



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

天然气加工工程

(第二版)

诸 林 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

天然气加工工程

(第二版)

诸 林 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容包括天然气基本性质、天然气净化、轻烃回收与分馏、天然气液化与提氮以及天然气的化工利用等。系统地论述了天然气处理与加工过程中所涉及的单元过程的原理、方法和工艺技术,内容全面、丰富、新颖。本书可作为化学工程与工艺专业及相关专业学生的教材,也可供从事天然气生产的科研、教学、设计和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气加工工程/诸林主编. —2版.
北京:石油工业出版社, 2008.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.
高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-6591-8

I. 天…

II. 诸…

III. 天然气化工—高等学校—教材

IV. TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 065508 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523580 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2008年7月第2版 2008年7月第2次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 21.25

字数: 539千字

定价: 30.00元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

第二版前言

天然气是一次能源中最为清洁、高效、方便的能源，近 20 年来在我国呈现出快速发展的态势。随着一批新的气田相继投入开发，以西气东输、川气东送为标志的天然气管道工程建设，更紧密地联系了资源地与经济发达地区的关系，促进了天然气市场的发展，也推动着天然气工业的进步。

本书是在 1995 年石油工业出版社出版的《天然气加工工程》（第一版）的基础上进行修改、充实和完善的。《天然气加工工程》（第一版）出版以来受到了读者的欢迎和好评，为培养和造就天然气处理和加工人才作出了较大的贡献。但随着岁月的流逝，天然气处理和加工技术不断进步，第一版有些内容已显陈旧。基于这样的考虑，这次再版维持了原书的结构，对部分内容进行了修改和完善，并增加了“天然气化工利用”一章。本书可供高等学校相关专业学生学习，也可供从事天然气生产的科研、教学、设计和管理人员参考。

本书是配合四川省精品课程“天然气加工工程”的建设而编写的，本书同时入选了高等院校石油天然气类规划教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书由诸林主编并统稿，参加编写和修订的还有王治红（西南石油大学）、刘瑾（西南石油大学）、杨贵权（中国石油天然气股份有限公司吐哈油田分公司）、门万生（中国石油天然气股份有限公司吐哈油田分公司）。全书由尹代益教授（西南石油大学）、叶世超教授（四川大学）主审。在本书编写过程中，参考和引用了许多中外文献，并蒙石油工业出版社、西南石油大学教材建设委员会的大力支持，此外，刘蔷、任雯、赵治宇等对本书的编写也作出了贡献，在此一并致以谢忱！

由于编者学识和水平的限制，书中疏漏之处在所难免，恳望读者不吝指正。

编 者

2008.01

第一版前言

我国是世界上开采和利用天然气最早的国家之一。随着“油气并重”方针的贯彻实施，我国相继发现了一批天然气气田。为了配合天然气工业发展的人才需求，西南石油学院于1988年率先创办了天然气加工专业，同时，编者开始收集、整理大量资料，筹备编写《天然气加工工程》教材。经过几年的努力，现将拙著奉献在读者面前，以期天然气工业的发展尽点绵薄之力。

本书的内容覆盖了传统意义上的天然气净化和天然气加工两方面，前者指脱水、脱硫等预处理过程，后者指天然气轻烃回收、提氮、液化等过程，这两个联系紧密的工业过程在本书中统称为天然气加工工程。全书共分8章，按天然气加工过程中的主要单元过程编写，以工艺过程为主线，内容丰富，表述合理，可供天然气加工专业和储运专业的学生学习，也可供从事天然气（含油田伴生气）加工的科研、教学、设计和技术人员参考。

本书由诸林同志主编，邓良春同志参编。邓良春同志编写了第5、第6章的部分内容，诸林同志统稿并编写了其余各部分内容，全书由尹代益教授主审。在本教材的编写过程中，作者参考和引用了许多中外文献，主要参考书目刊于书末，特向原作者致谢，同时作者还得到了赵立志教授、徐荣副教授、罗修占高级实验师和王戎、胡祁娟、木易、白剑、董激阳、王兴明等同志的帮助，并蒙西南石油学院教材建设委员会、石油工业出版社和西南石油学院化工系领导的大力支持，谨此致以谢忱！

由于编者学识和水平的限制，书中难免存在一些缺点乃至错误，恳望读者批评指正。

编 者
1995. 11

目 录

1 概论	1
1.1 天然气组成与分类	1
1.1.1 天然气的组成	1
1.1.2 天然气的分类	1
1.2 天然气及其有关组分的主要物性参数	3
1.2.1 天然气中常见组分的主要物理性质	3
1.2.2 天然气的视相对分子质量与相对密度	3
1.2.3 天然气中主要组分的蒸气压	7
1.2.4 天然气中主要组分的汽化热	7
1.2.5 天然气的比定压热容	8
1.2.6 天然气的焓	8
1.2.7 天然气的熵	12
1.2.8 天然气的粘度	13
1.2.9 天然气的热值	15
1.3 天然气加工过程与商品气气质指标	16
1.4 天然气的用途	17
2 状态方程与平衡计算	19
2.1 天然气的相态性质与压缩因子	19
2.1.1 天然气的相态性质	19
2.1.2 天然气的压缩因子	21
2.2 天然气加工常用状态方程及热力学计算式	23
2.2.1 RK 方程	24
2.2.2 SRK 方程	27
2.2.3 PR 方程	29
2.2.4 BWR 方程	30
2.2.5 SHBWR 方程	36
2.2.6 天然气加工工程中常用状态方程所导出的热力学计算式	38
2.3 平衡过程计算	41
2.3.1 烃类体系相平衡常数的计算	41
2.3.2 泡点与露点计算	45
2.3.3 闪蒸计算	52
3 天然气水合物与防止措施	59
3.1 天然气含水量及烃水体系平衡计算	59

3.1.1	天然气含水量的估算	59
3.1.2	烃—水体系平衡计算	65
3.2	天然气水合物的结构与生成条件预测	67
3.2.1	天然气水合物的结构	67
3.2.2	天然气水合物生成条件的预测	68
3.3	天然气水合物的防止措施	77
3.3.1	热力学抑制剂法	77
3.3.2	动力学抑制剂法	82
4	天然气酸性组分的脱除	84
4.1	天然气脱硫脱碳的方法	84
4.1.1	脱硫脱碳方法分类	84
4.1.2	脱硫脱碳方法原理及特点	85
4.2	溶液吸收法	87
4.2.1	醇胺法	87
4.2.2	选择性脱硫	93
4.2.3	醇胺法的一般操作问题	100
4.2.4	醇胺法设计考虑与主要运行参数	105
4.3	醇胺法脱硫脱碳工艺计算	110
4.3.1	醇胺溶液的基础物化数据	110
4.3.2	酸性组分在醇胺溶液中的平衡数据	116
4.3.3	酸气在醇胺溶液中的吸收热效应	124
4.3.4	酸气负荷与循环量	125
4.4	其他脱硫脱碳方法	129
4.4.1	膜分离法	129
4.4.2	固体氧化铁法	133
4.4.3	直接转化法	135
4.4.4	低温分馏法	137
4.5	脱硫脱碳方法选择与技术进展	139
4.5.1	天然气脱硫脱碳方法选择	139
4.5.2	脱硫脱碳技术进展	140
5	天然气脱水	143
5.1	天然气脱水方法	143
5.2	溶剂吸收法脱水	144
5.2.1	甘醇的主要性质	144
5.2.2	甘醇脱水工艺流程	146
5.2.3	三甘醇脱水工艺计算与操作	151
5.3	固体吸附法脱水	166
5.3.1	吸附剂类型与吸附性能	167
5.3.2	吸附法脱水工艺流程	171
5.3.3	吸附过程特征及工艺计算	174

5.4 其他脱水方法	188
5.4.1 氯化钙法脱水	188
5.4.2 低温法脱水	188
6 酸气处理	190
6.1 硫黄及硫黄回收	190
6.1.1 硫黄及硫黄的性质	190
6.1.2 硫黄回收方法	194
6.2 克劳斯硫黄回收工艺	195
6.2.1 克劳斯反应的基本原理	195
6.2.2 克劳斯法硫黄回收工艺流程	195
6.2.3 过程气再热方式	201
6.2.4 克劳斯硫黄回收典型设备	201
6.2.5 影响硫黄回收率的因素	203
6.2.6 硫黄回收催化剂	206
6.2.7 克劳斯硫黄回收工艺计算	210
6.3 液态硫处理与硫黄成型	220
6.3.1 液态硫脱气	220
6.3.2 液态硫的输送	222
6.3.3 硫黄成型	222
6.4 尾气处理	223
6.4.1 概述	223
6.4.2 斯科特法	224
6.4.3 尾气灼烧	226
6.5 硫黄回收工艺选择	227
7 轻烃回收与分馏	229
7.1 轻烃回收	229
7.1.1 轻烃回收方法	229
7.1.2 制冷方法	229
7.1.3 油吸收法	249
7.1.4 冷凝分离法	250
7.1.5 轻烃回收工艺方法的选择	261
7.2 轻烃分馏	263
7.2.1 轻烃分馏流程	264
7.2.2 分馏稳定系统参数确定、塔型选择与 CO ₂ 冻堵问题	266
7.2.3 精馏塔的计算	267
8 天然气液化与提氦	273
8.1 天然气液化	273
8.1.1 概述	273
8.1.2 天然气预处理	274
8.1.3 天然气液化工艺流程	275

8.1.4 液化天然气的再汽化	287
8.2 天然气提氮	288
8.2.1 深冷分离法提氮	289
8.2.2 天然气提氮新工艺	292
9 天然气化工利用	294
9.1 天然气化工利用概况	294
9.2 天然气制合成气	295
9.2.1 天然气水蒸气转化制合成气	295
9.2.2 天然气部分氧化制合成气	303
9.2.3 天然气联合转化制合成气	305
9.2.4 天然气制合成气工艺进展	306
9.2.5 合成气的利用	307
9.3 天然气制乙炔	311
9.3.1 乙炔的性质	311
9.3.2 天然气制乙炔的原理	311
9.3.3 天然气制乙炔的生产工艺	312
9.3.4 乙炔的利用	315
9.4 天然气制氢氰酸	317
9.4.1 氢氰酸的工业合成法	317
9.4.2 氢氰酸的利用	320
9.5 天然气制氯甲烷	320
9.5.1 甲烷热氯化反应机理及产物分布	320
9.5.2 甲烷热氯化生产氯甲烷的工艺	321
9.5.3 天然气制氯甲烷的其他工艺	322
9.5.4 氯甲烷的利用	323
9.6 天然气制硝基甲烷、二硫化碳	323
9.6.1 硝基甲烷	323
9.6.2 二硫化碳	324
9.7 天然气直接化工利用新技术的研究开发	326
9.7.1 甲烷氧化偶联制乙烯	326
9.7.2 甲烷直接制甲醇	327
9.7.3 甲烷直接转化制芳烃	328
参考文献	329

1 概 论

1.1 天然气组成与分类

广义的天然气是指在自然界中天然生成的气体化合物。就能源意义而言,天然气也就是气态的石油,是专指在岩石圈中生成并蕴藏于其中的以气态烷烃混合物为主的可燃性气体。从组成意义来讲,天然气包括传统意义上的常规天然气、非常规天然气(天然气水合物)、煤层气等。本书所指的天然气就是能源意义上的天然气。

天然气是洁净、方便、高效的优质能源,也是优良的化工原料,与煤、石油并称世界一次能源的三大支柱,在能源结构中占有重要的地位。

1.1.1 天然气的组成

1.1.1.1 天然气的化学组成

天然气是由以低分子饱和烃为主的烃类气体与少量非烃类气体组成的混合气体。在其组成中,甲烷(CH_4)占有绝大部分,乙烷(C_2H_6)、丁烷(C_4H_{10})和戊烷(C_5H_{12})含量不多,庚烷以上(C_7+)的烷烃含量极少。另外,天然气中还含有少量非烃类气体,如硫化氢(H_2S)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、氮气(N_2)、氢气(H_2)和水汽(H_2O),以及硫醇(RSH)^①、硫醚(RSR')、二硫化碳(CS_2)、羰基硫(或硫化羰)(COS)、噻吩($\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$)等有机硫化物,有时也含有微量的稀有气体,如氦气(He)、氩气(Ar)等。在大多数天然气中存在痕量的不饱和烃,如乙烯(C_2H_4)、丙烯(C_3H_6)、丁烯(C_4H_8),偶尔也含有极少量的环状烃化合物——环烷烃和芳烃,如环戊烷、环己烷、苯、甲苯、二甲苯等。

1.1.1.2 天然气组成的矿藏依赖性

天然气的化学组成多达100多种,各气田的天然气组成各不相同。实践表明,天然气由于生成的地质条件不同,不同地区、不同储集层深度,其组成不相同。同一口井不同层位,天然气组成不尽相同;同一储集层,不同井口采出的天然气组成也可能不相同,而且随着储量的递减,甚至随着气象条件的变化,天然气组成也发生改变。这就是天然气组成的矿藏依赖性。

1.1.2 天然气的分类

国内有学者从地质勘探角度根据国内所产天然气气体中硫化氢的含量提出了不同标准的天然气分类方案。

1989年戴金星院士提出微含硫化氢型气($<0.5\%$)、低含硫化氢型气($0.5\%\sim 2\%$)、高含硫化氢型气($2\%\sim 70\%$)、硫化氢型气($>70\%$)。

① R代表烷基基团。

湛继红等人提出含硫气藏 (2%~5%)、高含硫气藏 (5%~20%)、特高含硫气藏 (20%~80%)、“纯”硫化氢气藏 (>80%)。

王鸣华等学者根据国外和我国四川气田天然气含硫化氢的实际情况,提出无硫气(或甜气, <0.0014%)、酸气^① (0.0014%~0.3%)、含硫气 (0.3%~1.0%)、中含硫气 (1.0%~5.0%)、高含硫气 (>5.0%)。

从天然气净化与处理角度出发,天然气的分类依据不同的原则有三种方式,即按矿藏特点分类、按烃类组成分类和按酸气含量分类。

1.1.2.1 按矿藏特点分类

天然气按矿藏特点的不同可分为气井气、凝析井气和油田气,前两者合称非伴生气。

(1) 气井气,即纯气田天然气,气藏中的天然气以气相存在,通过气井开采出来。这类气体中甲烷含量高,属于干气。

(2) 凝析井气,即凝析气田天然气,在气藏中以气相存在,其凝析液主要是凝析油,可能还有部分被凝析的水。这类气田井口流出物中除含有甲烷、乙烷外,还含有一定量的丙烷、丁烷及 C₅ 以上的烃类。

(3) 油田气,即油田伴生气,它是与原油共生,在油藏中与原油呈相平衡接触的气体,包括游离气(气层气)和溶解在原油中的溶解气两种,从组成上讲属于湿气。在开采过程中一般借助气层气保持井压,而溶解气伴随原油采出。油田气采出的特点是:组成和气油比(一般为 20~500m³/t)因油田和开采条件而异,一般富含丁烷以上组分;不能按需求量来开采,总是随原油的开采而以一定的气油比采出。20 世纪 70 年代以前我国的油田气利用不够充分和合理,多以“点天灯”的形式(火炬燃烧)而浪费掉。20 世纪 80 年代以来,随着科技的进步和节能降耗的开展,各油田都采取了适宜的工艺路线对油田气进行回收利用,提高了经济效益和资源的利用效率。

1.1.2.2 按烃类组成分类

按烃类组成即按天然气中液烃含量的多少来分类,天然气可分为干气、湿气和贫气、富气。

1. C₅ 界定法——干气与湿气的划分

C₅ 界定法针对天然气中 C₅ 以上烃类的含量多少将其划分为干气和湿气。

(1) 干气,指 1m³ (CHN)^② 井口流出物中, C₅ 以上烃类含量低于 13.5cm³ 的天然气。

(2) 湿气,指 1m³ (CHN) 井口流出物中, C₅ 以上烃类含量高于 13.5cm³ 的天然气。

2. C₃ 界定法——贫气与富气的划分

C₃ 界定法针对天然气中 C₃ 以上烃类的含量多少将其划分为贫气和富气。

(1) 贫气,指 1m³ (CHN) 井口流出物中, C₃ 以上烃类含量低于 94cm³ 的天然气。

(2) 富气,指 1m³ (CHN) 井口流出物中, C₃ 以上烃类含量高于 94cm³ 的天然气。

《气体加工工程数据手册》对贫气的定义包括:一是指天然气加工装置中回收了天然气液体之后的残气,二是指几乎不含或无可回收天然气液体的未加工气体。而富气指适合用作天然气加工厂的原料并从中提取产品的气体。这与前述的定义无原则上区别。干气和湿气

① 低含硫气或含相当量的二氧化碳时,统称酸气。

② m³ (CHN): 基准立方米, 基方, 在我国使用的压力和温度的标准参比条件 (压力为 101.325kPa, 温度为 20℃) 下计量的气体立方米数。

在该文献中包括两方面的内容，一是针对天然气是否含有水分来划分干、湿气，二是与贫、富气的划分相类似，这一点在阅读相关外文期刊时要特别注意。

1.1.2.3 按酸气含量分类

按酸气（CO₂ 和硫化物）含量多少，天然气可分为酸性天然气和洁气。

酸性天然气是指含有显著量的硫化物和 CO₂ 等酸性气体，必须经处理后才能达到管输标准或商品气气质指标的天然气。洁气是指硫化物和 CO₂ 含量甚微或根本不含，不需净化就可外输或利用的天然气。

从以上叙述可见，酸性天然气和洁气的划分采取了模糊的判据，而具体的数值指标并无统一的标准。在我国，由于对 CO₂ 的净化处理要求不严格，因而一般采用 GB 17820—1999 规定的天然气技术指标中的二类标准即硫含量不高于 20mg/m³（CHN）作为界定指标，把含硫量高于 20mg/m³（CHN）的天然气称为酸性天然气。

经过脱硫处理后的天然气称为脱硫天然气，经过脱硫和脱水处理后的天然气称为净化天然气，简称净化气。

1.2 天然气及其有关组分的主要物性参数

1.2.1 天然气中常见组分的主要物理性质

天然气的组成是比较复杂的，本书列出了天然气中常见组分的主要物理性质，如表 1-1 所示。

1.2.2 天然气的视相对分子质量与相对密度

天然气是由多种气体组成的混合气且其组分和组成无定值，为了工程计算的需要，将标准状态下 1mol 天然气的质量定义为天然气的视相对分子质量或平均相对分子质量。根据 Key 混合规则，用公式表示为：

$$M_g = \sum y_i M_i \quad (1-1)$$

式中 M_g ——天然气的视相对分子质量；

y_i —— i 组分的摩尔分数；

M_i —— i 组分的相对分子质量。

显然，天然气的视相对分子质量取决于天然气的组成。各气田的天然气组成不同，视相对分子质量也就不同。一般干气的视相对分子质量为 16.82~17.98。

在标准状态下，天然气的密度与干燥空气的密度之比称为相对密度，即：

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{air}}} \quad (1-2)$$

式中 γ_g ——天然气的相对密度；

ρ_g ——天然气的密度，kg/m³；

ρ_{air} ——干燥空气的密度，kg/m³。

天然气的相对密度变化较大，这与天然气的视相对分子质量不尽相同是一致的。对于干气，其相对密度一般为 0.58~0.62，通常用实验方法确定。

表 1-1 天然气中常见组分的主要物理性质

序号	化合物	分子式	A 相对分子质量	B 沸点,℃ (101.325kPa)	C 蒸气压,kPa (40℃)	凝固点,℃ (101.325kPa)	D 折射率 (15℃)	临界常数		
								压力,kPa	温度,K	比容,m ³ /kg
1	甲烷	CH ₄	16.043	-161.51	(35000)	-182.45	1.00040	4599	190.56	0.00617
2	乙烷	C ₂ H ₆	30.070	-88.59	6000	-182.79	1.21403	4880	305.41	0.00489
3	丙烷	C ₃ H ₈	44.097	-42.07	1369.8	-187.62	1.29558	4240	369.77	0.00454
4	异丁烷	i-C ₄ H ₁₀	58.123	-11.79	530.89	-159.59	1.3251	3640	407.82	0.00446
5	正丁烷	n-C ₄ H ₁₀	58.123	-0.51	379.61	-138.35	1.33631	3784	425.10	0.00439
6	异戊烷	i-C ₅ H ₁₂	72.150	27.83	151.31	-159.89	1.35658	3381	460.35	0.00427
7	正戊烷	n-C ₅ H ₁₂	72.150	36.05	114.70	-129.71	1.36024	3365	469.65	0.00434
8	正己烷	C ₆ H ₁₄	86.177	68.72	37.297	-95.31	1.37746	3030	506.4	0.00429
9	正庚烷	C ₇ H ₁₆	100.24	98.37	12.342	-90.55	1.39017	2740	539.2	0.00426
10	正辛烷	C ₈ H ₁₈	114.231	125.65	4.146	-56.76	1.39981	2490	568.4	0.00420
11	正壬烷	C ₉ H ₂₀	128.258	150.78	1.358	-53.48	1.40773	2280	594.7	0.00433
12	正癸烷	C ₁₀ H ₂₂	142.285	174.11	0.4814	-29.63	1.41411	2100	617.7	0.00439
13	二氧化碳	CO ₂	44.010	-78.464	—	-56.56	1.00049	7374	304.11	0.00214
14	硫化氢	H ₂ S	34.082	-60.266	2859.7	-85.48	1.00061	8963	373.37	0.00288
15	氮气	N ₂	28.0134	-195.798	—	-209.997	1.00028	3398	126.21	0.00318
16	氨气	NH ₃	17.0305	-33.32	1555	-77.69	1.00036	11350	405.5	0.00425
17	空气	N ₂ +O ₂	28.9625	-194.34	—	—	1.00028	3771	132.43	0.00323
18	水	H ₂ O	18.0153	99.974	7.3849	0.000	1.33347	22064	647.10	0.003106
19	氢气	H ₂	2.0159	-252.850	—	-259.347	1.00013	1293	33.0	0.03185
20	一氧化碳	CO	28.010	-191.45	—	-204.99	1.00036	3494	132.86	0.00329
21	二氧化硫	SO ₂	64.065	-9.94	630.2	-75.47	1.00062	7884	430.8	0.00190
22	氧气	O ₂	31.9988	-182.954	—	-218.792	1.00027	5043	154.59	0.00299

序号	化合物	E			F	G	H	I			J	
		液体密度 (101.325kPa, 15℃)						理想气体 (101.325kPa, 15℃)	理想气体			
		相对密度 (15℃/15℃)	kg/m ³	m ³ /kmol					相对密度 (空气为1)	m ³ (气体)/kg		气体与液体 体积比
					密度/温度 系数 1/T	偏心因子 ω	真实气体的 压缩因子 (101.325kPa, 15℃)				比热容, kJ/(kg·K) (15℃, 101.325kPa)	
1	甲烷	0.3	300	0.05	—	0.0108	0.9980	0.55392	1.4738	442.15	2.2040	—
2	乙烷	0.35808	357.76	0.084051	—	0.0972	0.9918	1.0382	0.78635	281.32	1.7053	4.0283
3	丙烷	0.50776	507.30	0.086925	-0.00303	0.1515	0.9824	1.5226	0.53619	272.01	1.6242	2.5918
4	异丁烷	0.56349	562.98	0.10324	-0.00220	0.1852	0.9709	2.0068	0.40680	229.02	1.6164	2.3879
5	正丁烷	0.58459	584.06	0.099515	-0.00197	0.1981	0.9664	2.0068	0.40680	237.60	1.6514	2.3949
6	异戊烷	0.62491	624.35	0.11556	-0.00162	0.2286	—	2.4912	0.32772	204.61	1.6071	2.2301
7	正戊烷	0.63157	631.00	0.11434	-0.00161	0.2510	—	2.4912	0.32772	206.79	1.6233	2.2737
8	正己烷	0.66449	663.89	0.12981	-0.00136	0.2990	0.9881	2.9755	0.27438	182.15	1.6151	2.2306
9	正庚烷	0.68846	687.84	0.14568	-0.00122	0.3483	0.9948	3.4598	0.23597	162.30	1.6074	2.2087
10	正辛烷	0.70718	706.54	0.16168	-0.00115	0.3978	0.9977	3.9441	0.20699	146.25	1.6026	2.1923
11	正壬烷	0.72231	721.66	0.17773	-0.00110	0.4425	0.9990	4.4284	0.18436	133.04	1.5990	2.1855
12	正癸烷	0.73452	733.86	0.19389	-0.00102	0.4881	0.9996	4.9127	0.16618	121.95	1.5962	2.1797
13	二氧化碳	0.82268	821.94	0.053544	-0.01049	0.2667	0.9964	1.5196	0.53726	441.59	0.83294	—
14	硫化氢	0.80262	801.90	0.042499	-0.00283	0.0948	0.9845	1.1767	0.69382	556.37	0.99794	2.1098
15	氮气	0.80933	808.60	0.034644	—	0.0370	0.9997	0.96723	0.84402	982.48	1.0395	—
16	氨气	0.61826	617.70	0.027571	—	0.2558	0.9876	0.58802	1.3884	857.61	2.0971	4.6931
17	空气	0.87469	873.90	0.033142	—	—	0.9996	1.0000	0.81639	713.45	1.0040	—
18	水	1.0000	999.10	0.018032	-0.00023	0.3445	—	0.62202	1.3125	1311.3	1.8617	4.1863
19	氢气	0.071064	71.000	0.028393	—	-0.2216	1.0006	0.06960	1.729	832.78	14.261	—
20	一氧化碳	0.78931	788.60	0.035519	—	0.0477	0.9996	0.9671	0.84417	665.71	1.0403	—
21	二氧化硫	1.3973	1396.0	0.045892	—	0.2548	0.9801	2.2120	0.36907	515.22	0.61942	1.3589
22	氧气	1.1420	1141.0	0.028045	—	0.0216	0.9992	1.1048	0.73893	843.12	0.91673	—

续表

序号	化合物	K					L	M	燃烧极限空气混合物中的 体积分数, %		ASTM 辛烷值	
		热值, 15℃							下限	上限	动力法 D- 357	研究法 D- 908
		净热值		总热值								
		MJ/m ³ (GPA)● (理想气体)	MJ/kg (液体)	MJ/m ³ (GPA) (101. 325kPa, 理想气体)	MJ/kg (液体)	MJ/m ³ (GPA) (液体)						
1	甲烷	33. 949	—	37. 708	—	—	510. 44	9. 548	5. 0	15. 0	—	—
2	乙烷	60. 429	47. 162	66. 065	51. 595	18459	488. 86	16. 710	2. 9	13. 0	+0. 05	+1. 6
3	丙烷	86. 418	45. 955	93. 936	49. 986	25358	431. 78	23. 871	2. 0	9. 5	97. 1	+1. 8
4	异丁烷	112. 007	45. 210	121. 406	49. 032	27604	366. 46	31. 032	1. 8	8. 5	97. 6	+0. 1
5	正丁烷	112. 396	45. 342	121. 794	49. 164	28715	386. 08	31. 032	1. 5	9. 0	89. 6	93. 8
6	异戊烷	138. 087	44. 899	149. 363	48. 594	30340	342. 20	38. 193	1. 3	8. 0	90. 3	92. 3
7	正戊烷	138. 380	44. 973	149. 656	48. 668	30710	357. 45	38. 193	1. 4	8. 3	62. 6	61. 7
8	正己烷	164. 399	44. 735	177. 550	48. 342	32094	334. 78	45. 355	1. 1	7. 7	26. 0	24. 8
9	正庚烷	190. 389	44. 555	205. 424	48. 102	33087	317. 05	52. 516	1. 0	7. 0	—	—
10	正辛烷	216. 373	44. 418	233. 284	47. 919	33857	301. 23	59. 677	0. 8	6. 5	—	—
11	正壬烷	242. 399	44. 319	261. 191	47. 784	34484	289. 26	66. 839	0. 7	5. 6	—	—
12	正癸烷	268. 393	44. 234	289. 067	47. 669	34983	278. 31	74. 000	0. 7	5. 4	—	—
13	二氧化碳	0. 0	—	0. 0	—	—	573. 28	—	—	—	—	—
14	硫化氢	21. 905	14. 772	23. 784	16. 043	12865	548. 08	7. 161	4. 30	45. 50	—	—
15	氮气	0. 0	—	0. 0	—	—	199. 08	—	—	—	—	—
16	氩	13. 401	—	16. 220	—	—	1371. 07	3. 581	15. 50	27. 00	—	—
17	空气	0. 0	—	0. 0	—	—	205. 16	—	—	—	—	—
18	水	—	—	1. 8792	0. 0	0. 0	2256. 64	—	—	—	—	—
19	氢	10. 223	—	12. 102	—	—	441. 99	2. 387	4. 00	74. 20	—	—
20	一氧化碳	11. 965	—	11. 964	—	—	215. 78	2. 387	12. 50	74. 20	—	—
21	二氧化硫	0. 0	—	0. 0	—	—	389. 29	—	—	—	—	—
22	氧	0. 0	—	0. 0	—	—	213. 03	—	—	—	—	—

注:表中提到的压力均为绝对压力。

●m³(GPA),标准立方米,标方,在北美地区等使用的压力和温度的标准参比条件(压力为 101.325kPa,温度为 15℃)下计量的气体立方米数。

1.2.3 天然气中主要组分的蒸气压

轻烃在高温下的蒸气压如图 1-1 所示，轻烃在低温下的蒸气压如图 1-2 所示。

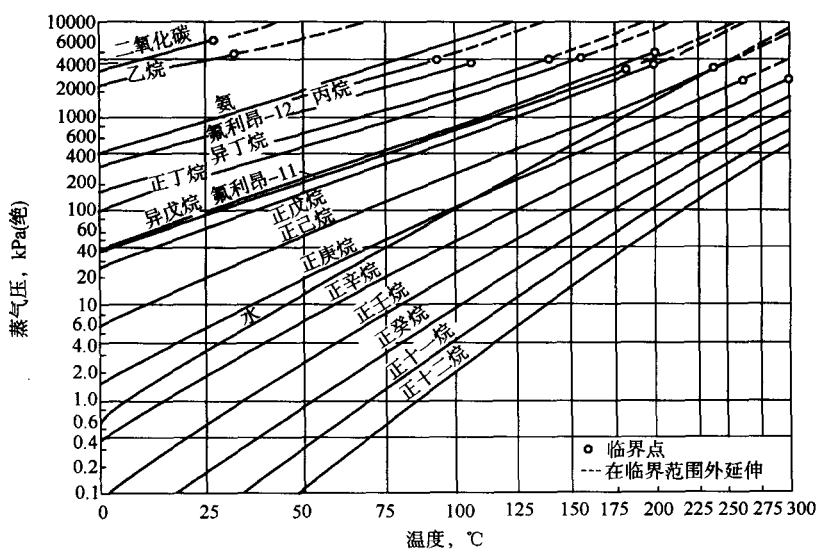


图 1-1 轻烃在高温下的蒸气压

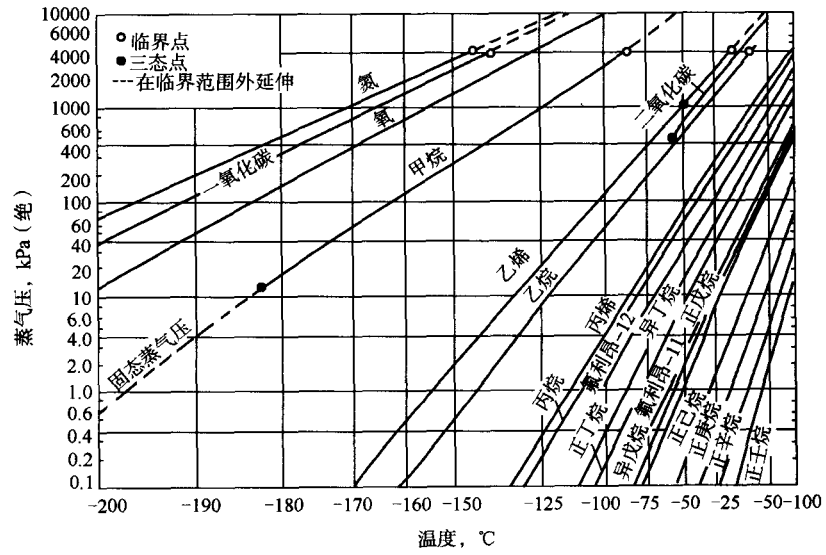


图 1-2 轻烃在低温下的蒸气压

1.2.4 天然气中主要组分的汽化热

甲烷的汽化热如图 1-3 所示，轻烃的汽化热如图 1-4 所示。

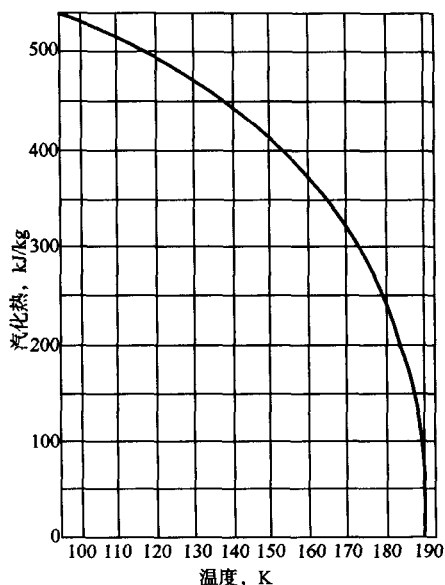


图 1-3 甲烷的汽化热

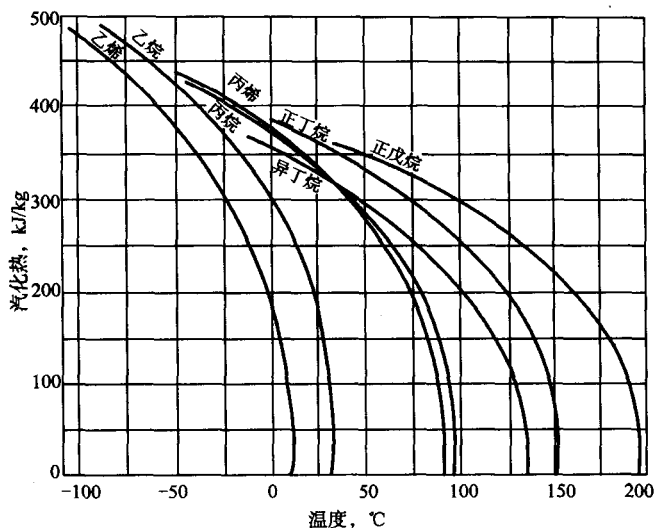


图 1-4 轻烃的汽化热

1.2.5 天然气的比定压热容

在不发生相变和化学变化的条件下，加热单位质量的某物质时，温度升高 1°C 所吸收的热量即为该物质的比定压热容。它是计算显热的基础热数据，在传热过程计算中会经常用到。

天然气的比定压热容可由各组分的比定压热容经加和求得，即：

$$c_p = \sum_i y_i c_{pi} \quad (1-3)$$

式中 c_p ——天然气的比定压热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

c_{pi} —— i 组分的比定压热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

y_i —— i 组分的摩尔分数。

若已知天然气的相对密度，也可由式 (1-4) 计算比定压热容：

$$c_p = \frac{0.403}{\sqrt{\gamma_g}} (1 + 0.001t) \quad (1-4)$$

式中 c_p ——天然气在常压下的比定压热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

γ_g ——天然气的相对密度；

t ——天然气的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.6 天然气的焓

焓是物质的状态参数，其变化与过程的性质无关，只取决于物质的初状态和终状态。焓随温度和压力而变化，理想气体的焓只与温度有关。在工程计算中，一般用焓变计算物质加热或冷却时热量的变化。

1.2.6.1 理想气体状态下焓的计算

天然气中常见组分在理想气体状态下的焓 H° ，如图 1-5 和图 1-6 所示，此外，式 (1-5) 是理想气体状态下焓的多项式计算式：