



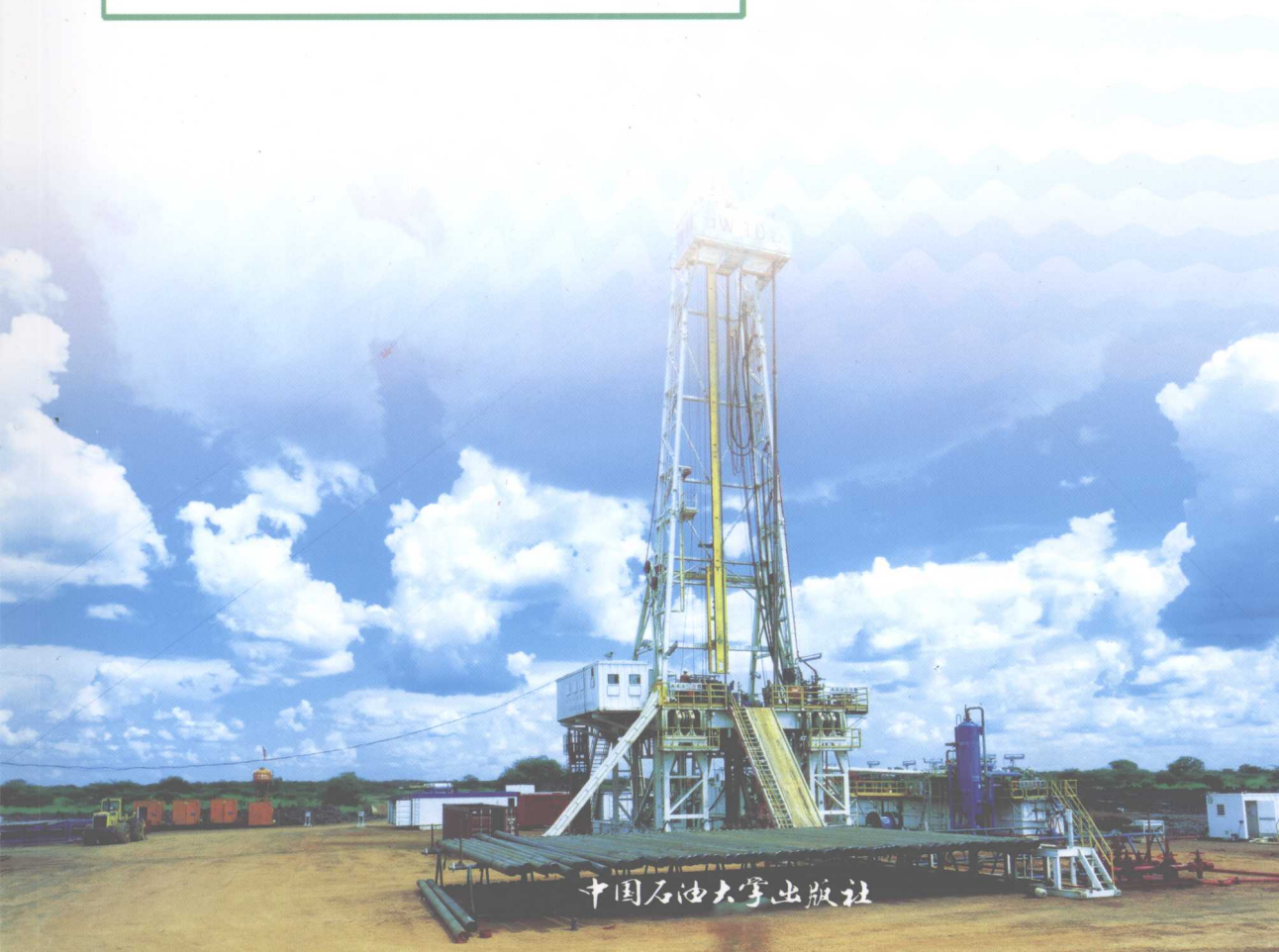
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

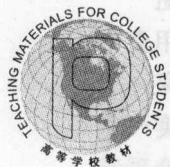
天然气开采· 工程基础

TIAN RAN QI KAI CAI GONG CHENG JI CHU

陈德春 主编



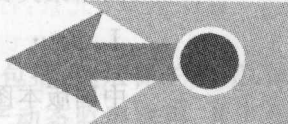
中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

预测采气工程方案的技术经济效果,涉及气田基本建设投资、固定资产折旧、以及投资回收期、内部收益率等多项指标。... 法,结合气... 即基础开采产天然气成本等多... 进行分析与评价,并对影响采气工程方案经济... 进行敏感... 这是气藏开发经济评价指标的组成内容和优化方案的重要... 1. 费用... 用成本基一采开产然天。III ... II ... 采气工程方案经济分析所涉及的开发生产费用主要... 费用,增产措施费用,采气工艺及配套技术费用,气井生产... 费用,增产措施费用,采气工艺及配套技术费用,气井生产...



天然气开采工程基础

习题与思考题

这是采气工程方案的基本构成。

陈德春 主编

林峰(主编) 李大国(副主编)
天然气开采工程基础
陈德春: 著

责任编辑: 高... 0216-8333304
封面设计: 尤... 天... 封

出版: 中国石油大学出版社(山东东营 邮编 257061)
网 址: <http://www.upbook.com.cn>

电子邮箱: shiyongyuan@126.com
青 岛 青 岛 青 岛 青 岛
青 岛 青 岛 青 岛 青 岛
青 岛 青 岛 青 岛 青 岛

发行: 中国石油大学出版社(电话 0216-8333301, 8333263)
本 开 180×232 印张: 10.22 字 数: 215千字

2007年12月第1版第1次印刷
中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

天然气开采工程基础/陈德春主编. —东营:中国石油
大学出版社,2007.10

ISBN 978-7-5636-2307-5

I. 天… II. 陈… III. 天然气开采—基本知识 IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 153720 号



天然气开采工程基础

陈德春 著

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 天然气开采工程基础

作 者: 陈德春

责任编辑: 高 颖(电话 0546—8393394)

封面设计: 九天设计

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 青岛海讯科技有限公司

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791,8392563)

开 本: 180×235 印张: 10.25 字数: 217 千字

版 次: 2007 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 15.00 元

前 言

Foreword

本书是根据石油工程专业培养方案和教学计划的要求,结合石油高等工程教育改革的需要而编写的,是供石油工程专业学生使用的采气工程课程教材。

本书以油藏工程和采油工程的知识背景为基础,以天然气开采工艺过程为主线,系统地介绍了天然气开采工程的基本原理、工艺技术和设计计算方法。全书共分8章,内容包括:天然气基础知识、气井完井、气井产能分析、气井生产系统分析、排水采气工艺、气井井场工艺、气井增产措施和采气工程方案设计等。授课教师使用时可根据教学的具体要求进行取舍。

本书由中国石油大学(华东)石油工程学院陈德春主编,张琪教授审阅,孟红霞、张红玲参加了编写工作。由于编者的经验和水平有限,书中不当之处敬请广大读者指正。

编 者

2007年7月

目 录

Contents

| | |
|--------------------------|------|
| 绪 论 | (1) |
| 第一章 天然气基础知识 | (4) |
| 第一节 天然气的组成和分类 | (4) |
| 第二节 天然气的理化性质 | (6) |
| 习题与思考题 | (12) |
| 第二章 气井完井 | (14) |
| 第一节 气井完井方法 | (14) |
| 第二节 气层保护技术 | (18) |
| 第三节 气井完井测试 | (24) |
| 习题与思考题 | (27) |
| 第三章 气井产能分析 | (28) |
| 第一节 稳定状态流动的气井产能公式 | (28) |
| 第二节 拟稳定状态流动的气井产能公式 | (33) |
| 第三节 气井产能经验方程 | (37) |
| 第四节 完井方式对气流入井动态的影响 | (38) |
| 习题与思考题 | (41) |
| 第四章 气井生产系统分析 | (42) |
| 第一节 气体井筒稳定流动能量方程 | (42) |
| 第二节 气体通过气嘴的流动 | (45) |
| 第三节 气井节点系统分析 | (47) |
| 习题与思考题 | (51) |
| 第五章 排水采气工艺 | (52) |
| 第一节 优选管柱排水采气 | (53) |
| 第二节 泡沫排水采气 | (63) |
| 第三节 气举排水采气 | (66) |
| 第四节 常规有杆泵排水采气 | (72) |
| 第五节 电潜泵排水采气 | (77) |



| | | |
|-------------|------------------------------|--------------|
| 第六节 | 射流泵排水采气 | (80) |
| | 习题与思考题 | (84) |
| 第六章 | 气井井场工艺 | (85) |
| 第一节 | 采气流程 | (85) |
| 第二节 | 天然气的计量 | (89) |
| 第三节 | 气液(固)分离 | (91) |
| 第四节 | 天然气脱水工艺 | (102) |
| 第五节 | 天然气脱硫工艺 | (109) |
| 第六节 | 天然气轻烃回收工艺 | (113) |
| | 习题与思考题 | (114) |
| 第七章 | 气井增产措施 | (116) |
| 第一节 | 气井的酸化 | (116) |
| 第二节 | 气井的压裂 | (124) |
| 第三节 | 储层评价及施工合理性研究 | (144) |
| | 习题与思考题 | (148) |
| 第八章 | 采气工程方案设计 | (149) |
| 第一节 | 采气工程方案设计的任务和特点 | (149) |
| 第二节 | 采气工程方案设计的前期工作 | (150) |
| 第三节 | 采气工程方案设计的主要内容及主体工艺分析论证 | (151) |
| 第四节 | 采气工程方案设计程序 | (152) |
| | 习题与思考题 | (157) |
| 参考文献 | | (158) |



绪 论

采气工程是天然气开采过程中气井完井、试井及生产测试、增产措施、天然气生产、井下作业与修井、地面集输与处理等工艺技术和采气工程方案设计的总称,是天然气开发与开采工程中一个占有主导地位的系统工程,对天然气气藏高效开发具有举足轻重的作用。

一、天然气工业的发展趋势

20世纪80年代以来,世界天然气工业发展迅速。天然气在世界一次能源构成中所占份额已从20世纪50年代初的9.7%上升到20世纪末的23.8%。天然气自然资源比石油更为丰富,估计天然气全球最终资源量为 $283 \times 10^{12} \text{ m}^3$,2010年以前全球天然气产量高峰可达 $3.4 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$ 。专家们普遍预测,21世纪中叶将是以天然气为主的能源时代。

中国天然气资源主要分布在中、西部地区 and 近海,80%以上集中分布在四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、准噶尔、松辽等盆地及东南海域。2000年底,根据最新数据重新测算,中国天然气地质资源量为 $47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量约为 $9.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。中国未曾评价的沉积岩的可采资源量约为 $5.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,由此可推测中国远景天然气可采资源总量可达 $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。另外,中国尚有丰富的非常规天然气资源量,如煤层气、水合物气、无机气和高压水溶气等。但是,中国天然气资源探明程度低,至1999年底共探明气层气储量为 $2.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$,加上溶解气储量,合计探明储量为 $3.11 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明程度仅为地质资源量的6.62%。

20世纪90年代以来,我国天然气的地质储量和产量明显增长,分别从1990年的 $7\,044.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $152.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至2003年的 $38\,735.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $341 \times 10^8 \text{ m}^3$,输气管线建设和利用市场不断扩大。2005年,中国天然气产量达 $499.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。按照国际产气大国的标准,我国正在从贫气国走向产气大国。

二、采气工程的主要任务

- (1) 针对气藏的地质特征和储层特点,编制气田开发的采气工程方案,对气藏实施高效、高采收率的开发;
- (2) 研究、发展适合气藏特点的采气工程工艺技术,并配套形成生产能力;
- (3) 对气井进行生产系统分析,优化采气工艺方式,提高气井的采气速度;



- (4) 推广、应用各种新技术、新装备,解决气田开发中的工程技术问题;
- (5) 研究、制定、完善采气工程方面的有关标准、规程、规范,使采气工程技术、施工操作有章可循,实现标准化、规范化作业,确保安全生产。

三、采气工程的主要特点

充分认识采气工程的特点是发展采气工程技术的前提和依据。我国的采气工程技术的基本特点如下:

1. 地质和储层的特殊性

天然气勘探成果表明,我国天然气气藏具有一定的特殊性:地质年代较老,埋藏较深;大多属于中低渗透储层,其中低渗透和特低渗透储层占有相当大的比例;驱动类型以弱弹性水驱为主;气田规模一般较小。这就决定了我国天然气开发的复杂性和分散性,所以必须具有较高的采气工艺技术。

2. 气藏产水危害的严重性

气藏产水后,水、气在渗流通道和自喷管柱内形成两相流动,增大了气藏和气井的能量损失,降低了气相渗透率,并分割气藏形成死气区,使气藏的采气速度和一次开采的采收率降低。有相当大一部分储量需要依靠二次开采的排水工艺技术才能开采出来。

3. 流体的高腐蚀性

在气藏中,不仅地层水的矿化度高,而且天然气中还含有硫化氢、二氧化碳等高腐蚀性的酸性气体,可能严重危及人、畜的安全,严重腐蚀气井的设备和管线,随时威胁气井的生产,从而给采气工程作业及配套设备提出了比采油工程更为苛刻的要求。

4. 天然气的可爆性和高压的危险性

天然气气藏一般具有较高的压力,特别是一些深层天然气气藏,常形成某些高压和超高压层段。另外,天然气又是一种易燃、易爆性气体,密度小,具有较大的可压缩性和膨胀性,使气井井口压力远远高于相同井深和井底压力的油井井口压力。因此,对气井井下工艺作业的防火、防爆措施要求更为严格。

四、采气工程的技术发展

我国的采气工程技术取得了举世瞩目的迅速发展。

20世纪60年代以前,我国最大的天然气生产基地四川气田还处于气井压力相对较高的开采初期和无水采气阶段,采气工程的主要内容是相对较简单的气井试井、地面集输、气井管理和酸化原理、酸液配方、现场施工技术的探索等。

20世纪60—70年代,我国采气工程有了新的进步,气体稳定流动能量方程开始在气井生产系统分析中应用,天然气脱硫、脱水等工艺技术基本成熟,常规解堵酸化的装备和工艺技术已基本解决。

20世纪70年代后期,特别是20世纪80年代以来,在气井的完井保护气层方面,从



储层评价方法、完井液研究、完井方式研究、固井及水泥添加剂研究、高效射孔到增产措施等方面的技术,都取得了重要成果。在气井增产工艺技术方面,针对低渗透储层改造,在“常规解堵酸化”的基础上发展了“前置液压裂酸化”、“胶凝酸压裂酸化”、“降阻酸压裂酸化”、“泡沫酸压裂酸化”、“堵塞球压裂酸化”、“封隔器分层压裂酸化”等6项压裂酸化工艺技术。针对产水气藏,发展了二次开采的排水采气工艺技术。针对低压气开采,发展了以高低压分输、天然气喷射器和压缩机增压输送的采、集、输配套工艺技术。

20世纪90年代,我国的天然气年产量突破了 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。不仅在四川发现了一些新气田,而且在陕甘宁盆地、南海北部大陆架都发现了新的大中型气田,在新疆的塔里木、准噶尔、吐哈三大盆地和青海也不断发现和钻获高压气井。另外,在我国的东部地区,天然气勘探也有了新的发现。与此同时,开展了采气工程方案的设计与编制,使采气工程方案逐步成为气田开发总体建设方案设计的重要组成部分和核心。所有这些都表明了天然气开采技术已经进入了大发展的新时期。

五、采气工程师的主要职责

从我国开发气藏的总体地质特点和储层特性出发,采气工程师主要肩负着3项重要任务:

(1) 在具体气藏条件下,根据气藏工程总体部署方案的要求,确定钻井类型、气层保护技术、完井方法、套管程序和开采方式,以确保气藏的储量被最大限度地控制和动用;

(2) 从气井投入开发到枯竭的整个阶段,要以最经济、最有效的方式,在井筒建立合理的采气生产压差,以获得较长的无水采气期和带水生产自喷期、较高的采气速度和气田开发的最高采收率,这是采气工程技术的核心;

(3) 要以最低的消耗完成产出天然气的采、集、输和气水分离、净化回收,为用户提供合格的商品天然气。

因此,采气工程师只有以适应气藏地质特点和储层要求的气藏工程研究成果为基础,才能指导解决气田开采中出现的各种问题;只有针对气藏的地质特点和储层特性,并以气藏工程研究成果为指导,才能充分了解气井生产系统现状,较好地预测气井生产系统的未来动态,编制好气田开发的采气工程方案,研究、发展适合于中国气藏特点的采气工程技术,提高气田开采的综合经济效益。



第一章 天然气基础知识

广义的天然气包括可燃的烃类气体、二氧化碳、硫化氢、氦气等可从地壳中取得的气体资源。一般所指的或狭义的天然气仅指烃气。根据 ISO 标准(ISO 14532 天然气·词汇, 2001), 天然气是指以甲烷为主的复杂烃类混合物, 通常也含很少量的乙烷、丙烷和更重的烃类, 以及若干不可燃气体, 如氮气和二氧化碳等。众多国际权威机构和专家预言, 21 世纪中期将进入天然气时代。

第一节 天然气的组成和分类

一、天然气的组成

天然气的主要成分为甲烷和少量乙烷、丙烷、丁烷、戊烷及以上烃类气体, 并可能含有氮气、氢气、二氧化碳、硫化氢、水蒸气等非烃类气体及少量氦气、氩气等惰性气体。在石油工业范围内, 天然气通常是指从气田采出的气及在油田采油过程同时采出的伴生气。

(1) 甲烷: 天然气的主要组成部分, 在天然气混合物中所占比例变化范围广。根据油气藏类型的不同, 甲烷所占比例为 29.0%~99.9%(体积分数)。甲烷在气藏中所占比例约为 80.0%~99.9%(体积分数), 在凝析气藏中约为 75.0%~94.4%(体积分数), 在油藏伴生气中约为 20.0%~97.0%(体积分数)。纯甲烷无色、稍有蒜味, 比空气轻, 在标准压力和 15℃ 条件下, 1 m³ 甲烷的质量为 0.667 kg。甲烷具有高的热稳定性和很高的热值含量。在我国工程计算中采用的地面标准压力和温度分别为 0.101 3 MPa 和 20℃, 物理标准则为 760 mmHg 和 0℃。

(2) 乙烷: 无色气体, 比空气稍重, 在标准压力和 15℃ 下, 1 m³ 乙烷的质量为 1.270 kg。它的热值介于 60 345~65 946 kJ/m³ 之间。在 20℃ 时, 加压至 3.8 MPa 以上, 乙烷可液化成相对密度为 0.446 的液体。在天然气混合物中, 乙烷的含量为 0.05%~25%(体积分数)。

(3) 丙烷: 无色气体, 比空气重, 在标准压力和 15℃ 下, 1 m³ 丙烷的质量为 1.965 9 kg。当温度在 20℃ 且压力在 0.85 MPa 以上时, 丙烷呈液态。丙烷的热值介于 86 420.9~93 888.9 kJ/m³ 之间。在天然气混合物中, 丙烷的含量为 0.005%~4.0%(体积分数)。

(4) 正丁烷: 相对密度比空气的大 1 倍, 在标准压力和 15℃ 下, 1 m³ 正丁烷的质量为



2.454 kg。在标准压力下,当温度高于 0.6°C 时,纯正丁烷才呈气态。当温度为 15°C 且压力为 0.18 MPa 时,正丁烷呈密度为 582 kg/m^3 的液体。在天然气混合物中,正丁烷的含量为 $0.001\%\sim 2.0\%$ (体积分数)。

(5) 异丁烷:是正丁烷的同分异构体,其物理性质与正丁烷不同。在标准压力下,当温度高于 -11°C 时,异丁烷呈气态,只有当温度更低时才呈液态。丁烷的热值介于 $112\ 294\sim 121\ 685\text{ kJ/m}^3$ 之间。

(6) 戊烷:与丁烷一样有两个同分异构体,即正戊烷和异戊烷,后者为汽油的组成部分。在标准压力下,正戊烷在 36°C 以上、异戊烷在 28°C 以上时为气体。在凝析气藏中含有较多的此类组分。

(7) 氮气:在天然气中的含量一般不超过 10% (体积分数),是无色、无味的惰性气体,在标准压力和 20°C 时, 1 m^3 氮气的质量为 1.183 kg 。在标准压力下,当温度低于 -195°C 时,氮气开始液化。

(8) 硫化氢:是极臭、有毒的可燃气体,在标准压力和 20°C 时,密度为 1.438 kg/m^3 。在 20°C 时,单位体积水中可溶解 2.582 体积的硫化氢。由于硫化氢易溶解于水,故在一般气藏中含量甚微或不含,但在国内外也都存在一些含硫化氢较高或很高的气藏。

(9) 二氧化碳:无色、具有微弱气味。 1 m^3 二氧化碳在标准状态下的质量为 1.85 kg ,在 15°C 和压力超过 5.65 MPa 时,二氧化碳由气态转化为液态。二氧化碳在水中有较高的溶解度。二氧化碳与水在一定条件下可形成水合物,并对井下设备及集输设备等产生腐蚀作用。

(10) 氦气:属稀有惰性气体,无色、无味,微溶于水,不可燃,也不能助燃。氦气是除氢气以外密度最小的气体,其密度是氢气的 1.98 倍。它是最难液化的气体之一。氦气是贵重的稀有气体,在天然气中含量甚微,不超过 1% (体积分数)。当天然气中氦气的含量超过 0.1% (体积分数)时,就有提氦的工业价值。

此外,天然气中还可能含有多硫化氢(H_2S_x),以及以胶溶态粒子的形态存在于气相中的沥青质,还可能微含水银。

为了了解天然气的组成,可以对天然气组分进行全分析。目前采用的分析仪器为气相色谱仪。主要有美国惠普和日本岛津系列气相色谱仪。表示天然气组成的方法有3种:物质的量组成、体积组成和质量组成。

二、天然气的分类

1. 按烃类组分关系分类

1) 干气

干气是指在地层中呈气态,采出后在一般地面设备和管线中不析出液态烃的天然



气。按 C_5 界定法,干气是指在 1 m^3 井口流出物中 C_5 以上液态烃含量低于 13.5 cm^3 的天然气。

2) 湿气

湿气是指在地层中呈气态,采出后在一般地面设备的温度、压力下即有液态烃析出的天然气。按 C_5 界定法,湿气是指在 1 m^3 井口流出物中 C_5 以上液态烃含量高于 13.5 cm^3 的天然气。

3) 贫气

贫气是指丙烷及以上烃类含量少于 $100\text{ cm}^3/\text{m}^3$ 的天然气。

4) 富气

富气是指丙烷及以上烃类含量大于 $100\text{ cm}^3/\text{m}^3$ 的天然气。

2. 按矿藏特点分类

1) 纯气藏天然气

在开采的任何阶段,矿藏流体在地层中均呈气态,但对于不同的气藏天然气,由于其成分不同,当采到地面后,在分离器或管系中可能有部分液态烃析出。

2) 凝析气藏天然气

矿藏流体在地层原始状态下呈气态,但开采到一定阶段,随地层压力的下降,流体状态跨过露点线进入相态反凝析区,部分烃类在地层中即呈液态析出。

3) 油田伴生天然气

在地层中与原油共存,采油过程中与原油同时被采出,经油、气分离后所得的天然气。

3. 按硫化氢、二氧化碳含量分类

酸性天然气是指含有显著量的硫化氢,甚至有可能含有有机硫化物、二氧化碳,需经处理才能达到管输商品气气质要求的天然气。

第二节 天然气的理化性质

碳和氢的化合物可以以多种形式化合成烷烃类 C_nH_{2n+2} 、烯烃类 C_nH_{2n} 和炔烃类 C_nH_{2n-2} ,其同分异构体(分子式相同而结构不同)也较多,常将它们统称为烃类化合物。

甲烷是天然气中的主要成分,亦是碳氢化合物家庭中最轻的成员,它的分子式为 CH_4 。天然气中其他重要的碳氢化合物是乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})、戊烷(C_5H_{12})和己烷(C_6H_{14})。除碳氢化合物外,天然气中还可含有二氧化碳(CO_2)、氮气(N_2)、硫化氢(H_2S)、水蒸气(H_2O)和氧气(O_2)等。

天然气中常见气体组分纯气理化常数见表 1-1。



表 1-1 天然气中常见气体组分纯气理化常数表

| 项号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | 9 | 10 | |
|----|----------|--------------------------------|---------|---|----------------------|---|--|---|--|----------------------------------|---|-------------------------|
| 序号 | 组 分 | 分子式 | 相对分子质量 | 理想密度 $\rho_i / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ (101.325 kPa, 293.15 K) | 理想相对密度 γ_i | 求和因子 $\sqrt{b^*}$ (101.325 kPa, 293.15 K) | 压缩因子 Z [*] (101.325 kPa, 293.15 K) | 理想比定压热容和比热容比 (101.325 kPa, 288.15 K) | 比定压热容 $c_p / [\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 比热容比 $c_p / c_v (\#_i)^{***}$ | 气体粘度 $\mu^{**} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ (101.325 kPa, 288.15 K) | Pitzer 偏心因子 ω |
| 1 | 甲烷 | CH ₄ | 16.043 | 0.666 9 | 0.553 9 | 0.042 4 | 0.998 2 | 2.204 | 1.315 | 1.315 | 0.010 78 | 0.012 6 |
| 2 | 乙 烷 | C ₂ H ₆ | 30.070 | 1.250 0 | 1.038 2 | 0.090 0 | 0.991 9 | 1.706 | 1.180 | 1.180 | 0.009 01 | 0.097 8 |
| 3 | 丙 烷 | C ₃ H ₈ | 44.097 | 1.833 2 | 1.522 4 | 0.134 9 | 0.981 8 | 1.625 | 1.130 | 1.130 | 0.007 88 | 0.154 1 |
| 4 | 丁 烷 | C ₄ H ₁₀ | 58.124 | 2.416 3 | 2.006 7 | 0.184 4 | 0.966 0 | 1.652 | 1.100 | 1.100 | 0.007 32 | 0.201 5 |
| 5 | 2-甲基丙烷 | C ₄ H ₁₀ | 58.124 | 2.416 3 | 2.006 7 | 0.179 2 | 0.967 9 | 1.616 | 1.110 | 1.110 | 0.007 24 | 0.184 0 |
| 6 | 戊 烷 | C ₅ H ₁₂ | 72.151 | 2.999 4 | 2.491 0 | 0.229 3 | 0.947 4 | 1.622 | 1.070 | 1.070 | — | 0.252 4 |
| 7 | 2-甲基丁烷 | C ₅ H ₁₂ | 72.151 | 2.999 4 | 2.491 0 | 0.204 5 | 0.952 8 | 1.600 | 1.076 | 1.076 | — | 0.228 6 |
| 8 | 2,2-甲基丙烷 | C ₅ H ₁₂ | 72.151 | 2.999 4 | 2.491 0 | 0.199 2 | 0.960 3 | 1.624 | 1.076 | 1.076 | — | 0.196 7 |
| 9 | 己 烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 3.582 5 | 2.975 3 | 0.287 7 | 0.917 2 | 1.613 | 1.062 | 1.062 | — | 0.299 8 |
| 10 | 2-甲基戊烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 3.582 5 | 2.975 3 | 0.274 0 | 0.924 9 | 1.602 | 1.065 | 1.065 | — | 0.278 4 |
| 11 | 3-甲基戊烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 3.582 5 | 2.975 3 | 0.274 8 | 0.924 5 | 1.578 | 1.065 | 1.065 | — | 0.274 1 |
| 12 | 2,2-甲基丁烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 3.582 5 | 2.975 3 | 0.255 1 | 0.934 9 | 1.593 | 1.065 | 1.065 | — | 0.233 3 |
| 13 | 2,3-甲基丁烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 3.582 5 | 2.975 3 | 0.266 1 | 0.929 2 | 1.586 | 1.052 | 1.052 | — | 0.247 5 |
| 14 | 庚 烷 | C ₇ H ₁₆ | 100.205 | 4.165 6 | 3.459 6 | 0.353 8 | 0.874 8 | 1.606 | 1.054 | 1.054 | — | 0.349 4 |
| 15 | 2-甲基己烷 | C ₇ H ₁₆ | 100.205 | 4.165 6 | 3.459 6 | 0.336 9 | 0.886 5 | 1.595 | 1.054 | 1.054 | — | 0.330 3 |
| 16 | 3-甲基己烷 | C ₇ H ₁₆ | 100.205 | 4.165 6 | 3.459 6 | 0.336 7 | 0.886 6 | 1.581 | 1.054 | 1.054 | — | 0.323 9 |



续表 1-1

| 项号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | 9 | 10 | |
|----|-------------|-----------------------------------|---------|---|----------------------|---|------------------------------------|---|--|---------------------------------|---|-------------------------|
| 序号 | 组 分 | 分子式 | 相对分子质量 | 理想密度 $\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ (101.325 kPa, 293.15 K) | 理想相对密度 γ_i | 求和因子 $\sqrt{b^*}$ (101.325 kPa, 293.15 K) | 压缩因子 Z* (101.325 kPa, 293.15 K) | 理想比定压热容和比热容比 (101.325 kPa, 288.15 K) | 比定压热容 $c_p / [\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 比热容比 $c_p / c_v (k_f)^{***}$ | 气体粘度 $\mu^{**} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ (101.325 kPa, 288.15 K) | Pitzer 偏心因子 ω |
| 17 | 辛 烷 | C_8H_{18} | 114.232 | 4.748 8 | 3.943 9 | 0.430 9 | 0.814 3 | 1.601 | 1.046 | — | — | 0.398 1 |
| 18 | 2,2,4-三甲基戊烷 | C_8H_{18} | 114.232 | 4.748 8 | 3.943 9 | 0.359 4 | 0.870 8 | 1.599 | 1.046 | — | — | 0.304 1 |
| 19 | 环己烷 | C_6H_{12} | 84.162 | 3.498 7 | 2.905 7 | 0.276 2 | 0.923 7 | 1.211 | 1.080 | — | — | 0.209 8 |
| 20 | 甲基环己烷 | C_7H_{14} | 98.169 | 4.081 8 | 3.390 0 | 0.332 3 | 0.889 6 | 1.324 | 1.068 | — | — | 0.236 4 |
| 21 | 苯 | C_6H_6 | 78.114 | 3.247 3 | 2.696 9 | 0.259 6 | 0.932 6 | 1.014 | 1.080 | — | — | 0.209 5 |
| 22 | 甲 苯 | C_7H_8 | 92.141 | 3.830 4 | 3.181 2 | 0.329 8 | 0.891 2 | 1.085 | 1.060 | — | — | 0.263 3 |
| 23 | 氢 气 | H_2 | 2.016 | 0.083 8 | 0.069 6 | — | 1.000 6 | 14.240 | 1.412 | 0.008 71 | 0.008 71 | — |
| 24 | 一氧化碳 | CO | 28.010 | 1.164 4 | 0.967 1 | 0.020 0 | 0.999 6 | 1.040 | 1.395 | 0.017 25 | 0.017 25 | 0.044 2 |
| 25 | 硫化氢 | H_2S | 34.076 | 1.416 6 | 1.176 5 | 0.094 3 | 0.991 1 | 0.996 | 1.320 | 0.012 40 | 0.012 40 | 0.092 0 |
| 26 | 氦 气 | He | 4.003 | 0.166 4 | 0.138 2 | -0.016 0 | 1.000 5 | 5.192 | 1.660 | 0.019 27 | 0.019 27 | — |
| 27 | 氩 气 | Ar | 39.948 | 1.660 7 | 1.379 2 | 0.026 5 | 0.999 3 | 4.994 | 1.668 | 0.022 01 | 0.022 01 | — |
| 28 | 氮 气 | N_2 | 28.013 | 1.164 6 | 0.967 2 | 0.017 3 | 0.999 7 | 1.040 | 1.400 | 0.017 35 | 0.017 35 | 0.037 2 |
| 29 | 氧 气 | O_2 | 31.999 | 1.330 2 | 1.104 8 | 0.026 5 | 0.999 3 | 0.916 6 | 1.397 | 0.020 06 | 0.020 06 | 0.020 0 |
| 30 | 二氧化碳 | CO_2 | 44.010 | 1.829 6 | 1.519 5 | 0.059 5 | 0.994 6 | 0.833 | 1.295 | 0.014 39 | 0.014 39 | 0.254 8 |
| 31 | 水(气态) | H_2O | 18.015 | 0.748 9 | 0.622 0 | 0.167 0 | 0.972 0 | 1.862 | 1.335 | — | — | 0.343 4 |
| 32 | 空 气 | $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \dots$ | 28.964 | 1.204 1 | 1.000 0 | — | 0.999 6 | 1.005 | 1.400 | 0.017 90 | 0.017 90 | — |



续表 1-1

| 项号 | 1 | 11 | | | 12 | 13 | | 14 | 15 | 16 | |
|----|----------|---------------------------|-------------------------|---|--------------------------|--|---|--------------------|--------------------|--|-----------------------|
| | | 临界常数 | | | | 理想发热量/(kJ·m ⁻³) (101.325 kPa, 293.15 K) | 蒸发热 H ₂ /(kJ·kg ⁻¹) (101.325 kPa, 沸点温度) | | | 燃烧理想气体 需要空气量 (空气/气体) (m ³ ·m ⁻³) | 气体和空气混合 时燃烧的极限体积/% |
| 序号 | 组分 | 压力 P _c /kPa | 温度 T _c /K | 体积 V _c /(m ³ ·kg ⁻¹) | 沸点 t/°C (101.325 kPa) | | | 高位 H _{is} | 低位 H _{ld} | | 高限 |
| 1 | 甲烷 | 4 604 | 190.55 | 0.006 17 | -161.52 | 37 033 | 33 356 | 509.86 | 9.54 | 15.0 | 5.0 |
| 2 | 乙烷 | 4 880 | 305.43 | 0.004 92 | -88.58 | 64 877 | 59 632 | 489.36 | 16.70 | 13.0 | 2.9 |
| 3 | 丙烷 | 4 249 | 369.82 | 0.004 60 | -42.07 | 92 331 | 84 978 | 425.73 | 23.86 | 9.5 | 2.1 |
| 4 | 丁烷 | 3 797 | 425.16 | 0.004 39 | -0.49 | 119 655 | 110 463 | 385.26 | 31.02 | 8.4 | 1.8 |
| 5 | 2-甲基丙烷 | 3 648 | 408.13 | 0.004 52 | -11.81 | 119 307 | 110 116 | 366.40 | 31.02 | 8.4 | 1.8 |
| 6 | 戊烷 | 3 369 | 469.60 | 0.004 21 | 36.06 | 147 063 | 136 034 | 357.22 | 38.18 | 8.3 | 1.4 |
| 7 | 2-甲基丁烷 | 3 381 | 460.39 | 0.004 24 | 27.84 | 146 729 | 135 700 | 342.20 | 38.18 | 8.3 | 1.4 |
| 8 | 2,2-甲基丙烷 | 3 199 | 433.75 | 0.004 20 | 9.50 | 146 250 | 135 221 | 315.34 | 38.18 | 8.3 | 1.4 |
| 9 | 己烷 | 3 012 | 507.40 | 0.004 29 | 68.74 | 174 459 | 161 589 | 334.81 | 45.34 | 7.7 | 1.2 |
| 10 | 2-甲基戊烷 | 3 010 | 497.45 | 0.004 26 | 60.26 | 174 137 | 161 268 | 322.52 | 45.34 | 7.7 | 1.2 |
| 11 | 3-甲基戊烷 | 3 124 | 504.40 | 0.004 26 | 63.27 | 174 247 | 161 378 | 325.82 | 45.34 | 7.7 | 1.2 |
| 12 | 2,2-甲基丁烷 | 3 081 | 488.73 | 0.004 17 | 49.73 | 173 751 | 160 882 | 305.24 | 45.34 | 7.7 | 1.2 |
| 13 | 2,3-甲基丁烷 | 3 127 | 499.93 | 0.004 15 | 57.98 | 174 087 | 161 218 | 316.50 | 45.34 | 7.7 | 1.2 |
| 14 | 庚烷 | 2 736 | 540.20 | 0.004 31 | 98.42 | 201 849 | 187 141 | 316.33 | 52.50 | 7.0 | 1.0 |
| 15 | 2-甲基己烷 | 2 734 | 530.31 | 0.004 20 | 90.05 | 201 555 | 186 848 | 306.06 | 52.50 | 7.0 | 1.0 |
| 16 | 3-甲基己烷 | 2 814 | 535.19 | 0.004 03 | 91.85 | 201 697 | 186 989 | 307.27 | 52.50 | 7.0 | 1.0 |



续表 1-1

| 项号 | 1 序号 | 11 组分 | 12 临界常数 | | 13 沸点 $t_f/^\circ\text{C}$ (101.325 kPa) | 14 理想发热量/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$) (101.325 kPa, 293.15 K) | | 15 蒸发热 H_v /($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) (101.325 kPa, 沸点温度) | 16 燃烧理想气体 需要空气量 (空气/气体) ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) | 17 气体和空气混合 时燃烧的极限体积/% | | |
|----|---------|-------------|------------------|----------------|--|--|-------------|--|--|-----------------------------|------|------|
| | | | 压力 P_c /kPa | 温度 T_c /K | | 体积 V_c /($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) | 高位 H_{15} | | | 低位 H_{14} | 高 限 | 低 限 |
| 17 | | 辛 烷 | 2 486 | 568.70 | 0.004 31 | 125.67 | 229 219 | 212 673 | 301.26 | 59.65 | — | 0.96 |
| 18 | | 2,2,4-三甲基戊烷 | 2 568 | 543.89 | 0.004 10 | 99.24 | 228 588 | 212 041 | 271.44 | 59.65 | — | 1.0 |
| 19 | | 环己烷 | 4 074 | 553.50 | 0.003 68 | 80.73 | 164 393 | 153 364 | 355.85 | 42.95 | 7.8 | 1.3 |
| 20 | | 甲基环己烷 | 3 472 | 572.12 | 0.003 75 | 100.93 | 191 329 | 178 461 | 317.03 | 50.11 | — | 1.2 |
| 21 | | 苯 | 4 898 | 562.16 | 0.003 28 | 80.09 | 137 280 | 131 765 | 393.32 | 35.79 | 7.9 | 1.3 |
| 22 | | 甲 苯 | 4 106 | 591.80 | 0.003 43 | 110.63 | 164 163 | 156 809 | 360.14 | 35.79 | 7.1 | 1.2 |
| 23 | | 氢 气 | 1 297 | 33.20 | 0.032 24 | -252.87 | 11 889 | 10 051 | 450.40 | 42.95 | 74.2 | 4.0 |
| 24 | | 一氧化碳 | 3 499 | 132.92 | 0.003 32 | -191.49 | 11 763 | 11 763 | 215.70 | 2.39 | 74.2 | 12.5 |
| 25 | | 硫化氢 | 9 005 | 373.50 | 0.002 87 | -60.31 | 23 393 | 21 555 | 548.01 | 7.16 | 45.5 | 4.3 |
| 26 | | 氮 气 | 227.5 | 5.20 | 0.014 36 | -268.93 | — | — | — | — | — | — |
| 27 | | 氧 气 | 4 876 | 150.82 | 0.001 87 | -185.83 | — | — | — | — | — | — |
| 28 | | 氮 气 | 3 399 | 126.10 | 0.003 22 | -195.80 | — | — | 204.00 | — | — | — |
| 29 | | 氧 气 | 5 081 | 154.70 | 0.002 29 | -182.96 | — | — | 213.00 | — | — | — |
| 30 | | 二氧化碳 | 7 382 | 304.19 | 0.002 14 | -78.51 | — | — | 573.27 | — | — | — |
| 31 | | 水(气态) | 22 118 | 647.30 | 0.003 18 | 100.00 | — | — | 2 257.00 | — | — | — |
| 32 | | 空 气 | 3 771 | 132.40 | 0.003 23 | -194.20 | — | — | 214.00 | — | — | — |



表 1-1 的几点说明:

(1) 表中数据在右上角标注“*”的项引自 GB/T 11062; 标注“**”的项引自 AGA NO3 报告; 标注“***”的项引自米勒著《流量测量工程手册》; 其余引自《气体加工工程数据手册》。干空气标准组分与 GB/T 11062 相同: 以摩尔分数表示, 其中氮气为 0.780 9, 氧气为 0.209 5, 氩气为 0.009 3, 二氧化碳为 0.000 3。

(2) 表中所列组分为天然气中常见的若干种气体。天然气中可以含有表中所列的几种或十几种组分, 或者全有, 并且还可能含有未列出的气体组分。此时需查询其他资料, 因为各地天然气中各气体的含量不一样。该表列出的为纯气组分时的理化常数。

(3) 分子式是表示气体一个分子中所含一种或几种元素的原子数目的表达式。

(4) 相对分子质量 M 是以下面这些相对原子质量为基础的: $M(C) = 12.011$; $M(H) = 1.008$; $M(O) = 15.995$; $M(N) = 14.006 7$; $M(S) = 32.06$ 。

(5) 理想密度 ρ_i 是该气体在服从理想气体定律的情况下单位体积的质量, 单位为 kg/m^3 。

(6) 理想相对密度 γ_i 是该气体与干空气理想密度之比, 亦即相对分子质量之比。

(7) 求和因子是用来求出天然气压缩因子的参数。

(8) 因为各种气体属于真实气体, 所以会偏离理想气体定律。压缩因子的数值大小说明偏离的程度, 按 $Z = \frac{pV}{RT}$ 计算。 R 称为气体通用常数, 其值为 $8.314 48 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

(9) 理想气体的比定压热容是《气体加工工程数据手册》根据参考文献中所列的摩尔定压热容计算得到的。摩尔热容用分子分配函数进行计算, 其值与压力无关。比热容可从米勒著《流量测量工程手册》上查得。在相同的状态条件下, 同一组分的气体的比热容比应是相同的, 即 $k_i = c_p/c_v$ 。

(10) 由 AGA NO3 报告中查得天然气中几种主要组分的气体粘度列于表中, 供查阅。

(11) 偏心因子 ω 用来计算复杂混合物与简单流体的偏差, $\omega = \lg\left(\frac{p}{p_c}\right) - 1$ 。

(12) 临界常数: 临界压力为气体临界状态所具有的压力, 一般用符号 p_c (单位为 Pa) 表示; 临界温度为气体处于临界状态所具有的温度, 一般用符号 T_c (单位为 K) 表示; 临界体积是单位质量气体物质在临界状态时变成液体物质所占有的最大体积, 一般用符号 V_c (单位为 m^3/kg) 表示。这三者统称为临界常数。

(13) 沸点是气体在 101.325 kPa (绝) 压力条件下, 气、液处于平衡状态下的温度 (单位为 $^{\circ}\text{C}$)。

(14) 理想发热量是不考虑气体压缩因子, 单位气体在规定的压力、温度条件下, 与空气完全燃烧所产生的发热量 (单位为 kJ/m^3)。高位理想发热量 H_{is} 为单位气体与空气完全燃烧生成的水在规定压力、温度条件下, 始终保持液相所释放的热量; 低位发热量 H_{id} 为单位气体与空气完全燃烧生成的水在规定压力、温度条件下, 始终保持气相所释放的热量。

(15) 蒸发热等于在 101.325 kPa 压力和沸点温度下, 饱和蒸气的焓减去相同条件下液体的焓。焓是热力学能和压力位能的总和。