

高等学校  
教学用书

# 采气实用计算



杨继盛 刘建仪 编

石油工业出版社

北京)

9

082448



内

高等学校教学用书

# 采气实用计算

杨继盛 刘建仪 编



200417806



石油工业出版社

(京)新登字082号

### 内 容 提 要

本书是为配合石油高校“采气工艺基础”课程教学而编写的教学参考书，目的在于拓宽课堂教学知识面，加强工科学生计算训练和应用专业知识解决实际问题的能力。

书中提供了采气工艺中常用的数学公式和16个比较重要的计算程序，同时，给出了115个计算实例。

本书可作为石油高校采油工程（含油藏工程）专业学生参考书，对在现场从事天然气开采的工程技术人员，无疑也是一本有实用价值的工具书。

高等学校教学用书

采气实用计算

杨继盛 刘建仪 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)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 12<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 印张 309 千字 印 1—2,000

1994 年 3 月北京第 1 版 1994 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1106-9/TE.1024(课)

定价：7.30元

## 前 言

对工科院校学生强化工程训练在当前具有重要意义，计算能力的训练和提高是其中一项重要内容。计算多、公式多和单位多是“采气工艺基础”这门课程教学中的特点，也是学生学习中的难点。要让学生将这门课真正学到手，课程中补充更多的计算方法，提供足够的计算实例，引导学生亲自上计算机运算是唯一切实有效的途径，本书正是为此目的而编写。

全书由流体参数、气藏储量、气井产能、井筒管流、地面输气、气井动态和井场工艺七个部分有关的计算方法组成，基本上概括了采气系统的主要运算内容。作为《采气工艺基础》的辅助教材，本书对一个求解目标，提供多种较新的解法。在每一部分中，不仅给出数学模型（计算公式）、计算步骤和必要程序，同时附有计算实例，看后就会自己计算。

全书由西南石油学院杨继盛主编，刘建仪编写了附录中的计算程序，并给出需计算机运算的例题答案。

西南石油学院李士伦教授为本书的主审，对本书提出了很多宝贵的建议和意见，在此向他表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，得到上级教材主管部门和学院领导的关心和支持，也得到很多同志的帮助，特向他们致以诚挚的谢意。

由于编写人员水平有限，错误和缺点在所难免，恳切欢迎读者批评指正。

编者

# 目 录

## 第一部分 储层流体性质

|                                         |        |
|-----------------------------------------|--------|
| 1 储层气体性质 .....                          | ( 1 )  |
| 1.1 天然气组成换算 .....                       | ( 1 )  |
| 1.2 真沸点馏分特征化 .....                      | ( 2 )  |
| 1.2.1 Lee-Kesler公式 .....                | ( 2 )  |
| 1.2.2 Winn-Sim-Daubert公式 .....          | ( 2 )  |
| 1.2.3 Watansiri-Owens-Starling公式 .....  | ( 3 )  |
| 1.2.4 Riazi-Daubert公式 .....             | ( 3 )  |
| 1.2.5 Cavett公式 .....                    | ( 3 )  |
| 1.3 天然气的平均分子量和相对密度 .....                | ( 5 )  |
| 1.3.1 平均分子量 .....                       | ( 5 )  |
| 1.3.2 相对密度 .....                        | ( 5 )  |
| 1.4 天然气的拟临界参数 .....                     | ( 6 )  |
| 1.4.1 已知天然气组成 .....                     | ( 6 )  |
| 1.4.2 已知天然气相对密度 .....                   | ( 6 )  |
| 1.5 非烃校正 .....                          | ( 7 )  |
| 1.5.1 Wichert-Aziz方法 .....              | ( 7 )  |
| 1.5.2 Car-Kobayshi-Burrows方法 .....      | ( 7 )  |
| 1.6 高分子量气体校正 .....                      | ( 8 )  |
| 1.7 天然气的偏差系数 .....                      | ( 10 ) |
| 1.7.1 Gopal方法 .....                     | ( 10 ) |
| 1.7.2 Carlile-Gillett方法 .....           | ( 10 ) |
| 1.7.3 Cranmer方法 .....                   | ( 11 ) |
| 1.7.4 Hall-Yarborough方法 .....           | ( 13 ) |
| 1.7.5 Dranchuk-Purvis-Robinson方法 .....  | ( 13 ) |
| 1.7.6 Dranchuk-Abu-Kassem方法 .....       | ( 14 ) |
| 1.7.7 Hankinson-Thomas-Phillips方法 ..... | ( 15 ) |
| 1.7.8 Sarem方法 .....                     | ( 15 ) |
| 1.8 天然气的密度、比容、千摩体积和千摩密度 .....           | ( 17 ) |
| 1.9 天然气的体积系数和膨胀系数 .....                 | ( 18 ) |
| 1.10 天然气的等温压缩系数 .....                   | ( 18 ) |
| 1.10.1 利用 Gopal 方程求 $C_1$ .....         | ( 18 ) |
| 1.10.2 Mattar-Brar-Aziz计算方法 .....       | ( 18 ) |
| 1.11 利用SRK状态方程计算气体参数 .....              | ( 19 ) |
| 1.12 天然气的粘度 .....                       | ( 20 ) |
| 1.12.1 Dempsey方法 .....                  | ( 20 ) |
| 1.12.2 Lee-Gonzalez-Eakin方法 .....       | ( 21 ) |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 1.12.3 Standing方法     | (21) |
| <b>2 储层液体性质</b>       | (23) |
| 2.1 原油泡点压力(饱和压力)      | (23) |
| 2.1.1 Standing方法      | (23) |
| 2.1.2 Vasquez-Beggs方法 | (23) |
| 2.1.3 Glaso方法         | (23) |
| 2.1.4 Marhoun方法       | (24) |
| 2.2 不饱和原油等温压缩系数       | (25) |
| 2.2.1 Vasquez-Beggs方法 | (25) |
| 2.2.2 Ahmed方法         | (25) |
| 2.3 标准状态原油密度          | (25) |
| 2.3.1 Katz方法          | (25) |
| 2.3.2 Ahmed方法         | (26) |
| 2.4 饱和原油密度            | (26) |
| 2.4.1 Standing方法      | (26) |
| 2.5 不饱和原油密度           | (27) |
| 2.5.1 定义式             | (27) |
| 2.5.2 Vasquez-Beggs方法 | (27) |
| 2.5.3 Ahmed方法         | (27) |
| 2.6 天然气在原油中的溶解度       | (28) |
| 2.6.1 Standing方法      | (28) |
| 2.6.2 Vasquez-Beggs方法 | (28) |
| 2.6.3 Glaso方法         | (28) |
| 2.6.4 Marhoun方法       | (28) |
| 2.7 饱和原油体积系数          | (29) |
| 2.7.1 定义式             | (29) |
| 2.7.2 Standing方法      | (29) |
| 2.7.3 Vasquez-Beggs方法 | (29) |
| 2.7.4 Glaso方法         | (30) |
| 2.7.5 Marhoun方法       | (30) |
| 2.7.6 Ahmed方法         | (30) |
| 2.8 不饱和原油体积系数         | (32) |
| 2.8.1 定义式             | (32) |
| 2.8.2 Vasquez-Beggs方法 | (32) |
| 2.8.3 Ahmed方法         | (32) |
| 2.9 原油总体积系数           | (33) |
| 2.9.1 定义式             | (33) |
| 2.9.2 Glaso方法         | (33) |
| 2.9.3 Marhoun方法       | (33) |
| 2.10 总等温压缩系数          | (34) |
| 2.10.1 定义式            | (34) |
| 2.10.2 不考虑气体溶解于液相     | (34) |
| 2.10.3 考虑气体溶解于液相      | (34) |
| 2.11 脱气原油粘度           | (35) |

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 2.11.1 Standing 方法                | (35) |
| 2.11.2 Beggs-Robinson方法           | (36) |
| 2.11.3 Glaso方法                    | (36) |
| 2.12 饱和原油粘度                       | (36) |
| 2.12.1 Standing方法                 | (36) |
| 2.12.2 Beggs-Robinson方法           | (37) |
| 2.12.3 Khan方法                     | (37) |
| 2.13 不饱和原油粘度                      | (38) |
| 2.13.1 Standing方法                 | (38) |
| 2.13.2 Vasquez-Beggs方法            | (38) |
| 2.13.3 Khan方法                     | (38) |
| 2.14 油气表面张力                       | (39) |
| 2.15 地层水的密度                       | (39) |
| 2.16 天然气在水中的溶解度                   | (40) |
| 2.17 地层水的体积系数                     | (40) |
| 2.18 水的等温压缩系数                     | (41) |
| 2.18.1 脱气水等温压缩系数                  | (41) |
| 2.18.2 饱和水等温压缩系数                  | (41) |
| 2.18.3 矿化度的影响                     | (41) |
| 2.19 地层水的粘度                       | (42) |
| 2.20 气水表面张力                       | (42) |
| 3 凝析油气体系性质                        | (43) |
| 3.1 凝析油气比                         | (43) |
| 3.2 复合凝析气组成                       | (44) |
| 3.2.1 已知体积气油比和气、油组成               | (44) |
| 3.2.2 已知体积气油比和油罐凝析油相对密度           | (44) |
| 3.3 凝析油体积系数                       | (45) |
| 3.4 凝析气体积系数 ( $\bar{p}_R > p_s$ ) | (46) |
| 3.5 凝析体系两相Z-系数                    | (47) |
| 3.6 凝析气的露点压力                      | (47) |
| 3.6.1 Nemeth-Kennedy方法            | (47) |

## 第二部分 气藏天然气储量

|                |      |
|----------------|------|
| 1 容积法估算天然气储量   | (50) |
| 1.1 气藏原始地质储量   | (50) |
| 1.2 定容气藏采出程度   | (50) |
| 1.3 气藏采收率      | (50) |
| 1.4 可采储量       | (51) |
| 1.5 储量丰度       | (51) |
| 1.6 单储系数       | (51) |
| 2 物质平衡法估算天然气储量 | (52) |
| 2.1 气藏物质平衡法    | (52) |
| 2.1.1 物质平衡法    | (52) |

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1.2 物质平衡直线法 .....                                                      | (52) |
| 2.2 异常高压气藏物质平衡法 .....                                                    | (54) |
| 2.2.1 物质平衡法 .....                                                        | (54) |
| 2.2.2 $p/Z$ 校正法 .....                                                    | (55) |
| 3 压降法估算天然气储量 .....                                                       | (56) |
| 3.1 式(2-17) .....                                                        | (56) |
| 3.2 式(2-19) .....                                                        | (56) |
| 3.3 式(2-20) .....                                                        | (56) |
| 4 产量递减分析法估算天然气储量 .....                                                   | (58) |
| 4.1 指数递减 .....                                                           | (58) |
| 4.1.1 指数递减判别方法 .....                                                     | (58) |
| 4.1.2 指数递减生产预测 .....                                                     | (59) |
| 4.2 调和递减 .....                                                           | (62) |
| 4.2.1 调和递减判别方法 .....                                                     | (62) |
| 4.2.2 调和递减生产预测 .....                                                     | (62) |
| 4.3 双曲线递减 .....                                                          | (64) |
| 4.3.1 双曲线递减判别方法 .....                                                    | (64) |
| 4.3.2 双曲线递减方程的确定 .....                                                   | (64) |
| 4.3.3 双曲线递减生产预测 .....                                                    | (64) |
| 5 矿场不稳定试井法估算天然气储量 .....                                                  | (66) |
| 6 凝析气田估算凝析气和凝析油储量 .....                                                  | (67) |
| 6.1 容积法 .....                                                            | (67) |
| 6.1.1 已知 $p_i$ 、 $T$ 、 $Z_i$ 和 $R_{voo}$ , 求 $G_{H_2}$ 、 $G_L$ .....     | (67) |
| 6.1.2 已知 $R_{voo}$ 、 $\gamma_i$ 和 $\gamma_o$ , 求 $G_{H_2}$ 和 $G_L$ ..... | (67) |
| 6.1.3 已知高压分离器油、气组成 $x_i$ 、 $y_i$ 和 $R$ .....                             | (68) |
| 6.2 物质平衡法 .....                                                          | (70) |

### 第三部分 气井产能试井

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 1 真实气体拟压力 .....         | (73) |
| 1.1 数值积分法 .....         | (73) |
| 1.2 半解析法 .....          | (73) |
| 2 常规回压试井 .....          | (75) |
| 3 等时试井 .....            | (77) |
| 4 修正等时试井 .....          | (79) |
| 5 一点法试井 .....           | (80) |
| 5.1 参考文献〔2〕方法 .....     | (80) |
| 5.2 参考文献〔3〕方法 .....     | (81) |
| 5.3 参考文献〔4〕方法 .....     | (81) |
| 6 不涉及稳定流动的试井 .....      | (82) |
| 6.1 $LIT$ 流动分析(一) ..... | (82) |
| 6.2 $LIT$ 流动分析(二) ..... | (85) |
| 7 预测气井流入动态 .....        | (88) |
| 7.1 参考文献〔5〕方法 .....     | (88) |

|               |        |
|---------------|--------|
| 7.2 参考文献〔7〕方法 | ( 88 ) |
|---------------|--------|

## 第四部分 井筒流体力学

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| 1 单相(气体)流体力学-静止气柱                 | ( 90 )  |
| 1.1 平均温度和平均气体偏差系数计算方法             | ( 90 )  |
| 1.2 Cullender和Smith计算方法           | ( 91 )  |
| 1.2.1 按井深 $H$ 计算(一步法)             | ( 91 )  |
| 1.2.2 将井深 $H$ 均分为上、下两段(两步法)计算     | ( 91 )  |
| 1.2.3 将井深 $H$ 等分为 $n$ 段, 计算井筒压力分布 | ( 92 )  |
| 1.3 Aziz计算方法                      | ( 93 )  |
| 2 单相(气体)流体力学-流动气柱                 | ( 95 )  |
| 2.1 平均温度和平均气体偏差系数计算方法             | ( 95 )  |
| 2.2 Cullender和Smith计算方法           | ( 96 )  |
| 2.2.1 按井深 $H$ 计算(一步法)             | ( 96 )  |
| 2.2.2 将井深 $H$ 均分为上、下两段(两步法)计算     | ( 96 )  |
| 2.2.3 将井深 $H$ 等分为 $n$ 段, 计算井筒压力分布 | ( 96 )  |
| 2.3 Aziz计算方法                      | ( 97 )  |
| 3 单相(气体)流体力学-环空流动                 | ( 98 )  |
| 4 单相(气体)流体力学-注气                   | ( 98 )  |
| 4.1 平均温度和平均气体偏差系数计算方法             | ( 98 )  |
| 4.2 Cullender和Smith计算方法           | ( 99 )  |
| 5 单相(气体)流体力学-斜井                   | ( 99 )  |
| 5.1 平均温度和平均气体偏差系数计算方法             | ( 99 )  |
| 5.2 Cullender和Smith计算方法           | ( 99 )  |
| 6 单相(气体)流体力学-气嘴                   | ( 100 ) |
| 6.1 孔眼                            | ( 100 ) |
| 6.2 井口气嘴                          | ( 101 ) |
| 6.3 井下安全阀(SSSV)                   | ( 102 ) |
| 7 拟单相流-流动气柱                       | ( 103 ) |
| 7.1 气中含凝析油                        | ( 103 ) |
| 7.2 气中含凝析油和水                      | ( 104 ) |
| 8 垂直管气液两相流                        | ( 105 ) |
| 8.1 Hagedorn-Brown方法(1965)        | ( 105 ) |
| 8.1.1 基本公式                        | ( 105 ) |
| 8.1.2 计算方法和步骤                     | ( 106 ) |
| 9 气井连续排液所需最小气量                    | ( 108 ) |
| 9.1 理论公式                          | ( 108 ) |
| 9.2 半经验公式                         | ( 109 ) |
| 10 管内冲蚀流速                         | ( 110 ) |

## 第五部分 输气、增压和管线存储

|            |         |
|------------|---------|
| 1 输气管内平均压力 | ( 112 ) |
|------------|---------|

|       |                     |       |
|-------|---------------------|-------|
| 2     | 输气管内平均温度            | (112) |
| 3     | 输气管沿线温度分布           | (112) |
| 4     | 输气管允许工作压力           | (113) |
| 5     | 水平输气管               | (114) |
| 5.1   | 基本公式(迭代公式)          | (114) |
| 5.2   | 非迭代公式               | (115) |
| 5.2.1 | Weymonth公式          | (115) |
| 5.2.2 | Panhandle (B) 式     | (115) |
| 5.2.3 | Clinedinst公式        | (115) |
| 5.2.4 | Cullender-Smith公式   | (115) |
| 6     | 起伏地形输气管(单相气体)       | (116) |
| 6.1   | 上山                  | (116) |
| 6.1.1 | 精确公式                | (116) |
| 6.1.2 | 近似公式                | (117) |
| 6.2   | 下山                  | (117) |
| 6.2.1 | 精确公式                | (117) |
| 6.2.2 | 近似公式                | (117) |
| 6.3   | n个坡度的输气管            | (117) |
| 6.3.1 | 精确公式                | (117) |
| 6.3.2 | 近似公式                | (118) |
| 7     | 气液两相管流(水平管、倾斜管)     | (120) |
| 7.1   | Beggs-Brill方法(1973) | (120) |
| 7.1.1 | 基本公式                | (120) |
| 7.1.2 | 计算方法和步骤             | (122) |
| 8     | 压缩天然气所需功率           | (127) |
| 8.1   | 往复式压缩机              | (127) |
| 8.2   | 离心式压缩机              | (129) |
| 9     | 管线存储                | (129) |
| 9.1   | 基本公式                | (129) |
| 9.2   | 计算步骤                | (130) |

## 第六部分 井口产能和生产动态预测

|     |                                       |       |
|-----|---------------------------------------|-------|
| 1   | 气井井口产能                                | (132) |
| 1.1 | 井口流压对产能的影响                            | (132) |
| 1.2 | 油管直径对产能的影响                            | (132) |
| 1.3 | 井下气嘴对产能的影响                            | (133) |
| 1.4 | 井下安全阀(SSSV)对产能的影响                     | (133) |
| 2   | 气井生产动态预测                              | (134) |
| 2.1 | $p_{ij} = \text{常数}, q_o = \text{常数}$ | (134) |
| 2.2 | $p_{ij} = \text{常数}$ , 产气量不限制         | (135) |
| 2.3 | $q_o = \text{常数}$                     | (135) |
| 2.4 | $q_o = \frac{1}{4} (AOF)$             | (136) |

## 第七部分 井场工艺计算

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 1 天然气部分冷凝计算 .....          | (142) |
| 1.1 SHBWR状态方程 .....        | (142) |
| 1.2 SRK状态方程 .....          | (143) |
| 2 节流温降的计算 .....            | (144) |
| 3 水化物生成条件的预测 .....         | (145) |
| 3.1 统计热力学方法 .....          | (145) |
| 3.2 Пономарев Г.В.方法 ..... | (147) |
| 3.3 水化物P-T图回归公式 .....      | (147) |
| 4 天然气流量计算 .....            | (148) |
| 4.1 孔板差压计流量计算 .....        | (148) |
| 4.2 临界流速流量计流量计算 .....      | (150) |
| 4.3 垫圈流量计流量计算 .....        | (151) |

# 第一部分 储层流体性质

## 1 储层气体性质

### 1.1 天然气组成换算

天然气是混合气，其组成有三种表示方法，即体积分数、摩尔分数和质量分数。对理想气体，体积分数与摩尔分数等值。

从质量分数换算为体积或摩尔分数：

$$y_i = \frac{(W_i/M_i)}{\sum(W_i/M_i)} \quad (1-1)$$

反之，从体积或摩尔分数换算为质量分数：

$$W_i = \frac{(y_i M_i)}{\sum(y_i M_i)} \quad (1-2)$$

式中  $M_i$ ——天然气中组分*i*的分子量；

$y_i, W_i$ ——分别表示天然气中组分*i*的摩尔分数（或体积分数）和质量分数。

例1.1 已知天然气摩尔分数如下，换算为质量分数。

| 组 分            | 摩尔分数 $y_i$ | 组 分            | 摩尔分数 $y_i$ |
|----------------|------------|----------------|------------|
| C <sub>1</sub> | 0.65       | C <sub>4</sub> | 0.10       |
| C <sub>2</sub> | 0.10       | C <sub>5</sub> | 0.05       |
| C <sub>3</sub> | 0.10       |                |            |

解 计算步骤、结果列入下表

| 组 分            | $y_i$ | $M_i$ | $m_i = y_i M_i$ | $W_i = m_i / M$ |
|----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub> | 0.65  | 16.04 | 10.4260         | 0.3824          |
| C <sub>2</sub> | 0.10  | 30.07 | 3.0070          | 0.1103          |
| C <sub>3</sub> | 0.10  | 44.10 | 4.4100          | 0.1618          |
| C <sub>4</sub> | 0.10  | 58.12 | 5.8120          | 0.2132          |
| C <sub>5</sub> | 0.05  | 72.15 | 3.6075          | 0.1323          |
|                |       |       | $M = 27.2625$   |                 |

例1.2 已知天然气质量分数如下，换算为摩尔分数。

| 组 分            | 质量分数 $W_i$ | 组 分            | 质量分数 $W_i$ |
|----------------|------------|----------------|------------|
| C <sub>1</sub> | 0.4        | C <sub>4</sub> | 0.2        |
| C <sub>2</sub> | 0.1        | C <sub>5</sub> | 0.1        |
| C <sub>3</sub> | 0.2        |                |            |

解 计算步骤、结果列入下表

| 组 分            | $W_i$ | $M_i$ | $n_i=W_i/M_i$ | $y_i=n_i/n$ |
|----------------|-------|-------|---------------|-------------|
| C <sub>1</sub> | 0.4   | 16.04 | 0.02494       | 0.6626      |
| C <sub>2</sub> | 0.1   | 30.07 | 0.00333       | 0.0885      |
| C <sub>3</sub> | 0.2   | 44.10 | 0.00454       | 0.1206      |
| C <sub>4</sub> | 0.2   | 58.12 | 0.00344       | 0.0914      |
| C <sub>5</sub> | 0.1   | 72.15 | 0.00139       | 0.0369      |
|                |       |       | $n=0.03764$   |             |

## 1.2 真沸点馏分特征化

气体分析报告中的真沸点馏分（例如庚烷以上组分，用符号 C<sub>7+</sub>表示），属于不确定组分，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（例如甲烷、乙烷）那样，可以直接从有关的书籍或手册中查出。

通过实验方法可以测得真沸点馏分的密度（或相对密度）和沸点，则其临界压力、临界温度等另外一些物性参数，常用一些相关式计算。下面介绍其中几个。

### 1.2.1 Lee-Kesler公式（1976）

$$T_c = [341.7 + 811.1\gamma + (0.4244 + 0.1174\gamma)(1.8T_b) + (0.4669 - 3.2623\gamma)10^5 / (1.8T_b)] / 1.8 \quad (1-3)$$

$$\ln(p_c) = 3.3865 - 0.0566/\gamma - (0.24244 + 2.2898/\gamma + 0.11857/\gamma^2)10^{-3} \times (1.8T_b) + (1.4685 + 3.648/\gamma + 0.47227/\gamma^2)10^{-7} \times (1.8T_b)^2 - (0.42019 + 1.6977/\gamma^2)10^{-10} \times (1.8T_b)^3 \quad (1-4)$$

$$M = -12272.6 + 9486.4\gamma + (4.6523 - 3.3287\gamma)(1.8T_b) + [(1 - 0.77084\gamma - 0.02058\gamma^2)(1.3437 - 720.79/1.8T_b)]10^7 / (1.8T_b) + [(1 - 0.80882\gamma + 0.02226\gamma^2)(1.8828 - 181.98/1.8T_b)]10^{12} / (1.8T_b)^3 \quad (1-5)$$

当  $\varphi > 0.8$  时，

$$\omega = -7.904 + 0.1352K - 0.007465K^2 + 8.359\varphi + (1.408 - 0.01063K)/\varphi \quad (1-6)$$

当  $\varphi < 0.8$  时，

$$\omega = [-\ln(9.869p_c) - 5.92714 + 6.09648/\varphi + 1.28862\ln\varphi - 0.169347\varphi^6] / [15.2518 - 15.6875/\varphi - 13.4721\ln\varphi + 0.43577\varphi^6] \quad (1-7)$$

式中  $T_c$ ——真沸点馏分临界温度，K；

$p_c$ ——真沸点馏分临界压力，MPa；

$T_b$ ——真沸点馏分沸点，K；

$\gamma$ ——真沸点馏分相对密度；

$M$ ——真沸点馏分平均分子量；

$\omega$ ——真沸点馏分偏心因子；

$K$ ——Watson特性因子，

$$K = (1.8T_b)^{\frac{1}{3}} / \gamma$$

$\varphi$ ——对比沸点。

$$\varphi = T_b / T_c$$

### 1.2.2 Winn-Sim-Daubert公式（1980）

$$T_c = \exp[4.2009T_b^{0.08615}\gamma^{0.04614}] / 1.8 \quad (1-8)$$

$$p_c = 6.1483 \times 10^6 T_b^{-2.3177} \gamma^{2.4853} \quad (1-9)$$

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

Edmister计算 $\omega$ 公式 (1985):

$$\omega = \frac{3[\lg(9.869 p_c)]}{7[T_c/T_b - 1]} - 1 \quad (1-11)$$

式中符号同前。

### 1.2.3 Watansiri-Owens-Starling公式 (1985)

$$\ln T_c = -0.0009391 T_b + 0.03095 \ln M + 1.11067 \ln T_b \\ + M[0.078154 \gamma^{\frac{1}{2}} - 0.061061 \gamma^{\frac{1}{3}} - 0.016943 \gamma] \quad (1-12)$$

$$\ln V_c = 73.539550 - 129.8038 \gamma + 63.1750 \gamma^2 - 13.175 \gamma^3 \\ + 1.10108 \ln M + 42.1958 \ln \gamma \quad (1-13)$$

$$\ln p_c = 1.664945 + 0.00281255(T_c/V_c)^{0.8} - 4.84(M/T_c) - 0.15919(T_b/M) \quad (1-14)$$

$$\omega = [9.2217 \times 10^{-4} T_b + 0.507288(T_b/M) + 382.904/M \\ + 0.2419988 \times 10^{-5}(T_b/\gamma)^2 - 0.2165 \times 10^{-4} T_b \cdot M \\ + 0.2016 \times 10^{-4}(\gamma)(M)^2 - 80.649342(T_b)^{\frac{1}{3}}/(M) \\ - 0.00377998(T_b)^{\frac{2}{3}}/(\gamma)^2](T_b/M) \quad (1-15)$$

式中  $V_c$ ——临界体积,  $\text{m}^3/\text{kmol}$ ;

其余符号同前。

### 1.2.4 Riazi-Daubert公式 (1980)

$$T_c = 19.0623(T_b)^{0.58848}(\gamma)^{0.3595} \quad (1-16)$$

$$p_c = 5.5306 \times 10^6 (T_b)^{-2.3125}(\gamma)^{2.3201} \quad (1-17)$$

$$M = 1.6607 \times 10^{-4} (T_b)^{2.1962}(\gamma)^{-1.0164} \quad (1-18)$$

$$V_c = 5.5635 \times 10^{-4} (T_b)^{0.2896}(\gamma)^{-0.7666} \quad (1-19)$$

式中  $V_c$ ——比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

其余符号同前。

### 1.2.5 Cavett公式 (1964)

$$T_c = [768.071 + 1.7134\theta - 0.10834 \times 10^{-2}\theta^2 + 0.3889 \times 10^{-6}\theta^3 - 0.89213 \times 10^{-2}\theta D \\ + 0.53095 \times 10^{-6}\theta^2 D + 0.32712 \times 10^{-7}\theta^2 D^2]/1.8 \quad (1-20)$$

$$\lg(p_c) = 0.6675 + 0.9412 \times 10^{-3}\theta - 0.30475 \times 10^{-5}\theta^2 + 0.15141 \times 10^{-8}\theta^3 \\ - 0.20876 \times 10^{-4}\theta D + 0.11048 \times 10^{-7}\theta^2 D + 0.1395 \times 10^{-9}\theta^2 D^2 \\ - 0.4827 \times 10^{-7}\theta D^2 \quad (1-21)$$

式中  $\theta = [1.8(T_b - 273) + 32]$

$$D = \frac{141.5}{\gamma} - 131.5$$

其余符号同前。

例1.3 已知 $C_{7+}$ 组分的参数:  $T_b = 365.22\text{K}$ 、 $\gamma = 0.7365$ , 分别用以下方法计算 $T_c$ 、 $p_c$ 、 $M$ 和 $\omega$

- (1) Lee-Kesler方法;
- (2) Winn-Sim-Daubert方法;
- (3) Watansiri-Owens-Starling方法;

(4) Riazi-Daubert方法;

(5) Cavett方法。

解 (1) Lee-Kester方法

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

$$\begin{aligned}\ln p_c &= 3.3865 - 0.0566 / (0.7365) - [0.24244 + 2.2898 / (0.7365) \\&\quad + 0.11857 / (0.7365)^2] \times 10^{-3} (1.8 \times 365.22) + [1.4685 \\&\quad + 3.648 / 0.7365 + 0.47227 / (0.7365)^2] \times 10^{-7} (1.8 \times 365.22)^2 \\&\quad - [0.42019 + 1.6977 / (0.7365)^2] \times 10^{-10} (1.8 \times 365.22)^3 \\&= 1.775\end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}K &= (1.8 \times 365.22)^{\frac{1}{3}} / 0.7365 \\&= 11.8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi &= 365.22 / 545 \\&= 0.67\end{aligned}$$

因  $\varphi < 0.8$ , 用式 (1-7) 计算  $\omega$ :

$$\begin{aligned}\omega &= [-\ln(9.869 \times 3.246) - 5.92714 + 6.09648 / 0.67 + 1.28862 \ln(0.67) - 0.169347 \\&\quad \times 0.67^6] / [15.2518 - 15.6875 / 0.67 - 13.4721 \ln(0.67) + 0.43577 \times 0.67^6] \\&= 0.318\end{aligned}$$

(2) Winn-Sim-Daubert方法

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

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

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

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{3[\lg(9.869 \times 3.306)]}{7[(544/365.22) - 1]} - 1 \\&= 0.3236\end{aligned}$$

(3) Watansiri-Owens-Starling方法

$$\begin{aligned}\ln(T_c) &= -0.0009391 \times 365.22 + 0.03095 \ln(95.7) \\&\quad + 1.11067 \ln(365.22) + 95.7 [0.078154 (0.7365)^{\frac{1}{2}} \\&\quad - 0.061061 (0.7365)^{\frac{1}{3}} - 0.016943 (0.7365)] \\&= 6.303\end{aligned}$$

$$T_c = 546\text{K}$$

$$\begin{aligned} \ln(V_c) &= 73.539550 - 129.8038(0.7365) + 63.1750(0.7365)^2 - 13.175(0.7365)^3 \\ &\quad + 1.10108\ln(95.7) + 42.1958\ln(0.7365) \\ &= -0.9358 \end{aligned}$$

$$V_c = 0.3923\text{m}^3/\text{kmol}$$

$$\begin{aligned} \ln(p_c) &= 1.664945 + 0.00281255(546/0.3923)^{0.8} - 4.84(95.7/546) \\ &\quad - 0.15919(365.22/95.7) \\ &= 1.1295 \end{aligned}$$

$$p_c = 3.0941\text{MPa}$$

$$\begin{aligned} \omega &= [9.2217 \times 10^{-4}(365.22) + 0.507288(365.22/95.7) + 382.904/95.7 \\ &\quad + 0.2419988 \times 10^{-5}(365.22/0.7365)^2 - 0.2165 \times 10^{-4}(365.22 \times 95.7) \\ &\quad + 0.2016 \times 10^{-4}(0.7365) \times (95.7)^2 - 80.649342(365.22)^{\frac{1}{3}}/(95.7) \\ &\quad - 0.00377998(365.22)^{\frac{2}{3}}/(0.7365)^2](365.22/95.7) \\ &= 0.2332 \end{aligned}$$

(4) Riazi-Raubert方法

$$T_c = 19.0623(365.22)^{0.5884}(0.7365)^{0.3596} = 550\text{K}$$

$$p_c = 5.5305(365.22)^{-2.3125}(0.7365)^{2.3201} = 3.23\text{MPa}$$

$$M = 1.6607 \times 10^{-4}(365.22)^{2.1982}(0.7365)^{-1.0164} = 96.2$$

$$\begin{aligned} V_c &= 5.5635 \times 10^{-4}(365.22)^{0.2896}(0.7365)^{-0.7666} \\ &= 0.0039\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

(5) Cavett方法

$$\begin{aligned} T_c &= [768.071 + 1.7134 \times 198 - 0.10834 \times 10^{-2}(198)^2 + 0.3889 \times 10^{-6}(198)^3 \\ &\quad - 0.89213 \times 10^{-12}(198)(60.5) + 0.53095 \times 10^{-6}(198)^2(60.5) \\ &\quad + 0.32712 \times 10^{-7}(198)^2(60.5)^2]/1.8 \\ &= 543.5\text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg(p_c) &= 0.6675 + 0.9412 \times 10^{-3}(198) - 0.30475 \times 10^{-5}(198)^2 + 0.15141 \\ &\quad \times 10^{-8}(198)^3 - 0.20876 \times 10^{-4}(198)(60.5) + 0.11048 \times 10^{-7}(198)^2(60.5)^2 \\ &\quad + 0.1395 \times 10^{-9}(198)^2(60.5)^2 - 0.4827 \times 10^{-7}(198)(60.5)^2 \\ &= 0.5075 \end{aligned}$$

$$p_c = 3.22\text{MPa}$$

### 1.3 天然气的平均分子量和相对密度

#### 1.3.1 平均分子量

天然气是混合气体，无恒定的分子量，其平均分子量按Key规则计算：

$$M_g = \sum y_i M_i \quad (1-22)$$

式中  $M_g$ ——天然气的平均分子量，

$y_i, M_i$ ——天然气中组分*i*的摩尔分数和分子量。

#### 1.3.2 相对密度

如天然气与空气都取同一标准状态，天然气的相对密度可用下式表示：

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{air}} = \frac{M_g}{M_{air}} = \frac{M_g}{28.96} \approx \frac{M_g}{29} \quad (1-23)$$

式中  $\gamma_g$ ——天然气的相对密度；

$\rho_g, \rho_{air}$ ——同一标准状态下，天然气、空气的密度；

$M_g, M_{air}$ ——天然气、空气的分子量。

**例1.4** 求例1.2所给天然气的分子量和相对密度

$$\begin{aligned} \text{解 } M_g &= 0.65 \times 16.04 + 0.10 \times 30.07 + 0.10 \times 44.10 + 0.10 \times 58.12 + 0.05 \times 72.15 \\ &= 27.2625 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

$$\gamma_g = 27.2625 / 28.96$$

$$= 0.9414$$

## 1.4 天然气的拟临界参数

### 1.4.1 已知天然气组成

$$p_{pc} = \sum y_i p_{ci} \quad (1-24)$$

$$T_{pc} = \sum y_i T_{ci} \quad (1-25)$$

式中  $y_i$ ——天然气中组分*i*的摩尔或体积分数；

$p_{ci}$ ——组分*i*的临界压力，MPa；

$T_{ci}$ ——组分*i*的临界温度，K；

$p_{pc}$ ——天然气的拟临界压力，MPa；

$T_{pc}$ ——天然气的拟临界温度，K。

### 1.4.2 已知天然气相对密度

对于气  $\gamma_g \geq 0.7$

$$p_{pc} = 4.88 - 0.39\gamma_g \quad (1-26)$$

$$T_{pc} = 92.2 + 176.6\gamma_g \quad (1-27)$$

$\gamma_g < 0.7$

$$p_{pc} = 4.78 - 0.25\gamma_g \quad (1-28)$$

$$T_{pc} = 92.2 + 176.6\gamma_g \quad (1-29)$$

对凝析气  $\gamma_g \geq 0.7$

$$p_{pc} = 5.10 - 0.69\gamma_g \quad (1-30)$$

$$T_{pc} = 132.2 + 116.7\gamma_g \quad (1-31)$$

$\gamma_g < 0.7$

$$p_{pc} = 4.78 - 0.25\gamma_g \quad (1-32)$$

$$T_{pc} = 106.1 + 152.2\gamma_g \quad (1-33)$$

或采用Standing公式(1977)：

对于气

$$p_{pc} = 4.67 + 0.10\gamma_g - 0.26\gamma_g^2 \quad (1-34)$$

$$T_{pc} = 93.3 + 180.6\gamma_g - 6.9\gamma_g^2 \quad (1-35)$$

对凝析气

$$p_{pc} = 4.87 - 0.36\gamma_g - 0.08\gamma_g^2 \quad (1-36)$$

$$T_{pc} = 103.9 + 183.3\gamma_g - 39.7\gamma_g^2 \quad (1-37)$$