，它还含有一些氧化物、硫化物、氮化物和一些无机杂质。

按含硫量，重油可分为低硫（不超过0.5%）、中硫（不超过1%）、高硫（不超过3.5%）重油。按原料成分和性质（初始的原油），重油可分为低石蜡重油及石蜡重油。

燃料的质量是以许多物理化学指标决定的，其中主要是：粘度、闪点、凝固点、含灰量、含硫量及含水量。这些指标表示重油的使用性质及其应用范围。

粘度是重油最重要的特征之一。随温度升高，粘度降低，随温度降低，粘度急剧增大。粘度的大小关系着运输、装油、输油及向喷射器输油的条件。高粘度的重油使完成上述工序非常困难，

在許多情況下需要採用特殊措施(預熱)。粘度及其與溫度的相互關係是由很多因素決定的。其中如：原油的質量、提煉的方法、含蠟量、含樹脂量等等。由於粘度有重要的實用意義，所以粘度為重油分類的基本指標。

閃點是燃料中輕質蒸餾的間接指標。它是從消防安全的觀點來決定其允許溫度的。當存在暴露火焰時，高於這個溫度重油可能發火和燃燒。如將重油加熱到高於這個溫度時，僅允許在封閉式容器內（石油加熱器）進行。

凝固點是個規定值，它是最低限度的溫度。低於這個溫度，在艦上不可能裝油、卸油、輸油及向噴射器輸油。

在上述分析燃料成分時，曾講解了各種燃料的一般主要特徵，如灰分、硫及水等等。所以這些也是重油的特性。下面就與船用鍋爐燃燒特點有關的重油灰分，硫及水分作一些補充敘述。

重油灰分主要是鹼金屬和鹼土金屬的氯化鹽、少量的鹼金屬和鹼土金屬的硫酸鹽。這些鹽類一部分溶解於重油內的水分里。重油燃燒時灰分附着在受熱面上。而附着物的厚度和特點與灰分的鹽分及這些受熱面所在的溫度場有關。通常，灰分像一種結構堅硬而密實的物質附着於靠近爐膛管束的受熱面上。在尾部受熱面上，灰分是疏松的，並且非常容易用吹風和清洗的方法清除。鹽分的沉積減低了鍋爐的傳熱，所以這是非常不利的。由於這個原因，灰分的極限值就成了規定重油品種的標準。

硫在重油中以硫化氫、單元硫及不同有機硫化物的形式存在。如上所述，硫的有害作用就在於它有腐蝕性，對金屬的腐蝕作用和燃燒產物對於金屬結構、受熱面及煙道的腐蝕作用。在艦上，硫是一種非常不利的元素。艦用鍋爐燃料的含硫量應該儘可能降低。

重油中的水是直接從生產重油工廠得到的，含水量一般不超過百分之一。重油水分的增加，往往是由於在儲油加熱時，採用與蒸汽直接接觸的加熱法和在輸送時因為油船漏水引起的。

重油的水之所以是有害的杂质，这不仅是因为它降低了燃料的发热量，而且因为它在重油里分布不均，当锅炉工作时，在许多场合下会导致灭火、喷火及其他事故。

现行标准规定的重油品种如下：

- а) 船用重油 (ГОСТ 1626-53);
- б) 石油燃料——重油 (ГОСТ 1501-52);
- в) 烏赫欽锅炉燃料。

在上列重油品种中，仅船用重油适用于舰用锅炉，它与其他品种的区别是具有较高的质量指标。在表 3 中，根据 ГОСТ 1626-53 列出了 $\Phi-12$ 及 $\Phi-20$ 号船用重油的性能。

表 3

名 称	重油 ГОСТ 1626-53	
	$\Phi-12$	$\Phi-20$
恩氏粘度($^{\circ}\text{Э}$)		
当 50°C 时，为	6~12	—
当 75°C 时，为	—	2~6
灰分(%), 不超过	0.15	0.15
硫分(%), 不超过	0.8	0.8
机械杂质(%), 不超过	0.25	0.25
水分(%), 不超过	1.0	1.0
闪点(在封闭的坩埚内测定; 以 $^{\circ}\text{C}$ 计)不低于	90	90
凝固点不高于	(-8)	(-5)

$\Phi-20$ 号重油比 $\Phi-12$ 号重油有较高凝固点，所以 $\Phi-20$ 仅在南海区域使用。船用重油的允许含硫量不超过 3%。基地油库接收重油时，允许其所含水分不超过 2%，但往舰上装油之前应该保证做到使其含水量不超过 1%。

对于船用重油可以采用下列的工作质平均成分：

$$C_p = 84.42\%$$

$$H_p = 11.47\%$$

$$N_p = 0.21\%$$

$$A_p = 0.15\%$$

$$S_p^{\text{II}} = 0.8\%$$

$$W_p = 2\%$$

$$O_p = 0.7\%$$

机械杂质 0.25%

共計 100% (按重量)。

相应于这些成分的重油計算低发热量为

$$Q_p^{\text{II}} = 9650 \text{ 千卡/公斤燃料。}$$

第二章 空气及燃烧产物

§4 确定燃烧 1 公斤燃料所需的空气量

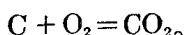
大家知道，燃料的可燃元素是碳 C、氢 H 及硫 S，所以燃烧 1 公斤燃料在理论上所需的氧量 G 等于燃烧每个可燃元素所需氧量之和。即

$$G = G^c + G^h + G^s,$$

式中 G ——燃烧 1 公斤燃料所需氧的重量；

G^c , G^h , G^s ——燃烧 C, H 及 S 所需的氧重量。

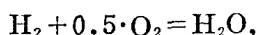
碳 (C) 的燃烧 碳燃烧的物质平衡由下列方程式决定：



从上式中可以看出，燃烧 1 克分子量的碳需要 1 克分子量的氧。考虑到碳的克分子量为 12 公斤，而氧的克分子量为 32 公斤，所以燃烧 1 公斤的碳将需要 $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ 公斤氧。因为每公斤燃料

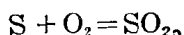
含有 $\frac{C_p}{100}$ 公斤碳，那么为其燃烧所需氧的重量将为 $\frac{8}{3} \cdot \frac{C_p}{100}$ 。

氢 (H₂) 的燃烧 类似上例，可将氢的氧化反应写成



由此得出，燃烧 2 公斤氢需要 16 公斤氧，而燃烧 1 公斤氢需要 8 公斤氧。因为每公斤燃料含有 $\frac{H_p}{100}$ 公斤氢。那么，为其燃烧所需氧的重量为 $\frac{8H_p}{100}$ 。

硫 (S) 的燃烧 对于硫可写成



因为硫的分子量与氧相同，所以燃烧 1 公斤硫将需要 1 公斤氧，

而燃燒 $\frac{S}{100}$ 公斤硫，需要 $\frac{S_p}{100}$ 公斤氧。

燃燒 1 公斤燃料在理論上所需氧的總額等於按照每個可燃元素求出的氧重量之和，再減去燃料中的氧；燃料中的氧量为 $\frac{O_p}{100}$

$$G = \frac{8/3 C_p}{100} + \frac{8 H_p}{100} + \frac{S_p}{100} - \frac{O_p}{100} \quad (1)$$

干空氣可認為由 23.2% 的氧及 76.8% 的氮組成，這對工程上的計算已足夠準確。那麼，燃燒 1 公斤燃料在理論上所需的空氣重量 L_0 可由下式得出

$$L_0 = \frac{G}{0.232} = 0.115 C_p + 0.345 H_p + 0.043 S_p - 0.043 O_p \quad (2)$$

用煙氣分析器分析煙氣時，常常測定 C_p 及 S_p 的燃燒產物總合，所以最好合併公式 (2) 中 $0.115 C_p$ 及 $0.043 S_p$ 兩項。

$$0.115 C_p + 0.043 S_p = 0.115 (C_p + 0.375 S_p) = 0.115 K_p,$$

式中 $K_p = C_p + 0.375 S_p$ ，並稱其為引用碳。因此，公式 (2) 的最後形式可寫成：

$$L_0 = 0.115 K_p + 0.345 H_p - 0.043 O_p \quad (3)$$

為了計算理論上所需的空氣體積[●] V_0 ，將 L_0 除以空氣之比重 γ 。

那麼，考慮到在標準狀況下空氣的比重 $\gamma = 1.293$ 公斤/米³，並且注意到方程式 (3)，則得出

$$V_0 = \frac{L_0}{1.293} = \frac{0.115 K_p + 0.345 H_p - 0.043 O_p}{100 \times 1.293},$$

或者最後寫成

$$V_0 = 0.0889 K_p + 0.265 H_p - 0.033 O_p \text{ 標準米}^3/\text{公斤燃料} \quad (4)$$

如果燃料與空氣的混合及燃燒能夠在保證燃料可燃元素的每個分

● 這里及以後所寫的空氣和燃燒產物的體積都是指標準狀況（0°C 及 760 毫米水銀柱），因此將會大大地簡化與鍋爐熱力計算有關的所有計算。

子，确切按照上述燃燒物质平衡方程式获得所需氧量的理想情况下进行时，那么理論上所需的空气量就足够了。这种理想的情况在炉子装置的目前发展水平下，还不能实现。因此，参加燃燒的实际空气量 L 比按照上述方程式算出的理論空气量要多。实际空气量与理論空气量之比称为过量空气系数，以 α 表示，

$$\alpha = \frac{L}{L_0} \quad \text{或} \quad \alpha = \frac{V}{V_0},$$

式中 L 及 V ——燃燒 1 公斤燃料实际所需空气的重量及体积。 α 值与燃料的品种，混合的质量及炉子装置的结构有关，現代鍋爐的 α 值界于 1.15~1.35 之間。当理論所需空气量等于实际空气量时，即 $L = L_0$ 或 $V = V_0$ ，因此 $\alpha = 1$ 。

§5 燃燒产物

燃料燃燒的結果形成燃燒产物，或称为烟气。烟气的成分与燃料的品种，燃燒条件及空气进量有关。

在理想的炉內过程中，空气中全部的氧与燃料的可燃元素化合，燃燒产物将由 CO_2 、 SO_2 、 H_2O 及 N_2 組成。在有过氧量的条件下燃燒时 ($\alpha > 1$)，燃燒产物将由 CO_2 、 SO_2 、 H_2O 、 N_2 及 O_2 組成。在鍋爐的实际工作条件下，甚至于在完善的炉內过程中，也难以保証燃料的所有可燃元素完全氧化。因此形成不完全燃燒产物，它是由不同结构的碳氢化合物，一氧化碳及不同气体产物組成的。为了簡化計算，实际上都将不易燃燒的气体 CO 看作是唯一的完全燃燒产物，并且所有涉及不完全燃燒的計算都与 CO 有关。

因为船用鍋爐的化学不完全燃燒損耗較小，所以这个假設并不影响鍋爐热力計算的准确性[●]。根据上面的假設，在鍋爐正常的工作中，燃燒产物将由 CO_2 、 SO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 及 CO 組成。

● 在燃燒过程中，如果 $\alpha < 1$ ，会形成大量的不完全燃燒产物，那么将全部化学不完全燃燒損耗都折算成 CO，将会造成較大的誤差。但是，因为在 船用鍋爐中 $\alpha > 1$ ，所以不再研究 $\alpha < 1$ 的燃燒情况。