

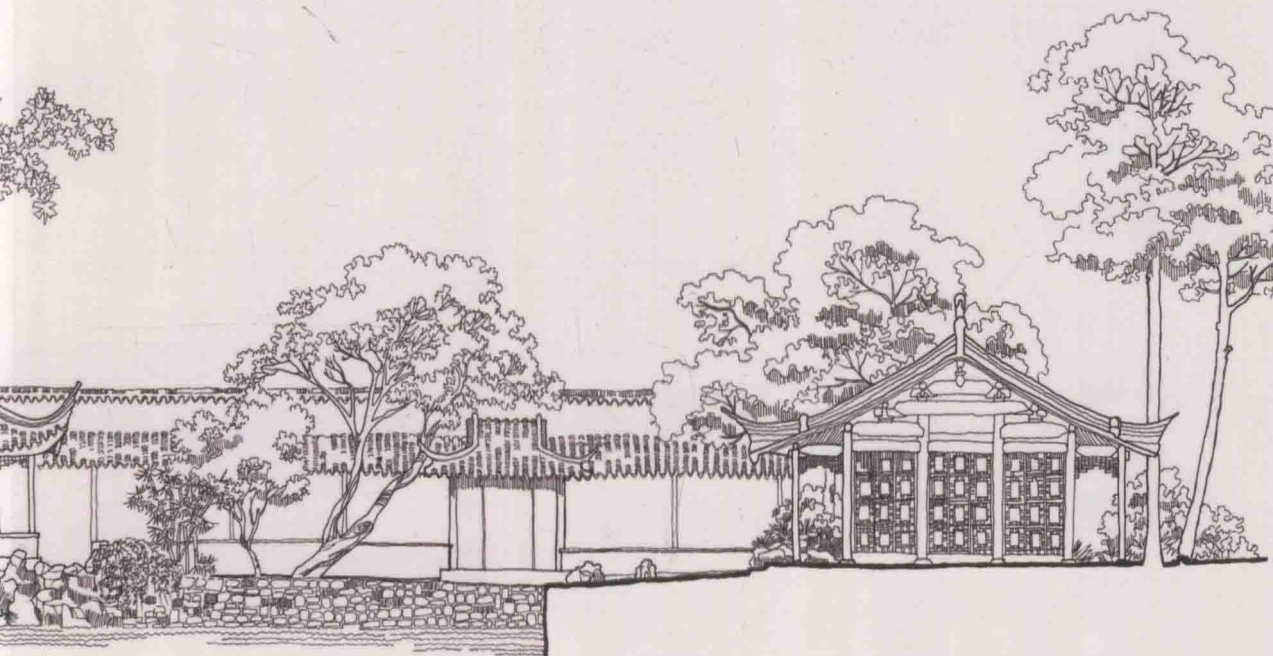


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

燃气输配 (第五版)

Gas Transmission and Distribution

段常贵 主编



中国建筑工业出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程专业指导委员会规划推荐教材

燃 气 输 配

Gas Transmission and Distribution

(第五版)

段常贵 主编

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. —5版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015.9

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-18411-8

I. ①燃… II. ①段… III. ①燃气输配-高等学校-教材 IV. ①TU996.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 202913 号

责任编辑: 齐庆梅

责任校对: 张颖 党蕾

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

燃 气 输 配

(第五版)

段常贵 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 445 千字

2015 年 12 月第五版 2015 年 12 月第三十五次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-18411-8

(27640)

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)

第四版前言

本书为建筑环境与设备工程专业适用的专业课教材《燃气输配》第四版。自《燃气输配》第三版教材 2001 年出版至今，已历时将近十年。十年来，我国的城镇燃气事业得到了飞速发展，城镇燃气的来源已经过渡到以天然气为主，人工煤气和液化石油气逐渐被天然气取代的时期。天然气的应用领域正不断扩大，技术不断进步。本书在总结多年教学经验的基础上，适应客观形势发展的需要，增加了两章天然气的相关内容，在章、节上进行了较大的调整，对部分内容作了更新、补充和修改。

本教材第一章、第十四章由张兴梅、苗艳姝共同编写；第二章、第四章由苗艳姝编写；第三章、第五章由张兴梅编写；第九章由车立新编写；第十二章由王焯编写；第十三章由聂廷哲编写；第六章、第七章、第八章、第十章、第十一章由段常贵编写。本书由段常贵担任主编。

由于编者水平所限，书中的错误和不妥之处欢迎读者给予批评指正。

编者
2011.2

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减。

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。

编者

1980.7

目 录

第一章 城镇燃气的分类及其性质	1
第一节 燃气的分类	1
第二节 燃气的基本性质	3
第三节 城镇燃气的质量要求	32
第二章 城镇燃气需用量及供需平衡	35
第一节 城镇燃气需用量	35
第二节 燃气需用工况	38
第三节 燃气输配系统的小时计算流量	41
第四节 燃气输配系统的供需平衡	43
第三章 燃气的长距离输送系统	46
第一节 长距离输气系统的构成	46
第二节 输气干线及线路选择	49
第四章 城镇燃气管网系统	53
第一节 城镇燃气门站	53
第二节 城镇燃气管网系统及其选择	56
第三节 城镇燃气管道的布线	60
第四节 工业企业燃气管网系统	64
第五节 建筑燃气供应系统	68
第五章 燃气管道及其附属设备	71
第一节 管材及其连接方式	71
第二节 燃气管道的附属设备	73
第三节 钢制燃气管道的防腐	78
第六章 燃气管网的水力计算	84
第一节 管道内燃气流动的基本方程式	84
第二节 城镇燃气管道水力计算公式和计算图表	92
第三节 燃气分配管网计算流量	102
第四节 管网水力计算	105
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

第八章 燃气的压力调节及计量	135
第一节 燃气压力调节过程	135
第二节 调压器的调节元件及敏感元件	139
第三节 燃气调压器	147
第四节 燃气调压站	155
第五节 燃气的计量	160
第九章 燃气的压送	167
第一节 活塞式压缩机	167
第二节 离心式压缩机	173
第三节 压缩机的排气温度及功率计算	174
第四节 变工况工作与流量的调节	178
第五节 压缩机室	184
第十章 燃气的储存	188
第一节 低压储气罐	188
第二节 高压储气罐	189
第三节 燃气储配站	195
第四节 长输管线及高压管道储气能力的计算	196
第五节 燃气的地下储存	198
第六节 燃气的其他储存方法	200
第十一章 压缩天然气供应	202
第一节 压缩天然气加气母站	202
第二节 压缩天然气的运输	206
第三节 压缩天然气储配站	208
第四节 压缩天然气汽车加气站	210
第五节 压缩天然气绝热节流过程	213
第十二章 液化天然气供应	217
第一节 液化天然气生产	217
第二节 液化天然气储运	221
第三节 液化天然气接收站	227
第四节 液化天然气气化站	228
第五节 液化天然气汽车加气站	234
第十三章 液化石油气供应	237
第一节 液化石油气的输送	237
第二节 液化石油气储罐的规格及阀件	242
第三节 液化石油气的降温储存	245
第四节 液化石油气的装卸方式	247
第五节 液化石油气的灌装	248

第一章 城镇燃气的分类及其性质

第一节 燃气的分类

城镇燃气是以可燃组分为主的混合气体，可燃组分一般有碳氢化合物、氢和一氧化碳，不可燃组分有二氧化碳、氮和氧等。

燃气的种类有很多，可以作为城镇燃气气源供应的主要是天然气和液化石油气，人工煤气将逐步被以上两种燃气所取代，生物气可以作为农村或乡镇以村或户为单位的能源。现在我国已经开始出现生物气的工业生产，经过提纯成为人工天然气作为城镇气源。

一、天然气

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，是理想的城镇燃气气源。有效利用天然气对于促进低碳化、实现节能减排、提高能源利用率和实现能源的可持续发展具有重要的意义。天然气的开采、储运和使用既经济又方便。例如液态天然气的体积仅为气态时的 1/600，有利于运输和储存。一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，天然气工业在世界范围内发展迅速。21 世纪，天然气将会取代石油成为全球的主导能源。

我国有较为丰富的天然气资源，但天然气资源地理分布不均衡，为实现资源的合理调配利用，20 世纪 90 年代以来，我国天然气管道向大型化、网络化方向发展，多条天然气长输管线进行建设并投入使用。

天然气有多种分类方式，按照勘探、开采技术可分为常规天然气和非常规天然气两大类。

（一）常规天然气

常规天然气按照矿藏特点可分为气田气、石油伴生气和凝析气田气等。

1. 气田气

气田气指产自天然气气藏的纯天然气。气田气的组分以甲烷为主，还含有少量的非烃类组分如二氧化碳、硫化氢、氮、氧和氢等，微量组分有氦和氩。

2. 石油伴生气

石油伴生气指与石油共生的、伴随石油一起开采出来的天然气。石油伴生气的主要成分是甲烷、乙烷、丙烷和丁烷，还有少量的戊烷和重烃。

3. 凝析气田气

凝析气田气是指从深层气田开采的含石油轻质馏分的天然气。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。

（二）非常规天然气

非常规天然气是指由于目前技术经济条件的限制尚未投入工业开采的天然气资源，包

括煤层气、页岩气、天然气水合物、水溶气、浅层生物气及致密砂岩气等。我国非常规天然气资源量丰富，在未来将具有巨大的应用前景。

1. 煤层气

煤层气又称煤层甲烷气，是煤层形成过程中经过生物化学和变质作用以吸附或游离状态存在于煤层及固岩中的自储式天然气。煤层气的成分以甲烷为主，含有少量的二氧化碳、氮、氢以及烃类化合物。煤层气的开发利用可以防范煤矿瓦斯事故、有效减排温室气体，并可作为一种高效、洁净的城镇燃气气源。我国鼓励煤层气的开发利用，目前，煤层气已经像常规天然气一样得到开采利用，初步形成产业化发展模式。

2. 页岩气

页岩气是以吸附或游离状态存在于暗色泥页岩或高碳泥页岩中的天然气。由于页岩气储层的渗透率低，使页岩气的开采难度较大。美国是世界上页岩气勘探开发利用技术较成熟的国家，已经实现了页岩气商业性开发。我国页岩气资源广泛分布于海相、陆相盆地，资源量丰富。

3. 天然气水合物

天然气水合物 (Gashydrates 或 Gas Hydrates) 俗称“可燃冰”，是天然气与水在一定条件下形成的类冰固态化合物。形成天然气水合物的主要气体为甲烷，在标准状态下，1 单位体积的甲烷水合物最多可结合 164 单位体积的甲烷。在天然气水合物的开采过程中，最大限度地减少对环境和气候的影响等技术难题是目前需要解决的问题。

二、液化石油气

液化石油气是在开采天然气及石油或炼制石油过程中，作为副产品而获得的一部分碳氢化合物，分为天然石油气和炼厂石油气。

目前我国城镇供应的液化石油气主要来自炼油厂，其主要组分是丙烷 (C_3H_8)、丙烯 (C_3H_6)、丁烷 (C_4H_{10}) 和丁烯 (C_4H_8)，习惯上称 C_3 、 C_4 ，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，液化后体积缩小约为原体积的 1/250。

液化石油气是管输天然气很好的补充气源，在天然气长输管线达不到的城镇，将会广泛采用液化石油气。另外，液化石油气也可以作为汽车燃料。

三、人工煤气

人工煤气是以煤或石油系产品为原料转化制得的可燃气体。按照生产方法和工艺的不同，一般可分为干馏煤气、气化煤气和油制气等。

目前，作为城镇气源的人工煤气主要有：焦炉炼焦副产品的高温干馏煤气和以石脑油为原料的油制气。人工煤气作为城镇气源将逐步被天然气所取代。

四、生物气

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，在微生物的作用下产生的可燃气体，叫做生物气 (沼气)。发酵的原料来源广泛，农作物的秸秆、人畜粪便、垃圾、杂草和落叶等有机物质都可以作为制取生物气的原料，因此生物气属于可再生能源。生物气的组分中甲烷的含量约为 60%，二氧化碳约为 35%，此外，还含有少量的氢和一氧化碳等气体。工业化生产的人工沼气，可在小范围内供应城镇居民及工业用户使用，也可以脱除二氧化碳后，转化为人工天然气供城市使用。

第二节 燃气的基本性质

无论是天然气、液化石油气还是人工煤气，由于产地不同即使是同一种类燃气的成分和热值都不尽相同，有时区别还可能很大。燃具制造商按照各类燃气的标准气进行设计和制造，用户也按此选择燃具。另外，当一种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、回火及不完全燃烧等现象。因此，有必要对燃气进行进一步的细化分类。《城镇燃气分类和基本特性》(GB/T 13611)根据燃气的华白数和燃烧势对燃气进行的分类如表 1-1 所示。表中所列华白数和燃烧势的波动范围是规定的最大允许波动范围，作为城镇燃气的源时应尽量控制在 $\pm 5\%$ 以内。

城镇燃气的类别及特性指标 (干燃气, 15℃, 101.325kPa) 表 1-1

类 别		高华白数 W_h (MJ/m ³)		燃烧势 CP	
		标 准	范 围	标 准	范 围
人工煤气	3R	13.71	12.62~14.66	77.7	46.5~85.5
	4R	17.78	16.38~19.03	107.9	64.7~118.7
	5R	21.57	19.81~23.17	93.9	54.4~95.6
	6R	25.69	23.85~27.95	108.3	63.1~111.4
	7R	31.00	28.57~33.12	120.9	71.5~129.0
天然气	3T	13.28	12.22~14.35	22.0	21.0~50.6
	4T	17.13	15.75~18.54	24.9	24.0~57.3
	6T	23.35	21.76~25.01	18.5	17.3~42.7
	10T	41.52	39.06~44.84	33.0	31.0~34.3
	12T	50.73	45.67~54.78	40.3	36.3~69.3
液化石油气	19Y	76.84	72.86~76.84	48.2	48.2~49.4
	20Y	79.64	72.86~87.53	46.3	41.6~49.4
	22Y	87.53	81.83~87.53	41.6	41.6~44.9

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。

某些低级烃的基本性质 (273.15K, 101.325kPa) 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 (kg/kmol)	16.0430	30.0700	28.0540	44.0970	42.0810	58.1240	58.1240	72.1510
摩尔体积 $V_{0,M}$ (Nm ³ /kmol)	22.3621	22.1872	22.2567	21.9360	21.9900	21.5036	21.5977	20.8910
密度 ρ_0 (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

续表

气 体	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	正戊烷
发热值								
高热值 H_h (MJ/Nm ³)	39.842	70.351	63.438	101.266	93.667	133.886	133.048	169.377
低发热值 H_l (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_l (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
黏度								
动力黏度 $\mu \times 10^6$ (Pa·s)	10.395	8.600	9.316	7.502	7.649	6.835		6.355
运动黏度 $\nu \times 10^6$ (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。

某些单一气体的基本性质(273.15K、101.325kPa)

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 (kg/kmol)	28.0104	2.0160	28.0134	31.9988	44.0098	34.0760	28.9660	18.0154
摩尔体积 $V_{0,M}$ (Nm ³ /kmol)	22.3984	22.4270	22.4030	22.3923	22.2601	22.1802	22.4003	21.6290
密度 ρ_0 (kg/Nm ³)	1.2506	0.0899	1.2504	1.4291	1.9771	1.5363	1.2931	0.8330
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	33.3	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)	200.86	31.015	310.910	430.090	468.190		320.070	321.700
发热值								
高热值 H_h (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_l (体积%)	12.5	4.0				4.3		
爆炸上限 L_h (体积%)	74.2	75.9				45.5		
黏度								
动力黏度 $\mu \times 10^6$ (Pa·s)	16.573	8.355	16.671	19.417	14.023	11.670	17.162	8.434
运动黏度 $\nu \times 10^6$ (m ² /s)	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 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 (平均摩尔质量)

混合气体的平均分子量按式 (1-1) 计算:

$$M = \sum y_i M_i = y_1 M_1 + y_2 M_2 + \cdots + y_n M_n \quad (1-1)$$

式中 M ——混合气体的平均分子量 (kg/kmol);
 $y_1, y_2 \cdots y_n$ ——混合气体中各组分的摩尔分数 (气体的摩尔分数与体积分数数值相等)。

$M_1, M_2 \cdots M_n$ ——混合气体中各组分的分子量 (kg/kmol)。

混合液体的平均分子量按式 (1-2) 计算:

$$M = \sum x_i M_i = x_1 M_1 + x_2 M_2 + \cdots + x_n M_n \quad (1-2)$$

式中 M ——混合液体的平均分子量 (kg/kmol);

$x_1, x_2 \cdots x_n$ ——混合液体中各组分的摩尔分数;

$M_1, M_2 \cdots M_n$ ——混合液体中各组分的分子量 (kg/kmol)。

(二) 平均密度和相对密度

混合气体的平均密度和相对密度按式 (1-3) 和式 (1-4) 计算:

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

$$S = \frac{\rho_0}{1.293} = \frac{M}{1.293 V_{0,M}} \quad (1-4)$$

式中 ρ ——混合气体的平均密度 (kg/m³);

m ——混合气体的质量 (kg);

v ——混合气体的体积 (m³);

V_M ——混合气体的平均摩尔体积 (m³/kmol);

S ——混合气体的相对密度;

ρ_0 ——标准状态下混合气体的平均密度 (kg/Nm³);

1.293——标准状态下空气的密度 (kg/Nm³);

$V_{0,M}$ ——标准状态下混合气体的平均摩尔体积 (Nm³/kmol)。

对于由双原子气体和甲烷组成的混合气体, $V_{0,M}$ 可取 22.4Nm³/kmol, 而对于由其他碳氢化合物组成的混合气体, 则取 22.0Nm³/kmol。可采用式 (1-5) 精确计算:

$$V_{0,M} = \sum y_i V_{0,M_i} = y_1 V_{0,M_1} + y_2 V_{0,M_2} + \cdots + y_n V_{0,M_n} \quad (1-5)$$

式中 $V_{0,M_1}, V_{0,M_2} \cdots V_{0,M_n}$ ——标准状态下混合气体中各组分的摩尔体积 (Nm³/kmol)。

混合气体平均密度还可根据混合气体中各组分的密度及体积分数按式 (1-6) 进行计算:

$$\rho_0 = \sum y_i \rho_{0,i} = y_1 \rho_{0,1} + y_2 \rho_{0,2} + \cdots + y_n \rho_{0,n} \quad (1-6)$$

式中 $\rho_{0,1}, \rho_{0,2} \cdots \rho_{0,n}$ ——标准状态下混合气体中各组分的密度 (kg/Nm³)。

含有水蒸气的燃气称湿燃气, 其密度按式 (1-7) 计算:

$$\rho_0^w = (\rho_0^g + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-7)$$

式中 ρ_0^w ——标准状态下湿燃气的密度 (kg/Nm³);

ρ_0^g ——标准状态下干燃气的密度 (kg/Nm^3);

d ——燃气含湿量 (kg 水蒸气/ Nm^3 干燃气);

0.833——标准状态下水蒸气的密度 (kg/Nm^3)。

干、湿燃气体积分数按式 (1-8) 换算:

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

式中 y_i^w ——湿燃气体积分数;

y_i ——干燃气体积分数;

k ——换算系数, $k = \frac{0.833}{0.833+d}$ 。

几种燃气在标准状态下的密度 (平均密度) 和相对密度 (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, 而气态液化石油气比空气重约一倍。

混合液体平均密度与相同状态下水的密度之比称为混合液体的相对密度。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】 已知混合气体各组分的摩尔分数分别为 $y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.04$, $y_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.75$, $y_{\text{nC}_4\text{H}_{10}} = 0.20$ (正丁烷), $y_{\text{nC}_5\text{H}_{12}} = 0.01$ (正戊烷)。求混合气体平均分子量、平均密度和相对密度。

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

$$\begin{aligned} M &= \sum y_i M_i \\ &= 0.04 \times 30.070 + 0.75 \times 44.097 + 0.20 \times 58.124 + 0.01 \times 72.151 \\ &= 46.622\text{kg}/\text{kmol} \end{aligned}$$

由表 1-2 查得标准状态下各组分的密度为 $\rho_{0,\text{C}_2\text{H}_6} = 1.355 \text{ kg}/\text{Nm}^3$, $\rho_{0,\text{C}_3\text{H}_8} = 2.010 \text{ kg}/\text{Nm}^3$, $\rho_{0,\text{nC}_4\text{H}_{10}} = 2.703 \text{ kg}/\text{Nm}^3$, $\rho_{0,\text{nC}_5\text{H}_{12}} = 3.454 \text{ kg}/\text{Nm}^3$, 按式 (1-6) 求标准状态下混合气体的平均密度:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \sum y_i \rho_{0,i} \\ &= 0.04 \times 1.355 + 0.75 \times 2.010 + 0.20 \times 2.703 + 0.01 \times 3.454 \\ &= 2.137\text{kg}/\text{Nm}^3 \end{aligned}$$

按式 (1-4) 求混合气体的相对密度:

$$S = \frac{\rho_0}{1.293} = \frac{2.137}{1.293} = 1.653$$

【例 1-2】 已知干燃气的体积分数分别为 $y_{\text{CO}_2}=0.019$, $y_{\text{C}_m\text{H}_n}=0.039$ (可按 C_3H_6 计算), $y_{\text{O}_2}=0.004$, $y_{\text{CO}}=0.063$, $y_{\text{H}_2}=0.544$, $y_{\text{CH}_4}=0.315$, $y_{\text{N}_2}=0.016$ 。假定燃气含湿量为 $d=0.002\text{kg}$ 水蒸气/ Nm^3 干燃气, 求湿燃气的体积分数及其平均密度。

【解】

(1) 湿燃气的体积分数

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) 求湿燃气的体积分数:

$$y_{\text{CO}_2}^{\text{w}} = k y_{\text{CO}_2} = 0.9976 \times 0.019 = 0.01895$$

依次可得: $y_{\text{C}_m\text{H}_n}^{\text{w}} = 0.03891$, $y_{\text{O}_2}^{\text{w}} = 0.00399$, $y_{\text{CO}}^{\text{w}} = 0.06285$, $y_{\text{H}_2}^{\text{w}} = 0.54270$, $y_{\text{CH}_4}^{\text{w}} = 0.31424$, $y_{\text{N}_2}^{\text{w}} = 0.01596$

$$\text{而 } y_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{w}} = \frac{\frac{d}{0.833}}{1 + \frac{d}{0.833}} = \frac{d}{0.833+d} = \frac{0.002}{0.833+0.002} = 0.00240$$

$$\begin{aligned} \sum y_i^{\text{w}} &= 0.01895 + 0.03891 + 0.00399 + 0.06285 \\ &\quad + 0.54270 + 0.31424 + 0.01596 + 0.00240 = 1.0 \end{aligned}$$

(2) 湿燃气的平均密度

标准状态下干燃气的平均密度:

$$\begin{aligned} \rho_0^{\text{d}} &= \sum y_i \rho_{0,i} \\ &= 0.019 \times 1.9771 + 0.039 \times 1.9136 + 0.004 \times 1.4291 + 0.063 \times 1.2506 \\ &\quad + 0.544 \times 0.0899 + 0.315 \times 0.7174 + 0.016 \times 1.2504 \\ &= 0.492\text{kg}/\text{Nm}^3 \end{aligned}$$

按式 (1-7) 求湿燃气密度:

$$\begin{aligned} \rho_0^{\text{w}} &= (\rho_0^{\text{d}} + d) \frac{0.833}{0.833+d} \\ &= (0.492 + 0.002) \frac{0.833}{0.833+0.002} \\ &= 0.493\text{kg}/\text{Nm}^3 \end{aligned}$$

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, 使气体液化所必需的压力叫临界压力。

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。

从 E 点开始压缩至 D 点时气体开始液化, 到

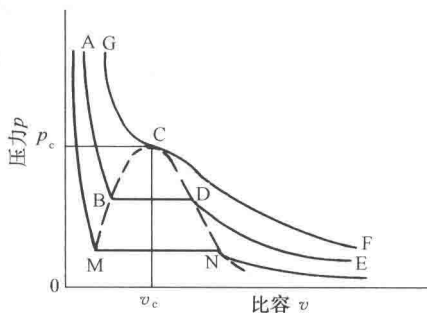


图 1-1 气体 $p-v$ 图的示意图

B点液化完成；而从F点开始压缩至C点时气体开始液化，但此时没有相当于BD的直线部分，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，越易于液化。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，故较容易液化。

几种气体的液态-气态平衡曲线如图 1-2 所示，曲线左侧为液态，右侧为气态，曲线的顶点为临界点。

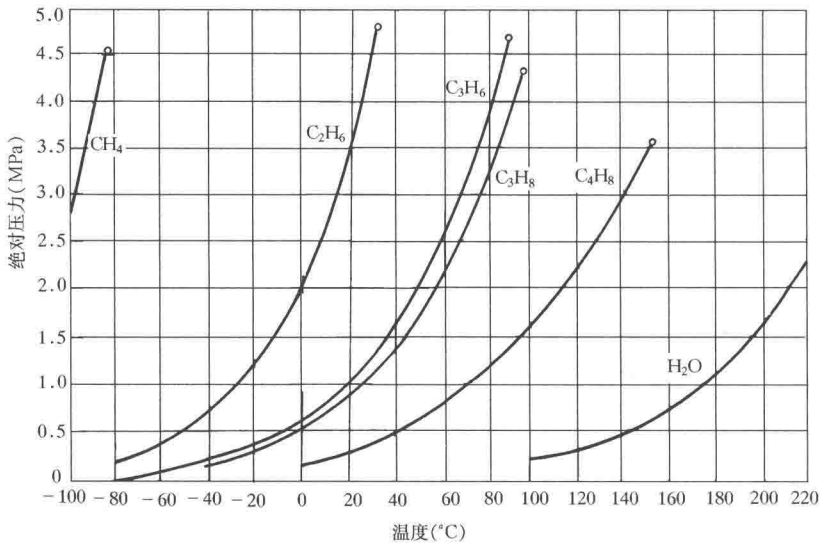


图 1-2 几种气体的液态-气态平衡曲线

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 时使丙烷液化的绝对压力为 0.846MPa，而当温度为 -20°C 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：

$$p_{m,c} = y_1 p_{c_1} + y_2 p_{c_2} + \dots + y_n p_{c_n} \quad (1-9)$$

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

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

p_{c_1} 、 p_{c_2} ... p_{c_n} ——混合气体中各组分的临界压力 (MPa)；

T_{c_1} 、 T_{c_2} ... T_{c_n} ——混合气体中各组分的临界温度 (K)；

y_1 、 y_2 ... y_n ——混合气体中各组分的体积分数。

(二) 实际气体状态方程

当燃气压力低于 1MPa 和温度在 10~20°C 时，在工程上还可视为理想气体。但当压力很高（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会很大。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式 (1-11)：