

燃气输配

哈尔滨建筑工程学院
北京建筑工程学院 编
同济大学 大 学

182



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

燃 气 输 配

哈尔滨建筑工程学院

北京建筑工程学院 编

同 济 大 学

中国建筑工业出版社

本书是高等工科学校城市燃气热能供应工程专业的试用教材。

教材内容包括：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；城市和工业企业燃气管网系统；燃气管网的水力计算、水力工况与技术经济计算；燃气的压送、储存、压力调节与计量；燃气输配系统的运行管理；液化石油气的储存、气化和用户供应等。

本书也可供从事城市工业企业煤气、天然气和液化石油气输配的设计、科研以及运行管理的工程技术人员参考。

高等学校试用教材
燃 气 输 配
哈尔滨建筑工程学院
北京建筑工程学院 编
同 济 大 学

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：20 字数：487千字

1981年7月第一版 1981年7月第一次印刷

印数：1—4,400册 定价：2.05元

统一书号：15040·4094

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、唐国璠；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同志细致审阅，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、北京市煤气公司、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。

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	31
第二章 城市燃气需用量及供需平衡	35
第一节 年用气量	35
第二节 燃气需用工况	37
第三节 燃气的小时计算流量	40
第四节 燃气生产与使用的平衡	42
第三章 燃气的长距离输送系统	48
第一节 长距离输气系统的构成	48
第二节 输气管线及线路选择	51
第四章 城市燃气管网系统	53
第一节 城市燃气管网的分类及其选择	53
第二节 城市燃气管道的布线	58
第三节 燃气管道及其附属设备	66
第四节 燃气管道的防腐	74
第五章 工业企业燃气管网系统	82
第一节 工业企业燃气管网系统的分类及其布线	82
第二节 工业企业燃气管道计算压力降的确定	86
第六章 燃气管网的水力计算	88
第一节 管道内燃气流动的基本方程式	88
第二节 燃气管道的水力计算公式	95
第三节 室内燃气管道计算	105
第四节 燃气分配管道计算流量的确定	109
第五节 环状管网的计算	113
第六节 应用电子计算机进行环状管网的水力计算	121
第七章 燃气管网的水力工况	127
第一节 管网计算压力降的确定	127
第二节 低压管网的水力工况	131
第三节 高、中压环网的水力可靠性	138
第四节 低压环网的水力可靠性	143
第五节 长输管线储气能力的计算	151
第八章 燃气管网的技术经济计算	154
第一节 技术经济计算的任务和方案比较方法	154

第二节	燃气调压室的最佳作用半径	157
第三节	枝状燃气管网的技术经济计算	162
第四节	环状燃气管网的技术经济计算	168
第九章	燃气的压力调节及计量	170
第一节	燃气压力调节过程	170
第二节	调压器的调节机构及传动装置	174
第三节	调压器	182
第四节	燃气调压室	188
第五节	燃气的计量	193
第十章	燃气的压送	198
第一节	活塞式压缩机	198
第二节	回转式压缩机	203
第三节	离心式压缩机	206
第四节	压缩机的排气温度及功率计算	207
第五节	变工况工作与流量的调节	212
第六节	压缩机室	218
第十一章	燃气的储存	222
第一节	低压湿式罐	222
第二节	低压干式罐	225
第三节	高压贮气罐	229
第四节	液化石油气和液化天然气的低温储存	236
第五节	燃气的地下储存	241
第六节	燃气的其它储存方法	243
第十二章	燃气输配系统的运行管理	245
第一节	燃气管道的运行管理	245
第二节	调压室的运行管理	249
第三节	压缩机及贮气罐的维护管理	250
第四节	燃气输配系统的调度	252
第十三章	液化石油气储配站	255
第一节	液化石油气的运输	255
第二节	液化石油气贮罐的规格及附件	261
第三节	液化石油气的装卸方式	273
第四节	液化石油气的灌瓶	277
第五节	液化石油气储配站的工艺流程及平面布置	287
第十四章	液化石油气的气化和用户供应	293
第一节	液化石油气的气化	293
第二节	用户供应	303
第三节	液化石油气混合气供应	310

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8300~8600千卡/标米³。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10000千卡/标米³。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，所以近些年来，许多国家大力发展天然气工业。有些天然气资源缺乏的国家也进口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。

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（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。用干馏方式生产煤气每吨煤可产煤气300~400米³。这类煤气中甲烷和氢的含量较高，低发热值一般在4000千卡/标米³左右。干馏煤气的生产历史最长，是我国目前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15~30公斤/厘米²的压力下，以

● 本书以0°C、760毫米汞柱时的状态为标准状态。

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3600千卡/标米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2500千卡/标米³左右，发生炉煤气的发热值为1300千卡/标米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

我国一些城市，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制气和重油蓄热催化裂解制气两种。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10000千卡/标米³。每吨重油的产气量为500~550米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4200~5000千卡/标米³左右，利用三筒炉催化裂解装置，每吨重油的产气量约为1200~1300米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、停炉机动灵活，既可作城市燃气的基本气源，也可作城市燃气的调度气源。

国外不少中、小燃气厂多数是以石脑油（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，主要组分为一氧化碳和氮气，发热值约为900~1000千卡/标米³。

高炉煤气可用作炼焦炉的加热煤气，以取代出焦炉煤气，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。

目前我国供应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（C₃H₈）、丙烯（C₃H₆）、丁烷（C₄H₁₀）和丁烯（C₄H₈），习惯上又称C₃、C₄，即只用碳的碳原子（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22000~29000千卡/标米³。液态液化

石油气的发热值约为10800~11000千卡/公斤。

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。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、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，叫作沼气。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。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5000千卡/标米³。

一些燃气的组分及低发热值列于表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 (千卡/ 标米 ³)	
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	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	8650
2	石油伴生气	81.7	6.2	4.86	4.94			0.3	0.2	1.8	10860
3	凝析气田气	74.3	6.75	1.87	14.91			1.62		0.55	11550
4	矿 井 气	52.4						4.6	7.0	36.0	4500
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	4360
2	连续式直立炭化炉煤气	18			1.7	17	56	5	0.3	2	3860
3	立箱炉煤气	25				9.5	55	6	0.5	4	3850
(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	3680
2	水 煤 气	1.2				34.4	52.0	8.2	0.2	4.0	2480
3	发生炉煤气	1.8		0.4		30.4	8.4	2.4	0.2	56.4	1410
(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	10070
2	重油蓄热催化裂解气	16.6			5	17.2	46.5	7.0	1.0	6.7	4190
(四)	高炉煤气	0.3				28.0	2.7	10.5		58.5	940
三	液化石油气(概略值)		50	50							25900
四	沼 气(生化气)	60				少量	少量	35		少量	5200

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，输送高发热值燃气对输配系统的经济性是有利的。我国城市煤气设计规范规定，作为城市燃气的人工燃气，其低发热值应大于3500千卡/标米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 $\left(\frac{\text{燃气的高发热值}}{\sqrt{\text{燃气的比重}}}\right)$ 波动范围应不超过

5%。当所输配的燃气掺混其它种类的燃气或被另一种燃气所取代，则燃气的燃烧性能会发生很大的变化。要使原有的用气设备的热负荷不变，又能保持良好的燃烧性能，必须考虑燃气的互换性。

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[0°C、760毫米汞柱]

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
分子容积 V _M (标米 ³ /公斤分子)	22.3621	22.1872	22.2567	21.9362	21.990	21.5036	21.5977	20.891
容 重 γ (公斤/标米 ³)	0.7174	1.3553	1.2605	2.0102	1.9136	2.7030	2.6912	3.4537
气体常数 R (公斤·米/公斤·°C)	52.73	28.13	30.01	18.82	19.77	13.99	14.05	10.95
临界参数								
临界温度 t _c (°C)	-82.1	32.3	9.8	95.7	91.6	152.8	134.0	197.2
临界压力 P _c (绝对大气压)	45.8	48.2	52.7	43.4	47.0	35.7	36.1	33.0
临界容重 γ _c (公斤/标米 ³)	162	210	220	226	232	225	221	232
发 热 值								
高热值 H _h (千卡/标米 ³)	9516	16803	15152	24187	22372	31978	31778	40455
低发热值 H _l (千卡/标米 ³)	8575	15381	14206	22270	20939	29533	29343	37435
爆炸极限①								
爆炸下限 L _i (体积%)	5.0	2.9	2.7	2.1	2.0	1.5	1.8	1.4
爆炸上限 L _h (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 (公斤·秒/米 ²)	1.060	0.877	0.950	0.765	0.780	0.697	—	0.648
运动粘度 ν × 10 ⁶ (米 ² /秒)	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20°C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、平均容重和平均比重

(一) 平均分子量

混合气体的平均分子量可按下式计算：

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

式中 M——混合气体平均分子量；

y₁, y₂, …, y_n——各单一气体容积成分(%)；

M₁, M₂, …, M_n——各单一气体分子量。

混合液体平均分子量按下式计算：

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
分子容积 V _M (标米 ³ /公斤分子)	22.8984	22.427	22.403	22.3923	22.2601	22.1862	22.4003	21.629
容 重 γ (公斤/标米 ³)	1.2506	0.0899	1.2504	1.4291	1.9771	1.5363	1.2931	0.833
气体常数 R (公斤·米/公斤·°C)	30.25	420.83	80.25	26.47	19.13	24.63	29.25	45.42
临界参数								
临界温度 t _c (°C)	-140.15	-239.83	-146.95	-118.35	31.05		-140.65	373.85
临界压力 P _c (绝对大气压)	34.5	12.8	33.5	50.1	72.9		37.17	218.3
临界容重 γ _c (公斤/标米 ³)	300.86	31.015	310.91	430.09	468.19		320.07	321.70
发 热 值								
高发热值 H _h (千卡/标米 ³)	3018	3044				6054		
低发热值 H _l (千卡/标米 ³)	3018	2576				5561		
爆炸极限①								
爆炸下限 L _l (体积%)	12.5	4.0				4.3		
爆炸上限 L _h (体积%)	74.2	75.9				45.5		
粘 度								
动力粘度 μ × 10 ⁶ (公斤·秒/米 ²)	1.890	0.852	1.700	1.980	1.430	1.190	1.750	0.860
运动粘度 ν × 10 ⁶ (米 ² /秒)	13.30	93.00	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20°C条件下，可燃气体在空气中的体积百分数。

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

式中 M——混合液体平均分子量；
 x₁、x₂……x_n——各单一液体分子成分(%)；
 M₁、M₂……M_n——各单一液体分子量。

(二) 平均容重和平均比重

混合气体平均容重和平均比重按下式计算：

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

$$s = \frac{\gamma}{1.293} = \frac{M}{1.293 V_M} \quad (1-4)$$

式中 γ——混合气体平均容重(公斤/标米³)；
 V_M——混合气体平均分子容积(标米³/公斤分子)；
 s——混合气体平均比重(空气为1)；
 1.293——标准状态下空气容重(公斤/标米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标米³/公斤分子，而对于由其它碳氢化合物组成的混合气体，则取22标米³/公斤分子。若要精确计算，可采用下式：

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

式中 $V_{M_1}, V_{M_2}, \dots, V_{M_n}$ ——各单一气体分子容积 (标米³/公斤分子)。

混合气体平均容重还可根据各单一气体容重及容积成分按下式计算:

$$\gamma = \frac{1}{100} (y_1 \gamma_1 + y_2 \gamma_2 + \dots + y_n \gamma_n) \quad (1-6)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——标准状态下各单一气体容重 (公斤/标米³)。

燃气通常含有水蒸气, 则湿燃气容重按下式计算:

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

式中 γ^w ——湿燃气容重 (公斤/标米³);

γ ——干燃气容重 (公斤/标米³);

d ——水蒸气含量 (公斤/标米³干燃气);

0.833 ——水蒸气容重 (公斤/标米³)。

干、湿燃气容积成分按下式换算:

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

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。

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

几种燃气的容重和比重 (即平均容重和平均比重) 列于表1-4。

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。

混合液体平均容重与760毫米汞柱、4°C

几种燃气的容重和比重 表 1-4

时水容重之比称为混合液体平均比重。因为水在760毫米汞柱、4°C时的容重等于1, 所以混合液体比重和容重在数值上是相等的。

在常温下, 液态液化石油气的容重是0.5公斤/升左右, 约为水的一半。

燃气种类	容重(公斤/标米 ³)	比 重
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】 已知混合气体的容积成分为 $y_{C_2H_6} = 4\%$, $y_{C_3H_8} = 75\%$, $y_{C_4H_{10}} = 20\%$, $y_{C_5H_{12}} = 1\%$ 。求该混合气体平均分子量、平均容重和平均比重。

【解】 由表1-2查得各组分分子量为 $M_{C_2H_6} = 30.070$, $M_{C_3H_8} = 44.097$, $M_{C_4H_{10}} = 58.124$, $M_{C_5H_{12}} = 72.151$ 。按式(1-1)求混合气体平均分子量

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

由表1-2查得各组分容重, 按式(1-6)求混合气体平均容重

$$\gamma = \frac{1}{100} \sum y_i \gamma_i = \frac{1}{100} \times (4 \times 1.355 + 75 \times 2.010 + 20 \times 2.703 + 1 \times 3.454) = 2.137 \text{ 公斤/标米}^3$$

按式(1-4)求混合气体平均比重

$$s = \frac{\gamma}{1.293} = \frac{2.137}{1.293} = 1.653$$

【例 1-2】 已知干燃气的容积成分为 $y_{CO_2} = 1.9\%$, $y_{C_mH_n} = 3.9\%$ (按 C_3H_8 计算), $y_{O_2} = 0.4\%$,

$y_{CO} = 6.3\%$, $y_{H_2} = 54.4\%$, $y_{CH_4} = 31.5\%$, $y_{N_2} = 1.6\%$ 。假定含水量 $d = 0.002$ 公斤/标米³ 干燃气, 求湿燃气的容积成分及其平均容重。

【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

$$y_{CO_2}^w = k y_{CO_2} = 0.9976 \times 1.9\% = 1.895\%$$

依次可得: $y_{CH_4}^w = 3.891\%$, $y_{O_2}^w = 0.399\%$, $y_{CO}^w = 6.285\%$, $y_{H_2}^w = 54.270\%$, $y_{N_2}^w = 31.424\%$,

$$y_{N_2}^w = 1.596\%, \text{ 而 } y_{H_2O}^w = \frac{d}{0.833} k \cdot 100 = \frac{0.002}{0.833} \times 0.9976 \times 100 = 0.240\%$$

2. 湿燃气的平均容重

首先确定干燃气的平均容重

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

按式 (1-7) 求湿燃气容重

$$\gamma^w = (\gamma + d) \frac{0.833}{0.833 + d} = (0.492 + 0.002) \frac{0.833}{0.833 + 0.002} = 0.493 \text{ 公斤/标米}^3$$

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作临界压力。

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。

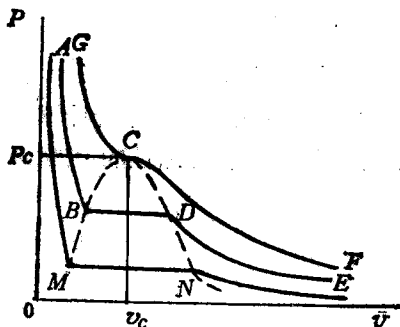


图 1-1 临界状态

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 点也叫临界点。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 分别叫作临界温度、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-气态平衡曲线示于图 1-2。

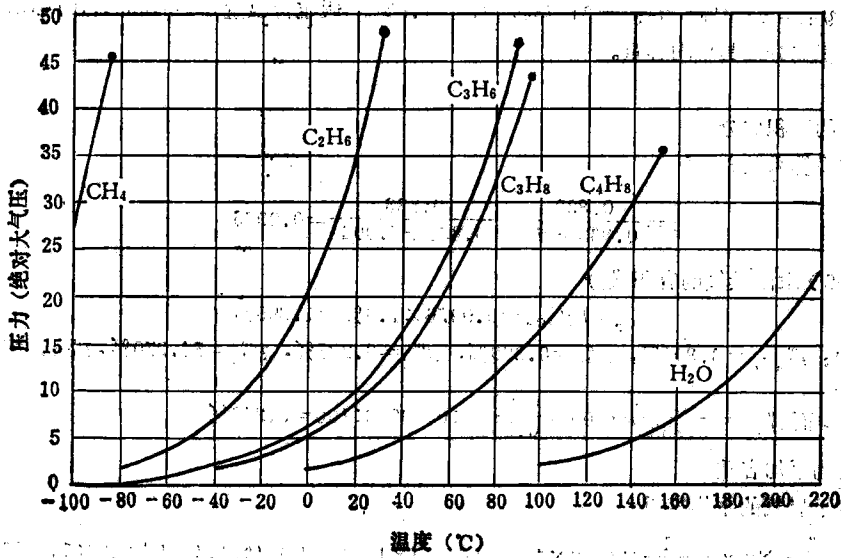


图 1-2 几种气体的液态-气态平衡曲线

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°C时使丙烷液化的压力为8.46绝对大气压，而当温度为-20°C时，在2.48绝对大气压下即可液化。

混合气体的平均临界压力和平均临界温度按下式计算：

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

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

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；

$P_{c_1}, P_{c_2}, \dots, P_{c_n}$ ——各组分的临界压力；

$T_{c_1}, T_{c_2}, \dots, T_{c_n}$ ——各组分的临界温度；

y_1, y_2, \dots, 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10绝对大气压和温度在10~20°C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（公斤/米²）；

v ——气体的比容（米³/公斤）；

Z ——压缩因子；

R ——气体常数（公斤·米/公斤·度）；

T ——气体的绝对温度（°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。

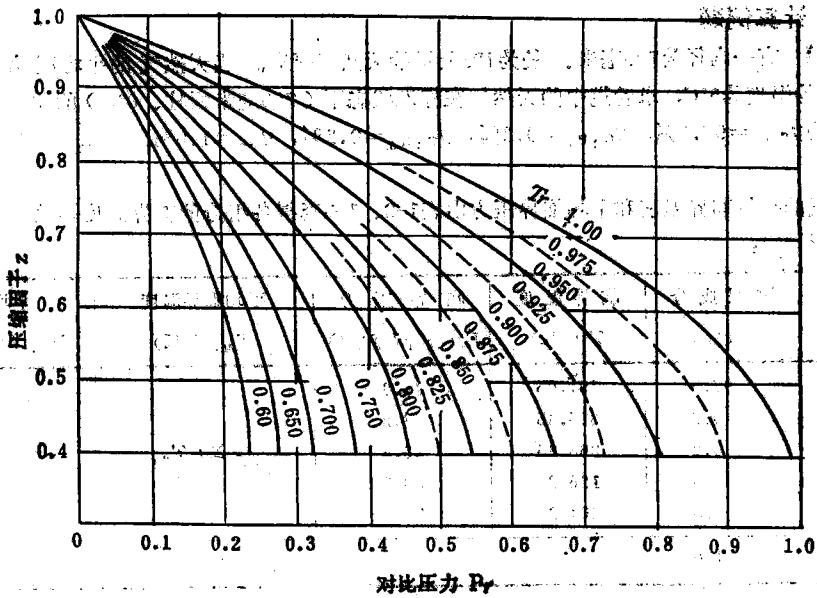


图 1-3 气体的压缩因子 Z 与对比温度 T_r 、对比压力 P_r 的关系 (当 $P_r < 1$, $T_r = 0.6 \sim 1.0$)

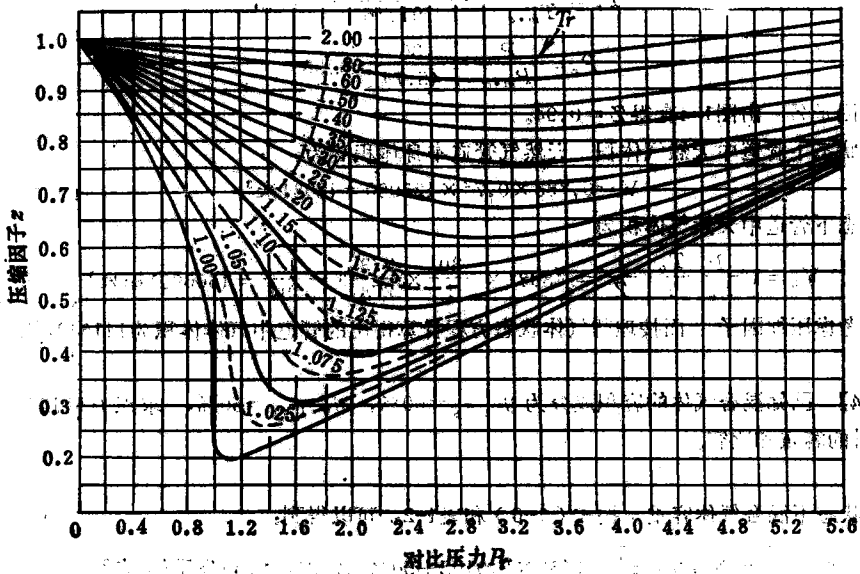


图 1-4 气体的压缩因子 Z 与对比温度 T_r 、对比压力 P_r 的关系 (当 $P_r < 5.6$, $T_r = 1.0 \sim 2.0$)

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。此处温度为绝对温度，压力为绝对压力。

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

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、1-4求得压缩因子 Z 。

(三) 计算例题

【例 1-3】 有一内径为700毫米、长为125公里的天然气管道。当天然气的平均压力为 30 公斤/厘米²、天然气的温度为5°C，求管道中的天然气在标准状态下（760毫米汞柱、0°C）的体积。已知天然气的容积成分为 $y_{CH_4}=97.5\%$ ， $y_{C_2H_6}=0.2\%$ ， $y_{C_3H_8}=0.2\%$ ， $y_{N_2}=1.6\%$ ， $y_{CO_2}=0.5\%$ 。

【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 及临界压力 P_c 填入下表中，进行计算：

气体名称	容积成分 $y_i(\%)$	临界温度 $T_c(^{\circ}K)$	临界压力 $P_c(\text{公斤/厘米}^2)$	平均临界温度 $T_{m.c.}(^{\circ}K)$	平均临界压力 $P_{m.c.}(\text{公斤/厘米}^2)$
CH ₄	97.5	191.05	45.8	$\frac{1}{100} \sum y_i T_{c_i}$	$\frac{1}{100} \sum y_i P_{c_i}$
C ₂ H ₆	0.2	305.45	48.2		
C ₃ H ₈	0.2	368.85	43.4		
N ₂	1.6	126.2	33.5		
CO ₂	0.5	304.2	72.9		
	100			191.16	45.74

2. 对比温度和对比压力

$$T_r = \frac{T}{T_{m.c.}} = \frac{273.15 + 5}{191.16} = 1.46$$

$$P_r = \frac{P}{P_{m.c.}} = \frac{30}{45.74} = 0.66$$

3. 压缩因子Z 由图1-4查得 $Z=0.94$ 。

4. 标准状态下管道中天然气体积 天然气管道本身体积 V 为

$$V = 0.785 \times 0.7^2 \times 125000 = 48081 \text{米}^3$$

标准状态下管道中天然气体积为

$$V_0 = V \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{1}{Z} = 48081 \times \frac{30}{1} \times \frac{273}{278} \times \frac{1}{0.94} = 1506901 \text{标米}^3$$

如果不考虑压缩因子，而按理想气体状态方程计算得出的管道中气体体积为1416487标米³，比实际少6%。

【例 1-4】 已知混合气体的容积成分为 $y_{C_3H_8}=50\%$ ， $y_{C_4H_{10}}=50\%$ ，求在 $P=10$ 公斤/厘米²、 $t=100^{\circ}C$ 时的容重和比容。

【解】

1. 标准状态下混合气体容重 按式(1-6)和表1-2，可以得到：

$$\gamma_0 = \frac{1}{100} \sum y_i \gamma_i = \frac{1}{100} \times (50 \times 2.0102 + 50 \times 2.703) = 2.36 \text{公斤/标米}^3$$

2. 混合气体的平均临界温度和临界压力 由表1-2查得丙烷的临界温度和临界压力为

$$T_c = 95.7 + 273.15 = 368.85^{\circ}K$$

$$P_c = 43.4 \text{绝对大气压}$$

正丁烷的临界温度和临界压力为

$$T_c = 152.8 + 273.15 = 425.95^{\circ}K$$

$$P_c = 35.7 \text{绝对大气压}$$

混合气体的平均临界温度和平均临界压力为

$$T_{m.c.} = \frac{1}{100} \sum y_i T_{c_i} = \frac{1}{100} \times (50 \times 368.5 + 50 \times 425.95) = 397.2^{\circ}K$$

$$P_{m.o.} = \frac{1}{100} \sum y_i P_{c,i} = \frac{1}{100} (50 \times 43.4 + 50 \times 35.7) = 39.6 \text{ 绝对大气压}$$

3. 对比压力和对比温度

$$P_r = \frac{P}{P_{m.o.}} = \frac{10 + 1}{39.6} = 0.28$$

$$T_r = \frac{T}{T_{m.o.}} = \frac{100 + 273.15}{397.2} = 0.94$$

4. 压缩因子 Z 由图1-3查得 Z = 0.87

5. 混合气体容重 P = 10 公斤/厘米²、t = 100°C 时的混合气体容重为

$$\gamma' = \gamma_0 \frac{P'}{P_0} \frac{T_0}{T'} \frac{1}{Z} = 2.36 \times \frac{735 \times 10^4 + 760}{760} \times \frac{273.15}{100 + 273.15} \times \frac{1}{0.87} = 21 \text{ 公斤/米}^3$$

6. 混合气体比容 P = 10 公斤/厘米²、t = 100°C 时的混合气体比容为

$$v' = \frac{1}{\gamma'} = \frac{1}{21} = 0.04762 \text{ 米}^3/\text{公斤}$$

若按理想气体状态方程计算， $\gamma = 18.42 \text{ 公斤/米}^3$ ， $v = 0.0543 \text{ 米}^3/\text{公斤}$ ，偏差达 14%。

三、粘 度

混合气体的动力粘度可以近似地按下式计算：

$$\mu = \frac{g_1 + g_2 + \dots + g_n}{\frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \dots + \frac{g_n}{\mu_n}} \quad (1-13)$$

式中 μ —— 混合气体在 0°C 时的动力粘度 (公斤·秒/米²)；

g_1, g_2, \dots, g_n —— 各组分的重量成分 (%)；

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ —— 相应各组分在 0°C 时的动力粘度 (公斤·秒/米²)。

混合气体的动力粘度和单一气体一样，也是随压力的升高而增大的，在绝对压力小于 10 公斤/厘米² 的情况下，压力的变化对粘度的影响较小，可不考虑。至于温度的影响，却不容许忽略。若仍然以 μ 表示 0°C 时混合气体的动力粘度，则 t°C 时混合气体的动力粘度按下式计算：

$$\mu_t = \mu \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-14)$$

式中 μ_t —— t°C 时混合气体的动力粘度 (公斤·秒/米²)；

T —— 混合气体的绝对温度 (°K)；

C —— 混合气体的无因次实验系数，可用混合法则求得。

不同温度下液态碳氢化合物的动力粘度示于图 1-5。

液态碳氢化合物的动力粘度随分子量的增加而增大，随温度的上升而急剧减小。气态碳氢化合物的动力粘度则正相反，分子量越大，动力粘度越小，温度越上升，动力粘度越增大，这对于一般的气体都适用。

混合气体和混合液体的运动粘度为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-15)$$

式中 ν —— 混合气体或混合液体的运动粘度 (米²/秒)；