

天然气集输工程

曾自强 张育芳 主编



石油工业出版社

天然气集输工程

曾自强 张育芳 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书的主要内容有:天然气的物理化学性质、水化物的形成及防止、矿场集输系统 气液分离设备、换热设备、矿场集输管网、天然气的脱水、提取天然气中的液烃、天然气的脱硫等内容。

本书除用作石油与天然气储运专业的教材外,也可作为生产单位工程技术人员业务学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气集输工程/曾自强,张育芳主编.

北京:石油工业出版社,2001 11

ISBN 7-5021-3419-0

I.天…

II.①曾…②张…

III.天然气-油气集输

IV.TE86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 036777 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

西南石油学院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 26印张 1插页 665千字 印1—1000

2001年11月北京第1版 2001年11月四川第1次印刷

ISBN 7-5021-3419-0/TE·2549

定价 39.00元

前 言

随着天然气和石油生产的不断发展,科学技术日新月异进步,很多年以前编写的《天然气集输工程》(讲义)看来已适应不了当前教学和生产上的需要。为此,在总结原来教材及教学的基础上,尽量采用该领域的先进科学技术来充实并编写出《天然气集输工程》教材,是我们肩负的重要任务和必须遵循的原则。

《天然气集输工程》是石油和天然气储运专业的一门重要专业课程。它向读者(主要是大学生),系统而重点地介绍:天然气(包括油田伴生气)的物理化学性质、天然气集输系统、矿场集输流程以及集输管网、防止水化物形成、气液的两相和三相分离、换热设备、气体脱水、轻烃回收以及脱硫等内容。

本教材在编写过程中,力求用通俗的文字,严谨的科学态度来阐述某些概念、理论;为使理论能更好地结合生产实际,相当详尽地介绍了设计计算的方法,并给出了算例;为使用方便,全书的公式和图表一律采用我国的法定单位制。对本书中所用的不少公式(方程),本来进行了推导,但由于篇幅限制就省掉了。请读者谅解。

本教材的书稿完成后,经过多届年级试用。后又经过修订(大量减少内容和篇幅,并增添新内容),正式交给出版社出版。

本书编写的具体分工是这样的:

绪论、第2、4、6章由曾自强编写;第1章由李素碧编写;第3章由郑云萍编写;第5章由曾自强和马国光合作编写;第7章由马国光编写;第8、9章由张育芳编写。本书各章的图幅是肖扬老师用计算机精心绘制的。全书各章经主编仔细审阅修改后定稿。

本书在编写过程中,得到了院系领导的关心和支持;教研室的领导和同志们给与了无私的帮助,在此特向他们致以诚挚的谢意。

由于水平所限,缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编者:1999年7月

目 录

绪 论	1
第 1 章 天然气的物理化学性质	4
1.1 天然气的化学组成与分类	4
1.2 天然气的物理化学性质	10
1.2.1 天然气的压力、温度、临界值及其对比值	10
1.2.2 天然气的分子质量	14
1.2.3 天然气的密度和相对密度	15
1.2.4 天然气的粘度	16
1.2.5 天然气的热力学性质	22
1.2.6 气体状态方程式及压缩系数	34
思考作业题	39
参考文献	39
第 2 章 天然气水化物的形成及防止	40
2.1 概述	40
2.2 天然气中水汽的含量	40
2.3 水化物的结构	44
2.4 形成水化物的温度或压力的确定	45
2.5 气体水化物的防止	52
2.5.1 在不形成水化物的条件下,允许气体进行膨胀	52
2.5.2 在给定条件下,求出气体节流调压后的温度降,判断是否形成水化物	53
2.5.3 喷注化学抑制剂	55
思考作业题	61
参考文献	61
第 3 章 天然气矿场集输系统	62
3.1 天然气集输系统	62
3.1.1 天然气集输系统	62
3.1.2 站场种类和作用	63
3.2 矿场(气田)集输系统	64
3.3 油田气的集输流程	73
3.4 调压计量站流程	73
3.4.1 输气管线起点调压计量站流程	73
3.4.2 输气管线中间调压计量站流程	74
3.4.3 输气管线终点调压计量站流程	75
思考作业题	76
参考文献	76
第 4 章 油(液)气分离设备	77

4.1	概述	77
4.2	两相分离设备的工作过程	78
4.2.1	卧式分离器	78
4.2.2	立式分离器	79
4.2.3	球形分离器	79
4.2.4	其他形式的分离器	79
4.2.5	卧式分离器与立式分离器的比较和选择	81
4.3	两相分离器的外壳及内部构件	81
4.3.1	进口转向器	82
4.3.2	波浪破碎器	82
4.3.3	除沫板	82
4.3.4	旋流破碎器	82
4.3.5	雾沫脱除器(除雾器)	83
4.4	两相分离的理论	84
4.4.1	颗粒的沉降	84
4.4.2	颗粒的大小	87
4.4.3	停留时间	88
4.5	两相分离器的尺寸设计	88
4.5.1	卧式两相分离器	88
4.5.2	设计卧式两相分离器尺寸的步骤	90
4.5.3	立式两相分离器	91
4.5.4	例题	92
4.6	两相分离器尺寸设计的另一方法	95
4.6.1	在具体情况下的颗粒沉降方程	95
4.6.2	立式重力式分离器的尺寸设计	96
4.6.3	卧式重力式分离器的尺寸设计	99
4.6.4	立式和卧式分离器的比较	100
4.7	旋风式分离器	101
4.7.1	颗粒沉降的规律	101
4.7.2	旋风分离器直径及进出口管的计算	103
4.8	三相分离设备的工作过程	106
4.8.1	卧式分离器	106
4.8.2	立式分离器	108
4.8.3	卧式分离器与立式分离器的对比选择	110
4.9	三相分离器的外壳及内部构件	110
4.9.1	聚结板	110
4.9.2	喷砂嘴和排出口	110
4.10	三相分离的理论	111
4.10.1	气体分离	111
4.10.2	油/水的沉降	111

4.10.3	在油中的水滴尺寸	111
4.10.4	在水中的油滴尺寸	111
4.10.5	停留时间	111
4.11	三相分离器的尺寸设计	112
4.11.1	卧式三相分离器	112
4.11.2	立式三相分离器	115
4.11.3	例题	117
4.12	丝网除雾器的工艺计算	120
4.12.1	允许的最大气体流速的计算	120
4.12.2	丝网除雾器的面积的计算	121
4.12.3	压力降的计算	121
4.13	我国气田上常用的各类型分离器	122
4.13.1	立式重力式分离器的结构	122
4.13.2	卧式分离器的结构	124
4.13.3	旋风分离器的结构	124
	思考作业题	125
	参考文献	126
第 5 章	换热设备	127
5.1	概述	127
5.1.1	按工作原理分类	127
5.1.2	按结构分类	127
5.2	传热机理	130
5.2.1	热传导	130
5.2.2	对流换热(热对流)	135
5.2.3	对流换热系数的计算	136
5.2.4	热辐射	162
5.3	两流体间的热量传递	167
5.3.1	传热方程和(总)传热系数	167
5.3.2	传热的热流量(热负荷)的计算	172
5.3.3	平均传热温差的计算	173
5.4	常用换热器的工艺计算	176
5.4.1	总述	176
5.4.2	壳管式换热器的工艺计算	188
5.4.3	套管式换热器的工艺计算	195
5.4.4	水套加热炉的工艺计算	201
	思考作业题	207
	参考文献	207
第 6 章	矿场集输管网	208
6.1	集输管网的类型	208
6.2	集输管网的计算	209

6.2.1	单相管路内压力降的计算	209
6.2.2	气液两相管路内压力降的计算	219
6.2.3	在阀门和管子附件处的压头损失	230
6.2.4	计算压力降的例题	234
6.2.5	输气管道中任何一点压力和平均压力	237
6.2.6	相当输气管道的概念	239
6.2.7	各种复杂输气管道的计算	239
6.2.8	管线尺寸和壁厚的确定	248
6.2.9	输气管道中温度变化	261
6.3	常用的管子、管件和阀门	262
6.3.1	管子、管件和阀门的标准化	262
6.3.2	矿场常用的管子和管件	264
6.3.3	阀门	265
6.3.4	节流阀的计算和选择	265
	思考作业题	266
	参考文献	266
第7章	天然气脱水	267
7.1	概述	267
7.2	溶剂吸收法脱水	268
7.2.1	甘醇脱水的基本原理和物理性质	268
7.2.2	三甘醇吸收脱水的原理流程	271
7.2.3	三甘醇法脱水的工艺参数选取	273
7.2.4	三甘醇脱水装置的工艺计算	276
7.3	固体吸附法脱水	296
7.3.1	吸附操作原理	296
7.3.2	吸附剂	299
7.3.3	吸附法脱水	303
7.4	脱水工艺的选择	316
	思考作业题	317
	参考文献	317
第8章	提取天然气中的液烃	318
8.1	概述	318
8.2	商用产品的技术条件及规范	318
8.3	从天然气中分离液烃的一般方法	320
8.3.1	油吸收法	320
8.3.2	吸附法	321
8.4	从天然气中提取液烃的主要方法——低温分离法	322
8.4.1	概述	322
8.4.2	相变制冷	324
8.4.3	直接膨胀制冷	335

8.4.4	天然气中凝析液量的计算	341
8.4.5	做外功的等熵膨胀过程的热力计算及算例	350
8.4.6	低温分离工艺流程	358
8.4.7	膨胀机	366
8.4.8	热分离机	368
8.5	提取天然气液烃加工方法的选择	371
8.6	凝析油的稳定及算例	371
8.7	天然气液化简介	375
8.7.1	液化天然气的必要性	375
8.7.2	天然气液化技术	375
8.7.3	液化天然气汽化时的冷量回收	379
	思考作业题	380
	参考文献	380
第9章	天然气脱硫	381
9.1	概述	381
9.2	气体脱硫方法的分类	381
9.3	常用的几种脱硫方法	384
9.3.1	烷醇胺法(化学吸收)	384
9.3.2	物理吸收法	388
9.3.3	改良蒽醌法	393
9.3.4	分子筛法	394
9.3.5	脱硫方法选择图	395
9.4	硫磺的生产(简介)	397
9.4.1	克劳斯反应综述	397
9.4.2	单流法(直通法)工艺流程简介	398
9.4.3	分流法硫磺回收工艺流程	399
9.5	硫磺回收装置的尾气处理(简介)	399
9.5.1	设计成使克劳斯反应进行完全的尾气处理法	400
9.5.2	将硫转化为 H ₂ S 的方法(还原—吸收法)	400
	思考作业题	401
	参考文献	401
	附录	402

绪 论

石油和天然气集输，主要研究油田和气田在生产过程中原油和天然气的收集、预处理和输送等问题。本书以气田天然气集输为主要研究对象；对于油田的伴生天然气，同样也在讨论之列。

天然气（石油）集输是继气（油）藏勘探、气（油）田开发和气（油）田开采之后的一个非常重要的生产阶段。它是从井口开始，将天然气（石油）通过管网收集起来，经过预处理，使其成为合格产品，然后外输至用户的整个生产过程。

天然气集输的生产过程，可用下面的框图来说明。

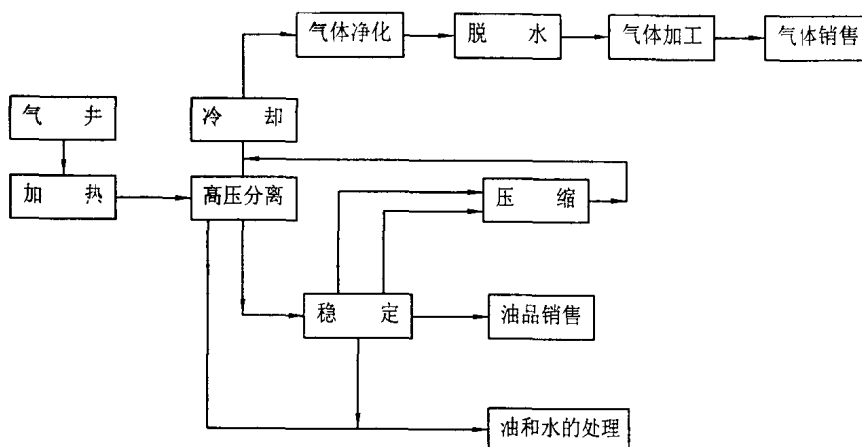


图 0-1 大天然气集输过程的框图

气田上大多数气井在高压下生产，为控制其流动需要安设节流阀。当气体流经节流阀时，气体产生膨胀，其温度降低。如果气体温度变得足够低，将形成水化物（一种固体结晶状的冰雪物质）。这就会导致管道和设备的堵塞。本书将讨论水化物生成及其预防措施。

从井中出来的天然气在节流到分离器压力以前，通常必须加热。水蒸汽加热装置和间接明火式加热器常常被用来防止气流形成水化物的堵塞。

也有可能要对气体进行冷却。有些气藏位于地面以下比较深的地方，气体的温度非常高。如果有大量的气体和液体从这些井中开采出来，气井的流动温度甚至在节流以后也可能非常高。在这种情况下，气体在处理或脱水、压缩之前就必须加以冷却。当然，在较高温度下，进行分离和对液体进一步处理也是可能的。液体通常是在冷却以前从气体中被分离出来，从而可减轻冷却设备的负荷。换热器用来冷却或加热气体；为了从油中脱除水和甘醇溶液的再生，换热器也可以用来冷却或加热这些液体以及其他用来处理气体的液体等。

在有些气田上，在气井生产的早期，当油管流动压力比较高，流经节流阀后的温度降比较大时，就需要进行加热。而随着时间的推移，油管流动压力下降，如果气井生产比较多的

液体，就可能需要对气体进行冷却，以提高液体的回收率。液体保持气藏热量的能力比较强，它在给定压力降时的温度降就比气体所相应的温度降要小些。本书将较详细地介绍各种用来进行加热和冷却的换热器的设计。

典型的是，在处理设施中，气体在高压下进行初步分离，这就使气藏能量能以用来驱动气体经过各个生产过程直到消费者；但随着时间的推移，油管流动压力可能降低，为进一步处理气体，可能需要对气体进行压缩增压。

气液混合物的初步分离通常是三相的，气体负荷对分离器的尺寸设计起支配作用；如果分离器足够大，就能满足气体负荷的要求，但对于三相分离来说，分离器通常还要有相当大的空间可以提供液体有充足的停留时间。在本书有关章节要详细讨论分离器的选择和尺寸设计。

从一级分离器分离出来的液体石油，可以用多级闪蒸分离来稳定，或者采用“凝析油稳定”的过程来加以稳定。烃类液体的稳定是涉及到从液体中增加烃类中间组分（ C_3 到 C_6 ）回收率的生产过程。涉及到蒸馏过程的“凝析油稳定”，将在本书有关章节中介绍。

应用本书有关章节所介绍的过程及设备，可以对凝析油和水进行分离和处理。

根据闪蒸分离的级数，在低压分离器中闪蒸出来的气体可以被压缩增压，然后与高压分离器出来的气体再混合。通常可以使用往复式压气机或离心式压气机来压缩气体。在功率不大的压气机站，特别是压缩从储油罐出来的气体（汽油蒸汽回收），通常使用回转式或叶片式压气机。

输气公司要求从他们所购买的气体中脱除杂质。他们认识到，为了公司管线和用户燃气设备有效地运行，必须脱除气体中的杂质，所以卖气给输气公司的气体销售合同，总是要包括关于输送给他们的气体质量的条款（规定）；并且进行定期的检测，以确定卖气者是否遵守合同规定。

酸气（通常是指 H_2S 和 CO_2 ）为天然气中的杂质，必须加以脱除。在有水时， CO_2 可形成碳酸，而 H_2S 可导致钢材的氢脆，因此二者的腐蚀性很强；另外， H_2S 即使在浓度很低的情况下，毒性也是非常大的。当气体卖给用户时，购买气体的公司规定 CO_2 和 H_2S 的最大允许浓度。 CO_2 的正常极限浓度为 2%~4%（体积），而 H_2S 的正常极限浓度为每 $1m^3$ ^① 气体中含 5.63mg H_2S （或每 100ft³^② 气体中含 H_2S 0.25 格令^③）。天然气中的另一杂质为氮气，因为氮气基本上没有热值，它的存在将降低天然气的燃烧热值。购买气体者可以给气体规定一个最低的燃烧热值（通常为 8300kcal/m³ 或者 34860kJ/m³），在某些情况下，需要脱除氮气以满足这些要求。这个可在非常低温的冷冻厂或用渗透薄膜来实现这个目的。这些生产过程不属于本书讨论的范围。

从气井中生产出来的天然气，通常饱和着水汽；极大多数的气体处理过程，最后也留下了饱和着水汽的气体。水汽本身是不会引起反对的，但是在当气体被压缩或冷却时，液相水或固相水就可以造成很大的麻烦。液体水加速了管线和其他设备的腐蚀；当有液体水时，可以形成固体水化物而堵塞阀门、管件以及有时是管线本身；液体水聚积在管线低的地方，将减小管线的通过能力。用脱水的方法来脱除天然气中的水汽，就可以消除这些可能出现的困难。这个也是气体销售协议中所需要的。当气体脱水以后，其露点（水分从气体中凝析出来的温度）将降低。

①指在 101325Pa、20℃ 条件下的气体体积 m^3 数；

②指在 14.7lb/in²、60°F 条件下的气体体积 ft³ 数；

③格令（grain）—英制质量单位，等于 64.8mg

典型的脱水规格例如在美国南方海湾地区为 $110\text{mg}(\text{水})/\text{m}^3(\text{气})$ (或 $7\text{lb}(\text{水})/\text{Mft}^3(\text{气})$)，对压力为 6.895MPa ($1000\text{lb}/\text{in}^2$) 的天然气来说，这个给出的露点为 0°C (即 32°F)；而在美国北部和加拿大，气体合同要求气体有比较低的露点和比较低的水汽浓度；水汽浓度通常为 $31\sim 32\text{mg}/\text{m}^3$ (即 $2\sim 4\text{lb}/\text{Mft}^3(\text{气})$)。如果气体在非常低的温度下进行加工，比如在气体深冷厂，可以要求将水汽脱除到 1ppm ^①。本书将讨论天然气的脱水问题。

气体的价值通常取决于它的燃烧热值。然而，如果乙烷、丙烷和丁烷有销售市场的话，从天然气中提取这些组分，哪怕是降低天然气的燃烧热值，也是经济合算的。在某些情况下，在输气管线向居民区或商业区供应气体燃料的场合，而又没有从天然气中提取高热值组分的工厂，销售合同就可以限定天然气的热值含量；即使是提取过程的本身被证明是不经济的，也必须对天然气进行加工，以减小其热值含量。

由加工天然气所提取出的液体，必须销售出去。液体销售合同规定一个最大的液体蒸汽压。典型的是，如果液体与凝析油相混合，则蒸汽压将限定在 $10\sim 14\text{RVP}$ (Reid 蒸汽压)。为了满足对气体热值限定的要求，原油（指粗油）的 RVP 值有时就可能被超过。通常，从天然气中提取丙烷和使用稳定塔来处理凝析油需要尽可能多地脱除甲烷及乙烷，此时燃烧热值和蒸汽压这两个标准都可以得到满足。

本书将比较详尽地介绍从天然气和油田伴生气中回收轻烃的有关问题。

在气田（油田）的整个生产过程中，必须关心各个设备以确保它们能够承受最大的压力值。在本书中将讨论确定管壁厚度的步骤，并规定管子、管件的压力等级；在任何情况下，管线和设备系统都必须设置卸压阀来最后限定设计压力（最大的允许工作压力）。

一个气田（油田）或一个矿场，通常有数十口或更多的井，根据气（油）田的大小、井位、地理地貌、气体（油）性质等因素，可以选用不同的集输系统和集输管网类型，本书将讨论这些内容及其有关部分。

①ppm —— parts per million 三个英文字的一个字母所构成的表示稀溶液中溶质浓度的符号，中文意义是百万分之一。它有两种情况：1) 百万分之一（质量），例如 1kg 溶液中含有 2mg 溶质，则称此稀溶液中溶质的浓度为 2ppm （质量）；2) 百万分之一（体积），例如 1 百万立方米天然气中含有 H_2S 5 立方米，则称天然气中 H_2S 的浓度为 5ppm （体积）。

第 1 章 天然气的物理化学性质

1.1 天然气的化学组成与分类

天然的可燃气体统称为天然气。

天然气是以烷烃 (C_nH_{2n+2}) 为主的各种烃类和少量非烃类气体所组成的气体混合物。按其化学组成(以体积百分含量计), 绝大部分是甲烷 (CH_4)、乙烷(C_2H_6)、丙烷 (C_3H_8); 丁烷 (C_4H_{10}) 和戊烷 (C_5H_{12}) 含量不多。天然气中也含有其他一些气体, 如硫化氢 (H_2S)、二氧化碳 (CO_2)、氮 (N_2) 及水汽 (H_2O); 有时还含有微量的稀有气体, 如氦 (He) 和氩 (Ar) 等。

在基准状态 (101325Pa, $0^\circ C$) 下, 在天然气中, 从甲烷到丁烷的烃类以气态存在; 戊烷以上的烃类是液态, 即天然气油。

按矿藏分类, 天然气可分为气田气、油田气和凝析气田气三种。

气田气主要含甲烷, 含量约为 80%~98%; 乙烷至丁烷烃类的含量一般不大, 戊烷和戊烷以上重烃以及非烃类气体或不含或含量甚微。

油田气包括溶解气和气顶气, 它的特征是乙烷和乙烷以上的烃类含量一般较高, 其组成同分去凝析油以后的凝析气田气相类似。

从凝析气田采出的天然气, 除含有大量的甲烷、乙烷外, 还含有一定数量的丙、丁烷; 戊烷及戊烷以上烃类含量较高, 含有汽油和煤油的组分。

对气田气而言, 各气田气的化学组成彼此差异也很大。表 1-1、表 1-2 列出了我国一些油气田天然气的化学组成。

天然气还可以分为干气 (或贫气) 和湿气 (或富气) 两类。但是, 世界上并没有一个统一的划分标准, 前苏联根据天然气中的汽油含量来划分; 在有的文献中, 是以天然气中甲烷含量来划分; 在美国, 一般是根据油气比和天然气的相对密度来划分干气和湿气。

若按天然气中含硫量的多少来划分, 每立方米天然气中含硫量小于 1 克的称为净气, 每立方米天然气中含硫量大于 1 克的气称为酸气。

天然气的化学组成是天然气工程中的重要原始数据。各组分的含量和性质决定了天然气的性质, 它是气田开发、气井分析、地面集输、净化加工及综合利用的设计依据。因此对天然气各组分的性质应有所了解, 表 1-3 及表 1-4 列出了天然气各组分的主要物理、化学性质及物理常数, 可供工艺计算时参考。

表 1-1 我国某些油田气的组成

油田名称	天然气组成, % (体积)											
	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	己烷	二氧化碳	硫化氢	氮	其他
大庆油田	1	79.75	1.9	7.6	5.62							5.23
	2	91.3	1.96	1.34	0.90				0.20		0.38	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	0.60		1.10
	气井气	90.7	2.6	2.8	0.6	0.1	0.5	0.5	0.2	1.3		0.7
	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	0.64
油港铁砧山	88.14	5.97	1.95	0.43	0.36	0.15	0.09	0.14	2.26			0.51
下辽河油田	81.5	8.5	8.5	5.0					1.0		1.0	3.0

表 1-2 四川某些气田天然气的组成

气田名称	产气地层	天然气组成, % (体积)										视临界温度 K	视临界压力 MPa						
		重烃			一氧化碳			不飽和烃			氮			氢	氟				
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	总计	硫化氢	一氧化碳	二氧化碳									
庙高寺	嘉二	96.42	0.73	0.14	0.04		0.91				0.08	0.69			1.93	0.05		191.8	4.643
傅家庙	嘉二	95.77	1.10	0.37	0.16		1.63			0.47	0.01			0.07	2.24			191.3	4.605
宋家场	阳三	97.17	1.02	0.2			1.22			0.44					1.09	0.04		192.0	4.639
阳高寺	阳三	97.81	1.05	0.17			1.22			0.44					0.48	0.05		192.3	4.644
兴隆场	喜二	96.74	1.07	0.32	0.16	0.076	1.62 ₆			0.145				0.008	1.54	0.042		192.1	4.618
自流井	阳三~阳二	97.12	0.56	0.07			0.63			1.135	0.02			0.002	1.06	0.032		192.0	4.657
威远	震旦系	86.80	0.11				0.11			4.437	0.879				8.1	0.316	0.027	190.8	4.665
卧龙河	1 嘉四	94.12	0.88	0.21	0.05		1.14			3.97				0.11	0.49			198.5	4.793
	2 嘉二	95.97	0.55	0.10	0.03	0.04	0.72			0.35	1.52			0.006	1.39	0.03	0.014	193.9	4.694
中	1 须二	91.15	5.8	1.59	0.71	0.20	8.3			0.54				0.05	0.10			203.2	4.656
坝	2 雷三	82.98	1.69	0.68	0.72	0.76	3.85			4.51	6.75			0.05	0.67			213.7	5.011
八角场	大二	90.99	3.49	1.89	1.07	1.21	7.66			0.25								204.9	4.594
相国寺	石炭系	97.62	0.92	0.07			0.99			0.16	0.01			0.013	1.13	0.076	0.006	191.2	4.628

表 1-3 天然气中常见烃类的基本性质 (在 101325Pa、0°C 条件下)

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
分子质量 <i>M</i>	16.043	30.070	44.097	58.124	58.124	72.151	72.151
千摩尔体积 <i>V_m</i> , m ³ /kmol	22.362	22.1872	21.9362	21.5977	21.5036	20.983	20.891
密度 <i>ρ</i> , kg/m ³	0.7174	0.353	2.0102	2.6912	2.7030	3.4386	3.4537
相对密度 <i>d</i>	0.5548	1.046	1.555	2.081	2.090	2.659	2.671
临界温度 <i>T_c</i> , K	191.05	305.45	368.85	407.15	425.15	460.85	470.35
临界压力 <i>P_c</i> , MPa	4.491	4.727	4.256	3.540	3.501	3.226	3.236
临界比容 <i>V_c</i> , m ³ /kmol	0.099	0.143	0.195	0.263	0.258	0.316	0.311
高发热值 <i>H_h</i> , MJ/m ³	39.84	67.34	101.26	133.05	133.89	168.32	169.37
低发热值 <i>H_l</i> , MJ/m ³	35.90	64.40	93.24	122.85	123.65	155.72	156.73
爆炸下限 <i>L₁</i> , % (体积)	5.0	2.9	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4
爆炸上限 <i>L_u</i> , % (体积)	15.0	13.0	9.5	8.5	8.5	8.3	8.3
定压比热 <i>C_p</i> , kJ/(kg K)	2.223	1.729	1.863	1.658	1.658	1.654	1.654
定容比热 <i>C_v</i> , kJ/(kg K)	1.670	1.444	1.649	1.49	1.49		
动力粘度 <i>μ</i> , (Pa S) × 10 ³	1.027	0.843	0.735	0.676	0.669	0.616	0.635
运动粘度 <i>η</i> , m ² /s × 10 ³	1.416	0.611	0.358	0.246	0.243	0.176	0.180
气体常数 <i>R</i> , kJ/(kg K)	0.5171	0.2759	0.1846	0.1378	0.1372	0.1078	0.1074
偏心因子 <i>ω</i>	0.0104	0.0986	0.1524	0.1848	0.2010	0.2223	0.2559

表 1-4 天然气中常见某些气体的基本性质 (在 101325Pa、0℃条件下)

项 目	氢	氮	氩	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	
分子质量 <i>M</i>	2.0160	28.0134	4.003		28.0104	44.0098	34.076	28.966
千摩尔体积 <i>V_m</i> , m ³ /kmol	22.427	22.403	22.363		22.3984	22.2601	22.1802	22.4003
密度 <i>ρ</i> , kg/m ³	0.0899	1.2504	0.179		1.2506	1.9771	1.5363	1.2931
相对密度 <i>Δ</i>	0.0695	0.967	0.138		0.967	1.529	1.188	1.00
临界温度 <i>T_c</i> , K	33.32	126.2	5.25		133.0	304.20	373.54	132.50
临界压力 <i>P_c</i> , MPa	1.255	3.285	0.222		3.383	7.149	8.715	3.645
临界比容 <i>V_c</i> , m ³ /kmol	0.065	0.090	0.058		0.093	0.094	0.098	0.090
高发热值 <i>H_h</i> , MJ/m ³	12.74				12.64		25.34	
低发热值 <i>H_l</i> , MJ/m ³	10.78				12.64		23.36	
爆炸下限 <i>L₁</i> , % (体积)	4.0				12.5		4.3	
爆炸上限 <i>L_h</i> , % (体积)	75.9				74.2		45.5	
定压比热 <i>C_p</i> , kJ/(kg K)	12.76	1.047	5.234		1.034	0.845	1.063	1.009
定容比热 <i>C_v</i> , kJ/(kg K)	10.13	0.745	3.140		0.737	0.653	0.804	0.720
动力粘度 <i>μ</i> , (Pa S) × 10 ³	0.836	1.667	1.718		1.657	1.402	1.167	1.716
运动粘度 <i>η</i> , m ² /s × 10 ²	9.30	1.33	9.598		1.33	0.709	0.763	1.34
气体常数 <i>R</i> , kJ/(kg K)	4.126	0.2967	2.077		0.2967	0.1876	0.2415	0.2868
偏心因子 <i>ω</i>	0.000	0.040			0.041	0.225	0.100	

天然气组成表示方法

天然气组成有三种表示方法：质量组成、体积组成和摩尔组成。每种组成均可用百分数或小数表示。

1. 质量（俗称重量）组成

如用符号 g_i 表示组分 i 的质量组成，则

(1) 用百分数表示时：

$$g_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \times 100 \quad (1-1)$$

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = 100 \quad (1-1a)$$

式中 m_i ——组分 i 的质量；

$\sum m_i$ ——总质量。

(2) 用小数表示时：

$$g_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (1-1b)$$

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = 1 \quad (1-1c)$$

2. 体积组成

如用符号 v_i 表示组分 i 的体积组成，则

(1) 用百分数表示时：

$$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i} \times 100 \quad (1-2)$$

$$v_1 + v_2 + \cdots + v_n = 100 \quad (1-2a)$$

式中 V_i ——组分 i 的体积；

$\sum V_i$ ——总体积。

(2) 用小数表示时：

$$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i} \quad (1-2b)$$

$$v_1 + v_2 + \cdots + v_n = 1 \quad (1-2c)$$

3. 摩尔组成（即分子组成）

如果气体的分子质量为 M ，则 M 千克的气体就称为 1 千摩尔（1kmol）；或者若气体分子质量为 M ，则 M 克的气体就称 1 摩尔（1mol）。

如用符号 y_i 表示组分 i 的摩尔组成，则：

(1) 用百分数表示时：