

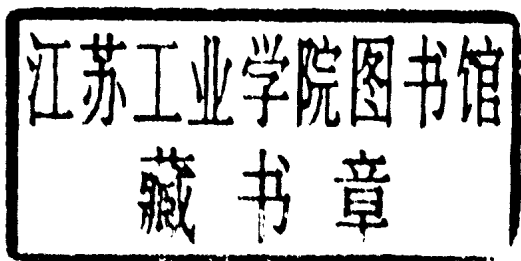
燃气燃烧原理

钱申贤 编著



燃气燃烧原理

钱申贤 编著



中国建筑工业出版社

本书是围绕城市和工业燃气在燃烧方面常见基本问题的原理论述的。包括一般的燃烧热工计算，燃气燃烧的化学反应机理。并就燃烧的基本现象（着火与点火，层流与湍流火焰传播）说明其物理概念，介绍了简化理论。重点对燃烧流体力学基础和火焰作了较全面的阐述。还论述了实验研究方法——物理模拟原理。

本书可供在城市燃气、冶金、机械、轻工等部门从事燃气燃烧应用的工程技术人员和大专院校师生及研究生学习参考。

燃 气 燃 烧 原 理

钱申贤 编著

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10³/₄ 字数：276千字

1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷

印数：1—1,830册 定价：9.50元

ISBN7—112—00602—3/TU·430

(5758)

前 言

近年来我国城市燃气事业日益发展，随之在民用和工业领域内需要各种各样的燃烧设备，以适应不同的加热工艺要求。设计和研制新的燃烧设备，需要有一定的燃烧理论知识作指导，然后在实践中检验是否达到预期效果。为此，作者试图写一本论述燃气燃烧有关主要问题的书，供从事城市燃气事业的工程技术人员学习参考。

作者根据燃气燃烧实践的体会，选择以下几个方面作为基本内容：燃气燃烧反应机理；燃气的着火与点火；可燃混合气中的火焰传播；气体的混合与传质；预混和扩散火焰；燃烧过程的相似与模化。同时，考虑到作为气体燃料燃烧提供热能的需要，又写了：燃烧反应热效应、热平衡和物质平衡。最后，为满足热能利用的需要，阐述了燃气燃烧火焰的辐射。至于火焰电离的问题，只是给出一个引子，为读者提供一条线索，说明它在燃气燃烧中的应用以及改变某些燃烧特性的可能性。

在编写过程中有以下几点考虑：

(1) 注重各种燃烧现象的物理本质，以实验结果进行某些规律性内容的分析讨论，并适当加入一些简化的分析方法。

(2) 由于燃气与空气的混合过程对整个燃烧过程及火焰的形成起很大作用，而这部分内容又是研制燃烧器的基础，因此对气体混合及火焰作了比较详细的介绍。

(3) 尽量选材于国外近几年来公开出版的书籍，避免与国内现有有关书籍内容重复。

本书可作为城市燃气热能专业本科生和研究生的参考书，也可供从事燃气燃烧设备设计的技术人员学习。

在编写过程中由于时间紧迫对书的总体设计考虑不够全面和深刻，所以在系统编排上肯定有不妥之处。另外，因作者水平有限，书中一定会有不少缺点和错误。恳切希望同行和广大读者提出批评指正，以便今后不断完善和提高。

作 者

1987.1. 北 京

目 录

第一章 燃烧反应热效应、热平衡及物质平衡	1
第一节 燃气燃烧化学计量方程式	1
第二节 燃烧反应热效应	2
第三节 燃气热值	5
第四节 燃气燃烧的物质平衡	7
第五节 燃气燃烧的热平衡	11
第二章 气体的混合与传质	18
第一节 湍流的物理性质	18
第二节 热量、质量和动量交换	26
第三节 湍流自由射流	28
第四节 平行和相交射流	41
第五节 旋转射流	52
第三章 燃气燃烧反应机理	72
第一节 主要燃烧反应概述	72
第二节 氢的氧化反应	75
第三节 一氧化碳的氧化反应	79
第四节 碳氢化合物的氧化反应	82
第四章 燃气的着火与点火	101
第一节 热力着火	101
第二节 分支链着火	108
第三节 燃气点火过程及热理论	116
第四节 电火花点火	122
第五节 其它形式的点火	136
第五章 可燃混合气中的火焰传播	143
第一节 火焰传播的基本方式	143
第二节 火焰正常传播的特点(管内火焰传播)	148

第三节	层流火焰传播理论简介	150
第四节	火焰传播速度的测定	158
第五节	影响层流火焰传播速度的因素	168
第六节	火焰传播界限	175
第七节	火焰的湍流传播	178
第六章	预混和扩散火焰	188
第一节	层流预混火焰	195
第二节	预混火焰的稳定性	206
第三节	层流扩散火焰	210
第四节	湍流扩散火焰	228
第五节	扩散火焰的稳定和稳焰器	235
第六节	有限空间的射流火焰及回流现象	241
第七节	同轴射流火焰	244
第八节	旋转火焰	251
第七章	火焰的辐射与电离	251
第一节	辐射的性质及基本定律	251
第二节	气体辐射	255
第三节	发光辐射	261
第四节	火焰的辐射放热及其增强措施	269
第五节	火焰与电场	273
第六节	离子风	275
第七节	离子的生成和动力学原理	284
第八节	火焰电离的工程应用	288
第八章	燃烧过程的相似与模化	293
第一节	物理模化和相似准则	294
第二节	物理模化方法和形式	301
第三节	部分模化法对火焰的应用	303
第四节	燃气燃烧实验研究	307
参考文献		322

第一章 燃烧反应热效应、热平衡及物质平衡

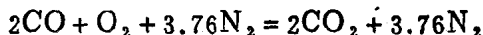
第一节 燃气燃烧化学计量方程式

本书所论述的燃烧是指可燃组分与空气中的氧之间进行的化学反应。从这一定义出发，氢的燃烧反应化学计量方程为：



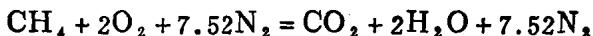
这说明燃烧两个分子的氢，需要一个分子的氧，反应结果生成两个分子的水蒸气。

一氧化碳的燃烧反应可写成：



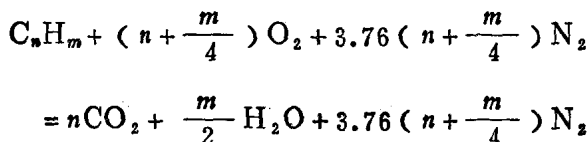
即燃烧 2 个分子的一氧化碳，需要一个分子的氧，并生成两个分子的二氧化碳。

甲烷的燃烧反应，则可写成：



即燃烧一个分子的甲烷，需要两个分子的氧，生成一个二氧化碳分子和两个水蒸气分子。

对于碳氢化合气来说，化学计量方程可写成如下的通式：



这说明，碳氢化合气完全燃烧时，不管其分子结构如何复杂，总是生成二氧化碳和水蒸气，其量由该碳氢化合气的碳原子和氢原子含量而定。

上述化学计量方程式不仅描述了燃烧反应过程的物质关系，

而且说明了反应组分之间的数量比例关系。由这种方程式得出的结果为从理论上保证完全燃烧而必须维持的燃气成分与氧气（或空气）之间的数量比例即化学计量比。应用上述化学计量方程可以进行任何燃气燃烧物质平衡的计算。

需要指出的是，上述方程仅仅说明了数量之间的比例关系，而并不能描述具体反应步骤和过程细节。

第二节 燃烧反应热效应

尽管实际化学反应总是伴随着反应系统温度的变化，但在热化学中看成是理论上的等温过程，即假设：放热反应发生时，将生成的热量随时不断引出系统；而吸热反应进行时，则必须不断向系统输入必要的热量，以使反应在恒定的温度下进行。这种假设，并不妨碍将热化学的结论推广到实际过程中去。

热力学第一定律阐明了能量守恒的规律，热化学实质上可以看作是热力学第一定律在化学中的具体应用。对于有能量转化的系统（或过程）来说，第一定律可表达为：

$$\Delta E = Q + W \quad (1-1)$$

式中 ΔE ——系统的内能变化；

Q ——反应时系统放出（或吸收）的热量；

W ——对系统做的功。

在研究化学反应时，内能的概念比物理中要广一些。在这种情况下，内能的含意除了热能（即分子运动的平动和旋转动能，分子内的振动能和分子相互作用力的势能）以外，还应包括分子键的化学能以及原子内的光级能。因此，化学反应往往伴有光效应，亦即释放出原子内部的光级能。

与仅作膨胀功 W_p 的状态变化的物理过程不同，化学反应可能随之要作与反应系统膨胀过程无关的功 W_o 。（如在原电池电路中电流的功）。这种功称之为有效功，所以 $W = W_p + W_o$ 。

对等温反应来说，热力学第一定律的表达式可更具体地写

成:

$$\Delta E = Q + W_p + W_s \quad (1-2)$$

若膨胀功相同, 则有效功越小时, 反应过程中放出的热量显得越多。显然, 当有效功等于零时, 则在该给定条件下进行的反应其放出的热量最多。这时可改写为:

$$\Delta E = Q_{\max} + W_s \quad (1-3)$$

此处 $Q_{\max}$ 称为化学反应的热效应。所以, 热效应就是在等温和不作有效功的条件下, 进行化学反应时释放 (或吸收) 的热量。在热化学中, 系统吸入热量为正值, 放出热量为负值, 热量的记号仍以系统为主。

在热化学中通常研究两类反应: 等容条件下进行的反应和等压条件下进行的反应。这些反应都是实际过程理论上的等温型式。

现设外压 P_0 作用下体积的膨胀微元为 dV , 则对系统作的功 $dW = -P_0 \cdot dV$, 即

$$W = - \int P_0 dV$$

对于可逆过程来说, 外压 P_0 实际上等于气体压力 P , 因此 $W = - \int P dV$ 。

当体积不变 (定容) 时, $dV = 0$, 于是有

$$- \int P dV = 0$$

(1-1) 式可简化为 $\Delta E = Q_v$ (或 $\Delta E = Q_{v, \max}$), 即加于定容系统的热能等于其内能的增大。

当压力不变 (定压) 时, $W = - \int P dV = P \cdot \Delta V$, 因此

$$\Delta E = Q_p - P \cdot \Delta V \text{ 或 } Q_p = \Delta E + P \cdot \Delta V \quad (1-4)$$

燃气燃烧过程通常发生在大气压 (常压) 下, 因此热力学函数一焓, 就是定压下的热含量, 其定义为:

$$H = E + PV \quad (1-5)$$

也可写成 $\Delta H = \Delta E + P \cdot \Delta V$ ，于是 $Q_p = \Delta H$ ，即等压下反应的热效应等于反应系统的焓的增量。

由于等压下的反应总是伴随有容积的变化，因此释放出的能量的一部分用于做膨胀功；然而等容下的反应不做功，所以同一反应在等压和等容下的热效应一般来说是不等的。内能和焓都是状态参数，在等压和等容过程中反应的热效应可由测量得到的状态参数的变化来确定。状态参数的变化与过程的具体行程无关，而仅仅决定于系统的起始和终了状态。由此可以直接得出：反应的热效应只决定于反应系统的始态和终态，而与反应的具体行程无关。这一规律是由俄国科学家盖斯通过实验发现的，故称为盖斯定律。按照此定律，一个化学反应中的热量变化，不管它是一步完成，还是分几步完成，都是相同的。所以，任何化合物的绝对焓值都可以通过加减一定的反应热而得出。

盖斯定律在各类热化学计算中具有非常重要的意义。根据这一定律，复杂反应的热效应可以运用对其它易于进行热量计测定的反应的数据来求得。应当指出的是，假若不知道反应热效应等于燃料直接变化成最终燃烧产物的热效应的话，那么即便是最简单的燃烧反应，要计算其释放出的热量也几乎是不可能的。

由前已知，实际上燃烧反应均伴随温度的升高。一般燃烧反应，系统的温度升高很多。但是应该考虑到，燃烧时燃料的全部化学能转变成热能，并用于提高系统的内部热能（等容时）或焓（等压时）。所以，对于燃料的燃烧反应来说， Q_p 值可由未冷却产物的内能与将它冷却到燃料和空气的起始温度时的内能之差值来确定。同样，燃烧反应的 Q_p 值可由未冷却的燃烧产物的焓与冷却到起始温度时的焓差来求得。因为在等压和等容条件下都是只要求得状态参数之差值即可，而并非绝对值，所以计算其起点的参数是没有意义的。而起点可从 0°C 算起，亦即认为 0°C 时气体的内能和焓都等于零。这种假设条件在热工计算中是常用的。

按照上述假设，任意量气体 V_0 在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的内能等于在定容条件下将此气体从 0°C 加热到 $t^\circ\text{C}$ 时所需的热量，可表示为：

$$E = V_0 \cdot \bar{c}_v \cdot t \quad \text{kJ} \quad (1-6)$$

式中 $\bar{c}_v$ ——气体在 0°C 至 $t^\circ\text{C}$ 温度范围内的平均定容体积比热。

同理, 如果焓也从 0°C 算起, 则任意量气体 V_0 在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的焓等于在定压下将此气体从 0°C 加热到 $t^\circ\text{C}$ 所需的热量, 表示为:

$$H = V_0 \cdot \bar{c}_p \cdot t \quad \text{kJ} \quad (1-7)$$

式中 $\bar{c}_p$ ——气体在 0°C 到 $t^\circ\text{C}$ 温度范围内的平均定压体积比热 (单一可燃气体的平均定压体积比热见表 1-1)。

单一可燃气体的平均定压体积比热 ($\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$)_{0~t}

表 1-1

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
0	1.299	1.277	1.513	1.544	1.792	2.227	3.039	4.128	5.129	
100	1.302	1.292	1.543	1.653	2.031	2.525	3.450	4.517	5.837	
200	1.307	1.297	1.574	1.765	2.257	2.809	3.860	5.255	6.515	
300	1.317	1.300	1.608	1.890	2.466	3.077	4.271	5.774	7.315	
400	1.329	1.302	1.644	2.019	2.658	3.333	4.661	6.268	7.742	
500	1.343	1.305	1.682	2.144	2.839	3.571	5.095	6.691	8.257	
600	1.357	1.308	1.719	2.264	3.006	3.793	5.431	7.114	8.784	
700	1.372	1.312	1.756	2.381	3.157	4.003	5.724	7.486	9.232	
800	1.386	1.317	1.793	2.490	3.291	4.119	5.987	7.808	9.626	
900	1.399	1.323	1.827	2.591	3.412	4.379	6.230	8.114	9.990	
1000	1.413	1.329	1.861	2.690	3.517	4.543	6.461	8.403	10.350	

第三节 燃 气 热 值

单位(质量、体积或摩尔)燃气在规定条件(通常为 $t = 25^\circ\text{C}$, $P = 1.013\text{bar}$) 下完全燃烧所放出的热量称为热值, 用它来表示燃气潜在的化学能。热值可分为高热值和低热值。高热值(也称燃烧热或总热值)是单位量燃气完全燃烧, 且烟气中的水蒸气冷凝成水时所释放出的热量; 低热值(也简称热值或净热值)是单位量燃气完全燃烧, 且烟气中水蒸气仍呈气态时所释放

出来的热量。

如前所述，一般燃烧反应都是在等压下进行的，热效应等于焓的增量，因此热值的表达式如下：

(1) 摩尔燃烧热

$$H_{h,m} = \frac{-(\Delta H)_R}{ng} \text{ MJ/kmol}$$

摩尔热值

$$H_{l,m} = H_{h,m} - \left(\frac{n_{H_2O}}{ng} r_m \right) \text{ MJ/kmol}$$

(2) 质量燃烧热

$$H_h = \frac{H_{h,m}}{M} \text{ MJ/kg}$$

质量热值

$$H_l = \frac{H_{l,m}}{M} \text{ MJ/kg}$$

(3) 标准体积燃烧热

$$H_{h,n} = \frac{-(\Delta H)_R}{V_n} = \frac{H_{h,m}}{V_{m,n}} = H_h \cdot \rho_n \text{ MJ/Nm}^3$$

标准体积热值

$$H_{l,n} = \frac{H_{l,m}}{V_{m,n}} = H_l \cdot \rho_n \text{ MJ/Nm}^3$$

式中 $(\Delta H)_R$ ——反应的焓增量 (MJ)；

M ——分子量 (kg/kmol)；

n_g ——燃烧前干燃气的摩尔数 (kmol)；

n_{H_2O} ——燃烧生成水蒸气的摩尔数 (kmol)；

r_m ——25°C时水蒸气的摩尔焓 (MJ/kmol)；

V_n ——标准体积 ($t_n = 0^\circ\text{C}$, $P_n = 1.013\text{bar}$)
(Nm³)；

$V_{m,n}$ ——标准摩尔体积 (Nm³/kmol)；

ρ_n ——气体的标准密度 (kg/Nm³)。

在工程中对气体燃料来说，常用标准体积高热值和低热值来

表示燃气的燃烧热能，其单位为MJ/Nm³或kJ/Nm³。

第四节 燃气燃烧的物质平衡

按照质量守恒的原则，通过物质平衡来确立燃烧反应物与生成物之间的数量关系。

一、燃烧所需空气量的计算

按照燃气的可燃成分和化学计量方程，燃烧1 m³燃气所需氧气量为：

$$V_{O_2}^0 = 0.01 (0.5CO + 0.5H_2 + 2CH_4 + 3.5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6.5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4.5C_3H_8 + 1.5H_2S - O_2) \text{ m}^3/\text{m}^3$$

氧在空气中的体积约占21%，则所需空气量为

$$V_{O_2}^0 = 4.76 V_{O_2}^0 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

为了保证燃气完全燃烧，通常要供给比理论计算所需的更多的空气量，即实际空气量 V_{O_2} ，以 $\frac{V_{O_2}}{V_{O_2}^0}$ 之比值 α 来表示， α 称为过量空气系数。

二、燃烧产生烟气量的计算

燃气燃烧后生成的烟气量按下式计算：

$$V_z = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

三原子气体 $CO_2 + SO_2 = RO_2$ ，上式可写成：

$$V_z = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

去除水蒸气的干烟气量为：

$$V_z' = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

上述诸式中各项计算如下：

$$V_{CO_2} = 0.01 (CO_2 + CO + nC_nH_{2n+2} + nC_nH_m)$$

$$V_{SO_2} = 0.01H_2S$$

$$V_{H_2O} = 0.01 \left[H_2 + (n+1)C_nH_{2n+2} + \frac{m}{2}C_nH_m + H_2S \right]$$

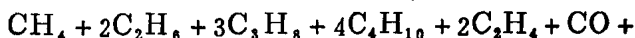
或计入燃气和空气中的水分

$$V_{H_2O} = 0.01 \left[H_2 + (n+1)C_nH_{2n+2} + \frac{m}{2}C_nH_m + H_2S \right. \\ \left. + 0.120d + 1.6V_o^0 \cdot \alpha \right]$$

$$V_{N_2} = 3.76\alpha \cdot V_o^0 + 0.01N_2$$

$$V_{O_2} = (\alpha - 1) V_o^0,$$

可按燃气和烟气中碳的平衡来计算干烟气量，计算式为：



$$CO_2 = V'_2 (CO'_2 + CO' + CH'_4)$$

$$V'_2 = \frac{CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 2C_2H_4 + CO + CO_2}{CO'_2 + CO' + CH'_4}$$

$$m^3/m^3$$

此处 CO'_2 、 CO' 和 CH'_4 分别表示烟气中 CO_2 、 CO 和 CH_4 的体积成分。

当产生不完全燃烧，烟气中含有 H_2 和 CH_4 时，烟气中的水蒸气含量为：

$$V'_{H_2O} = V_{H_2O} - 0.01V_2 (H_2 + 2CH_4) m^3/m^3$$

三、过剩空气系数的计算

当燃气燃烧所需空气量不足时，会引起不完全燃烧而产生 CO 等不完全燃烧产物，污染环境，造成化学热损失。燃烧所需空气量过大而超过最佳值时，会使排烟热损失加大，还可能导致燃烧室温度下降，反过来又引起不完全燃烧。因此，在过剩空气尽可能少的（保证完全燃烧）条件下，选择合理的燃烧方法和燃烧装置具有很大的意义。

当燃烧含硫燃料时，为避免产生腐蚀性大的 SO_3 等，使燃烧过剩空气尽可能达到最小，以保证热工设备的长期正常运转。所以，为保证最佳燃烧过程，必须控制和调节过剩空气。

完全燃烧时，按氮平衡可得：

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - N_{2,o}} = \frac{N'_2}{N'_2 - 3.76O'_2}$$

式中 N'_2 、 O'_2 —烟气中氮和氧的体积成分。

上式还可改写成:

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3.76 \frac{O'_2}{N'_2}} \text{ 或 } \alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{N'_2}}$$

不完全燃烧时, 过剩空气系数为:

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - 3.76 (O'_2 - 0.5CO' - 0.5H'_2 - 2CH'_4)}$$

当燃气中含氮量较高时, 如燃烧发生炉煤气和高炉煤气, 计算式变为:

$$\alpha = \frac{N'_2 - \frac{N_2}{V'_2}}{N'_2 - \frac{N_2}{V'_2} - 3.76O'_2}$$

$$\text{或 } \alpha = \frac{N'_2 - \frac{N_2}{V'_2}}{N'_2 - \frac{N_2}{V'_2} - 3.76(O'_2 - 0.5CO' - 0.5H'_2 - 2CH'_4)}$$

在燃烧过程中, 对烟气进行取样分析, 便可按上述公式计算出取样点的过剩空气系数。

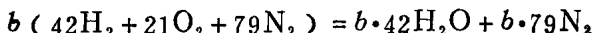
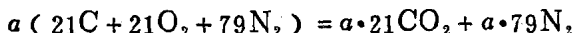
四、烟气中 $[CO_2]_{\max}$ 的计算

理论上的干烟气是由 RO_2 和 N_2 组成的。碳完全燃烧时



CO_2 的最大含量为21%, 因而碳燃烧时的 $[CO_2]_{\max} = 21\%$ 。含碳高的燃料燃烧生成的烟气中, $[CO_2]_{\max}$ 可接近此值, 例如, 对焦炭来讲 $[CO_2]_{\max} = 20.6\%$ 。

可燃组分中含有氢时, 不仅要产生 H_2O , 而且会降低 RO_2 。含氢燃料燃烧时



水蒸气冷凝后, 干烟气的组成为:

$$21\left(O_2 + 79N_2 + \frac{b}{a} 79N_2\right)$$

显然，在烟气中 CO_2 含量小于21%。 $\frac{H}{C}$ 比越大，亦即 $\frac{b}{a}$ 越大，则烟气中含氮量越多，从而 $[\text{CO}_2]_{\max}$ 越小。例如，天然气（按质量含25%的氢）其 $[\text{CO}_2]_{\max} \approx 11.8\%$ 。

燃料中含氧量增大时，由于所耗空气量少，降低了带入烟气中的氮气的量，故 $[\text{CO}_2]_{\max}$ 有所增大。对不同燃气来说，由于其 $\frac{H}{C}$ 比和 O_2 、 N_2 组分有很大差别，所以 $[\text{CO}_2]_{\max}$ 值的变化范围也较大。如天然气的 $[\text{CO}_2]_{\max} \approx 11.8\%$ ，混合发生炉煤气的 $[\text{CO}_2]_{\max} \approx 21\%$ 。

$[\text{CO}_2]_{\max}$ 的计算方法有：（1）按燃料成分计算；（2）按烟气成分计算。现分述于后。

1. 按燃气成分计算

按照定义
$$[\text{CO}_2]_{\max} = \frac{100 V_{\text{CO}_2}}{V_2^0} \%$$

V_{CO_2} 和 V_2^0 （理论烟气量）都可以照前述公式进行计算。

天然气和石油伴生气的 $[\text{CO}_2]_{\max}$ 可按下式计算：

$$[\text{CO}_2]_{\max} = 11.75 + 0.01(2\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 6\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} + 10\text{C}_6\text{H}_{14} + 11\text{CO}_2 - 1.5\text{N}_2) \%$$

若燃气中 $\text{N}_2 < 3\%$ ，公式为：

$$[\text{CO}_2]_{\max} = 11.75 + 0.01[2(\text{C}_2\text{H}_6 - \text{N}_2) + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 6\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} + 10\text{C}_6\text{H}_{14} + 11\text{CO}_2] \%$$

2. 按烟气成分计算

（1）完全燃烧时

无过剩 O_2 时
$$[\text{RO}_2]_{\max} = \frac{\text{RO}_2' \cdot 100}{\text{RO}_2' + \text{N}_2'} \%$$

有过剩 O_2 时
$$[\text{RO}_2]_{\max} = \frac{\text{RO}_2' \cdot 100}{100 - 4.76\text{O}_2'} \%$$

（2）不完全燃烧时 烟气中除了 RO_2 、 N_2 和 O_2 以外，还有 CO 、 CH_4 和 H_2 。对以 CO 为主要可燃成分的燃气，其不完全燃烧主要产物为 CO 。可以认为，干烟气由 RO_2 、 N_2 、 O_2 和 CO