

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

CNPC

高等专科学校教学用书

# 采气工程

曾庆恒 主编

CAI  
QI  
GONG  
CHENG



石油工业出版社

北京)

5

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

登录号	137036
分类号	TE375
种次号	005

高等专科学校教学用书

# 采 气 工 程

曾庆恒 主编



石油大学0136837

石 油 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

全书共九章,包括:天然气的性质、气井流入动态、管流及嘴流动态、气井系统分析、常规气井和特殊气井的开采、排水采气工艺、天然气矿场集输、天然气流量计算和天然气净化等。

本书除可作为石油高等专科学校采油(气)工程及相近专业的教材外,还可作为成人教育、现场工程技术人员和生产管理人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

采气工程/曾庆恒主编.

北京:石油工业出版社,1999.8

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材  
高等专科学校教学用书

ISBN 7-5021-2654-6

I.采…

II.曾…

III.天然气开采-高等学校-教材

IV.TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第45837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)

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 12½印张 311千字 印1—1000

1999年8月北京第1版 1999年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-2654-6/TE·2121(课)

定价:18.00元

# 前 言

天然气作为优质能源和化工原料，在国民经济中占有的地位日趋重要。我国在“九五”期间加强了天然气勘探和开发力度，不断开拓天然气资源领域，进一步提高了天然气工业的技术水平。根据目前世界天然气工业发展形势和前景分析，在 21 世纪，天然气将有可能取代石油成为最重要的一次能源。根据我国具有的天然气资源和巨大开采潜力这一优势，我国的天然气工业在不远的将来定会自立于世界民族之林，展现出蓬勃发展的新局面。

本教材是根据中国石油天然气集团公司“九五”重点教材编写计划编写的。在编写过程中，我们始终培养“高等工程技术应用性人才”为指导思想，密切结合我国天然气开采技术和工艺水平，注重内容的先进性、针对性和应用性，并注重理论和公式的应用，淡化其来源和过程。

本书由曾庆恒担任主编，杨继盛教授担任主审。

参加本书编写的有：西南石油学院李颖川（第二章，第三章，第四章）；四川石油钻采技术研究院杨川东（第五章的第三节、第五节，第六章）；重庆石油高等专科学校曾庆恒（前言，第一章，第五章的第一节、第二节、第四节、第六节、第七章，第八章），石永新（第九章，习题及全书的图表收集、整理），徐春碧承担了部分图表的整理和资料的收集工作。

在本书的编写过程中，得到了四川石油钻采研究院、四川石油管理局川东开发公司、川西南矿区、川南矿区、川中油气公司及西南石油学院等单位的领导和同行们的大力支持和热情帮助，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，望读者批评指正。

编 者

1999 年 3 月

# 目 录

<b>第一章 天然气的性质</b> .....	( 1 )
第一节 天然气的组成及主要物性参数.....	( 1 )
第二节 天然气状态方程及偏差系数.....	( 7 )
第三节 天然气等温压缩系数及体积系数.....	( 14 )
第四节 天然气的粘度.....	( 15 )
第五节 天然气的热力学性质.....	( 18 )
习 题.....	( 20 )
<b>第二章 气井流入动态</b> .....	( 22 )
第一节 达西流 IPR 公式 .....	( 22 )
第二节 非达西流动产能公式.....	( 27 )
第三节 完井段的压降.....	( 31 )
第四节 水平气井的流入动态.....	( 35 )
习 题.....	( 37 )
<b>第三章 管流及嘴流动态</b> .....	( 38 )
第一节 气相管流的基本方程.....	( 38 )
第二节 气相管流压降计算方法.....	( 41 )
第三节 气液两相管流简介.....	( 49 )
第四节 气体通过油嘴的流动.....	( 59 )
习 题.....	( 61 )
<b>第四章 气井系统分析</b> .....	( 62 )
第一节 气井系统.....	( 62 )
第二节 气井的协调.....	( 63 )
第三节 节点系统分析.....	( 65 )
习 题.....	( 76 )
<b>第五章 常规气井和特殊气井的开采</b> .....	( 77 )
第一节 气井合理产量的确定.....	( 77 )
第二节 气井的工作制度.....	( 78 )
第三节 常规气井的开采工艺.....	( 81 )
第四节 常规气井的生产管理.....	( 88 )
第五节 凝析气藏气井的采气.....	( 95 )
第六节 含硫气藏气井的采气.....	( 98 )
习 题.....	( 103 )
<b>第六章 排水采气工艺</b> .....	( 104 )
第一节 排水采气工艺概述.....	( 104 )
第二节 优选管柱排水采气.....	( 106 )

第三节	泡沫排水采气工艺	(109)
第四节	气举排水采气工艺	(114)
第五节	其他排水采气工艺简介	(119)
习 题		(121)
<b>第七章</b>	<b>天然气矿场集输</b>	(122)
第一节	采气井站流程与集输气管网	(122)
第二节	天然气节流调压	(125)
第三节	天然气气液分离	(135)
习 题		(148)
<b>第八章</b>	<b>天然气流量计算</b>	(149)
第一节	差压法测气原理	(149)
第二节	气量计算公式	(151)
第三节	流量计和标准节流装置的选择计算	(162)
第四节	垫圈流量计和临界速度流量计	(168)
习 题		(171)
<b>第九章</b>	<b>天然气净化</b>	(173)
第一节	天然气的含水量	(173)
第二节	天然气水化物的生成及其预防	(175)
第三节	天然气的脱水	(185)
第四节	天然气脱硫	(189)
习 题		(193)
<b>参考文献</b>		(194)

# 第一章 天然气的性质

广义而言，自然界中天然生成的气体化合物或气体元素的混合物统称为天然气。石油工业所述天然气是指从油气田开采出来的可燃性气体，它在各种压力和温度下的物性参数（例如：密度、偏差系数、粘度等）是气藏工程和采气工程所必需的基本数据。

## 第一节 天然气的组成及主要物性参数

天然气是以石蜡族低分子饱和烃为主的烃类气体和少量非烃类气体组成的混合气。在组成天然气的组分中，甲烷（ $\text{CH}_4$ ）占绝大部分，乙烷（ $\text{C}_2\text{H}_6$ ）、丙烷（ $\text{C}_3\text{H}_8$ ）、丁烷（ $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ）和戊烷（ $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ）含量不多。戊烷以上（ $\text{C}_5+$ ）组分基本不含，或含量甚少。另外，天然气中还含有少量的非烃类气体，如硫化氢（ $\text{H}_2\text{S}$ ）、二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）、一氧化碳（ $\text{CO}$ ）、氮（ $\text{N}_2$ ）、氧（ $\text{O}_2$ ）、氢（ $\text{H}_2$ ）和水汽（ $\text{H}_2\text{O}$ ），以及硫醇（ $\text{R}\cdot\text{SH}$ ）、硫醚（ $\text{RSR}$ ）等有机硫化物；有时也含有微量的惰性气体，如氦（ $\text{He}$ ）和氩（ $\text{Ar}$ ）等。在标准状态下（温度  $T_{sc} = 273\text{K}$ ，压力  $p_{sc} = 0.101\text{MPa}$ ），甲烷和乙烷为气体；丙烷、丁烷也是气体，但经压缩冷凝后极易液化，家用液化气就是这类组分。戊烷和戊烷以上（ $\text{C}_5+$ ）的轻质油称为天然汽油。

### 一、天然气的组成及表示方法

#### 1. 天然气的组成及分类

组成天然气的各组分在其中所占数量的比例，称为天然气的组成。由于天然气的成因、形成过程和所处地质背景不同，决定了天然气组成的多样性；不同地区、不同储集层深度，其天然气组成不同；同一储集层不同气井或同井的不同层位，天然气组成也不相同（见表 1-1）。

表 1-1 我国某些油气田天然气的组成（据王鸣华《气藏工程》，1997）

油气田	产气地层	天然气组成(体积),%											拟临界温度, K	拟临界压力, MPa
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	二氧化碳	硫化氢	氢	氮	氩	其他		
庙高寺	嘉二 <sup>2</sup>	96.42	0.73	0.14	0.04	—	—	0.69	—	1.93	0.05	—	191.8	47.35
傅家庙	嘉三	95.77	1.10	0.37	0.16	—	0.08	—	0.07	2.24	—	—	191.3	46.96
宋家场	阳三 <sup>3-4</sup>	97.17	1.02	0.2	—	—	0.47	0.01	—	1.09	0.04	—	192.0	47.30
阳高寺	阳三 <sup>3</sup>	97.81	1.05	0.17	—	—	0.44	—	—	0.48	0.05	—	192.3	47.36
兴隆场	嘉三	96.74	1.07	0.32	0.16	0.076	0.045	—	0.008	1.54	0.042	0	192.1	47.09
威远	震旦系	96.80	0.11	—	—	—	4.437	0.879	—	8.10	0.316	0.027	190.8	47.57
卧龙河 1)	嘉四 <sup>3</sup>	94.12	0.88	0.21	0.05	0	3.970	—	0.11	0.49	—	0.07	198.5	48.88
卧龙河 2)	嘉二 <sup>3</sup>	95.97	0.55	0.10	0.03	0.04	0.35	1.52	0.006	1.39	0.03	0.014	193.9	47.87
中坝 1)	须二	91.15	5.8	1.59	0.71	0.20	0.54	—	0.05	0.10	—	—	203.2	407.48

续表

油气田	产气地层	天然气组成(体积),%											拟临界温度, K	拟临界压力, MPa
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	二氧化碳	硫化氢	氢	氮	氧	其他		
中坝2)	雷三	82.98	1.69	0.68	0.72	0.76	4.51	6.75	0.05	0.67	—	—	213.7	51.10
相国寺	石炭系	97.62	0.92	0.07	0.00	—	0.16	0.01	0.013	1.13	0.076	0.006	191.2	47.19
大庆	—	79.75	5.6	7.6	5.64	—	—	—	—	—	—	3.31	—	—
中原文南	—	82.44	7.98	3.24	2.15	1.35	0.42	—	—	0.94	—	1.41	—	—
大港板桥	—	68.55	11.22	6.42	3.66	1.77	1.00	—	—	0.54	—	6.84	—	—
塔里木	—	84.67	3.01	1.31	0.87	0.90	0.22	—	—	6.57	—	2.45	—	—

天然气组成决定了气藏的经济价值,也导致气藏开采方式和工艺技术上的差别。

天然气的组成不仅可作为气田分类的依据之一,也是天然气地面处理的重要数据。目前国内广泛采用气相色谱仪来分析天然气的组成。

天然气中常见组分的主要物理化学性质如表1-2所示,可供一般计算查用。

表1-2 天然气中常见组分的主要物理化学性质(据杨继盛《采气工艺基础》,1992)

组分	分子式	分子质量	临界温度, K	临界压力, MPa	沸点 (0.101MPa), °C	偏心因子
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.043	190.55	4.604	-161.52	0.0126
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	305.43	4.880	-88.58	0.0978
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	369.82	4.249	-42.07	0.1541
正丁烷	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	425.16	3.797	-0.49	0.2015
异丁烷	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	408.13	3.648	-11.81	0.1840
正戊烷	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	469.6	3.369	36.06	0.2524
异戊烷	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	460.39	3.381	27.84	0.2286
己烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.78	507.4	3.012	68.74	0.2998
庚烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.205	540.2	2.736	98.42	0.3494
氦	He	4.003	5.2	0.277	-268.93	0
氮	N <sub>2</sub>	28.013	126.1	3.399	-195.80	0.0372
氧	O <sub>2</sub>	31.999	154.7	5.081	-182.962	0.0200
氢	H <sub>2</sub>	2.016	33.2	0.297	-252.87	-0.219
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	304.19	7.382	-78.51	0.2667
一氧化碳	CO	28.010	132.92	3.499	-191.49	0.0442
硫化氢	H <sub>2</sub> S	34.076	373.5	9.005	-60.31	0.0920
水汽	H <sub>2</sub> O	18.015	647.3	22.118	100.00	0.3434

天然气可按以下三种依据分类。

(1) 天然气按矿藏特点可分为气田气、油田气和凝析气田气。



①气田气：在气藏中的天然气以气相存在，主要含甲烷，含量一般占 95% 以上（按体积百分组成计）；乙烷至丁烷含量不大，戊烷以上重烃含量甚微或不合。

②油田气（包括溶解气和气顶气）：也称油田伴生气，它是伴随原油共生，在油藏中与原油呈相平衡接触的气体。其特征是乙烷和丙烷含量高于气田气。

③凝析气田气：即凝析气田采出的天然气，除含大量的甲烷外，戊烷及戊烷以上的烃类含量较高，含有煤油和汽油的成分。

(2) 按天然气的烃类组成可分为干气和湿气。

干气和湿气的划分，目前世界上无统一标准，一般可按烃类气体的湿度系数进行划分。湿度系数是指乙烷以上 ( $C_{2+}$ ) 体积组成含量与甲烷体积组成含量的比值 ( $C_{2+}/C_1$ )。因此，将湿度系数小于 5% 的天然气称为干气；反之，称为湿气。

(3) 按天然气中酸气含量分类：根据天然气中含硫量的多少可划分为净气和酸气。把天然气含硫量少于  $1g/m^3$  的称为净气，大于  $1g/m^3$  的称为酸气。

## 2. 天然气的组成表示法

天然气组成一般有三种表示方法：体积组成、质量组成和摩尔组成。

(1) 体积组成。在标准状态下， $i$  组分的体积  $V_i$  与总体积  $V$  之比，称为该组分的体积组成，用  $y_i$  表示，即

$$y_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} = \frac{V_i}{V} \quad (1-1)$$

显然， $\sum y_i = 1$ 。

(2) 质量组成。 $i$  组分的质量  $m_i$  与总质量  $m$  之比，称为该组分的质量组成，用  $w_i$  表示，即

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} = \frac{m_i}{m} \quad (1-2)$$

显然， $\sum w_i = 1$ 。

(3) 摩尔组成。 $i$  组分的摩尔数  $N_i$  与总摩尔数  $N$  之比，称为该组分的摩尔组成，也用  $y_i$  表示，即

$$y_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^k N_i} = \frac{N_i}{N} \quad (1-3)$$

如考虑天然气为遵循阿伏加德罗定律的混合气体，此时天然气中任何组分的体积组成在数值上应等于该组分的摩尔组成。

质量组成和体积组成（摩尔组成）之间可以互相换算，换算时所用的基本公式为

$$y_i = \frac{w_i}{\sum \frac{w_i}{M_i}} \quad (1-4)$$

$$w_i = \frac{y_i M_i}{\sum (y_i M_i)} \quad (1-5)$$

式中  $M_i$ ——组分  $i$  的分子摩尔质量，其值可查表 1-2。

## 二、天然气的主要物性参数

在采气工程和天然气矿场集输中，天然气密度、分子质量、相对密度、临界参数等都是非常重要的物性参数。

### 1. 天然气的分子摩尔质量

天然气是由多种气体组成的混合气，其组分和组成无定值。天然气也没有惟一公认的分式，不像有分子式的纯气体可以从分子式计算出一个恒定的分子摩尔质量。但是，工程上为了计算上的需要，人为地将标准状态下（0℃，0.101MPa）体积为22.4L天然气所具有的质量定义为天然气的分子摩尔质量，其计算公式为

$$M_g = \sum y_i M_i \quad (1-6)$$

式中  $M_g$ ——天然气的分子摩尔质量，kg/kmol；

$y_i$ ——组分  $i$  的摩尔组成，%；

$M_i$ ——组分  $i$  的分子摩尔质量，kg/kmol。

### 2. 天然气的密度和相对密度

(1) 天然气密度。单位体积天然气的质量，称为天然气的密度，用符号  $\rho_g$  表示，则

$$\rho_g = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

式中  $\rho_g$ ——天然气的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$m$ ——天然气的质量，kg；

$V$ ——天然气的体积，m<sup>3</sup>。

显然，天然气密度不仅取决于天然气的组成，还取决于所处的压力和温度状态。在标准状态下，天然气的密度可由下式确定，即

$$\rho_g = \frac{pM_g}{RT} \quad (1-8)$$

式中  $\rho_g$ ——标准状态下天然气密度，kg/m<sup>3</sup>；

$p$ ——气体绝对压力，MPa；

$M_g$ ——天然气的分子摩尔质量，kg/kmol；

$T$ ——天然气绝对温度，K；

$R$ ——摩尔气体常数， $R = 0.008314 \frac{\text{MPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ 。

(2) 天然气相对密度。在标准状态下，天然气密度与干燥空气密度的比值称为相对密度，常用符号  $\gamma_g$  表示，则

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{air}}} \quad (1-9)$$

式中  $\gamma_g$ ——天然气的相对密度；

$\rho_{\text{air}}$ ——干燥空气的密度，kg/m<sup>3</sup>。

如将天然气和干燥空气视为理想气体，天然气的相对密度还可表示为

$$\gamma_g = \frac{M_g}{M_{\text{air}}} = \frac{M_g}{28.97} \quad (1-10)$$

式中  $M_{\text{air}}$ ——干燥空气的分子摩尔质量，kg/kmol。

显然，天然气的分子摩尔质量与相对密度成正比。

天然气的相对密度变化较大，对于一般干气，其相对密度约为 0.58~0.62，也有相对密度大于 1 的天然气。

在实际操作中，欲求天然气的分子摩尔质量，常常先测量出气样的相对密度，再用式 (1-10) 计算天然气的分子摩尔质量，即

$$M_g = M_{\text{air}} \gamma_g = 28.97 \gamma_g$$

在公式的推导中，凡遇到  $M_g$  时常用  $28.97 \gamma_g$  代替，使导出的公式仅包含  $\gamma_g$ ，更便于计算参数。

### 3. 天然气的临界参数

天然气的临界参数也随组成而变化，没有一恒定的数值，一般要通过实验的方法才能较准确地测定。采气工程上广泛采用拟临界压力和拟临界温度的概念来代表天然气临界参数，并分别用符号  $p_{pc}$  和  $T_{pc}$  表示。应该强调，拟临界参数并不等于其真实的临界参数。有以下几种方法计算天然气拟临界参数：

(1) 已知天然气的体积组成，可由下式计算

$$p_{pc} = \sum y_i p_{ci} \quad (1-11)$$

$$T_{pc} = \sum y_i T_{ci} \quad (1-12)$$

式中  $p_{pc}$ ——天然气的拟临界压力，MPa；

$T_{pc}$ ——天然气的拟临界温度，K；

$y_i$ ——天然气中组分  $i$  的体积组成；

$p_{ci}$ ， $T_{ci}$ ——天然气中组分  $i$  的临界压力 (MPa)、临界温度 (K)，可由表 1-2 查得。

(2) 已知天然气的相对密度  $\gamma_g$ ，可查图 1-1 近似地求得。当天然气中含有较多的非烃气体时，必须利用图中插图进行非烃校正。

(3) 图 1-1 中的曲线已拟合成以下公式，已知  $\gamma_g$ ，可选用公式计算。

$$\left. \begin{array}{l} \text{对于凝析气} \\ \gamma_g \geq 0.7 \\ \gamma_g < 0.7 \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_{pc} = 132.2 + 116.7 \gamma_g \\ p_{pc} = 5.102 - 0.689 \gamma_g \\ T_{pc} = 106.1 + 152.21 \gamma_g \\ p_{pc} = 4.778 - 0.248 \gamma_g \end{array} \quad (1-13)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{对于干气} \\ \gamma_g \geq 0.7 \\ \gamma_g < 0.7 \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_{pc} = 92.2 + 176.6 \gamma_g \\ p_{pc} = 4.881 - 0.3861 \gamma_g \\ T_{pc} = 92.2 + 176.7 \gamma_g \\ p_{pc} = 4.778 - 0.248 \gamma_g \end{array} \quad (1-14)$$

同时，Thoms 等人综合图 1-1 和另外一些新的数据，提出下面公式。

$$\left. \begin{array}{l} \text{对于干气} \\ T_{pc} = 93.333 + 180.556 \gamma_g - 6.944 \gamma_g^2 \\ p_{pc}' = 4.6627 + 0.1034 \gamma_g - 0.2586 \gamma_g^2 \end{array} \right\} \quad (1-15)$$

使用式 (1-15) 的条件为  $H_2S$  含量小于 3%， $N_2$  含量小于 5% 或非烃气体总含量不超过 7%。

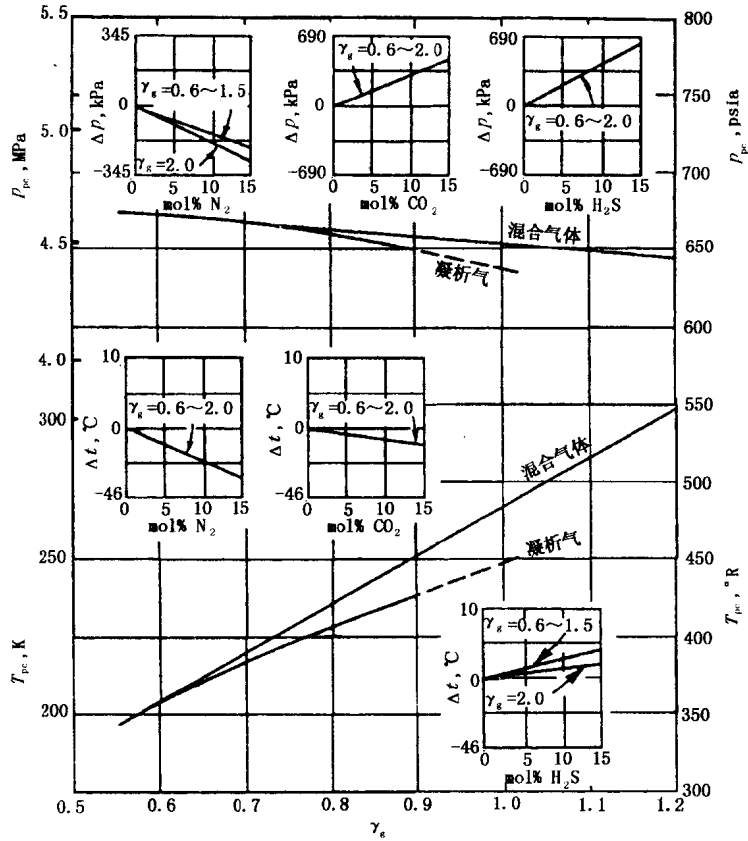


图 1-1 天然气拟临界参数 (据杨继盛《采气工艺基础》, 1992)

对于凝析气

$$\left. \begin{aligned} T_{pc} &= 103.9 + 183.3\gamma_g - 39.7\gamma_g^2 \\ p_{pc} &= 4.868 - 0.356\gamma_g - 0.077\gamma_g^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

(4) 另外, Wichery 和 Aziz 提出了一种非烃校正方法, 步骤如下:

①用查图或计算方法确定  $p_{pc}$  和  $T_{pc}$ 。

图 1-1 中  $\Delta t$ ,  $\Delta p$  指因酸性气体的摩尔百分含量而对天然气拟临界参数的校正值。

②用式 (1-17) ~ 式 (1-19) 计算校正后的拟临界温度  $T'_{pc}$  和  $p'_{pc}$ 。

$$T'_{pc} = T_{pc} - \epsilon \quad (1-17)$$

$$p'_{pc} = \frac{p_{pc} T'_{pc}}{T_{pc} + B(1-B)\epsilon} \quad (1-18)$$

$$\epsilon = \frac{120(A^{0.9} - A^{1.6}) + 15(B^{0.5} - B^4)}{1.8} \quad (1-19)$$

式中  $p'_{pc}$  ——校正后的拟临界压力, MPa;

$T'_{pc}$  ——校正后的拟临界温度, K;

$A$  ——天然气中  $H_2S$  和  $CO_2$  摩尔分数之和;

$B$  ——天然气中  $H_2S$  的摩尔分数;

$\epsilon$  ——拟临界温度校正系数。

## 第二节 天然气状态方程及偏差系数

采气工程中经常碰到气体的 PVT 运算, 为理解和掌握天然气状态变化规律, 本节简略地回忆一下理想气体的诸定律, 同时重点讨论气体状态方程和偏差系数。

### 一、理想气体定律

理想气体是一种假想气体, 其分子是不占有容积的质点, 且分子之间也没有作用力。反之, 分子本身所占的容积和分子之间的作用力都不可略去的气体称为实际气体。实际上, 只有在低压或较高温度下的气体才接近理想气体。采气工程中, 一般可将低压下的天然气视为理想气体进行状态计算, 基本可满足工程要求。

理想气体的一些定律, 在 17 和 18 世纪已由实验得出。

①波义耳定律: 一定量的气体在一定温度下, 其体积与压力成反比, 即

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

②盖、吕萨克定律: 一定量的气体在一定压力下, 其体积与绝对温度成正比, 即

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

③查理定律: 一定量的气体在体积不变时, 其压力与绝对温度成正比, 即

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

④阿佛加特罗定律: 体积相同的任何两种气体, 在相同状态 (压力、温度) 条件下, 具有相同的分子数目。

从阿佛加特罗定律可推得一个重要的结论: 即在相同状态 (压力、温度) 条件下 1kmol 的任何气体, 其所占的体积相等。在标准状态下, 其数值均为  $22.4\text{m}^3/\text{kmol}$ 。

### 二、实际气体状态方程式

自 1873 年范德华 (Van Der Waals) 两参数状态方程发表以来, 在过去的一个世纪里相继发表了不少的状态方程。近十几年来, 由于计算机的发展和推广, 极大地促进了这些方程的改进和完善, 更便于应用。本节选择了偏差系数方程和 BWR 方程加以介绍。

#### 1. 偏差系数状态方程

在一定温度和压力条件下, 一定质量的气体实际占有体积  $V_a$  与在相同条件下作为理想气体应该占有的体积  $V_i$  之比, 称为气体的偏差系数。对于天然气的偏差系数沿用同样定义, 该方程为

$$Z = \frac{V_a}{V_i} \quad (1-20)$$

对于理想气体,  $Z=1$ ; 对于实际气体,  $Z<1$  或  $Z>1$ 。

显然  $Z=f(y_i, p, T)$ , 即天然气的偏差系数随气体的组成、温度和压力的变化而变化。工程上运用对应状态原理证实: 在相同的对应状态下 (对比参数相等), 任何天然气的偏差系数几乎相等, 从而提出两参数图或表, 即  $Z=f(p_{pr}, T_{pr})$  图或表来解决确定偏差系数的问题。这将在后面再作详细介绍。

为了建立偏差系数状态方程, 讨论 1kmol 实际气体, 并将式 (1-20) 写成

$$V_i = \frac{V_a}{Z} \quad (1-21)$$

代入质量为 1kmol 的理想气体状态方程，删去注脚，即得质量为 1kmol 的实际气体状态方程

$$pV_m = ZRT \quad (1-22)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力，MPa；  
 $T$ ——气体的绝对温度，K；  
 $V_m$ ——1kmol 气体的体积， $m^3/kmol$ ；  
 $Z$ ——气体的偏差系数；  
 $R$ ——摩尔气体常数。

值得注意的是，摩尔气体常数  $R$  的单位和数值，在标准状态下，若  $p=0.101MPa$ ， $T=273.15K$ ， $Z=1$ ， $V_m=22.4m^3/kmol$ ，则

$$R = \frac{pV_m}{T} = \frac{0.101325 \times 22.4}{273} = 0.008314 \quad [MPa \cdot m^3 / (kmol \cdot K)]$$

$R$  的数值和单位与所用的  $p$ ， $V$ ， $T$  单位有关。如表 1-3 所示。需要注意的是，在进行气体状态运算时， $p$ ， $V$ ， $T$  的单位一经选定， $R$  的单位和数值也要与之相对应。 $n$  为气体的量。

表 1-3 通用气体常数  $R$  的单位和数值

$n$	$T$	$p$	$V$	$R$	
				数值	单位
kmol	K	MPa	$m^3$	0.008314	$MPa \cdot m^3 / (kmol \cdot K)$
kmol	K	Pa	$m^3$	8314	$J / (kmol \cdot K)$
kmol	K	bar	$m^3$	0.08314	$bar \cdot m^3 / (kmol \cdot K)$
lbmol	$^{\circ}R$	psia	$ft^3$	10.73	$psia \cdot ft^3 / (lbmol \cdot ^{\circ}R)$
lbmol	$^{\circ}R$	lbf/ft <sup>2</sup>	$ft^3$	1544	$lbf \cdot ft / (lbmol \cdot ^{\circ}R)$

由于任何一种气体在相同的标准状态下其摩尔体积的数值都相等，即  $R$  为同一值，因此  $R$  与气体种类无关，它的数值“通用”于任何组成的天然气。

讨论 1kg 质量的气体。如用气体的分子摩尔质量  $M$  除式 (1-22) 的两端，得

$$p \left( \frac{V_m}{M} \right) = Z \left( \frac{R}{M} \right) T \quad (1-23)$$

即  $p\nu = ZbT$

式中  $\nu$ ——气体的比体积， $m^3/kg$ ， $\nu = \frac{V_m}{M}$ ；

$b$ ——气体常数， $MPa \cdot m^3 / (kg \cdot K)$ ， $b = \frac{R}{M}$ 。

对于空气  $b = \frac{R}{M_{air}} = \frac{0.008314}{28.97} = 0.000287 \quad [MPa \cdot m^3 / (kg \cdot K)]$

对于天然气  $b = \frac{R}{M_g}$

显然，气体常数  $b$  与气体分子摩尔质量有关，即与气体种类有关，每一单组分气体都有自己的气体常数值。各气田所产天然气的分子摩尔质量都不相同，气体常数也就各不一样。

应该注意，切不可将摩尔气体常数  $R$  与气体常数  $b$  混为一谈。

由于第一节所指的天然气的密度为标准状态下的密度，而在任一条件下的天然气密度是一个十分重要的状态参数，因此式(1-23)用途之一就是用它求任何状态下天然气的密度。

因天然气的密度是比体积的倒数，从式(1-23)得

$$\rho_g = \frac{1}{v} = \frac{M_g p}{ZRT} = 3484.4 \times \frac{\gamma_g p}{ZT} \quad (1-24)$$

式中  $\rho_g$ ——任一状态下天然气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；其余符号意义同前。

如取  $p=0.101\text{MPa}$ ， $T=293\text{K}$ ，则空气密度  $\rho_{\text{air}}=1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ；

根据相对密度的定义，此标准状态下天然气的密度为  $\rho_g = \gamma_g \times 1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ；

如取  $p=0.101\text{MPa}$ ， $T=273\text{K}$ ，则空气密度  $\rho_{\text{air}}=1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。

式(1-22)和式(1-23)是偏差系数状态方程的两种基本表达式，还可扩展为下面两种表示方法。

对于  $n\text{kmol}$  气体，可用  $n$  分别乘式(1-22)的两端，则

$$\begin{aligned} p(nV_m) &= nZRT \\ pV &= nZRT \end{aligned} \quad (1-25)$$

式中  $V$ —— $n\text{kmol}$  气体的体积， $\text{m}^3$ 。

对于  $G\text{kg}$  气体，用  $G$  分别乘式(1-23)的两端，则

$$\begin{aligned} p(GV) &= GZbT \\ PV &= GZbT \end{aligned} \quad (1-26)$$

式中  $V$ —— $G\text{kg}$  气体的体积， $\text{m}^3$ ；

其他符号同式(1-23)。用式(1-23)~式(1-26)可进行天然气的PVT计算。

**例1-1** 某气田天然气的分子摩尔质量为  $17.2\text{kg}/\text{kmol}$ ，其中  $\text{H}_2\text{S}$  标准状态下的含量为  $18\text{mg}/\text{m}^3$ 。今有  $1000\text{m}^3$  天然气，其压力为  $0.7\text{MPa}$ ，温度为  $30^\circ\text{C}$ 。试求：(1)  $\text{H}_2\text{S}$  的体积组成；(2)  $\text{H}_2\text{S}$  在天然气中的体积；(3) 天然气的质量；(4) 天然气中单质硫的质量？

**解** (1) 计算出  $18\text{mg}$  的  $\text{H}_2\text{S}$  在标准状态下的体积，此体积与标准状态下  $1\text{m}^3$  天然气比值就是  $\text{H}_2\text{S}$  的体积组成，即

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{S}} &= \frac{G_{\text{H}_2\text{S}}RT}{M_{\text{H}_2\text{S}}p} = \frac{18 \times 10^{-6} \times 0.008314 \times 293.15}{34.076 \times 0.101325} \\ &= 0.000013 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$y_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{S}}}{\sum V_i} \times 100\% = \frac{0.000013}{1} \times 100\% = 0.0013\%$$

(2) 求  $\text{H}_2\text{S}$  在天然气中的体积。

天然气在标准状态下的体积为

$$V_{\text{sc}} = \frac{pVT_{\text{sc}}}{p_{\text{sc}}T} = \frac{0.7 \times 1000 \times 293.15}{0.101325 \times (273.15 + 30)} = 6681 \quad (\text{m}^3)$$

$\text{H}_2\text{S}$  在天然气中的体积为

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = y_{\text{H}_2\text{S}} V_{\text{sc}} = 0.0013\% \times 6681 = 0.087 \quad (\text{m}^3)$$

(3) 求天然气的质量，即

$$m_g = \frac{pV}{bT} = \frac{pVM}{RT} = \frac{0.7 \times 1000 \times 17.2}{0.008314 \times (273.15 + 30)}$$

$$= 4777 \text{ (kg)}$$

(4) 求天然气中 H<sub>2</sub>S 的质量

$$m_{\text{H}_2\text{S}} = 18 \times 6681 = 120258 \text{ (mg)}$$

$$= 0.12\text{kg}$$

在 0.12kg 的 H<sub>2</sub>S 中单质硫的质量为  $\frac{0.12 \times 32.06}{34.076} = 0.113 \text{ (kg)}$

在上述四种形式的偏差系数状态方程式 (1-23) ~ (1-26) 中, 偏差系数都随压力和温度而变化, 它本身并不是一个常数, 对这些方程直接积分或求导是困难的, 这是此类方程的弱点, 下面介绍另一类实际气体状态方程。

## 2. BWR 方程

1940 年 Benedict、Webb 和 Rabin 三人对 Beattie 和 Bridgeman 在 1928 年发表的状态方程作进一步的修正, 得出了包含 8 个系数的状态方程, 称为 BWR 状态方程。

BWR 方程的基本表达式为

$$p = \frac{RT}{V_m} + \frac{(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2})}{V_m^2} + \frac{(bRT - a)}{V_m^3} + \frac{aa}{V_m^6}$$

$$+ \frac{c}{T^2 V_m^3} \left(1 + \frac{\gamma}{V_m^2}\right) \exp\left(\frac{\gamma}{V_m^2}\right) \quad (1-27)$$

式中  $p$ ,  $V_m$ ,  $T$  和  $R$  的单位同式 (1-22)。

BWR 状态方程系数  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\alpha$  和  $\gamma$  对于纯组分为常数, 见表 1-4。对于混合气体皆为组分的函数。根据 Benedict 等人的建议, 这些参数可按下列混合规则求得, 从而使式 (1-27) 可用于天然气。

表 1-4 BWR 状态方程系数 (据杨继盛《采气工艺基础》, 1992)

组 分	$A_0$	$B_0$	$C_0 \times 10^{-5}$	$a$	$b$	$c \times 10^{-6}$	$\alpha \times 10^3$	$\gamma \times 10^2$
CH <sub>4</sub>	6995.25	0.6282401	275.763	2984.12	0.86732	498.106	511.172	153.934
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15670.7	1.00554	2194.27	20850.2	2.85393	6413.14	1000.44	302.790
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	25915.4	1.55884	6209.93	57248.0	5.77355	25247.8	2495.77	564.524
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	38587.4	2.20329	10384.7	117047	10.8890	55977.7	4414.96	872.447
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	38029.6	1.99211	12130.5	113705	10.2636	61925.6	4526.93	872.447
iC <sub>3</sub> H <sub>12</sub>	4825.36	2.56386	21336.7	225902	17.1441	136025	6987.77	1188.07
nC <sub>3</sub> H <sub>12</sub>	45928.8	2.51096	25917.2	246148	17.1441	161306	7439.92	1218.86
nC <sub>5</sub> H <sub>14</sub>	5443.4	2.84835	40556.2	429901	28.0032	296077	11553.9	1711.15
nC <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	66070.6	3.18782	57984.0	626106	38.9917	483427	17905.6	2309.42
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12593.6	0.891980	1602.28	15645.5	2.20678	4133.60	731.661	236.844
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	23049.2	1.36263	5365.97	46758.6	4.79997	20083.0	1873.12	469.325



$$\begin{aligned}
 A_o &= \left( \sum y_i A_{oi}^{\frac{1}{2}} \right)^2 & B_o &= \sum y_i B_{oi} & C_o &= \left( \sum y_i C_{oi}^{\frac{1}{2}} \right)^2 \\
 a &= \left( \sum y_i a_i^{\frac{1}{3}} \right)^3 & b &= \left( \sum y_i b_i^{\frac{1}{3}} \right)^3 & c &= \left( \sum y_i c_i^{\frac{1}{3}} \right)^3 \\
 \alpha &= \left( \sum y_i \alpha_i^{\frac{1}{3}} \right)^3 & \gamma &= \left( \sum y_i \gamma_i^{\frac{1}{2}} \right)^2
 \end{aligned}$$

千摩尔体积  $V_m$  的倒数称为千摩浓度  $\rho_m$  ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )，因此式 (1-27) 也可用千摩浓度  $\rho_m$  表示，即

$$\begin{aligned}
 p &= RT\rho_m + (B_o RT - A_o - \frac{C_o}{T^2})\rho_m^2 + (bRT - a)\rho_m^3 + aa\rho_m^6 \\
 &+ \frac{c\rho_m^3}{T^2}(1 + \gamma\rho_m^2)\exp(-\gamma\rho_m^2)
 \end{aligned} \quad (1-28)$$

式 (1-27) 和式 (1-28) 对于气相和液相都适用。用于气相时，8 个系数中的  $y_i$  即为气相组成， $\rho_m$  即为气相密度；用于液相时，8 个系数中的  $y_i$  即改为液相组成， $x_i$ ， $\rho_m$  为液相密度。

对于一般状态计算，式 (1-28) 更方便。欲求某一状态下的  $\rho_m$ ，可直接求解式 (1-28)。由于式 (1-28) 为  $\rho_m$  的高次方程，一般可用牛顿迭代法求解。下面给出牛顿迭代格式和所需的公式，即

$$\rho_m^{k+1} = \rho_m^k - \frac{F(\rho_m^k)}{F'(\rho_m^k)} \quad (1-29)$$

$$\begin{aligned}
 F(\rho_m) &= -p + RT\rho_m + (B_o RT - A_o - \frac{C_o}{T^2})\rho_m^2 + (bRT - a)\rho_m^3 \\
 &+ aa\rho_m^6 + \frac{c\rho_m^3}{T^2}(1 + \gamma\rho_m^2)\exp(-\gamma\rho_m^2)
 \end{aligned} \quad (1-30)$$

$$\begin{aligned}
 F' &= RT + (B_o RT - A_o - \frac{C_o}{T^2})(2\rho_m) + (bRT - a)(3\rho_m^2) + aa(6\rho_m^5) \\
 &+ \frac{c}{T^2}(3\rho_m^2 + 3\gamma\rho_m^4 - 2\gamma^2\rho_m^6)\exp(-\gamma\rho_m^2)
 \end{aligned} \quad (1-31)$$

### 三、天然气的偏差系数

前面已对天然气的偏差系数基本概念作了介绍，这里将讲述天然气的偏差系数的确定。天然气偏差系数确定的方法有：通过取气样用实验方法来测定得到；查 Standing 和 Katz 的图版或表确定；利用相关计算公式用计算机计算。利用实验方法测定天然气偏差系数在油层物理中介绍，这里不在重复。

#### 1. 根据 Standing 和 Katz 图表确定天然气偏差系数

1941 年 Standing 和 Katz 用天然气样进行恒质膨胀试验，测得不同温度下的  $Z = f(p)_T$  数据。根据天然气组成主要是化学特征相似的烷烃这一特征，成功地将对比状态定律扩大应用于天然气，从而得出天然气偏差系数  $Z$  与拟对比温度  $T_{pr}$  和拟对比压力  $p_{pr}$  的关系图版，通常称为两参数的  $Z$  函数图版，如图 1-2 所示。

确定天然气偏差系数的步骤如下：

- (1) 根据已知的天然气组成或相对密度，求  $p_{pc}$  和  $T_{pc}$ ；
- (2) 如含有非烃 ( $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$ )，应对  $p_{pc}$ ， $T_{pc}$  进行校正；
- (3) 根据给定的  $p$ ， $T$  值和  $p_{pc}$ ， $T_{pc}$  值，计算  $p_{pr}$ ， $T_{pr}$ ；