

高等学校教学用书

输气管道设计与管埋

姚光镇 主编

石油大学出版社

输气管道设计与管埋

姚光镇 主编

石油大学出版社

内 容 提 要

本书系高等院校石油及天然气储存与运输专业的专业课教材之一。结合国内外天然气管道输送理论和技术的发展现状，书中系统地阐述了有关输气管道工程设计与技术管理的理论和知识，并吸收了石油大学近年来关于输气管道数值计算及工况仿真方面的科研成果。其主要内容包括：天然气的物化性质与净化；输气管道的基本方程、水力计算、热力计算，及其数值解；干线输气管道的工况分析；输气站及其布置；城市配气与储气。

本书亦可供从事干线输气管道及城市配气管网工程设计和技术管理的工程技术人员参考。

输气管道设计与管理

姚光镇 主编

石油大学出版社出版

(山东省—东营市)

新华书店发行

石油大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 13.75 印张 333 千字

1991年6月第1版 2002年5月第2次印刷

印数 2301~2900 册

ISBN 7-5636-0142-2/TH·04

定价：13.00 元

前 言

能源工业和交通运输业在实现我国社会主义现代化中具有重要意义，随着能源工业的发展，天然气工业必然要进一步壮大。作为天然气工业，同时也是交通运输业的组成之一的干线输气管系统也会在我国逐步发展和建成。我国海上和西部内陆油气田的开发，已将大型输气管的建设提到了日程上。本书就是为适应输气管的设计、管理、科研和教学需要而编写的。

本书以石油储运专业“输气管工艺设计”的教学大纲为主要依据，在1985年华东石油学院出版的《输气管的设计与管理》的基础上修订而成。修订中注意吸收了国内外的先进技术和理论，特别是石油大学近年来关于输气管数值计算及工况仿真方面的科研成果。

本书共十章，其中第一章及第六章一、二节由俞蓉蓉同志编写，第六章三、四节及第九章第三节由孟伟同志编写，其余章节由姚光镇编写。全书由姚光镇同志主编。

石油大学杨延昕教授担任本书审阅，对书稿提出了很多宝贵意见，使编者得益非浅。在编写与出版过程中还得到石油大学许多同志的帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误或不妥之处，欢迎读者批评指正。

编 者

1989年1月

目 录

结 论	(1)
第一节 天然气的用途	(1)
第二节 天然气管道运输的发展概况	(1)
第三节 输气系统	(3)
第一章 天然气的物理化学性质	(6)
第一节 天然气的组成	(6)
第二节 气体的状态方程式	(10)
第三节 天然气物性及其计算	(19)
第二章 天然气净化	(37)
第一节 概述	(37)
第二节 分离和除尘	(38)
第三节 天然气脱水	(41)
第四节 脱硫和脱二氧化碳	(45)
第三章 气体管流的基本方程	(49)
第一节 连续性方程	(49)
第二节 运动方程	(50)
第三节 能量方程	(53)
第四章 输气管的水力计算	(55)
第一节 稳定流动的气体管流的基本方程	(55)
第二节 水平输气管的流量基本公式	(56)
第三节 地形起伏地区输气管的流量基本公式	(58)
第四节 摩擦阻力系数与常用的输气管流量公式	(61)
第五节 输气管基本参数对流量的影响	(66)
第六节 输气管的压力分布和平均压力	(67)
第七节 等流量复杂管计算	(69)
第八节 环状集气管网的计算	(75)
第五章 输气管的热力计算	(77)
第一节 输气管的温度分布	(77)
第二节 输气管的平均温度	(80)
第三节 总传热系数	(80)
第四节 水合物	(82)
第六章 水力、热力计算的数值解	(86)
第一节 静态水力、热力计算数值解的基本方程组	(86)

第二节	静态数值解微分方程组的求解	(88)
第三节	慢瞬变流的隐式中心有限差分法求解	(91)
第四节	快瞬变流的显式特征差分法求解	(98)
第七章	输气站	(103)
第一节	压缩机的工作原理	(103)
第二节	压气站的工作特性	(108)
第三节	单个压气站与管路的联合工作	(119)
第四节	离心压缩机的调节	(124)
第五节	压气站的平面布置与工艺流程	(126)
第八章	干线输气管的工况分析与末段储气	(131)
第一节	压气站与干线输气管的联合工作	(131)
第二节	首站进站压力对沿线压力的影响	(134)
第三节	末段管路的终点压力对沿线压力的影响	(136)
第四节	压气站或部分压缩机组停运对工况的影响	(137)
第五节	定期分气或集气对工况的影响	(140)
第六节	末段储气	(142)
第九章	干线输气管压气站的布置与工艺参数选择	(151)
第一节	预先不固定站址的压气站布置	(151)
第二节	预先固定某些站址的压气站布置	(158)
第三节	输气管线工况的计算机仿真	(158)
第四节	增加输气管的输气能力	(163)
第五节	最优工艺参数选择	(166)
第十章	城市配气与储气	(172)
第一节	配气系统的设计流量	(172)
第二节	配气站	(174)
第三节	配气管网	(176)
第四节	管网水力计算公式	(179)
第五节	管网各段的计算流量	(181)
第六节	树枝状配气管网的水力计算	(184)
第七节	环状配气管网的水力计算	(187)
第八节	应用电子计算机进行环状配气管网的水力计算	(194)
第九节	气体储存	(200)
附录一	概率积分函数	(208)
附录二	一维可压缩气体流动的特征方程	(209)
	主要参考文献	(214)

绪 论

第一节 天然气的用途

天然气的热值很高，每立方米平均达 33MJ，不含灰分，容易燃烧完全，不污染环境，运输方便，价格低廉，是理想的工业和民用燃料。天然气用在发电方面，可使火力发电站的投资比燃煤减少20%左右，而且管理方便，易于实现自动化，发电成本大大下降；用在炼铁上，可使焦比下降15%以上，获得更好的经济效益；用在民用方面，可提高炉灶热效率：煤炉热效率一般不大于40%，而结构良好的天然气炉灶热效率可达60%以上，且使用方便、卫生、很受居民欢迎。

天然气的主要成分是甲烷及少量的乙烷、丙烷、丁烷等。甲烷除用作燃料外，还可直接用于生产氢氰酸、二硫化碳、卤化甲烷、炭黑等；甲烷裂解得到乙炔，进而可以生产塑料、化学纤维、合成橡胶及许多有机合成产品的中间体；甲烷经转化生成一氧化碳和氢气，可生产甲醇、合成氨和尿素，是制造化肥的理想原料。乙烷、丙烷、丁烷也是重要的化工原料、裂解后得到乙烯、丙烯和丁烯，也可生产合成橡胶、合成纤维、塑料及其它一系列产品。

天然气中有的还含有少量的硫化氢、二氧化碳、氮、氦等，也是极有用途的原料。硫化氢可用于生产硫磺、硫酸和硫酸铵，二氧化碳可以制造干冰，氦更是国防和原子能工业需要的产品。

总之，天然气作为能源和化工原料，涉及到工业、农业、国防和人民生活的各个领域，在发展国民经济和实现我国四个现代化中具有重要意义。

第二节 天然气管道运输的发展概况⁽¹⁾

我国是世界上最早生产和应用天然气的国家之一。公元前便有“火井”的文字记载。到明末清初，天然气的开采和利用又有新的发展。但由于长期的封建统治，特别是近百年来帝国主义、封建主义和官僚资本主义的压迫，使我国的天然气工业长期处于落后状态，直到解放后，才获得较大的发展。1987年我国生产天然气135.4亿立方米，比1982年增长12%，为1949年的1800余倍。预计到2000年我国天然气生产量可达300亿立方米，比现在将有较大的增长。到目前为止，世界上天然气的产量也是逐渐增长的，1970年为10 282亿立方米，1975年为12 444亿立方米，1980年为15 435亿立方米，1982年为18 863.1亿立方米。目前天然气占世界能源消费的20%左右。产量以苏联、美国、加拿大最多。据估计，从现在起全世界的天然气资源可供开采150年左右，到本世纪末，天然气的年产量还会有一定的增长。

我国也是最早使用管道输送天然气的国家之一。公元1600年左右，竹管输气已有很

大发展,从“长竹剖开,去节、合缝、漆布,一头入插井底,其上曲接,以口紧对釜脐”的一井一管一锅的就地使用,到“一井口接数十竹者,并每竹中间复横嵌竹以接之”的分输,输送距离也从“周围砌灶”发展到“以竹筒引之百步千步”的长度,显示了我国古代劳动人民的智慧和管道建设水平。但是,在解放前我国还没有一条真正的近代的输气管道。直到1963年才于四川省建成了我国第一条输气管道,巴渝管线,管径426mm,全长55km,到目前为止四川省内已建成了长2000km以上,年输气量50~60亿立方米的现代输气管网。据新华社报道1988年我国又建成了北方的最大输气管网,从中原油田至沧州,全长400km,有两座净化厂、五座压气站,年输气量4亿立方米,它也是我国第一条有多个压气站的输气管网。

从世界范围看,18世纪以前天然气是依靠气井压力利用木竹管道短距离输送,18世纪后期开始使用铸铁管,1880年首次采用蒸汽机驱动的压气机,19世纪90年代钢管出现之后,管道建设进入了工业性发展阶段。随着现代科学技术的发展,以及世界对天然气需求的增长,输气管道已有很大发展。据统计,1974年全世界有输气管道约740000km,其中美国423000km,苏联90000km,西欧共同市场84000km。到1980年全世界拥有输气管道上升到860000km,出现了一些规模巨大的输气管网和跨国输气管道。例如苏联的中亚细亚—莫斯科(中央)管网系统,由4条干管组成,全长约10000km,年输气量650亿立方米;横贯加拿大的输气管道,总长8500km,经过加拿大四个省,另又平行铺设一条大湖管道,经北美大湖区向美国出口天然气,全系统拥有46座压气站和两座移动式压气机组,总功率达700000kW,最大操作压力 $69 \times 10^5 \text{ Pa}$,整个系统实现了全盘自动化。

美、加合资近年建成的阿拉斯加天然气输送系统,把阿拉斯加普鲁拉德霍湾气田的天然气输送到北纬49度线以南的美国内陆市场,并把加拿大艾伯特省多余的天然气输往美国。该系统的主干管线长约7800km,管径914~1420mm,日输气量为5663~9060万立方米,输气压力为 $98 \times 10^5 \text{ Pa}$,为保护永久冻土层,还将天然气降温至 -17°C 后输送。

苏联近年建成了从西伯利亚乌连戈伊气田向苏联欧洲部分输气的6条直径1420mm的干线,总长约20000km,总投资250亿卢布,年总输气量2000亿立方米。其中的一条,从乌连戈伊经波马雷到苏捷边境的乌日格罗德,全长4451km,工作压力 $73.55 \times 10^5 \text{ Pa}$,共有40个压气站,装机功率 $280 \times 10^4 \text{ kW}$,耗用管材 $270 \times 10^4 \text{ t}$,是苏联向西欧出口天然气的管线,年输气能力320亿立方米,输往西德100亿立方米,法国和意大利各80亿立方米,其余送往奥地利和瑞士。

有名的跨国管道还有阿尔及利亚—意大利输气管,起自非洲阿尔及利亚哈西鲁迈勒气田,终于意大利矿堡,天然气输送管道全长2506km,管径为1220mm,穿越突尼斯海峡时分为三条直径为510mm的加厚管。该管穿越地中海,又名“穿越地中海的输气管道”。

从上面介绍的一些简略情况可以看出,输气管道的发展趋向是大口径、高压力和不断采用新材料新技术。美国在1964年,输气管最大口径为910mm,1969年已发展到1220mm。苏联1965年开始采用1020mm管线,1967年发展到1220mm,1970年又增至1420mm。采用大口径管线的主要原因是可以降低投资和输气成本。

近年来新建的管道压力均较过去为高。苏联的输气干管压力一般为 $73.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,美国阿拉斯加输气管高的达 $98 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。穿越地中海的跨国输气管最高达 $196 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

增大输气压力，不但可以提高输气能力，还可以减少压气站，降低经营费用。

大口径、高压力管道的应用，必然要求高强度的钢材，促进了冶金、制管、焊接和其它施工技术的发展。

国外正在研究新的输气工艺，着眼点是提高管输条件下的天然气密度，即在低温高压下气态输送或液态输送。据称 -70°C 及 $117.68 \times 10^6 \text{ Pa}$ 的压力下，输气能力将为通常输气条件下的3.8倍，而低温所用的含镍3~3.5%的钢管的价格为一般钢管的2.8倍。气体液化后，密度为通常管输条件的15倍，可达到更高的输送能力。

第三节 输气系统

天然气密度小，体积大，管道输送几乎成了唯一的方式。从气田的井口装置开始，经矿场集气、净化、干线输气，直到通过配气管网送到用户，形成了一个统一的密闭的输气系统(图0-1)。整个系统主要由矿场集气管网、干线输气管道(网)、城市配气管网和与这些管网相匹配的站、场装置组成。

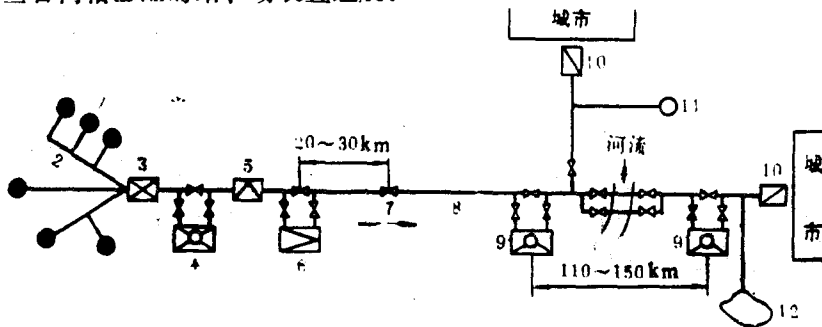


图0-1 输气系统示意图

- 1-井场装置；2-集气管网；3-集气站；4-矿场压气站；5-天然气处理厂；6-输气首站；7-截断阀；
8-干线管道；9-中间压气站；10-城市配气站及配气管网；11-地上储气库；12-地下储气库

一、矿场集气

气田集气从井口开始，经分离、计量、调压、净化和集中等一系列过程，到向干线输气为止。包括井场、集气管网、集气站、天然气处理厂、外输总站等。

气田集气有两种流程：单井集气和多井集气。

单井集气的井场除采气树外，还将节流(包括加热)、调压、分离、计量等工艺设施和仪表都布置在井口附近，每口气井有独立完整的一套。气体在井场初步处理后，经集气管网汇集于总站进一步调压、处理、计量后外输。

多井集气流程，在井场只有采气树，气体经初步减压后送到集气站，一个集气站汇集不超过10口井的气体，在站上分别对各井的气体进行节流(包括加热)、调压、分离、计量和预处理，然后通过集气管网集中于总站，外输至净化厂(处理厂)或干线。多井集气流程主要用于气田大规模开发阶段，它处理的气体质量好，节约劳力，便于实现自动化管理，经济效益高。

无论是单井或多井集气都可以采用树枝状或环状集气管网。环状管网可靠性好，但

投资较大。一个气田究竟采用何种集气流程和管网，要根据气田的储量、面积，构造的大小、形状、产层数，产层特性，产气量，井口压力和气体的组成与性质，以及采用的净化工艺，通过综合技术经济比较来确定。

二、干线输气

输气干线从矿场附近的输气首站开始，到终点配气站为止。长距离干线输气管管径大，压力高，距离可达数千公里，年输气量高达数百亿立方米，是一个复杂的工程系统，也是一个独立经营的企业。

为了长距离输气，需要不断供给压力能，沿途每隔一定距离设置一座中间压气站（又称压缩机站），输气首站就是第一个压气站，当地层压力足以将气体送到第二个压气站时，首站可暂时不建压缩机车间，此时的首站就是一个调压计量站。终点配气站本质上也是一个调压计量站，担负着向城市或用户配气管网供气的任务。

干线输气管网是一个复杂的工程，除了图0-2所示的线路和压气站两大部分外，还有通信、自动监控、道路、水电供应、线路维修和其它一些辅助设施和建筑。

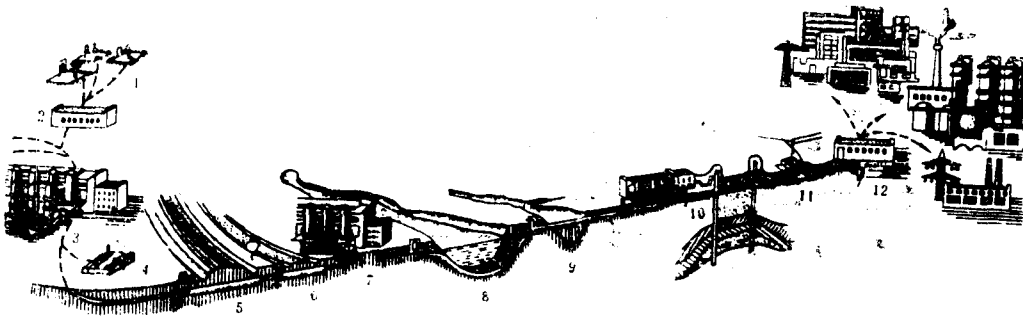


图0-2 干线输气管示意图

1-井场；2-集气站；3-有净化装置的压气首站；4-支线配气站；5,6-铁路和公路穿越；7-中间压气站；8,9-河流穿越和跨越；10-地下储气库；11-阴极保护站；12-终点配气站

三、城市配气

城市配气的任务是从配气站开始，通过各级配气管网和气体调压所保质保量地根据用户要求直接向用户供气。

配气站是干线的终点，又是城市配气的起点和总枢纽。气体在配气站内经过分离、调压、计量和添味后输入配气管网。城市配气管网也有树枝状和环状两种，按压力有高压、次高压、中压和低压四级，上一级压力的管网只有经过调压所调压后才能向下一级管网供气。配气管网的形式和压力等级要根据城市的规模、特点，用户多少，用气量大小，该地区的地形条件等来决定。

储气库一般都设在城市附近，以调节输气与供气之间的不平衡。当输气量大于向城市供气量时，气体储存起来。反之，则从储气库中取出气体以弥补不足。

三大管网、各类场站和储气库组成的整个输气系统也是一个密闭的水动力学系统，一处的流量变化、压力波动，或多或少都会影响到其它地方。由于气体的可压缩性，这方面的影响不会象输油管那样严重，也不会有水击。但一处的故障和灾害性事故，可能

造成部分甚至整个系统的集气、输气和配气的中断，给城市带来极为严重的影响。由于气体的密度小、体积大，储存困难，这方面的影响比输油管大得多。

正因为整个输气系统是密切相关地联系着，关系到几十亿、几百亿的投资，关系到工业、农业，关系到成千上万人的生活，所以它的设计、施工和管理都须十分认真对待，经多方论证而决定。

第一章 天然气的物理化学性质

第一节 天然气的组成

一、天然气的特点与组成

天然气泛指自然界的一切气体，狭义则指采自地层的可燃气体。石油工业中称采自气田或凝析气田的可燃气体为天然气，又称气田气；在油田中与石油一起开采出来的可燃气体称为石油伴生气。

天然气是一种多组分的混合气体，主要成分为烷烃，其中甲烷占绝大多数，另有少量的乙烷、丙烷和丁烷，此外一般还含有硫化氢、二氧化碳、氮和水气，以及微量的惰性气体，如氦(He)和氩(Ar)等。在标准状况(0°及101.325Pa)下，甲烷至丁烷以气体状态存在，戊烷以上为液态。

气田气的特点是甲烷含量特别多，占90%以上。油田的伴生气含乙烷和乙烷以上的烃类较多。表1-1和表1-2为我国一些主要气田天然气和油田伴生气的组成。应该指出：就组成而言，不但各气田、油田的气体组成相差很大，即使同一产地的气体也因时期不同略有差异。天然气中常见的烃类和某些气体的基本性质见表1-3和表1-4。

二、混合气体组成的表示法

天然气是一种气体混合物，要了解它的性质，必须知道各组分性质间的关系。混合物的组成可以用容积分数、摩尔分数、质量分数或它们的百分数来表示。

1. 容积分数和摩尔分数

如果混合物中各组分的容积为 V_1, V_2, V_3, \dots ，它们之和为总容积 V 。其中某一组分 i 的分容积为 V_i ，则其容积分数

$$y_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V_i}{\sum V_i} \quad (1-1)$$

根据定义可知，混合物所有组分的容积分数之和为1，即

$$\sum y_i = 1$$

同理，可以定义摩尔分数，它是 i 组分的摩尔数 n_i 与混合物总摩尔数 n 的比值：

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (1-2)$$

混合物所有组分的摩尔分数之和亦为1

$$\sum y_i = 1$$

从混合气体分压定律知道， i 组分的分压为 p_i 时，则存在

$$p_i V = n_i R_M T$$

式中 R_M 为通用气体常数。对于整个气体混合物则有

表1-1 四川某些气田天然气的组成

气田名称	产地层	天然气组成 (体积)											视临界温度 K	视临界压力 10 ⁵ Pa				
		重烃			气组					分, %								
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	总计	二氧化碳	硫化氢	不饱和烃	一氧化碳	氢			氮	氧	氩	
高寺庙	二	96.42	0.73	0.14	0.04	0.00	0.91	无	0.69					1.93	0.05		191.8	46.43
傅家庙	三	95.77	1.10	0.37	0.16	0.00	1.63	0.08	无					2.24			191.3	46.05
宋家场	三	97.17	1.02	0.2			1.22	0.47	0.01					1.09	0.04		192.0	46.33
阳高寺	三	97.81	1.05	0.17			1.22	0.44	无					0.48	0.05		192.3	46.44
兴隆场	三	96.74	1.07	0.32	0.16	0.076	1.628	0.045						1.54	0.042		192.1	46.10
自流井	阳三~阳二	97.12	0.56	0.07			0.63	1.135	0.02					1.06	0.032		192.0	46.57
威远	震旦系	86.80	0.11				0.11	4.437	0.379				0.03	8.1	0.316	0.027	190.8	46.65
卧龙河1	四	94.12	0.88	0.21	0.05		1.14	3.97						0.49			198.5	47.93
卧龙河2	二	95.97	0.55	0.10	0.03	0.04	0.72	0.35	1.52					1.39	0.03	0.014	193.9	46.94
中坝1	二	91.15	5.8	1.59	0.71	0.20	8.3	0.54						0.10			203.2	46.50
中坝2	三	82.93	1.69	0.68	0.72	0.70	3.95	4.51	6.75					0.67			213.7	50.11
八角场	三	90.93	3.49	1.89	1.07	1.21	7.66	0.25						1.13			204.0	45.94
相国寺	系	97.62	0.82	0.07			0.99	0.16	0.01					0.013	0.076	0.096	191.2	46.28

注: 引自(7), 原资料某些气田组分之和不为100%。

表1-2 我国某些油田伴生气的组成

油田名称	天然气组成 (体积)											其它		
	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	己烷	二氯化碳	硫化氢	氮			
大庆油田1	79.75	1.9	7.6	5.62									0.38	5.13
大庆油田2	91.3	1.96	1.34	0.90									0.60	3.92
胜利油田伴生气	86.6	4.2	3.5	0.7	1.9	0.6	0.5	0.3					1.10	
胜利油田气井气	90.7	2.6	2.8	0.6	0.1	0.5	0.2	0.2					0.7	
胜利油田气井气	97.7	0.1	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1					1.1	
大港油田	76.29	11.0	6.0	4.0							1.36		0.71	0.94
台湾铁砧山	88.14	5.97	1.95	0.43	0.36	0.15	0.09	0.14	2.20				0.51	

注: 引自(7), 原资料某些油田伴生气组分之和不为100%, 本书对其余项作了修正。

表1-3 天然气中常见烃类的基本性质(0℃, 101 325Pa)

项 目	甲 烷	乙 烷	丙 烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷
分子式	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₅ H ₁₂	n-C ₅ H ₁₂
分子量μ	16.043	30.070	44.097	58.124	58.124	72.151	72.151
千摩尔体积V _M , m ³ /kmol	22.3621	22.1872	21.9362	21.5977	21.5036	20.983	20.891
密度ρ, kg/m ³	0.7174	1.353	2.0102	2.6912	2.7030	3.4386	3.4537
相对密度Δ _r	0.5648	1.046	1.555	2.081	2.090	2.659	2.671
临界温度T _c , K	191.05	305.45	368.85	407.15	425.15	460.85	470.35
临界压力P _c , 10 ⁵ Pa	46.41	48.84	43.98	36.57	36.17	33.84	33.44
临界比容V _c , m ³ /kmol	0.099	0.143	0.195	0.263	0.253	0.306	0.311
高发热值H _h , MJ/m ³	30.84	70.35	101.26	133.05	133.89	168.32	169.37
低发热值H _l , MJ/m ³	35.90	64.40	93.24	122.85	123.65	155.72	156.73
爆炸下限L ₁ , %(体积)	5.0	2.9	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4
爆炸上限L ₂ , %(体积)	15.0	13.0	9.5	8.5	8.5	8.3	8.3
动力粘度η, 10 ⁻⁵ Pa·s	1.027	0.843	0.735	0.676	0.669	0.616	0.635
运动粘度ν, 10 ⁻⁵ m ² /s	1.416	0.611	0.358	0.246	0.243	0.176	0.180
气体常数R, kJ/kg·K	0.5171	0.2759	0.1846	0.1378	0.1372	0.1078	0.1074

注: 引自(16), 异戊烷的临界参数摘自(5)。

表1-4 天然气中常见的某些气体的基本性质(0℃, 101 325Pa)

项 目	氢	氮	氦	一氧化碳	二氧化碳	硫化氢	空 气
分子式	H ₂	N ₂	He	CO	CO ₂	H ₂ S	
分子量μ	2.0160	28.0134	4.003	28.0104	44.0098	34.076	28.966
千摩尔体积V _M , m ³ /kmol	22.427	22.403	22.363	22.3984	22.2601	22.1802	22.4003
密度ρ, kg/m ³	0.0899	1.2504	0.178	1.2506	1.9771	1.5363	1.2931
相对密度Δ	0.0695	0.967	0.138	0.967	1.529	1.188	1.00
临界温度T _c , K	33.32	126.2	5.19	133.0	304.20	373.2	132.50
临界压力P _c , 10 ⁵ Pa	12.97	33.94	2.27	34.96	73.87	89.37	37.66
临界比容V _c , m ³ /kmol	0.085	0.090	0.057	0.093	0.094	0.0785	0.096
高发热值H _h , MJ/m ³	12.74			12.64		25.34	
低发热值H _l , MJ/m ³	10.78			12.64		23.36	
爆炸下限L ₁ , %(体积)	4.0			12.5		4.3	
爆炸上限L ₂ , %(体积)	75.9			74.2		45.5	
动力粘度η, 10 ⁻⁵ Pa·s	0.836	1.667	1.718	1.657	1.402	1.167	1.718
运动粘度ν, 10 ⁻⁵ m ² /s	9.30	1.33	9.598	1.33	0.709	0.763	1.34
气体常数R, kJ/kg·K	4.126	0.2967	2.077	0.2067	0.1876	0.2415	0.2866

注: 引自(16), 氮和硫化氢的临界参数摘自(5)。

$$PV = nRT$$

式中 P 为气体混合物的总压，两式相除得

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{P_i}{P} \quad (1-3)$$

由上式可见，任一组分的摩尔分数也可以用该组分的分压与混合物总压的比值表示。

由混合气体的分容定律可以得到分容积为

$$V_i = \frac{n_i RT}{P}$$

混合物的总容积为

$$V = \frac{nRT}{P}$$

两式相除得

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = y_i \quad (1-4)$$

该式说明理想气体混合物的容积分数和摩尔分数相等。以后我们不再区分两者，都用 y_i 表示。

2. 质量分数和气体混合物的分子量

混合物总质量为 m ，等于各组分质量之和。其中 i 组分的质量为 m_i ，则其质量分数为

$$x_i = \frac{m_i}{m} = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (1-5)$$

同理

$$\sum x_i = 1$$

对于质量为 m_i ，分容积为 V_i ，千摩尔质量为 M_i 的气体，可写为

$$PV_i = \frac{m_i}{M_i} RT$$

同理，对于混合物的总体有

$$P \sum V_i = \frac{\sum m_i}{M} RT$$

式中 M 为气体混合物的千摩尔质量，两式相除得

$$\frac{V_i}{\sum V_i} = \frac{m_i}{\sum m_i} \cdot \frac{M}{M_i}$$

由于任何物质的千摩尔质量，在数值上都等于它的分子量，故上式又可写作

$$y_i = x_i \cdot \frac{\mu}{\mu_i} \quad (1-6)$$

式中 μ ——气体混合物的分子量；

μ_i ——气体混合物中 i 组分的分子量。

式(1-6)可用于摩尔分数 y_i 与质量分数 x_i 之间的换算。由于 $\sum x_i = 1$ ，根据式(1-6)得

$$\sum x_i = \sum y_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu} = \frac{1}{\mu} \sum y_i \cdot \mu_i = 1$$

所以

$$\mu = \sum y_i \cdot \mu_i \quad (1-7)$$

式(1-7)表明：气体混合物的分子量(又称视分子量)等于各组分的分子量与其摩尔分数乘积之和。要注意的是上述关系只对理想气体成立，在高压下这些组分的相互关系不能用式(1-4)、(1-6)来计算。

第二节 气体的状态方程式⁽⁶⁾⁽⁸⁾

描述气体压力、比容和温度之间相互关系的方程就是气体状态方程。我们把压力、比容和温度这三者关系称之为“PVT特性”。

一、理想气体及其与实际气体的偏差

理想气体是一种假想的气体，认为它的分子本身不占体积，分子之间没有吸引力。根据物理学的实验研究和分子运动论的探讨，理想气体的状态方程式为

$$pv = RT \quad (1-8)$$

$$p v_M = R_M T \quad (1-8a)$$

$$pV = mRT = nR_M T \quad (1-8b)$$

式(1-8)用于1公斤气体；式(1-8a)用于1千摩尔气体；式(1-8b)用于 m 公斤或 n 千摩尔气体。式中， v 是气体的比容； v_M 表示1千摩尔气体的容积； V 是 m 公斤或 n 千摩尔气体的容积； R 是每公斤气体的气体常数，不同的气体有不同的数值； R_M 是每千摩尔气体的气体常数，对于各种气体有一个共同的数值，又称通用气体常数。由于在标准状态($T_0 = 273.15\text{K}$, $p_0 = 101325\text{Pa}$)下，各种气体的千摩尔容积理论上均相等，且 $v_M^0 = 22.414\text{m}^3/\text{kmol}$ ，所以

$$R_M = \frac{p_0 v_M^0}{T_0} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15 \times 1000} = 8.3143\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

气体常数 R 与通用气体常数 R_M 的关系为

$$R = \frac{R_M}{M} \quad (1-9)$$

式中 M 为千摩尔气体的质量，单位为 kg/kmol ，其数值等于气体的分子量 μ 。 R 的单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

实际上没有一种气体完全符合理想气体状态方程，但在压力足够低，温度足够高，即密度足够小的情况下，例如在常温低压下，甲烷分子本身体积小，分子间距大，分子间引力小，因而其PVT特性接近理想气体的规律。

在输气干线中压力高达几个甚至几十个兆帕(10^6Pa)时，天然气与理想气体之间的性质差别较大，在工程上用压缩因子 Z 来表示真实气体与理想气体PVT特性的差别。其状态方程写作

$$pv = ZRT \quad (1-10)$$

设理想气体的比容为 v' ，在相同的压力和温度条件下

$$Z = \frac{v}{v'}$$

上式表明，压缩因子 Z 即真实气体与理想气体比容的比值，是表征这两种气体性质差异的参数。在数值上

$$Z = \frac{pv}{RT}$$

其值大小与气体的组成和状态有关，工程上常用图1-1所示通用压缩因子图查得。该图是根据适合于任何一种气体的对比态原理而制作的。

对比态原理是被广泛应用于推算流体热力学性质的方法之一。由于各种物质在临界状态都具有相似的性质，范德瓦尔斯(Van Der Waals)选取临界点为参考点，以临界性质为对比基础，这时流体的温度、压力和比容分别用对比参数值来表示。物质的参数与同名临界参数的比值称为对比参数：

$$p_r = \frac{p}{p_c}, \quad T_r = \frac{T}{T_c}, \quad v_r = \frac{v}{v_c} \quad (1-11)$$

式中 p_r 、 T_r 、 v_r 分别为对比压力，对比温度，对比容积。对比参数都是无量纲。我们将具有相同对比压力和对比温度的不同物质的状态称为对应状态。实验证明：处于对应状态的各种流体具有相同的对比容积，这就是对应态定律。其数学表达式为

$$F(p_r, T_r, v_r) = 0 \quad (1-12)$$

式(1-12)是用对比参数表达的状态方程式，其中不包括与物质种类有关的常数，因而它对各种物质是通用的。由(1-10)式

$$Z = \frac{pv}{RT}, \quad Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$$

Z_c 为临界状态时的压缩因子，两式相除得

$$Z = Z_c \cdot \frac{p_r v_r}{T_r}$$

按对应态定律，上式中的 p_r 、 T_r 和 v_r 只有两个独立变量，因此可写为

$$Z = f(p_r, T_r, Z_c) \quad (1-13)$$

实际上大多数物质 Z_c 的数值变化不大，在0.23~0.31左右，因而可近似认为是一常数，故式(1-13)简化为

$$Z = f(p_r, T_r) \quad (1-14)$$

上式说明各种物质对应态的压缩因子相等，可以根据对比参数用图解或计算的方法来求得压缩因子 Z 。

从图1-1可以看出，对于所有的等温线，压力趋于零时， Z 都趋于1。在临界点附近($p_r \approx 1$, $T_r \approx 1$)， Z 值都远小于1，说明这些气体偏离理想气体很远。当压力超过临界压力10倍($p_r \geq 10$ 时)，所有的 Z 值都大于1。 $Z < 1$ 可以解释为分子间的吸引力影响占有优势， $Z > 1$ 则是在高压下，分子之间的间隙已经很小，分子本身的体积已经影响到气