

国外油气勘探开发新进展丛书(四)

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU

# Integrated

## Flow Modeling

# 综合渗流模拟

[美] J. R. 范基 著

张烈辉 钱治家 王茜 编译

石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(四)

石油科学进展 49

**综合渗流模拟**

[美] J. R. 范基 著

张烈辉 钱治家 王 茜 编译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书系统介绍了综合油藏渗流模型 IFLO 的形成、发展和应用。内容包括:综合渗流模型 IFLO 所需要的数据和资料讨论;理解和应用 IFLO 模型的数学方法;混相流附加影响算法介绍;多组分、拟混相渗流模拟器 IFLO 所使用的流体性质算法介绍;油藏中流体驱替的基本概念讨论,油藏生命期不同阶段的流体驱替过程分析;流动方程的形成和建立、IFLO 的特殊应用等。

本书可供油气田开发有关的技术人员、管理人员以及有关院校师生参考,也可作为有关石油工程技术人员的培训教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

综合渗流模拟/[美]J. R. 范基著;张烈辉等编译.

北京:石油工业出版社,2006.7

(国外油气勘探开发新进展丛书.第4辑)

ISBN 7-5021-5429-9

I. 综…

II. ①范… ②张…

III. 油气藏渗流力学-渗流模型

IV. ①TE312 ②O357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 007339 号

Copyright © 2000 by Elsevier Science B. V.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elsevier Science 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

著作权合同登记号图字 01-2004-4912

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

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8

字数:202 千字

定价:35.00 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(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

## 译者前言

油藏模拟技术是油气田开发领域的一项重要和关键的技术之一,是再现油气藏开发历史,预测油气藏未来动态,对油气田开发重大问题决策的一项重要手段。近年来,随着计算数学和计算机技术的飞速发展,油藏模拟方法和技术取得了长足的进步。针对各种复杂储层、复杂流体,发展了各种各样的复杂渗流模型。每年都有大量的关于渗流模型方面的学术论文和专著问世,但还没有一个模型有机地将三维地震的测量信息融会到岩石物性计算中。因而使从事该项技术研究和工作的油气藏工程师及高等学校师生们在使用和学习该项技术时遇到了一些困难,为此,我们特编译了此书。

本书系统地介绍了一个综合渗流模型(IFLO),是对地球科学目前模型方法的自然扩展,它在岩石物性计算中考虑了三维地震的测量信息和数据,为油藏的准确描述和优化管理提供了更多的数据。该综合渗流模型包含了一些传统的流体流动方程和一个岩石物性模型,是一种拟混相、多组分和多维的流体渗流模型。IFLO 的独特之处在于岩石物理模型与流动模型的有机结合,可以进行声波速度与阻抗的计算,通过这些计算就可以追踪地震变量作为时间函数的变化情况。对油藏生命期的任何一个时间点进行模拟时,都可以利用综合渗流模型直接采用地震数据,从而简化了各学科之间的数据转换过程,增强了数据的一致性,并且为油藏管理人员提供了熟悉的动态预测模式。

参加本书编译工作的主要有西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室张烈辉,中国石油西南油气田分公司川东北气矿钱治家、中国海洋石油总公司深圳分公司王茜,参加编译和文字编排工作的还有西南石油大学教师代艳英及研究生石广志、梅青艳、肖茹月、刘林清、李登伟、罗建新、向祖平、李珂、李成勇、冉立、胡书勇、张锦良、詹静、马立平、慈建发、梁彬等。最后,全书由张烈辉、王茜统一审校。在此,衷心感谢参加本书编译工作的所有人员!最后,我们还要感谢“教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(TRAPOYP)”及“博士点基金课题(编号:20040615004)提供的支持!

张烈辉 钱治家 王茜

二〇〇六年一月

## 作者简介

John R. Fanchi 是科罗拉多矿业大学石油工程系的教授。他在 3 个大型石油公司的技术中心担任国际顾问,在石油与天然气领域,他的主要研究方向是油藏数值模拟,包括油气藏模拟程序的开发及其在油藏管理方面的应用。Fanchi 博士介绍了美国能源部的软件系统并且也发表了大量的论文,同时还出版了 4 本专著,包括《适用于科学家和工程师的最新数学动态》(第二版)、《油藏模拟实用手册》(第二版)。Fanchi 在休斯敦大学获得物理学博士学位。

# 前 言

扩展的综合流动模拟模型使得在油气藏生产过程中任何时候的模拟研究都可以直接利用地震数据资料。该模型将常规的流动模型与岩石物理模型结合在一起,简化了学科之间的数据转化过程,增强了模块的合理性,并且提供了地下油气资源管理者熟悉的动态预测模式。这些应用都是模型核心内容的自然扩展,而这些核心内容现在正被用于地球科学。

扩展的综合流动模拟模型阐述了流动方程、求解方法和扩展流动模型的模拟程序(IFLO)的应用。本书从多学科角度讨论了多孔介质的性质,阐明了应用模拟程序到实际问题中的技术细节。本书中提供的相关技术细则和软件的结合加深了从事地球科学的科学家和工程师对相关理论、概念和在实际中应用的理解。

扩展的综合流动模拟模型由一个三维、三相、扩展的多组分黑油模型与一个岩石物理模型构成,模型为三维、等温、达西渗流,并假设油藏流体包括油、气、水三相,油藏中至多三相流体,天然气和注入溶剂可溶解于油、水两相中,其物理性质取决于压力和组成。扩展的黑油模拟程序可以模拟一般的黑油或干气系统,如同混相过程中  $\text{CO}_2$  驱动和富气驱动一样。总模型中包括了重要的油藏地球物理特征的计算。

扩展的综合流动模拟模型(IFLO)的一个独特的特点就是将扩展的黑油模拟器与岩石物理模型集成在一起。扩展的综合流动模拟模型可实现声波速度或波阻抗计算。通过这些油藏岩石物理性质的计算就可以追踪地震属性随时间的变化,这些是四维地震分析的基础。

扩展的综合流动模拟模型(IFLO)可在 Window 环境下个人电脑上运行。它包含了多组分、拟混相特征与油藏地球物理特征之间的联系。其中,油藏地球物理特征在其他模型中难以找到。本书与软件的结合加深了对油藏模拟程序的理解,增强了对油藏管理观念的理解,有利于解决不同类型的油藏工程问题。

本书也同样适应于对扩展的综合流动模拟模型有兴趣的地球科学家和工程师。它可用于研究生教学、继续工程教育教学、短期培训和使用者的自学使用。

在此,我要感谢科罗拉多矿业大学学习这门课程的学生,谢谢他们提出的意见和建议。此外,我还要感谢 Kathy, Tony 和 Chris Fanchi 帮助我完成了手稿。同时欢迎读者提出改进意见和建议!

John R. Fanchi, Ph. D.

Golden, Colorado

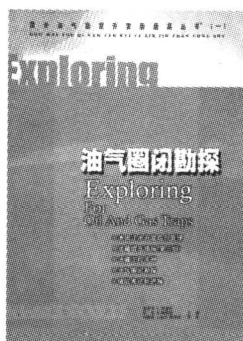
2000 年 6 月



## 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

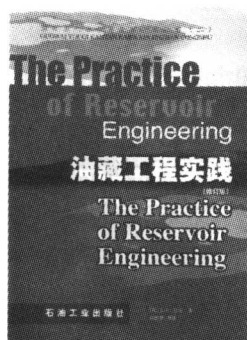


书号: 3718  
定价: 145.00 元

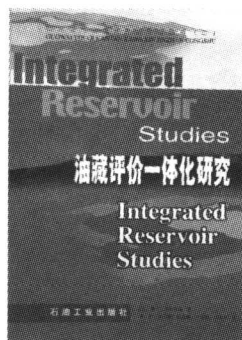


书号: 3722  
定价: 90.00 元

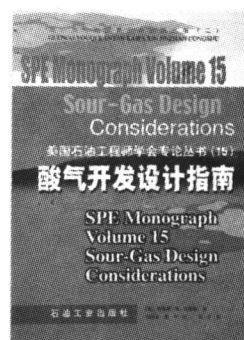
## 国外油气勘探开发新进展丛书(二)



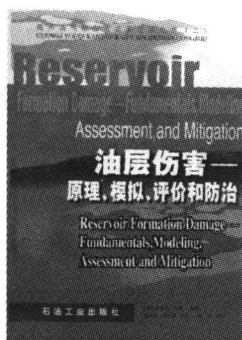
书号: 4217  
定价: 96.00 元



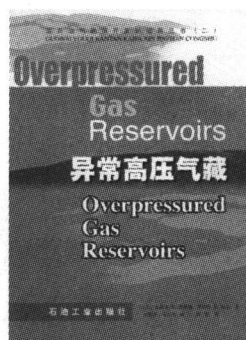
书号: 4226  
定价: 60.00 元



书号: 4352  
定价: 32.00 元



书号: 4334  
定价: 115.00 元

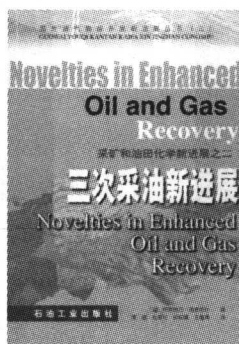


书号: 4297  
定价: 28.00 元

## 国外油气勘探开发新进展丛书(三)



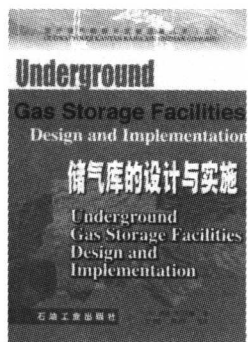
书号: 4539  
定价: 120.00 元



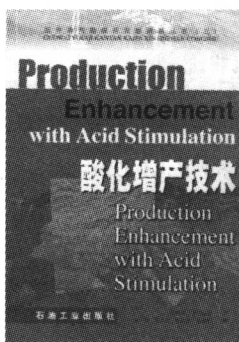
书号: 4725  
定价: 88.00 元



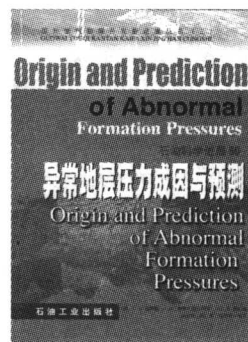
书号: 4707  
定价: 60.00 元



书号: 4681  
定价: 48.00 元



书号: 4689  
定价: 50.00 元



书号: 4764  
定价: 78.00 元

# 目 录

|                 |      |
|-----------------|------|
| <b>1 概述</b>     | (1)  |
| 1.1 程序概述        | (1)  |
| 1.2 常规黑油模型方程    | (2)  |
| 1.3 扩展的黑油模型方程   | (4)  |
| <b>2 油藏结构</b>   | (6)  |
| 2.1 坐标方向        | (6)  |
| 2.2 传统成图方法      | (6)  |
| 2.3 计算机成图       | (7)  |
| 2.4 地质统计绘图      | (9)  |
| 2.5 总体积与净体积     | (12) |
| <b>3 孔隙度</b>    | (13) |
| 3.1 孔隙度定义       | (13) |
| 3.2 净孔隙体积与饱和度   | (13) |
| 3.3 孔隙度分布统计     | (14) |
| 3.4 特征体积        | (19) |
| <b>4 渗透率</b>    | (20) |
| 4.1 达西定律        | (20) |
| 4.2 渗透率         | (23) |
| 4.3 渗透率的方向性     | (24) |
| 4.4 渗透率的平均      | (26) |
| <b>5 临界样品尺寸</b> | (28) |
| 5.1 孔隙度的临界样品尺寸  | (28) |
| 5.2 渗透率分布       | (29) |
| 5.3 渗透率的临界样品尺寸  | (32) |
| 5.4 渗透率非均质性的测量  | (33) |
| <b>6 岩石物理模型</b> | (35) |
| 6.1 纵波与横波波速     | (35) |
| 6.2 声速模量        | (37) |
| 6.3 声阻抗和反射系数    | (38) |
| 6.4 地质统计关系式     | (38) |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>7 相对渗透率</b>        | (42) |
| 7.1 有效渗透率与相对渗透率       | (42) |
| 7.2 两相相对渗透率           | (43) |
| 7.3 相对渗透率数据的平均        | (45) |
| 7.4 两相相对渗透率关系式        | (46) |
| 7.5 三相相对渗透率关系式        | (48) |
| <b>8 毛管压力</b>         | (51) |
| 8.1 基本概念              | (51) |
| 8.2 毛管压力              | (52) |
| 8.3 毛管压力的测量           | (53) |
| 8.4 毛管压力关系式           | (55) |
| <b>9 扩展的岩石—流体相互作用</b> | (58) |
| 9.1 混相条件              | (58) |
| 9.2 固体颗粒沉积            | (58) |
| 9.3 水堵                | (58) |
| 9.4 流度控制              | (59) |
| 9.5 有效相对渗透率和毛管压力      | (59) |
| 9.6 传导率               | (60) |
| <b>10 流体性质</b>        | (62) |
| 10.1 基本流体性质概念         | (62) |
| 10.2 黑油模型的 PVT 数据     | (65) |
| 10.3 饱和曲线的外推          | (66) |
| 10.4 泡点追踪             | (66) |
| 10.5 扩展的流体性质模型        | (67) |
| <b>11 流体驱替</b>        | (70) |
| 11.1 流度               | (70) |
| 11.2 分流量              | (71) |
| 11.3 采收率              | (73) |
| 11.4 生产阶段             | (74) |
| 11.5 混相驱模型            | (75) |
| <b>12 流动方程的形成</b>     | (79) |
| 12.1 物质守恒             | (79) |
| 12.2 三相流流动方程          | (80) |
| 12.3 流动方程的简化          | (82) |

|              |                          |              |
|--------------|--------------------------|--------------|
| 12.4         | 毛管压力 .....               | (83)         |
| 12.5         | 扩展的黑油模型方程 .....          | (84)         |
| <b>13</b>    | <b>源/汇项 .....</b>        | <b>(86)</b>  |
| 13.1         | 产能指数 .....               | (86)         |
| 13.2         | 流量约束条件 .....             | (87)         |
| 13.3         | 压力约束条件 .....             | (89)         |
| 13.4         | 井约束条件 .....              | (89)         |
| 13.5         | 水域模型 .....               | (90)         |
| <b>14</b>    | <b>扩展的流动方程的求解 .....</b>  | <b>(92)</b>  |
| 14.1         | 有限差分的概念 .....            | (92)         |
| 14.2         | 累积项的导数 .....             | (94)         |
| 14.3         | 体积积分与离散 .....            | (95)         |
| 14.4         | 多变量牛顿—辛普森 IMPES 方法 ..... | (96)         |
| <b>15</b>    | <b>IFLO 模型的应用 .....</b>  | <b>(99)</b>  |
| 15.1         | 监测前缘推进 .....             | (99)         |
| 15.2         | 4D 地震测量设计 .....          | (100)        |
| 15.3         | 提高原油采收率示例 .....          | (100)        |
| <b>附录 A</b>  | <b>程序补充说明 .....</b>      | <b>(104)</b> |
| A.1          | 初始化选项 .....              | (104)        |
| A.2          | 运行控制特征 .....             | (106)        |
| A.3          | 输出选项 .....               | (108)        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>             | <b>(110)</b> |
| <b>单位换算表</b> | <b>.....</b>             | <b>(114)</b> |

# 1 概 述

以计算机三维地球模型为基础的三维模拟方法的发展和应用正不断改变着油藏描述的方法[Lumley and Behrens, 1997; Jack, 1998; Tobias, 1998]。包含岩石物性运算的流量模型[Fanchi, 1999]进一步整合了来源于不同学科的数据。对油藏生命期的任何一个时间点进行模拟时,都可以通过综合流动模型直接利用地震数据,从而简化了各学科之间的数据转换过程,增强了数据的一致性,并且为油藏管理人员提供了熟悉的动态预测模式。综合流动模型是对地球科学目前模型方法的自然扩展,在岩石物性算法中考虑多元三维地震的测量结果为油藏的准确描述和优化管理提供了更多的数据。

本文着重介绍了综合油藏流动模拟器 IFLO 的形成、发展和应用。该综合流量模拟器包含了一些传统的流体流动方程和一个岩石物性模型,是一种拟混相、多组分和多维的流体流动模拟器。IFLO 可以模拟三维的等温达西流动,它假设油藏流体可以描述为三相,即油、气和水,该三相流体的物理性质取决于压力和组成,并且天然气和注入溶剂可溶于油相和水相。IFLO 的独特之处在于岩石物理模型与流动模型的有机结合。综合流动模型 IFLO 可以进行声波速度与阻抗的计算,通过这些计算就可以追踪地震变量作为时间函数的变化情况,这也是三维延时(四维)地震分析的基础。

综合流动模型 IFLO 所需要的所有数据都在油藏模拟的背景下进行了讨论,并介绍了用于理解和应用模型 IFLO 的数学方法。文中的实例说明了相关概念和该模拟器的应用范围。本章的以下内容总结了该模拟器求解的流动方程,并介绍了 IFLO 的操作特点。

## 1.1 程序概述

IFLO 软件的运行环境为配置英特尔奔腾处理器或相当处理器的个人电脑。这种大小的模拟器非常适合于油藏模拟器运用的学习,油藏管理概念的理解以及各类油藏工程问题的求解。它是一种廉价的研究工具,用于研究比解析解更先进的求解方式,而不需要使用完全商业化的模拟器。该模拟器提供了多组分和拟混相结合的选项,以及油藏地球物理性质选项,这在其他同类软件中是没有的。

IFLO 是对 MASTER 模拟器的改进,该模拟器是一种用于模拟二氧化碳驱和氮气驱的多组分、拟混合黑油模拟器[Ammer 等, 1991]。而 MASTER 又是 BOAST 模型的改进,即美国能源部在 1982 年出版的隐式压力显示饱和度(IMPES)模拟器[Fanchi 等, 1982]。IFLO 中对 MASTER 的改进包括使用了 BOAST 早期版本 BOAST II [Fanchi 等, 1987] 和 BOAST 4D [Fanchi, 2000] 的算法。

表 1.1 列出了 MASTER 与 IFLO 的一些不同点。从表 1.1 可以看出,IFLO 增加了一些有用的地球科学和油藏工程特征,其中包括对水平井或斜井的描述,非均质性储层油藏模拟的改进以及对重要的油藏地球物理信息的计算。

表 1.1 油藏模型对比

| 特    征       | MASTER       | IFLO               |
|--------------|--------------|--------------------|
| 完井           | 垂向连接         | 灵活选择               |
| 井控           | 有限的          | 扩展的                |
| 水平井/斜井       | 无            | 新增                 |
| 气井           | 无            | 新增                 |
| 压缩波速度        | 无            | 新增                 |
| 横波速度         | 无            | 新增                 |
| 声阻抗          | 无            | 新增                 |
| 反射系数         | 无            | 新增                 |
| 修正 $\phi, K$ | 输入 $\phi, K$ | 输入 $\phi, K$ 或乘以系数 |
| 修正传导率        | 输入传导率        | 乘以系数               |
| 修正孔隙体积       | 无            | 乘以系数               |
| 净厚度          | 无            | 新增                 |
| 零孔隙体积块       | 无            | 新增                 |
| 解析水区模型       | 无            | 新增                 |

此外, IFLO 在计算性能方面也有所改进, 见表 1.2。

表 1.2 计算性能对比

| 特    征  | MASTER        | IFLO         |
|---------|---------------|--------------|
| 饱和度表端点  | 设为 -0.1 和 1.1 | 设为 0.0 和 1.0 |
| 时间步长和报告 | 要求计数器测定时间步长   | 用户输入已模拟运行的时间 |
| 程序设计语言  | FORTRAN 77    | FORTRAN 90   |
| 动态修正    | 无             | 新增           |

IFLO 经过各种不同条件下的模拟测试, 包括油气藏衰竭开采、未饱和油藏的注水和注气、气藏水侵和二氧化碳驱, 获得了比其他模型更好的模拟效果。IFLO 基于质量守恒原理, 采用 Newton - Raphson 方法。IFLO 包含了物质平衡的修正, 把累积物质平衡误差降低到单一时间步的物质平衡误差大小。IFLO 还增加了其他一些功能, 使其可以应用于更加复杂的系统。

## 1.2 常规黑油模型方程

黑油模型油、气、水三相的物质平衡方程将在第 12 章进行推导。在这里对它们进行简要的概述是为了说明 IFLO 求解的重要辅助方程组。在模型中, 油藏流体使用三种流体相(油、气和水)来描述, 它们的物理特性仅是压力的函数, 并且油相和水相中可能存在有溶解气。黑油模型方程可以简单表示为:

油:

$$-\nabla \cdot \frac{\vec{v}_o}{B_o} - \frac{q_o}{\rho_{osc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (1.1)$$

水:

$$-\nabla \cdot \frac{\vec{v}_w}{B_w} - \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (1.2)$$

气:

$$-\nabla \cdot \left[ \frac{\vec{v}_g}{B_g} + \frac{R_{so}}{B_o} \vec{v}_o + \frac{R_{sw}}{B_w} \vec{v}_w \right] - \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \phi \left[ \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so}}{B_o} S_o + \frac{R_{sw}}{B_w} S_w \right] \right\} \quad (1.3)$$

下标  $p$  表示 o(油)、w(水)和 g(气), 方程(1.1) ~ (1.3) 中的符号定义如下:

式中  $B_p$ —— $p$  相的地层体积系数;  
 $q_p$ ——单位油藏体积  $p$  相的质量流量;  
 $R_{so}$ ——气在油中的溶解度;  
 $R_{sw}$ ——气在水中的溶解度;  
 $S_p$ —— $p$  相饱和度;  
 $v_p$ —— $p$  相的达西流速;  
 $\rho_{psc}$ —— $p$  相在标准条件下的密度;  
 $\phi$ ——孔隙度。

求解前面的流体流动方程还需要使用三个附加方程——辅助方程。它们是: 饱和度约束方程

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (1.4)$$

油—水毛细管压力方程:

$$p_{cow}(S_w) = p_o - p_w \quad (1.5)$$

以及气—油毛细管压力方程:

$$p_{cgo}(S_g) = p_g - p_o \quad (1.6)$$

式中  $p_p$ —— $p$  相的压力;  
 $p_{cow}$ ——油—水毛细管压力;  
 $p_{cgo}$ ——气—油毛细管压力。

$p$  相的达西流速为:

$$\vec{v}_p = -K \frac{K_r}{\mu_p} \nabla \Phi_p \quad (1.7)$$

式中  $K$ ——渗透率张量, 通常假设沿主轴方向;

$K_r, \mu_p$ —— $p$  相的相对渗透率和黏度。

相势  $\Phi_p$  表示为深度  $z$  的函数:

$$\begin{aligned} \Phi_o &= p_o - \frac{\rho_o z}{144} \\ \Phi_w &= p_o - p_{cow} - \frac{\rho_w z}{144} \\ \Phi_g &= p_o + p_{cgo} - \frac{\rho_g z}{144} \end{aligned} \quad (1.8)$$



相密度通过输入的 PVT 数据计算得出,即:

$$\begin{aligned}\rho_o &= \frac{1}{B_o}[\rho_{osc} + R_{so}\rho_{gsc}] \\ \rho_w &= \frac{1}{B_w}[\rho_{osc} + R_{sw}\rho_{gsc}] \\ \rho_g &= \frac{\rho_{gsc}}{B_g}\end{aligned}\quad (1.9)$$

岩石和饱和相压缩系数表达式为:

$$\begin{aligned}C_r &= \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial P_o} \\ C_g &= -\frac{1}{B_g} \frac{\partial B_g}{\partial P_o} \\ C_o &= -\left[ \frac{1}{B_o} \frac{\partial B_o}{\partial P_o} - \frac{B_g}{B_o} \frac{\partial R_{so}}{\partial P_o} \right] \\ C_w &= -\left[ \frac{1}{B_w} \frac{\partial B_w}{\partial P_o} - \frac{B_g}{B_w} \frac{\partial R_{sw}}{\partial P_o} \right]\end{aligned}\quad (1.10)$$

传统的黑油模型扩展后,诸如密度、压缩系数等参数性质的函数形式也随之改变,这些扩展公式将在下一节作简要介绍。

### 1.3 扩展的黑油模型方程

IFLO 的扩展黑油模型流动方程考虑了不止一种可溶物的溶解,这对于模拟像二氧化碳、氮气和空气这些物质的混相驱替是很有用的。流动方程[ Ammer 等,1991 ] 的表示形式如下:地面脱气原油:

$$\nabla \cdot \frac{KK_{ro}^e}{\mu_o^e B_o} \nabla \Phi_o - \frac{q_o}{\rho_{osc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (1.11)$$

水加表面活性剂:

$$\nabla \cdot \frac{KK_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w - \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (1.12)$$

表面活性剂:

$$\nabla \cdot x_s \frac{KK_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w - x_s \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi x_s \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (1.13)$$

可溶物质:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \left[ V_i \frac{KK_{rk}^e}{\mu_i^e B_i} \nabla \Phi_i + V_i R_{io} \frac{KK_{ro}^e}{\mu_o^e B_o} \nabla \Phi_o + V_i R_{iw} \frac{KK_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right] - \frac{q_i}{\rho_{isc}} \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \phi V_i \left[ \frac{S_i}{B_i} + \frac{R_{io}}{B_o} S_o + \frac{R_{iw}}{B_w} S_w \right] \right\}\end{aligned}\quad (1.14)$$

式中  $N_s$ ——可溶物质的种数;

$x_s$ ——表面活性剂的体积分数;

$V_i$ ——组分  $i$  的体积分数。