



油气田开发进修丛书

凝析气藏开发工程

杨宝善 编著

石油工业出版社

北京)

登录号	087354
分类号	TE372
种次号	003

油气田开发进修丛书

凝析气藏开发工程



200422514

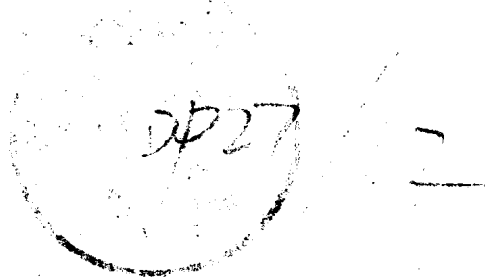
石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书系统地论述了凝析气田开发的理论和方法, 介绍了这一领域的最新科研成果, 并结合现场实际加以阐述和应用, 是一本可读性、适用性俱佳的著作。

本书可供从事气田和凝析气田开发的研究人员、现场人员以及有关院校的师生学习、借鉴、参考。



图书在版编目 (CIP) 数据

油气田开发进修丛书

凝析气藏开发工程 / 杨宝善编著 — 北京: 石油工业出版社, 1995.2

ISBN 7-5021-1220-0

I. 凝…

II. 杨…

III. 凝析气田—油田开发

IV · TE372

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 $19\frac{3}{4}$ 印张 490 千字 印 1—2000

1995 年 2 月北京第 1 版 1995 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 20.00 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;涉及多学科的油气管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,以促进油气管开发的现代化。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,西德也出版了一套例携工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、技术信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,并根据北京油气管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“油气管开发进修丛书”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管开发技术队伍服务。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,油气管开发测井基础,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,邀聘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管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管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

“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

前 言

凝析气藏是一种既不同于一般气藏也不同于油藏的特殊类型气藏。其开采技术比一般气藏和油藏复杂得多。因为，开发凝析气田时除考虑天然气采收率外，更重要的还需考虑提高凝析油采收率的问题。

国外从 30 年代初至今对凝析气田开发已有五十多年的历史和经验。我国从 50 年代起，陆续发现不少凝析气田，并相继投入了开发。预计随着勘探技术的不断发展，凝析气的储量一定会更加迅速地增长。因此，合理开采凝析气田和提高凝析油采收率，成为一个不容忽视的重要课题。然而，对我国大多数油藏工程师和工程技术人员来说，它还是一门新兴学科。而且目前国内在这一领域中，尚缺乏具有较完善的科学性、理论性、系统性和实用性的可供参考的有关著作。因此，为适应我国石油及天然气工业迅速发展和进一步提高凝析气田开发水平的需要，编写这本《凝析气田开发》一书是非常必要的。《凝析气田开发》这本书是作者根据自己从 1972 年至 1993 年期间致力于凝析气田开发生产实践、理论研究和编制不同类型的凝析气田开发方案，以及借鉴了国内外凝析气田开发经验，并两次赴美国实地考察和多次为各类培训班讲课的基础上写成的。

全书包括七章。第一章主要内容为天然气性质和热力学特征的有关基础知识及计算方法。第二章是凝析气的储量计算，重点论述反凝析气藏物质平衡方程。第三章则主要描述气体径向流动方程和垂直井筒流动方程及气井试井分析方法及其应用。第四章和第五章主要阐述储层流体的实验室研究内容和实验数据的应用，以及流体 PVT 模拟研究的理论和方法。第六章介绍混相驱替原理和方法。第七章重点论述凝析气藏识别方法、凝析气藏分类、及凝析气藏开采动态和研究方法。为使读者更好地理解 and 掌握各章节的理论，相应地设计了有关作业及其答案。

本书可作为具有一定油藏工程知识的从事于油气田开发的科研人员、工程技术人员和大专院校、有关专业师生进行科研、生产与教学的参考。由于本人水平所限，书中如有不周甚至错误之处，诚望广大读者和同仁指正。另外，在本书编写过程中张素芳高级工程师和夏昱同志为本书中的公式和有关计算进行了大量工作。在此表示衷心地感谢。

编者 杨宝善
1993 年 12 月于北京

目 录

第一章 天然气性质及烃类流体相态特征和相平衡计算	(1)
第一节 理想气体状态方程	(1)
第二节 非理想气体状态方程	(5)
第三节 天然气的物理性质	(17)
第四节 烃类流体相态特征	(26)
第五节 汽—液相平衡及平衡比概念	(32)
第六节 汽—液相平衡计算	(50)
第二章 气田和凝析气田储量计算	(57)
第一节 容积法储量计算	(57)
第二节 一般气藏物质平衡法	(64)
第三节 反凝析气藏物质平衡法	(68)
第四节 用生产井数据计算储量	(74)
第五节 采收率确定方法	(78)
第三章 气体在孔隙介质和垂直井筒中的流动方程及气井试井	(88)
第一节 气藏流体渗流特征	(88)
第二节 达西流动及非达西流动	(89)
第三节 气体在孔隙介质中径向流动的基本微分方程	(93)
第四节 拟压力的定义及其计算方法	(100)
第五节 气井试井	(106)
第六节 天然气在井筒中的流动	(126)
第四章 储层流体 pVT 性质及相态的实验室研究	(133)
第一节 流体取样方法	(133)
第二节 储层流体研究的内容和要求以及实例	(141)
第三节 储层流体数据的应用	(165)
第五章 流体 pVT 及相态的模拟研究	(177)
第一节 流体 pVT 及相态模拟基本原理	(177)
第二节 “ C_{n+} ”馏分特征化	(186)
第三节 油气藏流体 pVT 模拟研究	(201)
第六章 混相驱替的基本原理	(223)
第一节 混相驱的概念	(223)
第二节 在混相驱研究中相态特性的表示方法	(223)
第三节 烃类及非烃溶剂的几种混相方法和混相机理	(227)
第四节 最低混相压力的估算方法	(238)
第五节 动力混相过程的筛选标准	(244)
第七章 凝析气藏工程	(247)

第一节 凝析气藏判断方法及其分类·····	(247)
第二节 凝析气藏开发工程论证·····	(266)
第三节 凝析气藏开采中有关参数的确定方法·····	(269)
第四节 凝析气藏开采动态·····	(283)
参考文献·····	(299)
附表 平衡相关系数·····	(300)

第一章 天然气性质及烃类流体

相态特征和相平衡计算

第一节 理想气体状态方程

一、波义耳定律

1662年 R.Boyle 发现,一定量的气体在恒温下,它的体积和压力成反比,表达式如下:

$$p = \frac{K_1}{V} \quad (1-1)$$

K_1 为常数。该方程也可以重新整理为气体的压力与体积的乘积在恒温条件下为一常数。

$$pV = K_1$$

或者

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = p_3 V_3 = \dots \quad (1-2)$$

实际上波义耳定律是很原始的,而且只能是近似的。方程(1-1)也可以用下图表示,如图1-1。在恒温 T_1 和 T_2 时一定质量的气体其体积与压关系呈双曲线形。

二、查理定律

J.A.C.Charles 于 1787 年和 J.L.Gay-Lussac 于 1802 年分别研究了一定质量的气体在常压下温度对体积的影响。即在恒压下,温度升高一度,任何气体体积的增加对原来温度条件下的体积之比是相同的,其表达式如下:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + \beta V_0 (t_1 - t_0) \\ &= V_0 (1 + \beta (t_1 - t_0)) \end{aligned} \quad (1-3)$$

V_1 为在 t_1 时的体积, V_0 为在 t_0 时的体积, β 为体积膨胀系数。应该注意 βt 是没有单位的,因而 β 的单位为 $(\text{度})^{-1}$ 。Gay-Lussac 发现,如果 V_0 是在 0°C 下的体积,那么体积膨胀系数 β 将近似地等于常数 $1/273$ 。方程(1-3)可减化为:

$$V_1 = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} (t_1 - 0)\right) \quad (1-4)$$

同样，假定温度为 t_2 时，也可以写为：

$$V_2 = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} (t_2 - 0) \right) \quad (1-5)$$

将公式 (1-4) 与 (1-5) 相比，则得：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2} \quad (1-6)$$

$$\text{令 } T = 273 + t \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1-7)$$

代入上式 (1-6) 得

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-8)$$

或

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = K_2 \quad (1-9)$$

K_2 为常数。方程 (1-8) 也可以用下图 1-2 表示在恒压时 V 与 T 的关系。

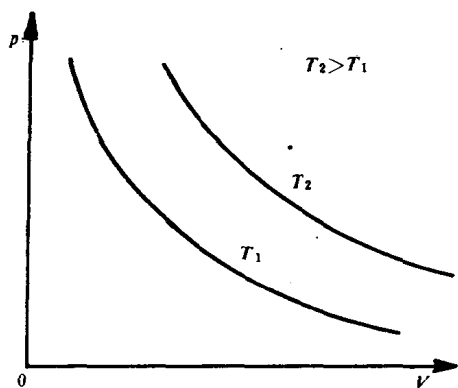


图 1-1 一定质量气体
在恒温下 $p-V$ 关系

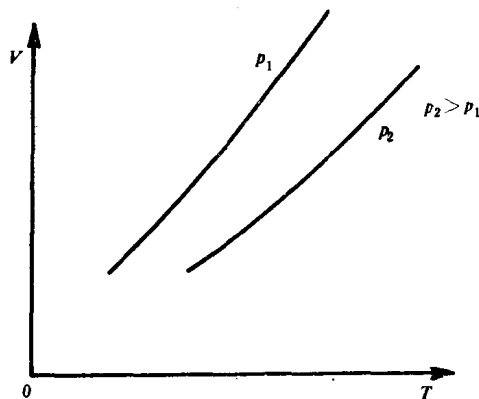


图 1-2 一定质量的气体
在恒压下 $V-T$ 关系

三、理想气体定律

应当指出，上述波义耳定律和查理定律都是近似的。为确保这两个定律对气体的精确描述而提出假设的气体，即理想气体。理想气体就是假定没有分子间吸引力和分子体积为无穷小的气体。只有在高温、低压的条件下，真实气体才接近于理想气体的性质。

理想气体定律是根据波义耳定律和查理定律导出的。假定质量为 W 的理想气体，其初始温度为 T_1 ，体积为 V_1 以及压力为 p_1 。如温度保持在恒定温度 T_1 ，而压力由 p_1 变为 p_2 ，

应用波义耳定律如下:

$$p_1 V_1 = p_2 V^*$$

或

$$V^* = \frac{p_1 V_1}{p_2} = F(T_1, p_2) \quad (1-10)$$

另外, 假定压力恒定, 改变温度为 T_2 , 应用查理定律如下:

$$\frac{V^*}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

或

$$V^* = \frac{V_2 T_1}{T_2} = F(T_1, p_2) \quad (1-11)$$

在公式 (1-10) 和 (1-11) 中消去 V^* 项得:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-12)$$

如果把 p_2 、 V_2 、 T_2 当作起点, 那么也可导出下式:

$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$

因此, 可将上式写成

$$\frac{pV}{T} = K \quad (1-13)$$

上式中的 K 为一定值。方程 (1-13) 即为理想气体定律。由于气体的质量和分子量为常数, 所以摩尔数 n 也为常数。

$$n = \frac{W}{M} \quad (1-14)$$

式中的 M 为气体分子量。并定义 R 为通用气体常数。

$$nR = K \quad (1-15)$$

将 (1-15) 代入 (1-13) 得:

$$pV = nRT \quad (1-16)$$

方程 (1-16) 即为理想气体定律的常用形式。应该注意通用气体常数 R 的单位必须与 pV/nT 的单位相对应。常用的 R 值列表如下:

表 1-1 常用的 R 值

p	V	T	R
bar	L	K	83.14 (bar) (L) / (kmol) ($^{\circ}$ K)
bar	m^3	K	0.08314 (bar) (m^3) / (kmol) ($^{\circ}$ K)
MPa	m^3	K	0.00831 (MPa) (m^3) / (kmol) ($^{\circ}$ K)
KPa	m^3	K	8.314 (kPa) (m^3) / (kmol) ($^{\circ}$ K)
kg/cm^2	m^3	K	0.08478 (kg/cm^2) (m^3) / (kmol) ($^{\circ}$ K)
psia	ft^3	$^{\circ}$ R	10.73 (psia) (ft^3) / (lb-mole) ($^{\circ}$ R)
lb/ ft^2	ft^3	$^{\circ}$ R	1545 (psia) (ft^3) / (lb-mole) ($^{\circ}$ R)

上述确定 R 值的方法对理想气体是可用的。但对真实气体来说, 只有当压力接近于零时, 其真实气体才近似于理想气体状态。如下式所示:

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{pV}{nT} = R \quad \text{对真实气体}$$

或 $\lim_{p \rightarrow 0} pV = (nRT) \quad \text{在恒温下} \quad (1-17)$

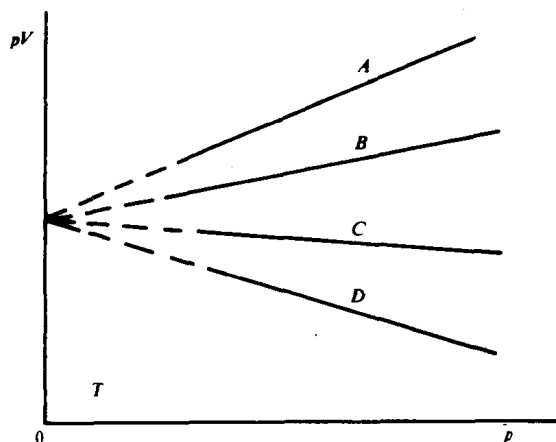


图 1-3 1 摩尔气体压力为零时 pV 值相交于一点

如果用真实气体的 p - V 数据, 并用方程 (1-17) 作 pV 与 p 的关系图, 将各曲线延伸到压力为零时, 得出各种真实气体的 pV 值相交于一点。

我们得出: (1 克摩尔气体在 0°C 时)

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow 0} (pV) &= 22.414 \text{ (L} \cdot \text{atm)} \\ &= 2.26 \times 10^{-3} \text{ (m}^3 \cdot \text{MPa)} \end{aligned} \quad (1-18)$$

应该注意, 在不同温度下, 它的极限值也是不同的。用公式 (1-17) 和 (1-18) 很容易计算出气体常数 R 的值

$$1 \times 273 \times R = 22.414$$

$$R = \frac{22.414}{1 \times 273} = 0.08205 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{(\text{° K}) (\text{g} - \text{mole})}$$

$$= 1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{MPa}}{\text{° K} \cdot \text{g} - \text{mole}}$$

理想气体状态方程具有一定的局限性，一般单原子气体比较能符合于这个方程，而气体分子越复杂，偏差就越大。压力高于 4bars 即不能适用。

第二节 非理想气体状态方程

一、Van Der Waals' 状态方程

因为理想气体状态方程适用范围有限，而工业上绝大多数都是非理想气体。所以，自从 1873 年 J.D. Van Der Waals 对理想气体状态方程修改发表之后，于 20 世纪中叶相继发表了很多气体状态方程。但它们基本上是在这个基础上进一步修改的。下面介绍一下 Van Der Waals 状态方程。由 Van Der Waals 提出的修正参数如下：

$$p = \text{真实压力} = \text{理想压力} - \frac{a}{V^2}$$

$$V = \text{真实体积} = \text{理想体积} + b$$

式中的 a 和 b 为相关关系常数。

压力的校正是考虑气体分子在气体内部和在靠近容器壁两种情况下得到的。因为在流体内部各个方向上的引力都是一样的，但靠近容器壁的流体引力远比内部的流体引力小得多。这个结果使压力有所下降。这种校正是与 N^2 成正比的（流体中的分子数和撞击表面的分子数）。如果 V 是被 1 个摩尔气体所占有的体积，那么它就是与 N 成反比。体积的校正是在理想气体体积后加一个常数项 b 。这样，就得出了 Van Der Waals' 方程：

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = RT \quad (1-19)$$

式中的 V 代表每摩尔气体的体积。应当注意， $\frac{a}{V^2}$ 的单位是压力单位，而 b 则是每摩尔气体的体积。

常数 a 和 b 也可以与临界性质相关联：

$$V_c = 3b \quad (1-20)$$

$$P_c = \frac{a}{27b^2} \quad (1-21)$$

$$T_c = \frac{8a}{27Rb} \quad (1-22)$$

或

$$a = \frac{27R^2 T_c^2}{64P_c} \quad (1-23)$$

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} \quad (1-24)$$

根据 Van Der Waals' 定律也可以表示为:

$$\frac{RT_c}{P_c V_c} = \frac{8}{3} = 2.67 \quad (1-25)$$

实际上 $\frac{RT_c}{P_c V_c}$ 并不是常数, 而是不同的气体有不同的值, 如下列气体的 $\frac{RT_c}{P_c V_c}$ 值分别为:

H ₂	3.28
N ₂	3.18
CO ₂	3.68

显然, 用 Van Der Waals' 方程计算的 $\frac{RT_c}{P_c V_c}$ 值是低一些。这表明还不能完全应用这种校正的相关关系计算分子引力。

二、应用压缩因子修改理想气体状态方程

我们知道, 用压缩因子 Z 修改理想气体定律, 并将其应用于真实气体的 $P-V-T$ 关系的计算, 会得到比较满意的结果。压缩因子定义如下:

$$Z = \frac{pV}{RT} \quad (1-26)$$

显然, 如果 $V=f(p, T)$, 那么

$$Z=f(T, p) \quad (1-27)$$

即压缩因子是温度和压力的函数。用压缩因子 Z 校正气体的非理想性, 既保留了气体定律的基本形式, 又可以用来计算真实气体的 pVT 关系。所以它具有一定的优点。一般在石油及天然气工业中常用到这个方程。原始的压缩因子不是从理论推导来的, 而是由 CO₂、N₂、H₂、NH₃、CH₄、C₃H₈、C₈H₁₀ 等实验数据的平均值绘制而成。

实际上压缩因子 Z 是个变量，它决定于压力、温度和气体组成。在恒温条件下，非理想气体的压缩因子 Z 与压力的关系如图 1-4。

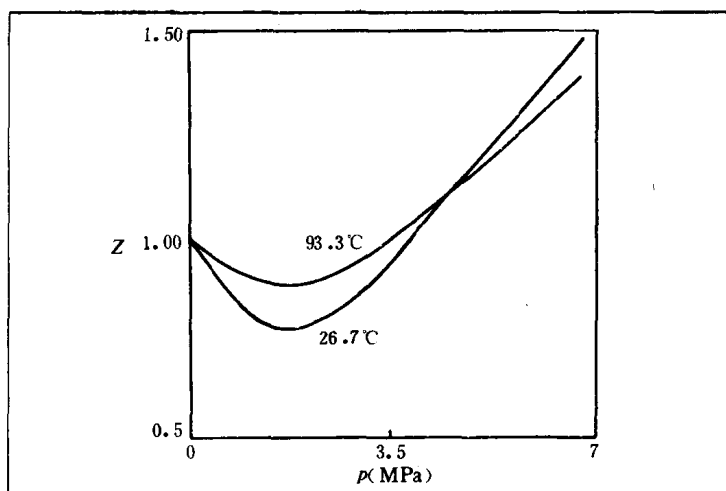


图 1-4 在恒温下天然气压缩因子与压力关系

研究不同组分的天然气压缩因子表明，压缩因子可以在拟临界压力和拟临界温度的基础上，引进一对拟对比压力和拟对比温度的概念，来达到一般工程要求足够精度的压缩因子特征化。

$$p_{pr} = p / p_{pc}; \quad T_{pr} = T / T_{pc} \quad (1-28)$$

式中的压力和温度都取绝对单位。在天然气工程中由 Standing 和 Katz 于 1942 年发表的压缩因子图版已被广泛应用，见图 1-5、1-6。该图版已由 Poettmann 和 Carpenter 转换为数据表，见附表 3。该表被美国州际石油合同委员会在“气井回压测试手册”中以更大的篇幅加以推广。附表内的拟对比压力是由 0.20~15.00，增值为 0.05；拟对比温度由 1.05~3.00，增值未定。附表 1 中给出了天然气相对密度与拟临界压力和拟临界温度的相关关系数据。附表 2 给出了 CO_2 、 N_2 和 H_2S 的拟临界性质数据。如果天然气中含有大于 5.0% 的 CO_2 或者 H_2S ，读者就应参阅 Robinson 等或者 Wichert 和 Aziz 等人的修正方法加以修正。

附表 1 和附表 2 中的数据，当相对密度大约在 0.55~0.90 范围内时，可由下列方程计算拟对比压力和拟对比温度：

$$p_{pr} = 689.60 - 30.48r_g + 4.35 (\% \text{CO}_2) - 1.68 (\% \text{N}_2) + 4.44 (\% \text{H}_2\text{S}) \quad (1-29-i)$$

$$T_{pr} = 152.89 + 339.29r_g - 1.68 (\% \text{CO}_2) - 2.69 (\% \text{N}_2) + 0.00 (\% \text{H}_2\text{S}) \quad (1-29-2)$$

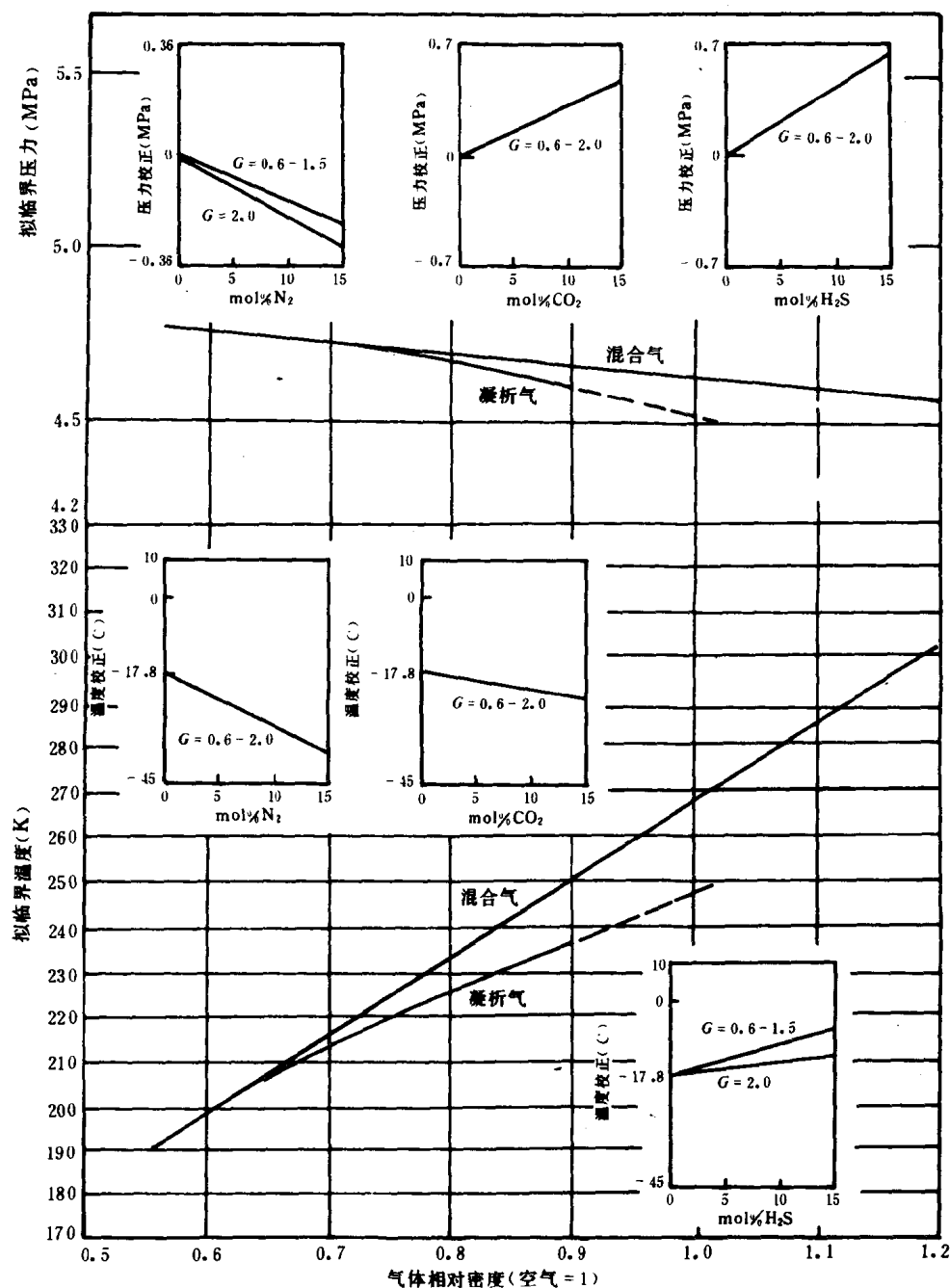


图 1-5 天然气混合物的拟临界性质

Standing 和 Katz 相关关系图版法是比较可靠的，从 1942 年开始，一直被广泛应用到现在。随着计算机的发展和应用，Takacs.G 于 1976 年发表了一篇文章，他对八种计算压缩因子的方法进行了比较，主要分为两类：一类为用解析法同 Standing 和 Katz 的等温曲线进行拟合；另一类是用状态方程计算压缩因子。后者为 Hall.K.R 和 Yarborough.L 于 1974 提出的 (2)。这种方法简单、精确，在小型台式计算机上即可运算。Hall-Yarborough 公式如下：

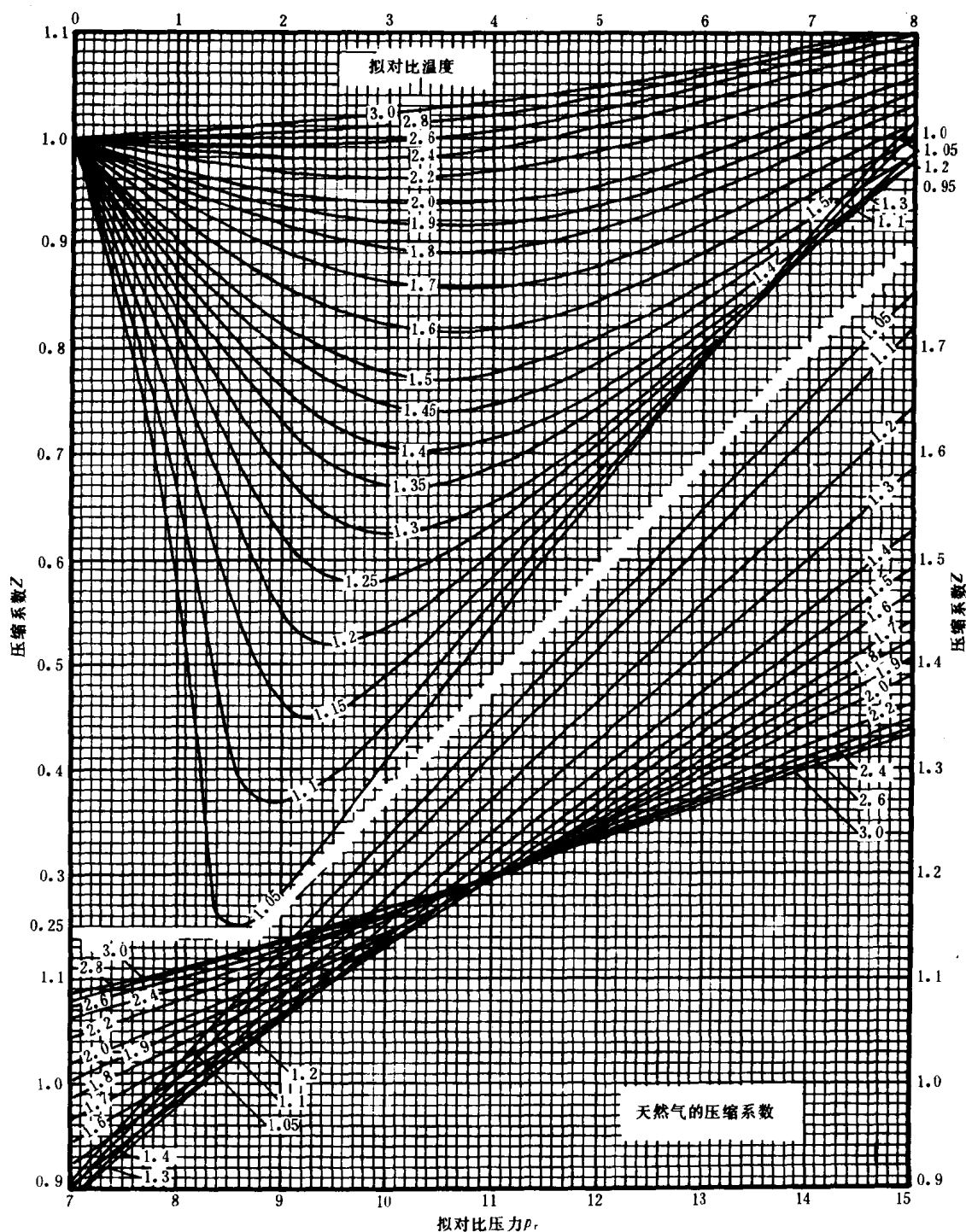


图 1-6 天然气压缩因子与拟对比压力关系