



# 燃气燃烧 与 应用技术基础

全国公用事业职工中专城市燃气工程专业教材编写组编

科学出版社

# 燃气燃烧与应用技术基础

全国公用事业职工中专城市燃气工程专业教材编写组 编

科学出版社

1993

**(京)新登字 092 号**

### **内 容 简 介**

本书系统地介绍了燃气燃烧及燃具设备的技术要求、使用、保养、点火、安全、自控装置等方面的基础理论和应用技术。

本书除可供中等专业学校燃气工程专业作教材外，还可供燃气专业的工程技术人员、管理人员参考。

### **燃气燃烧与应用技术基础**

全国公用事业职工中专城市燃气工程专业教材编写组 编

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京市黄城根北街16号

邮政编码：100717

王桥印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1993年6月第 一 版 开本 787×1092 1/16

1993年6月第一次印刷 印张 12 1/2

印数 1—8000 字数 287 000

书号ISBN 7-03-003798-7/TE·3

**定价：7.40 元**

## 编写委员会成员

高逢友 浦风苹 叶连生 陈国才 葛学良 刘以成  
孙振峰 刘宝立 陆可云 贾青良 薛恩连

# 前 言

随着我国城市燃气事业的发展,各地燃气管理部门及生产、输配、应用单位迫切需要城市燃气工程专业方面的人才,为此各省、市的公用事业管理部门及各大城市的燃气公司都相继建立了职工中等专业学校,设置了城市燃气工程专业。各校在教学过程中普遍感到因专业教材的缺乏,影响了教学质量的提高,故编撰一套适用于职工中专的城市燃气工程专业的教材已成燃眉之急。

在建设部教育司的支持和关心下,由北京、天津、沈阳、上海、成都等煤气公司的职工中专学校组成的全国公用事业职工中专城市燃气工程专业教材编写组,历经四年,完成了《燃气生产与净化基础》、《燃气输配基础》、《燃气燃烧与应用技术基础》等三本专业课教材的编写工作。

本套教材根据全国公用事业职工中专城市燃气工程专业的教学计划、教学大纲的要求,结合全国各地煤气公司的实际情况,收集了近年来各地煤气公司在科研开发、技术改造方面的成果与经验,内容紧密联系生产实际,不仅可以作为职工中专教材,还可作为岗位培训教材,同时又可供城市燃气工程管理人员及技术人员参考。

本套教材的每一章都附有一定数量的思考题。教材编写组还将进一步完善有关教学参考资料和教学录像片,以供配套使用。本套教材在编写过程中得到了全国各地煤气公司领导及专家的大力支持与协助,特在此表示衷心感谢。

本书由叶连生主编,参加编写的人员还有刘宗伦、田申、丁强、曹文轩、秦贵森、王汉卿、徐裕秋。全书由李家骏、席德粹、陆慧英、唐曾乐主审。

编写职工中专城市燃气工程专业教材在国内尚属首次,碍于经验不足,水平有限,本教材中难免出现纰漏,恳请读者在试用中予以批评指正。

# 目 录

绪 论 .....	1
第一章 燃气的燃烧 .....	5
第一节 燃气的状态和热值 .....	5
第二节 燃烧所需空气量及燃烧产物 .....	7
第三节 燃气的燃烧温度 .....	13
第四节 燃气的着火及爆炸极限 .....	14
第五节 燃气燃烧的火焰传播 .....	17
第二章 燃烧方法与燃烧器 .....	24
第一节 概述 .....	24
第二节 扩散式燃烧 .....	26
第三节 扩散式燃烧器 .....	31
第四节 大气式燃烧 .....	47
第五节 大气式燃烧器 .....	52
第六节 完全预混式燃烧 .....	66
第七节 完全预混式燃烧器 .....	67
第三章 民用燃气用具 .....	71
第一节 燃气炊事用具 .....	71
第二节 燃气沸水器及其它燃气用具 .....	91
第三节 燃气热水器 .....	99
第四节 民用燃具的检验与使用 .....	112
第五节 民用燃具的故障及维修 .....	120
第六节 民用燃具对制作材料的要求 .....	125
第七节 民用燃具的烟气排除 .....	127
第四章 燃气工业炉及余热利用 .....	136
第一节 燃气工业炉 .....	136
第二节 燃气工业炉的热平衡及热效率 .....	147
第三节 燃气工业炉的余热利用 .....	153
第四节 燃气工业炉的运行管理 .....	159
第五章 燃气的互换及置换 .....	161
第一节 燃气的互换性和燃具的适应性 .....	161
第二节 燃气互换性的判别方法 .....	162
第三节 燃气的置换 .....	164
第六章 燃气燃烧的自动控制及安全运行管理 .....	167
第一节 燃烧自动与安全控制的内容和意义 .....	167
第二节 燃烧设备的点火方式 .....	168

第三节 自动及安全控制 .....	170
第四节 安全运行管理 .....	176
附 录 .....	183
参考文献 .....	194





工厂、家庭和街灯照明。美国的第一家煤气公司是巴铁摩尔煤气照明公司，于1817年开始正式供气，把煤气送到当地一条街道上作街灯照明。随后，德国、法国、俄国和比利时等国也相继发展煤气工业，开始都用于照明。我国的第一家煤气企业是上海市煤气公司，于1865年开始供应煤气，主要供街道照明。根据清朝同治年间的兵部候补员外郎张德彝所著《随使法国记》一书第34页所述，他在赴法途中，于清同治九年庚午(1870年)10月23日晚在上海停留期间见“江岸煤气灯密列成行，映于水面，如珊瑚大柱，撑于水晶之中，可观之至”。这足以证明，当时上海市的煤气照明已具有相当大的规模。

19世纪初，对煤气燃烧器也作了大量试验和研究。1825年英国人斯托纳(Stonal)发明街灯式燃烧器；1829年马莱特取得鼓风式燃烧器的第一个专利。开始时，这些燃

烧器的热效率低，照明亮度不够，火焰变化多端，使用效果不好。1855年德国科学家发明了至今仍负盛名的本生(Bunsen)灯，首次应用燃气引射助燃空气，使燃烧所需一部分空气在混合管内先与燃气混合，再送到燃烧器头部去燃烧，这也就是现在众所周知的大气式燃烧器。这一发明对当时的燃烧技术产生了决定性的影响。用这一基本原理研制成的各种煤气燃烧器，至今仍广泛用于实验室、学校、企业以及日常生活的燃烧器具上。本生灯原理如图0-3所示。

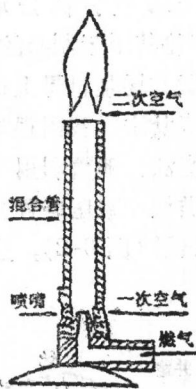


图0-3 本生灯原理示意图

由于爱迪生发明了电灯，特别是他在1879年制成功白炽电灯泡后，煤气在照明领域和电力经过一番激烈的竞争，终于败下阵来，转而又去开辟新市场。第一台煤气灶具是英国人J.夏普(Sharp)于1826年发明的，他在自己家中试验把煤气用于烹调取得成功。但真正得到应用的煤气灶是在1851年由美国一家工厂正式制造出的，那以后煤气

灶才得到普遍推广使用。快速热水器是英国人莫汉(Morham)于1868年发明的。图0-4为英国在1875年制造并得到应用的煤气双眼灶。

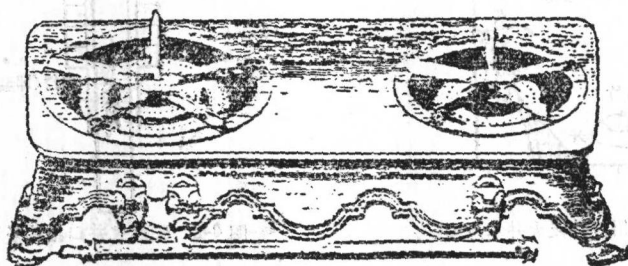


图0-4 英国19世纪的民用双眼灶

19世纪末20世纪初，本生类型的燃烧器已得到广泛应用。煤气已从主要用于照明，逐步转向烹调、供热水和采暖。煤气用于照明主要是靠燃气燃烧时的亮度，而用于供加热就要求燃气有尽可能高的单位发热量。随着供气规模日益扩大、制气技术提高，气源也相应增多。用煤作原料制的气有水平炉煤气、直立炉煤气、焦炉气、水煤气和发生炉煤气等。各种煤气成分不一，单位发热量和相对密度也有很大差别。一座城市若有多种气源就会

引起混气问题。在相当长的一段时间里，人们误认为只要混合后的燃气热值与原来的燃气热值大致相同就可以满足互换的要求。实践证明，这样做并不成功。1926年意大利人华白(Wobbe)提出著名的华白数，用燃气的热值和相对密度之间的关系来表达燃气的互换性，即

$$\text{华白数} = \frac{\text{燃气高热值}}{\sqrt{\text{燃气相对密度}}}$$

一般认为，两种不同燃气的华白数差别在 $\pm 5\%$ 情况下是可以互换的。

随着气源类型逐渐增多，燃气成分变化范围日益扩大和复杂，因而只用华白数还不能满足燃气互换的要求。特别是人工煤气和天然气、液化石油气，除热值相差很大以外，其燃烧速度也相距甚远。从本世纪20年代后期起一些国家进一步展开了系统的燃气互换性研究，同时对燃烧器在其燃气成分改变时的适应能力也展开了研究。

美国煤气协会在1947~1951年发表了很多有关燃气互换性的研究报告。长期以来，美国燃气工业主要以天然气为主。所用AGA指数算法，即用离焰、回火和黄焰三个指数作为判定指标，是以天然气作为基准燃气，根据大量实验数据整理研究而取得的，适用于天然气的互换性研究。50年代到60年代，法国煤气公司长期系统研究燃气互换性，所用方法就是著名的德尔布法。英国、德国、荷兰等国也在这方面进行过大量研究工作。70年代以来美国及其它国家应用计算机处理大量实验数据，得到更为完善的结果。

一些燃气专家认为只用华白数已不能控制燃气的互换性，提出采用燃烧速度指数(OP)和华白数(W)来控制燃气的互换性。80年代起我国不少专家和学者也采用此法，并列出了各种燃气的华白数和燃烧速度指数，以供研究和解决燃气互换的问题。

## 二、燃气燃烧技术的发展

燃气燃烧器具也随着燃气工业的发展而日新月异，新颖、实用、热效率高而且美观的设备不胜枚举，特别是工业和商业用的燃烧设施更引人注目。现将有关情况简述如下：

(1) 平焰燃烧技术起始于60年代，它与直焰燃烧相比加热更均匀，平面火焰可附着炉墙铺展，不会直冲受热工件而导致局部过热，并具有均匀的温度场，可提高加热质量和速度，与一般燃烧器相比，可节省燃气约20~40%。我国在70年代末也将不少工业炉改用平焰燃烧器，并取得良好效果。

(2) 浸没燃烧技术是英国人科利尔(Collier)于1889年发明的，但直到第二次世界大战期间美国才开始使用，欧洲和日本是在50年代开始应用于工业生产。该法是将燃气和空气预先充分混合送入燃烧室进行完全燃烧，之后使高温烟气喷入液体中以直接接触方式传热，其热效率可高达95%以上。它适用于液体加热。

(3) 催化无焰燃烧是由法国人吕米尔(Lumier)和埃尔克(Herck)于1916年前后发明的，于60和70年代在美国、德国、法国、英国和日本得到推广使用，70年代后期在我国也逐步得到发展。这种燃烧技术是可燃气体在固体催化剂上燃烧，用于工业生产，如烘烤油漆涂层使之干燥和固化等。它还广泛用于木材、树脂和纤维织品以及摄影胶片的干燥，还可供采暖用。

(4) 高速燃烧于本世纪 60 年代初在美、英、法等国试验成功并开始推广使用, 70 年代德国、日本等也相继研制使用。我国于 70 年代开始对其进行研制, 并应用于工业生产。高速燃烧可利用高温烟气在高速下直接吹向物料表面, 可提高对流传热量, 热效率高, 适用于黑色和有色金属的热加工。

(5) 脉冲燃烧是英国煤气公司华生研究所研制开发的高效燃具, 以一燃烧室来代替烧嘴。在脉冲燃烧器中, 燃烧和热量释放是周期性进行的, 所产生的压力波以燃烧振荡的频率引起较高的声级, 它正是利用压力波的能量来引射助燃空气和排出燃烧产物。目前脉冲燃烧器由于其结构简单、燃烧强度高、排气速度的波动使对流传热系数提高, 可减少传热表面, 已用于工业部门。

(6) 燃料电池近年来在许多工业化国家得到研制。其基本原理与电解水的逆反应相同, 即使氢气和氧气发生反应生成电和水, 只要连续供给原料(天然气和空气), 就可持续供电, 故实际上是一种新型发电装置。目前根据电解质种类大体上分为三类。磷酸型为第一代燃料电池, 预期再过几年可投放市场。另有熔融碳酸盐型和固体电解质型, 属于高温条件下工作的燃料电池, 特点是发电效率高, 但技术上尚未过关, 目前世界各国正进行深入研究。

### 三、我国城镇燃气事业的基本情况

1949 年前我国城镇燃气事业非常落后, 城镇燃气的最高生产水平的年产量只有  $3970 \times 10^4 \text{m}^3$ , 用气人口只有 26.8 万, 当时只有上海市和东北三省几座城镇有煤制气的工厂。在上海市是为外国人和国内少数达官贵人服务的, 而在东北三省则是为日本军国主义的殖民统治者服务的。一般平民百姓无力问津。

中华人民共和国成立后, 相继在一些大中型城镇开始发展燃气事业。特别是 1979 年改革开放以来, 城镇燃气事业飞速发展, 欣欣向荣。截止 1990 年年底, 全国市级以上城市共有 434 座, 有燃气供应的城市就有 191 座, 另外还有 85 座县城也有较小规模的燃气设施。全国共有燃气企业 269 家, 从事燃气事业的职工总数已达 10 多万。全国的燃气用户已有 1231.1 万, 其中民用户为 1210.0 万, 工业用户为 2.8 万, 福利用户为 9.8 万, 其它用户为 8.5 万。输配管道合计达  $2.12 \times 10^4 \text{km}$ 。居民用户超过 10 万的城市已有 27 座。用户数超过 100 万的只有上海、北京和天津三城市。

目前我国城市燃气的发展前景越来越好。不少已具有相当规模的城市正在扩大生产和供气规模, 原来没有燃气设施的城市正在筹建燃气生产、输配系统工程。利用燃气代替固体燃料不仅能够节约能源、提高热效率, 还能提高产品质量及数量, 改善劳动强度, 减轻城市交通运输负担, 保护城市环境, 防止大气污染, 为人民创造优美的生活环境。现代化城市的重要标志之一, 即城市燃气化。在“八五”和“九五”期间, 我国的城镇燃气事业必将有飞跃的发展。

# 第一章 燃气的燃烧

## 第一节 燃气的状态和热值

### 一、燃气的状态

城市居民和工业企业用燃气一般都是可燃气体和不可燃气体的混合气。其可燃气体有氢、一氧化碳、甲烷和碳氢化合物；不可燃气体有氮、氧和二氧化碳。此外，还有少量混杂气体和微量杂质，如水蒸气、硫化氢、焦油、氨、萘和灰尘等。

燃气按照其来源和生产方法，一般分为人工燃气、液化石油气、天然气和沼气四类。人工燃气有焦炉煤气、发生炉煤气、油制气等几种。天然气包括纯天然气、石油伴生气、凝析气田气和矿井气等。

由于燃气通常含有水蒸气，工作状态(指燃气的压力、温度和体积)也不同，所以我们规定以温度为 273.15K、压力为 101325Pa 的干燥气体作为物理标准状态，该标准状态下的体积称为物理标准体积。本教材以后所用体积均指该状态下体积，用符号  $m^3(n)$  表示。

燃气含有水蒸气时，称为湿燃气。干、湿燃气体积组分的换算公式为

$$y_i^w = ky_i \quad (1-1)$$

$$k = \frac{0.833}{0.833 + d_w} \quad (1-2)$$

式中， $y_i^w$  为湿燃气中各组分容积成分(体积%)； $y_i$  为干燃气中各组分容积成分(体积%)； $k$  为干、湿燃气的换算系数； $d_w$  为湿燃气的含湿量[ $kg(\text{水})/m^3(n)$ 干燃气]；0.833 为水蒸气的密度[ $kg/m^3(n)$ ]。

因为燃气的工作状态各不相同，进行计算时需把燃气的体积换算成标准体积。由理想气体状态方程  $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$  可得换算公式

$$V_0 = V \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P}{101325} \quad (1-3)$$

若考虑水蒸气在燃气中的压力，则公式变为

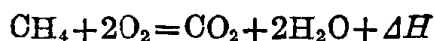
$$V_0 = V \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P - \varphi P_s}{101325} \quad (1-4)$$

式中， $V_0$  为燃气在标准状态下的体积[ $m^3(n)$ ]； $V$  为燃气在工作状态下的体积( $m^3$ )； $t$  为燃气在工作状态下的温度( $^{\circ}C$ )； $P$  为燃气的绝对压力(Pa)； $\varphi$  为水蒸气饱和度，或称燃气相对湿度，对湿燃气一般取  $\varphi = 1.0$ ； $P_s$  为与燃气温度相同时的水蒸气饱和压力(Pa)。

### 二、燃气的燃烧条件和热值

燃气的燃烧是指燃气中的可燃组分(如  $H_2$ 、 $CO$ 、 $C_mH_n$  和  $H_2S$  等)在一定条件下与(空气中的)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。

以甲烷为例,与氧的燃烧反应计量方程式为



这表示 1 mol CH<sub>4</sub> 与 2 mol O<sub>2</sub> 完全反应后,生成 1 mol CO<sub>2</sub> 和 2 mol H<sub>2</sub>O,并且释放出一定的热量 ΔH。由于各单一气体的摩尔容积可近似认为相等,所以,在定性分析和定量计算燃气燃烧过程时,可以把方程中各组分的摩尔比例关系转化为容积比例关系。燃气中其它各组分的燃烧反应计量方程式可以从附录二中查得。

分析这些燃烧反应过程,可以得出完成燃气燃烧必须具备以下条件:

- (1) 燃气中的可燃组分和(空气中的)氧气必须按一定比例呈分子状态混合。
- (2) 参与反应的分子在碰撞时必须具备破坏旧分子和形成新分子所需的能量。
- (3) 具有完成反应过程所需的时间。

燃气的热值是指在物理标准状态下 1 m<sup>3</sup> 燃气完全燃烧所放出的热量,用  $H$  表示,单位为 kJ/m<sup>3</sup>(n);对于液化石油气,单位为 kJ/kg。

热值可分为高热值和低热值。

高热值是指 1 m<sup>3</sup>(n) 燃气完全燃烧后,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,用  $H_h$  表示。

低热值是指 1 m<sup>3</sup>(n) 燃气完全燃烧后,烟气被冷却至原始温度,但其中的水蒸气以蒸气状态排出时所放出的热量,用  $H_l$  表示。

由此可以看出,燃气的高热值在数值上大于低热值,差值为水蒸气的汽化潜热。但在实际应用中,燃气燃烧产生烟气中的水蒸气通常是以气态排出的。所以,实际工程中常用低热值进行计算。

各单一可燃气体的热值是用各自与氧进行燃烧反应的热效应与该气体的摩尔容积(对于液化石油气为摩尔质量)的比值求得的。

例如,由 H<sub>2</sub> 的燃烧反应式及产生的热效应求其高、低热值的公式为

$$H_h = \frac{\text{高热效应 } \Delta H_h}{\text{H}_2 \text{ 的摩尔容积}} = \frac{286013 \text{ kJ/kmol}}{22.4270 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kmol}} = 12753 \text{ kJ/m}^3(\text{n})$$

$$H_l = \frac{\text{低热效应 } \Delta H_l}{\text{H}_2 \text{ 的摩尔容积}} = \frac{242064 \text{ kJ/kmol}}{22.4270 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kmol}} = 10794 \text{ kJ/m}^3(\text{n})$$

常见各单一可燃气体的热值列于附录二中。

燃气是含有多种组分的混合气体。它的热值可以用热量计直接测得,也可以通过所含各可燃组分的热值按下式求得:

$$H = 0.01 \sum H_i y_i \quad (1-5)$$

式中,∑为符号后叠加求和;H<sub>i</sub>为燃气中各可燃组分的高热值或低热值[kJ/m<sup>3</sup>(n)];y<sub>i</sub>为燃气中各可燃组分的容积成分(体积%)。

干燃气和湿燃气的热值可以按下式进行换算:对于低热值,

$$H_l^w = H_l^{ar} \frac{0.833}{0.833 + d_o} \quad (1-6)$$

或

$$H_l^w = H_l^{ar} \left( 1 - \frac{\varphi P_i}{P} \right) \quad (1-7)$$

对于高热值,

$$H_h^w = (H_h^{dr} + 562 d_g) \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-8)$$

或

$$H_h^{dr} = H_h^w \left(1 - \frac{\varphi P_s}{P}\right) + 468 \left(\frac{\varphi P_s}{P}\right) \quad (1-9)$$

式中  $H_h^w, H_i^w$  分别为湿燃气的高、低热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3(n)$  湿燃气];  $H_h^{dr}, H_i^{dr}$  分别为干燃气的高、低热值 [ $\text{kJ}/\text{m}^3(n)$  干燃气]。

在我国制定的《城市煤气设计规范》中，对燃气的热值规定为低热值大于  $14654 \text{kJ}/\text{m}^3(n)$ 。

**例 1-1** 已知某干燃气各组分的容积成分(体积%)分别为:  $y_{\text{H}_2} = 57.0, y_{\text{CO}} = 5.2, y_{\text{CH}_4} = 20.0, y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1.3$  (按  $\text{C}_3\text{H}_8$  计算),  $y_{\text{CO}_2} = 2.7, y_{\text{H}_2\text{O}} = 13.0, y_{\text{O}_2} = 0.8$ 。设含湿量  $d_g = 0.01 \text{kg}/\text{m}^3(n)$  干燃气, 求湿燃气各组分的容积成分和干、湿燃气的高热值和低热值。

**【解】** (1) 求湿燃气的各组分容积成分。先求换算系数  $k$ :

$$k = \frac{0.833}{0.833 + d_g} = \frac{0.833}{0.833 + 0.01} = 0.9881$$

湿燃气各组分的容积成分

$$y_i^w = k y_i$$

$$y_{\text{H}_2}^w = 57.0 \times 0.9881 = 56.32 \quad y_{\text{CO}}^w = 5.2 \times 0.9881 = 5.14$$

$$y_{\text{CH}_4}^w = 20.0 \times 0.9881 = 19.76 \quad y_{\text{C}_2\text{H}_6}^w = 1.3 \times 0.9881 = 1.28$$

$$y_{\text{CO}_2}^w = 2.7 \times 0.9881 = 2.67 \quad y_{\text{H}_2\text{O}}^w = 13.0 \times 0.9881 = 12.84$$

$$y_{\text{O}_2}^w = 0.8 \times 0.9881 = 0.79 \quad y_{\text{H}_2\text{O}}^w = 1.14$$

(2) 求高热值和低热值。查附录二, 由公式(1-5)得

$$H_h^{dr} = 0.01 \sum H_i^d y_i = 0.01 \times (12753 \times 57.0 + 12644 \times 5.2 + 39842 \times 20.0 + 93671 \times 1.3) \\ = 17113 [\text{kJ}/\text{m}^3(n)]$$

$$H_i^{dr} = 0.01 \sum H_i^i y_i = 0.01 \times (10794 \times 57.0 + 12644 \times 5.2 + 35906 \times 20.0 + 87667 \times 1.3) \\ = 15131 [\text{kJ}/\text{m}^3(n)]$$

$$H_h^w = k(H_h^{dr} + 562 d_g) = 0.9881 \times (17113 + 562 \times 0.01) \\ = 16915 [\text{kJ}/\text{m}^3(n)]$$

$$H_i^w = k H_i^{dr} = 0.9881 \times 15131 = 14951 [\text{kJ}/\text{m}^3(n)]$$

## 第二节 燃烧所需空气量及燃烧产物

### 一、理论空气量和理论烟气量

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。一般情况下, 在燃气应用设备中燃烧所需氧气都是直接取自空气。干空气的体积组分一般为氧 21%, 氮 79%, 则两者体积比为

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

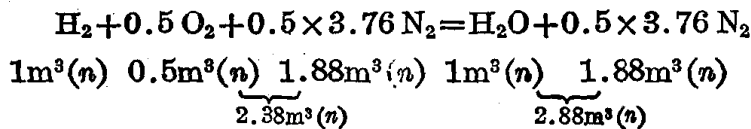
$1 \text{m}^3(n)$  (或  $1 \text{kg}$ ) 燃气按燃烧反应计量方程式完全燃烧所需的空气量, 叫做该燃气燃

烧所需的理论空气量,用  $V_0$  表示,单位为  $\text{m}^3(n) \cdot \text{空气}/\text{m}^3(n)$  干燃气或  $\text{m}^3(n)/\text{kg}$ 。这也是燃气完全燃烧所需最少空气量。

当只供给理论空气量时,燃气完全燃烧后的产物就是理论烟气体积,用  $V_f^0$  表示,单位为  $\text{m}^3(n) \cdot \text{烟气}/\text{m}^3(n) \cdot \text{干燃气}$  或  $\text{m}^3(n) \cdot \text{烟气}/\text{kg}$ 。

燃气完全燃烧所需理论空气量,只须根据燃气各可燃组分的体积百分比,求得其中各单一可燃气体完全燃烧所需空气量,叠加起来,减掉原燃气中所含氧气量折合成的空气量即可。

各单一可燃气体完全燃烧所需理论空气量可根据燃烧反应计量方程式求得,列于附录二中。以氢气为例,燃烧反应式为



这说明,  $1\text{m}^3(n)\text{H}_2$  完全燃烧需要  $0.5\text{m}^3(n)$  氧气或  $2.38\text{m}^3(n)$  空气。

同样可求得  $1\text{m}^3(n)\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$  等可燃气体完全燃烧所需氧气量或空气量。

若某燃气的可燃组分和氧气(指燃气中的氧气)的体积百分比分别为  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ , 则可得该燃气完全燃烧所需理论空气量

$$V_0 = \frac{1}{21} \left[ 0.5\text{H}_2 + 0.5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n + 1.5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right] \quad (1-10)$$

式中,  $m$  为碳氢化合物  $\text{C}_m\text{H}_n$  (不含  $\text{CH}_4$ ) 中碳的原子数;  $n$  为碳氢化合物  $\text{C}_m\text{H}_n$  (不含  $\text{CH}_4$ ) 中氢的原子数。

同样,燃气燃烧产物产生的理论烟气体积,可以根据各可燃组分的体积百分比及燃烧反应计量方程式,求得各自供给理论空气量时所产生的烟气体积叠加起来即可。

由于理论烟气的组分是  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 所以在计算时根据燃气各可燃组分求得完全燃烧后产生的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  (合称三原子气体,用符号  $\text{RO}_2$  表示),  $\text{H}_2\text{O}$  及  $\text{N}_2$  含量,叠加起来即为  $V_f^0$ 。

此方法非常繁杂,在实际计算时常使用以下经验公式求理论空气量和理论烟气体积:

(1) 当低热值小于  $12600 \text{kJ}/\text{m}^3(n)$  时,

$$V_0 = \frac{0.209}{1000} H_i \quad (1-11)$$

$$V_f^0 = \frac{0.173}{1000} H_i + 1.0 \quad (1-12)$$

(2) 当燃气低热值大于  $12600 \text{kJ}/\text{m}^3(n)$  时,

$$V_0 = \frac{0.26}{1000} H_i - 0.25 \quad (1-13)$$

$$V_f^0 = \frac{0.272}{1000} H_i + 0.25 \quad (1-14)$$

(3) 对于天然气、液化石油气、石油伴生气等烷烃类燃气,

$$V_0 = \frac{0.268}{1000} H_i$$

$$V_f^0 = \frac{0.239}{1000} H_i + a$$

式中的  $a$ , 对于天然气  $a=2$ ; 对于液化石油气  $a=4.5$ ; 对于石油伴生气  $a=2.2$ 。

## 二、实际空气需要量和实际烟气体量

在实际中, 由于多方面的原因, 很难保证燃气与空气充分混合, 因此燃气不能完全燃烧。为了燃气燃烧完全, 实际供给的空气量比理论空气量多。实际供给空气量  $V$  与理论空气量  $V_0$  之比称为过剩空气系数  $\alpha$ ,

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

通常  $\alpha > 1$ 。  $\alpha$  值的大小取决于燃气的燃烧方法和燃烧设备的运行工况。显而易见, 正确选择  $\alpha$  值的大小, 对实现燃烧过程十分重要。  $\alpha$  值过小, 燃气燃烧不完全, 燃气的化学热能未能完全释放出来;  $\alpha$  值过大, 会使烟气中含有未被利用的空气, 这部分空气同样被加热, 随燃烧产物放出, 从而降低了燃烧设备的热效率。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。

由上述可知, 燃气燃烧时的实际烟气体量

$$V_f = V_f^0 + (\alpha - 1)V_0 \quad (1-16)$$

## 三、不完全燃烧产物 CO 的确定

当燃气燃烧不完全时, 产生的烟气中除含有  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  外, 还含有  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$  等不完全燃烧产物。由于  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  的含量比  $\text{CO}$  少得多, 所以工程上常以  $\text{CO}$  代表不完全燃烧产物。烟气中  $\text{CO}$  含量的多少直接反映了燃气燃烧情况的好坏。但是, 烟气中  $\text{CO}$  的含量很少, 一般小于 1%, 需用微量气体分析仪才能准确地测得, 所以经常用下面的近似公式进行确定:

$$\text{CO}' = \frac{21 - \text{O}_2' - \text{RO}_2'(1 + \beta)}{0.605 + \beta} \quad (1-17)$$

式中,  $\text{CO}'$  为干烟气中一氧化碳含量(体积 %);  $\text{RO}_2'$ ,  $\text{O}_2'$  分别为干烟气中三原子气体 ( $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ) 和氧的含量(体积 %), 由烟气分析仪确定;  $\beta$  为燃料特性系数, 它只与燃料组分有关, 对一定组分的燃料,  $\beta$  为定值, 对天然气  $\beta = 0.75 \sim 0.80$ , 对焦炉煤气  $\beta = 1.05$ 。

当燃气组分已知时,  $\beta$  值可按下式确定:

$$\beta = \frac{0.395(\text{H}_2 + \text{CO}) + 0.79 \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n}{\text{CO} + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}} + \frac{1.18\text{H}_2\text{S} - 0.79\text{O}_2 + 0.21\text{N}_2}{\text{CO} + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}} - 0.79 \quad (1-18)$$

式中,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  为干燃气中各组分的体积百分比。

当燃气完全燃烧时,  $\text{CO}' = 0$ , 则

$$21 - \text{O}_2' - \text{RO}_2'(1 + \beta) = 0; \quad \text{RO}_2' = \frac{21 - \text{O}_2'}{1 + \beta} \quad (1-19)$$



此式即为燃气完全燃烧的基本方程式。用此方程式可以判别燃烧过程的好坏。

$$21 - O_2' - RO_2(1 + \beta) = 0$$

表明燃烧完全。

$$21 - O_2' - RO_2(1 + \beta) > 0$$

表明燃烧不完全。

从式中还可看出，烟气中  $RO_2$  含量与过剩  $O_2$  有关，也就与过剩空气系数  $\alpha$  有关。 $\alpha$  值越大， $RO_2$  越小； $\alpha=1$  时 ( $O_2=0$ )， $RO_2$  值最大。

$$RO_{2\max}' = \frac{21}{1 + \beta}$$

在现场测试烟气中一氧化碳含量时，有一种简单、方便并具有一定精确度的测试方法，即检测管法。其中包括比色检测管和比长检测管。

(1) CO 比色检测管。这是一种利用 CO 能使某种化学试剂(指示剂)变色的现象，并根据变色的深浅检测 CO 浓度的测试方法。其构造如图 1-1 所示，一般用直径为 6mm 的玻璃管制成。管中装有以硅胶碎粒为担体的黄色指示剂，它是由硅钼酸铵和硫酸钡溶液吸附在担体上经减压干燥制成。红色胶与黑色胶表示气流方向，气样由红端进入、黑端排出。气样可以用专门的注射器(如 ZS-1 型 CO 检定器)或用 100 mL 医用注射器注入检测管内。

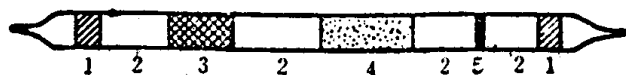


图 1-1 比色检测管

1. 玻璃棉； 2. 白色胶； 3. 红色胶； 4. 黄色胶(指示剂)； 5. 黑色胶

在测试前，要对新购买的检测管进行校正，用已知浓度的标准气体，按照检测管说明书的要求注入检测管，然后根据浓度与进气样量，按照指示剂颜色的变色程度与比色板比较，并查表得到 CO 浓度。如果测得的浓度与已知浓度相等，说明检测管工作正常；如果不相等，则应适当地调整进气时间与进气样量，直到测得的浓度与已知浓度相等为止。在以后实际测试中，均应保持校正的进气时间与进气样量。

测试步骤如下：

- (a) 用注射器抽取气样，并用气样充分清扫注射器，以保证气样纯度。
- (b) 将检测管两端锉开。
- (c) 用注射器将气样从红胶端注入检测管。进气样量与进气时间应根据校正要求来控制。
- (d) 记录气样温度。
- (e) 气样进完后，等待 1 min，根据指示剂颜色变化程度与比色板比较，并查表得气样 CO 浓度。
- (f) 如果需要保存实验结果，可以将玻璃管密封保存起来。

(2) CO 比长检测管。这是一种不用比色板，直接根据指示剂颜色变化的长度测出 CO 含量的测试方法。其构造如图 1-2 所示，由一根直径为 3.0~3.5 mm，长度约 180 mm 的玻璃管制成。管内装有各种试剂及指示胶。管子两端是用玻璃丝做成的堵塞物(1)，其长度约 5 mm。在左边玻璃丝的后面是 24~42 目的活性炭(2)，其长度亦为 5 mm。用于清