

杨继盛 编

采气工艺基础

石油工业出版社

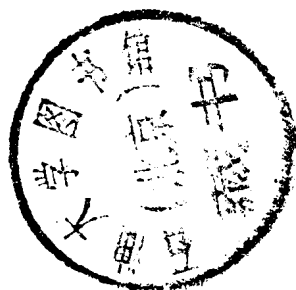
京)

| | |
|-----|--------|
| 登录号 | 127355 |
| 分类号 | TE 31 |
| 种次号 | 043 |

高等学校教学用书

采气工艺基础

杨继盛 编



石油0121196

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书为采油工程专业新增教材之一。前六章包括天然气的物性参数、气流入井、井筒管流、地面管流、气井生产系统分析和井场工艺，这是采气工艺的理论基础；后三章针对我国气田开发的复杂性和特殊性，分别介绍了凝析气田、水驱气田和含硫气田的开采工艺。

本书除作为石油高等学校、职大、函大采油工程及相近专业的教材外，亦可供气田工程技术和生产管理人员学习参考。

高等学校教学用书

采气工艺基础

杨继盛 编

*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(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

北京市朝阳区北苑印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 25 $\frac{1}{2}$ 印张 644 千字 印 4001 5000

1992 年 12 月北京第 1 版 1995 年 12 月北京第 3 次印刷

ISBN 7-5021-0785-1/TE·737 (课)

定价: 19.70 元

前 言

我国是世界上开采和利用天然气最早的国家。在下一世纪，天然气有可能取代石油而成为最重要的一次能源。预计我国天然气资源量非常雄厚，开采潜力很大。1987年10月，中国石油天然气总公司提出，要按照“油气并重”的方针，大力加强天然气的勘探和开发，这对改善我国能源结构，缓和供需运输紧张状况，支援农业摆脱当前局面和防治环境污染，具有十分重要的战略意义。

本教材为适应我国社会主义经济发展和采油专业教材建设的需要，在我院前几版教材和多年教学经验的基础上，搜集了近几年国外有关教材及文献中的新内容，根据中国石油天然气总公司下达的教材编写计划，应急重新编写而成的。在编写过程中，编者的想法是针对本科学生这一层次，密切结合我国气田的实际和国外最新信息，适当拓宽专业知识面，精选最主要的内容，力求讲清思路，学了能用，并便于编写计算机程序。本书计划60学时（含15个计算机学时）。在学习本课程之前，学生应学过水力学、渗流力学、工程热力学和物理化学。为便于学生学习使用，本书每章末均附有习题和主要参考文献。

我院李仕伦教授为本书审阅全稿，对本书提出了许多宝贵意见，这对编者给予了极大的帮助。

从编者积累素材到编写成书，一直得到四川石油管理局的许多领导、同行和校友们的指导和支持，仅在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不少缺点和问题，望批评指正。

西南石油学院

杨继盛

1989年10月

目 录

| | |
|-------------------------------|---------|
| 第一章 天然气的主要物性参数 | (1) |
| 第一节 天然气的组成、视分子量和相对密度 | (1) |
| 第二节 实际气体状态方程 | (9) |
| 第三节 天然气的压缩系数 | (17) |
| 第四节 天然气的等温压缩率 | (27) |
| 第五节 天然气的体积系数和膨胀系数 | (32) |
| 第六节 天然气的粘度 | (34) |
| 第二章 气井产能试井 | (44) |
| 第一节 稳定状态流动的气井产能公式 | (44) |
| 第二节 假稳定状态流动的气井产能公式 | (53) |
| 第三节 气井产能经验方程 | (59) |
| 第四节 气井产能试井工艺 | (61) |
| 第五节 完井方式对气流入井的影响 | (80) |
| 第六节 预测气井流入动态 | (86) |
| 第三章 气体井筒流动 | (92) |
| 第一节 气体稳定流动能量方程 | (92) |
| 第二节 气井井底压力计算 | (99) |
| 第三节 斜井和注气井井底压力计算 | (117) |
| 第四节 气液井拟单相流井底压力计算 | (122) |
| 第五节 气水同产井井底压力计算 | (126) |
| 第六节 气井流出动态曲线与油管动态曲线 | (145) |
| 第七节 气体通过气嘴的流动 | (147) |
| 第四章 集输气管流计算 | (155) |
| 第一节 水平单相 (气体) 管流 | (155) |
| 第二节 起伏地形单相 (气体) 管流 | (164) |
| 第三节 变径管、并行管和副管 | (172) |
| 第四节 地面 (水平、倾斜) 气液两相管流 | (180) |
| 第五章 气井生产系统分析 | (198) |
| 第一节 概述 | (198) |
| 第二节 普通节点分析 | (202) |
| 第三节 函数节点分析 | (212) |
| 第四节 射孔完井分析 | (214) |
| 第五节 气井生产系统产能预测 | (216) |
| 第六章 气井井场工艺 | (220) |
| 第一节 节流调压 | (220) |

| | | |
|-----|---------------------|-------|
| 第二节 | 气液分离 | (227) |
| 第三节 | 孔板差压流量计气体流量计算 | (235) |
| 第四节 | 天然气水化物 | (245) |
| 第五节 | 天然气脱水 | (259) |
| 第七章 | 凝析气田采气 | (266) |
| 第一节 | 烃类相态基本概念 | (266) |
| 第二节 | 气液平衡计算 | (272) |
| 第三节 | 凝析气井取样 | (284) |
| 第四节 | 凝析气田储量计算 | (287) |
| 第五节 | 凝析气田动态预测 | (294) |
| 第六节 | 凝析气田轻烃处理方案 | (305) |
| 第七节 | 回注干气主要工艺参数 | (322) |
| 第八章 | 排水采气 | (329) |
| 第一节 | 气井连续排液所需最小气量 | (330) |
| 第二节 | 泡沫排水采气 | (335) |
| 第三节 | 连续气举排水采气 | (344) |
| 第四节 | 其它排水采气方法综述 | (375) |
| 第九章 | 含硫气田采气 | (379) |
| 第一节 | 含硫天然气的危害性 | (379) |
| 第二节 | 含硫天然气中元素硫的沉积 | (382) |
| 第三节 | 天然气脱硫 | (388) |
| 第四节 | 橇装式脱硫装置 | (392) |
| 附录一 | 天然气压缩系数表 | (394) |
| 附录二 | 本书常用单位换算关系表 | (402) |

第一章 天然气的主要物性参数

天然气是从油气田开采的可燃气体。它在各种压力和温度下的物性参数（例如密度、压缩系数、粘度等），是气藏工程和采气工艺所必需的基本数据。本章首先介绍几种常用参数，其它的一些参数将结合有关章节再作适当的补充。

确定天然气在各种状态下的物性参数，可直接取气样通过常规实验方法或高压物性实验方法进行测定，也可通过计算的方法确定。前者在“油层物理”等课程中已经讲到，本章主要介绍后者。

第一节 天然气的组成、视分子量和相对密度

一、天然气的组成

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。对于一个油、气田来说，其所产的天然气含有哪些组分，每一组分又各占多少，这些对天然气的物性和品质影响极大。

在组成天然气的组分中，甲烷（ CH_4 ）占绝大部分，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。天然气中还含有少量的非烃类气体，如硫化氢（ H_2S ）、二氧化碳（ CO_2 ）、一氧化碳（ CO ）、氮（ N_2 ）、氧（ O_2 ）、氢（ H_2 ）和水汽（ H_2O ）等。天然气中有时也含有微量的稀有气体，如氦（ He ）和氩（ Ar ）等。

在标准状态下，甲烷和乙烷是气体。丙烷、正丁烷（ $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ）和异丁烷（ $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ）也是气体，但经压缩冷凝后极易液化，家用液化气（LPG）就是这类组分。戊烷和戊烷以上（常用符号 C_{5+} 表示）的轻质油称为天然汽油（NG）。在天然气的烃类气体中，除甲烷外，通称天然气液烃（NGL），因为通过一定的液化装置（露点装置或深冷装置）都能使它们液化。

各种组分在天然气中所占数量的比率，称为天然气的组成。

各类油、气田中，天然气的组成差异很大（参见表 1-1）。不同的气田或裂缝系统，天然气的组成也不同（见表 1-2）。

天然气的组成不仅可作为气田分类的依据之一，也是地面天然气处理的重要数据。

天然气中常见组分的主要物理化学性质如表 1-3 所示，可供一般计算查用。更详细的这类表可查本章文献[1]。

天然气分析报告中的真沸点馏分，例如庚烷以上组分（ C_{7+} ），属不确定组分，其临界压力、临界温度、分子量和偏心因子等物性参数，不能像确定组分（表 1-3 中所列组分）那样可从表中查出。

真沸点馏分的密度（或相对密度）和沸点可通过实验方法测得。已知其相对密度和沸点，其它物性参数常用一些相关式估算，下面介绍其中的两个相关式。

Lee-Kesler 相关式

表 1-1 有代表性的油、气田天然气组成

| 组 分 | 干 气 体积% | 凝析气 体积% | 油田伴生气 体积% |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| C ₁ | 96.00 | 75.00 | 27.52 |
| C ₂ | 2.00 | 7.00 | 16.34 |
| C ₃ | 0.60 | 4.50 | 29.18 |
| C ₄ | 0.30 | 3.00 | 22.55 |
| C ₅ | 0.20 | 2.00 | 3.9 |
| C ₆ | 0.10 | 2.50 | 0.47 |
| C ₇₊ | 0.80 | 6.00 | 0.04 |
| 合计 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| | $M_g = 17.584$ $\gamma_g = 0.607$ | $M_g = 27.472$ $\gamma_g = 0.948$ | $M_g = 38.568$ $\gamma_g = 1.331$ |

注：组分中下角标 1~7 表示碳原子数，即甲烷、乙烷……。

表 1-2 四川部分气田天然气组成

| 气田 | 天然气组成, 重量% | | | | | | | | |
|-----|------------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|
| | 甲烷 | 乙烷 | 丙烷 | 丁烷 | 二氧化碳+ 硫化氢 | 不饱和烃 | 一氧化碳 | 氢 | 氮 |
| 自流井 | 95.94 | 0.66 | 0.24 | | 0.67 | 0.07 | 0.05 | 0.02 | 0.67 |
| 邓井关 | 97.55 | 0.90 | 0.22 | 0.07 | 0.23 | 0.13 | 0.10 | 0.09 | 0.52 |
| 圣灯山 | 95.43 | 0.99 | 0.40 | | 1.53 | 0.13 | 0.18 | 0.02 | 1.53 |
| 黄家场 | 96.71 | 0.78 | 0.17 | | 1.04 | 0.03 | 0.02 | 0.18 | 0.95 |
| 阳高寺 | 95.54 | 1.41 | 0.37 | | 0.40 | 0.12 | 0.18 | 0.15 | 1.76 |
| 纳溪 | 96.62 | 1.34 | 0.47 | | 0.42 | 0.11 | 0.05 | 0.04 | 1.14 |
| 长桓坝 | 97.61 | 1.15 | 0.39 | | 0.24 | 0.11 | 0.14 | 0.06 | 0.41 |
| 黄瓜山 | 94.85 | 1.17 | 0.21 | 0.13 | 2.26 | | 0.10 | 0.73 | 0.25 |
| 龙洞坪 | 92.57 | 1.16 | 0.55 | 0.37 | 0.06 | 0.05 | 0.25 | 0.12 | 4.38 |
| 石油沟 | 94.74 | 2.59 | 1.01 | | 0.31 | 0.03 | 0.02 | | 0.89 |
| 东溪 | 95.59 | 1.71 | | | 1.91 | 0.23 | | | 0.51 |
| 卧龙河 | 90.29 | 0.48 | 0.15 | 0.15 | 3.76 | | | 0.06 | 0.48 |

$$T_c = [341.7 + 811.1\gamma + (0.4244 + 0.1174\gamma) (1.8T_b) + (0.4669 - 3.2623\gamma) \times 10^5 / (1.8T_b)] / 1.8 \quad (1-1)$$

$$\ln p_c = 3.3865 - 0.0566 / \gamma - (0.24244 + 2.2898 / \gamma + 0.11857 / \gamma^2) \times 10^{-3} (1.8T_b) + (1.4685 + 3.648 / \gamma + 0.47227 / \gamma^2) \times 10^{-7} (1.8T_b)^2 - (0.42019 + 1.6977 / \gamma^2) \times 10^{-10} (1.8T_b)^3 \quad (1-2)$$

表 1—3 天然气中常见组分主要物理化学性质

| 组 分 | 分子式 | 分子量 | 临界温度 K | 临界压力 MPa | 沸 点 (0.101325MPa) ℃ | 偏心因子 |
|------|----------------------------------|---------|-----------|-------------|---------------------------|--------|
| 甲 烷 | CH ₄ | 16.043 | 190.55 | 4.604 | -161.52 | 0.0126 |
| 乙 烷 | C ₂ H ₆ | 30.070 | 305.43 | 4.880 | -88.58 | 0.0978 |
| 丙 烷 | C ₃ H ₈ | 44.097 | 369.82 | 4.249 | -42.07 | 0.1541 |
| 正丁烷 | n-C ₄ H ₁₀ | 58.124 | 425.16 | 3.797 | -0.49 | 0.2015 |
| 异丁烷 | i-C ₄ H ₁₀ | 58.124 | 408.13 | 3.648 | -11.81 | 0.1840 |
| 正戊烷 | n-C ₅ H ₁₂ | 72.151 | 469.6 | 3.369 | 36.06 | 0.2524 |
| 异戊烷 | i-C ₅ H ₁₂ | 72.151 | 460.39 | 3.381 | 27.84 | 0.2286 |
| 己 烷 | C ₆ H ₁₄ | 86.178 | 507.4 | 3.012 | 68.74 | 0.2998 |
| 庚 烷 | C ₇ H ₁₆ | 100.205 | 540.2 | 2.736 | 98.42 | 0.3494 |
| 氦 | He | 4.003 | 5.2 | 0.277 | -268.93 | 0 |
| 氮 | N ₂ | 28.013 | 126.1 | 3.399 | -195.80 | 0.0372 |
| 氧 | O ₂ | 31.999 | 154.7 | 5.081 | -182.962 | 0.0200 |
| 氢 | H ₂ | 2.016 | 33.2 | 0.297 | -252.87 | -0.219 |
| 二氧化碳 | CO ₂ | 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 ₂ S | 34.076 | 373.5 | 9.005 | -60.31 | 0.0920 |
| 水 汽 | H ₂ O | 18.015 | 647.3 | 22.118 | 100.00 | 0.3434 |

$$\begin{aligned}
 M = & -12272.6 + 9486.4\gamma + (4.6523 - 3.3287\gamma) (1.8T_b) \\
 & + \left\{ (1 - 0.77084\gamma - 0.02058\gamma^2) [1.3437 - 720.79 / (1.8T_b)] \right\} \times 10^7 / (1.8T_b) \\
 & + \left\{ (1 - 0.80882\gamma + 0.02226\gamma^2) [1.8828 - 181.98 / (1.8T_b)] \right\} \\
 & \times 10^{12} / (1.8T_b)^3 \tag{1-3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega = & -7.904 + 0.1352K - 0.007465K^2 + 8.359\theta \\
 & + (1.408 - 0.01063K) / \theta \quad \text{当 } \theta > 0.8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{或} = & [-\ln(9.866p_c) - 5.92714 + 6.09648 / \theta + 1.28862 \ln(\theta) \\
 & - 0.169347\theta^6] / [15.2518 - 15.6875 / \theta - 13.4721 \ln(\theta) \\
 & + 0.43577\theta^6] \quad \text{当 } \theta < 0.8 \tag{1-4}
 \end{aligned}$$

$$K = (1.8T_b)^{1/3} / \gamma \tag{1-5}$$

$$\theta = T_b / T_c \tag{1-6}$$

式中 T_c ——临界温度, K;
 p_c ——临界压力, MPa;
 T_b ——沸点, K;
 γ ——相对密度;
 M ——平均分子量;
 ω ——偏心因子。

Winn-Sim-Daubert 相关式

$$T_c = \exp[4.2009T_b^{0.08615} \gamma^{0.04614}] / 1.8 \quad (1-7)$$

$$p_c = 6.1483 \times 10^6 T_b^{-2.3177} \gamma^{2.4853} \quad (1-8)$$

$$M = 5.805 \times 10^{-5} T_b^{2.3776} \gamma^{-0.9371} \quad (1-9)$$

$$\omega = \frac{3[\log(9.866p_c)]}{7[T_c/T_b - 1]} - 1 \quad (1-10)$$

例 1-1 已知天然气庚烷以上组分的沸点为 92.22°C , 相对密度为 0.7365, 分别用两种相关式计算 T_c 、 p_c 、 M 和 ω 。

解 (1) Lee-Kesler 相关式

$$\begin{aligned} T_c &= [341.7 + 811.1 \times 0.7365 + (0.4244 + 0.1174 \times 0.7365) \times (1.8 \times 365.22) \\ &+ (0.4669 - 3.26238 \times 0.7365) \times 10^5 \times (1.8 \times 365.22)^{-1}] / 1.8 \\ &= 545\text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln p_c &= 3.3865 - 0.0566 / 0.7365 - [0.24244 + 2.2898 / 0.7365 \\ &+ 0.11857 / (0.7365)^2] \times 10^{-3} \times (1.8 \times 365.22) + [1.4685 + 3.648 / 0.7365 \\ &+ 0.47227 / (0.7365)^2] \times 10^{-7} \times (1.8 \times 365.22)^2 - [0.42019 \\ &+ 1.6977 / (0.7365)^2] \times 10^{-10} \times (1.8 \times 365.22)^3 \\ &= 1.1775 \end{aligned}$$

$$p_c = 3.246\text{MPa}$$

$$\begin{aligned} M &= -12272.6 + 9486.4 \times 0.7365 + (4.6523 + 3.3287 \times 0.7365) (1.8 \times 365.22) \\ &+ [(1 - 0.77084 \times 0.7365 - 0.02058 \times 0.7365^2) (1.3437 - 720.79 / (1.8 \times 365.22))] \\ &\times 10^7 / (1.8 \times 365.22) + [(1 - 0.80882 \times 0.7365 + 0.0222 \times 0.7365^2) \\ &\times (1.8828 - 181.98 / (1.8 \times 365.22))] \times 10^{12} / (1.8 \times 365.22)^3 \\ &= 98.5 \end{aligned}$$

$$K = (1.8 \times 365.22)^{1/3} / 0.7365 = 11.8$$

$$\begin{aligned}\theta &= 365.22 / 545 \\ &= 0.67 \quad \theta < 0.8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= [-\ln(9.866 \times 3.246) - 5.92714 + 6.09648 / 0.67 \\ &\quad + 1.28862 \ln(0.67) - 0.169347 \times 0.67^6] / [15.2518 \\ &\quad - 15.6875 / 0.67 - 13.4721 \ln(0.67) + 0.43577 \times 0.67^6] \\ &= 0.318\end{aligned}$$

(2) Winn - Sim - Daubert相关式

$$\begin{aligned}T_c &= \left\{ \exp[4.2009 (365.22)^{0.08615} \times (0.7365)^{0.04614}] \right\} / 1.8 \\ &= 544\text{K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_c &= 6.1483 \times 10^6 \times (365.22)^{-2.3177} \times (0.7365)^{2.4853} \\ &= 3.306\text{MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M &= 5.805 \times 10^{-5} \times (365.22)^{2.3776} \times (0.7365)^{-0.9371} \\ &= 95.7\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{3[\log(9.866 \times 3.306)]}{7[(544 / 365.22) - 1]} - 1 \\ &= 0.3236\end{aligned}$$

天然气组成有质量组成、体积组成和摩尔组成三种表示方法。每种组成的数值可用分数(或小数)表示,也可用百分数表示。

1. 质量组成

如天然气由 k 种气体组成,则总质量 m 等于各组分质量 m_1, m_2, \dots, m_k 之总和,即

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_k = \sum_{i=1}^k m_i$$

其中, i 组分的质量 m_i 与总质量 m 之比值即为该组分的质量分数。用 W_i 表示,即

$$W_i = \frac{m_i}{m} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (1-11)$$

显然, $\sum_{i=1}^k W_i = 1$ 。

用质量百分数表示:

$$(\text{质量百分数})_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \times 100\% \quad (1-12)$$

2. 体积组成

如天然气由 k 种气体组成，在标准状态下，气体的总体积 V 等于各组分分体积 V_1, V_2, \dots, V_k 之总和，即

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_k = \sum_{i=1}^k V_i$$

其中，在标准状态下， i 组分的体积 V_i 与总体积 V 之比值即为该组分的体积分数。用 y_i 表示，即

$$y_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \quad (1-13)$$

显然， $\sum y_i = 1$ 。

用体积百分数表示：

$$(\text{体积百分数})_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \times 100\% \quad (1-14)$$

3. 摩尔组成

如天然气由 k 种气体组成，则总摩尔数 n 等于各组分摩尔数 n_1, n_2, \dots, n_k 之总和，即

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k = \sum_{i=1}^k n_i$$

其中， i 组分的摩尔数 n_i 与总摩尔数 n 之比值，即为该组分的摩尔分数。用 y_i 表示，即

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (1-15)$$

显然， $\sum_{i=1}^k y_i = 1$ 。

用摩尔百分数表示：

$$(\text{摩尔百分数})_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \times 100\% \quad (1-16)$$

对于理想气体，体积分数等于摩尔分数，所以式(1-13)和式(1-15)都用同一符号 y_i 表示。但在高压下，体积分数与摩尔分数就不是同一数值。

质量组成与体积组成(或摩尔组成)之间可以互相换算，换算时所用的基本公式是：

$$m_i = n_i M_i \quad \text{或} \quad n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (1-17)$$

式中 M_i —— i 组分的分子量，其值可查表1-3。

二、天然气的视分子量和相对密度

天然气是多种气体组成的混合气，其组分和组成无定值。天然气也没有一个唯一公认的分式，不能象有分子式的纯气体可以从分子式计算出一个恒定的分子量。但是，工程上为了计算上的需要，人为地将标准状态下1摩尔体积天然气的质量，定义为天然气的“视分子量”(Apparent Molecular Weight)或“平均分子量”(Average Molecular Weight)。根据Key混合规则，用公式表示为

$$M_g = \sum y_i M_i \quad (1-18)$$

式中 M_g ——天然气的视分子量，g/gmol 或 kg/kmol；

y_i ——组分 i 的摩尔组成，小数。

M_i ——组分 i 的分子量，g/gmol 或 kg/kmol。

显然，天然气的视分子量取决于天然气的组成。各气田的天然气的组成不同，视分子量也就不同。一般干气田的天然气的视分子量约为16.82~17.98。

众所周知，干燥空气也是由氧、氮等气体组成的混合气，其通用的视分子量也是由式(1-18)确定的。公认值为28.97，工程上常取29。

本书后面提到的天然气和空气的视分子量不再冠以“视”字，简称为分子量。但是应清楚理解天然气和空气的分子量毕竟是人们设想的概念。

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。定义为

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{air}}} \quad (1-19)$$

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；

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

$$\gamma_g = \frac{M_g}{M_{\text{air}}} = \frac{M_g}{28.97} \approx \frac{M_g}{29} \quad (1-20)$$

式中 M_{air} ——干燥空气的分子量。

显然，天然气的分子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。

在气田实际工作中，测量气体的相对密度比作气样全分析省时、省钱。因此，欲求天然气的分子量，常常先测量出气样的相对密度，再用式 (1-20) 计算出天然气的分子量。即

$$M_g = M_{\text{air}} \gamma_g = 28.97 \gamma_g \approx 29 \gamma_g \quad (1-21)$$

在公式推导中，凡遇到 M_g 时常用 $29\gamma_g$ 代替，使导出的公式仅包含 γ_g ，更便于计算参数。

例 1-2 已知天然气的摩尔分数如下所示：

| 组 分 | 摩尔分数 y_i |
|----------------|------------|
| C ₁ | 0.95 |
| C ₂ | 0.03 |
| C ₃ | 0.02 |

要求：①换算为质量分数；②再由质量分数换算为体积百分数；③求天然气的分子量；④求天然气的相对密度。

解 (1) 由所给出的摩尔分数换算为质量分数的计算步骤和结果列入下表：

| 组 分 | 摩尔分数 y_i | 分子量 M_i | 每摩尔气中组分 i 的质量 $m_i = y_i M_i$ | 质量分数 $W_i = m_i / \sum m_i$ |
|----------------|---------------|--------------|------------------------------------|--------------------------------|
| C ₁ | 0.95 | 16.042 | 15.240 | 0.895 |
| C ₂ | 0.03 | 30.07 | 0.902 | 0.053 |
| C ₃ | 0.02 | 44.10 | 0.882 | 0.052 |
| 合计 | | | 17.02 | 1.000 |

(2) 由所得质量分数换算为体积百分数如下表：

| 组 分 | 质量分数 W_i | 分子量 M_i | 每千克气中组分 i 的摩尔数 $n_i = W_i / M_i$ | 体积百分数 $(n_i / \sum n_i) \times 100\%$ |
|----------------|---------------|--------------|---------------------------------------|--|
| C ₁ | 0.895 | 16.042 | 0.0558 | 95 |
| C ₂ | 0.053 | 30.07 | 0.0018 | 3 |
| C ₃ | 0.052 | 44.10 | 0.0012 | 2 |
| 合计 | | | 0.0588 | 100 |

(3) 气体分子量:

$$M_g = \sum y_i M_i = 17.02 \text{ kg / kmol}$$

(4) 气体相对密度:

$$\gamma_g = \frac{M_g}{M_{\text{air}}} = \frac{17.02}{28.97} = 0.588$$

第二节 实际气体状态方程

气体状态方程描述一定质量的气体压力、绝对温度和气体体积之间的关系。若气体分子所占的体积与气体总体积相比可以忽略不计；气体分子之间没有吸引力和排斥力；气体分子之间的碰撞是弹性碰撞，则在上述三个假设的条件下，综合波义耳、查理和阿佛加德罗定律导出的理想气体状态方程是广为人知的基本定律，它主要适用于低压条件下。

采气工艺主要涉及高压条件下的实际气体。描述实际气体状态的方程也很多，目前气田上广泛应用的是压缩系数状态方程 (Compressibility Equation of State)。本节将重点介绍。

自 1873 年 Van der Waal 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，更方便于应用。目前公认较好的有 BWR 方程，以及 RK 方程、PR 方程、SW 方程和 PT 方程等三次型状态方程。西南石油学院发展的 LHSS 方程也是一个新的三次型状态方程。对为数众多的这些实际气体状态方程，本节选择了 RK 方程和 BWR 方程加以介绍，以拓宽知识面，并为后面章节的其它应用打下基础。

一、压缩系数状态方程

在一定温度和压力条件下，一定质量气体实际占有的体积与在相同条件下作为理想气体应该占有的体积之比，称为气体的压缩系数或 Z 系数 (Compressibility Factor or Z-Factor)。对于天然气的压缩系数同样沿用此定义，写为

$$Z = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{ideal}}} \quad (1-22)$$

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

天然气的压缩系数随气体组成、温度和压力而变化。工程上运用对比状态原理证实在相同的对比状态下，任何天然气的压缩系数极为近似（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 Z 系数的问题，这在下节再作详细介绍。

为建立压缩系数状态方程，讨论 1kmol 实际气体，并将式 (1-22) 写成

$$V_{\text{ideal}} = \frac{V_{\text{actual}}}{Z}$$

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

$$pV_m = ZRT \quad (1-23)$$

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 ——气体压缩系数;
 R ——通用气体常数,

$$R = 0.008314 \text{MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

这里值得注意的是通用气体常数 R 的单位和数值。在标准状态下, 若 $p_{sc} = 0.101325 \text{MPa}$, $T_{sc} = 273 \text{K}$, $Z_{sc} = 1$, $V_m = 22.4 \text{m}^3 / \text{kmol}$ 。则

$$\begin{aligned} R &= \frac{p_{sc} V_m}{T_{sc}} = \frac{0.101325 \times 22.4}{273} \\ &= 0.008314 \text{MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

若仅变换 p_{sc} 的单位和数值:

如 $p_{sc} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ (即 N / m^2), 则

$$R = \frac{1.01325 \times 10^5 \times 22.4}{273} = 8314 \text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

如 $p_{sc} = 1.01325 \text{bar}$, 则

$$R = \frac{1.01325 \times 22.4}{273} = 0.08314 \text{bar} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

从上述简单运算可以看到, 标准状态下的压力、温度、摩尔体积取什么数值和单位, R 也就有不同的数值和单位, 如表 1—4 所示。需要注意的是, 在气体状态运算时, p 、 V 、 T 的单位一经选定, R 的单位和数值也要与之相对应。

表 1—4 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 | $\text{MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ |
| kmol | K | Pa | m^3 | 8314 | $\text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ |
| kmol | K | bar | m^3 | 0.08314 | $\text{bar} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ |
| kmol | K | kgf / cm^2 | m^3 | 0.0848 | $(\text{kgf} / \text{cm}^2) \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ |
| kmol | K | kgf / cm^2 | m^3 | 848 | $\text{kgf} \cdot \text{m} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ |
| lbmol | R | psia | ft^3 | 10.73 | $\text{psia} \cdot \text{ft} / (\text{lbmol} \cdot \text{R})$ |
| lbmol | R | lbf / ft^2 | ft^3 | 1544 | $\text{lbf} \cdot \text{ft} / (\text{lbmol} \cdot \text{R})$ |

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”于任何一种气体，也“通用”于任何组成的天然气。

讨论 1kg 质量的气体。如用气体的分子量 M 除式 (1-23) 的两端，得

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

$$\text{则} \quad pv = ZbT \quad (1-24)$$

式中 v ——气体比容， m^3/kg ，

$$v = \frac{V_m}{M}$$

b ——气体常数， $\text{MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})$

$$b = \frac{R}{M}$$

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

$$\text{对于天然气, } b = \frac{R}{M_g}.$$

显然，气体常数 b 与气体分子量有关，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量都不相同，气体常数也就各不一样。

应该注意切不可将通用气体常数 R 与气体常数 b 混为一谈。

天然气的密度是一个十分重要的状态参数，提出式 (1-24) 的主要目的之一就是用它求天然气的密度。

由于天然气的密度是比容的倒数，从式 (1-24) 得

$$\rho_g = \frac{1}{v} = \frac{M_g p}{ZRT} = 3484.4 \frac{\gamma_g p}{ZT} \quad (1-25)$$

式中 ρ_g ——天然气的密度， kg/m^3 ；

γ_g ——天然气的相对密度。

如取 $p_{\text{sc}} = 0.101325 \text{MPa}$ ， $T_{\text{sc}} = 293 \text{K}$ ，则空气密度

$$\rho_{\text{air}} = \frac{M_{\text{air}} p}{RT} = \frac{28.97 \times 0.101325}{0.008314 \times 293} = 1.205 \text{kg}/\text{m}^3$$

根据相对密度的定义，此标准状态下天然气的密度为

$$\rho_g = 1.205 \gamma_g \quad (1-26)$$

式 (1-23) 和式 (1-24) 是压缩系数状态方程的两种基本表达式，还可扩展为下面两