

国外油气勘探开发新进展丛书(四)
GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU

Gas

Reservoir Engineering

气藏工程

[美] L. 约翰 罗伯特 A. 沃特恩伯格 著
王玉普 郭万奎 庞颜明 周学民 译

石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(四)

气 藏 工 程

[美] L. 约翰 罗伯特 A. 沃特恩伯格 著

王玉普 郭万奎 庞颜明 周学民 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了天然气的属性、管线中气体流动的基本定律、气流的测量方法、井内流体、孔隙介质中流体流动的基本原理、气井的非稳态试井、气井的产能试井、气井试井的设计和实现、气井的递减曲线分析、天然气体积和物质平衡计算,以及油藏模拟技术。本书理论性、系统性强,为便于学习,每章还配有大量的例题、习题,以及问题与讨论。

本书可供从事油气田开发工作的有关技术人员学习和参考,也可作为石油高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气藏工程/(美)罗伯特,(美)沃特恩伯格著;王玉普等译.
北京:石油工业出版社,2007.2

(国外油气勘探开发新进展丛书.第4辑)

书名原文:Gas Reservoir Engineering

ISBN 978-7-5021-5702-9

I. 气…

II. ①罗… ②沃… ③王…

III. 气田开发

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 103315 号

Copyright 1996 by the Society of Petroleum Engineers Inc.

All rights reserved. This book, or any part thereof, can not be reproduced in any form without written consent of the publisher.

本书经 Society of Petroleum Engineers Inc. 授权翻译出版,

中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2007年2月第1版 2007年2月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:40.25

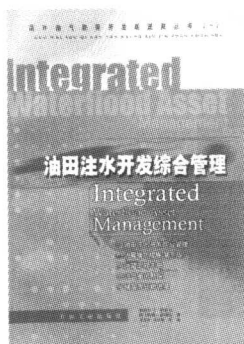
字数:1027千字

定价:120.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

国外油气勘探开发新进展丛书(一)



书号: 3592
定价: 56.00 元



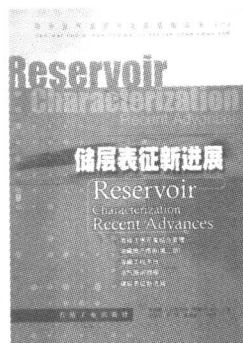
书号: 3663
定价: 120.00 元



书号: 3700
定价: 110.00 元

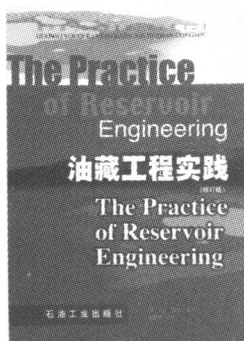


书号: 3718
定价: 145.00 元

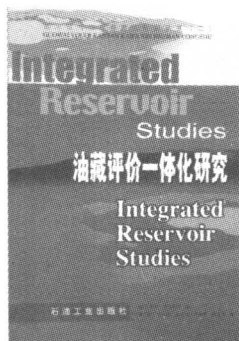


书号: 3722
定价: 90.00 元

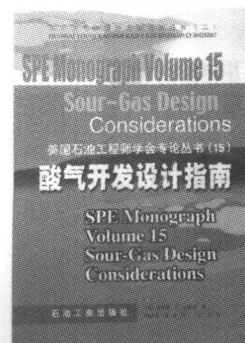
国外油气勘探开发新进展丛书(二)



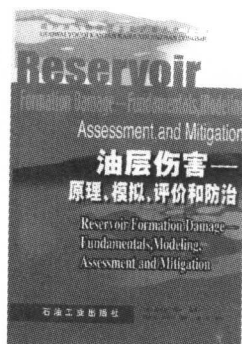
书号: 4217
定价: 96.00 元



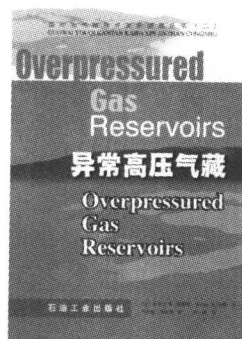
书号: 4226
定价: 60.00 元



书号: 4352
定价: 32.00 元

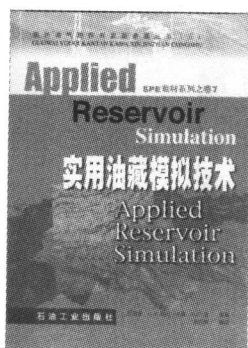


书号: 4334
定价: 115.00 元

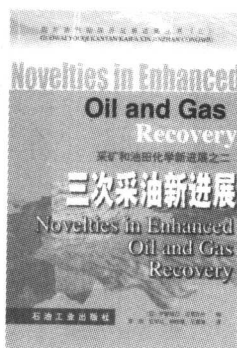


书号: 4297
定价: 28.00 元

国外油气勘探开发新进展丛书(三)



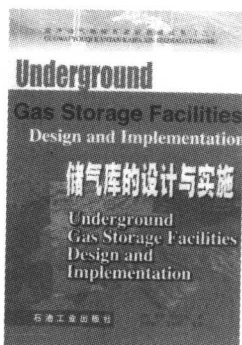
书号: 4539
定价: 120.00 元



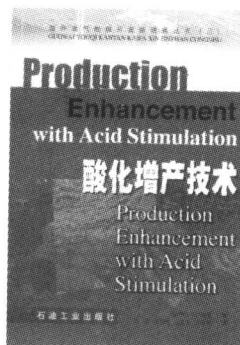
书号: 4725
定价: 88.00 元



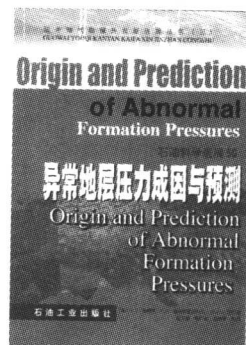
书号: 4707
定价: 60.00 元



书号: 4681
定价: 48.00 元



书号: 4689
定价: 50.00 元



书号: 4764
定价: 78.00 元

《国外油气勘探开发新进展丛书(四)》

编 委 会

主 任：胡文瑞

副 主 任：赵政璋 张卫国

编 委：(按姓氏笔画排序)

王玉普 王连刚 闫建华 刘德来

吴 奇 杜金虎 杨能宇 张仲宏

张烈辉 郑新权 周家尧 郭万奎

咸月瑛 高志强

序

为了跟踪国外油气勘探开发的新理论、新技术、新工艺,提高中国石油天然气股份有限公司油气勘探开发的理论和技术水平,提高整体经济效益,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司有计划地组织有关专家对国外油气勘探开发及生产方面的新技术、新理论、新成果进行调研引进、吸收,并翻译出版,推荐给油田广大技术人员及管理干部,以期能达到促进生产、更新知识、提高业务水平及技术水平的目的。第一批、第二批与第三批引进 16 本专著后,产生了较好的社会效益,得到了广大读者的高度关注和认可,普遍认为翻译质量高,出版质量好,内容满足实际需要。

为了进一步搞好中国石油天然气股份有限公司石油勘探开发的科技发展事业,促进石油工业发展,我们在前三辑出版的基础上,经过多次调研、筛选,又推选出国外最新出版的 6 本专著翻译出版,即《井喷与井控手册》、《综合渗流模拟》、《油藏工程基本原理》、《气藏工程》、《油井打捞作业手册——工具、技术与经验方法》、《多分支井技术》,以期追踪国外油气田勘探开发的热点问题和切合我国油气田开发实际需要的实用技术。

在全套丛书的引进、翻译出版过程中,勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的油田工程技术人员担任该书的翻译和审校工作,使本套丛书得以高质高效地出版。希望各油田及科研院校从事于勘探、开发工作的管理人员、技术人员以及研究人员读读这套丛书,同时在实践中应用之,这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用,为搞好油田勘探开发,实施低成本战略,创造更大的效益做出贡献。

中国石油天然气股份有限公司副总裁

前 言

天然气生产在美国正变得越来越重要,并且其收益现在已经超过了原油生产所带来的收益。考虑到这种趋势将在世界范围内流行,作者觉得有必要在本科生教育中强调气藏工程学的重要性并以此为目的编写了这本教科书。本书也可以作为研究生和现场石油工程师了解气藏工程学的入门书籍。

尽管大部分应用于油井的技术可以应用于气井,但两者之间还是存在一些区别。了解这些区别并且知道该怎样识别和处理这些区别是十分重要的。作者在尽力提供实际的方程和方法的同时,仍会强调它们的基本原理。作者并没有试图提供在该技术领域对所有问题的最知名的求解方法。大部分情况下,甚至不提出问题,而是把重点放在基本原理上,以力求这本在气藏工程学方面的书能够在现在和将来都能被接受。如果读者在目录和检索中没有发现所感兴趣的话题,这只是因为它不在作者认为该书所拥有的重要基本理论之中。

作者编写本书之际,正值被石油工程师们所应用的计算方法发生重大改革的时候。大部分出现的计算用计算机来完成,或者是由工程师或其助手编写的商业软件包或表格来完成。尽管这些方法带来了产量的提高,但是这种现代的趋势也带来了工程上的“黑盒”解法。作者希望通过本书使这个“黑盒”变得透明一点,于是在本书中讨论基本原理,强调方法的假定和局限性,并且用完全可行的例子来讲解推荐的方法。同时,在一些场合,作者也推进了这种计算趋势,因为有时也提出和推荐了要求十分复杂数学计算(对于用手计算)的计算技术。当然,作者的目的是让这些复杂的方法用电子表格或其他的计算机软件来实现。相信这种方法要优于只提供可以手算实现的简单的技术(即更近似)。

商业的石油软件变化非常迅速,并且在许多情况下,各个出版商的产品都有所不同,因此,不能在此讲解对于特定应用的当前流行或领先软件的使用法。然而,作者尽力提供一般的计算方法,这些方法在编写本书时期的任何商业软件中都可以找到相似的形式。

目 录

1 天然气的性质	(1)
1.1 介绍	(1)
1.2 定义和基本原理回顾	(1)
1.3 天然气的性质	(3)
1.4 拟临界气体属性的计算	(5)
1.5 z 系数计算的 Dranchuk 和 Abou - Kassem 相关方法	(26)
1.6 气体的地层体积系数(FVF)	(28)
1.7 气体的密度	(29)
1.8 气体的压缩系数	(30)
1.9 气体的黏度	(31)
1.10 油藏中油的属性	(32)
1.11 油藏中水的属性	(41)
1.12 气体中水蒸气含量	(51)
1.13 气体水合物	(53)
1.14 PV 压缩系数的相关计算	(56)
1.15 气体的湍流因子和非达西流动系数	(57)
1.16 总结	(58)
2 管线中气体流动的基本定律	(68)
2.1 介绍	(68)
2.2 系统、热、功和能量	(68)
2.3 热力学第一定律	(71)
2.4 机械能守恒	(73)
2.5 摩擦引起的能量损失	(74)
2.6 伯努利方程	(74)
3 气流的测量方法	(79)
3.1 介绍	(79)
3.2 孔板流量计	(79)
3.3 孔板流量计的安装	(101)
3.4 临界流校准仪	(103)
3.5 油嘴	(105)
3.6 皮托管	(106)
4 井内气流	(110)
4.1 介绍	(110)

4.2	干气井井底压力的计算	(110)
4.3	流体对计算 BHFP 的影响	(126)
4.4	评价气井生产运行状况	(138)
4.5	预测气井运行状况	(145)
4.6	总结	(147)
5	孔隙介质中流体流动的基本原理	(156)
5.1	简介	(156)
5.2	理想油藏模型	(156)
5.3	散射方程的解	(179)
5.4	探测半径	(193)
5.5	叠加定律	(197)
5.6	Horner 近似	(199)
5.7	散射方程的泛 Everdingen - Hurst 解	(201)
5.8	总结	(207)
6	气井的非稳态试井	(216)
6.1	介绍	(216)
6.2	非稳态试井的类型和目的	(216)
6.3	均匀储层模型——轻微可压缩流体	(216)
6.4	实际测试中的复杂性	(219)
6.5	气井非稳态测试的基本原理	(223)
6.6	非达西流	(227)
6.7	气井流动测试的分析	(227)
6.8	气井压力恢复测试的分析	(243)
6.9	标准曲线分析	(254)
6.10	水力压裂气井	(268)
6.11	天然裂缝性储层	(292)
6.12	使用特征压力行为确定油藏模型	(308)
6.13	总结	(310)
7	气井的产能试井	(331)
7.1	介绍	(331)
7.2	产能试井的类型和目的	(331)
7.3	产能试井分析理论	(331)
7.4	稳定时间	(337)
7.5	产能试井分析	(339)
7.6	总结	(375)
8	气井试井的设计和实现	(383)
8.1	介绍	(383)
8.2	试井类型和目的	(383)

8.3	一般的测试设计考虑因素	(385)
8.4	非稳态试井的设计	(389)
8.5	产能试井设计	(413)
8.6	总结	(419)
9	气井的递减曲线分析	(426)
9.1	介绍	(426)
9.2	递减曲线分析的简单介绍	(426)
9.3	传统分析技术	(426)
9.4	递减标准曲线	(437)
9.5	总结	(451)
10	天然气体积和物质平衡计算	(461)
10.1	介绍	(461)
10.2	体积法	(461)
10.3	物质平衡法	(471)
10.4	总结	(506)
11	油藏模拟	(516)
11.1	介绍	(516)
11.2	求解传导方程(一维)的有限差分方法	(516)
11.3	求解精度	(522)
11.4	有限差分方程的网格块方法	(524)
11.5	真实气体流的模拟系统, $x-y$ 坐标	(526)
11.6	方程求解	(530)
11.7	对于真实气体流的单井模拟, $r-z$ 坐标	(533)
11.8	GASSIM	(535)
11.9	历史匹配	(538)
11.10	预测性能	(543)
附录 A	计算气体 z 因子的 Dranchuk 和 Abou - Kassem 状态方程	(548)
附录 B	确定静态 BHP 的 Poettmann 方法积分值	(550)
附录 C	不同单井泄油面积的形状因子	(555)
附录 D	$-Ei(-x)$ 方程指数积分值	(557)
附录 E	散射方程的 Van Everdingen - Hurst 解	(559)
附录 F	压力导数的确定	(573)
附录 G	试井分析及油藏识别表格	(575)
附录 H	用压力平方法进行产能试井分析	(591)
附录 I	试井设计表格	(609)
附录 J	水侵气藏中残余气饱和度的相关计算	(613)
附录 K	2D 气藏模拟的 GASSIM 计算机程序	(614)
附录 L	单位换算表	(631)

1 天然气的性质

1.1 介绍

本章提出了多种用于气藏工程学计算所需要的油藏流体性质估算的方法。实验室分析是确定一个流体样本物理和化学性质最准确的方法,然而在没有试验室数据的情况下,相关方法成为估算多种属性的可行的选择。我们不仅用相关方法来估算天然气的属性,而且也用它对液态碳氢化合物和地层水的性质进行估算。这里之所以选用相关方法是考虑到它在人工分析和计算机编程方面的准确性、一致性和简单性。另外相关方法也用于对孔隙体的压缩性和针对湍流的非达西流体系数的估算,这种现象在气井中普遍存在。

1.2 定义和基本原理回顾

在讨论流体性质计算和相关方法之前,我们先对一些用于帮助理解流体属性和用于相关计算的一些定义和基本原理进行回顾。这些回顾包括对摩尔分数、摩尔体积、理想和实际气体活动概念及相应状态原理的回顾。McCain^[1]先生对上述基础进行了较为详尽的讨论并且提出了用碳氢气体和流体相位属性进行讨论的一个非常好的方法。

1.2.1 摩尔和摩尔分数

一磅摩尔(lbm·mol)是一个物质的量,是质量以磅为单位的分子的质量。同样的定义适用于克摩尔、千克摩尔等。例如,1 磅摩尔甲烷的质量是 16.043lbm。在一个混合物中,一个分量的摩尔分数等于该分量的磅摩尔数除以所有分量的磅摩尔数。对于一个有 n 个分量的系统,摩尔分数为:

$$y_i = n_i / \sum_{j=1}^{n_c} n_j \quad (1.1)$$

其中 y_i 为第 i 个分量的摩尔分数, n_i 为第 i 个分量的磅摩尔数, n_c 为系统中分量的个数。

1.2.2 理想气体定律

在对实际气体的活动进行讨论之前,我们先来看一个假设的理想气体。理想气体属性的定义包括如下的内容^[1]:

- (1) 气分子的体积与整个封闭的气体总体积相比是无关紧要的;
- (2) 分子与分子间以及分子与容器壁之间不存在吸引力和排斥力;
- (3) 所有分子的碰撞是完全弹性的,比如,碰撞时不存在内部能量的损失。

一个描述气体所占体积和压力及温度间关系的方程被称为状态(EOS)方程^[1]。理想气体的 EOS 方程形式是从经验观察得到的。对于一个在常温下给定质量的气体,其压力和体积的乘积 pV 为常数(Boyle 定律);另外对于一个在常压下给定质量的气体,其体积和温度的比值 V/T 也为常数(Charles 定律)。综合 Boyle 定律和 Charles 定律,我们可以得到一个理想气体的 EOS 方程为:

$$pV = nRT \quad (1.2)$$

式中 p ——压力, psia;
 V ——体积, ft^3 ;
 n ——气体的磅摩尔数;
 R ——通用气体常数, 等于 $10.732 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3 / (^\circ\text{R} \cdot \text{lbm} \cdot \text{mol})$;
 T ——绝对温度, $^\circ\text{R}$ 。

值得注意的是通用气体常数的单位和大小是随着式(1.2)中其他变量的单位而变化的, 故 R 值有不同的单位^[1]。式(1.2)也可直接从运动学理论推导出来^[1]。

1.2.3 摩尔体积

摩尔体积 V_m 的概念用来转换在标准压力和温度条件下给定质量的气体为其蒸发体积。上述概念表明在给定的一系列标准条件下, 摩尔体积是常数, 可以实现质量向体积的互换, 或者适应一些推导的需要, 在标准条件下实现体积到质量的转换。

综合摩尔体积的定义 $V_m = V/n$ 及由式(1.2)给定的理想气体定律, 可以得到:

$$V_m = RT_{sc}/p_{sc} \quad (1.3)$$

假定基本或标准条件为: $T_{sc} = 60^\circ\text{F} + 459.67 = 519.67^\circ\text{R}$, $p_{sc} = 14.65 \text{ psia}$, 式(1.3)变为:

$$V_m = \frac{\left(10.732 \frac{\text{psia} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbm} \cdot \text{mol}^\circ\text{R}}\right)(519.67^\circ\text{R})}{14.65 \text{ psia}} = 380.7 \text{ ft}^3 / (\text{lbm} \cdot \text{mol}) \quad (1.4)$$

由于摩尔体积的大小依赖于压力和温度的标准条件, 为此对这些条件的定义就显得十分重要。除非有特殊的说明, 本书用 $p_{sc} = 14.65 \text{ psia}$ 和 $T_{sc} = 60^\circ\text{F}$ 作为标准条件。而且, 为了获得式(1.4)中的摩尔体积, 我们通过转换常数 459.67 将标准的温度从华氏度向兰氏度转换。对于本章中后面的计算, 我们应用一个精度稍低但是却更一般的转换常数 460。

1.2.4 实际气体的活动

实际气体定律是一个简单的压力—体积关系(比如, EOS), 它可以通过在理想气体定律中引入一个考虑非理想气体活动的校正系数来预测。实际气体定律为:

$$pV = znRT \quad (1.5)$$

其中 z 为无量纲数, 称为 z 系数、压缩系数或气体偏差系数。 z 系数校正理想气体定律的简单 EOS 式(1.2), 可以用来描述一个实际气体的活动。在理想压力和温度条件下, $z = 1.0$ 。 z 系数与压力、温度和气体成分有关, 可以在实验室通过对气藏样本的测量获得, 当然更多的是通过相关方法获得。

1.2.5 相应状态的法则

一些气体性质在相同的压力和温度简化条件下针对类似气体具有相同的数值(例如石蜡气体)。针对纯化合物的简化压力和温度条件可分别表示为:

$$p_r = p/p_c \quad (1.6)$$

$$T_r = T/T_c \quad (1.7)$$

针对纯化合物的拟简化压力和温度条件可分别表示为:

$$p_{pr} = p/p_{pc} \tag{1.8}$$

$$T_{pr} = T/T_{pc} \tag{1.9}$$

式中 p_c ——纯气体的临界力,psia;
 p_{pc} ——气体混合物的拟临界压力,psia;
 T_c ——纯气体的临界温度,R;
 T_{pc} ——气体混合物的拟临界温度,R。

一个纯物质的临界点(p_c, T_c)是指其液态和蒸发阶段相同情况下的压力和温度。在临界压力 p_c 以上,不管温度如何,液态和气态不能同时存在;在临界温度 T_c 以上,不管压力如何,物质不能被液化。对于纯物质, p_c 和 T_c 可通过试验确定。对于混合物, p_{pc} 和 T_{pc} 既可以通过一致性的混合规则计算,也可以通过相关来估算。这些计算得到的 p_{pc} 和 T_{pc} 值不是真正的临界值,液态和蒸发状态的性质在点(p_{pc}, T_{pc})处也是不同的。

对某种气体属性的观测,如 z 系数,应该在相同的简化温度和压力条件下针对纯的或类似的气体形式进行,这是它们相应状态的基础。同样的做法也可以对化学上相似的混合物进行观测。因此, z 系数针对纯气体和气体混合物的相关计算就基于上述原理。

1.3 天然气的性质

表 1.1 列出了天然气中出现的纯的组分的物理属性。这些属性是在标准条件($p_{sc} = 14.7$ psia, $T_{sc} = 60^\circ\text{F}$)下估算出来的,包括分子质量、临界压力和温度、理想密度、黏度(仅比戊烷轻的成分)。这些纯组分的属性被用来在混合规则基础上计算气体混合物的准属性,包括视分子质量和特定气体的重力。参考文献[2]~参考文献[4]提供了更为全面的天然气属性和通常在开发过程中出现的污染成分的列表。

表 1.1 温度 60°F、压力 14.7psia 条件下气体的物理属性

组成部分	化学式	分子质量 lbm/(lbm·mol)	临界温度 °R	临界压力 psia	液体密度 ^① lbm/ft ³	气体密度 lbm/ft ³	气体黏度 cP
氢气	H ₂	2.109	59.36	187.5	4.432	0.005312	0.00871
氦气	He	4.003	9.34	32.9	7.802	0.01055	0.01927
水	H ₂ O	18.015	1164.85	3200.1	62.336	—	-1.122
一氧化碳	CO	28.013	227.16	473.1	50.479	0.07381	0.01725
氮气	N ₂	28.010	239.26	507.5	49.231	0.08432	0.01735
氧气	O ₂	31.999	278.24	731.4	71.228	0.08981	0.02006
二氧化硫	H ₂ S	34.08	672.35	1306.0	49.982	0.1160	0.01240
二氧化碳	CO ₂	44.010	547.58	1071.0	51.016	0.07632	0.01439
空气	—	28.963	238.36	546.9	54.555	0.04228	0.01790
甲烷	CH ₄	16.043	343.00	666.4	18.710	0.07924	0.01078
乙烷	C ₂ H ₆	30.070	549.59	706.5	22.214	—	0.00901

续表

组成部分	化学式	分子质量 lbm/(lbm · mol)	临界温度 °R	临界压力 psia	液体密度 ^① lbm/ft ³	气体密度 lbm/ft ³	气体黏度 cP
丙烷	C ₃ H ₈	44.097	665.73	616.0	31.619	—	0.00788
异丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123	734.13	527.9	35.104	—	0.00732
正丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123	765.29	550.6	36.422	—	0.00724
异戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150	828.77	490.4	38.960	—	—
正戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150	845.47	488.6	39.360	—	—
己烷	C ₆ H ₁₄	86.177	913.27	436.9	41.400	—	—
庚烷	C ₇ H ₁₆	100.204	972.37	396.8	42.920	—	—
辛烷	C ₈ H ₁₈	114.231	1023.89	360.7	44.090	—	—
壬烷	C ₉ H ₂₀	128.258	1070.35	331.8	45.020	—	—
癸烷	C ₁₀ H ₂₂	142.285	1111.67	305.2	45.790	—	—

① 这里给出的数据是在 60°F, 压力 14.7 psia 条件下以液体形式存在的组分的“液体密度”, 以及在该温度、压力条件下以气体形式存在的组分的“估算液体密度”。

1.3.1 气体混合物的视分子质量

由于一个气体混合物是由不同大小和质量的分子组成, 因此其自身并没有明显的分子质量。然而, 一个气体混合物的活动就好像它具有一个明确的分子质量。这种观测到的由 n_c 个组分构成的气体混合物的分子质量被称为视分子质量或摩尔平均分子质量, 由下式确定:

$$M = \sum_{i=1}^{n_c} y_i M_i \quad (1.10)$$

式中 M ——气体混合物的视分子质量, lb/(lbm · mol);

M_i ——第 i 个气体成分的分子质量, lb/(lbm · mol);

y_i ——第 i 个组分在气态下的摩尔分数。

1.3.2 气体的相对密度

气体的相对密度 γ_g 是这样定义的, 当气体和干空气在相同的温度和压力条件下测量, 气体和干空气的密度之比称为 γ_g :

$$\gamma_g = \rho_g / \rho_a \quad (1.11)$$

式中 ρ_g ——气体混合物的密度, lbm/ft³;

ρ_a ——空气的密度, lbm/ft³。

在标准条件下(例如 14.65 psia, 60°F), 空气和天然气都可以通过理想气体定律进行模拟。在上述条件下, 如果我们用磅摩尔($n = m/M$)和密度($\rho = m/V$)定义, 并通过理想气体 EOS 方程来模拟气体和空气的活动, 就可以得到气体混合物的相对密度的表达式为:

$$\gamma_g = (pM/RT)(pM_a/RT) = M/M_a \quad (1.12)$$

式中 γ_g ——气体的相对密度(空气为 1.0);

M ——气体的视分子质量, $\text{lbm}/(\text{lbm} \cdot \text{mol})$;

M_a ——空气的分子质量, 等于 $28.9625 \text{ lbm}/(\text{lbm} \cdot \text{mol})$ 。

尽管式(1.12)是在假设理想气体条件下推导出来的(在标准条件下准确),但在天然气工业中它也广泛始用于对实际气体和气体混合物的定义。

1.4 拟临界气体属性的计算

这部分讨论两种计算碳烃气体混合物的拟临界压力和温度。这些拟临界属性提供了混合物的物理属性和其相应状态原则的相关方法。如前所述,对应状态原则表明纯的且类似的气体在相同的简化压力和温度条件下具有相同的气体偏差系数或 z 系数。其他的气体物理属性也同时与其对应的状态准则相关。化学上相似的气体混合物也可以在简化的温度和压力下相关。

第一种方法是由 Stewart 先生等提出的一系列混合准则^[5],前提是需要知道气体的成分。尽管这种方法与早期的方法相比更费时(比如 Kay 过程^[6]),但 Stewart 等人的混合准则被证明精度更高。第二种方法由 Sutton 提出^[7],用来估算气体成分未知情况下的拟临界属性。Sutton 的方法与 Stewart 等人的混合准则法相比需要更少的数学运算,特别是当速度因素比精度更重要时,Sutton 方法成为首选。尽管 Sutton 方法仅仅用特殊的气体相对密度来替代具体的碳烃组分,但精度仍要比 Kay 的混合准则高。

另外,本章还讨论了用相关方法来校正由于天然气开采过程中存在污染成分的拟临界压力和温度,如:硫化氢、二氧化碳、氮和水蒸气等的存在。同时给出了一个针对湿气或气体冷凝物的相对密度进行估算的计算方法,这个特定的气体相对密度可以用在 Sutton 方法中来估算拟临界属性。

1.4.1 已知气体成分下的拟临界属性估算:Stewart 等人混合准则

Stewart 等人^[5]对比了 21 种不同的混合准则,结论为最好的方法由式(1.19)~式(1.24)给出。这个混合准则提供了试验数据与计算结果相比较情形下简单立方混合准则的最一致性结果。这里“简单的立方”指三次方形式的 EOS 方程(例如, van der Waals^[8] 和 Redlich - Kwong^[9] EOS 方程)。由于上述混合准则给出了最为准确的结果,因此应该用 Stewart 等人的方法来估算拟临界压力和温度,进而估算 z 系数、气体压缩性和气体黏度。

下面是一个推荐的 Stewart 等人混合准则过程,同时它也用于校正 Sutton^[7]方法中的高分子质量成分[式(1.16)~式(1.18)]。Kessler - Lee^[10]方程[式(1.13)~式(1.15)]用于计算含有庚烷成分的临界属性。

Stewart 等人方法的计算过程:

(1)如果在天然气混合物中,重组分(C_7 或者比 C_7 更高)占主导,那么在试验室中对分子质量和 C_{7+} 部分相对密度的测量需要用混合准则来计算混合物的相对密度和拟临界属性。建议用 Whitson^[11]和 Kessler - Lee^[10]方程[式(1.13)~式(1.15)]来估算 C_{7+} 部分的临界属性。

① 估算 C_{7+} 部分的沸点温度:

$$T_{bc_{7+}} = (4.5579 M_{C_{7+}}^{0.15178} \gamma_{C_{7+}}^{0.15427})^3 \quad (1.13)$$

② 估算 C_{7+} 部分的拟临界压力:

$$p_{pc_{C_{7+}}} = \exp \left[8.3634 - \frac{0.0566}{\gamma_{C_{7+}}} - \left(0.24244 + \frac{2.2898}{\gamma_{C_{7+}}} + \frac{0.11857}{\gamma_{C_{7+}}^2} \right) \frac{T_{bc_{7+}}}{1.000} \right. \\ \left. + \left(1.4685 + \frac{3.648}{\gamma_{C_{7+}}} + \frac{0.47227}{\gamma_{C_{7+}}^2} \right) \frac{T_{bc_{7+}}^2}{10^7} - \left(0.42019 + \frac{1.6977}{\gamma_{C_{7+}}^2} \right) \frac{T_{bc_{7+}}^3}{10^{10}} \right] \quad (1.14)$$

③ 估算 C_{7+} 部分的拟临界温度:

$$T_{pc_{C_{7+}}} = (341.7 + 811\gamma_{C_{7+}}) + (0.4244 + 0.1174\gamma_{C_{7+}})T_{bc_{7+}} \\ + (0.4669 - 3.2623\gamma_{C_{7+}}) \frac{10^5}{T_{bc_{7+}}} \quad (1.15)$$

(2) 利用 Sutton^[7] 方法来确定高分子质量组分的校正因子 F_j, ξ_j 和 ξ_k :

$$F_j = \frac{1}{3} \left(\frac{yT_c}{p_c} \right)_{C_{7+}} + \frac{2}{3} \left(\frac{y^2T_c}{p_c} \right)_{C_{7+}} \quad (1.16)$$

$$\xi_j = 0.6081F_j + 1.1325F_j^2 - 14.004F_j\gamma_{C_{7+}} + 64.434F_j\gamma_{C_{7+}}^2 \quad (1.17)$$

$$\xi_k = \left(\frac{T_c}{\sqrt{p_c}} \right)_{C_{7+}} (0.3129\gamma_{C_{7+}} - 4.8156\gamma_{C_{7+}}^2 + 27.3751\gamma_{C_{7+}}^3) \quad (1.18)$$

(3) 从表 1.1 或参考文献[2] ~ 参考文献[4] 获取剩余组分的临界压力和温度。

(4) 确定气体的拟临界压力和温度。

① 计算参数 J 和 K :

$$J = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n_c} \left(\frac{yT_c}{p_c} \right)_i + \frac{2}{3} \left[\left(\sum_{i=1}^{n_c} y \sqrt{\frac{T_c}{p_c}} \right)_i \right]^2 \quad (1.19)$$

$$K = \sum_{i=1}^{n_c} \left(\frac{yT_c}{p_c} \right)_i \quad (1.20)$$

② 校正 C_{7+} 部分的 J 和 K 参数:

$$J' = J - \xi_j \quad (1.21)$$

$$K' = K - \xi_k \quad (1.22)$$

③ 计算拟临界温度和压力:

$$T_{pc} = K'^2 / J' \quad (1.23)$$

$$p_{pc} = T_{pc} / J' \quad (1.24)$$

例 1.1: 用 Stewart 等人的混合拟则来计算脱硫天然气的拟临界属性。

计算表 1.2 中描述的脱硫天然气的视分子质量、气体的重力及拟临界压力和温度。所谓脱硫气体^[12]是指没有硫化氢(H_2S)污染的天然气。 C_{7+} 部分的分子质量和重度分别是 114.2 lbm/(lbm · mol) 和 0.7070。