



油气田开发进修丛书

# 实用油藏工程方法

秦同洛 李 逦 陈元千 编著

石油工业出版社

(北京)

3

|     |          |
|-----|----------|
| 登录号 | - 087027 |
| 分类号 | TE 3     |
| 册次号 | 033      |

油气田开发进修丛书

# 实用油藏工程方法

秦同洛 李 盈  
陈元千 编著



石油工业出版社

(京)新登字082号

### 内 容 提 要

本书是油气田开发进修丛书之一。它简明扼要地介绍了油藏工程计算所需的储层流体物性和岩石物性的基本内容；从理论到实际应用，对矿场试井、水驱油机理、油田开发设计、动态预测和采收率计算等内容，进行了较为详细地叙述和推导；并对油藏评价和油田开发的调整问题，作了简要的分析与讨论。

本书虽是油藏工程师的进修教材，也可以作为与油藏工程有关的科研、教学和矿场部门的参考书。

DP36/10

油气田开发进修丛书

实用油藏工程方法

秦同洛 李 望  
陈元千 编著

\*

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印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 22 $\frac{1}{2}$ 印张 559千字 印2,001—4,800

1989年7月北京第1版 1992年12月北京第2次印刷

ISBN 7-5021-0258-2/TE·254

定 价：9.40 元

## 丛书出版前言

当前世界科学技术发展日新月异，每年发表的科技论文在二千万篇以上，而文献的数量几乎是以每十年翻一番的速度递增；涉及多学科的油气田开发的技术进展及文献积累也不例外。因而从七十年代开始，各主要石油国家都越来越重视知识更新；重视在职继续教育，注意改善和提高技术素质；重视信息资源的开发，以促进油气田开发的现代化。例如国际著名的石油工程师协会（SPE）持续出版了评述型的石油技术专论丛书；美国石油地质家协会（AAPG）发行了该会讲师团在世界各地巡回进行继续教育的专题讲座系列；法国石油研究院（IFP）出版了一系列的提高型油田开发技术专著；荷兰及英国壳牌国际石油公司（Shell）也将历年培训教材以石油科学进展丛书的名义陆续出版；西德也出版了一套便携式入门型石油地质及工程基础丛书。这些具有不同特色、水平、范围的丛书竞芳争艳，反映了国际石油界对智力投资和人才开发的重视。

我国因十年动乱造成石油教育的青黄不接，专业图书供应缺乏，脱产进修、技术讯息交流都存在不少困难；党的十一届三中全会以后，在北京和各油田都曾举办了各种形式的培训机构，但还远不能适应生产发展和技术进展的需要以及技术人员的自修要求。

中国石油学会石油工程学会根据上述情况，并根据北京油气田开发技术培训中心数年来的教学实践，决定邀请有关人员成立“油气田开发进修丛书”编委会，聘请学有专长和实践经验丰富的专家教授，撰写若干专题性著作，并将陆续出版为广大油气田开发技术队伍服务。第一批的选题包括：砂岩油藏的沉积学基础，气藏开发工程基础，油气田开发测井基础，油藏物理基础，渗流力学基础，试井分析理论基础，油藏工程分析方法，油藏数值模拟基础，自喷采油基础，机械采油基础，酸化压裂原理，分层注采工艺，油田化学基础以及提高油藏采收率方法等。今后还将按技术进展和生产及培训需要，继续增加选题，邀请更多人士参与丛书的编撰和审查。

丛书的读者对象是大专毕业和从事油气田开发实践的工程技术人员。它着眼于巩固专题基础，加强知识反馈，促进技术更新。它不同于高等学校教材，也不同于一般专著。丛书的各个专题将分系统、科学地介绍基本概念，基本理论与基本方法。力求理论联系生产实际，反映技术进展动向，阐明技术问题，同时将综合反映出油气田开发技术的多个侧面及其内在联系。

考虑到有关专业术语、符号、量制尚待统一制定，因此丛书的专业符号尽量采用国际比较通用的石油工程师协会（SPE）、测井分析家协会（SPWLA）的标准符号；量制则按国家颁布的标准以求一致；关于专业术语将尽量协调一致，避免一义数名、一名多义。

由于我们的工作经验不足，在编辑过程中可能会出现一些缺点和问题，请广大读者看后提出宝贵意见。

中国石油学会石油工程学会

一九八三年七月

## “油气田开发进修丛书”编委会

谭文彬    秦同洛    韩大匡    张朝琛    刘翔鄂  
王乃举    万仁甫    赵 芬    郑育琪    赵 钧

# 序 言

油藏工程是一门从总体上来认识和改造油(气)藏的技术学科。我们之所以称之为“总体”，是指它包括着两方面意思的一个完整的过程。一是认识和分析组成油藏的各个部分，它们的物理化学性质及其在油(气)开采中的作用；二是在开采过程中，油藏内部所发生的物理化学变化，它们的机制及其对油(气)开采的影响。油藏工程是一门高度综合的技术学科。它综合分析来自油藏地质、油藏物理、测井、试井和采油等方面的成果，以及所提供的信息资料。对油藏中发生的各种变化，从开采的角度上进行评价，作出预测，并根据这种预测提出相应的技术措施，目的是为了提高油(气)的采收率。油藏工程的发展与上述各种学科的发展有着密切的联系，既是它们发展的结果，又是在于提高油(气)采收率的需要。油藏工程从它的性质上来说，又是一门方法性很强的科学。近年来电子技术和电脑技术的发展，对油藏工程的进展起到了很大的作用。

本书主要讨论的内容有，与油气藏工程密切联系的储层流体物性、储层岩石物性和油藏评价，以及油气藏工程常用的分析方法，其中包括油气藏的物质平衡方程式、产量递减分析、试井、水驱油理论基础、确定采收率的方法和油藏开发与调整等。

当前世界上已有很多油田走完了二次采油的历程，进入了三次采油阶段。但是，现在的三次采油技术，除了稠油热蒸汽驱进入工业生产而外，其他各种方法均处于试验阶段。对于三次采油方法本身，目前还没有什么经过实际考验、行之有效、为众所公认的油藏工程方法。本书将不涉及三次采油方面的内容。

正如本书的书名所概括的那样，本书的编写内容要以实用为主。根据当前计算机技术的普及情况，书中除给出若干实用的曲线图表之外，还提供了许多相关经验公式，以供读者的选用。当然，也不可能将文献中发表过的各种相关经验公式，都收集在本书之中。根据我们的看法，书中所介绍的相关经验公式，已大体上能够满足油藏工程计算的需要。书中的例题，尽可能考虑到我国油田开发的实际情况，以及多年来我国的实际经验，使本书能够成为我国油田开发工作者的有用参考书。

本书是由三人的通力合作完成的。秦同洛教授、高级工程师完成的内容有：序言、第二章的第3节、第三章的第1至第4节、第十章，以及除第五章之外的各章小结和全书的最后校订。李 教授、高级工程师完成的内容为第七章和第八章。陈元千高级工程师完成的内容为：第一章、第二章的第1、2、4、5、6节、第三章的第5节和第四、五、六、九各章，以及本书的附录。

油藏工程是一门实用性较强的综合技术学科，由于我们个人的水平所限，书中的不当之处在所难免，敬请读者予以指正。

编著者 1988年6月北京

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第一章 储层流体物性</b> .....        | 1   |
| 第1节 地层天然气的物性 .....             | 1   |
| 第2节 地层原油的物性 .....              | 12  |
| 第3节 地层水的物性 .....               | 25  |
| 第4节 烃类的相态 .....                | 29  |
| 第5节 烃类系统划分的一般界限 .....          | 33  |
| 小结 .....                       | 34  |
| 参考文献 .....                     | 36  |
| <b>第二章 储层岩石物性</b> .....        | 37  |
| 第1节 孔隙度 .....                  | 37  |
| 第2节 渗透率 .....                  | 40  |
| 第3节 含油饱和度 .....                | 55  |
| 第4节 润湿性 .....                  | 56  |
| 第5节 毛管压力 .....                 | 58  |
| 第6节 岩石的有效压缩系数 .....            | 64  |
| 小结 .....                       | 65  |
| 参考文献 .....                     | 67  |
| <b>第三章 油藏评价</b> .....          | 68  |
| 第1节 油藏的概念 .....                | 68  |
| 第2节 油藏的热力学条件 .....             | 69  |
| 第3节 油藏的构造和油层的连续性 .....         | 72  |
| 第4节 油(气)藏的驱动方式 .....           | 75  |
| 第5节 油、气田的储量计算 .....            | 81  |
| 小结 .....                       | 90  |
| 参考文献 .....                     | 92  |
| <b>第四章 油藏物质平衡方程式</b> .....     | 93  |
| 第1节 油藏饱和类型和驱动类型的划分 .....       | 93  |
| 第2节 油藏物质平衡方程式的建立 .....         | 94  |
| 第3节 天然水侵量的计算方法 .....           | 99  |
| 第4节 物质平衡方程式的线性表达式及多解性的判断 ..... | 124 |
| 第5节 应用举例 .....                 | 127 |
| 小结 .....                       | 135 |
| 参考文献 .....                     | 137 |
| <b>第五章 气藏物质平衡方程式</b> .....     | 138 |
| 第1节 正常压力系统气藏的物质平衡方程式 .....     | 138 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 第2节 异常高压气藏的物质平衡方程式 .....     | 145        |
| 第3节 应用举例 .....               | 147        |
| 小结 .....                     | 152        |
| 参考文献 .....                   | 153        |
| <b>第六章 产量递减分析</b> .....      | <b>154</b> |
| 第1节 Arps 的递减类型 .....         | 155        |
| 第2节 递减类型的对比与判断 .....         | 160        |
| 第3节 应用举例 .....               | 168        |
| 小结 .....                     | 174        |
| 参考文献 .....                   | 175        |
| <b>第七章 试井</b> .....          | <b>176</b> |
| 第1节 基本微分方程式 .....            | 176        |
| 第2节 基本微分方程式的解 .....          | 178        |
| 第3节 无量纲化 .....               | 182        |
| 第4节 叠加原理和映射法 .....           | 183        |
| 第5节 压降试井 .....               | 188        |
| 第6节 压力恢复试井 .....             | 194        |
| 第7节 平均地层压力的确定 .....          | 200        |
| 第8节 注水井试井 .....              | 212        |
| 第9节 油藏非均质对试井结果的影响 .....      | 216        |
| 第10节 续流分析 .....              | 231        |
| 小结 .....                     | 239        |
| 参考文献 .....                   | 241        |
| <b>第八章 水驱油的理论基础及分析</b> ..... | <b>242</b> |
| 第1节 饱和度分布 .....              | 242        |
| 第2节 平面一维流动的产量公式 .....        | 248        |
| 第3节 面积波及系数 .....             | 250        |
| 第4节 油层的纵向非均质性 .....          | 258        |
| 第5节 体积波及系数 .....             | 264        |
| 第6节 各种井网的注水量 .....           | 266        |
| 第7节 注水动态预测方法 .....           | 268        |
| 小结 .....                     | 307        |
| 参考文献 .....                   | 308        |
| <b>第九章 确定采收率的方法</b> .....    | <b>309</b> |
| 第1节 影响采收率的因素 .....           | 309        |
| 第2节 确定采收率的方法 .....           | 311        |
| 第3节 应用举例 .....               | 325        |
| 小结 .....                     | 330        |
| 参考文献 .....                   | 332        |
| <b>第十章 油田开发调整</b> .....      | <b>334</b> |



|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第1节 层系调整 .....                 | 334 |
| 第2节 井网调整 .....                 | 335 |
| 第3节 驱动方式调整 .....               | 337 |
| 第4节 开采工艺调整 .....               | 338 |
| 小结 .....                       | 339 |
| 附录1 不同单位制的换算关系 .....           | 340 |
| 附录2 利用不同实用单位制表示的油藏工程常用公式 ..... | 342 |

# 第一章 储层流体物性

石油、天然气和水，是油、气藏中存在的主要流体，也是研究储层流体的主要对象。石油 (Petroleum) 是指以气相、液相或固相碳氢化合物为主的烃类混合物。在地层温度和地层压力条件下，以液相存在并含有少量非烃类的液体，称为原油 (Crude Oil)；在地层温度和地层压力条件下，以气相存在并含有少量非烃类的气体，称为天然气 (Natural gas)；在地层温度和地层压力条件下，以气相存在，当采至地面的常温常压下，可以分离出较多的凝析油，称为凝析气 (Condensate gas)。以三者为主体的储层，分别称为油藏、气藏和凝析气藏。

储层流体物性参数，是油、气藏工程计算的重要参数。本章将着重介绍这些参数的物性，并提供估算这些参数的相关经验公式。

## 第1节 地层天然气的物性

### 一、天然气的偏差系数及密度

由分子物理学可以写出，理想气体的状态方程式为：

$$pV = nRT \quad (1-1)$$

式中  $p$  —— 气体压力, MPa;  
 $V$  —— 气体的体积,  $m^3$ ;  
 $n$  —— 气体的摩尔量, kmol;  
 $R$  —— 气体常数,  $MPa \cdot m^3 / (kmol \cdot K)$ ;  
 $T$  —— 地层温度, K。

天然气是一种真实的气体，为适应此气体，将 (1-1) 式改写为：

$$pV = ZnRT \quad (1-2)$$

式中的  $Z$  叫做气体偏差系数，它表示在某一温度和压力条件下，同一质量气体的真实体积与理想体积之比值，即

$$Z = V_{\text{actual}} / V_{\text{ideal}} \quad (1-3)$$

由于  $n$  等于气体的质量除以气体的分子量，故 (1-2) 式又可写为：

$$pV = Z \frac{m}{M} RT \quad (1-4)$$

式中  $m$  —— 气体的质量, kg;  
 $M$  —— 气体的分子量, kg/kmol。

单位体积气体的质量为气体的密度，故由 (1—4) 式得：

$$\rho_g = \frac{m}{V} = \frac{pM}{ZRT} \quad (1-5)$$

式中的  $\rho_g$  为气体的密度，以  $\text{kg}/\text{m}^3$  表示。

气体的相对密度定义为，在标准温度 (293K) 和标准压力 (0.101MPa) 条件下，气体密度与干燥空气密度之比值，即

$$\gamma_g = \rho_g / \rho_{\text{air}} \quad (1-6)$$

在标准条件下，气体和空气的状态都可用理想气体定律表示，即可忽略  $Z$  的影响。因此，将 (1—5) 式的关系代入 (1—6) 式得：

$$\gamma_g = \frac{\frac{pM}{RT}}{\frac{pM_{\text{air}}}{RT}} = \frac{M}{M_{\text{air}}} = \frac{M}{28.97} \quad (1-7)$$

式中的  $M_{\text{air}}$  为空气的分子量，取为 28.97。

天然气是一种多组分的真实气体混合物，在应用 (1—4) 式描述它的状态时，必须考虑气体偏差系数的影响。而气体偏差系数是压力、温度和气体组分的函数。一般的实验室很少具有直接测定气体偏差系数的条件，而多采用 Standing-Katz 图版 (见图 1—1) 加以确定。

在图 1—1 上的  $p_{\text{pr}}$  和  $T_{\text{pr}}$ ，分别叫做拟对比压力和拟对比温度，并表示为：

$$p_{\text{pr}} = p / p_{\text{pc}} \quad \text{和} \quad T_{\text{pr}} = T / T_{\text{pc}} \quad (1-8)$$

式中的  $p_{\text{pc}}$  和  $T_{\text{pc}}$ ，分别叫做拟临界压力和拟临界温度。

根据天然气的摩尔组分分析数据，可以按照下面的关系式列表计算出天然气的拟临界压力、拟临界温度和视分子量的大小 (见表 1—1)。

$$p_{\text{pc}} = \sum X_i p_{\text{ci}} \quad (1-9)$$

$$T_{\text{pc}} = \sum X_i T_{\text{ci}} \quad (1-10)$$

$$M_g = \sum X_i M_i \quad (1-11)$$

式中  $X_i$  —— 第  $i$  气体组分的摩尔含量， $f$ ；  
 $p_{\text{ci}}$  —— 第  $i$  气体组分的临界压力，MPa；  
 $T_{\text{ci}}$  —— 第  $i$  气体组分的临界温度，K；  
 $M_i$  —— 第  $i$  气体组分的分子量， $\text{kg}/\text{kmol}$ 。

由表 1—1 计算结果得到， $p_{\text{pc}} = 4.618\text{MPa}$ 、 $T_{\text{pc}} = 198.39\text{K}$  和  $M_g = 17.5315$ 。将天然气的视分子量  $M_g$  的数值代入 (1—7) 式得该天然气的相对密度为：

$$\gamma_g = 17.5315 / 28.97 = 0.605$$

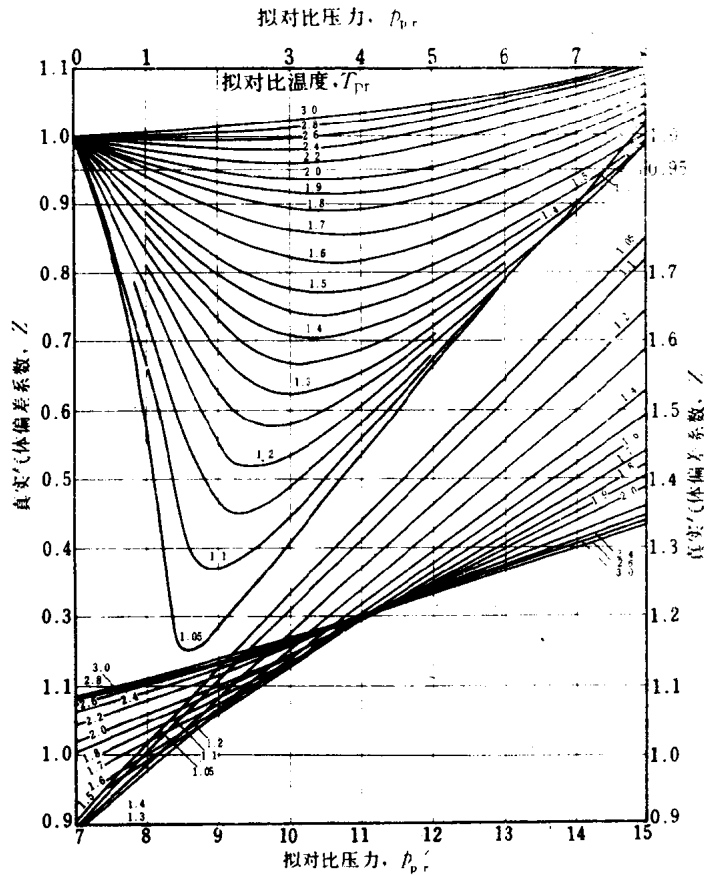


图1—1 确定气体偏差系数的Standing-Katz图版<sup>[1]</sup>

表1—1 确定气体分子量、拟临界温度和拟临界压力

| 组 分   | 摩尔含量<br>$X_i$ | 分子量<br>$M_i$ | $X_i M_i$ | 临界温度<br>$T_{ci}, K$ | $X_i T_{ci}$ | 临界压力<br>$p_{ci}, MPa$ | $X_i p_{ci}$ |
|---|---------------|--------------|-----------|---------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| N <sub>2</sub>                              | 0.0138        | 28.013       | 0.3866    | 126.11              | 1.740        | 3.3936                | 0.0468       |
| CH <sub>4</sub>                             | 0.9302        | 16.043       | 14.9232   | 190.67              | 177.36       | 4.6408                | 4.3169       |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>               | 0.0329        | 30.070       | 0.9893    | 305.50              | 10.05        | 4.8835                | 0.1607       |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>               | 0.0136        | 44.097       | 0.5997    | 370.00              | 5.03         | 4.2568                | 0.0579       |
| <i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>    | 0.0023        | 58.124       | 0.1337    | 408.11              | 0.94         | 3.6480                | 0.0084       |
| <i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>    | 0.0037        | 58.124       | 0.2151    | 425.39              | 1.57         | 3.7928                | 0.0140       |
| <i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>    | 0.0012        | 72.151       | 0.0866    | 460.89              | 0.55         | 3.3336                | 0.0040       |
| <i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>    | 0.0010        | 72.151       | 0.0722    | 470.11              | 0.47         | 3.3770                | 0.0034       |
| C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>              | 0.0008        | 86.178       | 0.0689    | 507.89              | 0.41         | 3.0344                | 0.0024       |
| C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> <sup>+</sup> | 0.0005        | 114.232      | 0.0571    | 540.22              | 0.27         | 7.0596                | 0.0035       |

$$M_g = \sum X_i M_i = 17.5315 \quad \sum X_i T_{ci} = 198.39 \quad \sum X_i p_{ci} = 4.618$$

通常遇到的烃类及非烃类气体的各项特定物性列于表1—2内。

表1—2 烃类及非烃类气体的物性常数表

| 组 分<br>名 称 | 代号                        | 分子式                                       | 分子量     | 沸点, ℃         |               | 临界压力<br>$p_c$ , MPa | 临界温度<br>$T_c$ , K | 在标准条件下<br>液体密度, g/cm <sup>3</sup> |
|------------|---------------------------|---|---------|---------------|---------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------|
|            |                           |   |         | 在0.101325MPa下 | 在0.101325MPa下 |                     |                   |                                   |
| 甲烷         | C <sub>1</sub>            | CH <sub>4</sub>                           | 16.043  | -161.50       | -182.48       | 4.6408              | 190.67            | 0.3                               |
| 乙烷         | C <sub>2</sub>            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>             | 30.070  | -88.61        | -183.27       | 4.8835              | 305.50            | 0.3564                            |
| 丙烷         | C <sub>3</sub>            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>             | 44.097  | -42.06        | -187.69       | 4.2568              | 370.00            | 0.5077                            |
| 异丁烷        | <i>i</i> -C <sub>4</sub>  | <i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>  | 58.124  | -11.72        | -159.61       | 3.6480              | 408.11            | 0.5631                            |
| 正丁烷        | <i>n</i> -C <sub>4</sub>  | <i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>  | 58.124  | -0.50         | -138.36       | 3.7928              | 425.39            | 0.5844                            |
| 异戊烷        | <i>i</i> -C <sub>5</sub>  | <i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>  | 72.151  | 27.83         | -159.91       | 3.3336              | 460.89            | 0.6247                            |
| 正戊烷        | <i>n</i> -C <sub>5</sub>  | <i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>  | 72.151  | 36.06         | -129.73       | 3.3770              | 470.11            | 0.6310                            |
| 正己烷        | <i>n</i> -C <sub>6</sub>  | <i>n</i> -C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>  | 86.178  | 68.72         | -95.32        | 3.0344              | 507.89            | 0.6640                            |
| 正庚烷        | <i>n</i> -C <sub>7</sub>  | <i>n</i> -C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>  | 100.205 | 98.44         | -90.58        | 2.7296              | 540.22            | 0.6882                            |
| 正辛烷        | <i>n</i> -C <sub>8</sub>  | <i>n</i> -C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>  | 114.232 | 125.67        | -56.77        | 2.4973              | 569.39            | 0.7068                            |
| 正壬烷        | <i>n</i> -C <sub>9</sub>  | <i>n</i> -C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>  | 128.259 | 150.78        | -53.49        | 2.3028              | 596.11            | 0.7217                            |
| 正癸烷        | <i>n</i> -C <sub>10</sub> | <i>n</i> -C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> | 142.286 | 174.11        | -29.64        | 2.1511              | 619.44            | 0.7342                            |
| 空气         | Air                       | N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>             | 28.964  | -194.28       | /             | 3.7714              | 132.78            | 0.856                             |
| 氧化碳        | CO <sub>2</sub>           | CO <sub>2</sub>                           | 44.010  | -186.43       | /             | 7.3787              | 304.17            | 0.827                             |
| 氦气         | He                        | He  | 4.003   | -372.52       | /             | 0.2289              | 5.278             | /                                 |
| 氢气         | H <sub>2</sub>            | H <sub>2</sub>                            | 2.016   | -459.73       | -259.35       | 1.3031              | 33.22             | 0.07                              |
| 硫化氢气       | H <sub>2</sub> S          | H <sub>2</sub> S                          | 34.076  | -315.74       | -82.93        | 9.0080              | 373.56            | 0.79                              |
| 氮气         | N <sub>2</sub>            | N <sub>2</sub>                            | 28.013  | -371.19       | -210.01       | 3.3936              | 126.11            | 0.808                             |
| 氧气         | O <sub>2</sub>            | O <sub>2</sub>                            | 31.999  | -389.22       | -218.79       | 5.0807              | 154.78            | 1.14                              |
| 水          | H <sub>2</sub> O          | H <sub>2</sub> O                          | 18.015  | 100           | 0             | 22.1286             | 647.33            | 1.0                               |

在许多情况下,天然气的组分是已知的,就可以按照上述的方法,计算天然的拟临界压力、拟临界温度和视分子量。但是,假若在矿场没有取得天然气的组分分析数据,而只测定了天然气的相对密度,那么,可以利用图1—2的关系,由天然气的相对密度查得天然气的拟临界压力和拟临界温度数值。

当确定天然气和凝析气的相对密度之后,也可采用如下的相关经验公式,计算天然气和凝析气的拟临界压力和拟临界温度:

(1)对于干气:

当  $\gamma_g \geq 0.7$  时<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.8815 - 0.3861\gamma_g \\ T_{pc} &= 92.2222 + 176.6667\gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

当  $\gamma_g < 0.7$  时<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.7780 - 0.2482\gamma_g \\ T_{pc} &= 92.2222 + 176.6667\gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

Standing (1981) 提供的美国加利福尼亚州的干气的相关经验公式为<sup>[3]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.6677 + 0.1034\gamma_g - 0.2586\gamma_g^2 \\ T_{pc} &= 93.3333 + 180.5556\gamma_g - 6.9444\gamma_g^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

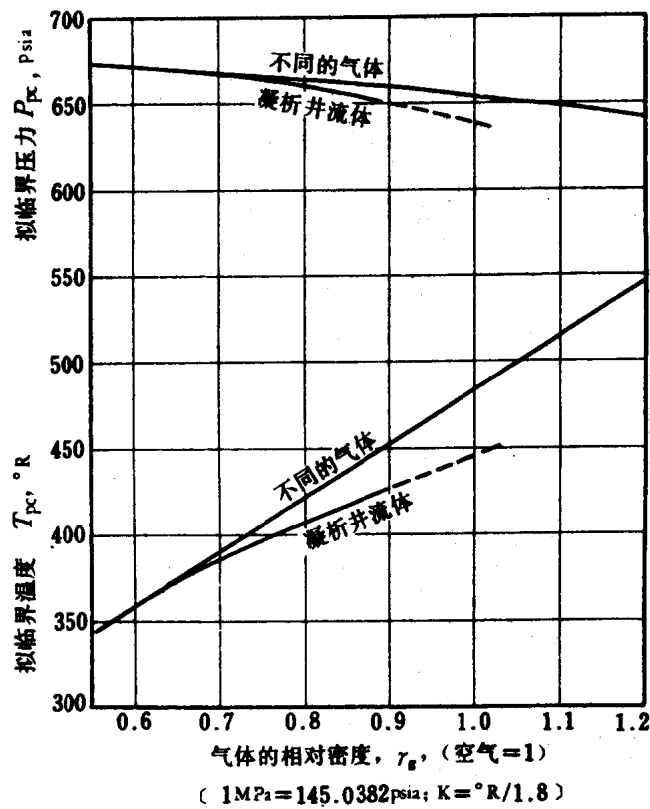


图 1—2 不同天然气和凝析气的拟临界性质<sup>[1]</sup>

(2) 对于凝析气 (湿气)：

当  $\gamma_g \geq 0.7$  时<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 5.1021 - 0.6895\gamma_g \\ T_{pc} &= 132.2222 + 116.6667\gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

当  $\gamma_g < 0.7$  时<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.7780 - 0.2482\gamma_g \\ T_{pc} &= 106.1111 + 152.2222\gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

Standing (1981) 提供的相关经验公式为<sup>[3]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.8677 - 0.3565\gamma_g - 0.07653\gamma_g^2 \\ T_{pc} &= 103.8889 + 183.3333\gamma_g - 39.72222\gamma_g^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

(3) 对于含有  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的酸性天然气气体, 在 0.55 ~ 0.9 范围内的气体相对密度, 可采用如下的修正式<sup>[4]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} p_{pc} &= 4.7546 - 0.2102\gamma_g + 0.03 (\% \text{CO}_2) - 1.1583 \times 10^{-2} (\% \text{N}_2) \\ &\quad + 3.0612 \times 10^{-2} (\% \text{H}_2\text{S}) \\ T_{pc} &= 84.9389 + 188.4944\gamma_g - 0.9333 (\% \text{CO}_2) - 1.4944 (\% \text{N}_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中  $\% \text{CO}_2$  —— 二氧化碳气的摩尔组分含量, %;

$\% \text{N}_2$  —— 氮气的摩尔组分含量, %;

$\% \text{H}_2\text{S}$  —— 硫化氢气的摩尔组分含量, %。

对于含有  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  气体的酸性天然气, Wichert 和 Aziz 于 1970 年提出了如下的校正方法<sup>[1,5]</sup>:

(a) 利用天然气的组分分析数据或图 1-2, 确定  $p_{pc}$  和  $T_{pc}$  的数值;

(b) 由下面的关系式计算校正的拟临界性质:

$$\begin{aligned} T_{pc}' &= T_{pc} - \varepsilon \\ p_{pc}' &= \frac{p_{pc} T_{pc}'}{T_{pc} + \varepsilon (B - B^2)} \end{aligned} \quad (1-19)$$

$$\varepsilon = 66.67 (A^{0.9} - A^{1.6}) + 8.33 (B^{0.5} - B^4)$$

式中  $A$  ——  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的摩尔组分含量, f;

$B$  ——  $\text{H}_2\text{S}$  的摩尔组分含量, f;

$T_{pc}'$  —— 校正的拟临界温度, K;

$p_{pc}'$  —— 校正的拟临界压力, MPa;

$\varepsilon$  —— 校正因子, K。

(c) 利用校正的拟临界压力和拟临界温度, 由 (1-8) 式计算拟对比压力  $p_{pr}$  和拟对比温度  $T_{pr}$ ;

(d) 由图 1-1 或相关经验公式, 确定  $Z$  的数值。

Beggs 和 Brill (1973) 给出了拟合 Standing-Katz (1942) 图版的如下相关经验公式<sup>[3]</sup>:

$$Z = A + (1 - A) / e^B + C p_{pr}^D \quad (1-20)$$

式中 
$$A = 1.39 (T_{pr} - 0.92)^{0.5} - 0.36T_{pr} - 0.101 \quad (1-21)$$

$$B = (0.62 - 0.23T_{pr})p_{pr} + \left[ \frac{0.066}{(T_{pr} - 0.86)} - 0.037 \right] p_{pr}^2 + \frac{0.32}{10^9(T_{pr} - 1)} p_{pr}^6 \quad (1-22)$$

$$C = (0.132 - 0.32 \log T_{pr}) \quad (1-23)$$

$$D = 10^{(0.3106 - 0.497T_{pr} + 0.18247p_{pr}^2)} \quad (1-24)$$

Dranchuk 和 Purvis 等人 (1974), 同样以拟合 Standing-Katz 图版得到了如下的相关经验公式<sup>[2]</sup>:

$$Z = 1 + \left( A_1 - \frac{A_2}{T_{pr}} - \frac{A_3}{T_{pr}^3} \right) \rho_R + \left( A_4 - \frac{A_5}{T_{pr}} + \frac{A_6}{T_{pr}^3} \right) \rho_R^2 \quad (1-25)$$

式中 
$$\rho_R = \frac{0.27p_{pr}}{ZT_{pr}} \quad (1-26)$$

$$A_1 = 0.3151; A_2 = 1.0467; A_3 = 0.5783;$$

$$A_4 = 0.5353; A_5 = 0.6123; A_6 = 0.6815。$$

在已知  $p_{pr}$  和  $T_{pr}$  的情况下, 由 (1-25) 式求解  $Z$  时, 需要经过一个迭代的程序, 即先给定不同的  $Z$  值 (先从  $Z=1.0$  开始), 由 (1-26) 式求出  $\rho_R$  值, 再由 (1-25) 式计算  $Z$  值。假若给定的  $Z$  值与由 (1-25) 式计算的  $Z$  值非常接近, 或者两者相差某一允许的最小值, 即可认为求得的  $Z$  值是正确的数值。

## 二、天然气的压缩系数

天然气的压缩系数, 是在恒温条件下, 随压力变化的单位体积变化量。应当注意, 不要同气体偏差系数 (有时又有压缩因子之称) 相混淆。它是气藏工程计算中的重要参数。按其定义可写为:

$$C_g = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-27)$$

式中的  $C_g$  为天然气压缩系数, 以  $\text{MPa}^{-1}$  表示。

将 (1-2) 式改写为下式:

$$V = nRTZ / p \quad (1-28)$$

对 (1-28) 式求导得:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = nRT \frac{p \frac{\partial Z}{\partial p} - Z}{p^2} \quad (1-29)$$



将 (1—28) 式和 (1—29) 式代入 (1—27) 式得：

$$C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \quad (1-30)$$

对于理想气体，由于  $Z=1.0$ ，因此， $C_g=1/p$ 。在利用 (1—30) 式计算天然气的压缩系数时，需要确定在特定压力和温度下的  $Z$  系数随压力的变化率。由于确定  $Z$  值的图版和相关经验公式，都是拟对比压力  $p_{pr}$  和拟对比温度  $T_{pr}$  的函数。因此，这里引出拟对比压缩系数  $C_{pr}$  的概念，并由下式表示：

$$C_{pr} = C_g p_{pc} \quad (1-31)$$

将 (1—30) 式中的偏导数改写为：

$$\frac{\partial Z}{\partial p} = \left( \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) \left( \frac{\partial p_{pr}}{\partial p} \right) \quad (1-32)$$

由 (1—8) 式的拟对比压力对压力求偏导数后得：

$$\left( \frac{\partial p_{pr}}{\partial p} \right) = \frac{1}{p_{pc}} \quad (1-33)$$

将 (1—33) 式代入 (1—32) 式得：

$$\frac{\partial Z}{\partial p} = \frac{1}{p_{pc}} \left( \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) \quad (1-34)$$

再将 (1—8) 式和 (1—34) 式代入 (1—30) 式得：

$$C_g = \frac{1}{p_{pr} p_{pc}} - \frac{1}{Z p_{pc}} \left( \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) \quad (1-35)$$

或写为

$$C_g p_{pc} = \frac{1}{p_{pr}} - \frac{1}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) \quad (1-36)$$

由 (1—36) 式与 (1—31) 式相等得拟对比压缩系数为：

$$C_{pr} = \frac{1}{p_{pr}} - \frac{1}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial p_{pr}} \right) \quad (1-37)$$

(1—37) 式中的  $(\partial Z / \partial p_{pr})$  的数值，可以由图 1—1 上特定的常数  $T_{pr}$  曲线的斜率求得。Trube<sup>[6]</sup> 利用实际的取样分析数据，建立了不同拟对比温度  $T_{pr}$  的拟对比压缩系数  $C_{pr}$  与拟对比压力  $p_{pr}$  的关系图，见图 1—3 和图 1—4。在已知  $p_{pr}$  和  $T_{pr}$  数值之后，可查图 1—3 或图 1—4 得到拟对比压缩系数。然后，在已知拟临界压力  $p_{pc}$  的条件下，由下式确定天然气的压缩系数：

$$C_g = C_{pr} / p_{pc} \quad (1-38)$$