



世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

# 燃气燃烧 与燃烧装置

刘蓉 刘文斌 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

免费电子课件

21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

# 燃气燃烧与燃烧装置

主 编 刘 蓉 刘文斌

副主编 赵惠忠

参 编 徐 鹏 郭 全 张 敏



机械工业出版社

本书系统地阐述了燃气燃烧理论、燃烧器及民用燃具设计、燃气在空调及工业炉中的应用等内容。

全书内容密切结合国内外燃气燃烧应用发展的现状，以我国最新的标准、规程和规范为依据，取材面广，反映了当代燃气燃烧装置的科技成就和水平。因此，本书亦可供从事燃气热能利用工作的设计、科研及运行管理人员参考。

本书配有电子课件，免费提供给选用本教材的授课教师。课件索取方式参见书末“信息反馈表”。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

燃气燃烧与燃烧装置/刘蓉, 刘文斌主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 8

(21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材)

ISBN 978-7-111-27542-8

I. 燃… II. ①刘…②刘… III. ①燃料气—燃烧理论—高等学校—教材②燃气设备—高等学校—教材 IV. TE64 TK17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 114542 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘 涛 版式设计: 张世琴 责任校对: 陈延翔

封面设计: 王伟光 责任印制: 邓 博

北京中兴印刷有限公司印刷

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·16.75 印张·322 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-27542-8

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379720

封面无防伪标均为盗版

# 序

建筑环境与设备工程专业是 1998 年教育部新颁布的全国普通高等学校本科专业目录，将原“供热通风与空调工程”专业和“城市燃气供应”专业进行调整、拓宽而组建的新专业。专业的调整不是简单的名称的变化，而是学科科研与技术发展，以及随着经济的发展和人民生活水平的提高，赋予了这个专业新的内涵和新的元素，创造健康、舒适、安全、方便的人居环境是 21 世纪本专业的重要任务。同时，节约能源、保护环境是这个专业及相关产业可持续发展的基本条件，因而它们和建筑环境与设备工程专业的学科科研与技术发展总是密切相关的，不可忽视。

一个新专业的组建及其内涵的定位，首先是由社会需求所决定的，也是和社会经济状况及科学技术的发展水平相关的。我国的经济持续高速发展和大规模建设需要大批高素质的本专业人才，专业的发展和重新定位必然导致培养目标的调整和整个课程体系的改革。培养“厚基础、宽口径、富有创新能力”，符合注册公用设备工程师执业资格，并能与国际接轨的多规格的专业人才以满足需要，是本专业教学改革的目的。

机械工业出版社本着为教学服务，为国家建设事业培养专业技术人才，特别是为培养工程应用型和技术管理型人才作贡献的愿望，积极探索本专业调整和过渡期的教材建设，组织有关院校具有丰富教学经验的教授、副教授编写了这套建筑环境与设备工程专业系列教材。

这套系列教材的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，突出特点是既照顾学科体系的完整，保证学生有坚实的数理科学基础，又重视工程教育，加强工程实践的训练环节，培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力，同时注重加强学生综合能力和素质的培养，以满足 21 世纪我国建设事业对专业人才的要求。

我深信，这套系列教材的出版，将对我国建筑环境与设备工程专业人才的培养产生积极的作用，会为我国建设事业作出一定的贡献。

**陈在康**

# 前 言

“燃气燃烧与燃烧装置”是普通高等学校建筑环境与设备工程本科专业的主要专业课程之一。本书体系主要参照城市燃气热能工程专业教材《燃气燃烧与应用》，系统地阐述了燃气燃烧理论、燃烧器及民用燃具设计、燃气在空调及工业炉中应用等内容，并列举了计算例题。同时还阐述了燃气燃烧的自动控制和安全措施。本书的编写注重理论结合实践，通过本门课程的教学，可培养学生从事燃气燃烧设备的设计、研究、应用管理等方面的能力。

本书根据建筑环境与设备工程本科专业的特点，详细阐述了燃烧器的设计原理，重点介绍了民用燃气燃烧装置的系统构成、应用规范等。本书在保留传统教材理论体系的前提下，根据专业设置的特点作了相应调整：增加了对燃气采暖壁挂锅炉以及燃气空调的介绍，还简单介绍了天然气冷热电三联供的利用形式；在第6章燃气互换性中增加了燃气配气的内容；对燃气燃烧器的节能环保技术作了较系统的介绍；对燃气在工业中的应用仅作了简单介绍，但强调了对工业炉耗气量的计算。

本书内容包括燃气的燃烧计算、燃气燃烧的基本原理、燃气燃烧的气流混合、燃气燃烧方法、燃气燃烧器、燃气互换性、民用燃气用具、燃气空调、燃气工业炉。

本书由北京建筑工程学院刘蓉、华中科技大学刘文斌任主编，上海理工大学赵惠忠任副主编，北京建筑工程学院郭全、徐鹏及上海水产大学张敏参与了编写工作。

全书共分9章，各章分工为：第1章徐鹏、刘蓉；第2章、第3章刘文斌；第4章刘蓉、刘文斌；第5章赵惠忠、刘蓉、张敏；第6章刘文斌、赵惠忠；第7章刘文斌、赵惠忠、郭全；第8章、第9章刘蓉；全书由刘蓉统稿。

本书由重庆大学彭世尼教授、同济大学冯良教授主审。

感谢北京市燃气集团刘燕高级工程师提出的非常宝贵的意见。

感谢对本书编写工作给予过帮助和关心的所有老师和朋友。

本书引用了许多资料(数据、图表、例题、工程设计等),谨向有关文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中错误和不足之处,敬请专家和读者批评指正,编者不胜感谢。

编者

# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 燃气的燃烧计算</b> .....	1
1.1 燃气的热值 .....	1
1.2 燃烧所需空气量 .....	3
1.3 燃烧产物的计算 .....	5
1.4 燃烧运行时烟气中的 CO 含量和过剩空气系数 .....	7
1.5 燃烧温度 .....	12
思考题 .....	20
<b>第 2 章 燃气燃烧的基本原理</b> .....	21
2.1 燃气的着火 .....	21
2.2 燃气的点火 .....	26
2.3 火焰传播 .....	30
2.4 火焰传播浓度极限 .....	42
思考题 .....	43
<b>第 3 章 燃气燃烧的气流混合</b> .....	44
3.1 静止气流中的自由射流 .....	44
3.2 平行气流 .....	49
3.3 相交气流 .....	52
3.4 旋转气流 .....	56
思考题 .....	58
<b>第 4 章 燃气燃烧方法</b> .....	59
4.1 扩散式燃烧 .....	60
4.2 预混式燃烧 .....	65
4.3 燃烧过程的强化与完善 .....	74
思考题 .....	83
<b>第 5 章 燃气燃烧器</b> .....	84
5.1 燃气燃烧器的分类与技术要求 .....	84
5.2 自然引风扩散式燃烧器 .....	85
5.3 鼓风式扩散燃烧器 .....	96
5.4 大气式燃烧器 .....	107
5.5 完全预混式燃烧器 .....	128



5.6 节能环保燃烧技术及装置 .....	142
思考题 .....	157
<b>第6章 燃气互换性</b> .....	158
6.1 燃气互换性和燃气用具适应性 .....	158
6.2 华白数 .....	159
6.3 部分预混火焰特性对燃气互换性的影响 .....	161
6.4 燃气互换性的判定 .....	165
6.5 燃气的配制 .....	169
思考题 .....	171
<b>第7章 民用燃气用具</b> .....	172
7.1 燃气灶具 .....	172
7.2 燃气热水器与采暖炉 .....	174
7.3 民用燃气用具的自动与安全控制装置 .....	188
7.4 民用燃气用具的通风排气 .....	197
7.5 民用燃气用具热工参数的确定 .....	206
7.6 燃气用具的质量标准与检验 .....	210
思考题 .....	213
<b>第8章 燃气空调</b> .....	214
8.1 燃气直燃型吸收式空调 .....	214
8.2 燃气发动机热泵 .....	216
8.3 燃气锅炉 .....	217
8.4 燃气干燥除湿设备 .....	220
8.5 燃气直燃高架式供暖 .....	221
8.6 天然气热电冷联供系统 .....	223
思考题 .....	232
<b>第9章 燃气工业炉</b> .....	233
9.1 燃气工业炉的分类 .....	233
9.2 燃气工业炉的组成 .....	235
9.3 燃气工业炉的耗气量计算 .....	243
思考题 .....	245
<b>附录</b> .....	246
附录 A 各种常用燃气的组成和特性 (0.101325MPa) .....	246
附录 B 一些常用气体的物理、化学和燃烧特性 (0.101325MPa) .....	248
附录 C 气体平均体积定压热容 $c_p$ .....	252
附录 D 城镇燃气试验气 (干气、15℃、0.101325MPa) .....	254
<b>参考文献</b> .....	257

## 第 1 章

# 燃气的燃烧计算

燃烧计算是燃气燃烧与应用的基础，它为工业及民用燃烧设备的设计提供可靠的依据。燃气燃烧计算通常包括三个方面：①确定燃气的热值；②计算燃烧所需的空气量及产生的烟气量；③确定燃烧温度和绘制焓温图。

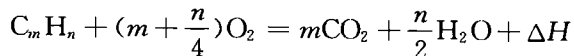
### 1.1 燃气的热值

#### 1.1.1 燃烧及燃烧反应计量方程式

对于气体燃料（俗称燃气）来说，燃烧是指气体中的可燃成分（ $C_mH_n$ 、 $H_2$ 、 $CO$ 等）在一定条件下与  $O_2$  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。

燃烧反应计量方程式是进行燃烧计算的依据。它可以表示出燃烧反应前后，燃气中的各种可燃物质与其燃烧产物之间的量值比例关系。

例如，任何一种形式的碳氢化合物  $C_mH_n$  的燃烧反应方程式都可用下式表示



式中  $\Delta H$ —— $C_mH_n$  完全燃烧后所放出的热量。

#### 1.1.2 燃气热值的确定

$1m^3$  燃气完全燃烧后，其烟气被冷却至初始温度所放出的热量称为该燃气的热值，单位为  $kJ/m^3$ 。对于液化石油气，热值单位也可用  $kJ/kg$ 。

##### 1. 低热值和高热值

由于碳氢化合物  $C_mH_n$  中含 H，所以燃气燃烧有  $H_2O$  产生。根据燃烧烟气中  $H_2O$  的排出状态不同，热值分为高热值和低热值。

低热值——当  $H_2O$  以气体状态排出时，燃烧所放出的热量称之为低热值。

高热值——当  $H_2O$  以凝结水状态排出时，蒸汽中所含的潜热得以释放，此种状态下所放出的热量称之为高热值。

显然，燃气的高热值在数值上大于其低热值，差值为烟气中水的汽化热（汽化潜热）。

在燃烧设备中，烟气中的水蒸气通常是以气体状态排出的，因此实际工程中经常用到的是燃气的低热值。有时为了进一步利用烟气中的热量，把烟气冷却至其露点温度以下使水蒸气冷凝液化，这时可用到燃气的高热值，例如冷凝锅炉。

## 2. 热值计算

在此特别说明，本教材以  $15^\circ\text{C}$ 、 $0.101325\text{MPa}$  为计算基准状态，以下简称基态。没有特别说明的与体积相关的参数值均为基态的值，体积单位为  $\text{m}^3$ 。标准状态特指  $0^\circ\text{C}$ 、 $0.101325\text{MPa}$  的状态。

单一可燃气体的热值参见附录 B。

实际使用的燃气通常是含有多种可燃组分的混合气体。混合气体的热值可以直接用实验的方法测定，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

$$H = 0.01 \times (H_1 r_1 + H_2 r_2 + \cdots + H_n r_n) \quad (1-1)$$

式中  $H$ ——燃气（混合气体）的高热值或低热值 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )；

$H_1, H_2, \cdots, H_n$ ——燃气中各可燃组分的高热值或低热值 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )；

$r_1, r_2, \cdots, r_n$ ——燃气中各可燃组分的体积分数 (%)。

## 3. 热值的换算

### 1) 干燃气的高热值与低热值的换算

$$H_n^{\text{H}} = H_n^{\text{L}} + 18.57(r_{\text{H}_2} + \sum \frac{n}{2} r_{\text{C}_m\text{H}_n} + r_{\text{H}_2\text{S}}) \quad (1-2)$$

式中  $H_n^{\text{H}}$ ——干燃气的高热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ (干燃气)]；

$H_n^{\text{L}}$ ——干燃气的低热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ (干燃气)]；

$r_{\text{H}_2}$ 、 $r_{\text{C}_m\text{H}_n}$ 、 $r_{\text{H}_2\text{S}}$ —— $\text{H}_2$ 、 $\text{C}_m\text{H}_n$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  在干燃气中的体积分数 (%)；

18.57——水在基态下的汽化热 ( $\times 10^2 \text{kJ}/\text{m}^3$ )。

### 2) 湿燃气的高热值与低热值的换算

$$H_n^{\text{H}} = H_n^{\text{L}} + \left[ 18.57 \times (r_{\text{H}_2} + \sum \frac{n}{2} r_{\text{C}_m\text{H}_n} + r_{\text{H}_2\text{S}}) + 2353d_g \right] \frac{0.79}{0.79 + d_g} \quad (1-3)$$

式中  $H_n^{\text{H}}$ ——湿燃气的高热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ (干燃气)]；

$H_n^{\text{L}}$ ——湿燃气的低热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ (干燃气)]；

$d_g$ ——燃气的含湿量 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ (干燃气)]；

0.79——水蒸气在基态下的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

2353——水的汽化热 (kJ/kg)。

3) 干燃气的低热值与湿燃气的低热值的换算

$$H_v^w = H_v^d \frac{0.79}{0.79 + d_g} \quad (1-4)$$

4) 干燃气的高热值与湿燃气的高热值的换算

$$H_n^w = (H_n^d + 2353d_g) \frac{0.79}{0.79 + d_g} \quad (1-5)$$

## 1.2 燃烧所需空气量

燃烧所需的  $O_2$  一般是从小空气中直接获得的。若不考虑空气中含有少量  $CO_2$  和其他稀有气体, 干空气的体积分数可按  $O_2$  为 21%、 $N_2$  为 79% 计算。在燃气的燃烧过程中要供给适量的空气, 过多或过少都会对燃烧产生不利影响。

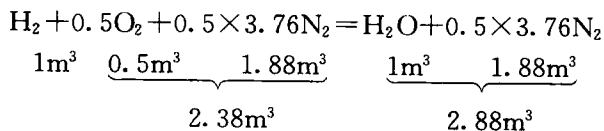
### 1.2.1 理论空气需要量

理论空气需要量是指按燃烧反应计量方程式, 每  $m^3$  (或 kg) 燃气完全燃烧所需的空气量, 是燃气完全燃烧所需的最少空气量。

干空气中  $N_2$  与  $O_2$  的容积比为

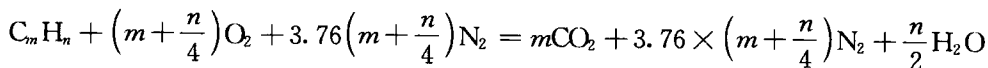
$$\frac{r_{N_2}}{r_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3.76$$

各单一可燃气体燃烧所需的理论空气量可按附录 B 所列的燃烧反应式确定, 其值可按该表查出。例如,  $H_2$  的燃烧反应式为



在近似假定各种气体的 kmol 容积相等的前提下, 由以上反应式可见,  $1m^3 H_2$  完全燃烧需同样温度压力状态的  $0.5m^3 O_2$  或  $2.38m^3$  空气, 燃烧后生成烟气换算到同一状态的值为  $2.88m^3$ 。特别说明, 采用  $m^3/m^3$  单位的参数, 其中所涉及的气体状态均换算到同一计算状态, 则该比例值不随温度变化。

用上述同样方法, 可写出任何碳氢化合物  $C_m H_n$  的燃烧反应通式



已知  $C_m H_n$  的分子式, 就可以求得该  $C_m H_n$  完全燃烧所需的理论空气量。

对于混合燃气, 当燃气组分已知时, 可按下式计算燃气燃烧所需的理论空气量

$$V_0 = \frac{1}{21} \left[ 0.5r_{H_2} + 0.5r_{CO} + \Sigma(m + \frac{n}{4})r_{C_mH_n} + 1.5r_{H_2S} - r_{O_2} \right] \quad (1-6)$$

式中  $V_0$ ——理论空气需要量 [ $m^3$ (干空气)/ $m^3$ (干燃气)];  
 $r_{H_2}$ 、 $r_{CO}$ 、 $r_{C_mH_n}$ 、 $r_{H_2S}$ 、 $r_{O_2}$ ——燃气中  $H_2$ 、 $CO$ 、 $C_mH_n$ 、 $H_2S$ 、 $O_2$  的体积分数 (%)。

一般情况下, 燃气的热值越高, 燃烧所需的理论空气量就越多。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  $11077\text{kJ}/\text{m}^3$  时

$$V_0 = \frac{0.22}{1000} H_l \quad (1-7)$$

当燃气的低热值大于  $11077\text{kJ}/\text{m}^3$  时

$$V_0 = \frac{0.274}{1000} H_l - 0.25 \quad (1-8)$$

对烷烃类燃气 (天然气、石油伴生气、液化石油气) 可采用

$$V_0 = \frac{0.283}{1000} H_l \quad (1-9)$$

$$V_0 = \frac{0.253}{1000} H_h \quad (1-10)$$

式中  $H_l$ 、 $H_h$ ——燃气 (混合气体) 的低热值和高热值 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )。

### 1.2.2 实际空气需要量

由于燃气与空气的混合很难达到完全均匀, 如果在实际燃烧装置中只供给理论空气量, 则很难保证在有限的时间内燃气与空气的充分接触, 不能做到完全燃烧。因此, 实际供给的空气量一般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与空气分子接触的机会, 也增加了其相互作用的机会, 从而促使其燃烧完全。

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

$$\alpha = \frac{V}{V_0} \quad (1-11)$$

式中  $V$ ——实际空气需要量 [ $m^3$ (干空气)/ $m^3$ (干燃气)]。

在燃烧过程中, 正确选择和控制  $\alpha$  值的大小是十分重要的,  $\alpha$  过小或过大都会导致不良后果:  $\alpha$  过小会导致不完全燃烧, 造成能源浪费和环境污染;  $\alpha$  过大则使烟气体积增大, 炉膛温度与烟气温度降低, 导致换热设备换热效率降低与排烟热损失增大, 同样造成能源浪费。因此, 先进的燃烧设备一般在保证完全燃烧的前提下, 尽量使  $\alpha$  值趋近于 1。而随时掌握燃烧设备的  $\alpha$  值又是监测燃烧器具运行工况的重要手段。

实际上,  $\alpha$  的取值决定于所采用的燃烧方法及燃烧设备的运行状况。在工业设备中,  $\alpha$  值一般控制在 1.05~1.20; 在民用燃气用具中,  $\alpha$  值一般控制在 1.3~1.8。

### 1.3 燃烧产物的计算

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。理论烟气的组分有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$ 。一些燃料中含有一定的 S, 则在它们的燃烧产物中还含有  $\text{SO}_2$ 。由于在进行气体分析时,  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的含量经常合在一起, 而  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的计量方程式也有许多相似之处, 因此通常将  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  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还含有  $\text{O}_2$ , 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。

#### 1.3.1 理论烟气体积 ( $\alpha=1$ 时)

理论烟气体积可根据燃气燃烧反应计量方程式计算, 也可根据燃气热值近似计算。

##### 1. 按燃气组分计算

在已知燃气组分时可根据燃气燃烧反应计量方程式计算理论烟气体积。

##### (1) $\text{RO}_2$ 体积

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0.01 \times (r_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}} + \sum n r_{\text{C}_m\text{H}_n} + r_{\text{H}_2\text{S}}) \quad (1-12)$$

式中  $V_{\text{RO}_2}$  ——  $\text{RO}_2$  体积 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ (干燃气)];

$r_{\text{CO}_2}$ 、 $r_{\text{CO}}$ 、 $r_{\text{C}_m\text{H}_n}$ 、 $r_{\text{H}_2\text{S}}$  —— 燃气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{C}_m\text{H}_n$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  的体积分数 (%);

$V_{\text{CO}_2}$ 、 $V_{\text{SO}_2}$  ——  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的体积 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ (干燃气)]。

##### (2) 水蒸气体积

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01 \times [r_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{S}} + \sum \frac{n}{2} r_{\text{C}_m\text{H}_n} + 126.6 \times (d_g + V_0 d_a)] \quad (1-13)$$

式中  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$  —— 理论烟气中水蒸气的体积 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ (干燃气)];

$d_a$ 、 $d_g$  —— 空气、燃气的含湿量 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ (干空气)];

$r_{\text{H}_2}$  —— 燃气中  $\text{H}_2$  的体积分数 (%);

126.6 —— 水蒸气在基态的比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

##### (3) $\text{N}_2$ 体积

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79V_0 + 0.01r_{\text{N}_2} \quad (1-14)$$

式中  $V_{N_2}^0$ ——理论烟气中  $N_2$  的体积 [ $m^3/m^3$ (干燃气)];

$r_{N_2}$ ——燃气中  $N_2$  的体积分数 (%)。

(4) 理论烟气总体积

$$V_f^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0 \quad (1-15)$$

式中  $V_f^0$ ——理论烟气量 [ $m^3/m^3$ (干燃气)]。

2. 按燃气热值近似计算

对烷烃类燃气

$$V_f^0 = \frac{0.252H_1}{1000} + \alpha \quad (1-16)$$

其中, 天然气,  $\alpha=2$ ; 石油伴生气,  $\alpha=2.2$ ; 液化石油气,  $\alpha=4.5$ 。

对炼焦煤气

$$V_f^0 = \frac{0.287H_1}{1000} + 0.25 \quad (1-17)$$

对低热值小于  $13293\text{kJ}/m^3$  的燃气

$$V_f^0 = \frac{0.183H_1}{1000} + 1.0 \quad (1-18)$$

### 1.3.2 实际烟气量 ( $\alpha>1$ 时)

$RO_2$  体积与过剩空气无关, 所以体积量不变。

水蒸气体积增加了过剩空气带入的  $H_2O$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 1.266 \times (\alpha - 1)V_0 d_a \quad (1-19)$$

$N_2$  体积也增加了过剩空气带入的  $N_2$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0.79 \times (\alpha - 1)V_0 \quad (1-20)$$

实际烟气中存在  $O_2$ , 其体积为

$$V_{O_2} = 0.21 \times (\alpha - 1)V_0 \quad (1-21)$$

实际烟气总体积为

$$V_f = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (1-22)$$

如果忽略过剩空气带入的  $H_2O$ , 则实际烟气量还可根据下式计算

$$V_f = V_f^0 + (\alpha - 1)V_0 \quad (1-23)$$

### 1.3.3 烟气的密度

$$\rho_i = \frac{\rho_g^{dr} + 1.226\alpha V_0 + (d_g + \alpha V_0 d_a)}{V_f} \quad (1-24)$$

式中  $\rho_i$ 、 $\rho_g^{dr}$ ——烟气、干燃气的密度 ( $\text{kg}/m^3$ );

- $d_g$ 、 $d_a$ ——燃气、空气的含湿量 [kg/m<sup>3</sup>(干空气)];  
1.226——空气在基态时的密度 (kg/m<sup>3</sup>)。

## 1.4 燃烧运行时烟气中的 CO 含量和过剩空气系数

### 1.4.1 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,需采用微量气体分析仪才能准确地测得,有时也可以根据燃气成分及烟气中三原子气体和过剩 O<sub>2</sub> 的含量用计算方法来确定 CO 量,其计算公式推导如下:

假定燃气的体积分数是

$$r_{H_2} + r_{CO} + \sum r_{C_m H_n} + r_{H_2 S} + r_{O_2} + r_{CO_2} + r_{N_2} = 100 \quad (1-25)$$

如果实际得到的干烟气体积分数是

$$r_{CO_2}' + r_{SO_2}' + r_{CO}' + r_{N_2}' + r_{O_2}' = 100 \quad (1-26)$$

式中  $r_{CO_2}'$ 、 $r_{SO_2}'$ 、 $r_{CO}'$ 、 $r_{N_2}'$ 、 $r_{O_2}'$ ——干烟气中 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的体积分数 (%)。

其中的 N<sub>2</sub> 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 1m<sup>3</sup> 干燃气所得的 N<sub>2</sub> 的容积  $V_{N_2}$  应为

$$V_{N_2} = 0.79V_0 + \frac{r_{N_2}}{100} + \frac{V_f^{dr}(r_{O_2}' - 0.5r_{CO}')}{100} \frac{79}{21} \quad (1-27)$$

式中  $V_{N_2}$ ——干烟气中 N<sub>2</sub> 的体积 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(干燃气)];

$V_f^{dr}$ ——燃烧 1m<sup>3</sup> 干燃气所得干烟气体积 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(干燃气)]。

因为燃烧 1m<sup>3</sup> 干燃气时,所得的三原子气体和 CO<sub>2</sub> 的总体积是

$$V_{RO_2} + V_{CO} = \frac{1}{100}(r_{CO} + \sum m r_{C_m H_n} + r_{CO_2} + r_{H_2 S}) \quad (1-28)$$

如以  $r_{RO_2}' + r_{CO}'$  表示三原子气体和 CO 在干烟气中的体积分数,则

$$r_{RO_2}' + r_{CO}' = \frac{V_{RO_2} + V_{CO}}{V_f^{dr}} 100$$

即

$$V_f^{dr} = \frac{100(V_{RO_2} + V_{CO})}{r_{RO_2}' + r_{CO}'} \quad (1-29)$$



将式 (1-26) 中的  $r_{N_2}'$  用  $\frac{V_{N_2}}{V_f^{dr}}$  代替, 则

$$r_{RO_2}' + r_{CO}' + \frac{V_{N_2}}{V_f^{dr}} 100 + r_{O_2}' = 100 \quad (1-30)$$

将式 (1-27)、式 (1-29)、式 (1-6) 代入式 (1-30) 中可得

$$(r_{RO_2}' + r_{CO}') + r_{O_2}' + \frac{r_{RO_2}' + r_{CO}'}{100 \times (V_{RO_2} + V_{CO})} 100 \left\{ \frac{79}{21} \times \frac{1}{100} \times \left[ 0.5 \times (r_{H_2} + r_{CO}) + \Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) r_{C_m H_n} + 1.5 r_{H_2 S} - r_{O_2} \right] + \frac{r_{N_2}}{100} \right\} + \frac{79}{21} \times (r_{O_2}' - 0.5 r_{CO}') = 100$$

将  $(V_{RO_2} + V_{CO})$  按式 (1-28) 代入, 得

$$\frac{0.21 \times (r_{RO_2}' + r_{CO}') + r_{O_2}' - 0.395 r_{CO}' + (r_{RO_2}' + r_{CO}') \times 0.395 \times (r_{H_2} + r_{CO}) + 0.79 \Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) r_{C_m H_n} + 1.18 r_{H_2 S} - 0.79 r_{O_2}' + 0.21 r_{N_2}}{r_{CO} + \Sigma m r_{C_m H_n} + r_{CO_2} + r_{H_2 S}} = 21$$

令  $\beta =$

$$\frac{0.395 \times (r_{H_2} + r_{CO}) + 0.79 \Sigma \left( m + \frac{n}{4} \right) r_{C_m H_n} + 1.18 r_{H_2 S} - 0.79 r_{O_2}' + 0.21 r_{N_2}}{r_{CO} + \Sigma m r_{C_m H_n} + r_{CO_2} + r_{H_2 S}} - 0.79 \quad (1-31)$$

式中  $\beta$  —— 燃烧特性系数, 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  $\beta=0.75 \sim 0.8$ ; 对液化石油气  $\beta=0.5$ ; 对炼焦煤气  $\beta=0.98$ 。

代入  $\beta$ , 式 (1-31) 可写成

$$0.21 \times (r_{RO_2}' + r_{CO}') + r_{O_2}' - 0.395 r_{CO}' + (r_{RO_2}' + r_{CO}') \beta + 0.79 \times (r_{RO_2}' + r_{CO}') = 21$$

$$\text{即 } (r_{RO_2}' + r_{CO}') + r_{O_2}' - 0.395 r_{CO}' + (r_{RO_2}' + r_{CO}') \beta = 21$$

由此可得出确定  $r_{CO}'$  的公式

$$r_{CO}' = \frac{21 - r_{O_2}' - r_{RO_2}'(1 + \beta)}{0.605 + \beta} \quad (1-32)$$

式中  $r_{RO_2}'$  和  $r_{O_2}'$  由烟气分析测定。

当完全燃烧时,  $r_{CO}'=0$ , 则

$$21 - r_{O_2}' - r_{RO_2}'(1 + \beta) = 0 \quad (1-33)$$

式 (1-33) 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。