

高校建筑环境与设备工程学科
专业指导委员会推荐教材

GAO XIAO
JIAN ZHU
HUAN JING YU
SHE BEI
GONG CHENG
XUE KE
ZHUAN YE
ZHI DAO WEI
YUAN HUI TUI
JIAN JIAO CAI

燃气输配

(第三版)

段常贵 主编
王民生 主审

中国建筑工业出版社

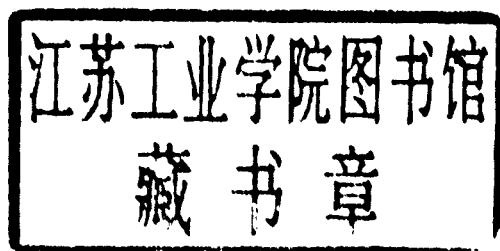
高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

燃 气 输 配

(第三版)

段常贵 主编

王民生 主审



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气输配/段常贵主编, —3版.—北京: 中国建筑工业出版社, 2001

(高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材)

ISBN 7-112-04640-8

I. 燃… II. 段… 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(2001)第 051945 号

本书内容包括: 燃气的分类及其性质; 城市燃气需用量及供需平衡; 燃气的长距离输送系统; 城市燃气管网系统; 燃气管道及其附属设备; 燃气管网的水力计算; 燃气管网的水力工况; 燃气管网的技术经济计算; 燃气的压力调节及计量; 燃气的压送; 燃气的储存; 液化石油气储配站; 液化石油气的管道供应等。

本书也可供从事城市和工业企业燃气输配的设计、科研以及运行管理的工程技术人员参考。

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

燃 气 输 配

(第三版)

段常贵 主编

王民生 主审

*

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

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 424 千字

2001 年 12 月第三版 2004 年 3 月第十一次印刷

印数: 43881-46880 册 定价: 24.30 元

ISBN 7-112-04640-8

TU·4110 (10090)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

第三版前言

从第二版《燃气输配》教材发行至今，已过去了十余年。在这期间，我国的城市燃气事业发展迅速，正在实施的“西气东输”战略工程对从事城市燃气输配的设计、科研以及运行管理的工程技术人员提出了更高的要求。燃气输配技术特别是天然气及液化石油气管道供应技术取得了长足的进步，而以人工气为气源的输配系统还要保留一定的时期。另一方面，原“城市燃气热能供应工程专业”已调整合并为“建筑环境与设备专业”，城市燃气是专业方向之一。为适应这一变化，在总结多年教学经验的基础上，本书在章、节上进行了调整，对部分内容作了补充和更新，对有些内容进行了删减。

本教材第一章由严铭卿编写；第二章、第六章、第七章由张同编写；第三章、第四章、第五章由彭世尼编写；第八章、第九章、第十章、第十一章由段常贵编写；第十二章、第十三章由严铭卿、段常贵共同编写。

本书由段常贵担任主编。王民生担任主审。承主审细致审阅，提出许多宝贵意见。

由于编写水平所限，书中的错误和不妥之处希望读者予以批评指正。

编者

2001.5

第二版前言

本书是根据 1986 年 9 月供热通风及燃气类教材编审委员会的决定，在第一版的基础上进行修订的。

在修订中，考虑到本书自第一版发行 6 年来，燃气输配技术的发展及教学需要的情况，在总结教学经验的基础上，对部分内容作了补充和更新，对有些内容进行了删简。

参加本书第二版的编写人员有：薛世达、朱芝芬、段常贵、张士文、黄箴、唐国堃、王民生、李淑媛、黎光华、刘永志。本书由薛世达和王民生主编，由中国市政工程华北设计院李猷嘉主审。

恳请读者对本书内容批评指正。

编者
1987.6

第一版前言

本书是根据城市燃气热能供应工程专业“燃气输配”教材大纲编写的，使用学时数为80学时。

提高气体燃料在能源结构中的比重，对实现四个现代化有重要意义。发展城市燃气事业，是合理有效利用能源、保护城市环境，防止大气污染、促进生产和改善人民生活条件的重要措施之一。城市燃气输配系统的规划、设计、建造和管理，应达到技术先进、经济合理和安全可靠的要求，以保证居民和工业企业正常的用气需要。

本书内容结合我国燃气输配工程的生产实际，并注意吸收国外燃气输配的先进技术。

本书由哈尔滨建筑工程学院、北京建筑工程学院和同济大学三院校的城市燃气热能供应工程教研室合编。编写人员有：哈尔滨建筑工程学院薛世达、朱芝芬、段常贵、张士文、黄箴、唐国堃；北京建筑工程学院王民生、刘永耀；同济大学李淑媛。由薛世达和王民生担任主编。

本书承国家城建总局天津市政工程设计院李猷嘉细致审阅，提出许多宝贵意见。又承重庆建筑工程学院、天津市政工程设计院、北京市公用局、上海市公用局、北京市煤气热力设计所、北京市公用事业科学研究所、北京市城气公司、上海市煤气公司、天津市煤气事业管理处、哈尔滨市煤气公司和大庆石油设计研究院等单位的有关教师和科技人员，提给许多资料和宝贵意见，在此致以衷心感谢。由于编者水平所限，书中错误和不妥之处，希望读者予以批评指正。

编者
1980.7

目 录

第一章 燃气的分类及其性质	1
第一节 燃气的分类及用途	1
第二节 燃气的基本性质	4
第三节 城市燃气的质量要求	30
第二章 城市燃气需用量及供需平衡	33
第一节 城市燃气需用量	33
第二节 燃气需用工况	36
第三节 燃气输配系统的小时计算流量	39
第四节 燃气输配系统的供需平衡	41
第三章 燃气的长距离输送系统	47
第一节 长距离输气系统的构成	47
第二节 输气干线及线路选择	52
第四章 城市燃气管网系统	55
第一节 城市燃气管网的分类及其选择	55
第二节 城市燃气管道的布线	61
第三节 工业企业燃气管网系统	65
第四节 建筑燃气供应系统	68
第五章 燃气管道及其附属设备	73
第一节 管材及其连接方式	73
第二节 燃气管道的附属设备	75
第三节 钢制燃气管道的防腐	79
第六章 燃气管网的水力计算	85
第一节 管道内燃气流动的基本方程式	85
第二节 城市燃气管道水力计算公式和计算图表	93
第三节 燃气分配管网计算流量	102
第四节 管网水力计算	107
第七章 燃气管网的水力工况	119
第一节 管网计算压力降的确定	119
第二节 低压管网的水力工况	125
第三节 高、中压环网的水力可靠性	130
第四节 低压环网的水力可靠性	133
第八章 燃气管网的技术经济计算	142
第一节 技术经济计算的任务和方案比较方法	142

第二节	燃气调压站的最佳作用半径	146
第三节	枝状燃气管网的技术经济计算	151
第九章	燃气的压力调节及计量	158
第一节	燃气压力调节过程	158
第二节	调压器的调节机构及传动装置	162
第三节	燃气调压器	170
第四节	燃气调压站	174
第五节	燃气的计量	179
第十章	燃气的压送	184
第一节	活塞式压缩机	184
第二节	回转式压缩机	189
第三节	离心式压缩机	191
第四节	压缩机的排气温度及功率计算	192
第五节	变工况工作与流量的调节	197
第六节	压缩机室	202
第十一章	燃气的储存	206
第一节	低压湿式罐	206
第二节	低压干式罐	209
第三节	高压储气罐	213
第四节	燃气储配站	218
第五节	长输管线及高压管道储气能力的计算	221
第六节	液化石油气的降温储存	223
第七节	天然气的液化及液态储存	224
第八节	燃气的地下储存	228
第十二章	液化石油气储配站	231
第一节	液化石油气的运输	231
第二节	液化石油气储罐的规格及阀件	237
第三节	液化石油气的装卸方式	241
第四节	液化石油气的灌装	242
第五节	液化石油气储配站的工艺流程及平面布置	248
第十三章	液化石油气的管道供应	254
第一节	液化石油气的气化	254
第二节	液化石油气的管道供应	264
第三节	液化石油气混空气的管道供应	266
参考文献	270

第一章 燃气的分类及其性质

第一节 燃气的分类及用途

城市民用和工业用燃气是由几种气体组成的混合气体，其中含有可燃气体和不可燃气体。可燃气体有碳氢化合物、氢和一氧化碳，不可燃气体有二氧化碳、氮和氧等。

燃气的种类很多，主要有天然气、人工燃气、液化石油气和沼气。

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。

纯天然气（简称天然气）的组分以甲烷为主，还含有少量的二氧化碳、硫化氢、氮和微量的氦、氖、氩等气体。我国四川天然气中甲烷含量一般不少于 90%，发热值为 34800~36000kJ/Nm³①。我国大港地区的天然气为石油伴生气，甲烷含量约为 80%，乙烷、丙烷和丁烷等含量约为 15%，发热值约为 41900kJ/Nm³。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。矿井气的主要可燃组分是甲烷，其含量随采气方式而变化。

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，是理想的城市气源。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市燃气事业。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 万亿立方米，准噶尔盆地，鄂尔多斯盆地，资源量达 1~3 万亿立方米，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 万亿立方米。此外，在苏北、涩北、吐哈、柴达木都有大型天然气储藏。估计，中国天然气储量超过 30~40 万亿立方米，到目前已证实约 2 万亿立方米。我国天然气资源探明程度一直很低。20 世纪 80 年代开始，加强了天然气的勘探开发。目前投入开发的有：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，实现西气东输。到 2010 年，规划建设天然气管道约 7000 公里，向长江下游总供气量达到每年 190 亿立方米。天然气事业的发展，展示了我国城市民用和工业燃气的光明前途。

① 本书以 273.15K、101325Pa 时的状态为标准状态。标准状态下的容积单位以标准立方米 (Nm³) 表示。

二、人工燃气

(一) 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 $16700\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右。干馏煤气的生产历史最长，目前我国若干城市燃气的重要气源之一。

(二) 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。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，可获得高压蒸气氧鼓风煤气，也叫高压气化煤气。其主要组分为氢及含量较高的甲烷，发热值在 $15100\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 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市燃气使用。

水煤气和发生炉煤气的主要组分为一氧化碳和氢。水煤气的发热值为 $10500\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右，发生炉煤气的发热值为 $5400\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 左右。由于这两种燃气的发热值低，而且毒性大，不可以单独作为城市燃气的气源，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，增加供应城市的气量，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，作为城市燃气的调度气源。发生炉煤气还可作工厂及燃气轮机的燃料。

(三) 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）制取城市燃气。

按制取方法不同，可分为重油蓄热裂解气和重油蓄热催化裂解气两种。重油蓄热裂解气以甲烷、乙烯和丙烯为主要组分，发热值约为 $41900\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。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 $17600 \sim 20900\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 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，既可作城市燃气的基本气源，也可作城市燃气的调度气源。

中、小燃气厂也可以石脑油（粗汽油）作为制气原料，因与重油相比，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。

(四) 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 $3800 \sim 4200\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。

高炉煤气可用作炼焦炉的加热煤气，以取代焦炉煤气，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 $7\% \sim 8\%$ 。

液化石油气的主要成分是丙烷 (C₃H₈)、丙烯 (C₃H₆)、丁烷 (C₄H₁₀) 和丁烯 (C₄H₈)，习惯上又称 C₃、C₄，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/Nm³。液态液化石油气的发热值约为 45200~46100kJ/kg。

液化石油气中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。

液化石油气与天然气不同，属于二次能源。因此液化石油气的资源量取决于石油炼制能力和实际规模。由于液化石油气还来源于天然气的生产，因而也与天然气的开发有一定联系。

四、沼气

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，叫做沼气 (生物气)。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，因此沼气属于可再生能源。沼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。发热值约为 20900kJ/Nm³。

各种燃气的组分及低发热值举例见表 1-1。

燃气的组分及低发热值

表 1-1

序号	燃气类别	组 分 (体积%)								低发热值 (kJ/Nm ³)	
		CH ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _m H _n	CO	H ₂	CO ₂	O ₂		N ₂
一	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	1.87	14.91			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	28.5			32.17	2.68	31.51	2.13	0.62	2.39	42160
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	沼气 (生物气)	60				少量	少量	35	少量		21770

确定城市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，都与所使用燃气的种类有关。城市燃气在管道中输送的距离较长，管道的造价及金属用量在输配系

统中所占的比重很大。显然，输送高热值燃气对输配系统的经济性是有利的。我国城市燃气设计规范规定，作为城市燃气的人工燃气，其低发热值应大于 $14700\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。由于用气设备是按确定的燃气组分设计的，所以城市燃气的组分必须维持稳定。为保证原有的用气设备热负荷的稳定，所供应燃气的华白指数 $\left(\frac{\text{燃气的高发热值}}{\sqrt{\text{燃气的密度}}}\right)$ 波动范围应不超过 5%。当所输配的燃气被另一种燃烧特性差别较大的燃气所取代时，除了华白指数以外，还必须考虑不产生离焰、黄焰、回火、不完全燃烧等火焰特性。

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 1-2 和表 1-3。这里主要介绍混合气体和混合液体的基本特性。

某些低级烃的基本性质 [273.15K、101325Pa]

表 1-2

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 ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
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 (Nm ³ /kmol)	22.3621	22.1872	22.2567	21.9362	21.990	21.5036	21.5977	20.891
密度 ρ (kg/Nm ³)	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 ρ _c (kg/Nm ³)	162	210	220	226	232	225	221	232
发热值								
高热值 H _s (MJ/Nm ³)	39.842	70.351	63.438	101.266	93.667	133.886	133.048	169.377
低发热值 H _i (MJ/Nm ³)	35.902	64.397	59.477	93.240	87.667	123.649	122.853	156.733
爆炸极限 ^①								
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 _t (体积%)	15.0	13.0	34.0	9.5	11.7	8.5	8.5	8.3
粘度								
动力粘度 μ × 10 ⁶ (Pa·s)	10.393	8.600	9.316	7.502	7.649	6.835		6.355
运动粘度 ν × 10 ⁶ (m ² /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

① 在常压和 293K 条件下，可燃气体在空气中的体积百分数。

某些气体的基本性质 [273.15K、101325Pa]

表 1-3

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 ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ S		H ₂ 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 (Nm ³ /kmol)	22.3984	22.427	22.403	22.3923	22.2601	22.1802	22.4003	21.629
密度 ρ (kg/Nm ³)	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 ρ _c (kg/Nm ³)	300.86	31.015	310.91	430.09	468.19		320.07	321.70

续表

气 体	一氧化碳	氢	氮	氧	二氧化碳	硫化氢	空气	水蒸气
发热值								
高热值 H_s (MJ/Nm ³)	12.636	12.745				25.348		
低发热值 H_l (MJ/Nm ³)	12.636	10.786				23.368		
爆炸极限 ^①								
爆炸下限 L_s (体积%)	12.5	4.0				4.3		
爆炸上限 L_l (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 ² /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	

① 在常压和 293K 条件下, 可燃气体在空气中的体积百分数。

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下式计算:

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

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下式计算:

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

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下式计算:

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

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

式中 ρ ——混合气体平均密度 (kg/Nm³);
 V_M ——混合气体平均摩尔容积 (Nm³/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 (kg/Nm³)。

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 Nm³/kmol, 而对于由其他碳氢化合物组成的混合气体, 则取 22 Nm³/kmol。若要精确计算, 可采用下式:

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

式中 $V_{M_1}, V_{M_2}, \dots, V_{M_n}$ ——各单一气体摩尔容积 (Nm^3/kmol)。

混合气体平均密度还可根据单一气体密度及容积成分可按下式计算：

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

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——标准状态下各单一气体密度 (kg/Nm^3)；

燃气通常含有水蒸气，则湿燃气密度可按下式计算：

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

式中 ρ^w ——湿燃气密度 (kg/Nm^3)；

ρ ——干燃气密度 (kg/Nm^3)；

d ——水蒸气含量 (kg/Nm^3 干燃气)；

0.833——水蒸气密度 (kg/Nm^3)。

干、湿燃气容积成分按下式换算：

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

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， $k = \frac{0.833}{0.833 + d}$ 。

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 1-4。

几种燃气的密度和相对密度 表 1-4

燃气种类	密度 (kg/Nm^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

由表 1-4 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 $500\text{kg}/\text{m}^3$

左右，约为水的一半。

(三) 计算例题

【例 1-1】 已知混合气体的容积成分为 $y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 4\%$ ， $y_{\text{C}_3\text{H}_8} = 75\%$ ， $y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 20\%$ ， $y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 1\%$ 。求混合气体平均分子量、平均密度和相对密度。

【解】 由表 1-2 查得各组分分子量为 $M_{\text{C}_2\text{H}_6} = 30.070$ ， $M_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44.097$ ， $M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 58.124$ ， $M_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 72.151$ 。按式 (1-1) 求混合气体平均分子量

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{100} \sum y_i M_i \\ &= \frac{1}{100} \times (4 \times 30.07 + 75 \times 44.097 + 20 \times 58.124 + 1 \times 72.151) \\ &= 46.622 \end{aligned}$$

由表 1-2 查得各组分密度，按式 (1-6) 求混合气体平均密度

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \\ &= \frac{1}{100} \times (4 \times 1.355 + 75 \times 2.010 + 20 \times 2.703 + 1 \times 3.454) \end{aligned}$$

$$= 2.137 \text{ kg/Nm}^3$$

按式 (1-4) 求混合气体相对密度

$$S = \frac{\rho}{1.293} = \frac{2.137}{1.293} = 1.653$$

【例 1-2】 已知干燃气的容积成分为 $y_{\text{CO}_2} = 1.9\%$, $y_{\text{C}_m\text{H}_n} = 3.9\%$ 。(按 C_3H_6 计算), $y_{\text{O}_2} = 0.4\%$, $y_{\text{CO}} = 6.3\%$, $y_{\text{H}_2} = 54.4\%$, $y_{\text{CH}_4} = 31.5\%$, $y_{\text{N}_2} = 1.6\%$ 。假定含湿量 $d = 0.002 \text{ kg/Nm}^3$ 干燃气, 求湿燃气的容积成分及其平均密度。

【解】

1. 湿燃气的容积成分

首先确定换算系数 k

$$k = \frac{0.833}{0.833 + d} = \frac{0.833}{0.833 + 0.002} = 0.9976$$

按式 (1-8) 求湿燃气的容积成分

$$y_{\text{CO}_2}^w = k y_{\text{CO}_2} = 0.9976 \times 1.9\% = 1.895\%$$

依次可得: $y_{\text{C}_m\text{H}_n}^w = 3.891\%$, $y_{\text{O}_2}^w = 0.399\%$, $y_{\text{CO}}^w = 6.285\%$, $y_{\text{H}_2}^w = 54.270\%$, $y_{\text{CH}_4}^w = 31.424\%$, $y_{\text{N}_2}^w = 1.596\%$, 而 $y_{\text{H}_2\text{O}}^w = \frac{d}{0.833} k \cdot 100 = \frac{0.002}{0.833} \times 0.9976 \times 100 = 0.240\%$

2. 湿燃气的平均密度

首先确定干燃气的平均密度

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \\ &= \frac{1}{100} \times (1.9 \times 1.9771 + 3.9 \times 1.9136 \\ &\quad + 0.4 \times 1.4291 + 6.3 \times 1.2506 + 54.4 \times 0.0899 + 31.5 \times 0.7174 \\ &\quad + 1.6 \times 1.2504) = 0.492 \text{ kg/Nm}^3 \end{aligned}$$

按式 (1-7) 求湿燃气密度

$$\begin{aligned} \rho^w &= (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \\ &= (0.492 + 0.002) \frac{0.833}{0.833 + 0.002} \\ &= 0.493 \text{ kg/Nm}^3 \end{aligned}$$

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压缩时, 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 ρ_c 分别叫做临界温度、临界压力、临界比容和临

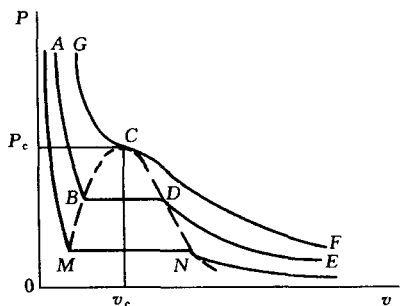


图 1-1 临界状态

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-气态平衡曲线示于图 1-2。

图 1-2 中的曲线是蒸气和液体的分界线，曲线左侧为液态，右侧为气态。

由图可知，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下式计算：

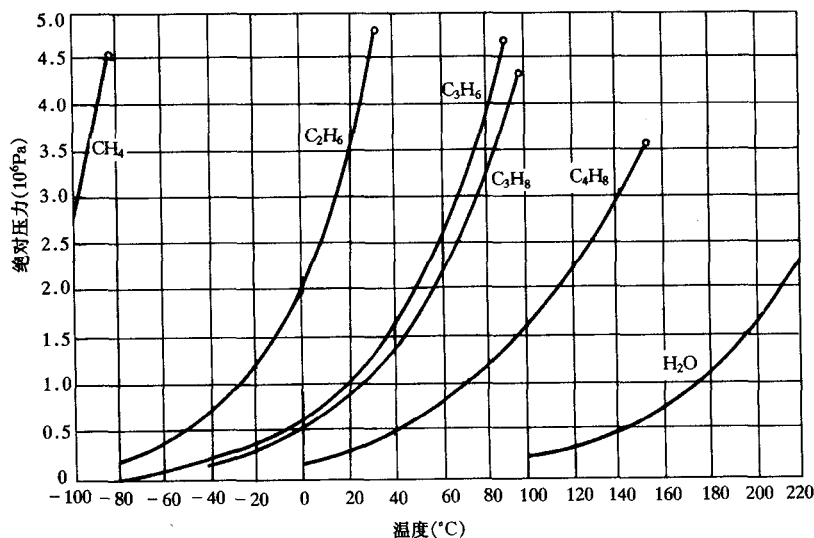


图 1-2 几种气体的液态-气态平衡曲线

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

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

式中

$P_{m.c}$ 、 $T_{m.c}$ ——混合气体的平均临界压力和平均临界温度；

P_{c_1} 、 P_{c_2} …… P_{c_n} ——各组分的临界压力；

T_{c_1} 、 T_{c_2} …… T_{c_n} ——各组分的临界温度；

y_1 、 y_2 …… 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 (m^3/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。

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad P_r = \frac{P}{P_c} \quad (1-12)$$

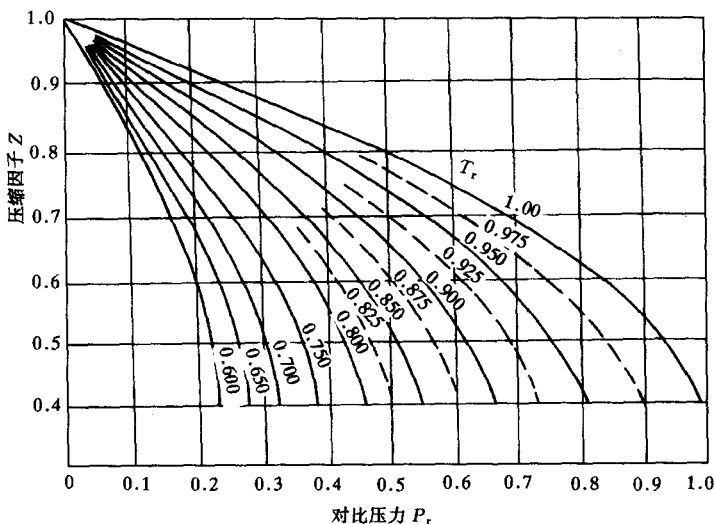


图 1-3 气体的压缩因子 Z 与对比温度 T_r ，对比压力 P_r 的关系
 (当 $P_r < 1$, $T_r = 0.6 \sim 1.0$)

对于混合气体，在确定 Z 值之前，首先要按式 (1-9)、(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 1-3】 有一内径为 700mm、长为 125km 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 $y_{\text{CH}_4} = 97.5\%$ ， $y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.2\%$ ， $y_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.2\%$ ， $y_{\text{N}_2} = 1.6\%$ ， $y_{\text{CO}_2} = 0.5\%$ 。

【解】

1. 天然气的平均临界温度和平均临界压力由表 1-2、1-3 查得，各组分的临界温度 T_c