

# 燃气燃烧与应用

同 济 大 学 重 庆 建 筑 工 程 学 院 编  
哈 尔 滨 建 筑 工 程 学 院 北 京 建 筑 工 程 学 院



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

# 燃气燃烧与应用

同 济 大 学  
重 庆 建 筑 工 程 学 院  
哈 尔 滨 建 筑 工 程 学 院  
北 京 建 筑 工 程 学 院

编

中国建筑工业出版社

本书系全国高等工科院校“城市燃气热能供应工程”专业试用教材。

全书共十六章，包括燃气燃烧理论、燃烧器及民用燃具设计、燃气在工业炉及锅炉设备中的合理利用与节能方法、热力计算和空气动力计算以及运行管理和安全技术等内容。

本书亦可供从事煤气、天然气、液化石油气和农村沼气热能利用工作的设计、科研及运行管理人员参考。

高等学校试用教材  
**燃气燃烧与应用**  
同 济 大 学  
重庆建筑工程学院 编  
哈尔滨建筑工程学院  
北京建筑工程学院

\*

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 各地新华书店经营  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24% 字数：601 千字  
1981年6月第一版 1981年6月第一次印刷  
印数：1—4,400册 定价：2.55元  
统一书号：15040·4080

# 前 言

本书是高等工科院校城市燃气热能供应工程专业试用教材。

利用燃气代替固体燃料不仅能够节约能源、提高产品质量及数量、实现生产自动化、改善劳动条件，同时能够减轻城市交通运输负担及提高人民生活水平，而且还能防止大气污染，保护城市环境。所以，城市燃气化是城市现代化的重要标志之一。

本书主要论述了燃气燃烧理论、燃烧器设计、民用燃具设计、燃气在工业炉及锅炉设备中的合理利用与节能措施、热力计算和空气动力计算方法，同时还阐述了燃气燃烧的自动调节、运行管理和安全技术措施。

本书在编写过程中承蒙国家城市建设总局天津市政工程设计院及北京、上海、沈阳等煤气公司、重庆天然气公司的大力协助，提供了宝贵资料和意见，特此致谢。

参加本书编写的同志有：同济大学姜正侯、徐吉浣、章成骏、张同、杨庆泉；重庆建筑工程学院郭文博、刘瑶征；哈尔滨建筑工程学院傅忠诚、李拯鸣和北京建筑工程学院钱中贤。全书由姜正侯、郭文博两同志主编，并请天津大学金志刚同志主审。

# 目 录

第一章 燃气的燃烧计算 .....	1
第一节 燃气的热值 .....	1
第二节 燃烧所需空气量 .....	3
第三节 完全燃烧产物的计算 .....	5
第四节 运行时烟气中的CO含量和过剩空气系数 .....	7
第五节 燃气燃烧温度及焓温图 .....	11
第二章 燃气燃烧反应及着火 .....	18
第一节 温度及压力对燃气燃烧反应速度的影响 .....	18
第二节 链反应 .....	21
第三节 燃气的着火 .....	24
第四节 燃气的点火 .....	29
第三章 燃气燃烧的气流混合过程 .....	36
第一节 射流运动规律 .....	36
第二节 紊流扩散过程 .....	51
第四章 燃气燃烧的火焰传播 .....	54
第一节 火焰传播的理论基础 .....	54
第二节 法向火焰传播速度的测定 .....	60
第三节 影响火焰传播速度的因素 .....	65
第四节 混合气体火焰传播速度的计算 .....	70
第五节 紊流火焰传播速度 .....	71
第六节 火焰传播浓度极限 .....	75
第五章 燃气燃烧方法 .....	77
第一节 扩散式燃烧 .....	77
第二节 大气式燃烧 .....	84
第三节 无焰式燃烧 .....	92
第四节 燃烧过程的强化与完善 .....	95
第五节 燃烧器的分类与技术要求 .....	100
第六章 扩散式燃烧器 .....	101
第一节 自然引风式扩散燃烧器 .....	101
第二节 强制鼓风式扩散燃烧器 .....	111
第七章 大气式燃烧器 .....	124
第一节 大气式燃烧器的构造及特点 .....	124
第二节 大气式燃烧器的头部设计 .....	131
第三节 低压引射器的计算 .....	137
第四节 低压引射大气式燃烧器的计算 .....	142
第五节 燃气燃烧器的噪音及控制措施 .....	147

第八章 无焰式燃烧器 .....	151
第一节 无焰式燃烧器的构造及特点 .....	151
第二节 无焰式燃烧器的头部设计 .....	156
第三节 高压引射器的计算 .....	161
第四节 其它类型燃烧器 .....	172
第九章 燃气互换性 .....	180
第一节 燃气互换性和燃具适应性 .....	180
第二节 华白数 .....	182
第三节 火焰特性对燃气互换性的影响 .....	184
第四节 燃气互换性判定指数 .....	188
第十章 民用燃气用具 .....	194
第一节 燃气炊事用具 .....	194
第二节 燃气热水器、沸水器及其它燃具 .....	196
第三节 民用燃气用具的设计 .....	200
第四节 民用燃具对制作材料的要求 .....	206
第五节 民用燃气用具的烟气排除 .....	208
第十一章 燃气工业炉 .....	215
第一节 燃气工业炉的分类 .....	215
第二节 燃气工业炉的基本组成 .....	217
第三节 燃气工业炉的热工特性 .....	224
第四节 燃气在金属加热工艺中的应用 .....	234
第五节 燃气在硅酸盐煅烧工艺中的应用 .....	245
第六节 燃气在干燥工艺中的应用 .....	249
第十二章 燃气锅炉及燃气工业炉余热利用 .....	251
第一节 燃气锅炉 .....	251
第二节 燃气工业炉余热利用 .....	268
第十三章 燃气工业炉的热力计算 .....	281
第一节 燃气工业炉的热平衡 .....	281
第二节 燃气工业炉膛热交换计算 .....	288
第三节 对流受热面传热计算 .....	295
第四节 对流放热系数 .....	298
第五节 辐射放热系数 .....	307
第六节 平均温差 .....	309
第七节 对流受热面传热计算方法提要 .....	311
第十四章 燃气工业炉的空气动力计算 .....	331
第一节 燃气工业炉空气动力计算的任务 .....	331
第二节 气体流动阻力计算 .....	333
第三节 燃气工业炉通风排烟装置 .....	348
第十五章 燃气燃烧的自动与安全控制 .....	352
第一节 燃烧自动与安全控制的意义 .....	352
第二节 自动点火 .....	353
第三节 自动控制 .....	355

第四节	安全控制	358
第十六章	燃气应用设备的运行管理及安全技术	365
第一节	概述	365
第二节	燃气应用设备的运行管理	365
第三节	燃气应用设备的安全技术	370
附录		378
参考文献		389

# 第一章 燃气的燃烧计算

燃气是各种气体燃料的总称，它能燃烧而放出热量，供城市居民和工业企业使用。常用的燃气有纯天然气、石油伴生气、炼焦煤气、碳化煤气、高压气化煤气、热裂解油制气、催化裂解油制气、液化石油气和矿井气等。

燃气通常由一些单一气体混合而成，其组分主要是可燃气，同时也含有一些不可燃气体。可燃气有碳氢化合物、氢及一氧化碳。不可燃气体有氮、二氧化碳及氧。此外，燃气中还含有少量的混杂气体及其它杂质，例如水蒸气、氨、硫化氢、萘、焦油和灰尘等。

燃气燃烧计算是工业炉及锅炉热力计算的一部分。它为工业炉及锅炉热平衡计算、传热计算、空气动力计算和燃烧器计算提供可靠的依据。燃气燃烧计算的内容包括：确定燃气的热值、计算燃烧所需的空气量及烟量、确定燃烧温度和绘制焓温图等。

## 第一节 燃气的热值

### 一、燃烧及燃烧反应计量方程式

气体燃料中的可燃成分（ $H_2$ 、 $CO$ 、 $C_mH_n$ 和 $H_2S$ 等）在一定条件下与氧发生激烈的氧化作用，并产生大量的热和光的物理化学反应过程称为燃烧。

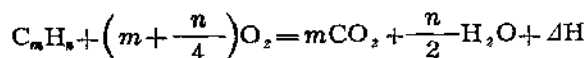
燃烧必须具备的条件是：燃气中的可燃成分和（空气中的）氧气需按一定比例呈分子状态混合；参与反应的分子在碰撞时必须具有破坏旧分子和生成新分子所需的能量；具有完成反应所必需的时间。

燃烧反应计量方程式是燃气进行燃烧计算的依据。它表示各种单一可燃气体燃烧反应前后物质的变化情况以及反应前后物质间的体积和重量的比例关系。例如：



表示1公斤分子 $CH_4$ 与2公斤分子 $O_2$ 完全燃烧后，生成1公斤分子 $CO_2$ 与2公斤分子 $H_2O$ ，同时放出一定的热量 $\Delta H$ 。其它常见的单一可燃气体与氧完全燃烧的反应计量方程式（简称燃烧反应式）列于附录2中。

任何一种形式的碳氢化合物 $C_mH_n$ 的燃烧反应式，都可用以下通式表示：



各种单一气体的公斤分子容积实际上是不完全相等的，但在燃烧计算时可近似假定它们相等。这样，燃烧反应计量方程式所反映的公斤分子之间的比例关系，就可以转化为容积之间的比例关系。



## 二、燃气热值的确定

1 标米<sup>3</sup>燃气完全燃烧所放出的热量称为该燃气的热值，单位为 千卡/标米<sup>3</sup>。对于液化石油气，热值单位也可用 千卡/公斤。

热值可分为高热值和低热值。

高热值是指 1 标米<sup>3</sup>燃气完全燃烧后其烟气被冷却至原始温度，而其中的水蒸气以凝结水状态排出时所放出的热量。

低热值是指 1 标米<sup>3</sup>燃气完全燃烧后其烟气被冷却至原始温度，但烟气中的水蒸气仍为蒸气状态时所放出的热量。

显然，燃气的高热值在数值上大于其低热值，差值为水蒸气的气化潜热。

在工业与民用燃气应用设备中，烟气中的水蒸气通常是以气体状态排出的，因此实际工程中常用燃气低热值进行计算。而只有当烟气冷却至露点温度以下时，其水蒸气的气化潜热才能被利用。

单一可燃气体的热值可根据附录 2 所示的该气体燃烧反应的热效应算得。

例如，根据附录 2 中 CH<sub>4</sub> 的燃烧反应式可计算出每标米<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> 的热值为：

$$H_h = \frac{212664}{22.3621} = 9510 \text{ 千卡/标米}^3$$

$$H_l = \frac{191643}{22.3621} = 8570 \text{ 千卡/标米}^3$$

根据附录 2 中 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 的燃烧反应式，可计算出每公斤 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 的热值为：

$$H_h = \frac{530442}{44.097} = 12029 \text{ 千卡/公斤}$$

$$H_l = \frac{488212}{44.097} = 11071 \text{ 千卡/公斤}$$

式中 22.3621——标准状态下 CH<sub>4</sub> 的公斤分子容积（标米<sup>3</sup>/公斤分子）；

44.097——C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 的分子量（公斤/公斤分子）；

H<sub>h</sub>、H<sub>l</sub>——燃气的高热值和低热值（千卡/标米<sup>3</sup>或千卡/公斤）。

常见的单一可燃气体的高热值和低热值列于附录 2 中。

实际使用的燃气是含有多种组分的混合气体。混合气体的热值可以直接用热量计测定，也可以由各单一气体的热值根据混合法则按下式进行计算：

$$H = H_1 r_1 + H_2 r_2 + \dots + H_n r_n \quad (1-1)$$

式中 H——燃气（混合气体）的高热值或低热值（千卡/标米<sup>3</sup>）；

H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>、……H<sub>n</sub>——燃气中各可燃组分的高热值或低热值（千卡/标米<sup>3</sup>），由附录 2 查得；

r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub>、……r<sub>n</sub>——燃气中各可燃组分的容积成分。

干燃气的高热值和低热值可按下式进行换算：

$$H_h^d r = H_l^d r + 4.68 \left( H_2 + \sum \frac{n}{2} C_n H_n + H_2 S \right) \quad (1-2)$$

式中 H<sub>h</sub><sup>d</sup>r——干燃气的高热值（千卡/标米<sup>3</sup>于燃气）；

$H_1^{d,r}$ ——干燃气的低热值 (千卡/标米<sup>3</sup>干燃气);

$H_2$ 、 $C_m H_n$ 、 $H_2 S$ ——氢、碳氢化合物、硫化氢在干燃气中的容积成分。

湿燃气的高热值和低热值可按下式进行换算:

$$H_2^w = H_1^w + \left[ 4.68 \left( H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2 S \right) + 600 d_g \right] \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-3)$$

或 
$$H_2^w = H_1^w + 4.68 \left( H_2^w + \sum \frac{n}{2} C_m H_n^w + H_2 S^w + H_2 O^w \right) \quad (1-4)$$

式中

$H_2^w$ ——湿燃气的高热值 (千卡/标米<sup>3</sup>湿燃气);

$H_1^w$ ——湿燃气的低热值 (千卡/标米<sup>3</sup>湿燃气);

$d_g$ ——燃气的含湿量 (公斤/标米<sup>3</sup>干燃气);

$H_2^w$ 、 $C_m H_n^w$ 、 $H_2 S^w$ 、 $H_2 O^w$ ——氢、碳氢化合物、硫化氢、水蒸气在湿燃气中的容积成分。

干燃气的低热值和湿燃气的低热值可按下式进行换算:

$$H_1^w = H_1^{d,r} \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-5)$$

或

$$H_1^w = H_1^{d,r} \left( 1 - \frac{\varphi P_s}{P} \right) \quad (1-6)$$

干燃气的高热值和湿燃气的高热值可按下式进行换算:

$$H_2^w = (H_1^{d,r} + 600 d_g) \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-7)$$

或

$$H_2^w = H_1^{d,r} \left( 1 - \frac{\varphi P_s}{P} \right) + 468 \frac{\varphi P_s}{P} \quad (1-8)$$

式中  $\varphi$ ——湿燃气的相对湿度;

$P$ ——燃气绝对压力 (毫米汞柱);

$P_s$ ——在与燃气相同温度下水蒸气的饱和分压力 (毫米汞柱)。

## 第二节 燃烧所需空气量

### 一、理论空气需要量

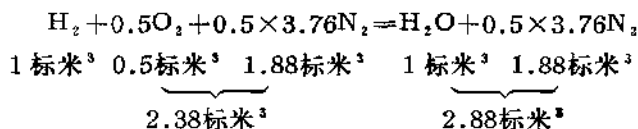
由燃烧反应必须具备的条件可知,燃气燃烧需要供给适量的氧气。氧气过多或过少都对燃烧不利。

在燃气应用设备中燃烧所需的氧气一般是从空气中直接获得。若不考虑干空气中所含的少量二氧化碳和其它稀有气体,干空气的容积成分可按含氧21%、含氮79%计算;而重量成分则按含氧23.2%、含氮76.8%计算。干空气中氮与氧的容积比为:

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{79}{21} = 3.76$$

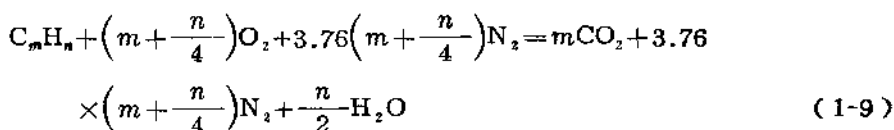
所谓理论空气需要量,是指每标米<sup>3</sup>(或公斤)燃气按燃烧反应计量方程式完全燃烧所需的空气量,单位为标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>或标米<sup>3</sup>/公斤。理论空气需要量也是燃气完全燃烧所需的最小空气量。

各单一可燃气体燃烧所需的理论空气量可按附录2所列的燃烧反应式确定,其值可按该表查出。例如,氢的燃烧反应式为



在近似假定各种气体的公斤分子容积相等的前提下，由以上反应式可见，1标米<sup>3</sup>氢气完全燃烧需0.5标米<sup>3</sup>氧气或2.38标米<sup>3</sup>空气，燃烧后生成2.88标米<sup>3</sup>烟气。

用上述同样方法，可写出任何碳氢化合物C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>的燃烧反应通式：



已知碳氢化合物的分子式，根据方程式(1-9)就可以求得该碳氢化合物完全燃烧所需的理论空气量。

当燃气组成已知，可按下式计算燃气燃烧所需的理论空气量：

$$V_0 = \frac{1}{21} \left[ 0.5\text{H}_2 + 0.5\text{CO} + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right)\text{C}_m\text{H}_n + 1.5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right] \quad (1-10)$$

式中  $V_0$ ——理论空气需要量(标米<sup>3</sup>干空气/标米<sup>3</sup>干燃气)；

$\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{C}_m\text{H}_n$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ ——燃气中各种可燃组分的容积成分；

$\text{O}_2$ ——燃气中氧的容积成分。

从附录1中看出，燃气的热值越高，燃烧所需理论空气量也越多，因此当已知燃气热值时，其理论空气量还可按以下公式近似计算：

当燃气的低热值小于2500千卡/标米<sup>3</sup>时：

$$V_0 = \frac{0.875}{1000} H_i \quad (1-11)$$

当燃气的低热值大于2500千卡/标米<sup>3</sup>时：

$$V_0 = \frac{1.09}{1000} H_i - 0.25 \quad (1-12)$$

对烷烃类燃气(天然气、石油伴生气、液化石油气)可采用：

$$V_0 = \frac{1.12}{1000} H_i \quad (1-13)$$

$$V_0 = \frac{1.01}{1000} H_i \quad (1-14)$$

## 二、实际空气需要量

如前所述，理论空气需要量是燃气完全燃烧所需的最小空气量。由于燃气与空气存在混合不均匀性，如果在实际燃烧装置中只供给理论空气量，则很难保证燃气与空气的充分混合，因而不能完全燃烧。因此实际供给的空气量应大于理论空气需要量，即要供应一部分过剩空气。过剩空气的存在增加了燃气分子和空气分子碰撞的可能性，增加了其相互作用的机会，从而促使燃烧完全。

实际供给的空气量 $V$ 与理论空气需要量 $V_0$ 之比称为过剩空气系数 $\alpha$ ，即

$$\alpha = \frac{V}{V_0} \quad \text{或} \quad V = \alpha V_0 \quad (1-15)$$

通常  $\alpha > 1$ 。 $\alpha$  值的大小决定于燃气燃烧方法及燃烧设备的运行工况。在工业设备中， $\alpha$  一般控制在 1.05~1.20；在民用燃具中  $\alpha$  一般控制在 1.3~1.8。

在燃烧过程中，正确选择和控制  $\alpha$  是十分重要的， $\alpha$  过小和过大都将导致不良后果；前者使燃料的化学热不能充分发挥，后者使烟气体积增大，炉膛温度降低，增加了排烟热损失，其结果都将使加热设备的热效率下降。因此，先进的燃烧设备应在保证完全燃烧的情况下，尽量使  $\alpha$  值趋近于 1。

### 第三节 完全燃烧产物的计算

#### 一、烟 气 量

燃气燃烧后的产物就是烟气。当只供给理论空气量时，燃气完全燃烧后产生的烟气体积称为理论烟气体积。理论烟气的组分是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。前三种组分合在一起称为干烟气。包括  $\text{H}_2\text{O}$  在内的烟气称为湿烟气。由于在气体分析时  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的含量经常合在一起，而产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的化学反应式也有许多相似之处，因此  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  通常合称为三原子气体，用符号  $\text{RO}_2$  表示。当有过剩空气时，烟气中除上述组分外尚含有过剩空气，这时的烟气体积称为实际烟气体积。如果燃烧不完全，则除上述组分外，烟气中还将出现  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$  等可燃组分。

燃气中各可燃组分单独燃烧后产生的理论烟气体积可通过燃烧反应式来确定，其计算结果列于附录 2 中。

含有 1 标米<sup>3</sup>干燃气的湿燃气完全燃烧后产生的烟气体积，按以下方法计算<sup>①</sup>：

(一) 按燃气组分计算

1. 理论烟气体积 (当  $\alpha = 1$  时)

三原子气体体积

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0.01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m \text{C}_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S}) \quad (1-16)$$

式中  $V_{\text{RO}_2}$ ——三原子气体体积 (标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气)；

$V_{\text{CO}_2}$ 、 $V_{\text{SO}_2}$ ——二氧化碳和二氧化硫的体积 (标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气)

水蒸气体积

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01 \left[ \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \sum \frac{n}{2} \text{C}_m \text{H}_n + 120(d_g + V_0 d_a) \right] \quad (1-17)$$

式中  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ ——理论烟气中水蒸气体积 (标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气)；

$d_a$ ——空气的含湿量 (公斤/标米<sup>3</sup>干空气)。

氮气体积

<sup>①</sup> 在工程上进行燃气燃烧计算时，可以用 1 标米<sup>3</sup>的湿燃气为基准；也可以用含有 1 标米<sup>3</sup>干燃气及  $d$  公斤水蒸气的湿燃气为基准，其中  $d$  为燃气含湿量 (公斤/标米<sup>3</sup>干燃气)。本书基本上采用后一种方法。采用后一种方法的优点是在计算中所用的干燃气成分不随含湿量的变化而变化。含有 1 标米<sup>3</sup>干燃气及  $d$  公斤水蒸气的湿燃气，也常常简称为 1 标米<sup>3</sup>干燃气。因此在本书中凡是用到 1 标米<sup>3</sup>干燃气的场合，按照不同的情况可能有两种不同的含义，一种是指 1 标米<sup>3</sup>真正的干燃气，另一种是指含有 1 标米<sup>3</sup>干燃气的湿燃气，而且在多数场合下是指后一种含义。

$$V_{N_2}^0 = 0.79V_0 + 0.01N_2 \quad (1-18)$$

式中  $V_{N_2}^0$ ——理论烟气中氮气的体积（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

理论烟气总体积

$$V_f^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0 \quad (1-19)$$

式中  $V_f^0$ ——理论烟气量（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

2. 实际烟气量（当  $\alpha > 1$  时）

三原子气体体积  $V_{RO_2}$  仍按式（1-16）计算。

水蒸气体积

$$V_{H_2O} = 0.01 \left[ H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 120(d_g + \alpha V_0 d_a) \right] \quad (1-20)$$

式中  $V_{H_2O}$ ——实际烟气中的水蒸气体积（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

氮气体积

$$V_{N_2} = 0.79\alpha V_0 + 0.01N_2 \quad (1-21)$$

式中  $V_{N_2}$ ——实际烟气中氮气体积（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

过剩氧体积

$$V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)V_0 \quad (1-22)$$

式中  $V_{O_2}$ ——实际烟气中过剩氧体积（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

实际烟气总体积

$$V_f = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (1-23)$$

式中  $V_f$ ——实际烟气量（标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气）。

（二）按热值近似计算

1. 理论烟气量

对烷烃类燃气

$$V_f^0 = \frac{H_f}{1000} + a \quad (1-24)$$

对于天然气， $a = 2$

对于石油伴生气， $a = 2.2$

对于液化石油气， $a = 4.5$

对炼焦煤气

$$V_f^0 = \frac{1.14H_f}{1000} + 0.25 \quad (1-25)$$

对低热值小于3000千卡/标米<sup>3</sup>的燃气

$$V_f^0 = 0.725 \frac{H_f}{1000} + 1.0 \quad (1-26)$$

2. 实际烟气量

$$V_f = V_f^0 + (\alpha - 1)V_0 \quad (1-27)$$

## 二、烟气的重度

在标准状态下烟气的重度可按式计算：

$$\gamma_f^0 = \frac{\gamma_f^0 V_f^0 + 1.293\alpha V_0 + (d_g + \alpha V_0 d_a)}{V_f} \quad (1-28)$$

式中  $\gamma_f^0$ ——标准状态下烟气的重度(公斤/标米<sup>3</sup>)；  
 $\gamma_f^0 r$ ——燃气的重度(公斤/标米<sup>3</sup>干燃气)。

#### 第四节 运行时烟气中的CO含量和过剩空气系数

##### 一、烟气中CO含量的确定

如前所述，当燃气不完全燃烧时，烟气中除含有CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O外，尚有不完全燃烧产物CO、CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>等。由于CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>的含量比CO少得多，因此工程上常将CO的含量视为该烟气中的不完全燃烧产物量。

烟气中的CO含量一般很少，都在1~2%以下，这时用一般烟气分析仪很难测得准确。因此，常根据燃气成分及烟气中三原子气体和过剩氧的含量用计算方法来确定CO量，其计算公式推导如下：

假定燃气的容积成分是

$$\text{H}_2 + \text{CO} + \sum \text{C}_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 100 \quad (1-29)$$

如果实际得到的干烟气容积成分是：

$$\text{CO}_2' + \text{SO}_2' + \text{CO}' + \text{N}_2' + \text{O}_2' = 100 \quad (1-30)$$

式中 CO<sub>2</sub>'、SO<sub>2</sub>'、CO'、N<sub>2</sub>'、O<sub>2</sub>'——干烟气中各组分的容积成分。

则其中的氮是从三个不同来源进入烟气的。一部分随燃烧所需的理论空气进入；一部分随燃气原始组分进入；另一部分随过剩空气进入。因此，燃烧1标米<sup>3</sup>干燃气所得的氮的容积V<sub>N<sub>2</sub></sub>应等于

$$V_{\text{N}_2} = 0.79V_0 + \frac{\text{N}_2}{100} + \frac{V_f^0 r (\text{O}_2' - 0.5\text{CO}')}{100} \frac{79}{21} \quad (1-31)$$

式中 V<sub>N<sub>2</sub></sub>——干烟气中氮的体积(标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气)；

V<sub>f</sub><sup>0</sup>r——燃烧1标米<sup>3</sup>干燃气所得干烟气体积(标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>干燃气)。

因为燃烧1标米<sup>3</sup>干燃气时，所得的三原子气体和一氧化碳的总体积是：

$$V_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}} = \frac{1}{100} (\text{CO} + \sum m \text{C}_m \text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}) \quad (1-32)$$

如以RO<sub>2</sub>' + CO'表示三原子气体和一氧化碳在干烟气中的容积成分，则

$$\text{RO}_2' + \text{CO}' = \frac{V_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}}}{V_f^0 r} 100$$

即

$$V_f^0 r = \frac{100(V_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}})}{\text{RO}_2' + \text{CO}'} \quad (1-33)$$

将式(1-30)中的N<sub>2</sub>'用 $\frac{V_{\text{N}_2}}{V_f^0 r}$ 代替，则

$$\text{RO}_2' + \text{CO}' \frac{V_{\text{N}_2}}{V_f^0 r} 100 + \text{O}_2' = 100 \quad (1-34)$$

将式(1-31)、(1-33)、(1-10)代入式(1-34)中可得：

$$(\text{RO}'_2 + \text{CO}') + \text{O}'_2 + \frac{\text{RO}'_2 + \text{CO}'}{100(\text{V}_{\text{RO}_2} + \text{V}_{\text{CO}})} 100 \left\{ \frac{79}{21} \times \frac{1}{100} [0.5(\text{H}_2 + \text{CO}) + \Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m \text{H}_n + 1.5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2] + \frac{\text{N}_2}{100} \right\} + \frac{79}{21} (\text{O}'_2 - 0.5\text{CO}') = 100$$

将  $(\text{V}_{\text{RO}_2} + \text{V}_{\text{CO}})$  按式 (1-32) 代入, 得

$$0.21(\text{RO}'_2 + \text{CO}') + \text{O}'_2 - 0.395\text{CO}' + (\text{RO}'_2 + \text{CO}') \times \frac{0.395(\text{H}_2 + \text{CO}) + 0.79\Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m \text{H}_n + 1.18\text{H}_2\text{S} - 0.79\text{O}_2 + 0.21\text{N}_2}{\text{CO} + \Sigma m \text{C}_m \text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}} = 21$$

$$\text{令 } \beta = \frac{0.395(\text{H}_2 + \text{CO}) + 0.79\Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m \text{H}_n + 1.18\text{H}_2\text{S} - 0.79\text{O}_2 + 0.21\text{N}_2}{\text{CO} + \Sigma m \text{C}_m \text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}} - 0.79 \quad (1-35)$$

式中  $\beta$ ——燃料特性系数, 它只与燃料的组成有关, 对一定组成的燃料,  $\beta$  为定值。如对天然气  $\beta = 0.75 \sim 0.80$ 。

代入  $\beta$ , 上式可写成:

$$0.21(\text{RO}'_2 + \text{CO}') + \text{O}'_2 - 0.395\text{CO}' + (\text{RO}'_2 + \text{CO}')\beta + 0.79(\text{RO}'_2 + \text{CO}') = 21$$

$$\text{即 } (\text{RO}'_2 + \text{CO}') + \text{O}'_2 - 0.395\text{CO}' + (\text{RO}'_2 + \text{CO}')\beta = 21$$

$$\text{RO}'_2 + 0.605\text{CO}' + \text{O}'_2 + (\text{RO}'_2 + \text{CO}')\beta = 21$$

由此可得出确定  $\text{CO}'$  的公式:

$$\text{CO}' = \frac{21 - \text{O}'_2 - \text{RO}'_2(1 + \beta)}{0.605 + \beta} \quad (1-36)$$

式中  $\text{RO}'_2$  和  $\text{O}'_2$  由烟气分析测定。

当完全燃烧时,  $\text{CO}' = 0$ , 则

$$21 - \text{O}'_2 - \text{RO}'_2(1 + \beta) = 0 \quad (1-37)$$

式 (1-37) 即为燃气完全燃烧的基本方程式, 用此方程式可判别燃烧过程的好坏。

$21 - \text{O}'_2 - \text{RO}'_2(1 + \beta) = 0$  表明燃烧完全;

$21 - \text{O}'_2 - \text{RO}'_2(1 + \beta) > 0$  表明燃烧不完全。

式 (1-37) 还可写成

$$\text{RO}'_2 = \frac{21 - \text{O}'_2}{1 + \beta} \quad (1-38)$$

由式 (1-38) 可知, 烟气中  $\text{RO}'_2$  含量与过剩氧  $\text{O}'_2$  有关, 即与过剩空气系数  $\alpha$  有关。若  $\alpha$  越大,  $\text{RO}'_2$  越小。

只有当完全燃烧 ( $\text{CO}' = 0$ ) 和过剩空气系数  $\alpha = 1$  时 ( $\text{O}'_2 = 0$ ),  $\text{RO}'_2$  才达到最大值, 从式 (1-38) 可得:

$$\text{RO}'_{2\text{max}} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (1-39)$$

从式 (1-39) 不难看出,  $\text{RO}'_{2\text{max}}$  只与燃料的特性系数  $\beta$  有关。当燃料一定时,  $\beta$  为定值, 因此  $\text{RO}'_{2\text{max}}$  也为定值。同时还可以看出,  $\beta > 0$  的燃料的  $\text{RO}'_{2\text{max}}$  小于 21%。

应该指出, 气体燃料不完全燃烧产物除一氧化碳外还有氢和甲烷, 因此式 (1-36) 只是一个近似计算式, 准确的  $\text{CO}'$ 、 $\text{H}'_2$ 、 $\text{CH}'_4$  只能靠气体分析仪测得。

## 二、过剩空气系数的确定

燃气设备工作时，由于各种原因，实际的过剩空气系数常常与设计值不符。过剩空气量的大小直接影响其热效率。因此，必须经常根据烟气分析的结果计算过剩空气系数 $\alpha$ ，及时检查和调节过剩空气量，使其符合燃烧过程的需要。

如前所述，过剩空气系数是实际空气量和理论空气需要量之比，即

$$\alpha = \frac{V}{V_0} = \frac{V}{V - \Delta V} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta V}{V}} \quad (1-40)$$

式中  $\Delta V$ ——过剩空气量（标米<sup>3</sup>干空气/标米<sup>3</sup>干燃气）。

### （一）完全燃烧时过剩空气系数的确定

当完全燃烧时，过剩氧含量 $V_{O_2}$ 可以按干烟气中自由氧的容积成分 $O'_2$ 确定，即

$$V_{O_2} = \frac{O'_2}{100} V_f^{d,r} \quad (1-41)$$

而空气中氧气的容积成分是21%，所以过剩空气量为：

$$\Delta V = \frac{V_{O_2}}{0.21} \quad (1-42)$$

将式（1-41）代入（1-42）中，得

$$\Delta V = \frac{O'_2}{21} V_f^{d,r} \quad (1-43)$$

同时，燃烧所用的实际空气量 $V$ 可以用于烟气中由空气带入的氮含量 $V_{N_2^a}$ 来确定：

$$V_{N_2^a} = \frac{N'_{2a}}{100} V_f^{d,r}$$

式中  $N'_{2a}$ ——干烟气中由空气带入的氮的容积成分。

而空气中氮的容积成分是79%，所以实际空气量为

$$V = \frac{V_{N_2^a}}{0.79} = \frac{N'_{2a}}{79} V_f^{d,r} \quad (1-44)$$

将式（1-43）和式（1-44）代入式（1-40）中得

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\frac{O'_2}{21} V_f^{d,r}}{\frac{N'_{2a}}{79} V_f^{d,r}}} = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O'_2}{N'_{2a}}}$$

或

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{N'_{2a}}} \quad (1-45)$$

式（1-45）中

$$N'_{2a} = N'_2 - N'_{2g}$$

式中  $N'_2$ ——干烟气中氮的总容积成分；

$N'_{2g}$ ——干烟气中由燃气带入的氮的容积成分。



而 
$$N'_{2g} = \frac{V_{N_2g}}{V_f'} \cdot 100 = \frac{N_2 RO'_2}{V_{RO_2} 100}$$

式中  $N_2$ ——干燃气中氮的容积成分。

所以 
$$N'_{2a} = N'_2 - N'_{2g} = N'_2 - \frac{N_2 RO'_2}{V_{RO_2} 100}$$

将上式代入式(1-45)中, 就得到完全燃烧时过剩空气系数的计算公式:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{N'_2 - \frac{N_2 RO'_2}{V_{RO_2} 100}}}$$

将式(1-16)中的  $V_{RO_2}$  值代入上式, 得

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{N'_2 - \frac{RO'_2}{CO_2 + CO + \sum m C_m H_n + H_2 S}}} \quad (1-46)$$

当燃气中氮含量很少时, 可认为  $N'_{2g} \approx 0$ , 则

$$N'_{2a} = N'_2$$

而完全燃烧时干烟气中

$$RO'_2 + O'_2 + N'_2 = 100$$

所以

$$N'_{2a} = 100 - (RO'_2 + O'_2)$$

将上式代入式(1-45)得

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{100 - (RO'_2 + O'_2)}} \quad (1-47)$$

式中的  $RO'_2$  和  $O'_2$  均由烟气分析而得。

此外, 还可以用更简单的近似公式来确定过剩空气系数。

当干烟气中氮的容积成分接近79%时, 可近似假定  $N'_2 \approx 79$ , 则式(1-45)成为

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O'_2} \quad (1-48)$$

将式(1-48)的分子、分母各乘以  $\frac{1}{1+\beta}$ , 可得

$$\alpha \approx \frac{\frac{21}{1+\beta}}{\frac{21 - O'_2}{1+\beta}} = \frac{RO'_{2max}}{RO'_2} \quad (1-49)$$

当燃气一定时,  $RO'_{2max}$  为定值。因此, 只要从烟气分析中得到  $RO'_2$ , 就可以根据式(1-49)简便地估算出过剩空气系数  $\alpha$ 。由式(1-48)则可以根据烟气中的  $O'_2$  估算出过剩空气系数  $\alpha$ 。在炉子运行时只要用气体自动分析仪连续测定烟气中的  $RO'_2$  或  $O'_2$ , 就可连续监视炉内燃烧工况。

## (二) 不完全燃烧时过剩空气系数的确定

不完全燃烧时, 烟气的含氧量就包括过剩空气的氧和由于不完全燃烧而未耗用的氧两部分, 因此过剩空气量为: