

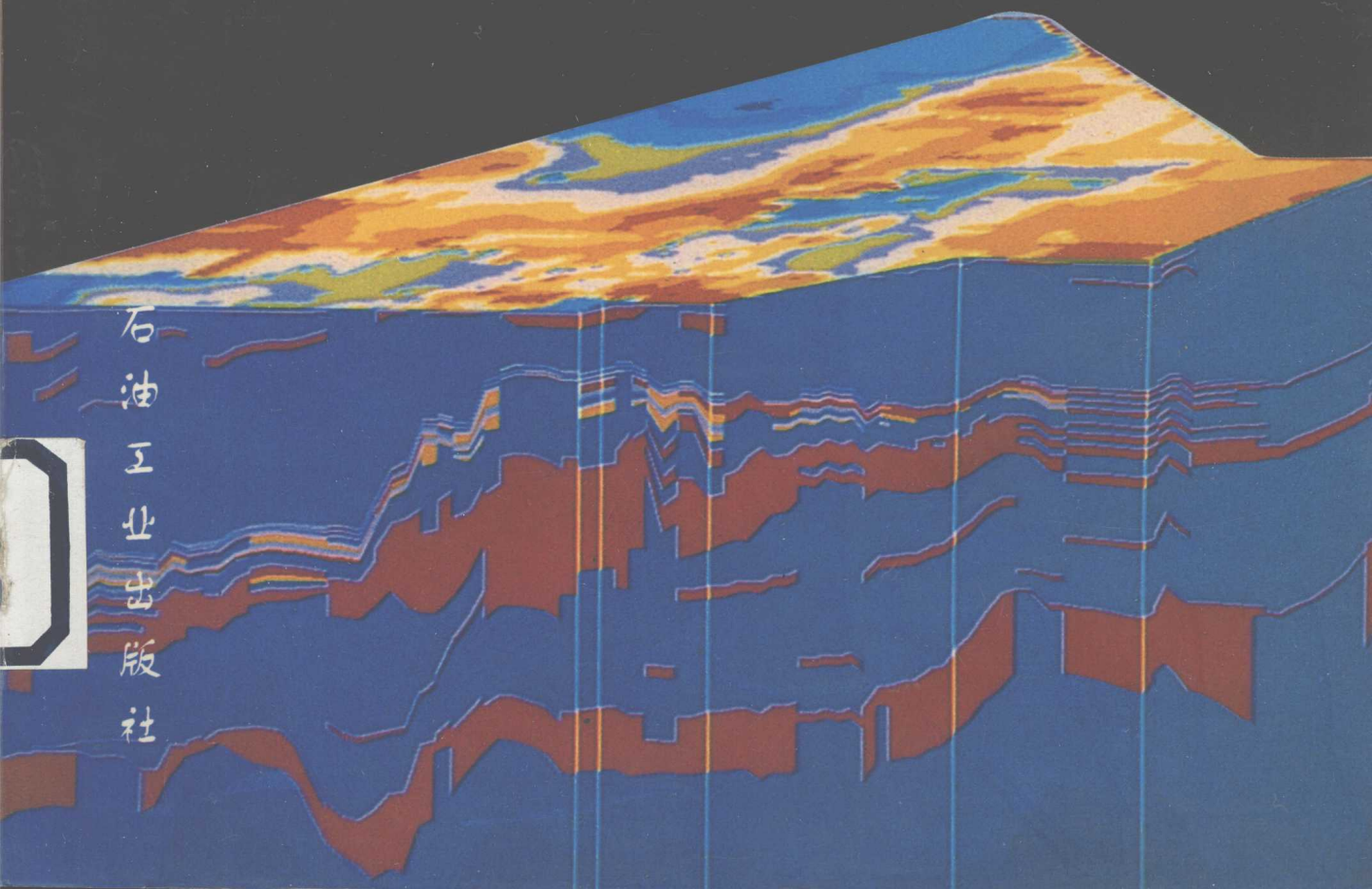
GAS RESERVOIR ENGINEERING

气藏工程

王鸣华 主编

天然气开采工程丛书

(二)



石油工业出版社

天然气开采工程丛书 (二)

气 藏 工 程

王鸣华 主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

《天然气开采工程丛书》共分六个分册：《气田开发地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》，本书是其中之一。

气藏工程是气田开发中的一门重要学科，是在气藏描述的基础上着重研究天然气在各种空隙（孔隙、洞、喉）介质中的渗流规律，并采用各种工程措施，把天然气最经济地、最大限度地从地层中驱向井底直至井口。

本书着重介绍天然气在地层条件下的物理性质、储气层的基本参数、凝析气的相态特征、渗流规律、气井现代试井理论和应用、天然气动态储量计算方法、气态动态特征、气藏和凝析气藏数值模拟技术以及开发方案编制等内容，并结合四川气田的开发实际，叙述了这些方法的应用条件和某些实例，使读者易于理解和掌握本书中所涉及的各种方法。

本书可供从事气田开发、气藏工程工作的研究人员、工程技术人员及石油院所师生参考

图书在版编目（CIP）数据

气藏工程/王鸣华主编.

北京：石油工业出版社，1997.12

（天然气开采工程丛书；2）

ISBN 7-5021-2106-4

I. 气…

II. 王…

III. 气田开发

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 19028 号

石油工业出版社出版

（100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼）

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 18½ 印张 453 千字 印 1-1500

1997 年 12 月北京第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2106-4/TE·1771

平装定价：38.00 元

《天然气开采工程丛书》编辑委员会

中国石油天然气总公司编辑委员会

主 任 李虞庚

副主任 冈秦麟 王乃举 张家茂 滕耀坤

编 委 蒋其凯 曾宪义 罗英俊 孟慕尧 潘国潮 李海平

李希文 吕德本 叶敬东 张卫国 徐文渊 周学厚

王季明 王鸣华 文楚雄

四川石油管理局编辑委员会

主 任 滕耀坤

副主任 徐文渊 周学厚 王季明 冉隆辉 刘同斌

编 委 (以姓氏笔划为序)

王全生 王鸣华 许可方 陈中一 陈赓良 李联奎

杨光鲜 范恩泽 金裕方 张 化 侯德明 章申远

游开诚 舒世容

《气藏工程》分册编写组

主 编 王鸣华

副 主 编 钟孚勋

编写人员 王鸣华 钟孚勋 李仕伦 高曼萍
乐长荣 孙 雷

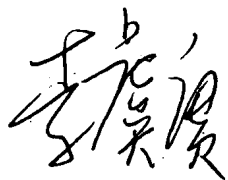
序

40年来,我国气田开发经验不断丰富,已逐步形成一套适合我国气田开发特点的技术。为了系统总结经验,提高气田开发技术水平,迎接我国天然气工业的大发展,中国石油天然气总公司科技发展局组织了长期从事气田开发、具有较高理论水平和丰富实践经验的技术人员,系统编写了这套丛书,即《气田开发地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》,共六个分册。

我国是世界上天然气开采和利用最早的国家,早在公元前301年汉末晋初时,就开始了采气熬盐,开创了世界最古老的“卓筒井”钻井、“廉盆”排水采气、“亮筒子”试气、“补腔”修井、“显号”识别裂缝以及“通腔”划分连通系统,这些都已成为世界石油史上光辉的一页,也是浅层低孔隙低渗透裂缝-孔隙型有水气田开采的宝贵经验。解放前,我国天然气开采技术停滞不前,处于十分落后的局面,直到新中国成立,才开始较大规模工业化的勘探与开发,气田由旧中国的两个增加到现在的116个,年产气大幅度增加,已成为我国国民经济发展不可缺少的能源。目前陆上天然气勘探有了新的发展,海上崖13-1大气田也已开始投入开发,这为我国“九五”期间天然气进一步加快发展创造了条件。

我国已开发气田的地质条件复杂,开采的技术难度较大,绝大多数气田储层为低孔隙低渗透,具有边、底水。以碳酸盐岩为主的中、小型气田,其微细裂缝为渗流通道,非均质性严重,主力气田多为含硫气田,使生产建设面临一系列技术难题。正是在这种复杂和困难的条件下,我国的技术人员经历了多年的探索,不断地实践—认识—再实践—再认识,引进和应用新技术、新方法和新装备,加深了对我国气田开发基本规律的认识,完善配套了天然气上、下游工程,使我国天然气工业得到了发展,气田开发水平步入现代技术水平。

我国天然气开发具有40年的经验,这是十分宝贵的,认真系统地总结经验,必将对我国天然气工业的发展起到积极的推动和指导作用。随着我国新气田、大气田的不断发现,将有一大批技术人员加入气田开发队伍,这套丛书不仅是矿场技术人员很好的参考书,也是石油大专院校很好的教材。我相信,随着我国天然气工业的发展,今后我国气田开发的技术水平将会不断完善和提高。



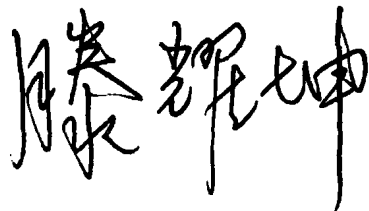
一九九六年七月二十一日

序

四川盆地是一个面积约 $18 \times 10^4 \text{km}^2$ 的大型含气盆地。在前震旦系变质岩和火成岩的基底上，沉积了厚达 6000~12000m 的海、陆相地层，为天然气的生成、运移、聚集和保存提供了有利条件。现已证实，震旦系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系均蕴藏着丰富的天然气。但盆地的地质情况极其复杂，储集层绝大多数为低孔、低渗的裂缝性碳酸盐岩，多数气田有边、底水，且具有井下温度高、地层压力高、天然气含硫化氢高等特点，这给勘探开发工作带来了诸多困难。

四川开采利用天然气的历史悠久，但大规模的勘探开发是在新中国成立以后。40 多年来，四川石油管理局的广大职工，以求实、创新、勇于实践的精神，攻克了天然气勘探、开发、钻井、采气、集输、处理、加工等领域一个个技术难关，创造了一套适应四川复杂地质条件的勘探开发技术，探明了占全国 40% 的天然气地质储量，使天然气产量占全国总产量的 41%，占纯气藏产气量的 80%，为我国西南地区工农业发展做出了重大贡献，使四川成为我国天然气工业的重要基地。

《天然气开采工程丛书》是根据中国石油天然气总公司的要求而编写的。为此，四川石油管理局成立了由长期从事天然气事业、理论造诣深、实际经验丰富的专家组成的编辑委员会和 30 余名高级工程师组成的六个编写组，对 40 多年来四川在天然气开发方面的实践经验，特别是近十多年来在技术攻关、科学研究以及引进、消化国外先进技术方面的成果进行全面、系统总结，因此，这套“丛书”不仅较全面地反映了四川天然气开发的科技进步，同时也从一个侧面反映了多年来我国在天然气开采诸方面所取得的巨大成就。40 年，在历史的长河中是很短暂的，但若能通过这 40 年的经验总结对今后全国天然气工业的发展有所启迪、有所促进，我们将感到十分欣慰，我想，这也是广大气田开发科技工程技术人员对这套“丛书”的期望。



一九九六年七月

前 言

我国是世界上最早开发和利用天然气的国家，特别是四川盆地碳酸盐岩气田开采历史悠久，早在公元 280 年，我们的祖先在川西南地区自流井气田上用顿钻凿井，从井下汲卤、采气，利用天然气煎卤制盐。在长期的开采实践中，创造了一整套对付碳酸盐岩洞洞缝缝的勘探开发办法和钻采工艺，在气田开采史上具有光辉的篇章。

新中国成立以来，四川天然气工业获得了迅速的发展。特别是在党的十一届三中全会以后，广大石油、天然气工作者解放思想，对碳酸盐岩不均质裂缝性气田的勘探开发新方法和新技术进行了积极的攻关和实践，使四川天然气工业的发展上了新的台阶，已发现了 83 个气田，建成了年产 70 亿立方米天然气生产的工业基地，为四川工农业的发展提供了优质的原料和燃料。

四川碳酸盐气田具有多产层、多裂缝系统的特点，气藏具有高压、低孔、裂缝发育不均、高含硫化氢和含边、底水的性质，开发难度很大。然而，在开发各类气藏的过程中，积累了丰富的第一手资料，提供了不同类型气藏开发的经验和教训，使四川气田的开发技术不断完善，较大地提高了各类气藏的采收率，气田开发的经济效益越来越显著。

“七五”以来，在“油气并重”的勘探方针下，增加了天然气勘探和开发的投入，在我国的西部、四川、陕甘宁地区和东南沿海大陆架发现了一批大中型气田，天然气探明储量增加幅度较大，加快了天然气田的开发工作，为天然气工业的进一步发展奠定了基础。

气藏工程是气田开发中的一门重要学科，是在气藏描述的基础上，着重研究天然气在各种空隙（孔隙、洞、喉）介质中的渗流规律，并采用各种工程措施，把天然气最经济地、最大限度地从地层中驱向井底直至井口。因此气藏工程学在气田开发领域中占有十分重要的位置。本书着重介绍天然气在地层条件下的物理性质、储气层的基本参数、凝析气的相态特征、渗流规律、气井现代试井理论和应用、天然气动态储量计算方法、气藏动态特征、气藏和凝析气藏数值模拟技术以及开发方案编制等内容。并结合四川气田的开发实际，叙述了这些方法的应用条件和某些实例，使读者易于理解和掌握本书中所涉及的各种方法。

本书对气藏工程师们在气田开发理论研究和矿场应用时有参考使用价值。

本书在四川石油管理局《天然气开采工程丛书》编辑委员会指导下编写完成，编写人员具体分工如下：

第一、二章由乐长荣，第三章和第十章由李仕伦和孙雷，第四、五章由高曼萍、钟孚勋，第六章由王鸣华，第七、八章由钟孚勋，第九章由钟孚勋、王鸣华，全书由王鸣华、钟孚勋修改编辑完成。

本书在编写过程中受到四川石油管理局开发处和地质勘探开发研究院领导的支持和帮助，以及局科技处文楚雄的协调和帮助，在此表示感谢。

目 录

第一章 天然气的物理—化学性质	(1)
第一节 天然气的组分和分类	(1)
第二节 气体偏差系数 (Z)	(5)
第三节 气体密度	(13)
第四节 天然气压缩系数	(17)
第五节 天然气体积系数	(20)
第六节 气体粘度	(21)
第七节 天然气含水量和溶解度	(27)
第八节 天然气水合物	(32)
第二章 气层储渗参数	(38)
第一节 孔隙度	(38)
第二节 渗透率	(45)
第三节 流体饱和度	(50)
第四节 岩石和流体的压缩系数	(53)
第三章 油气体系的相态性质	(56)
第一节 单组分和两组分烃类体系相态性质	(56)
第二节 油气体系气液相平衡计算	(58)
第三节 常用状态方程的选择和分析	(63)
第四节 C_n^+ 重馏分的特征化处理	(70)
第五节 国内应用相态计算软件包情况简介	(74)
第四章 气井产能试井	(76)
第一节 气井井底压力计算	(76)
第二节 气井产能试井基本原理	(78)
第三节 气井产能试井方法	(87)
第四节 气井产能试井的应用	(97)
第五章 气井不稳定试井	(100)
第一节 气井不稳定试井分析原理	(100)
第二节 气井不稳定试井解释	(108)
第三节 典型曲线拟合方法	(118)
第四节 其它试井方法	(133)
第五节 气井试井应用	(139)
第六章 气藏储量计算	(148)
第一节 天然气储量分级	(148)
第二节 容积法计算天然气储量	(149)
第三节 压降法计算天然气储量	(152)

第四节	利用试井和动态资料计算气井控制储量·····	(159)
第五节	气藏可采储量概述·····	(170)
第七章	气藏动态特征分析·····	(173)
第一节	裂缝—孔隙型气藏动态特征·····	(173)
第二节	多裂缝系统的动态特征·····	(181)
第三节	裂缝—孔洞底水气藏动态特征·····	(184)
第四节	气藏动态分析中常用方法·····	(190)
第五节	气井合理产量和递减分析·····	(206)
第八章	气藏数值模拟·····	(212)
第一节	气藏数值模拟基本原理·····	(212)
第二节	气藏数值模拟操作使用·····	(225)
第三节	气藏数值模拟应用·····	(231)
第九章	气藏开发方案编制·····	(236)
第一节	气藏地质模型·····	(237)
第二节	开发层系和开发井位部署·····	(239)
第三节	气井完井方法和采气制度的选择·····	(240)
第四节	气藏生产规模和动态预测·····	(242)
第五节	采气工程和地面工程·····	(245)
第六节	气藏开发方案(地下部分)经济评价·····	(246)
第七节	最佳方案和实施要求·····	(252)
第八节	气藏早期评价和后期调整·····	(253)
第九节	气藏开发优化的认识·····	(254)
第十章	凝析气田开发基础·····	(257)
第一节	凝析气田开发特征·····	(257)
第二节	凝析气井生产测试、取样和油气相态分析·····	(258)
第三节	凝析气田开发方案编制流程·····	(261)
第四节	凝析气田开发数值模拟简介·····	(267)
第五节	合理开发凝析气田的要点·····	(278)
参考文献	·····	(279)

第一章 天然气的物理—化学性质

本章论述与气藏工程密切相关的天然气物理—化学性质。天然气的 PVT 状态取决于其化学组分。各气藏的天然气组分可能存在很大的差异，这导致气藏生产动态极大的差别。因此，我们将从第一节述及天然气化学组分和分类开始，以后的各节将述及预测天然气性质参数的方法和技术，这些方法和技术多是经验性的，但对气藏工程分析评价具有足够的精确度。天然气的相态及状态方程将在第三章中介绍。

第一节 天然气的组分和分类

一、天然气组分

广义的天然气是指自然界中一切天然生成的气体化合物或气体元素的混合物。

从油气能源勘探开发的意义上讲，天然气是专指岩石圈中生成蕴藏的以气态烷烃混合物为主的可燃性气体，其主要成分是甲烷（ CH_4 ），四川气田天然气的甲烷含量在 83%～97.6%（体积）。此外还含有少量的硫化氢（ H_2S ）、二氧化碳（ CO_2 ）、氮（ N_2 ）等非烃类气体和水蒸汽，以及微量的稀有气体，如氩（Ar）、氙（Xe）、氖（Ne）、氪（Kr）、氦（He）等。

天然气是一种低相对密度、低粘度的流体，无色，在常压和 293K 时， $\text{CH}_4\sim\text{C}_4\text{H}_{10}$ 为气态， $\text{C}_5\text{H}_{10}\sim\text{C}_{17}\text{H}_{36}$ 为液态， $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 为固态。天然气是一种可燃气体，它与 5%～15% 的空气混合易燃，点火温度范围在 866.5～977.6K，具有很高含热量。如在标准状态下，甲烷的热值为 $37260\text{kJ}/\text{m}^3$ ，比普通的煤大 1.5 倍。这是天然气重要的性质参数，因为天然气的定价最常用的是它的热值含量，而不是它的重量或体积。天然气不仅是优质洁净的燃料，更是优质的化工原料。1985 年，在我国天然气年产量中，用于各种化工原料的天然气量占 44.5%，获得巨大的经济效益。

由于天然气成因、形成的过程和所处地质背景不同，决定了它的组分、在地层中存在和开发中出现的形态不同，这是天然气的一个重要特点。因此，不同地区的气田所产天然气都是以碳氢化合物为主，但其组分却有很大的差别，这就决定了各地区天然气的经济价值、开采方式和采用的工艺技术。

表 1-1 列出了四川部分气田天然气的组分。

为了认识天然气开发中的这些特点，现分别对其主要组分作简单介绍。

甲烷：是天然气的主要组成部分，在天然气的混合物中，其含量往往超过 90%（体积）。纯甲烷为无色，稍有蒜味。它比空气轻，在标准压力和 15℃ 下， 1m^3 甲烷重 0.677kg。甲烷具有高的热稳定性和很高的热值含量（ $33904\sim37668\text{kJ}/\text{m}^3$ ），比煤大 1.5 倍。

乙烷：无色气体，比空气稍重，在标准状态下， 1m^3 乙烷重 1.270kg。它的热值在 $60345\sim65946\text{kJ}/\text{m}^3$ 。在 20℃ 时加压至 3.8MPa 以上，便液化成相对密度为 0.446 的液体。

丙烷：无色气体，比空气重，在标准状态下， 1m^3 丙烷重 1.9659kg。温度在 20℃ 及 0.85MPa 压力以上时，呈液态。丙烷的热值为 $86402.9\sim93888.9\text{kJ}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 四川某些气田天然气的组成

气田名称	产气地层	天然气组分，%（体 积）												视临界温度 K	袖临界压力 MPa	现场分析										
		甲烷	重 烃						乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷			正戊烷	总量	硫化氢	不饱和烃	一氧化碳	氢	氮	氢	氮	硫化氢 g/m ³	二氧化碳 g/m ³
庙高寺	嘉二 ¹	96.42	0.73	0.14	0.04				0.91	无	0.69													10.510		
傅家庙	嘉三	95.77	1.10	0.37	0.16				1.63	0.08	无								0.07	2.24				无		
宋家场	阳三 ³⁻⁴	97.17	1.02	0.2					1.22	0.47	0.01								无	1.09	0.04			0.323		
阳高寺	阳三 ³	97.81	1.05	0.17					1.22	0.44	无								无	0.48	0.05			0.052		
兴隆场	嘉三	96.74	1.07	0.32	0.070	0.090	0.075			0.045									0.008	1.54	0.042	0				
自流井	阳三一阳二	97.12	0.56	0.07						1.135	0.020								0.002	1.06	0.032	0				
威 远	震旦系	86.80	0.11							4.437	0.879									8.10	0.316	0.027		13.528	74.484	
卧龙河1)	嘉四 ³	94.12	0.88	0.21	0.05		0			3.970	0.03	0.04	0.11	0.49												
卧龙河2)	嘉二 ³	95.97	0.55	0.10	0.01	0.02	0.02	0.02		0.35	1.52	—	—	—	0.006	1.30	0.03	0.014	0.006	1.30	0.03	0.014		23.44	6.84	
中坝1)	须二	91.15	5.8	1.59	0.71	0.20				0.54					0.05	0.10				0.05						
中坝2)	雷三	82.98	1.69	0.68	0.73	0.76				4.51	6.75				0.05	0.67										
八角场	大三	90.99	3.49	1.89	1.07	1.21				0.25																
相国寺	石炭系	97.62	0.92	0.07	0.00	—			0.99	0.16	0.01				0.013	1.13	0.076	0.000					0.023	3.077		
卧龙河	石炭系	97.18	0.43	0.03	0.004	0.006	0									0.73							3.170	25.322		
大干池	石炭系	95.97	1.23	0.23	0.004	0.006	0									1.87							0.034	11.289		

正丁烷：相对密度比空气大 1 倍，在 15℃ 和标准压力下，1m³ 正丁烷重 2.454kg。在标准压力下，当温度高于 +0.6℃ 时，纯正丁烷才以气态存在。在温度为 +15℃ 及压力为 0.18MPa 时，正丁烷呈密度为 0.582kg/m³ 的液体。

异丁烷：是正丁烷的同分异构体，其物理性质与正丁烷也不一样。如在标准压力下，当温度在 -11℃ 以下时呈气态，温度更低时才呈液态。

丁烷的热值为 112294~121685kJ/m³。

戊烷：与丁烷一样有两个同分异构体正戊烷和异戊烷。在标准压力下，正戊烷在 36℃ 以上，异戊烷在 28℃ 以上时方为气体。后者为汽油的组成部分，凝析气田内有较高的含量。

除上述烷烃外，天然气还含有少量的稀烃、环烷烃和芳香烃。

在天然气中，除烃类成分外，还含有不同数量的二氧化碳、硫化物和氮，少量的氢、氧、一氧化碳和其它稀有气体。下面将几种主要的非烃类气体作简单的介绍。

二氧化碳 (CO₂)：无色，具有微弱的气味。1m³ CO₂ 在标准状态下重 1.858kg。在 +15℃ 和压力超过 5.65MPa 时，CO₂ 气转化为液态。CO₂ 气在水中有高的溶解度。如在 +15℃ 时，100 单位水中可溶解 101.9 单位体积的 CO₂ 气，比甲烷高 33.9 倍。CO₂ 与水在一定条件下可形成水合物，所形成的水合物如 CO₂ + H₂O 对井下及集输设备产生腐蚀作用。二氧化碳气往往与天然气伴生，其体积含量一般为 10%~15%，但也有体积含量高达 80%~99.5%，成为具有很高开采价值的二氧化碳气藏。

氮气 (N₂)：在天然气中的体积含量一般不超过 10%，通常为 2%~3%。N₂ 气是无色无味的惰性气体，在标准压力和 20℃ 时，1m³ 重 1.183kg。在标准压力下，当温度低于 -195℃ 时氮气开始液化。

硫化氢 (H₂S)：是含硫化物中的主要组成部分，是极臭有毒的可燃气体，燃烧 1m³ H₂S 需 7.15m³ 的空气。在标准压力和 20℃ 时重量为 1.438kg/m³，易溶解于水，在 20℃ 时，单位体积水中可溶解 2.582 单位体积的 H₂S 气。0℃ 时可溶解 4.670 单位体积。由于 H₂S 气易溶解于水，故一般气藏中不含或含量甚微。但国内外也有一些气藏中含 H₂S 较高或很高的实例。我国四川盆地碳酸盐岩气藏中 H₂S 含量一般都低于 10% (体积比)，少数低于 1% 或高于 10%。我国天然气中 H₂S 含量最高的是渤海湾盆地的赵兰庄孔一段气藏，H₂S 含量 92% (体积比)。世界上含 H₂S 最高的天然气是美国的弗兰克林气田。含 H₂S 的天然气给钻井和采气工程带来很大困难，但它是硫磺资源的重要来源。

氦气 (He)：属稀有惰性气体，无色，无味，微溶于水，不能燃烧，也不能助燃。氦是除氢气以外密度最小的气体，其密度是氢气的 1.98 倍，空气的 1/7.2。它是最难液化的气体。氦气是贵重的稀有气体，天然气中含量甚微，不超过 1% (体积比)。天然气中含量超过 0.1% (体积比) 时，就有提取氦的工业价值。我国鄂尔多斯盆地的保 1 井和华 27 井及汾渭盆地的渭 13 井，天然气中 He 含量分别高达 0.47%，2.13%，3.68% (体积比)。美国圣胡安盆地的比特列比托，托西戈等气田的天然气中 He 含量高达 7.27%~8.92%，丹佛盆地的纳瓦伊奥—切姆别尔斯气田天然气中 He 含量高达 10% (体积比)。

除了上述组分外，天然气中还含有含量甚微的其它成分，这些成分对提高天然气的商品气质的标准也有一定的影响。

二、天然气分类

随着天然气工业日益发展，各专业门类的研究目的不同，使天然气的分类方法十分繁多。下面仅从气田开发角度考虑，对天然气进行分类。

1. 按矿场特点分类

天然气可分伴生气和非伴生气。伴生气是伴随原油共生，与原油一同采出的天然气；非伴生气包括纯气藏气和凝析气藏的气，两者在地层中均呈气相。

气藏气。产自天然气藏中的天然气称气藏气。气藏气中主要组分为甲烷，含量占 80%（体积比）以上，含少量乙烷至丁烷，戊烷以上重烃含量甚微或不含。此外还含有少量非烃类气体，如 CO_2 ， H_2S ， N_2 等，但不含非饱和烃类气体。

凝析气藏气。除含有大量的甲烷外，尚含有大量的戊烷及戊烷以上的烃类，即含有汽油、煤油组分。

油田气。包括溶解气和气顶气，也称伴生气。它的特点是乙烷和乙烷以上的烃类含量较气田气高。

2. 按天然气的化学成分分类

按天然气的化学成分可划分为三个基本类型：

1) 烃类气在天然气混合物中，以甲烷及其重烃同系物的体积含量超过 50% 时称烃类气。按烃类气的湿度系数，将烃类气分为干气和湿气。湿度系指重烃体积组分（主要是 $\text{C}_2\sim\text{C}_4$ ）含量与甲烷体积组分含量的比值（ C_2^+/C_1 ）。一般将含 95% 甲烷的天然气称为干气（ $\text{C}_2^+/\text{C}_1 < 5\%$ ）；含重烃组分，且甲烷含量小于 95%（ $\text{C}_2^+/\text{C}_1 > 5$ ）的天然气称为湿气。

从对气藏工程应用角度考虑，采用下列指标区分天然气为宜：

①湿度系数——（ $\text{C}_2^+/\text{C}_1 < 5\%$ ），称干气；

（ $\text{C}_2^+/\text{C}_1 > 5\%$ ），称湿气。

②干燥系数——（ C_4/Σ 重烃），体积比值大于 2.6 者，称纯气藏气；小于 2.6 者称油藏气；乙烷比丙烷含量（体积比）高者属干气；丙烷比乙烷含量（体积比）高者属凝析气藏气。

根据天然气中硫化氢含量的不同，有关学者提出不同的分类标准：

谌继红等人对国外大量含硫化氢气藏的调研分析和统计，将硫化氢含量（体积比）在 2%~5% 的称为含硫气藏；5%~20% 的称高含硫气藏；20% 以上者称特高含硫气藏；80%~90% 以上者命名为“纯”硫化氢气藏。

戴金星等人（1989）在对天然气分类中，根据天然气中硫化氢体积分量的多少划分为：

①0%~0.5%，微含硫化氢型气；

②0.5%~2.0%，低含硫化氢型气；

③2.0%~70%，高含硫化氢型气；

④70% 以上者称硫化氢型气。

Amursry 等人按天然气中硫化氢体积分量分为 5 个等级。四川气田天然气中硫化氢含量（体积比）一般在 0.01%~6.5% 之间，个别的气藏或气井不含硫化氢或硫化氢含量高达 32.31%（如卧 63 井）。根据四川气田天然气中含硫化氢的实际情况，参照上述分类，划分如下等级：

①小于 0.0014%，命名为无硫气，又称净气或甜气；

②0.0014%~0.3%，低含硫气或含相当量的二氧化碳时，统称为酸气；

③0.3%~1.0%，含硫气；

④1.0%~5.0%，中含硫气；

⑤5% 以上者为高含硫气。

2) 二氧化碳类气。世界上已发现不少二氧化碳纯气藏, 如我国广东的三水盆地、江苏泰兴的黄桥等。美国、保加利亚、罗马尼亚等都发现含二氧化碳高达 98% 以上的纯气藏。有的以二氧化碳为主, 伴生有甲烷和氮气, 而更多的则是在烃类气藏中有二氧化碳共存。

3) 氮类气。天然气中氮的含量变化很大, 从微量到以氮为主要成分。如我国鄂西、江汉等地区, 含氮量有的高达 80%~90%, 成为有开采价值的氮气藏。四川震旦系气藏天然气中氮气含量在 6%~9% (体积比), 其它层系的气藏都小于 2%, 一般在 1% 左右。

第二节 气体偏差系数 (Z)

天然气偏差系数又称压缩因子, 是指在相同温度、压力下, 真实气体所占体积与相同量理想气体所占体积的比值。天然气的偏差系数随气体组分不同及压力和温度的变化而变化。

天然气偏差系数有若干不同的计算关系式, 但其基本关系式是对应状态原理。范德华对应状态原理说明, 一种物质的物理参数是它对应临界点物性参数的函数。因此, 表示真实气体与理想气体性质偏差的气体偏差系数是相应压力 (p) 和温度 (T) 的对比压力 (p_r) 和对比温度 (T_r) 的函数:

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

式中 p_r ——对比压力, 指气体的绝对工作压力 p 与临界压力 p_c 之比, 即 $p_r = p/p_c$;

T_r ——对比温度, 指气体的绝对工作温度 T 与临界温度 T_c 之比, 即 $T_r = T/T_c$ 。

对天然气混合物, 工程上常应用拟对比压力 p_{pr} 和拟对比温度 T_{pr} 表示, 将混合气体视为“纯”气体, 利用对应状态原理, 就可求得 Z 值。拟对比参数定义如下:

拟对比压力: 气体的绝对工作压力 p 与拟临界压力 p_{pc} 之比, 即:

$$p_{pr} = p/p_{pc} = p/\sum y_i p_{ci}$$

拟对比温度: 气体的绝对工作温度 T 与拟临界温度 T_{pc} 之比, 即:

$$T_{pr} = T/T_{pc} = T/\sum y_i T_{ci}$$

以临界压力和临界温度下的偏差系数 Z_c 作为基础的 Z 系数关系式已应用了相当长的时间, 对不同的 Z_c 值用人工计算制作了各种计算图表。它能给出良好精度, 会使大多数状态方程获得计算机解。求取 Z 值的方程很多, 下面介绍几种常用方法。

1. Standing-Katz 偏差系数图

图 1-1 表示无硫 (不含 H_2S 和 CO_2) 天然气的 Z 作为 p_{pr} 和 T_{pr} 函数的相关图, 只要知道天然气的 p_{pr} 和 T_{pr} , 就能从图中的对应曲线上查出 Z 值。对含有微量非烃类, 如 N_2 的无硫气, 这种计算图一般来说是可靠的。

对于含 H_2S 和 CO_2 的天然气, 求其 Z 值有很多种校正方法。图 1-2 为应用校正系数 ϵ 来校正拟临界压力 p_{pc} 和拟临界温度 T_{pc} 的方法, ϵ 值还有下列计算公式, 即 $\epsilon = 66.67$

$[A^{0.9} - A^{1.6} + 8.33 (B^{0.5} - B^4)]$, A 是 H_2S 和 CO_2 的含量之和, B 是 H_2S 的含量, 这样可得:

$p'_{pc} = p_{pc} T'_{pc} / [T_{pc} B \epsilon (1 - B)]$ 和 $T'_{pc} = T_{pc} - \epsilon$ 。用 p'_{pc} 和 T'_{pc} 值, 计算对比压力和对比温度值, 再从 Standing-Katz 关系图中可获得含硫气体正确的 Z 系数值。

例 1-1 天然气组分如下表, 应用 Standing-Katz 的 Z 系数图求在 13.78MPa 和 366.48K 条件下的 Z 系数。

组分	摩尔分数 y_i	相对分子质量 M_i	临界压力 p_{ci} MPa	临界温度 T_{ci} K
C_1	0.9300	16.043	4.604	190.6
C_2	0.0329	30.070	4.880	305.4
C_3	0.0136	44.097	4.249	369.8
n- C_4	0.0037	58.124	3.796	425.2
i- C_4	0.0023	58.124	3.648	408.2
n- C_5	0.0010	72.151	3.368	469.7
i- C_5	0.0012	72.151	3.381	460.4
C_6	0.0008	86.178	3.012	507.4
C_7^+	0.0005	128.259	2.289	594.7
H_2	0.0140	28.013	3.399	126.3

解:

$$M = \sum y_i M_i = 17.54$$

$$\gamma_g = 17.54/28.97 = 0.6050$$

$$p_{pc} = \sum y_i p_{ci} = 4.58 \text{MPa}$$

$$T_{pc} = \sum y_i T_{ci} = 198.3 \text{K}$$

因此

$$p_{pr} = 13.78/4.58 = 3.01$$

$$T_{pr} = 366.48/198.29 = 1.848$$

由图 1-1 查得 $Z=0.905$ 。

组分	摩尔分数 y_i	临界压力 p_{ci} MPa	临界温度 T_{ci} K
C ₁	0.8910	4.604	190.6
C ₂	0.0265	4.880	305.4
C ₃	0.0190	4.249	369.8
n-C ₄	0.0030	3.796	425.2
i-C ₄	0.0020	3.648	408.2
N ₂	0.0065	3.399	126.3
CO ₂	0.0100	7.383	304.2
H ₂ S	0.0420	9.004	373.6

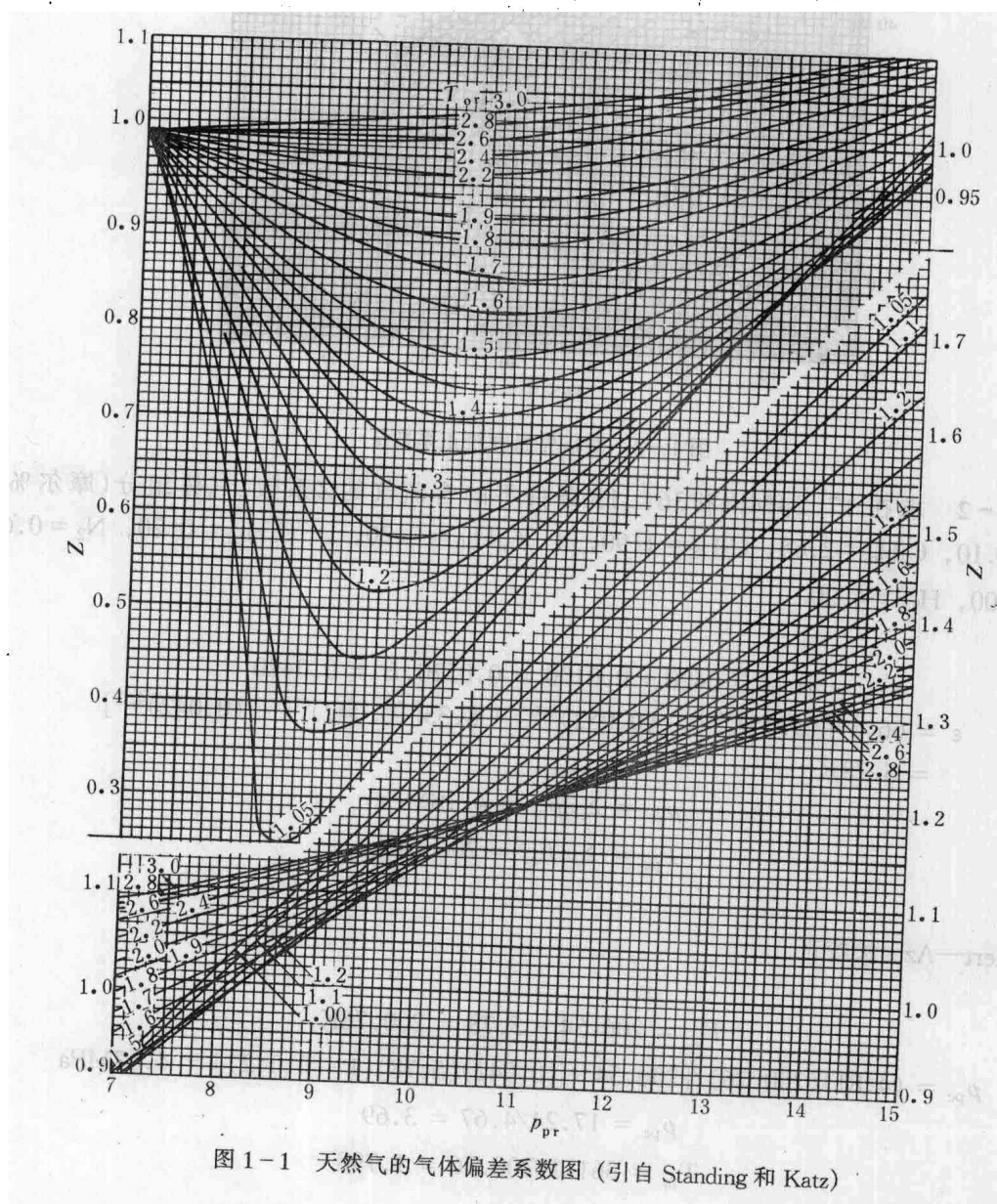


图 1-1 天然气的气体偏差系数图 (引自 Standing 和 Katz)