

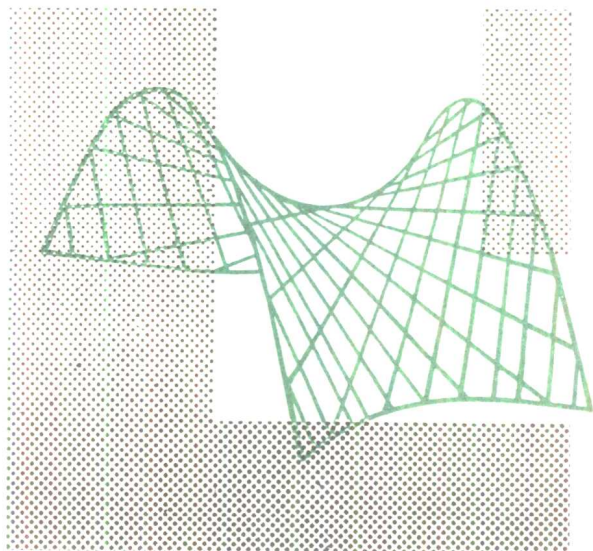
高等学校试用教材

燃气燃烧 与应用

(第三版)

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

● 中国建筑工业出版社



高等学校试用教材

燃气燃烧与应用

(第三版)

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

编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

燃气燃烧与应用/《燃气燃烧与应用》编委会编,
3版.—北京:中国建筑工业出版社,2000.9
(高等学校试用教材)
ISBN 7-112-04205-4

I. 燃… II. 燃… III. 燃料气-燃烧-高等学校-教材 IV. TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 17061 号

本书系根据最新技术发展作了修订的全国高等工科院校“城市燃气工程”专业试用教材(第三版)。

全书共 17 章,包括燃气燃烧理论、燃烧器及民用燃具设计、燃气在工业炉中的合理利用与节能方法、热力计算和空气动力计算以及自动调节、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
(第三版)

同 济 大 学
重 庆 建 筑 大 学
哈 尔 滨 建 筑 大 学 编
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)
新华书店总店科技发行所发行
煤炭工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 字数: 631 千字
2000 年 12 月第三版 2000 年 12 月第八次印刷
印数: 23991—26990 册 定价: 26.40 元

ISBN 7-112-04205-4

TU·3314(9686)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换
(邮政编码 100037)

第三版 前 言

本书根据供热通风及燃气类教材编审委员会决定修订再版。

本书第二版出版以来,我国燃气工业特别是天然气工业有了显著的进步,国内外燃气燃烧与应用技术继续不断发展,本书尽量收集了在此期间的科技成果和信息,力求与本行业的最新进展相适应。

总结本书第二版使用 10 年的教学经验,我们对本书的章节编排和内容作了较大的调整和更新。

参加本书修订工作的有:姜正侯、郭文博、傅忠诚、李振鸣、钱申贤、罗贤成、章成骏、张同、徐吉浣、刘瑶征、杨庆泉。全书由姜正侯、郭文博主编,并请金志刚主审。

第二版 前 言

本书根据供热通风及燃气类教材编审委员会决定修订再版。

本书第一版出版六年来,国内外燃气燃烧与应用技术不断发展。我们尽量收集了在此期间涌现的研究成果和技术资料,对本书进行了增删更新,力求使其与本行业的最新成就相适应。

在内容深广度和章节编排上,我们总结了六年来使用本书的教学经验,在总体上保持了原书特色,同时对某些章节进行了调整与改写。

参加本书修订工作的有:同济大学姜正侯、徐吉浣、章成骏、张同、杨庆泉;重庆建筑大学郭文博、刘瑶征;哈尔滨建筑大学傅忠诚、李振鸣和北京建筑工程学院钱申贤。全书由姜正侯、郭文博主编,并请天津大学金志刚主审。

第一版 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;重庆建筑大学郭文博、刘瑶征;哈尔滨建筑大学傅忠诚、李振鸣和北京建筑工程学院钱申贤。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 燃气燃烧反应动力学	18
第一节 化学反应速度	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	30
第三章 燃气燃烧的气流混合过程	38
第一节 静止气流中的自由射流	38
第二节 平行气流	42
第三节 相交气流	45
第四节 旋转射流	52
第五节 紊流扩散过程	56
第四章 燃气燃烧的火焰传播	60
第一节 火焰传播的理论基础	60
第二节 法向火焰传播速度的测定	64
第三节 影响火焰传播速度的因素	69
第四节 混合气体火焰传播速度的计算	74
第五节 紊流火焰传播	75
第六节 火焰传播浓度极限	79
第五章 燃气燃烧方法	82
第一节 扩散式燃烧	82
第二节 部分预混式燃烧	89
第三节 完全预混式燃烧	100
第四节 燃烧过程的强化与完善	102
第六章 扩散式燃烧器	113
第一节 燃烧器的分类与技术要求	113
第二节 自然引风式扩散燃烧器	114
第三节 鼓风式扩散燃烧器	123
第七章 大气式燃烧器	137
第一节 大气式燃烧器的构造及特点	137
第二节 大气式燃烧器的头部计算	144
第三节 低压引射器的计算	150
第四节 低压引射大气式燃烧器的计算	155

第八章 完全预混式燃烧器	164
第一节 完全预混式燃烧器的构造及特点	164
第二节 头部计算	168
第三节 高压引射器的计算	174
第四节 完全预混高(中)压引射式燃烧器的计算	179
第九章 特种燃烧器	184
第一节 低 NO_x 燃气燃烧器	184
第二节 高速燃烧器	187
第三节 平焰燃烧器	191
第四节 浸没燃烧器	193
第五节 燃气辐射管	196
第六节 脉冲燃烧器	198
第七节 催化燃烧器	199
第八节 富氧燃烧器	201
第九节 双燃料燃烧器	203
第十章 燃气互换性	205
第一节 燃气互换性和燃具适应性	205
第二节 华白数	207
第三节 火焰特性对燃气互换性的影响	208
第四节 燃气互换性的判定	212
第十一章 民用燃气用具	223
第一节 燃气炊事用具及其他燃具	223
第二节 燃气热水器	226
第三节 民用燃气用具的工艺设计	230
第四节 民用燃气用具的通风排气	239
第五节 民用燃具材料	253
第十二章 燃气工业炉窑	256
第一节 概述	256
第二节 燃气工业炉的炉型与构造	258
第三节 燃气工业炉的热工特性	266
第四节 燃气钢铁用炉	276
第五节 燃气有色金属用炉	286
第六节 燃气窑业用炉	288
第七节 燃气化工与环保用炉	292
第八节 燃气干燥用炉	294
第十三章 燃气工业炉余热利用	297
第一节 余热利用的技术经济意义	297
第二节 换热器	299
第三节 废热锅炉	306
第十四章 燃气工业炉的热力计算	310
第一节 燃气工业炉的热平衡和焓平衡	310
第二节 燃气工业炉炉膛热交换计算	321

第三节	对流受热面传热计算	328
第四节	对流放热系数	329
第五节	辐射放热系数	335
第六节	平均温差	336
第七节	对流受热面传热计算方法提要	337
第十五章	燃气工业炉的空气动力计算	347
第一节	燃气工业炉空气动力计算的任务	347
第二节	气体流动阻力计算	349
第三节	燃气工业炉通风排烟装置	360
第十六章	燃气燃烧的自动与安全控制	364
第一节	燃烧自动与安全控制的意义	364
第二节	自动点火与自动控制	365
第三节	安全控制	371
第四节	计算机控制的应用	376
第十七章	燃气应用设备的运行管理及安全技术	380
第一节	概述	380
第二节	燃气应用设备的运行管理	380
第三节	燃气应用设备的安全技术	386
附录	395
参考文献	406

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、液化石油气、炼焦煤气、炭化煤气、高压气化煤气、热裂解油制气、催化裂解油制气和矿井气等。

燃气通常由一些单一气体混合而成,其组分主要是可燃气体,同时也含有一些不可燃气体。可燃气体有碳氢化合物、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他杂质,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、锅炉及燃气用具热力计算的一部分。它为工业炉、锅炉及燃气用具热平衡计算、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气量、确定燃烧温度和绘制焓温图等。

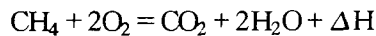
第一节 燃气的热值

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。

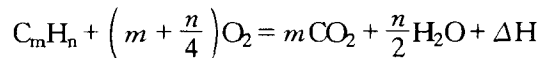
燃烧必须具备的条件是:燃气中的可燃成分和(空气中的)氧气需按一定比例呈分子状态混合;参与反应的分子在碰撞时必须具有破坏旧分子和生成新分子所需的能量;具有完成反应所必需的时间。

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 $1\text{mol}CH_4$ 与 $2\text{mol}O_2$ 完全燃烧后,生成 $1\text{mol}CO_2$ 与 $2\text{mol}H_2O$,同时放出一定的热量 ΔH 。其他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:



各种单一气体的摩尔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摩尔之间的比例关系,就可以转化为容积之间的比例关系。

二、燃气热值的确定

1Nm^3 燃气完全燃烧所放出的热量称为该燃气的热值,单位为千焦每标准立方米。对

于液化石油气,热值单位也可用千焦每公斤表示。

热值可分为高热值和低热值。

高热值是指 1Nm^3 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 1Nm^3 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汽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,差值为水蒸气的汽化潜热。

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,其水蒸气的汽化潜热才能被利用。

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_4 的燃烧反应式可计算出每标准立方米 CH_4 的热值为:

$$H_h = \frac{890943}{22.3621} = 39842\text{kJ}/\text{Nm}^3$$

$$H_l = \frac{802932}{22.3621} = 35906\text{kJ}/\text{Nm}^3$$

根据附录 2 中 C_3H_8 的燃烧反应式,可计算出每公斤 C_3H_8 的热值为:

$$H_h = \frac{2221487}{44.097} = 50377\text{kJ}/\text{kg}$$

$$H_l = \frac{2045424}{44.097} = 46385\text{kJ}/\text{kg}$$

式中 22.3621——标准状态下 CH_4 的摩尔容积(Nm^3/kmol);

44.097—— C_3H_8 的分子量(kg/kmol);

H_h 、 H_l ——燃气的高热值和低热值(kJ/Nm^3 或 kJ/kg)。

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:

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

式中 H ——燃气(混合气体)的高热值或低热值(kJ/Nm^3);

H_1 、 H_2 、 \cdots 、 H_n ——燃气中各可燃组分的高热值或低热值(kJ/Nm^3),由附录 2 查得;

r_1 、 r_2 、 \cdots 、 r_n ——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:

$$H_h^{\text{干}} = H_l^{\text{干}} + 19.59 \left(H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2 S \right) \quad (1-2)$$

式中 $H_h^{\text{干}}$ ——干燃气的高热值(kJ/Nm^3 干燃气);

$H_l^{\text{干}}$ ——干燃气的低热值(kJ/Nm^3 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:

$$H_h^w = H_l^w + \left[19.59 \left(H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S \right) + 2352 d_g \right] \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-3)$$

或
$$H_h^w = H_l^w + 19.59 \left(H_2^w + \sum \frac{n}{2} C_m H_n^w + H_2S^w + H_2O^w \right) \quad (1-4)$$

式中 H_h^w ——湿燃气的高热值(kJ/Nm³湿燃气);

H_l^w ——湿燃气的低热值(kJ/Nm³湿燃气);

d_g ——燃气的含湿量(kg/Nm³干燃气);

H_2^w 、 $C_m H_n^w$ 、 H_2S^w 、 H_2O^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:

$$H_l^w = H_l^{dr} \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-5)$$

或
$$H_l^w = H_l^{dr} \left(1 - \frac{\varphi P_s}{P} \right) \quad (1-6)$$

干燃气的高热值和湿燃气的高热值可按下式进行换算:

$$H_h^w = (H_h^{dr} + 2352 d_g) \frac{0.833}{0.833 + d_g} \quad (1-7)$$

或
$$H_h^w = H_h^{dr} \left(1 - \frac{\varphi P_s}{P} \right) + 1959 \frac{\varphi P_s}{P} \quad (1-8)$$

式中 φ ——湿燃气的相对湿度;

P ——燃气绝对压力(Pa);

P_s ——在与燃气相同温度下水蒸气的饱和分压力(Pa)。

第二节 燃烧所需空气量

一、理论空气需要量

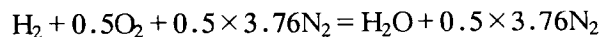
由燃烧反应必须具备的条件可知,燃气燃烧需要供给适量的氧气。氧气过多或过少都对燃烧不利。

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他稀有气体,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,是指每立方米(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,单位为标准立方米每标准立方米或标准立方米每公斤。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

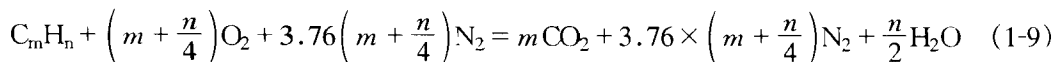


$$1\text{Nm}^3 \quad 0.5\text{Nm}^3 \quad 1.88\text{Nm}^3 \quad 1\text{Nm}^3 \quad 1.88\text{Nm}^3$$

$$\qquad\qquad\qquad \underbrace{\hspace{10em}}_{2.38\text{Nm}^3} \qquad\qquad\qquad \underbrace{\hspace{10em}}_{2.88\text{Nm}^3}$$

在近似假定各种气体的千摩尔容积相等的前提下,由以上反应式可见。1Nm³ 氢气完全燃烧需 0.5Nm³ 氧气或 2.38Nm³ 空气,燃烧后生成 2.88Nm³ 烟气。

用上述同样方法,可写出任何碳氢化合物 C_mH_n 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:

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

式中 V_0 ——理论空气需要量(Nm³ 干空气/Nm³ 干燃气);

H₂、CO、C_mH_n、H₂S——燃气中各种可燃组分的容积成分;

O₂——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 10500kJ/Nm³ 时:

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

当燃气的低热值大于 10500kJ/Nm³ 时:

$$V_0 = \frac{0.26}{1000} H_l - 0.25 \quad (1-12)$$

对烷烃类燃气(天然气、石油伴生气、液化石油气)可采用:

$$V_0 = \frac{0.268}{1000} H_l \quad (1-13)$$

$$V_0 = \frac{0.24}{1000} H_h \quad (1-14)$$

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 α ,即

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

通常 $\alpha > 1$ 。 α 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, α 一般控制在 1.05~1.20;在民用燃具中 α 一般控制在 1.3~1.8。

在燃烧过程中,正确选择和控制 α 是十分重要的, α 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 α 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量称为理论烟气量。理论烟气的组分是 CO_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O 。前三种组分合在一起称为干烟气。包括 H_2O 在内的烟气称为湿烟气。由于在气体分析时 CO_2 和 SO_2 的含量经常合在一起,而产生 CO_2 和 SO_2 的化学反应式也有许多相似之处,因此 CO_2 和 SO_2 通常合称为三原子气体,用符号 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,这时的烟气量称为实际烟气量。如果燃烧不完全,则除上述组分外,烟气中还将出现 CO 、 CH_4 、 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量可通过燃烧反应式来确定,其计算结果列于附录 2 中。

含有 1Nm^3 干燃气的湿燃气完全燃烧后产生的烟气量,按以下方法计算^①:

(一) 按燃气组分计算

1. 理论烟气量(当 $\alpha = 1$ 时)

三原子气体体积

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

式中 V_{RO_2} ——三原子气体体积(Nm^3/Nm^3 干燃气);

V_{CO_2} 、 V_{SO_2} ——二氧化碳和二氧化硫的体积(Nm^3/Nm^3 干燃气)。

水蒸气体积

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

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

d_a ——空气的含湿量(kg/Nm^3 干空气)。

氮气体积

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79 V_0 + 0.01 \text{N}_2 \quad (1-18)$$

式中 $V_{\text{N}_2}^0$ ——理论烟气中氮气的体积(Nm^3/Nm^3 干燃气)。

^① 在工程上进行燃气燃烧计算时,可以用 1Nm^3 的湿燃气为基准;也可以用含有 1Nm^3 干燃气及 d (kg)水蒸气的湿燃气为基准,其中 d 为燃气含湿量(kg/Nm^3 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 1Nm^3 干燃气及 d (kg)水蒸气的湿燃气,也常常简称为 1Nm^3 干燃气。因此在本书中凡是用到 1Nm^3 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 1Nm^3 真正的干燃气,另一种是指含有 1Nm^3 干燃气的湿燃气,而且在多数场合下是指后一种含义。

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(Nm^3/Nm^3 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(Nm^3/Nm^3 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(Nm^3/Nm^3 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(Nm^3/Nm^3 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(Nm^3/Nm^3 干燃气)。

(二) 按热值近似计算

1. 理论烟气量

对烷烃类燃气

$$V_f^0 = \frac{0.239H_l}{1000} + a \quad (1-24)$$

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

$$V_f^0 = \frac{0.272H_l}{1000} + 0.25 \quad (1-25)$$

对低热值小于 $12600kJ/Nm^3$ 的燃气

$$V_f^0 = 0.173 \frac{H_l}{1000} + 1.0 \quad (1-26)$$

2. 实际烟气量

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

二、烟气的密度

在标准状态下烟气的密度可按下式计算:

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

式中 ρ_f^0 ——标准状态下烟气的密度(kg/Nm^3);
 ρ_g^{dr} ——燃气的密度(kg/Nm^3 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_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O 外,尚有不完全燃烧产物 CO 、 CH_4 和 H_2 等。由于 CH_4 、 H_2 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 $1\% \sim 2\%$ 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'_2 、 SO'_2 、 CO' 、 N'_2 、 O'_2 ——干烟气中各组分的容积成分。

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 1Nm^3 干燃气所得的氮的容积 V_{N_2} 应等于

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

式中 V_{N_2} ——干烟气中氮的体积(Nm^3/Nm^3 干燃气);

V_f^{dr} ——燃烧 1Nm^3 干燃气所得干烟气体积(Nm^3/Nm^3 干燃气)。

因为燃烧 1Nm^3 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 $\text{RO}'_2 + \text{CO}'$ 表示三原子气体和一氧化碳在干烟气中的容积成分,则

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

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

将式(1-30)中的 N'_2 用 $\frac{V_{\text{N}_2}}{V_f^{\text{dr}}}$ 代替,则

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

将式(1-31)、式(1-33)、式(1-10)代入式(1-34)中可得。

$$(RO'_2 + CO') + O'_2 + \frac{RO'_2 + CO'}{100(V_{RO_2} + V_{CO})} 100 \left\{ \frac{79}{21} \times \frac{1}{100} [0.5(H_2 + CO) + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1.5H_2S - O_2] + \frac{N_2}{100} \right\} + \frac{79}{21} (O'_2 - 0.5CO') = 100$$

将 $(V_{RO_2} + V_{CO})$ 按式(1-32)代入,得

$$0.21(RO'_2 + CO') + O'_2 - 0.395CO' + (RO'_2 + CO') \\ \times \frac{0.395(H_2 + CO) + 0.79 \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1.18H_2S - 0.79O_2 + 0.21N_2}{CO + \Sigma m C_m H_n + CO_2 + H_2S} \\ = 21$$

$$\text{令 } \beta = \frac{0.395(H_2 + CO) + 0.79 \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1.18H_2S - 0.79O_2 + 0.21N_2}{CO + \Sigma m C_m H_n + CO_2 + H_2S} - 0.79$$

(1-35)

式中 β ——燃料特性系数,它只与燃料的组成有关,对一定组成的燃料, β 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 β ,上式可写成:

$$0.21(RO'_2 + CO') + O'_2 - 0.395CO' + (RO'_2 + CO')\beta + 0.79(RO_2 + CO') = 21$$

$$\text{即 } (RO'_2 + CO') + O'_2 - 0.395CO' + (RO'_2 + CO')\beta = 21 \\ RO'_2 + 0.605CO' + O'_2 + (RO'_2 + CO')\beta = 21$$

由此可得出确定 CO' 的公式:

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

式中 RO'_2 和 O'_2 由烟气分析测定。

当完全燃烧时, $CO' = 0$, 则

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

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。

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

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

式(1-37)还可写成

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

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

只有当完全燃烧($CO' = 0$)和过剩空气系数 $\alpha = 1$ 时($O'_2 = 0$), RO_2 才达到最大值,从式(1-38)可得:

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

从式(1-39)不难看出, $RO'_{2\max}$ 只与燃料的特性系数 β 有关。当燃料一定时, β 为定值,因此 $RO'_{2\max}$ 也为定值。一般天然气 $RO'_{2\max} = 11.7\sim 12$;液化石油气 $RO'_{2\max} = 14$;炼焦煤气