

高层建筑实用技术指南丛书

高层建筑燃气系统设计指南

● 刘松林 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高层建筑实用技术指南丛书

高层建筑燃气系统设计指南

刘松林 著



机械工业出版社

本书着重阐述高层建筑燃气设计必须掌握的基本知识,介绍了在高层建筑中燃气系统的设计、施工技术,同时也介绍近几年来在这方面开发的新技术、新工艺和科研成果。

本书内容阐述力求简明扼要,公式、数据、资料可靠。有些公式、图表都是多年来实践经验的总结,并附有典型的工程实例。对从事高层建筑燃气供应设计和施工的技术人员有很实际的指导作用。

本书可供从事燃气设计、施工和管理人员及初学者阅读,也可作为大中专院校有关专业教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑燃气系统设计指南/刘松林著. —北京:机械工业出版社, 2004.7

(高层建筑实用技术指南丛书)

ISBN 7-111-14630-1

I. 高... II. 刘... III. 高层建筑—燃料气—市政工程 IV. TU996

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 055063 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:杨少彤 版式设计:霍永明 责任校对:李汝庚

封面设计:张静 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 8.25 印张 · 203 千字

0 001—4 000 册

定价:17.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

燃料作为能源，是保证国民经济向前发展的重要因素。城市燃气属于气体燃料，它同固体、液体燃料相比，有许多优点：城市燃气使用方便；燃气燃具燃烧完全，热效率高，易调节、控制；燃气燃烧后有害气体少，无残渣；城市燃气通过管道直接送至用户，减少城市交通运输量，既方便又可靠；城市燃气用于工业加热，可以改革工艺，提高产品的产量和质量。城市燃气作为民用燃料时，因能改善家庭环境卫生，节约时间，使人们能从繁杂的家务劳动中解放出来，更显示其优越性。城市燃气在发展生产，方便人民生活，合理利用资源，节约能耗，减少污染，改善环境卫生等方面起着重要作用。

我国的城市燃气事业，近年来发展很快，特别是随着石油化工工业的高速度发展，许多城市新建了液化石油气和天然气的供应设施。已建立燃气供应设施的城市，亦由过去的以煤制气为主要气源的状况逐步改变为以煤制气、液化天然气和天然气等多种气源供应的城市供气系统。特别是近年来国家“西气东输”计划的实施，由西部新疆轮台县为起点，经陕西靖边至上海市为终点，铺设约 3 900km 管道，将西部开采的天然气输送到东部，沿途将经过数十个城市。这一工程竣工后，使广大城市发展燃气事业有了可靠的能源保证，沿途的城市将可充分利用这一高效率的清洁能源。

同时由于改革开放的深入，城市的建设有了飞速发展，许多城市的高层建筑和超高层建筑有如雨后春笋般地矗立起来，这些建筑的燃气供应技术给我们从事燃气供应工作的技术人员提出了新的要求。

世界高层建筑发展已有 100 多年的历史，从 19 世纪中叶开始到 20 世纪 50 年代，建筑业有较大发展。高层建筑首先在美国大量兴建，并向超高层发展，继而在欧洲、亚洲以及第三世界各国相继建造了许多超高层建筑，形成世界范围内高层、超高层建筑的繁荣时期，如美国的纽约、芝加哥；日本的东京、大阪；澳大利亚；非洲大陆的约翰内斯堡；加拿大的多伦多；新加坡、法国、德国、罗马尼亚、马来西亚等国的城市均建造了大量的超高层建筑，其高度已从 100 多米发展到 400 多米。目前世界上最高的高层建筑当数美国芝加哥的西尔斯大厦和马来西亚的双塔石油大厦。

我国的高层建筑发展始于 20 世纪 70 年代，至今已有 30 多年历史。随着我国改革开放的深入，城市建设的加速发展及旅游事业的兴起，加之人民生活的不断提高，在城市土地面积有限的情况下，发展高层建筑就成为必然趋势。我国高层建筑发展比较快的城市有北京、上海、广州、天津和深圳，以上海为例，

目前已有高层建筑 3 000 多幢，其中高度在 100m 以上的超高层建筑有 100 多幢，尚有 1 000 多幢高层在拟建中。尤其是已建成的金茂大厦及在建的国际环球金融中心，建筑高度均在 400m 以上。这些高层、超高层建筑均要求有效地供应燃气。然而，在这样高的建筑内供应燃气在我国是史无前例的，在全球范围内也无先例。

本书就住宅燃气供应及高层建筑供应燃气在技术上进行探讨，并通过大量的设计实例与施工实践案例，将理论与实践相结合，对高层建筑燃气系统的设计和施工进行阐述。希望能对从事燃气设计、施工和管理的人员有所帮助。

编 者

目 录

前 言

第一章 概 述 1

第一节 燃气的燃烧特性 1

一、燃气的热值 2

二、燃烧所需空气量 3

三、烟气量 4

四、燃气的互换性 4

五、着火、着火温度 5

六、爆炸极限 5

七、燃烧温度 5

八、火焰传布及火焰传布速度 5

第二节 燃气的分类 7

一、人工煤气 7

二、液化石油气 7

三、天然气 8

四、沼气 8

第三节 燃气的组分和质量要求 8

一、燃气组分 8

二、燃气的质量要求 10

第四节 燃气常用仪表 10

一、常用的燃气计量表 10

二、有电子功能的家用燃气计量表 12

第五节 燃气燃烧器具 15

一、燃气燃烧器 15

二、家庭用燃气用具 15

第二章 燃气需用量计算 17

第一节 居民生活用气量指标 17

第二节 公共建筑用气量指标 17

第三节 房屋采暖用气量 22

第三章 燃气调压器 24

第一节 燃气调压器通过能力的计算 24

一、燃气调压器的通过能力 24

二、燃气调压器通过能力的换算公式 25

第二节 燃气调压器旁通管及管径的

确定 28

第三节 箱式燃气调压器（站） 28

第四节 燃气调压站的设置 30

一、燃气调压站设置的原则 30

二、装有燃气设备房间的排气量计算 32

第四章 燃气管道的水力计算 37

第一节 水力计算基本公式 37

一、对于中压燃气管道 37

二、对于低压燃气管道 37

三、实用的管道水力计算公式 38

四、燃气管道水力计算图 39

五、燃气管道的局部阻力 41

六、燃气管道的附加压力 42

七、燃气管道的当量管径和当量长度 42

八、低压燃气管道的压力降分配 45

九、管道计算 46

第二节 管子壁厚计算 58

一、承受内压管子的强度分析 58

二、管子壁厚计算 58

第三节 高层建筑燃气中央空调设计 60

一、燃气直燃型吸收式冷温水机的

选型 61

二、燃气直燃型吸收式冷温水机组的

设置 61

三、燃气直燃型吸收式冷温水机组的

燃气供应 62

第五章 地上燃气管道设计 68

第一节 地上燃气管道设计原则 68

一、室外明敷燃气支管的设计 68

二、室内燃气管道的设计 69

三、地下室、半地下室燃气管道的

设计 75

第二节 高层建筑地上燃气管道设计 76

一、消除高层建筑燃气供应系统中燃气的

附加压力 76

二、高层建筑内燃气立管自重的影响	78	验收	107
三、受地震及风荷载产生的水平位移的影响	81	一、户外燃气计量表箱及燃气计量表 安装	107
四、受风荷载时室内燃气管道的安全措施	83	二、户外燃气计量表、箱的试验及 验收	109
五、高层建筑内自动报警和自动切断系统	84	第八章 地上燃气管道施工与质量 检验	111
六、住宅厨房燃气管道及设备泄漏保护装置	84	第一节 地上燃气管道的管材与接口	111
第六章 燃气热水器	90	一、管材与管件	111
第一节 燃气热水器的分类	90	二、燃气管道的接口	111
一、燃气快速热水器	90	第二节 地上燃气管道施工的基本操作	112
二、燃气快速热水器的构造和工作原理	91	一、铰制螺纹与切割	112
三、燃气容积式热水器	93	二、调直与弯曲	113
第二节 燃气热水器的选择	94	三、管道连接	114
一、燃气快速热水器的规格	94	四、管道安装	115
二、燃气快速热水器的形状	96	第九章 燃气管道竣工投产和运行 管理	118
第三节 燃气快速热水器的给、排气	96	第一节 燃气管道的竣工投产	118
一、单独排气烟道	97	一、防止燃气燃烧、爆炸的措施	118
二、复合排气烟道	97	二、新建燃气管道的气体置换	118
三、共用给、排气烟道	97	第二节 燃气管道的运行管理	120
四、共用给、排气烟道截面积计算	98	一、燃气管道	120
第四节 燃气快速热水器的安装	99	二、低一低压调压器	120
一、燃气快速热水器安装部位的选择	99	三、波形挠性补偿器	120
二、燃气快速热水器的安装	100	四、燃气泄漏报警器和自动切断阀	120
第七章 户外燃气计量表的设计	103	附录 低压燃气管道水力计算单位长度 压力降便查表	121
第一节 户外燃气计量表的设计	103	参考文献	126
一、安装户外燃气计量表的条件	103		
二、户外燃气计量表安装部位	103		
第二节 户外燃气计量表、箱的安装及			

第一章 概 述

城市燃气是指可以供城市居民、企业事业单位使用的各种气体燃料的总称。随着资源的开发和综合利用,用作城市燃气的气体燃料无论在数量上、品种上都在不断增长与扩大。

人们最早发现的气体是天然气。我国是世界上最早发现和使用天然气的国家。早在公元前 11 世纪初的《周易》上便有“泽中有火”的记载。公元前 1 世纪,西汉杨雄的《蜀都赋》和班固的《汉书》中亦有“火井”、“火从地出”的记载。四川成都和邛县出土的东汉画像砖上的煮盐图表明,我国在公元 1、2 世纪已利用天然气煮盐。公元 900 年有我们祖先利用竹管输送天然气用于照明的文字记载。

1670 年英国的约翰·克莱顿 (John Clyton) 教士首先发现煤经干馏后可以得到一种气体燃料。1792 年苏格兰人威廉·默多克 (M. Murdoch) 第一个用煤制造出煤气,并将它用作照明。1808 年伦敦出现了世界上第一个煤气公司,当时煤气用于街道的煤气灯照明。以后欧洲各国相继发展煤制气,并迅速传播到世界各地。1864 年英国资本家在上海建立了第一个用煤作原料的煤气厂。20 世纪初电力照明崛起,煤气开始转向家庭炊事、采暖及工业上加热。此后,煤炭的气化技术发展很快,各种炉型的制气炉相继研制成功,使燃气工业进入一个新的发展时期。

第二次世界大战后,随着石油工业的发展,炼油厂副产品液化石油气、油制气和天然气资源的开发,使城市燃气的气源大大增加。尤其是天然气的液化技术的进展,长距离输气管的成功敷设,使一些资源缺少的国家可以通过进口天然气而加快本国城市燃气化的速度。燃气供应已从城市普及到农村,形成全国以至跨国的燃气供应系统。各种口径的燃气输送管线长达数十万千米,燃气管道的最大口径已达 2 500mm。随着天然气远距离输气技术的开发,管网压力级制向高压、超高压方向发展,最高压力已超过 7.0MPa。计算机在燃气生产、输送、调度、管理上的广泛使用,大大提高了城市燃气供应的可靠性和经济性。

我国的城市燃气还处在发展时期,解放初仅有上海和东北的 9 个城市具有煤制气设施,而且设备陈旧,供气量少。随着改革开放的深入,我国的燃气事业也得到了很大发展。我国城市燃气发展的潜力很大,资源丰富。目前全国已有 100 多个城市先后建立了燃气供应设施。随着气体燃料在能源结构中所占的比重增加,城市燃气事业必将得到更为迅速的发展。

我国的城市建设突飞猛进,高楼林立,人口众多。在高层建筑尤其是在超高层建筑内供应燃气涉及诸多技术问题,如计算、施工、设备等。没有有效的技术手段,将无法提供安全可靠的服务。因此,对高层建筑供应燃气,进行必要的研究,是设计、施工人员的职责。

第一节 燃气的燃烧特性

燃气是以可燃气体为主要组分的混合气体燃料。20 世纪 50 年代以前燃气主要采用煤加工生产,因此习惯地把这类混合气体称为“燃气”。

随着社会生产的发展,燃气的生产方式、气源及组分都有了很大变化。天然气、液化石

油气逐渐成为城市燃气的重要气源。

城市燃气是指可以作为供给城市居民、公共建筑、工业企业使用的燃气。并不是所有燃气均可作为城市燃气使用，对供城市使用的燃气——城市燃气，是有一定的质量标准的。在我国作为城市燃气的主要气源有：煤制气、天然气及液化石油气三大类。

人工煤气的种类较多，有固体燃料——煤为原料的煤制煤气，也有以液体燃料——重油、石脑油等为原料的油制气化煤气（以下统称人工煤气）。天然气包括气井天然气、石油伴生气和矿井气等。液化石油气一部分来自油气田，一部分来自炼油厂。

城市燃气又可根据热值不同分为两类，一类是低热值燃气，它的热值为 $16\,000 \sim 38\,000 \text{ kJ/m}^3$ （标态）。另一类是高热值燃气，它的热值为 $38\,000 \text{ kJ/m}^3$ （标态）以上。城市燃气中的煤制煤气一般是低热值燃气。油制气化煤气、天然气、液化石油气等一般是高热值燃气。

燃气的燃烧特性有以下几项。

一、燃气的热值

城市燃气中的可燃成分（ H_2 、 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。而 1m^3 （标态）城市燃气完全燃烧时所放出的热量称为该城市燃气的热值，单位为 kJ/m^3 （标态）。

热值可分为高热值和低热值。高热值是指 1m^3 （标态）城市燃气完全燃烧后其烟气被冷却到原始温度，包括其中的水蒸气以凝结水状态排出时所放出的全部热量。低热值是指 1m^3 （标态）城市燃气完全燃烧后其烟气被冷却到原始温度，而其中水蒸气仍为气态时所放出的热量。

显然，城市燃气的高热值在数值上大于其低热值，两者之差为水蒸气的汽化热。

在工程上由于烟气中的水气一般不会冷凝，通常仍以气体状态随烟气排出，所以常用低热值进行计算。一般焦炉煤气低热值大约 $16\,000 \sim 17\,000 \text{ kJ/m}^3$ （标态），天然气约 $36\,000 \sim 46\,000 \text{ kJ/m}^3$ （标态），液化石油气约 $88\,000 \sim 120\,000 \text{ kJ/m}^3$ （标态）。

单一可燃气体热值见表 1-1。

混合气体的热值可按下式计算：

$$Q_{ym} = (y_1 Q_{y1} + y_2 Q_{y2} + \cdots + y_n Q_{yn})/100 = \sum_{i=1}^n y_i Q_{yi}/100 \quad (1-1)$$

$$Q_{gm} = (g_1 Q_{g1} + g_2 Q_{g2} + \cdots + g_n Q_{gn})/100 = \sum_{i=1}^n g_i Q_{gi}/100 \quad (1-2)$$

式中 Q_{ym} 、 Q_{gm} ——混合气体单位容积和单位质量的热值 [kJ/m^3 （标态）和 kJ/kg （标态）]；

Q_{yi} 、 Q_{gi} ——混合气体中各组分单位容积和单位质量的热值 [kJ/m^3 （标态）和 kJ/kg （标态）]；

y_1 、 $y_2 \cdots y_n$ ——混合气体中各组分体积百分数；

g_1 、 $g_2 \cdots g_n$ ——混合气体中各组分质量百分数。

干燃气和湿燃气的低热值可按下式进行换算

$$Q_d = Q \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-3)$$

$$Q_d = Q \left(1 - \frac{p p_{ab}}{p}\right)$$

式中 Q_d ——湿燃气的低热值 $[\text{kJ}/\text{m}^3$ (标态) 湿燃气];

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

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

φ ——湿燃气的相对湿度;

p ——燃气的绝对压力 (Pa);

p_{ab} ——在与燃气相同温度下水蒸气的饱和分压力 (Pa)。

表 1-1 单一可燃气体的燃烧特性

序号	气体名称	分子式	爆炸极限 L20℃ (上/下) 空气中体积 百分数(%)	着火 温度 t /℃	燃 烧 反 应 式	理论空气量 和耗氧量 /(m³ /m³)(标态)		理论烟气量 V _f /(m³/m³)(标态)				热值 Q /(kJ/m³)(标态)	
						空气	氧	CO ₂	H ₂ O	N ₂	V _f	高	低
1	氢	H ₂	75.9/4.0	400	H ₂ + 0.5O ₂ = H ₂ O	2.38	0.5	—	1.0	1.88	2.88	12 724	10 768
2	一氧化碳	CO	74.2/12.5	605	CO + 0.5O ₂ = CO ₂	2.38	0.5	1.0	—	1.88	2.88	12 615	12 615
3	甲烷	CH ₄	15.0/5.0	540	CH ₄ + 2.0O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	9.52	2.0	1.0	2.0	7.52	10.52	39 752	35 822
4	乙炔	C ₂ H ₂	80.0/2.5	335	C ₂ H ₂ + 2.0O ₂ = 2CO ₂ + H ₂ O	11.90	2.5	2.0	1.0	9.40	12.40	58 370	56 359
5	乙烯	C ₂ H ₄	34.0/2.7	425	C ₂ H ₄ + 3.0O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	14.28	3.0	2.0	2.0	11.28	15.28	63 294	59 343
6	乙烷	C ₂ H ₆	13.0/2.91	515	C ₂ H ₆ + 3.5O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	16.66	3.5	2.0	3.0	13.16	18.16	70 190	64 251
7	丙烯	C ₃ H ₆	1.7/2.0	460	C ₃ H ₆ + 4.5O ₂ = 3CO ₂ + 3H ₂ O	21.42	4.5	3.0	3.0	16.92	22.92	93 456	87 466
8	丙烷	C ₃ H ₈	9.5/2.1	450	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O	23.80	5.0	3.0	4.0	18.80	25.80	101 039	93 030
9	丁烯	C ₄ H ₈	10.0/1.6	385	C ₄ H ₈ + 6.0O ₂ = 4CO ₂ + 4H ₂ O	28.56	6.0	4.0	4.0	22.56	30.56	125 559	117 425
10	丁烷	n-C ₄ H ₁₀	8.5/1.5	365	C ₄ H ₁₀ + 6.5O ₂ = 4CO ₂ + 5H ₂ O	30.94	6.5	4.0	5.0	24.44	33.44	133 580	123 364
11	戊烯	C ₅ H ₁₀	8.7/1.4	290	C ₅ H ₁₀ + 7.5O ₂ = 5CO ₂ + 5H ₂ O	35.70	7.5	5.0	5.0	28.20	38.20	158 848	148 494
12	戊烷	C ₅ H ₁₂	8.3/1.4	260	C ₅ H ₁₂ + 8.0O ₂ = 5CO ₂ + 6H ₂ O	38.08	8.0	5.0	6.0	30.08	41.08	168 237	156 374
13	苯	C ₆ H ₆	8.0/1.2	560	C ₆ H ₆ + 7.5O ₂ = 6CO ₂ + 3H ₂ O	35.70	7.5	6.0	3.0	28.20	37.20	161 887	155 412
14	硫化氢	H ₂ S	45.5/4.3	270	H ₂ S + 1.5O ₂ = SO ₂ + H ₂ O	7.14	1.5	1.0	1.0	5.64	7.64	25 306	23 329

二、燃烧所需空气量

由燃烧的条件可知, 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。燃烧所需要的氧气一般是从空气中直接获得, 空气中氧气约占容积的 21%, 氮气约占 79%, 氮与氧的容积比为

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

理论空气需要量是指每 m^3 (标态) 或每 kg 燃气按燃烧反应计算完全燃烧时所需要的空气量, 单位为 m^3/m^3 (标态) 或 m^3/kg (标态)。理论空气量也是燃气完全燃烧所需的最小空气量。燃气的热值越高, 燃烧所需理论空气量也越多, 工程上可按以下公式进行近似计算。

当低热值小于或等于 $12\,000\text{kJ}/\text{m}^3$ (标态) 时:

$$V_0 = \frac{0.219}{1\,000} Q \quad (1-4)$$

$$\text{当低热值大于 } 12\,000\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ (标态) 时: } V_0 = \frac{0.272}{1\,000} Q - 0.25 \quad (1-5)$$

对烷烃类燃气 (天然气、石油伴生气、液化石油气) 可采用:

$$V_0 = \frac{0.28}{1\,000} Q \quad (1-6)$$

式中 V_0 ——理论空气量 [m^3/m^3 (标态)];

Q ——燃气的低热值 [kJ/m^3 (标态)]。

实际上由于燃气与空气存在混合不均匀性, 供给燃烧用的空气量应大于理论空气需要量, 就是要供给过量空气以促使完全燃烧。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 a , 即

$$a = \frac{V}{V_0} \quad \text{或} \quad V = aV_0$$

a 值的大小决定于燃烧公式和燃烧设备的运行情况。在工业设备中, a 一般控制在 1.05 ~ 1.20; 在民用燃具中 a 一般控制在 1.3 ~ 1.8。燃烧同样体积的液化石油气、天然气和焦炉气所需的空气量是不同的, 液化石油气所需的空气量约为天然气的 3 倍, 为焦炉气的 6 倍。

三、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 CO_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O 。不完全燃烧时烟气中还会有一氧化碳。 1m^3 (标态) 燃气完全燃烧所产生的理论烟气体积可按热值近似计算。

低热值小于或等于 $12\,000\text{kJ}/\text{m}^3$ (标态) 的燃气:

$$V_t^0 = 0.181 \frac{Q}{1\,000} + 1 \quad (1-7)$$

炼焦燃气:

$$V_t^0 = \frac{0.285 Q}{1\,000} + 0.25 \quad (1-8)$$

烃类气体:

$$V_t^0 = \frac{0.25 Q}{1\,000} + a \quad (1-9)$$

式中 V_t^0 ——理论烟气体积 [m^3/m^3 (标态)];

Q ——燃气的低热值 [kJ/m^3 (标态)];

a ——系数, 对天然气 $a = 2.0$, 对石油伴生气 $a = 2.2$, 对液化石油气 $a = 4.5$ 。实际烟气体积 V_t 可按下列式计算:

$$V_t = V_t^0 + (a - 1) V_0 \quad (1-10)$$

四、燃气的互换性

随着我国城市燃气事业的发展, 供气规模、气源类型、燃具类型都在不断增加。很多城市从单一的气源发展为多种气源。这些多种气源的成分、热值、密度和燃烧特性等都很不相同。但是, 任何燃具都是按一定的燃气成分设计的。当燃气的成分发生变化时, 燃具的燃烧工况就会发生变化。假如按一定燃气成分设计的燃具, 在燃气成分有某些变化时, 燃烧工况虽有改变, 但尚能达到燃具原有设计要求, 则表示后一种燃气与前一种燃气具有互换性。当后一种燃气置换前一种燃气时, 首先应保证燃具热负荷 (即燃具在单位时间内所产生的热量) 在互换前后不发生大的改变。以民用燃具为例, 如果热负荷减少太多, 烧煮时间也要加长; 如果热负荷增加太多, 燃气就会浪费。当燃具喷嘴前压力不变, 燃具热负荷与燃气热值成正比, 与燃气对空气的相对密度的平方根成反比, 即

$$W = \frac{Q}{\sqrt{S}} \quad (1-11)$$

式中 W ——华白数，或称热负荷指数；

Q ——燃气热值 $[\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ (标态)}]$ ，按照各国习惯，有的取高热值，有的取低热值；

S ——燃气对空气的相对密度。

华白数是早期使用的一个互换性判定指标，一般规定在两种燃气互换时华白数 W 的变化不大于 $\pm (5\% \sim 10\%)$ 。但随着气源种类的不断增多，两种互换燃气的化学、物理及燃烧特性差别较大，这时单靠华白数就不足以判断两种燃气是否可以互换，还需考虑火焰特性这样一个较为繁杂的因素。它与燃气的化学、物理性质直接有关，到目前为止还无法用一个单一指标来表示。了解燃气的互换性原理后，也就可以理解燃烧焦炉气的燃具与燃烧液化石油气的燃具不可互换的道理。

五、着火、着火温度

任何可燃气体在一定条件下与氧接触，都要发生氧化反应。如果氧化反应过程发生的热量大于散失的热量，或者活化中心浓度增加的数量大于减少的数量，即由稳定的氧化反应转变为不稳定的氧化反应而引起燃烧的一瞬间，称为着火。

一般工程上遇到的着火是由于系统中热量的积聚，使温度急剧上升引起着火，称为热力着火。当点火棒或电火花等微小热源放入燃气中，则贴近热源周围的一层燃气被迅速加热，并开始燃烧产生火焰，然后向系统其他部分传播，使燃气逐步着火燃烧即为热力着火。这种现象称为强制点火，或简称点火。在一定条件下由于活化中心浓度迅速增加而引起反应转变为不稳定的氧化反应的过程称为支链着火。例如，磷在空气中会发生闪光，但温度并不高；许多液态可燃物（醚、汽油、煤油等）在低压和温度只有 $200 \sim 280^\circ\text{C}$ 时发生微弱的火光（又称冷焰）等。单一可燃气体的着火温度见表 1-1。在纯氧中的着火温度要比在空气中低 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

实际上，着火温度不是固定数值，它取决于可燃气体在空气中的浓度及其混合程度、压力、燃烧室的形状与大小和有无催化作用等因素。工程上实用的着火温度应由实验确定。

六、爆炸极限

当可燃气体与空气混合到一定浓度时遇到明火而引起爆炸，这种能爆炸的混合气体中所含燃气的浓度范围叫作爆炸极限，用百分数表示。在混合物中当可燃气体的含量减少到不能形成爆炸混合物时的浓度，称为爆炸下限，而当可燃气体增加到能形成爆炸混合物时的浓度，称为爆炸上限。单一可燃气体在常压、 20°C 时的爆炸极限见表 1-1。

七、燃烧温度

一定比例的燃气和空气完全燃烧时放出的热量，使燃烧产物（烟气）所具有的温度称为燃烧温度。燃烧温度可由燃气完全燃烧前后的热平衡方程求得。

八、火焰传布及火焰传布速度

在工程中，一般都用点火方法使可燃气体混合物着火。当一部分可燃气体混合物点燃后，形成高温燃烧，焰面加热了相邻的可燃气体混合物，使其温度升高，当达到着火温度时，就形成新的燃烧。这样不断移动，使每层气体都相继经历加热、着火和燃烧过程。这个现象就称为火焰的传布。

当火焰传布仅是由于传热作用，炽热的焰面将热量传给未燃气体，使其着火燃烧，依次

传布到整个体积, 这种火焰传布过程称为正常火焰传布。燃气在工业和民用燃烧设备中的燃烧过程都属于正常燃烧。

影响火焰传布速度的因素很多, 实际应用时一般采用实验方法测定或用经验公式计算。

当燃气中 $\text{CO} < 20\%$ (可燃气体的组分) 和 $\text{N}_2 + \text{CO}_2 < 50\%$ (扣除可燃气体中空气的组分) 时, 计算公式为

$$u = \frac{\sum u_i a_i V_{oi} y_i}{\sum a_i V_{oi} y_i} [1 - f_i (\text{N}_2 + \text{N}_2^2 + 2.5\text{CO}_2)] \quad (1-12)$$

$$\text{N}_2 = \frac{y_{\text{N}_2} - 3.76 y_{\text{O}_2}}{100 - 4.76 y_{\text{O}_2}}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{y_{\text{CO}_2}}{100 - 4.76 y_{\text{O}_2}}$$

$$f_i = \frac{\sum y_i}{\sum \frac{y_i}{\delta_i}}$$

式中 u ——混合气体最大燃烧速度 (m/s);

u_i ——混合气体各组分的最大燃烧速度 (m/s);

a_i ——混合气体各组分最大燃烧速度时的一次空气系数;

V_{oi} ——混合气体各组分的理论空气量 [m^3/m^3 (标态)];

y_i ——混合气体各体积组分 (%);

y_{N_2} ——混合气体中氮的体积组分 (%);

y_{O_2} ——混合气体中氧的体积组分 (%);

y_{CO_2} ——混合气体中二氧化碳的体积组分 (%);

f_i ——各组分考虑惰性组分影响的系数。

表 1-2 列出计算燃气最大燃烧速度的资料:

表 1-2 计算燃气最大燃烧速度的资料

化 学 式	H_2	CO	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	C_4H_8	C_4H_{10}
u	2.80	1.00	0.38	0.67	0.43	0.50	0.42	0.46	0.38
α	0.5	0.4	1.10	0.85	1.15	1.10	1.125	1.13	1.15
V_0	2.38	2.38	9.52	14.28	16.66	21.42	23.80	28.56	30.94
δ	0.75	1.00	0.5	0.25	0.22	0.22	0.22	0.20	0.18

对于不同种类的燃料, 气体燃料的燃烧比液体和固体燃料容易发生, 燃烧速度也更快。因为液体和固体燃料燃烧时要先进行熔化、蒸发等准备过程, 气体燃料就不需经过这些过程。不同种类的可燃气体的燃烧过程和燃烧速度也不同, 分子结构简单的燃气如氢气在燃烧时, 只经过受热、氧化过程; 而较复杂的可燃气体如天然气 (主要为甲烷)、焦炉气 (主要

为氢气、甲烷和一氧化碳等)和液化石油气就要经过受热、分解氧化等过程才能开始燃烧。因此简单燃气比复杂燃气的燃烧速度快。经测试,燃气最大燃烧速度:氢气为 2.80m/s , 甲烷为 0.38m/s , 液化石油气为 $0.38 \sim 0.35\text{m/s}$ 。因为燃气的燃烧速度都很快,所以一旦漏气飘逸到有明火处即引起燃烧,即使距离上百米,也能在极短时间内迅速燃烧到发生漏气的地方,而引起火灾。

第二节 燃气的分类

燃气是以可燃气体为主要组分的混合气体燃料,由于 20 世纪 50 年代以前,燃气普遍采用煤加工生产,因此习惯上把这类可燃混合气体燃料称为“煤气”,也有些地方称为“瓦斯”(GAS)。

燃气的种类较多,主要有人工煤气、液化石油气、天然气和沼气。

燃气按热值不同分为两类。一类是热值低的可燃气体,如氢气和一氧化碳,热值约为 $13\,000\text{kJ/m}^3$ (标态);另一类是热值高的可燃气体,如烷、烃类可燃气体,它们的热值超过 $38\,000\text{kJ/m}^3$ (标态)。

一、人工煤气

人工煤气是指以煤或重油为主要原料制取的可燃气体,按其生产方式不同可分为以下几种。

(一) 干馏煤气

将煤隔绝空气加热到一定温度时,煤中所含挥发物开始挥发,产生焦油、苯和煤气,剩留物最后变成多孔的焦炭。这种分解过程称为干馏。利用焦炉、连续式直立碳化炉(又称伍德炉)和立箱炉等对煤进行干馏所获得的煤气称为干馏煤气。

在干馏过程中,由于最终温度不同,又可分为高温干馏和中温干馏。它们所产生的干馏煤气,则称为全焦煤气和半焦煤气。利用焦炉生产高温干馏煤气,它的剩留物为焦炭。利用碳化炉、立箱炉生产中温干馏煤气,它的剩留物为半焦,通常称为熟煤。

干馏煤气的主要成分为氢、甲烷、一氧化碳等,热值为 $17\,000\text{kJ/m}^3$ (标态)左右。干馏煤气的吨煤产气率为 $300 \sim 500\text{m}^3/\text{t}$ 。

(二) 轻油制气

轻油制气的原料选择范围很广,可以用石脑油、液化石油气、油田伴生气、天然气凝析油、炼油厂尾气、天然气、甲醇等为原料。

(三) 油制气

油制气的主要成分为烷烃、烯烃等碳氢化合物,以及少量的一氧化碳。裂解后的副产品有苯、萘、焦油、炭黑等。

二、液化石油气

液化石油气有两个来源:在油气田,它是在冷却、加压工段中分离回收的产品;在炼油厂,它是炼油过程中的一种副产品。由于原油成分和性质不同,炼油厂的加工工艺及设备类型也不同,一般分蒸馏、热裂化、催化裂化、催化重整和焦化五种。不同加工工艺液化石油气的产率及产量也不同。

液化石油气的主要成分是丙烷、丁烷、丙烯、丁烯等。在常温常压下呈气态,当压力升高或温度降低时,很容易转变为液态,从液态转变为气态其体积扩大 250 倍。所以气、液两

相是液化石油气的特征。液化石油气气态和空气的相对密度约为 1.85，液态纯丙烷的密度为 0.509g/cm^3 ，发热值约为 $92\,000 \sim 121\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。

液化石油气可进行管道输送，也可加压液化灌瓶。随着我国石油工业的发展，液化石油气已成为城市燃气的重要气源之一。

三、天然气

天然气是埋藏在地下的可燃气体，它包括气井天然气、石油伴生气、凝析气田气和矿井气。

由气井开采出的可燃气体称为纯天然气。它的主要成分是甲烷（ CH_4 ），约占 98% 左右。此外还有少量的乙烷、丙烷、氨、硫化氢、一氧化碳、二氧化碳等。热值约为 $38\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。

石油伴生气是采油时的副产品，它的主要成分也是甲烷，约占 80% ~ 90% 左右。此外还有少量的烷烃类及二氧化碳、氢、氮等。热值约为 $42\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。

凝析气田气含有石油轻质馏分，除有大量甲烷外，还含有 2% ~ 5% 戊烷及戊烷以上碳氢化合物。热值约 $46\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。

天然气采出后需经降压、分离、净化（脱硫、脱水），才能作为城市燃气的气源。

矿井气是采煤时的副产品，主要成分是甲烷、氮，此外还有氧、二氧化碳等。矿井气只有当甲烷体积分数在 40% 以上时，才能作为燃气供应。当甲烷体积分数在 40% ~ 45% 时，矿井气的热值约为 $17\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。

四、沼气

沼气是一种生物能源。生物通过自己特有的系统收集储存太阳能，然后在一定条件下，通过微生物——主要是甲烷细菌作用，将储存的能量转化为以甲烷、二氧化碳为主要组分的气可燃气，通常称为沼气。

各种有机物如蛋白质、纤维素、脂肪、淀粉等都能在隔绝空气的条件下发酵，在微生物作用下产生沼气。粪便、垃圾、杂草、酒糟等有机物，均可作为生产沼气的原料。

沼气的主要组分为甲烷（约占 60%）、二氧化碳（约占 35%），此外尚有少量的氢、氧、一氧化碳等。热值约为 $21\,000\text{kJ/m}^3$ （标态）。沼气池如图 1-1 所示。

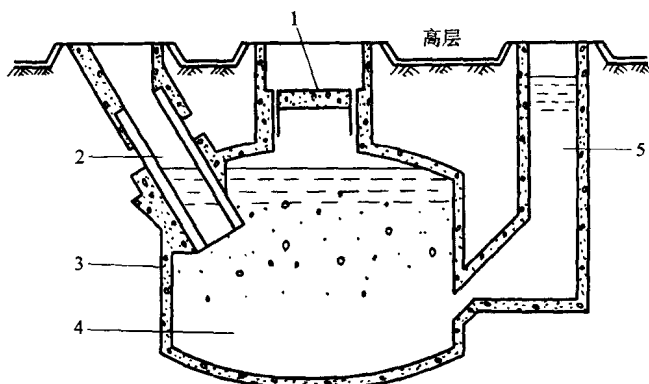


图 1-1 沼气池
1—活动盖 2—进料管 3—主池 4—液料 5—出料口

第三节 燃气的组分和质量要求

一、燃气组分

（一）各类燃气的组分

可用作城市燃气的气源很多，我国的城市燃气目前在某些城市仍以人工煤气为主要气源。天然气和液化石油气的应用近几年来发展较快，在城市燃气供应中占有一定的地位。各

类燃气的组分见表 1-3。

(二) 燃气中的杂质及其影响

在燃气供应中，常由于燃气中的杂质影响燃气的安全供应。由于燃气中的杂质会造成众多事故：如管道设备的腐蚀，调压器的控制失灵，阀门管道的阻塞等。特别是冬天气温较低，煤焦油极易凝结，气态萘也将析出结晶成固体，造成管道、设备阻塞和失去控制。而要清除在燃气设备中的这些杂质，则需花费极大的人力物力。

表 1-3 各种燃气平均组分

种 类		燃气成分体积分数(干成分)%									
		甲烷 CH ₄	丙烷 C ₃ H ₈	丁烷 C ₄ H ₈	其他碳氢 化合物 C _m H _n	氢 H ₂	一氧化 碳 CO	二氧化 碳 CO ₂	氮 N ₂	氧 O ₂	硫化 氢 H ₂ S
天然气		98.0	0.3	0.3	0.4				1.0		
石油伴生气		81.7	6.2		4.94			0.3	1.8	0.2	
矿井气		52.4		4.86				4.6	36.0	7.0	
液化石油气			50.0								
焦 炉 煤 气	焦炉	27.0			2.0	56.0	6.0	3.0	5.0	1.0	
	水平炉	15.28			2.0	26.22	8.76		39.36	2.2	6.18
	伍德炉	16.2			1.8	44.0	15.2	2.8	19.0	1.0	
高压气化炉		18.96			0.79	55.9	9.72		13.97	0.52	0.14
发生炉水煤气		0.7				47.3	43.5	3.5	4.4	0.6	
发生炉混合煤气		1.8			0.4	8.4	30.4	2.2	56.4	0.4	
油 制 气	重油蓄热催化	16.6			5.0	46.5	17.2	7.0	6.7	1.0	
	重油蓄热裂解	28.5			32.17	31.51	2.63	2.13	2.39	0.62	
	重油部分氧化	0.4				47.6	44.8	5.9	1.2	0.1	
沼 气		60.0				0.4		39.0	0.3	0.3	

燃气中的杂质，对燃气计量表及燃具也有很大影响，常常造成仪表失灵、燃具堵塞与损坏。

燃气中的杂质主要有以下几种：

1. 焦油和灰尘

干馏煤气中焦油和灰粉含量较高时，常积聚在管道、管道弯管、调压器阀体等一些阻力较大的部位，造成管道阻塞事故。

2. 硫化物

燃气中的硫化物主要是硫化氢（H₂S），此外还有硫醇（CH₃SH、C₂H₅SH）、二硫化碳（CS₂）等。硫化氢与氧化反应生成二氧化硫（SO₂），具有强烈的刺激性气味，对人的眼粘膜和呼吸道有损害作用。当硫化氢在空气中的浓度达到 0.3%（体积分数）以上时，则能引起中毒，危及生命。

硫化氢又是一种活性腐蚀剂，对管道、设备有较强的腐蚀性。硫化氢的燃烧产物二氧化硫也具有腐蚀性，能加速燃具、火孔等部位的腐蚀。硫化氢与二氧化碳、氧混合时，对金属

的腐蚀更为严重。

3. 萘

萘俗称“白片”，在干馏煤气中含量较多。由于煤气出厂时温度较高，萘成气态，随煤气输出。当气温下降时，处于饱和状态的气态萘便开始结晶析出，积聚于管道及设备内，影响煤气输送。特别是冬季气温骤降，由于萘结晶析出堵塞管道、设备，造成供应不良与供应中断事故。对煤气中含萘量的规定冬季与夏季有明显的区别。

4. 氨

干馏煤气中含有氨，它对管道、设备有腐蚀作用。氨燃烧后产生一氧化碳、二氧化碳等有害气体对人体有害。但氨对硫化物产生的酸类物质起中和作用，所以燃气中含有微量氨是有益于保护金属的。

二、燃气的质量要求

(一) 燃气的质量指标要求

(1) 城镇燃气（应按基准气分类）的发热量和组分的波动应符合城镇燃气互换的要求。

(2) 城镇燃气偏离基准气的波动范围宜按现行的国家标准《城市燃气分类》GB/T 13611的规定采用，并应适当留有余地。

(二) 采用不同种类的燃气作城镇燃气除应符合以上要求外，还应符合的要求

(1) 天然气的质量指标应符合下列要求：

1) 天然气发热量、硫和硫化氢总含量、水露点指标应符合现行国家标准《天然气》GB 17820的一类气或二类气的规定。

2) 在天然气交接点的压力和温度条件下：天然气的烃露点应比最低环境温度低 5℃；天然气中不应有固态、液态或胶状物质。

(2) 液化石油气质量指标应符合现行国家标准《油气田液化石油气》GB 9052.1 或《液化石油气》GB 11174 的规定。

(3) 人工煤气质量指标应符合现行国家标准《人工煤气》GB 13612 的规定。

(4) 液化石油气与空气的混合气作主气源时，液化石油气的体积分数应高于其爆炸上限的 2 倍，且混合气的露点温度应低于管道外壁温度 5℃。硫化氢含量不应大于 20mg/m³。

(5) 城镇燃气应具有可以察觉的臭味，燃气中加臭剂的最小量应符合下列规定：

1) 无毒燃气泄漏到空气中，达到爆炸下限的 20% 时，应能察觉。

2) 有毒燃气泄漏到空气中，达到对人体允许的有害浓度时，应能察觉。

对于以一氧化碳为主要成分的燃气，空气中一氧化碳的含量达到 0.02%（体积分数）时，应能察觉。

第四节 燃气常用仪表

一、常用的燃气计量表

常用的计量仪表较多。用于精确测量流量的有湿式气体流量计。用于民用及工业用户的燃气计量表，按构造的不同可分为皮膜表及罗茨表，按压力不同则有低压表及中压表。

(一) 湿式气体流量计

湿式流量计（图 1-2）简称湿式表，现有 0.25m³/h 及 0.5m³/h 两种规格，常用于实验室