



石油高等院校特色规划教材

燃气工程及应用技术

张引弟 伍丽娟 张 瑞 编著
廖锐全 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色规划教材

燃气工程及应用技术

张引弟 伍丽娟 张 瑞 编著
廖锐全 主审



石油工业出版社

内 容 提 要

本书从基础理论出发,系统地阐述了燃气储运及应用基本概念、最新技术和工程实例,内容包括燃气的热物理特性,燃气储运及应用工业链的各个环节,即燃气的运输与储存、天然气的脱水脱酸气与液烃回收及分离、城市燃气管网系统监控及调节计量、燃气燃烧方法与节能技术、天然气冷能压力能的应用与联合供电技术、CO₂回收方法与资源化利用技术,以及天然气与新能源技术的联合应用等,全面反映了国内外燃气储运及应用技术的最新应用和技术发展。

本书可作为能源领域,尤其是燃气工程及应用领域高等院校本科生及研究生的专业教材,适用的专业有:油气储运工程,供热、供燃气与通风工程,建筑环境与设备工程,热能工程,化学工程及能源环境工程等,也可作为该领域科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃气工程及应用技术/张引弟,伍丽娟,张瑞编著.

北京:石油工业出版社,2016.1

(石油高等院校特色规划教材)

ISBN 978-7-5183-0964-1

I. 燃…

II. ①张…②伍…③张…

III. 燃气-热力工程-高等学校-教材

IV. TU996

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 273737 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.75

字数:480 千字

定价:39.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

全球已步入低碳经济时代,从现在到2030年,燃气的总消费量将持续增长,并且将取代石油居一次能源首位。国际上认为,21世纪天然气在能源消费中的比重应达到33%以上,目前发达国家已经达到26%,而我国只有3%左右。因此,天然气是中国2010—2030年以低碳能源支撑经济增长的关键,是中国交通能源多元化、降低石油对外依存度的关键。“天然气经济效应”将推动我国的能源、环保产业向一个崭新的方向发展。

我国天然气工业尚处于起步阶段,随着天然气工业的发展和环保的要求,我国燃气的利用方向将以发展“以气发电”“以气代油”“城市气化”为主。在这样的形势下,对燃气人才的需求越来越多——基于此,长江大学油气储运工程系2011年在专业和科研平台建设方面新设了方向——燃气工程方向。近4年来,我们专业和科研平台建设同步进行,在专业课程体系建设方面加大或新设了与燃气相关的课程。这些课程包括天然气集输、燃气输配、输气管道设计与管理、燃气工程及应用技术、燃气应用及新能源技术、燃气燃烧及输配测试技术、天然气储存与利用技术等。这些课程除了“天然气集输”“燃气输配及输气管道设计与管理”之外,其他课程我校目前暂无合适的参考书。

有鉴于此,本书作者组织储运工程系相关教师一起编写燃气方向系列教材,《燃气工程与应用技术》是该系列的第一本。在本书撰写的过程中,充分考虑了我校油气储运工程专业的办学背景、教学计划、课程设置以及科研方向,突出燃气特色,努力与研究热点和国际前沿接轨。本书中在内容编排上除了参考同行业国内外研究现状外,还有部分内容来自国家自然科学基金(50306022)、湖北省自然科学基金(2013CFB398)、中国石油科技创新基金(2015D-5006-0603)及长江青年科技创新团队基金的资助研究成果。另外,本书亦是湖北省高等学校教学研究项目“油气储运工程专业燃气方向综合建设与教学改革研究(编号2013256)”的重要研究内容之一。

本书分为八章。第一章介绍了天然气的特性、我国天然气的现状及存在的问题。第二章侧重介绍燃气储运技术及工艺,主要包括天然气管道输送、液化天然气(LNG)储运、压缩天然气(CNG)储运、天然气水合物(NGH)储运、液化石油气(LPG)储运、天然气吸附储存(ANG)技术以及天然气储气库等内容。第三章从分离器、天然气脱水、天然气脱酸气、天然气液烃回收及燃气分离等方面阐述燃气净化与分离技术。第四章主要介绍城市燃气输配,内容包括城市燃气管网系统、工

业企业燃气管网系统、建筑燃气供应系统、燃气管道设备及安全、燃气管网监控及数据采集系统、燃气压力调节与计量等内容。第五章主要介绍燃气燃烧技术,包括燃气燃烧计算、燃气的燃烧反应动力学、燃气燃烧方法、燃烧设备及节能新技术。第六章从天然气利用过程中的节能角度,阐述了天然气冷能单元利用技术及研究、天然气冷能集成利用技术与研究、天然气压力能利用技术及研究与天然气冷热电三联供技术及研究等方面内容。第七章则侧重介绍烟气 CO_2 回收及资源化利用,主要包含温室效应和 CO_2 的排放状况、 CO_2 回收方法、 CO_2 的资源化利用及 CO_2 减排对策和建议等内容。第八章主要从天然气与新能源的联系角度来展开介绍,内容包括地热能、太阳能、风能、生物质能及氢能等方面。

本书第一、二章由伍丽娟编写,第三章由张瑞编写,张引弟编写其余章节并担任本书的统稿工作,廖锐全担任本书主审,研究生李姗、汪蝶、何显荣、欧阳进杰及徐磊做了大量的辅助工作,中国石油辽河油田公司 SAGD 开发项目管理部高级工程师杨建平、储运工程系李小艳老师及石油工程学院领导提出了宝贵的建议和意见,本书在编写过程中,还引用了相关的文献内容,在此对被引作者和相关参与者表示衷心的感谢。特别感谢石油工业出版社有限公司“石油教材出版基金”对本书编著工作的支持与资助。

本书虽然多次审稿、修改,但由于水平有限,不妥及疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评斧正,作者不胜感激。

编 者

2015 年 9 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 天然气的特性	1
第二节 天然气的现状及存在的问题	5
习题	6
第二章 燃气储运技术及工艺	7
第一节 天然气分类及性质	7
第二节 天然气管道输送	10
第三节 液化天然气(LNG)储运	23
第四节 压缩天然气(CNG)储运	30
第五节 天然气水合物(NGH)储运	37
第六节 液化石油气(LPG)储运	54
第七节 天然气吸附储存(ANG)技术	61
第八节 天然气储气库	69
习题	76
第三章 燃气净化与分离技术	77
第一节 分离器	77
第二节 天然气脱水	79
第三节 天然气脱酸气	83
第四节 天然气凝液回收	88
第五节 燃气分离	90
习题	91
第四章 城市燃气输配	92
第一节 城市燃气管网系统	92
第二节 工业企业燃气管网系统	107
第三节 建筑燃气供应系统	113
第四节 燃气管道设备及安全	123
第五节 燃气管网监控及数据采集系统	128
第六节 燃气压力调节与计量	131
习题	143

第五章 燃气燃烧技术	144
第一节 燃气燃烧计算	144
第二节 燃气的燃烧反应动力学	151
第三节 燃气燃烧方法	161
第四节 燃烧设备	171
第五节 节能新技术	189
习题	200
第六章 天然气利用过程中的节能	202
第一节 LNG 冷能单元利用技术及研究	202
第二节 LNG 冷能集成利用技术与研究	213
第三节 天然气压力能利用技术及研究	220
第四节 天然气冷热电三联供技术及研究	230
习题	245
第七章 烟气 CO ₂ 回收及资源化利用	246
第一节 温室效应和 CO ₂ 的排放状况	246
第二节 CO ₂ 回收方法	248
第三节 CO ₂ 的资源化利用	261
第四节 CO ₂ 减排对策	267
习题	268
第八章 天然气与新能源	269
第一节 地热能	269
第二节 太阳能	279
第三节 风能	285
第四节 生物质能	287
第五节 氢能	289
习题	292
参考文献	293

第一章 绪 论

第一节 天然气的特性

一、地层条件下的天然气

从广义上讲,在常温常压下以气态存在的任何天然物质都称为天然气。这些天然物质在地壳中是有限的。主要是由5个碳原子以下的烃类、二氧化碳、氮气、硫化氢、氢气、氦气和氡气等组成。

通常,这些天然气体大多数以超临界状态存在。它们可溶解在水里或者原油内。原油主要由5个或5个碳原子以上的烃类组成。这些高分子烃类在常温常压下呈液态。当埋藏深度增加时,温度平均以 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的幅度上升(视局部热流量和地层剖面的热传导率而定,变化范围为 $20\sim 80^{\circ}\text{C}/\text{km}$)。深度达到5km后,温度高于地壳中除丁烷以外的所有富有天然气的临界温度。

在正常的地下条件下,许多天然气在水中的溶解度相当高,其溶解度随压力的上升而急剧上升,在温度达到 60°C 时又下降,在地质条件下,这些作用相互平衡后溶解度随深度增加仍呈现上升趋势。当达到一定深度,地层中孔隙流体的压力接近地静压力时,1mol 纯水能溶解10mol 以上的甲烷,即 1m^3 水大约溶解 15m^3 甲烷(标准条件下)。

天然气,特别是烃类气体与原油有很高的混溶性,且随着温度和压力的升高,这种混溶性增加很大。

此外,在已发现和待发现的天然气藏中,甲烷只占地壳中各种气体的很小一部分(占 $5\%\sim 10\%$),另一部分甲烷呈溶解状态,保存在油藏和水溶气藏中,且大部分气体呈分散状态储存在沉积岩和其他岩石中。因为大部分天然气储存在非常规气藏中,特别是水化物气藏中,所以很难从地层中经济性地开采出来。

二、天然气藏的天然气组分

天然气的化学组分为石蜡族低分子饱和烃气体和非烃气体。烃类气体以甲烷为主,含量一般大于 70% ,乙烷次之,含量一般小于 10% ,丙烷、丁烷等的含量不多。常见的非烃气体是硫化氢、二氧化碳和氮气,有时也含有氦、氖、氩、氙等惰性稀有气体。不同地层、不同层位的天然气组成变化很大,其气体组分的差异不但影响本身的经济价值,对开发工程也有重要影响(表1-1)。

在大多数情况下,天然气藏是多种气体组分的混合物,但纯的或近似纯的甲烷气藏、二氧化碳气藏和氮气藏也较为常见。除甲烷外,其他气态氢类所占比例变化很大,但从未高于 60% 。氢气、氦气、氡气几乎总是比例很小,但也有例外,如独联体发现的一个气田的氢气含量达到 70% ,美国有一个气藏氦气的最高含量达到 10% 。

天然气藏只有达到一定规模才具有商业开采价值,严格讲,只有烃类气体占主要部分的气藏才能称为天然气藏。

表 1-1 中国各油气区天然气藏气体组分

油气区	层位	统计 气藏数	相对密度		甲烷含量, %		重烃含量, %		氮气含量, %		硫化氢含量, %		二氧化碳含量, %	
			范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
大庆	K ₁	8	0.5651 ~0.6890	0.5796	90.41 ~98.20	95.12	0.39 ~2.22	1.37	0.49 ~6.89	3.31		微	0.02 ~0.62	0.32
吉林	K ₁	10	0.5620 ~0.6501	0.5924	88.63 ~99.09	96.16	0.32 ~2.24	1.27	1.05 ~8.07	2.06		微	0.01 ~0.83	0.48
辽河	E	37	0.5569 ~0.8556	0.6338	71.17 ~99.40	90.07	0.34 ~2.71	7.89	0.01 ~5.72	1.56	0 ~0.17	0.10	0 ~3.17	0.40
河北	E	28	0.5609 ~0.7356	0.6340	60.69 ~98.99	87.47	0.14 ~28.65	10.56	0 ~2.61	1.15		微	0 ~3.95	0.72
	P-O	9	5.5779 ~0.7319	0.6852	78.45 ~86.84	82.80	1.12 ~19.91	13.60	0 ~4.45	1.38		微	0 ~6.64	1.55
山东	N-E	8	0.5563 ~0.8836	0.6243	76.25 ~98.95	93.69	0.79 ~20.46	5.30	0 ~5.81	0.78		微	0 ~3.65	0.82
河南	E	16	0.5715 ~0.6372	0.5925	91.63 ~97.13	94.80	1.40 ~6.26	3.40	0.77 ~1.91	0.95		微	0.45 ~0.89	0.68
江苏	E	2	0.5700 ~0.5702	0.5701	84.02 ~97.55	90.79	1.22 ~1.35	1.29	1.23 ~13.77	7.05	微	微~0.50	0.25	
陕甘宁	T-P	9	0.5641 ~0.6633	0.5957	91.11 ~98.27	92.84 ~13.82	4.22	0.04 ~7.67	2.61		微	微~5.53	0.82	
	O ₁	2	0.5628 ~0.6013	0.5889	92.65 ~98.53	95.51	0 ~1.92	0.66	0.08 ~2.86	0.77	0 ~0.34	0.03	0.07 ~6.19	3.15

续表

油气区	层位	统计 气藏数	相对密度		甲烷含量, %		重烃含量, %		氮气含量, %		硫化氢含量, %		二氧化碳含量, %	
			范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
青海	Q—E	6	0.5543 ~0.6338	0.5733	85.31 ~99.99	96.25	0 ~1.13	0.30	0.1 ~11.84	0.03		0		微
新疆	N—J—T	9	0.5574 ~0.7311	0.6349	76.02 ~98.93	88.10	1.20 ~18.16	9.63	微 5.34	1.68		微	0 ~2.85	0.29
赤水	T—P	4	0.5624 ~0.5739	0.5679	97.01 ~98.56	97.65	0.36 ~0.88	0.54	0.50 ~2.18	1.25	0 ~2.21	0.65	0.02 ~0.34	0.15
建南	T—P—C	4	0.5827 ~0.6495	0.6070	88.37 ~96.42	93.28	0.06 ~1.52	0.74	0.07 ~2.82	1.20	0.05 ~2.87	1.02	0.61 ~6.38	3.75
四川	J—T ₃	16	0.5653 ~0.6745	0.6161	83.93 ~95.89	91.46	0.01 ~14.27	6.86	0.60 ~1.84	0.68		微	0.17 ~2.50	0.95
	T—P—C—Z	175	0.5610 ~0.7710	0.5765	83.55 ~99.21	96.77	0 ~14.27	0.82	0.01 ~8.39	1.28	0 ~31.95	0.26	0 ~6.49	0.88
全国		343	0.5563 ~0.8836	0.6008	60.69 ~99.99	93.71	0 ~28.62	3.87	0 ~13.77	1.34	0 ~31.95	0.17	0 ~6.64	0.76

天然气藏由圈闭体、储渗体和流体三大要素组成,每一大要素又可分为若干种类。气藏的分类是以这些要素中的一种或几种为依据,以能反映这些要素特征的指标作为标准进行划分的,有以圈闭成因分类的,分为构造圈闭、地层圈闭和岩性圈闭;有以油气成因分类的;有根据气藏的流体和空隙介质进行分类的。

三、天然气组分来源

(一) 烃类

气态烃类有三种成因类型:细菌气、热解气和无机气。然而到目前为止,人类只发现前两种有商业价值的气藏。

1. 细菌气

由于细菌对沉积岩有机物残渣的作用而产生的气体,称为细菌气或生物气。这种所谓产生甲烷的细菌在沉积岩沉降及潜埋早期产生作用,像大家都知道的在沼泽或墓地就会形成一种可自燃的气体。

产生甲烷的细菌只能在非常严格的环境条件下繁殖,这种环境必须是无氧的,也没有硫酸盐或硝酸盐,这些被酶作用物必须是以溶解在沉积环境水中的形式存在,所需的氢由细菌生态系统中其他细菌提供。甲烷是唯一生成的烃类,其温度必须保持在 $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内,大致相当于地层深度 $2000 \sim 2500\text{m}$ 。氢的产生同样也受到现有空间的限制,沉积岩必须保持有足够的孔隙度。

细菌气并不是有机沉积物的必然产物,尽管如此,细菌气占已发现天然气储量的 20%。

2. 热解气

在一定条件下,在一些沉积层,由有机物质按照“热模式”形成热解气。这种有机物质与沉积岩一块形成,聚集在沉积层界面的有机碎屑由活性有机物降解。在有氧环境中,这种降解过程进行得很快,也接近完全,在有机碎屑中原来存在的碳几乎全部转化为二氧化碳,并释放到大气中。在缺氧环境中,这种降解进行得比较缓慢,也不充分,这种残余物以复杂的微结构形式聚集在沉积岩中,并且一直保持降解过程。在有机溶剂中不溶解的所有物质构成干酪根。在沉积盆地演化过程中,沉积物逐渐下沉,温度和压力上升。虽然温度一般低于 200°C ,但沉积周期相当长,以至于在沉降时占沉积物有机成分大多数的干酪根完全热降解,这种热降解产生烃及非烃类化合物。

在沉积初期,一般在 2000m 以上没有烃类生成,在这个区域内,干酪根分子失去氧化功能团,产生氧化物,干酪根的热裂解逐步开始生成液态烃(原油),大部分气态烃是由已形成的原油二次裂解形成的,这个区域称为后生作用区。此时,气油比增长较快,形成油占主要成分的油区和气体占主要成分的凝析气区或者称为湿气区。

3. 无机气

火山喷发气体和地下热水中也含有甲烷,变质岩(岩浆岩)矿物中的流体常常也含有轻质烃类,主要是甲烷。这些烃类是由简单化合物直接合成的,但这种气很难形成工业开发规模。

(二) 非烃类

天然气生成的过程,伴随产生部分非烃类气体,有些非烃类物质在一定的条件下也能形成较大规模的气藏,如二氧化碳气藏、硫化氢气藏。

第二节 天然气的现状及存在的问题

一、我国天然气储量及消费现状

能源是人类活动的物质基础。从某种意义上来说,人类活动的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的应用。由于天然气具有高效、清洁、方便、安全性好、经济性好和资源丰富等优点,其经济效益和社会效益非常可观,国内外对天然气的开发、利用和储运技术进行了广泛而有效的研究。

我国的天然气主要分布在四川盆地、鄂尔多斯盆地、西北新疆含气盆地(新疆地区的塔里木、准噶尔、吐哈三大盆地共发现气田 8 个,煤层气田 8 个)、南部莺琼盆地(海域第一大气区)、东海陆架盆地、松辽—渤海湾地区(共发现 3 个中型油气田,6 个含油气结构和煤层气)。根据我国油气最新资源评价成果,我国天然气总资源量为 $47.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中陆上 $38.58 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占 82.1%;海域 $8.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占 17.9%。截至 2005 年底,全国天然气剩余可采储量为 $2.66 \times 10^{12} \text{ m}^3$,仅占世界的 1.3%,人均占有量只有世界平均水平的 6.6%。气层气储采比为 47:1,探明程度较低,潜力很大。

相关机构对 2030 年天然气用气量和供应区域的预测表明,中国的天然气消费将以 7.6% 的速度迅速增长,2030 年的消费量将达到 $460 \times 10^8 \text{ ft}^3/\text{d}$,相当于欧盟 2010 年的天然气消费水平。中国在全球天然气需求增长中占 23% 的份额。天然气在中国一次能源消费中所占的份额将从 4% 增加到 12%。澳大利亚、中国和美国预计也会大幅增加天然气供应量,在全球天然气供应增量中各占 11% ~ 12% 的份额。天然气贸易的趋势势不可挡。

二、天然气工业发展现状

将自然存在的天然气开采出来,供给终端的用户作为燃料、化工原料的生产系统称为天然气工业。天然气工业由开采净化、输送储存和分配应用三大部分构成,俗称天然气工业中的上、中、下游。其基本过程如图 1-1 所示。

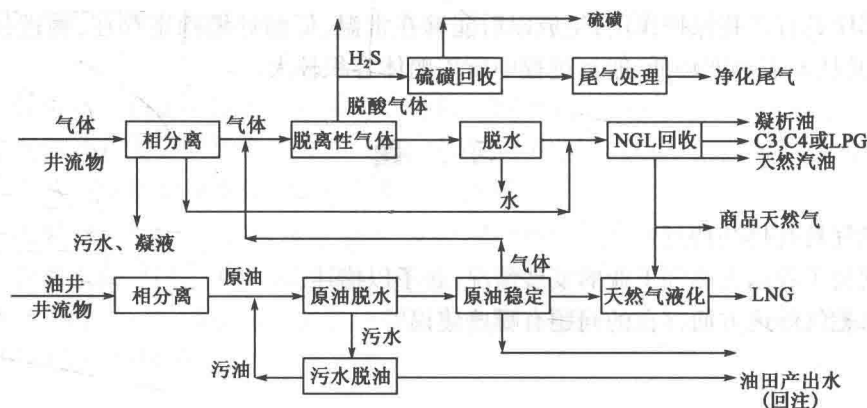


图 1-1 天然气处理与加工示意图

气井生产系统是由储层、举升油管、针型阀、地面集气管线、分离器等多个部件串联起来

的。由于埋深于地壳中,经过漫长的地质年代和地壳运动,形成不同的沉积物特征和环境,积累成不同的地层,产生各种地质构造形态,因而天然气的储集具有纷繁复杂的形态和环境,而且天然气的生产在很大程度上受到地下天然气渗流规律的控制,由此使得天然气的勘探、开发和生产成为具有丰富内涵的工程技术。输送至用户之前,开采出来的天然气需经过处理、加工和净化,达到一定的质量指标,以满足安全、平稳输气和用户的要求(包括热值、水露点、烃露点、硫含量和二氧化碳含量等参数),是必不可少的生产环节。其中,天然气净化的目的是将天然气中的水、硫和二氧化碳等成分的含量降至工业和民用商品天然气所要求的指标,且符合环境法规的要求。它通常包括四类工艺处理,即天然气脱水、脱硫、硫磺回收和废气处理。

从气田开发出来到地面的天然气,往往需要经过长距离运输才能到达用户所在的地区。因而天然气储运成为重要的工程环节。储存天然气有两个目:一是为了解决消费者用气量的不平衡问题,即“调峰”;二是为了保证供气的可靠性。天然气的实际消费量是随着时间作周期性变化的,在每一年及每一天中都有用气量的高峰期和低谷期。但是,来自产地的天然气供给量既不能按消费者的高峰值计算,也不可以按低谷期计算,只能按照其平均消费量来稳定地供气。

目前实际应用天然气运输方式主要有管道输送(PNG)、液化水合物(LNG)、运输和压缩天然气(CNG)输送、吸附(ANG)储运和天然气水合物(NGH)储运等。

三、天然气储运存在的问题

天然气常用储运技术及新兴储运技术尽管都有长远的发展,但也存在如下问题:

(1) PNG 技术成熟,但受到气源、距离及投资等条件的限制,远洋输送不易实现,而且输送压力高,运行、维护费用高。

(2) LNG 输送方式在大规模、长距离、跨海船运方面应用广泛,其储存密度大、压力低、系统的安全性和可靠性比较高、技术难度大,建设初期成本巨大,输配站受安全因素制约,不能在人口稠密地区设立。

(3) CNG 输送技术成熟度高,具有灵活度高、投资少等特点,缺点是运行费用高,不适合远距离输送,存在较大的安全隐患。

(4) ANG 储运压力较低,但是吸附寿命短,吸附周期长,扩大吸附剂筛选范围难度较大。

(5) NGH 具有自我保护作用,生成以后能够在常温、低温环境稳定存在,输送过程中不需要高压,但其技术成熟度较低,船运过程中所需船体容积较大。

习 题

1. 天然气具有哪些特点?
2. 查阅关于我国天然气工业的发展情况,并予以描述。
3. 针对燃气储运方面存在的问题有哪些建议?

第二章 燃气储运技术及工艺

第一节 天然气分类及性质

天然气是由有机物转化而成的。生成天然气的有机物质是海洋和湖泊中的动物、植物遗体,其中以水生的浮游生物(如鱼类、藻类)和各类微生物等富含脂肪、蛋白质、碳水化合物的有机物质为主。这些生物的大部分或成为其他生物的食料,或变为 CO_2 而游离于大气中,只有少部分随着细小的沉积物沉积于海洋或湖泊的低洼地带。进入沉积物的有机物在缺氧的地质环境下受地层压力、温度、放射线、细菌、催化剂等复杂的生物化学作用,促进有机物的分解,完成“去氢加氧”和“富集碳”的过程,逐步形成分散的以 CH_4 为主的碳氢化合物——天然气。

通常根据形成条件不同,天然气分为气田气、油田伴生气及凝析气田气。天然气是一种混合气体,其组成随气田和产气层位不同而异。气田气的主要成分中, CH_4 、 C_2H_6 以上的烃类较少,同时还含有少量 H_2S 、 CO_2 、 N_2 、 H_2O 以及 He 、 Ar 等非烃类组分;油田伴生气除含有大量 CH_4 外, C_2H_6 以上的含量较高;凝析气田气除含有大量 CH_4 外, C_5H_{12} 以上烃类含量较高,并含有汽油和煤油组分。

根据天然气含油量的多少,将它分为两类:凡每立方米天然气含油量在 100g 以下的称为干气(又称贫气),反之则称为湿气(又称富气)。根据天然气含硫量的多少,将它划分为酸气和净气,前者是指每立方米硫含量大于 1g 。

自气井或油气井采出的天然气含有大量的矿物质和水分,必须经过分离净化处理后才能供用户使用。

天然气从地下开采出来时压力很高,有几十兆帕到几百兆帕,因此,有利于远距离输送,输送到用户时仍能保证较高压力,有利于炉子采用高压喷嘴进行燃烧。

用天然气作燃料比其他燃料具有更多的优点:容易燃烧,清洁无灰,热值高,燃烧效率高,是最清洁的高能优质天然燃料,无论是用于工业、发电、内燃机,还是用于民用燃料都是非常理想的。

天然气既可以单独供给各种加热设备作燃料,也可以和其他低热值燃气混合后供给用户使用。天然气中含有大量的烃类气体,经转化后可得到以 H_2 和 CO 为主的还原性气体,用于冶炼工业。天然气也是十分重要的基本有机化工原料。

天然气主要用途是作燃料,可制造炭黑、化学药品和液化石油气,由天然气生产的丙烷、丁烷是现代工业的重要原料。天然气主要由气态低分子烃和非烃气体混合组成。我国有着比较丰富的天然气资源,分布比较广泛,主要分布在东部地区(渤海湾,松辽)、陕甘宁地区、川渝地区、青海地区 and 新疆地区等。

一、天然气的分类

(1) 天然气按在地下存在的相态,可分为游离态、溶解态、吸附态和固态水合物。游离态的天然气经聚集形成天然气藏,才可开发利用。

(2)天然气按照生成形式,可分为伴生气和非伴生气。

①伴生气:伴随原油共生,与原油同时被采出的油田气。伴生气通常是原油的挥发性部分,以气的形式存在于含油层之上,凡是有原油的地层中都有伴生气,只是油、气量比例不同。即使在同一油田中,石油和天然气来源也不一定相同,它们由不同的途径和经不同的过程汇集于相同的岩石储层中。

②非伴生气:包括纯气田天然气和凝析气田天然气两种,在地层中都以气态存在。凝析气田天然气从地层流出井口后,随着压力的下降和温度的升高,分离为气液两相,气相是凝析气田天然气,液相是凝析液,称为凝析油。若为非伴生气,则与液态集聚无关,可能产生于植物物质。世界天然气产量中,主要是气田气和油田气。对煤层气的开采,现已日益受到重视。

(3)天然气按照蕴藏状态,可分为构造性天然气、水溶性天然气、煤矿天然气。构造性天然气又可分为伴随原油出产的湿性天然气、不含液体成分的干性天然气。

(4)天然气按成因,可分为生物成因气、油型气和煤型气。无机成因气尤其是非烃气受到高度重视。

(5)天然气按不同的缩写,也可以分为 LNG、LPG、SNG、CNG、NG。LNG 是英文“Liquefied Natural Gas”的缩写,是液化天然气的代称;LPG 是英文“Liquefied Petroleum Gas”的缩写,是液化石油气的代称;SNG 是英文“Substitute Natural Gas”的缩写,是代用天然气的代称;CNG 是英文“Crush Natural Gas”的缩写,是压缩天然气的代称;NG 是英文“Natural Gas”的缩写,是天然气的代称。LNG 是最近这些年兴起的能源,已经十分广泛地运用到各种行业。气田生产的天然气进行净化处理后,再经超低温(-162°C)常压液化就形成液化天然气。

二、气体组分表示方法

混合气体的组分表示方法有容积成分、质量成分及分子成分三种。

(1)容积成分 y_i :混合气体中各组分的分容积与混合气体的总容积之比,混合气体的总容积等于各组分的分容积之和。

(2)质量成分 g_i :混合气体中各组分的质量与混合气体的总质量之比,混合气体的总质量等于各组分的质量之和。

(3)分子成分 x_i :混合气体中各组分的摩尔数与混合气体的摩尔数之比。

混合气体总容积与各容积成分之间的关系满足式(2-1):

$$V_m = \frac{1}{100}(y_1 V_{m1} + y_2 V_{m2} + \cdots + y_n V_{mn}) \quad (2-1)$$

同温同压下,1 摩尔任何气体的容积大致相等,因此气体的分子成分在数值上近似等于其容积成分。混合气体的总摩尔数等于各组分的摩尔数之和,即混合液体组分的表示方法与混合气体相同。

三、气体的平均相对分子质量

平均相对分子质量:燃气的总质量与燃气的摩尔数之比。

(1)混合气体的平均相对分子质量:

$$M_m = \frac{1}{100}(y_1 M_{m1} + y_2 M_{m2} + \cdots + y_n M_{mn}) \quad (2-2)$$

(2)混合液体的平均相对分子质量:

$$M = \frac{1}{100}(x_1 M_1 + x_2 M_2 + \cdots + x_n M_n) \quad (2-3)$$

四、气体与液体的平均密度和相对密度

(1)气体的平均密度 ρ :单位体积的气体所具有的质量, kg/m^3 。

$$\rho = \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \quad (2-4)$$

气体的密度随温度和压力的变化而变化,压力升高,体积减小;温度升高,体积增大。

(2)相对密度 s :气体的密度与相同状态的空气密度的比值。

$$s = \frac{\rho}{1.293} \quad (2-5)$$

(3)混合液体的平均密度 $\rho_{\text{液}}$:

$$\rho_{\text{液}} = \frac{1}{100} \sum y_i \rho_i \quad (2-6)$$

(4)液体的相对密度指液体的密度与水的密度的比值。因为 4°C 时水的密度为 $1\text{kg}/\text{L}$,所以液体的相对密度和平均密度在数值上相等。常温下,液态液化石油气的平均密度是 $0.5 \sim 0.6\text{kg}/\text{L}$,相对密度为 $0.5 \sim 0.6$,约为水的一半。天然气和焦炉煤气都比空气轻,而气态液化石油气约比空气重一倍。

五、气体的临界参数和实际气体状态方程

(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,这个温度就称为该气体的临界温度。在临界温度下,使气体液化所必需的压力称为临界压力。气体的临界温度越高,越易液化。天然气的主要成分是甲烷,它的临界温度低,因此较难液化,而组成液化石油气的碳氢化合物的临界温度较高,因此较易液化。

(二)实际气体状态方程

当气体压力低于 1MPa 和温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时,在工程上还可以当作理想气体。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很大。在实际工程中,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 ,得到实际气体状态方程:

$$pv = ZRT \quad (2-7)$$

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的。对比温度 T_r 是工作温度 T 和临界温度 T_c 的比值,对比压力 p_r 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。对于混合气体,先确定平均临界压力和平均临界温度,再求得压缩因子 Z 。

六、黏度、蒸气压与温度的关系

混合气体的动力黏度和单一气体一样,也随压力的升高而增大,在绝对压力小于 1MPa 的情况下,压力的变化对黏度的影响减小,可不考虑。混合气体的运动黏度随压力的升高而减小。温度的影响却不可忽略,一般气体的黏度随温度的升高而增加,液体的黏度随温度的升高而降低。压力对液体黏度的影响不大。

饱和蒸气压简称蒸气压,是在一定温度下密闭容器中的液体及其蒸气处于动态平衡时蒸气所表示的绝对压力。蒸气压与密闭容器的大小及液量无关,仅取决于温度。温度升高时,蒸气压增大。

根据道尔顿定律,混合液体的蒸气压等于各组分蒸气压之和。如果容器中是由丙烷和丁烷所组成的液化石油气,当温度一定时,其蒸气压取决于丙烷和丁烷含量的比例。当使用容器中的液化石油气时,总是先蒸发出较多的丙烷,而剩下的液体中丙烷的含量逐渐减少,所以温度虽然不变,容器中的蒸气压也会逐渐下降。

燃气是易燃、易爆的混合气体,有些燃气还有毒性。燃气中含有可燃气体(碳氢化合物、氢气和一氧化碳)和不可燃气体(二氧化碳和氮气等惰性气体),部分燃气还含有氧气、水及少量杂质。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,都与所使用的燃气种类有关。城市燃气在管道中的输送距离较长,管道的造价及金属的用量在输配系统中所占的比重较大,所以,从经济上讲,输送高发热值的燃气对输配系统有利。

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 14700kJ/m^3 。由于用气设备是按确定的组分设计的,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、回火及不完全燃烧等火焰特性。

第二节 天然气管道输送

管道运输是国民经济综合运输的重要组成部分,也是衡量一个国家的能源与运输业是否发达的特征之一。目前,长距离、大管径的输油气管道均由独立的运营管理企业负责经营和管理。管道运输多用来输送流体(货物),如原油、成品油、天然气及固体煤浆等,它与其他运输方式(铁路、公路、海运、河运)相比,主要区别在于驱动流体的运输工具是静止不动的泵机组、压缩机组和管道泵机组,压缩机组给流体以压能,使其沿管道连续不断地向前流动,直至运输到指定地点。

目前,在由铁路、公路、水运、航空和管道五大运输方式构成完整的交通运输体系中,管道运输成为当今油气储运的首选方案。在世界运输体系中,发达国家利用管道输送油气的货物周转已占全球货物周转量的 22.4%。

由于天然气呈气体状态,相对密度小,易散失,采用管道输送安全性高,输送产品质量有保证、经济性好,对环境污染小,所以天然气的输送一般都采用管道运输(PNG 技术)。自 1893 年世界第一条石油输送管道建成以来,世界各地及各个国家的油气管道建设得到迅速发展。1948—1997 年,全世界共建成油气管道 $191 \times 10^4\text{km}$,其中输气管道为 $103 \times 10^4\text{km}$,占 54%;原