

城市燃气 基础教程

CHENGSHI RANQI JICHU JIAOCHENG

钱文斌 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



城市燃气基础教程

主 编 钱文斌
参 编 沈 蓓 梁 立 何承明
高慧娜 龚小辉 李丹华
陈长军



机械工业出版社

本书是一本学习城市燃气相关知识的基础培训教材,内容包括燃气基础知识、燃气输配、燃气应用、LNG/CNG/LPG 供应系统、燃气工程设计、燃气管道工程施工、燃气运行及安全管理七部分,比较系统、全面、准确、简洁地介绍了燃气行业最新的理论知识、管理经验以及行业要求,是一本理论全面、实时性和操作性较强的燃气专业基础教材。

本书适合作为燃气相关行业管理人员和燃气相关企业员工的培训学习专业资料,还可以作为高等院校燃气专业的参考资料,也可以作为职业教育燃气相关专业的学习教材。

为方便教学,本书配有电子课件,凡选用本书作为授课教材的教师均可登录 [www. cmpedu. com](http://www.cmpedu.com) 免费注册下载。编辑咨询电话:010-88379865。

图书在版编目(CIP)数据

城市燃气基础教程/钱文斌主编. —北京:机械工业出版社,2012.5
ISBN 978-7-111-38355-0

I. ①城… II. ①钱… III. ①城市燃气—教材 IV. ①TU996

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第096634号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王莹莹 责任编辑:曹新宇 王莹莹

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:鞠 杨 责任印制:张 楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2012年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 22.75印张 · 562千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-38355-0

定价:68.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:[http://www. cmpedu. com](http://www.cmpedu.com)

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www. cmpbook. com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo. com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



前 言

随着西气东输、川气东送和海气上岸等国内各大天然气项目的陆续建设和完成，揭开了中国燃气行业如火如荼的发展序幕，在今后相当长的时间里，燃气行业会经历一个由快速发展到全面普及的过程。国内燃气企业普遍存在着技术力量薄弱、专业人员稀缺的现象，这不但制约了燃气企业的快速发展，也给燃气企业的安全运行留下了隐患。为了尽快提高燃气企业的技术水平，行之有效的办法是展开行之有效的专业技术培训，使燃气行业管理人员和燃气企业员工达到相应岗位要求的技术素质。

为此，我们有针对性地编写了这本《城市燃气基础教程》，内容包括燃气基础知识、燃气输配、燃气应用、LNG/CNG/LPG 供应系统、燃气工程设计、燃气管道工程施工、燃气运行及安全管理七部分，比较系统、全面、准确、简洁地介绍了燃气行业最新的理论知识、管理经验以及行业要求，是一本理论全面、实时性和操作性较强的燃气专业基础教材。

本书由钱文斌任主编，参与编写的还有沈蓓、梁立、何承明、高慧娜、龚小辉、李丹华和陈长军。

由于编者水平有限，本书难免存在不妥之处，欢迎广大读者提出批评和建议，以便我们修订再版时完善。

编 者



目 录

前 言

第一部分 燃气基础知识	1
第一章 燃气的分类.....	2
第二章 燃气的基本性质.....	4
第三章 燃气的互换性.....	20
第四章 城市燃气的质量要求 及加臭.....	23
第五章 热量单位换算及常用 燃气热值.....	27
第二部分 燃气输配	29
第一章 燃气的长距离输气系统.....	30
第一节 长距离输气系统 的构成.....	30
第二节 输气管道.....	31
第二章 城市燃气管网系统.....	36
第一节 城市燃气管网系统的 分类及选择.....	36
第二节 市政燃气管道的布线.....	37
第三节 室内燃气供应系统.....	38
第三章 燃气的调压.....	41
第一节 燃气调压器.....	41

第二节 燃气调压设施.....	46
第四章 燃气计量及远程抄表.....	49
第一节 燃气的计量.....	49
第二节 远程抄表.....	53
第五章 燃气的压送.....	57
第一节 活塞式压缩机.....	57
第二节 回转式压缩机.....	60
第三节 变工况工作与流量 的调节.....	61
第六章 燃气的储存.....	64
第一节 低压湿式罐.....	64
第二节 高压储气罐.....	65
第三节 燃气储配站.....	67
第四节 LNG 储气.....	68
第五节 长输管线末段储气.....	70
第六节 燃气的地下储存.....	70
第七节 不同储气方式的特点.....	71
第七章 地下管网地理信息系统.....	73
第八章 SCADA 系统.....	75
第三部分 燃气应用	79
第一章 燃气燃烧基本常识.....	80
第一节 燃气燃烧方法.....	80

第二节 燃烧器	81	第四节 初步设计	189
第三节 燃气燃烧的安全控制	83	第五节 施工图设计	190
第二章 燃气的具体应用	86	第六节 施工图设计文件审查	192
第四部分 LNG/CNG/LPG		第二章 燃气管道工程设计技术	193
供应系统	95	第一节 常用技术标准	193
第一章 液化天然气 (LNG)		第二节 管材及附件	197
供应	96	第三节 施工图	199
第一节 LNG 的性质	96	第四节 主要设备	210
第二节 LNG 供应的基本情况	97	第五节 管道附属设备	212
第三节 天然气液化	101	第三章 城市燃气需用量及	
第四节 液化天然气的运输	103	供需平衡	214
第五节 液化天然气气化站	106	第一节 城市燃气需用量	214
第六节 LNG 瓶组站	119	第二节 燃气需用工况	216
第七节 LNG 汽车加气站	122	第三节 燃气输配系统的小时	
第二章 压缩天然气 (CNG)		计算流量	217
供应	127	第四节 燃气输配系统的	
第一节 CNG 的性质	127	储气调峰	218
第二节 压缩天然气供应	128	第四章 燃气管网的水力计算	222
第三节 压缩天然气运输	128	第一节 管道内燃气流动的	
第四节 压缩天然气储配站	129	基本方程式	222
第五节 CNG 瓶组站	134	第二节 城市燃气管道水力计算	
第六节 压缩天然气加气站	136	公式及计算图表	222
第七节 L-CNG 汽车加气站	150	第三节 管网水力计算	230
第三章 液化石油气 (LPG)		第四节 常用燃气管道规格的	
供应	153	确定	238
第一节 LPG 的性质及特点	153	第五章 压力管道	241
第二节 液化石油气运输	156	第一节 压力管道的基本概念	241
第三节 液化石油气气化站和		第二节 设计资格认证	242
混气站	158	第三节 压力管道设计管理	243
第四节 LPG 汽车加气站	168	第六部分 燃气管道工程施工	245
第五节 LPG 瓶组站	176	第一章 燃气管道工程建设管理	246
第六节 LPG 瓶装气供应	180	第一节 建设工程项目管理	
第五部分 燃气工程设计	183	概论	246
第一章 燃气工程设计概述	184	第二节 工程项目的质量控制	251
第一节 城市燃气建设程序	184	第三节 工程项目的进度控制	256
第二节 城市燃气规划	185	第四节 工程项目的投资控制	265
第三节 可行性研究报告	187	第五节 建设工程监理	272
		第二章 燃气工程常用的管材	

和管件·····	275
第一节 钢管·····	275
第二节 聚乙烯燃气管道·····	277
第三节 铸铁管·····	280
第四节 铝塑复合管·····	280
第五节 管件·····	281
第六节 阀门与法兰·····	283
第三章 燃气管道的安装·····	288
第一节 土方工程·····	288
第二节 钢管的安装·····	291
第三节 PE 燃气管道的安装 ·····	298
第四节 铸铁管的安装·····	301
第四章 钢管的防腐·····	304
第一节 钢管腐蚀的原因·····	304
第二节 地上钢管的防腐·····	304
第三节 埋地钢管的防腐·····	307
第五章 燃气管道的防雷·····	313
第六章 燃气管道的穿跨越施工·····	316
第一节 顶管施工·····	316
第二节 水下敷设·····	317
第三节 定向钻·····	318
第四节 跨越施工·····	320

第七章 燃气工程的竣工验收·····	321
--------------------	-----

第七部分 燃气运行及安全管理·····	323
---------------------	-----

第一章 燃气运行及安全管理的 一般规定·····	324
第二章 燃气设备管理·····	326
第三章 巡视和检查·····	338
第一节 管道及附属设施巡视·····	338
第二节 用户设施的检查·····	340
第四章 燃气管道抢险维修技术·····	342
第一节 准备工作·····	342
第二节 抢修现场·····	342
第三节 抢修作业程序·····	342
第四节 相关要求·····	344
第五章 安全运行管理·····	348
第一节 安全概念·····	348
第二节 事故类型·····	348
第三节 事故控制技术·····	350
第四节 安全风险控制与管理·····	352

参考文献·····	356
-----------	-----



第一部分

燃气基础知识

第一章 燃气的分类

第二章 燃气的基本性质

第三章 燃气的互换性

第四章 城市燃气的质量要求及加臭

第五章 热量单位换算及常用燃气热值

第一章 燃气的分类

燃气的种类有很多，可分为天然气、人工燃气、液化石油气、生物气四种。可以作为城市燃气气源供应的主要是天然气和液化石油气，人工燃气将逐步被以上两种燃气所取代，生物气可以在农村或乡镇作为以村或户为单位的能源。

一、天然气

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）气田气是指产自天然气气藏的纯天然气。气田气的组分以甲烷为主。

（2）石油伴生气是指与石油共生的、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。

（3）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，还含有质量分数2%~5%的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及制取的天然气资源，包括天然气水合物、煤层气、页岩气、煤制天然气等。

（1）天然气水合物俗称“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。

（2）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。

（3）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。

（4）煤制天然气是指煤经过气化产生合成气，再经过甲烷化处理，生产出的代用天然气（SNG）。煤制天然气的能源转化效率较高，技术已基本成熟，是生产石油替代产品的有效途径。生产煤制天然气的耗水量在煤化工行业中相对较少，而转化效率又相对较高，因此，与耗水量较大的煤制油相比具有明显的优势。此外，生产煤制天然气过程中利用的水中不存在污染物质，对环境的影响也较小。

二、人工燃气

人工燃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，一般可分为固体燃料干馏煤气、固体燃料气化煤气、油制气、高炉煤气。

（1）固体燃料干馏煤气是利用焦炉、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。

（2）固体燃料气化煤气是以煤作为原料采用纯氧和水蒸气为汽化剂，获得高压蒸汽氧



鼓风煤气，也叫高压气化煤气。压力氧化煤气、水煤气、发生炉煤气等均属于此类煤气。

(3) 油制气是利用重油（炼油厂提取汽油、煤油和柴油之后所剩的油品）制取的燃气。

(4) 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。

目前，作为城市气源的人工燃气主要有：焦炉炼焦副产的高温干馏煤气、以纯氧和水蒸气作汽化剂的高压气化煤气和以石脑油为原料的油制气。

三、液化石油气

液化石油气是在天然气及石油开采或炼制石油过程中，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。

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，并在微生物的作用下产生可燃性气体，叫做生物气，也称作沼气。生物气的低发热值约为 $20\,900\text{ kJ/Nm}^3$ ($4\,993\text{ kcal/Nm}^3$)。目前，沼气在一些乡镇中得到了广泛的应用。

第二章 燃气的基本性质

燃气组成中常见的低级烃和某些气体的基本性质分别列于表 1-2-1 和表 1-2-2。

表 1-2-1 某些低级烃的基本性质 (273.15 K、101.325 kPa)

气体 基本性质	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 $M/(\text{kg/kmol})$	16.043 0	30.070 0	28.054 0	44.097 0	42.081 0	58.124 0	58.124 0	72.151 0
摩尔体积 $V_{0,M}/(\text{Nm}^3/\text{kmol})$	22.362 1	22.187 2	22.256 7	21.936 0	21.990 0	21.503 6	21.597 7	20.891 0
密度 $\rho_0/(\text{kg/Nm}^3)$	0.717 4	1.355 3	1.260 5	2.010 2	1.913 6	2.703 0	2.691 2	3.453 7
气体常数 $R/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	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	4.640 7	4.883 9	5.339 8	4.397 5	4.762 3	3.617 3	3.657 8	3.343 7
临界密度 $\rho_c/(\text{kg/Nm}^3)$	162	210	220	226	232	225	221	232
发热值								
高发热值 $H_h/(\text{MJ/Nm}^3)$	39.842	70.351	63.438	101.266	93.667	133.886	133.048	169.377
低发热值 $H_l/(\text{MJ/Nm}^3)$	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 $L_l/(\text{体积}\%)$	5.0	2.9	2.7	2.1	2.0	1.5	1.8	1.4
爆炸上限 $L_h/(\text{体积}\%)$	15.0	13.0	34.0	9.5	11.7	8.5	8.5	8.3
黏度								
动力黏度 $\mu \times 10^6/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	10.395	8.600	9.316	7.502	7.649	6.835		6.355
运动黏度 $\nu \times 10^6/(\text{m}^2/\text{s})$	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 293 K 条件下, 可燃气体在空气中的体积百分数。

表 1-2-2 某些气体的基本性质 (273.15 K、101.325 kPa)

气体 基本性质	一氧化碳	氢气	氮气	氧气	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 $M/(\text{kg/kmol})$	28.010 4	2.016 0	28.013 4	31.998 8	44.009 8	34.076 0	28.966 0	18.015 4
摩尔体积 $V_{0,M}/(\text{Nm}^3/\text{kmol})$	22.398 4	22.427 0	22.403 0	22.392 3	22.260 1	22.180 2	22.400 3	21.629 0
密度 $\rho_0/(\text{kg/Nm}^3)$	1.250 6	0.089 9	1.250 4	1.429 1	1.977 1	1.536 3	1.293 1	0.833 0
气体常数 $R/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	296.63	412.664	296.66	259.585	188.74	241.45	286.867	445.357
临界参数								

(续)

气体 基本性质	一氧化碳	氢气	氮气	氧气	二氧化碳	硫化氢	空气	水蒸气
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	3.495 7	1.297 0	3.394 4	5.076 4	7.386 6		3.766 3	22.119 3
临界密度 $\rho_c/(kg/Nm^3)$	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 $L_l/(\text{体积}\%)$	12.5	4.0				4.3		
爆炸上限 $L_h/(\text{体积}\%)$	74.2	75.9				45.5		
黏度								
动力黏度 $\mu \times 10^6/Pa \cdot s$	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	93.0	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 293 K 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可按式 (1-2-1) 计算:

$$M = \sum y_i M_i = y_1 M_1 + y_2 M_2 + \cdots + y_n M_n \quad (1-2-1)$$

式中 M ——混合气体平均分子量 ($kg/kmol$);

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——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可按式 (1-2-2) 计算:

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

式中 M ——混合液体平均分子量 ($kg/kmol$);

$x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——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

混合气体平均密度和相对密度按式 (1-2-3) 和式 (1-2-4) 计算:

$$\rho = m/v = M/V_M \quad (1-2-3)$$

$$S = \rho_0/1.293 = M/1.293 V_{0,M} \quad (1-2-4)$$

式中 ρ ——混合气体的平均密度 (kg/m^3);

m ——混合气体的质量 (kg);

v ——混合气体的体积 (m^3);

V_M ——混合气体的平均摩尔体积 (m^3/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/Nm^3);

1.293——标准状态下空气的密度 (kg/Nm^3);

$V_{0,M}$ ——标准状态下混合气体的平均摩尔体积 (Nm^3/kmol)。

对于由双原子气体和甲烷组成的混合气体, $V_{0,M}$ 可取 $22.4 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$, 而对于由其他碳氢化合物组成的混合气体, $V_{0,M}$ 则取 $22.0 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$ 。采用式 (1-2-5) 可精确计算:

$$V_{0,M} = \sum y_i V_{0,M_i} = y_1 V_{0,M_1} + y_2 V_{0,M_2} + \cdots + y_n V_{0,M_n} \quad (1-2-5)$$

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 (Nm^3/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 (1-2-6) 进行计算:

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

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/Nm^3)。

含有水蒸气的燃气称为湿燃气, 其密度可按式 (1-2-7) 计算:

$$\rho_0^w = (\rho_0^g + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-2-7)$$

式中 ρ_0^w ——标准状态下湿燃气的密度 (kg/Nm^3);

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 (1-2-8) 换算:

$$y_i^w = k y_i \quad (1-2-8)$$

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, $k = \frac{0.833}{0.833 + d}$ 。

几种燃气的密度 (标准状态下) 和相对密度 (即平均密度和平均相对密度) 列于表1-2-3。

表 1-2-3 几种燃气的密度和相对密度

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 1-2-3 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 1-2-1】 已知混合气体各组分的摩尔分数分别为 $y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.04$, $y_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.75$,



$y_{nC_4H_{10}} = 0.20$, $y_{nC_5H_{12}} = 0.01$, 求混合气体的平均分子量、平均密度和相对密度。

【解】 由表 1-2-1 查得各组分分子量分别为 $M_{C_2H_6} = 30.070$, $M_{C_3H_8} = 44.097$, $M_{nC_4H_{10}} = 58.124$, $M_{nC_5H_{12}} = 72.151$, 按式 (1-2-1) 求混合气体的平均分子量:

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

由表 1-2-1 查得标准状态下各组分的密度为 $\rho_{0,C_2H_6} = 1.355 \text{ kg/Nm}^3$, $\rho_{0,C_3H_8} = 2.010 \text{ kg/Nm}^3$, $\rho_{0,nC_4H_{10}} = 2.703 \text{ kg/Nm}^3$, $\rho_{0,nC_5H_{12}} = 3.454 \text{ kg/Nm}^3$, 按式 (1-2-6) 求标准状态下混合气体的平均密度:

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

按式 (1-2-4) 求混合气体的相对密度:

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

【例 1-2-2】 已知干燃气的体积分数分别为 $y_{CO_2} = 0.019$, $y_{C_mH_n} = 0.039$ (按 C_3H_6 计算), $y_{O_2} = 0.004$, $y_{CO} = 0.063$, $y_{H_2} = 0.544$, $y_{CH_4} = 0.315$, $y_{N_2} = 0.016$, 假定燃气含湿量为 $d = 0.002 \text{ kg 水蒸气/Nm}^3$ 干燃气, 水蒸气的相对密度为 0.833 kg/Nm^3 , 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 (1-2-8) 求湿燃气的体积分数:

$$y_{CO_2}^w = k y_{CO_2} = 0.9976 \times 0.019 = 0.01895$$

依次可得: $y_{C_mH_n}^w = 0.03891$, $y_{O_2}^w = 0.00399$, $y_{CO}^w = 0.06285$, $y_{H_2}^w = 0.54270$, $y_{CH_4}^w = 0.31424$, $y_{N_2}^w = 0.01596$

$$\text{而 } y_{H_2O}^w = \frac{\frac{d}{0.833}}{1 + \frac{d}{0.833}} = \frac{d}{0.833 + d} = \frac{0.002}{0.833 + 0.002} = 0.00240$$

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

(2) 湿燃气的平均密度

根据式 (1-2-6), 标准状态下干燃气的平均密度:

$$\rho_0^g = \sum y_i \rho_{0,i}$$

$$\begin{aligned}
 &= \gamma_{\text{CO}_2} \rho_{0, \text{CO}_2} + \gamma_{\text{C}_m \text{H}_n} \rho_{0, \text{C}_m \text{H}_n} + \cdots + \gamma_{\text{N}_2} \rho_{0, \text{N}_2} \\
 &= 0.019 \times 1.977 \text{ 1} + 0.039 \times 1.913 \text{ 6} + 0.004 \times 1.429 \text{ 1} + 0.063 \times 1.250 \text{ 6} + \\
 &\quad 0.544 \times 0.089 \text{ 9} + 0.315 \times 0.717 \text{ 4} + 0.016 \times 1.250 \text{ 4} \\
 &= 0.492 \text{ (kg/Nm}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

按式 (1-2-7) 求湿燃气密度:

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

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做临界压力。

图 1-2-1 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。

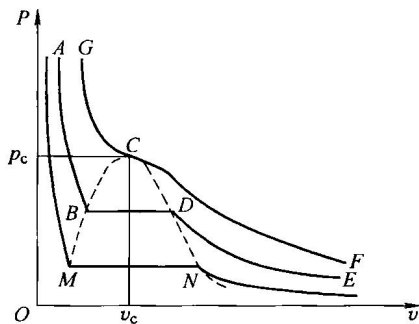


图 1-2-1 临界状态

从 E 点开始压缩至 D 点时气体开始液化，到 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1-2-1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 1-2-2 所示。

图 1-2-2 中的曲线是液体及其蒸气的平衡曲线，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，则气化所需压力越小。例如 20℃ 时使丙烷 (C_3H_8) 液化的绝对压力为 0.846 MPa，而当温度为 -20℃ 时，在 0.248 MPa 绝对压力下即可液化。

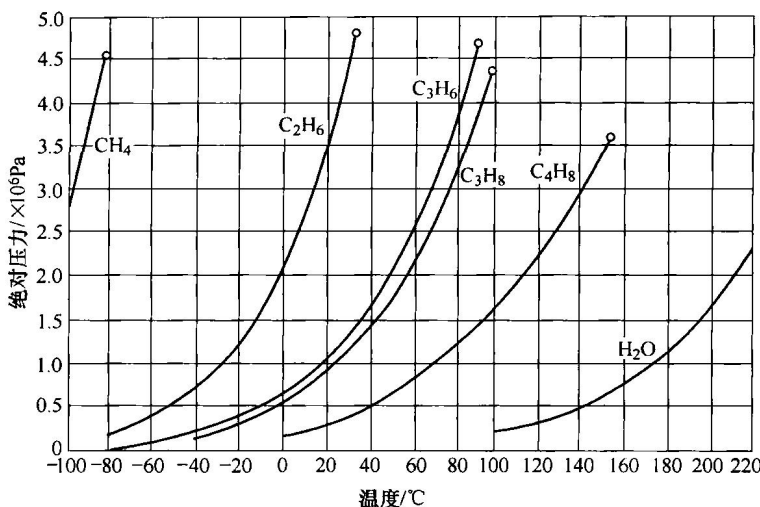


图 1-2-2 几种气体的液态—气态平衡曲线

混合气体的平均临界压力和平均临界温度按式 (1-2-9) 和式 (1-2-10) 计算:

$$p_{m,c} = y_1 p_{c1} + y_2 p_{c2} + \cdots + y_n p_{cn} \quad (1-2-9)$$

$$T_{m,c} = y_1 T_{c1} + y_2 T_{c2} + \cdots + y_n T_{cn} \quad (1-2-10)$$

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

p_{c1} 、 p_{c2} 、 $\cdots$ 、 p_{cn} ——混合气体中各组分的临界压力;

T_{c1} 、 T_{c2} 、 $\cdots$ 、 T_{cn} ——混合气体中各组分的临界温度;

y_1 、 y_2 、 $\cdots$ 、 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 1 MPa 和温度在 10 ~ 20℃ 时, 在工程上可视其为理想气体。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:

$$pv = ZRT \quad (1-2-11)$$

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 随温度和压力而变化, 压缩因子 Z 值可由图 1-2-3 和图 1-2-4 确定。

图 1-2-3 和图 1-2-4 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。

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad p_r = \frac{p}{p_c} \quad (1-2-12)$$

对于混合气体, 在确定 Z 值之前, 首先要按式 (1-2-9)、式 (1-2-10) 确定平均临界

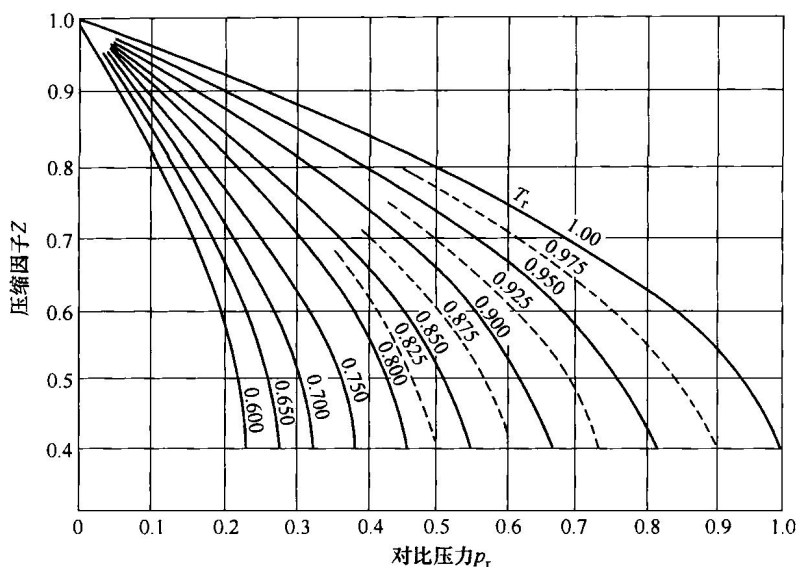


图 1-2-3 气体的压缩因子 Z 与对比温度 T_r 、对比压力 p_r 的关系 (当 $p_r < 1$, $T_r = 0.6 \sim 1.0$ 时)

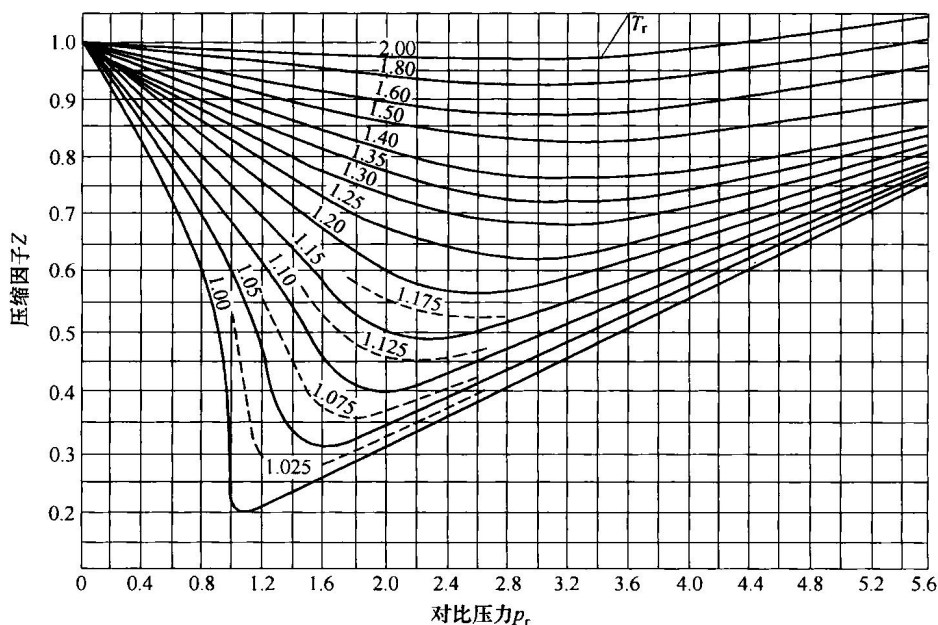


图 1-2-4 气体的压缩因子 Z 与对比温度 T_r 、对比压力 p_r 的关系 (当 $p_r < 5.6$, $T_r = 1.0 \sim 2.0$ 时)

压力和平均临界温度, 然后再按图 1-2-3、图 1-2-4 求得压缩因子 Z 。

(三) 计算例题

【例 1-2-3】 有一内径 $d = 700$ mm、长 $l = 125$ km 的天然气管道。当天然气的平均压力为 3.04 MPa (绝)、温度为 278 K, 求管道中的天然气在标准状态下 (101.325 kPa, 273.15 K) 的体积。已知天然气中各组分的体积分数为 $\gamma_{\text{CH}_4} = 0.975$, $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.002$, $\gamma_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.002$, $\gamma_{\text{N}_2} = 0.016$, $\gamma_{\text{CO}_2} = 0.005$ 。