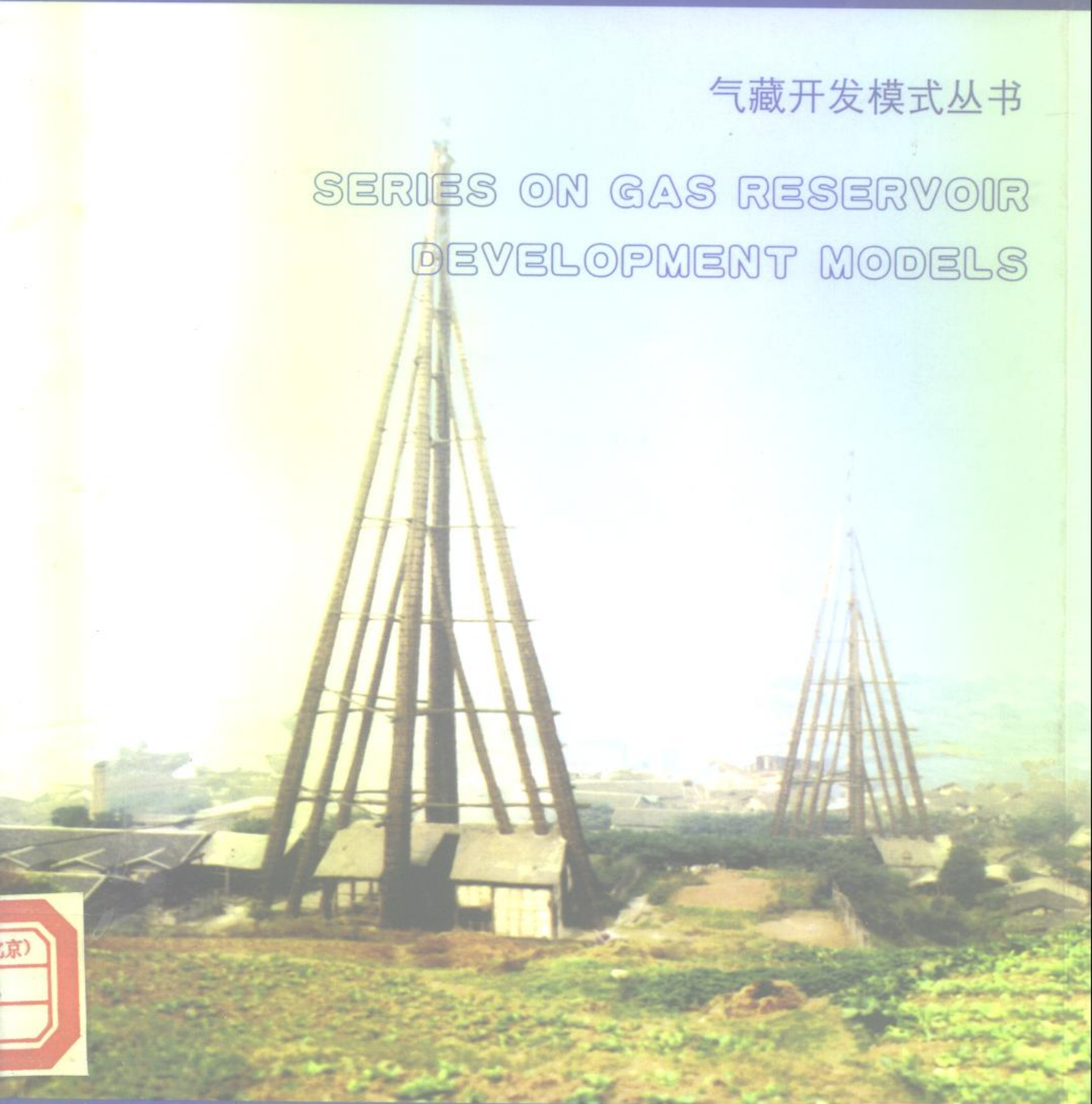


气藏和气井动态分析及计算程序

《气藏和气井动态分析及计算程序》编写组 编著

气藏开发模式丛书

SERIES ON GAS RESERVOIR
DEVELOPMENT MODELS



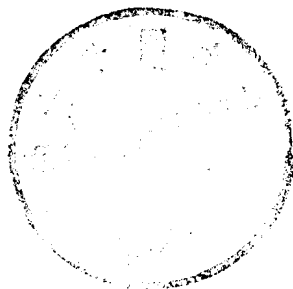
石油工业出版社

101623
T E 33
009

气藏开发模式丛书

气藏和气井动态分析 及计算程序

《气藏和气井动态分析及计算程序》编写组 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是按照气田开发分析过程,将常规的气藏、气井动态分析工作系统化、规范化、软件化。本书基本包含了常规分析的所有方法,同时,编制有一个系统化的软件,可使读者能方便地选择各种分析计算方法。本书可供油气田开发工程技术人员和管理干部以及高等院校的师生参考。

本书第一、二、三章及全书算例由赵红编写,第四、七章及计算程序由冯曦编写,第五、六、八、九、十章由钟孚勋编写,全书由冈秦麟和钟孚勋审定。

2003 57

图书在版编目(CIP)数据

气藏和气井动态分析及计算程序

《气藏和气井动态分析及计算程序》编写组编著.

北京:石油工业出版社,1996.6

(气藏开发模式丛书/冈秦麟主编)

ISBN 7-5021-1335-5

I.气…

II.气…

III.①油田动态-分析②气田动态-分析③油气田-储量-计算

IV.①TE33②TE15

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第11209号

石油工业出版社出版

(100011北京安定门外安华里2区1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 14³/₄印张 354千字 印1-1500

1996年6月北京第1版 1996年6月北京第1次印刷

ISBN7-5021-1335-5/TE·1189

精装定价:26.00元

平装定价:16.00元

《气藏和气井动态分析及计算程序》

编写及编审人员名单

主 编： 冈秦麟

编写人员： 钟孚勋 冯 曦 赵 红

审定人员： 冈秦麟 钟孚勋

责任编辑： 崔红升

序

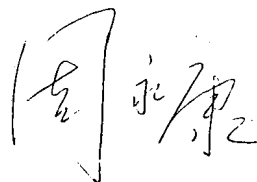
总结我国不同类型气藏开发模式及工艺技术，并组织出版一套系统的丛书，这在我国还是首次。这套书的出版，对于适应我国天然气工业发展的需要，促进我国气田开发技术水平的提高，必将产生重要的作用。

为了总结我国气田开发的经验，更好地指导今后工作，中国石油天然气总公司科技局组织了石油科研院所、高等院校和油气田企业中有丰富实践经验，又有较高理论水平的老、中、青科研人员，组成“不同类型气藏开发模式及工艺技术系列”课题研究组。这个课题组由108名同志组成，在四年的时间里，做了大量深入细致的调研分析、室内试验和数值模拟等工作，取得可喜的研究成果。这些研究成果，最终都体现在这套书中。

这套书内容比较丰富，既介绍了不同类型气藏的开发模式和开采工艺，又介绍了一套系统的气藏开发实用技术方法；既有对不同类型气田开发实例的剖析，又有在实践基础上形成的新理论和新认识；既有对国内气田开发经验的系统总结，又有对国外气田开发做法的介绍。因此，这套书是我国气田开发方面比较系统的著作。

这套书指导性比较强。由于主要来自于对实践经验的总结，因此对国内气田开发具有现实的指导意义，其中许多研究成果已用于指导新气田的开发，提高了气田开发的科学性、预见性和经济效益。比如关于低渗透区一部分天然气可通过高渗透区气井采出的新认识和新方法，已用于大天池等新气田的开发设计，大大减少了钻井数，提高了气田开发水平。我们也应当看到，由于我国较早投入开发的气田多集中在四川盆地，在区域上有较大的局限性，因此，这套书中总结的开发模式类型较少，有待于今后进一步充实和丰富。

科学技术是第一生产力，努力提高科技水平，是走上以经济效益为中心发展轨道的一条重要途径。我国有丰富的天然气资源，努力寻找和开发天然气资源，需要大力提高天然气勘探开发的技术水平。石油战线的科技工作者担负着光荣而艰巨的任务，需要进行艰苦的努力和不懈的探索。



丛书前言

我国不同类型气藏开发模式及工艺技术系列的课题研究,是为了适应我国天然气工业即将大发展的需要,也是为了更好地提高气田开发的科学性、预见性和自觉性。

1988年中国石油天然气总公司科技发展局和原天然气司组织有关专家研究了课题内容、技术路线、技术关键、模式类型选择、气田开发基础技术方法以及承担课题单位的选择等。由于我国天然气田主要集中在四川盆地,地质条件复杂、开采难度大,一批气田现已开采了20~30年。为了开发好这些气田,四川石油管理局做了大量的工作,积累了丰富的经验。系统地总结这些气田的开发经验,并掌握其发展规律,将会提高全国各地气田开发的技术水平。为此,中国石油天然气总公司科技发展局决定编写《气藏开发模式》丛书,共分五册:

《总论》

《中国五类气藏开发模式》

《气藏开发应用基础技术方法》

《气藏和气井动态分析及计算程序》

《国外六类气藏开发模式及工艺技术》

本套丛书由四川石油管理局、西南石油学院、中原石油勘探局、中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院万庄分院、中国石油天然气总公司信息所等单位一批有丰富实践经验和较高理论水平的专家承担,系统地开展了气藏开采历程的剖析、室内机理研究、国内外气藏研究方法的整理和筛选,在重新建立地质模型基础上,采用数值模拟方法重新优化设计以及开展我国气田开发适用的计算机软件等研究。本课题始终在19名专家组成的技术领导小组领导下进行工作,已于1994年全面完成。

本套丛书的出版,将大大提高我国气田开发的科学性和预见性,是一套实用性很强的气田开发技术丛书,也是适用的技术工具书。

随着我国投入开发的气田不断增加,更多的气藏类型有待我们进一步总结,以不断完善和丰富我国气田开发的理论及工艺技术。

中国石油天然气总公司科技发展局

1994年8月2日

绪 言

气井、气藏动态分析方法，是科学开发气田的一项基础工作。它以渗流力学理论为基础，在气田开发全过程，应用科学的计算方法，不断地分析气井、气藏开采特征及其动态变化规律，达到高效、高水平的开发气田。

20世纪以来，随着世界石油工业的发展，油田开发和气田开发越来越显露出其不同的开发规律，从储层特征、层系划分、井网部署、开发方式、开采工艺、开发指标控制因素以及采收率预测等均有各自的特点和不同的要求。通过大量的气田投入开发，气藏工程方法不断得到丰富和完善，现已逐步形成独立的学科，气井、气藏动态分析方法越来越被人们所重视，已成为气田开发生产管理和科研工作的基本手段。

我国气田主要分布在四川，气田开发已有30多年的历史，近年来又在陕甘宁盆地、柴达木盆地、海上以及新疆地区陆续发现一批气田。由于气田类型多、大多储层物性差、非均质性严重，相当一部分是裂缝性、小断块或透镜体岩性气藏。在这样复杂的气田开发中，锻炼培育了一批既有理论又有实践经验的气田开发技术人员，基本上掌握了气田开发工作中的一整套气藏工程方法，并结合我国气田实际情况，开发了一些适合我国气田特点、并行之有效的计算方法，使常规气藏工程方法更加完善、实用和系统、较好地满足了气田发展的需要。

由于近年来我国天然气探明储量增长较快，新找到一批大、中型气田，我国天然气工业将进入大发展时期，合理开发好气田已成为当前的突出任务。为此，1989年中国石油天然气总公司科技发展局组织了“气藏工程方法”课题研究，其中第一部分就是开展常规气井、气藏动态分析方法的系统化、规范化和软件化研究，对国内外量大、面宽的常规气藏工程计算方法，进行了系统分析、筛选、分类，并使其科学化。在此基础上，形成一套功能较全、实用性强、操作简单和方便的软件系统。这不仅可大大提高工作效率，更重要的是使用的计算方法正确，计算结果准确，而且分析工作更加规范和全面系统，能正确及时地掌握气井、气藏在开发过程中的动态，从而，为科学地调整开发好气田创造条件。

本书几乎涉及气藏工程全部常规分析内容，共建立了十个方面70余种计算方法和200多个计算公式，这些方法和公式大多都在我国实际气田开发中进行了验证，证明公式和方法是正确的，“软件”的分析、计算结果是可靠的，精度是高的。软件设计采用了模块化结构，分层式多级菜单管理方式，在保持现有结构情况下，可随时补充嵌入新内容，使软件既有严密的逻辑性，又可灵活的自由选择，还可进一步扩充完善，操作简单方便，并全部实现了数据处理、分析、绘图、制表的计算机处理。这是一个规模大、功能丰富、逻辑结构清晰、实用性强、可扩充性强的大型气井、气藏动态分析微机软件系统。这样全面系统的气井、气藏动态分析方法及软件在国内外尚属首次。本书的出版必将为气田开发技术人员的工作提供方便，并大大提高气田开发工作的水平和工作效率，为科学合理开发气田提供可靠依据。

冈秦麟

1994年8月2日

前 言

气藏、气井动态分析是气田开发的核心工作，贯穿于气藏工程研究和气田生产管理之中，涉及面广，内容丰富，方法众多。掌握和分析气藏、气井的开采动态，研究其动态机理，是认识气藏、气井的主要工作，是开发气田和改造气田不可缺少的部分。无论是气田开发动态预测，还是开发规划的编制，动态分析都是十分重要的基础工作。只有深入地分析了气藏、气井的动态特征，掌握了其动态规律，才能深化对气田的认识，从而确定最佳开发方案，调整方案、挖潜方案，或编制切合实际的气田生产规划，实现气田开发的高效开发。

气藏、气井动态分析是一项十分繁杂的工作，它以渗流力学为基础，涉及了气藏工程的各个方面。要全面掌握，除需要较为深厚的理论基础外，还要有丰富的实际经验，限于能力、经验、手段以及理解程度的差别，动态分析工作总会参差不齐，直接影响着气田开发的研究和生产管理。

本书试图将常规的气藏、气井动态分析工作，系统化、规范化、软件化，使这项繁杂的工作明确化、程式化，从而易于掌握，并且使分析更全面，结果更准确，资料利用率更高。因此，书中较为全面地收集了有关气藏、气井动态分析方法，几乎涉及了气藏工程所有常用的分析方法，包括储层流体和储层岩石物性计算、井筒流动计算、压力系统确定、储量计算、产能计算、参数计算、平均地层压力计算、产量递减分析、采收率计算等十个方面，共有分析方法 70 余种，计算公式 200 多个。其中既有广泛应用的经典方法，也有近年来迅速发展起来的现代方法，还有根据大量实际资料总结出来的经验方法。同时，引入一些实用算法，如重积分法、曲线非线性最小二乘拟合等，扩展了动态分析方法。所有的分析过程都纳入了一个软件系统，使分析过程清晰、明确、程式化。

全书是按照气田开发分析过程编写，基本上是采用分析方法、算例、计算机程序的结构，其算例的写法是按照程序运行过程编写的。

本书编写过程中，得到陈元千教授的热情支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，编写经验缺乏，本书难免有错误和不妥之处，敬请批评指正。

作 者

1993 年 10 月于成都

目 录

第一章 储层流体物性	(1)
第一节 天然气 pVT 计算	(1)
第二节 原油 pVT 计算	(4)
第三节 地层水 pVT 计算	(8)
第四节 天然气组分	(10)
第二章 储层岩石物性	(12)
第一节 孔隙度	(12)
第二节 渗透率	(12)
第三节 岩石有效压缩系数	(15)
第三章 井筒流动	(17)
第一节 气井井底压力计算	(17)
第二节 气井排液计算	(18)
第四章 压力系统确定	(20)
第一节 井间干扰分析	(20)
第二节 动态图分析	(26)
第三节 地层流体界面位置确定	(28)
第五章 储量计算	(32)
第一节 气藏储量计算	(32)
第二节 单井或气藏储量计算	(48)
第六章 产能计算	(59)
第一节 稳定试井法	(59)
第二节 不关井的稳定试井法	(62)
第三节 等时试井和修正等时试井	(64)
第四节 一点法	(67)
第五节 压力恢复法	(68)
第六节 产能测试应用	(71)
第七章 参数计算	(73)
第一节 基本原理	(73)
第二节 试井解释	(81)
第三节 多产量试井	(90)
第四节 典型曲线模型	(92)
第五节 典型曲线分析	(95)
第六节 一致性检验	(104)
第八章 平均地层压力计算	(109)
第一节 单井平均地层压力计算	(109)

第二节 气藏平均地层压力计算	(114)
第九章 产量递减分析	(120)
第一节 递减类型的对比与判断	(120)
第二节 递减分析	(125)
第十章 采收率计算	(129)
第一节 物质平衡法	(129)
第二节 产量递减法	(131)
第三节 平均产率法	(132)
第四节 罗杰斯蒂函数法	(132)
附录 计算程序	(134)
参考文献	(220)

第一章 储层流体物性

储层流体物性参数是油、气藏工程计算的重要参数，在动态分析中不可缺少。流体物性参数计算公式较多，有不少相关经验公式，通过大量的计算对比，本章选择了下述算式进行计算。

第一节 天然气 pVT 计算

1. 天然气偏差系数

天然气是一种真实气体，其状态方程式为：

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

式中的 Z 叫做气体偏差系数，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。利用 Dranchuk, Purvis 和 Robinson (1974) 的相关经验公式计算：

$$Z = 1 + (A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^3})\rho_r + (A_4 + \frac{A_5}{T_r})\rho_r^2 + \frac{A_5 A_6 \rho_r^5}{T_r} + \frac{A_7 \rho_r^2}{T_r^3} (1 + A_8 \rho_r^2) \exp(-A_8 \rho_r^2) \quad (1-2)$$

式中 $A_1=0.3151$ $A_2=-1.0467$ $A_3=-0.5783$ $A_4=0.5353$ $A_5=-0.6123$
 $A_6=-0.1049$ $A_7=0.6816$ $A_8=0.6845$

$$\rho_r = \frac{0.27p_r}{ZT_r} \quad (1-3)$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (1-4)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1-5)$$

在已知 p_r 和 T_r 的情况下，需要经过一个迭代过程求解 ρ_r ：

$$\rho_r(i+1) = \rho_r(i) - \frac{f(\rho_r)}{g(\rho_r)} \quad (1-6)$$

$$f(\rho_r) = A_5 A_6 \rho_r^6 + (A_4 T_r + A_5)\rho_r^3 + (A_1 T_r + A_2 + \frac{A_3}{T_r^3})\rho_r^2 + T_r \rho_r + \frac{A_7 \rho_r^3}{T_r^2} (1 + A_8 \rho_r^2) \exp(-A_8 \rho_r^2) - 0.27\rho_r \quad (1-7)$$

$$g(\rho_r) = f'(\rho_r) \quad (1-8)$$

求得 ρ_r 后计算 Z 值:

$$Z = \frac{0.27p_r}{\rho_r T_r} \quad (1-9)$$

这种算法收敛很快,只需迭代 5 次或更少次数,即可达到令人满意的精度。

符号及单位注释:

- Z——天然气偏差系数, f;
- p——气体压力, MPa;
- p_r ——对比压力, f;
- p_c ——临界压力, MPa;
- T——地层温度, K;
- T_r ——对比温度, f;
- T_c ——临界温度, K;
- V——气体体积, m^3 ;
- n——气体摩尔数, kmol;
- R——气体常数, $MPa \cdot m^3 / (kmol \cdot k)$;
- ρ_r ——对比密度, f。

2. 天然气等温压缩系数

天然气等温压缩系数, 是在恒温条件下随压力变化的单位体积变化量, 可写为:

$$C_g = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-10)$$

解出(1-1)式中的 V 代入有:

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P} \quad (1-11)$$

引入对比压缩系数 C_r :

$$C_g = \frac{C_r}{p_c} \quad (1-12)$$

计算 C_r :

$$C_r = \frac{1 - \frac{\rho_r}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \rho_r}}{p_r} \quad (1-13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{d\rho_r} = \frac{1}{\rho_r T_r} [& 5A_5 A_6 \rho_r^5 + 2(A_4 T_r + A_5) \rho_r^2 + (A_1 T_r + A_2 + \frac{A_3}{T_r^2}) \rho_r \\ & + 2 \frac{A_7 \rho_r^2}{T_r} (1 + A_8 \rho_r^2 - A_8^2 \rho_r^4) \exp(-A_8 \rho_r^2)] \end{aligned} \quad (1-14)$$

符号及单位注释:

C_g ——天然气等温压缩系数, l / MPa ;

C_r ——天然气对比压缩系数, f ;

其余符号与 Z 关系式中符号同义。

3.天然气的粘度

在地层条件下, 天然气粘度是压力、温度和气体组分的函数, 根据 Carr 的关系式有:

$$\ln\left(\frac{\mu_g T_r}{\mu_l}\right) = A_0 + A_1 p_r + A_2 p_r^3 + A_3 p_r^3 + T_r(A_4 + A_5 p_r + A_6 p_r^2 + A_7 p_r^3) \\ + T_r^2(A_8 + A_9 p_r + A_{10} p_r^2 + A_{11} p_r^3) \\ + T_r^3(A_{12} + A_{13} p_r + A_{14} p_r^2 + A_{15} p_r^3) \quad (1-15)$$

式中 $A_0 = -2.4621182$ $A_1 = 2.97054714$ $A_2 = -0.286264054$ $A_3 = 0.00805420522$

$A_4 = 2.80860949$ $A_5 = -3.49803305$ $A_6 = 0.36037302$ $A_7 = -0.0104432413$

$A_8 = -0.793385684$ $A_9 = 1.39643306$ $A_{10} = -0.149144925$ $A_{11} = 0.00441015512$

$A_{12} = 0.0839387178$ $A_{13} = -0.186408846$ $A_{14} = 0.0203367881$ $A_{15} = -0.000609579263$

$$\mu_l = \mu_1 + \mu_{N_2} + \mu_{CO_2} + \mu_{H_2S} \quad (1-16)$$

$$\mu_1 = (1.709 \times 10^{-5} - 2.062 \times 10^{-6} \gamma_g)(1.8T + 32)$$

$$+ 8.188 \times 10^{-3} - 6.15 \times 10^{-3} \lg(\gamma_g) \quad (1-17)$$

$$\mu_{N_2} = N_2 \cdot (8.48 \times 10^{-3} \lg(\gamma_g) + 9.59 \times 10^{-3}) \quad (1-18)$$

$$\mu_{CO_2} = CO_2 \cdot (9.08 \times 10^{-3} \lg(\gamma_g) + 6.24 \times 10^{-3}) \quad (1-19)$$

$$\mu_{H_2S} = H_2S \cdot (8.49 \times 10^{-3} \lg(\gamma_g) + 3.73 \times 10^{-3}) \quad (1-20)$$

符号及单位注释:

μ_g ——天然气粘度, $mPa \cdot s$;

μ_l ——在气层温度和大气压力下的气体粘度, $mPa \cdot s$;

μ_{N_2} ——氮气粘度校正值, $mPa \cdot s$;

μ_{CO_2} ——二氧化碳粘度校正值, $mPa \cdot s$;

μ_{H_2S} ——硫化氢粘度校正值, $mPa \cdot s$;

N_2 、 CO_2 、 H_2S ——分别为其含量, %;

γ_g ——天然气相对密度(空气 = 1.0);

T ——地层温度, $^{\circ}C$ 。

其余符号与上同义。

4.天然气的体积系数

天然气体积系数是天然气地下体积量与天然气地面标准条件下体积量的比值, 表示为:

$$B_g = \frac{V_R}{V_{sc}} \quad (1-21)$$

从(1-1)式中解出体积量,代入有:

$$B_g = \frac{p_{sc} Z T}{p Z_{sc} T_{sc}} \quad (1-22)$$

通常取 $Z_{sc} = 1.0$, 而当 $p_{sc} = 0.101 \text{MPa}$ 和 $T_{sc} = 293 \text{K}$ 时为:

$$B_g = 3.447 \times 10^{-4} \frac{Z T}{p} \quad (1-23)$$

符号及单位注释:

B_g ——天然气体积系数, f;

V_R ——天然气地下体积量, m^3 ;

V_{sc} ——天然气地面标准条件下体积量, m^3 。

算例: 根据实验室数据, 天然气的临界温度为 193K, 临界压力为 4.6MPa, 气层温度为 110℃, 气层压力为 30MPa, 气体相对密度为 0.6, 求天然气的 pVT 数据。

输入已知数据:

气层压力: 30 MPa

气层温度: 110 °C

临界压力: 4.6 MPa

临界温度: 193K

气体相对密度: 0.6

校正系数: 0

求得天然气 pVT 参数为:

气体偏差系数 $Z = 1.003151$

气体等温压缩系数 $C_g = 0.02588 \text{ 1/MPa}$

气体粘度 $\mu_g = 0.0201673 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

气体体积系数 $B_g = 0.00424999$

第二节 原油 pVT 计算

地层原油的物性, 是影响油藏类型, 拟定开发方案和进行各种油藏工程计算的重要参数。

1. 原油饱和压力

它表示在地层条件下, 原油中的溶解气开始分离出来时的压力。饱和压力的大小, 主要取决于油、气的组分和油藏的温度, 应该通过 pVT 取样分析测定。但是在没有这样的分析资料时, 也可利用相关经验公式确定:

$$p_b = \left[\frac{R_s}{A \gamma_{gs} e^{C \cdot \gamma_1 / T_1}} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (1-24)$$

$$\gamma_{gs} = \gamma_g \left[1 + 0.2488 \left(\frac{1.076}{\gamma_0} - 1 \right) \left(5.625 \times 10^{-2} T_s + 1 \right) (\lg p_s + 0.1019) \right] \quad (1-25)$$

$$\gamma_{11} = \frac{1.076}{\gamma_0} - 1 \quad T_1 = 3.6585 \times 10^{-3} (T + 273)$$

当 $\gamma_0 > 0.876$ 时:

$$A = 1.4899 \quad B = 1.0937 \quad C = 6.875$$

当 $\gamma_0 < 0.876$ 时:

$$A = 1.1655 \quad B = 1.187 \quad C = 6.396$$

符号及单位注释:

p_b ——原油饱和压力,MPa;

R_s ——实测油气比, m^3/m^3 ;

γ_{gs} ——校正后的气体相对密度(空气 = 1.0);

γ_0 ——原油相对密度(水 = 1.0);

γ_g ——实测天然气相对密度(空气 = 1.0);

T_s ——分离器温度,°C;

p_s ——分离器压力,MPa;

T ——油气层温度,°C。

2.原始溶解油气比

在地层条件下的原油中溶解有天然气,单位体积原油中天然气的溶解量称为原始溶解油气比,一般标准米³/吨为单位。其大小取决于地层内的油、气性质、组分、地层温度和饱和压力大小。

$$R_s = A \cdot \gamma_{gs} \cdot p^B \cdot e^{\frac{C \cdot \gamma_1}{T_1}} \quad (1-26)$$

符号及单位注释:

使用符号与上同义。

3.原油压缩系数

它是油藏弹性能量的一个量度。其定义为在地层条件下,每单位压力变化时,单位体积原油的体积变化率:

$$C_0 = \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-27)$$

C_0 的数值,应由实验室测定,当实在无法取得这一数据时,也可采用相关经验公式,Vazquez 和 Beggs 给出了处于等于或高于饱和压力条件下的算式:

$$C_0 = [-1433 + 28.075 R_s + 550.4(5.625 \times 10^{-2} T + 1)]$$

$$-1180\gamma_{gs} + 1658.215\left(\frac{1.076}{\gamma_0} - 1\right)] / (10^5 p) \quad (1-28)$$

符号及单位注释:

C_0 ——原油压缩系数, $1/\text{MPa}$;

V ——原油体积, m^3 ;

其余符号与上同义。

4. 原油粘度

粘度又称为粘滞系数, 地层原油粘度除受其地层温度和地层压力的影响外, 还受到构成原油的组分和天然气在原油中的溶解度的影响。一般由实验室测定, 也可计算系数先计算脱气原油粘度, 而后按溶解气含量进行校正:

$$\mu_{od} = 10^A - 1 \quad (1-29)$$

式中:

$$A = 1.7763 \times 10^{-2} B(5.625 \times 10^{-2} T + 1)^{-1.163}$$

$$B = 10^C$$

$$C = 3.0324 - 2.66022\left(\frac{1.076}{\gamma_0} - 1\right)$$

对于等于或低于饱和压力条件下的“含气原油”, 有 Beggs 和 Connally 的相关经验公式:

$$\mu_{ob} = AA \cdot \mu_{od}^{BB} \quad (1-30)$$

$$AA = (5.618 \times 10^{-2} R_s + 1)^{-0.515} \quad (1-31)$$

$$BB = (3.7453 \times 10^{-2} R_s + 1)^{-0.338} \quad (1-32)$$

对于高于饱和压力的含气原油有 Vazgues 的相关经验公式:

$$\mu_o = \mu_{ob} \left(\frac{p}{p_b}\right)^{AAA} \quad (1-33)$$

$$AAA = 956.43p^{1.187} e^{-(11.513 + 1.302 \times 10^{-2} p)} \quad (1-34)$$

符号及单位注释:

μ_{od} ——地层温度下脱气原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

μ_{ob} ——饱和压力下地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

μ_o ——地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

其余符号与上同义。

5. 原油体积系数

当原油采至地面时, 由于压力和温度的降低, 引起溶解气从原油中分离, 使原油体积缩小。原油体积系数定义为原油在地下的体积 V_f 与其地面脱气后体积 V_s 的比值, 即:

$$B_o = \frac{V_f}{V_s} \quad (1-35)$$

原油体积系数应在实验室中加以测定。也可采用一些相关经验公式计算。

等于或低于饱和压力时，有 Vazquez 和 Beggs 的经验公式：

$$B_{ob} = 1 + C_1 R_s + \left[(C_2 + C_3 R_s)(6.4286 \times 10^{-2} T - 1) \left(\frac{1.076}{\gamma_o} - 1 \right) \right] / \gamma_{gs} \quad (1-36)$$

当 $\gamma_o > 0.876$ 时：

$$C_1 = 2.6261 \times 10^{-3};$$

$$C_2 = 0.06447;$$

$$C_3 = -3.7441 \times 10^{-4};$$

当 $\gamma_o < 0.876$ 时：

$$C_1 = 2.6222 \times 10^{-3};$$

$$C_2 = 0.0405;$$

$$C_3 = 2.7642 \times 10^{-5};$$

高于饱和压力条件下，有：

$$B_o = B_{ob} e^{[C_o(p_s - p)]} \quad (1-37)$$

符号及单位注释：

B_o ——原油体积系数；

B_{ob} ——饱和压力下原油体积系数；

V_f ——原油在地下体积；

V_s ——地面脱气后体积。

其余符号与上同义。

算例：油层压力为 34.47MPa，温度为 121.11℃ 的原油相对密度为 0.83，分离器压力、温度条件下天然气相对密度为 0.6，实测油气比为 178.086m³/m³。求此原油的 pVT 数据。

分离器压力：0.7908 MPa

分离器温度：17.78 ℃

对分离器条件未进行校正

油气层压力：34.47 MPa

油气层温度：121.11 ℃

原油密度：0.83

天然气密度：0.6 (空气 = 1.0)

按分离器条件校正的天然气相对密度：0.6 (空气 = 1.0)

实测的油气比：178.086 m³/m³

计算的泡点压力：35.139 MPa

求得原油 pVT 数据为：

原油压缩系数：0.0022193 (1/MPa)

原油粘度：0.283067 mPa·s