

普通高等教育



“十五”

PUTONG  
GAODENG JIAOYU  
SHIWU  
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

# 燃气输配

马良涛 主编 韩晶 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

PUTONG

GAODENG JIAOYU

SHIWU

GUIHUA JIAOCAI

规划教材

# 燃 气 输 配

主 编  
副主编  
编 委  
主 审

江苏工业学院图书馆

马良涛

韩 晶

程义革

詹淑惠

藏 书 章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

973166

## 内 容 提 要

本书共分十二章,主要内容有:燃气的分类及其性质,城镇燃气需用量及供需平衡,燃气的长距离输送系统,城镇燃气输配系统,燃气管网的水力计算和水力工况,燃气管网的技术经济分析,燃气的压送和储存以及压力调节与计量,液化石油气储备站系统,液化石油气的气化和管道供应。

本书可作为高等学校建筑环境与设备工程、热能与动力工程、城镇燃气(暖通)工程等专业使用的教材,也可作为燃气工程设计、科研、施工和运行管理的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

燃气输配/马良涛主编. —北京:中国电力出版社,  
2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2039-5

I. 燃... II. 马... III. 煤气输配-高等学校-教材 IV. TU996.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第063897号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2004年8月第一版 2004年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.75印张 364千字

印数 0001—3000册 定价 23.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

## 序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

**中国电力教育协会**

二〇〇二年八月

# 前 言

城镇燃气化是城市现代化的重要标志之一。城镇燃气在发展生产、提高人民生活水平、节约能源、减轻污染、改善环境等方面起着重要作用。近年来，我国的燃气事业获得了迅速的发展，“西气东输”工程的实施，对城镇燃气输配的设计、施工、运行管理等提出了新的要求。本书较系统完整地叙述了城镇燃气输配的理论和方法，紧密结合专业和科学技术的发展，吸收了燃气输配技术的最新成果，遵循了我国的新规范，既注重基础知识，又加强了实用性。本书可作为建筑环境与设备工程、热能与动力工程、城镇燃气（暖通）工程等专业的教材，也可供从事燃气工程设计、科研、施工和运行管理的工程技术人员参考。

本书编写分工：第一、四、十一、十二章由马良涛编写；第二、三、五、六章由韩晶编写；第七~十章由罗义英编写。全书由马良涛担任主编，詹淑慧担任主审。有关专家、学者对本书提出了宝贵的意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，缺点、错误难免，恳请读者批评指正。

编 者

2004年6月

# 目 录

序	
前言	
<b>第一章 燃气的分类及其性质</b>	1
第一节 燃气的分类	1
第二节 燃气的基本性质	4
第三节 城镇燃气的质量要求	31
<b>第二章 城镇燃气需用量及供需平衡</b>	35
第一节 城镇燃气需用量	35
第二节 燃气的需用工况	38
第三节 燃气的小时计算流量	39
第四节 燃气输配系统的供需平衡	41
<b>第三章 燃气的长距离输送系统</b>	45
第一节 长距离输气系统的构成	45
第二节 输气管线及线路选择	49
<b>第四章 城镇燃气输配系统</b>	53
第一节 城镇燃气输配系统的组成	53
第二节 城镇燃气管网的分类及其选择	54
第三节 城镇燃气管道的布线	61
第四节 工业企业燃气管网系统	67
第五节 建筑燃气供应系统	71
第六节 燃气管道及其附属设备	73
第七节 钢燃气管道的防腐	80
<b>第五章 燃气管网的水力计算</b>	86
第一节 燃气管道的水力计算公式和图表	86
第二节 室内燃气管道水力计算	94
第三节 燃气分配管道计算流量	98
第四节 管网水力计算	101
<b>第六章 燃气管网的水力工况</b>	111
第一节 管网计算压力降的确定	111
第二节 低压管网的水力工况	116
<b>第七章 燃气管网的技术经济分析</b>	125
第一节 燃气管网的技术经济分析概述	125
第二节 城镇燃气输配方案经济性评价方法	127
第三节 燃气管网及调压站的费用计算	130

第四节	燃气输配系统经济技术分析举例	134
<b>第八章</b>	<b>燃气的压力调节与计量</b>	<b>136</b>
第一节	燃气压力调节过程	136
第二节	调压器的调节机构及传动装置	139
第三节	调压器通过能力计算	140
第四节	燃气调压器	145
第五节	调压器的选型计算	152
第六节	燃气调压站	154
第七节	燃气的计量	159
<b>第九章</b>	<b>燃气的压送</b>	<b>164</b>
第一节	压缩机的分类	164
第二节	活塞式压缩机	164
第三节	回转式压缩机	168
第四节	离心式压缩机	170
第五节	压缩机的选型	172
第六节	压缩机室	173
<b>第十章</b>	<b>燃气的储存</b>	<b>177</b>
第一节	储气设施的功能及分类	177
第二节	低压储气罐	178
第三节	高压储气罐	181
第四节	燃气储配站	185
第五节	天然气的液化及液态储存	190
第六节	燃气的地下储存	194
第七节	长输管线末端储气	196
<b>第十一章</b>	<b>液化石油气储配站供应系统</b>	<b>199</b>
第一节	供应系统概述	199
第二节	液化石油气的运输	200
第三节	液化石油气储配站	207
第四节	液化石油气的装卸、储存、灌装	212
<b>第十二章</b>	<b>液化石油气的气化和管道供应</b>	<b>223</b>
第一节	液化石油气的气化	223
第二节	液化石油气的管道供应	231
第三节	液化石油气混空气的管道供应	237
<b>参考文献</b>		<b>243</b>



# 第一章 燃气的分类及其性质

## 第一节 燃气的分类

燃气是由多种可燃气体和不可燃气体组成的混合气体。其中可燃气体有碳氢化合物、氢和一氧化碳等，不可燃气体有二氧化碳、氮和氧等。

随着燃气工业的发展，城镇燃气的种类越来越多。而确定城镇输配系统的压力级制、管径、燃气管网构筑物及防护和管理措施，都与燃气的种类有关；同时燃烧设备是按某一特定的燃气组分设计、制造的，虽然燃具能够适应燃气组分在一定范围的变化，但总有一个限度，若燃气的组分差异很大时，将引起燃烧特性的变化。所以从燃气输配、燃烧应用和燃气互换性方面考虑，为了使燃气输配企业和燃烧设备制造厂都遵守一个共同的准则，必须将燃气进行分类。

### 一、按气源分类

按燃气气源的种类，通常可把燃气分为天然气、人工燃气、液化石油气和生物质气等。

#### (一) 天然气

天然气一般可分为四种：从气井开采出来的气田气或称纯天然气；伴随石油一起开采出来的石油气，也称石油伴生气；含石油轻质馏分的凝析气田气；从井下煤层抽出的煤矿矿井气。

天然气主要是由低分子的碳氢化合物组成的混和物。气田气的组分以甲烷为主，甲烷含量在90%以上，还含有少量的二氧化碳、硫化氢、氮和微量的氦、氖、氩等气体。发热值约为33360~36300kJ/m<sup>3</sup>。石油伴生气的甲烷含量约为80%，乙烷、丙烷和丁烷等含量约为15%，低发热值约为41900kJ/m<sup>3</sup>。凝析气田气除含有大量甲烷外，还含有2%~5%戊烷及戊烷以上的碳氢化合物，低发热值约为48360kJ/m<sup>3</sup>。矿井气的主要可燃组分是甲烷，其含量随采气方式而变化，低发热值约为18840kJ/m<sup>3</sup>。

天然气既是制取合成氨、炭黑、乙炔等化工产品的原料气，又是优质燃料气，是理想的城镇气源。由于开采、储运和使用天然气既经济又方便，天然气工业在世界范围内有了很大的发展。21世纪初，天然气将取代石油成为主导的能源。有些天然气资源缺乏的国家通过进口天然气或液化天然气以发展城镇燃气事业。液态天然气的体积为气态时的1/600，有利于运输和储存。

我国天然气事业有很好的发展前景。在资源方面，我国有丰富的天然气资源量。包括：塔里木盆地，资源量超过5万亿m<sup>3</sup>；准噶尔盆地，鄂尔多斯盆地，资源量达1~3万亿m<sup>3</sup>；华北、渤海湾、四川、东海、珠江口、莺琼盆地、晋绥、楚雄、华北南部储量分别为0.3~0.9万亿m<sup>3</sup>。此外，在苏北、涩北、吐哈、柴达木都有大型天然气储藏。据估计，中国天然气储量超过30~40万亿m<sup>3</sup>，到目前已证实约2万亿m<sup>3</sup>。我国天然气资源探明程度一直很低，20世纪80年代开始，我国加强了天然气的勘探开发。目前投入开发的有：塔里木、四川、

陕甘宁、莺琼、东海等盆地。在开发计划方面，国家已把发展天然气长输管道列入全国重点基础建设项目，实施“西气东输”工程。到2010年，我国天然气年需求量将达 $1200 \times 10^8 \text{m}^3$ ，规划建设天然气管道约7000km，向长江下游总供气量达到每年190亿 $\text{m}^3$ 。天然气事业的发展，展示了我国城镇燃气事业的光明前途。

## (二) 人工燃气

人工燃气是指从固体或液体燃料加工所生产的可燃气体。根据制气原料和加工方式的不同，可生产多种类型的人工燃气。

### 1. 固体燃料干馏煤气

利用焦炉、连续式直立炭化炉和立箱炉等对煤进行干馏所获得的煤气称为干馏煤气。

用干馏方式生产煤气，每吨煤可产煤气 $300 \sim 400 \text{m}^3$ 。这类煤气中甲烷和氢的含量较高，低发热值一般在 $16700 \text{kJ}/\text{m}^3$ 左右。干馏煤气的生产历史最长，目前是我国一些城镇燃气的重要气源之一。

### 2. 固体燃料气化煤气

压力气化煤气、水煤气、发生炉煤气等均属此类。

(1) 压力气化煤气。在 $2.0 \sim 3.0 \text{MPa}$ 的压力下，以煤作原料采用纯氧和水蒸气为气化剂，可获得高压气化煤气。其主要组分为氢和甲烷，发热值在 $15100 \text{kJ}/\text{m}^3$ 左右。若城市附近有褐煤或长焰煤资源，可采用鲁奇炉生产压力气化煤气，这套装置可建立在煤矿附近（一般称为坑口气化），不需另外设置压送设备，用管道可直接将燃气输送至较远城镇作为城镇燃气使用。

(2) 水煤气和发生炉煤气。主要组分为一氧化碳和氢。水煤气的发热值为 $10500 \text{kJ}/\text{m}^3$ 左右，发生炉煤气的发热值为 $5400 \text{kJ}/\text{m}^3$ 左右。由于这两种燃气的发热值低，而且毒性大，不可以单独作为城镇燃气的气源，但可用来加热焦炉和连续式直立炭化炉，以顶替出发热值较高的干馏煤气，增加供应城镇的气量，也可以和干馏煤气、重油蓄热裂解气掺混，调节供气量和调整燃气发热值，作为城镇燃气的补充和调峰气源。

### 3. 油制气

可以利用重油（炼油厂提取汽油、煤油和柴油之后所剩的油品）制取城镇燃气。

按制取方法不同，可分为重油蓄热热裂解气和重油蓄热催化裂解气两种。重油蓄热热裂解气以甲烷、乙烯和丙烯为主要组分，发热值约为 $41900 \text{kJ}/\text{m}^3$ 。每吨重油的产气量为 $500 \sim 550 \text{m}^3$ 。重油蓄热催化裂解气中氢的含量最多，也含有甲烷和一氧化碳，发热值在 $17600 \sim 20900 \text{kJ}/\text{m}^3$ 左右，利用三筒炉催化裂解装置，每吨重油的产气量约为 $1200 \sim 1300 \text{m}^3$ 。

生产油制气的装置简单，投资省，占地少，建设速度快，管理人员少，启动、停炉灵活，既可作城镇燃气的基本气源，也可作城镇燃气的调度气源。

中、小燃气厂也可以石脑油（粗汽油）作为制气原料，与重油相比，石脑油有如下优点：含硫少，不生成焦油，烟尘及污水等公害问题少，气化效率高，而且石脑油催化裂解制气转换一氧化碳也比较简单。

### 4. 高炉煤气

高炉煤气是冶金工厂炼铁时的副产气，主要组分是一氧化碳和氮气，发热值约为 $3800 \sim$

4200kJ/m<sup>3</sup>。

高炉煤气可用作炼焦炉的加热煤气，以取代焦炉煤气，将焦炉煤气供应城市。高炉煤气也常用作锅炉的燃料或与焦炉煤气掺混用于冶金工厂的加热工艺。

### (三) 液化石油气

液化石油气是开采和炼制石油过程中，作为副产品而获得的一部分碳氢化合物。

目前国产的液化石油气主要来自炼油厂的催化裂化装置。液化石油气产量通常约占催化裂化装置处理量的7%~8%。液化石油气的主要成分是丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)、丙烯(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>)、丁烷(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)和丁烯(C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>)，习惯上又称C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>，即只用烃的碳原子(C)数表示。这些碳氢化合物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。从气态转变为液态，其体积约缩小250倍。气态液化石油气的发热值约为92100~121400kJ/m<sup>3</sup>。液态液化石油气的发热值约为45200~46100kJ/kg。

液化石油气中的烯烃部分可作化工原料，而其烷烃部分可用作燃料。近年来，国外不少城市还用它作为汽车燃料，该项技术在我国也得到了重视和开发。由于在燃气事业中，发展液化石油气投资省、设备简单、供应方式灵活、建设速度快，所以液化石油气供应事业发展很快。

### (四) 生物质气

各种有机物质，如蛋白质、纤维素、脂肪、淀粉等，在隔绝空气的条件下发酵，并在微生物的作用下产生的可燃气体，叫做生物质气(沼气)。发酵的原料是取之不尽、用之不竭的粪便、垃圾、杂草和落叶等有机物质，因此生物质气属于可再生能源。生物质气的组分中甲烷的含量约为60%，二氧化碳约为35%，此外，还含有少量的氢、一氧化碳等气体。生物质气的发热值约为21770kJ/m<sup>3</sup>。各种燃气的组分及低发热值举例见表1-1。

表 1-1 燃气的组分及低发热值

序号	燃气类别	组分(体积%)									低发热值 (kJ/m <sup>3</sup> )
		CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
—	天然气										
1	纯天然气	98	0.3	0.3	0.4					1.0	36220
2	石油伴生气	81.7	6.2	4.86	4.94			0.3	0.2	1.8	45470
3	凝析气田气	74.3	6.75	1.88	14.9			1.62		0.55	48360
4	矿井气	52.4						4.6	7.0	36.0	18840
二	人工燃气										
(一)	固体燃料干馏煤气										
1	焦炉煤气	27			2	6	56	3	1	5	18250
2	连续式直立炭化炉煤气	18			1.7	17	56	5	0.3	2	16160
3	立箱炉煤气	25				9.5	55	6	0.5	4	16120
(二)	固体燃料气化煤气										
1	压力气化煤气	18			0.7	18	56	3	0.3	4	15410
2	水煤气	1.2				34.4	52.0	8.2	0.2	4.0	10380
3	发生炉煤气	1.8		0.4		30.4	8.4	2.4	0.2	56.4	5900
(三)	油制气										
1	重油蓄热热裂解气	34.0	8.3	1.5	28.7	3.8	16.7	3.6	0.4	3.0	41530
2	重油蓄热催化裂解气	16.6			5	17.2	46.5	7.0	1.0	6.7	17540
(四)	高炉煤气	0.3				28.0	2.7	10.5		58.5	3940
三	液化石油气(概略值)		50	50							108440
四	生物质气(沼气)	60				少量	少量	35	少量		21770

## 二、按燃烧特性分类

燃气性质中影响燃烧特性的参数主要有燃气的热值  $H$ 、相对密度  $s$  及火焰传播速度（即燃烧速度）。为此导出与热值和相对密度有关的综合系数，即华白指数  $W$  ( $W = H/\sqrt{s}$ )。在压力不变的情况下，华白指数作为燃具相对热负荷的一个度量，是设计或选用燃具的重要依据。很多国家（如英国、法国、前苏联等）按华白指数对燃气进行分类，国际煤气联盟（IGU）也制订了按华白指数对燃气进行分类的标准，见表 1-2。

表 1-2 国际煤气联盟（IGU）燃气分类

分 类	华白指数 ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )	典型燃气
一类燃气	17.8 ~ 35.8	人工燃气
二类燃气	35.8 ~ 53.7	天然气
L 族	35.8 ~ 51.6	
H 族	51.6 ~ 53.7	
三类燃气	71.5 ~ 87.2	液化石油气

当燃气的组分和性质变化较大，或者掺入的燃气与原来的燃气性质相差较远时，燃气的燃烧速度会发生较大的变化，仅用华白指数分类也不能满足设计需要，因而又提出燃烧速度指数——燃烧势  $C_p$ 。它反映了燃气燃烧火焰所产生离焰、黄焰、回火和不完全燃烧的倾向性，是一项反映燃具燃烧稳定状况的综合指标，能更全面地判断燃气的燃烧特性。

根据我国当前主要的城镇气源分布情况，参照 IGU 燃气分类以及一些国家的相应标准，制订了我国“城镇燃气分类”标准。分类指标是国际上广泛采用的华白指数和燃烧势。表 1-3 列出了三大族十一类燃气的华白指数及燃烧势的标准和允许波动范围。

表 1-3 我国燃气分类及燃烧特性值

族 类	类别号	华白指数 ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )		燃 烧 势	
		标准值	波动范围	标准值	波动范围
人工气	5R	22.7	21.1 ~ 24.3	94	55 ~ 96
	6R	27.1	25.2 ~ 29.0	108	63 ~ 110
	7R	32.7	30.4 ~ 34.9	121	72 ~ 128
天然气	4T	18.0	16.7 ~ 19.3	25	22 ~ 57
	6T <sup>①</sup>	26.4	24.5 ~ 28.2	29	25 ~ 65
	10T	43.8	41.2 ~ 47.3	33	31 ~ 34
	12T	53.5	48.1 ~ 57.8	40	36 ~ 88
	13T	56.5	54.3 ~ 58.8	41	40 ~ 94
液化石油气	19Y	81.2	76.9 ~ 92.7	48	42 ~ 49
	20Y	84.2	76.9 ~ 92.7	46	42 ~ 49
	22Y	92.7	76.9 ~ 92.7	42	42 ~ 49

① 6T 为液化石油气混空气，燃烧特性接近天然气。

## 第二节 燃气的基本性质

燃气组成中常见的低级烃和某些单一气体的基本性质分别列于表 1-4 和表 1-5 中。这

里主要介绍混合气体和混合液体的基本特性。

表 1-4 某些低级烃的基本性质[273.15K、101325Pa]

气 体	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	正戊烷
分子式	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
分子量 $M$	16.0430	30.0700	28.0540	44.0970	42.0810	58.1240	58.1240	72.1510
摩尔容积 $V_M$ (m <sup>3</sup> /kmol)	22.3621	22.1872	22.2567	21.9362	21.990	21.5036	21.5977	20.981
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.7174	1.3553	1.2605	2.0102	1.9136	2.7030	2.6912	3.4537
气体常数 $R$ [kJ/(kg·K)]	517.1	273.7	294.3	184.5	193.8	137.2	137.8	107.3
临界参数								
临界温度 $T_c$ (K)	191.05	305.45	282.95	368.85	364.75	425.95	407.15	470.35
临界压力 $p_c$ (MPa)	4.6407	4.8839	5.3398	4.3975	4.7623	3.6173	3.6578	3.3437
临界密度 $\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	162	210	220	226	232	225	221	232
发热值								
高热值 $H_h$ (MJ/m <sup>3</sup> )	39.842	70.351	63.438	101.266	93.667	113.886	113.048	169.377
低发热值 $H_l$ (MJ/m <sup>3</sup> )	35.902	64.397	59.477	93.240	87.667	123.649	112.853	156.733
爆炸极限								
爆炸下限 $L_s$ (体积%)	5.0	2.9	2.7	2.1	2.0	1.5	1.8	1.4
爆炸上限 $L_u$ (体积%)	15.0	13.0	34.0	9.5	11.7	8.5	8.5	8.3
粘度								
动力粘度 $\mu \times 10^6$ (Pa·s)	10.395	8.600	9.316	7.502	7.649	6.835		6.355
运动粘度 $\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	14.50	6.41	7.46	3.81	3.99	2.53		1.85
无因次系数 $C$	164	252	225	278	321	377	368	383

表 1-5 某些气体的基本性质[273.15K、101325Pa]

气 体	一氧化碳	氢	氮	氧	二氧化碳	硫化氢	空气	水蒸气
分子式	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S		H <sub>2</sub> O
分子量 $M$	28.0104	2.0160	28.0134	31.9988	44.0098	34.076	28.966	18.0154
摩尔容积 $V_M$ (m <sup>3</sup> /kmol)	22.3984	22.427	22.403	22.3923	22.2601	22.1802	22.4003	21.629
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.2506	0.0899	1.2504	1.4291	1.9771	1.5363	1.2931	0.833
气体常数 $R$ [kJ/(kg·K)]	296.63	412.664	296.66	259.585	188.74	241.45	286.867	445.357
临界参数								
临界温度 $T_c$ (K)	133.0	33.30	126.2	154.8	304.2		132.5	647.3
临界压力 $p_c$ (MPa)	3.4957	1.2970	3.3944	5.0764	7.3866		3.7663	22.1193
临界密度 $\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	300.86	31.015	310.91	430.09	468.19		320.07	321.70
发热值								
高热值 $H_h$ (MJ/m <sup>3</sup> )	12.636	12.745				25.348		
低发热值 $H_l$ (MJ/m <sup>3</sup> )	12.636	10.786				23.368		
爆炸极限								
爆炸下限 $L_s$ (体积%)	12.5	4.0				4.3		
爆炸上限 $L_u$ (体积%)	74.2	75.9				45.5		
粘度								
动力粘度 $\mu \times 10^6$ (Pa·s)	16.573	8.355	16.671	19.417	14.023	11.670	17.162	8.434
运动粘度 $\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	13.30	93.0	13.30	13.60	7.09	7.63	13.40	10.12
无因次系数 $C$	104	81.7	112	131	266		122	

## 一、混合气体及混合液体的平均分子量、平均密度和相对密度

### (一) 平均分子量

混合气体的平均分子量可按式(1-1)计算,即

$$M = \frac{1}{100}(y_1 M_1 + y_2 M_2 + \cdots + y_n M_n) \quad (1-1)$$

式中  $M$ ——混合气体平均分子量；  
 $y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各单一气体容积成分 (%)；  
 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——各单一气体分子量。

混合液体平均分子量可按式 (1-2) 计算，即

$$M = \frac{1}{100}(x_1 M_1 + x_2 M_2 + \cdots + x_n M_n) \quad (1-2)$$

式中  $M$ ——混合液体平均分子量；  
 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——各单一液体分子成分 (%)；  
 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——各单一液体分子量。

## (二) 平均密度和相对密度

混合气体平均密度和相对密度按式 (1-3) 计算，即

$$\rho = \frac{M}{V_M} \quad (1-3)$$

$$S = \frac{\rho}{1.293} = \frac{M}{1.293 V_M} \quad (1-4)$$

式中  $\rho$ ——混合气体平均密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；  
 $V_M$ ——混合气体平均摩尔容积 ( $\text{m}^3/\text{kmol}$ )；  
 $S$ ——混合气体相对密度 (空气为 1)；  
 1.293——标准状态下空气的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

对于由双原子气体和甲烷组成的混合气体，标准状态下的  $V_M$  可取  $22.4 \text{m}^3/\text{kmol}$ ；对于由其他碳氢化合物组成的混合气体， $V_M$  则取  $22 \text{m}^3/\text{kmol}$ 。若要精确计算，可采用式 (1-5)，即

$$V_M = \frac{1}{100}(y_1 V_{M_1} + y_2 V_{M_2} + \cdots + y_n V_{M_n}) \quad (1-5)$$

式中  $V_{M_1}, V_{M_2}, \cdots, V_{M_n}$ ——各单一气体摩尔体积 ( $\text{m}^3/\text{kmol}$ )

混合气体平均密度还可根据单一气体密度及容积成分按式 (1-6) 计算，即

$$\rho = \frac{1}{100}(y_1 \rho_1 + y_2 \rho_2 + \cdots + y_n \rho_n) \quad (1-6)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——标准状态下各单一气体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

燃气通常含有水蒸气，则湿燃气密度可按式 (1-7) 计算，即

$$\rho^* = (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-7)$$

式中  $\rho^*$ ——湿燃气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；  
 $\rho$ ——干燃气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；  
 $d$ ——水蒸气含量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$  干燃气)；  
 0.833——水蒸气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

干、湿燃气容积成分按式 (1-8) 换算, 即

$$y_i^w = ky_i \quad (1-8)$$

$$k = \frac{0.833}{0.833 + d}$$

式中  $y_i^w$ ——湿燃气容积成分 (%);

$y_i$ ——干燃气容积成分 (%);

$k$ ——换算系数。

几种燃气的密度和相对密度 (即平均密度和平均相对密度) 列于表 1-6。

由表 1-6 可知, 天然气、焦炉煤气都比空气轻, 而气态液化石油气约比空气重一倍。

混合液体平均密度与 101325Pa、277K 时水的密度之比称为混合液体相对密度。在常温下, 液态液化石油气的密度是  $500\text{kg/m}^3$  左右, 约为水的 1/2。

表 1-6 几种燃气的密度和相对密度

燃气种类	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	相对密度
天然气	0.75~0.8	0.58~0.62
焦炉煤气	0.4~0.5	0.3~0.4
气态液化石油气	1.9~2.5	1.5~2.0

### (三) 计算例题

**【例 1-1】** 已知干燃气的容积成分为甲烷 27%, 一氧化碳 6%, 氢气 56%, 二氧化碳 3%, 氧气 1%, 氮气 5%,  $\text{C}_m\text{H}_n$  (按丙烯) 2%。求混合气体平均分子量、平均密度和相对密度。若含湿量为  $0.002\text{kg/m}^3$  干燃气, 求湿燃气的容积成分及其平均密度。

解

1. 由表 1-4、表 1-5 查得各组分分子量, 按式 (1-1) 求混合气体平均分子量

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{100} \sum y_i m_i \\ &= \frac{1}{100} \times (27 \times 16.043 + 6 \times 28.0104 + 56 \times 2.016 + 3 \\ &\quad \times 44.0098 + 1 \times 31.9988 + 5 \times 28.0134 + 2 \times 42.081) \\ &= 11.0238 \end{aligned}$$

2. 由表 1-4、表 1-5 查得各组分密度, 按式 (1-6) 求混合气体平均密度

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \\ &= \frac{1}{100} \times (27 \times 0.7174 + 6 \times 1.2506 + 56 \times 0.0899 + 3 \times 1.9771 \\ &\quad + 1 \times 1.4291 + 5 \times 1.2504 + 2 \times 1.9136) \\ &= 0.493(\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

3. 按式 (1-4) 求混合气体相对密度

$$S = \frac{\rho}{1.293} = \frac{0.493}{1.293} = 0.381$$

4. 湿燃气的容积成分

首先确定换算系数,  $k = \frac{0.833}{0.833 + d} = \frac{0.833}{0.833 + 0.002} = 0.9976$

按式(1-8)求湿燃气的容积成分,  $y_{\text{CH}_4}^{\text{W}} = ky_{\text{CH}_4} = 0.9976 \times 27\% = 26.935\%$

依次可得:  $y_{\text{CO}}^{\text{W}} = 5.986\%$ ,  $y_{\text{H}_2}^{\text{W}} = 55.866\%$ ,  $y_{\text{CO}_2}^{\text{W}} = 2.993\%$ ,  $y_{\text{O}_2}^{\text{W}} = 0.998\%$

$y_{\text{N}_2}^{\text{W}} = 4.988\%$ ,  $y_{\text{C}_m\text{H}_n}^{\text{W}} = 1.995\%$ , 而  $y_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{W}} = \frac{d}{0.833} k \times 100 = 0.240\%$

5. 湿燃气的平均密度按(1-7)计算

$$\begin{aligned} \rho^{\text{W}} &= (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \\ &= (0.493 + 0.002) \frac{0.833}{0.833 + 0.002} \\ &= 0.494 (\text{kg}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

## 二、临界参数及实际气体状态方程

### (一) 临界参数

温度不超过某一数值, 对气体进行加压, 可以使气体液化, 而在该温度以上, 无论加多大压力都不能使气体液化, 这个温度就叫该气体的临界温度。在临界温度下, 使气体液化所必须的压力叫做临界压力。

图 1-1 所示为在不同温度下对气体加压时, 其压力和体积的变化情况。

当从 E 点开始压缩时至 D 点开始液化, 到 B 点液化完成; 而当气体从 F 点开始压缩时至 C 点开始液化, 但此时没有相当于 BD 直线部分, 其液化的状态与前者不同。C 点为临界点。

气体在 C 点所处的状态称为临界状态, 它既不属于气相, 也不属于液相。这时的温度  $T_c$ 、压力  $p_c$ 、比容  $v_c$ 、密度  $\rho_c$  分别叫做临界温度、临界压力、临界比容和临界密度。在图 1-1 中, NDCG 线的右边是气体状态, MBCG 线的左边是液体状态, 而在 MCN 线以下为气液共存状态, CM 和 CN 为边界线。

气体的临界温度越高, 越易液化。天然气主要成分甲烷的临界温度低, 故较难液化; 而组成液化石油气的碳氢化合物的临界温度较高, 故较易液化。

几种气体的液态—气态平衡曲线如图 1-2 所示。

图 1-2 中的曲线是蒸汽和液体

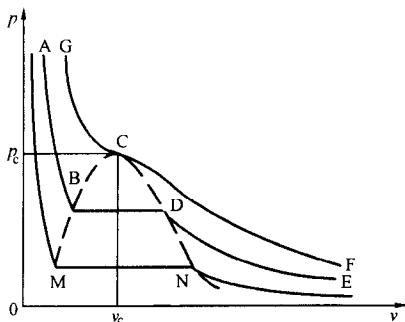


图 1-1 临界状态

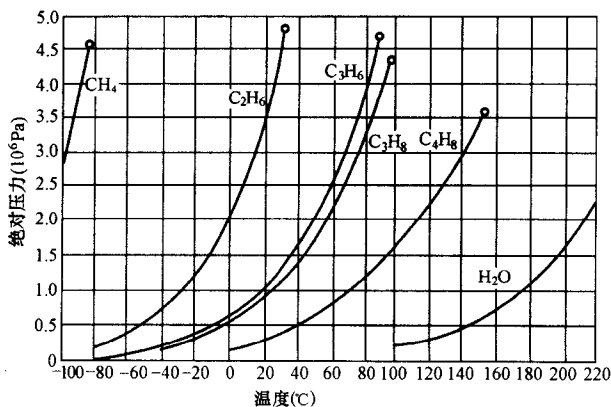


图 1-2 几种气体的液态—气态平衡曲线



的分界线，曲线左侧为液态，右侧为气态。

由图 1-2 可知，气体温度比临界温度越低，则液化所需压力越小。例如 20℃ 时，使丙烷液化的绝对压力为 0.846MPa，而当温度为 -20℃ 时，在 0.248MPa 绝对压力下即可液化。

混合气体的平均临界压力和平均临界温度按式 (1-9) 和式 (1-10) 计算，即

$$p_{m.c} = \frac{1}{100}(y_1 p_{c_1} + y_2 p_{c_2} + \cdots + y_n p_{c_n}) \quad (1-9)$$

$$T_{m.c} = \frac{1}{100}(y_1 T_{c_1} + y_2 T_{c_2} + \cdots + y_n T_{c_n}) \quad (1-10)$$

式中  $p_{m.c}$ 、 $T_{m.c}$ ——混合气体的平均临界压力 (MPa) 和平均临界温度 (K)；

$p_{c_1}$ 、 $p_{c_2}$ 、 $\cdots$ 、 $p_{c_n}$ ——各组分的临界压力 (MPa)；

$T_{c_1}$ 、 $T_{c_2}$ 、 $\cdots$ 、 $T_{c_n}$ ——各组分的临界温度 (K)；

$y_1$ 、 $y_2$ 、 $\cdots$ 、 $y_n$ ——各组分的容积成分 (%)。

### (二) 实际气体状态方程

当燃气压力低于 1MPa 和温度在 10~20℃ 时，在工程上还可当作理想气体。当压力很高 (如在天然气的长输管线中)、温度很低时，用理想气体状态方程进行计算所引起的误差将很大。实际工程中，在理想气体状态方程中引入考虑气体压缩性的压缩因子  $Z$ ，可以得到实际气体状态方程

$$pv = ZRT \quad (1-11)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力 (Pa)；

$v$ ——气体的比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$Z$ ——压缩因子；

$R$ ——气体常数 [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]；

$T$ ——气体的热力学温度 (K)。

压缩因子  $Z$  是随温度和压力而变化。压缩因子  $Z$  值可由图 1-3 和图 1-4 确定。

图 1-3 和图 1-4 都是按对比温度和对比压力制作的。所谓对比温度  $T_r$ ，就是工作温度  $T$  与临界温度  $T_c$  的比值，而对比压力  $p_r$ ，就是工作压力  $p$  与临界压力  $p_c$  的比值。此处温度为热力学温度，压力为绝对压力，即

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad p_r = \frac{p}{p_c} \quad (1-12)$$

对于混合气体，在确定  $Z$  值之前，首先要按式 (1-9)、式 (1-10) 确定平均临界压力和平均临界温度，然后再按图 1-3、图 1-4 求得压缩因子  $Z$ 。

### (三) 计算例题

**【例 1-2】** 有一内径为 900mm、长为 115km 的天然气管道。当天然气的平均压力为 3.04MPa、温度为 278K，求管道中的天然气在标准状态下 (101325Pa、273.15K) 的体积。已知天然气的容积成分为甲烷 97.5%，乙烷 0.2%，丙烷 0.2%，氮气 1.6%，二氧化碳 0.5%。

解

#### 1. 天然气的平均临界温度和平均临界压力