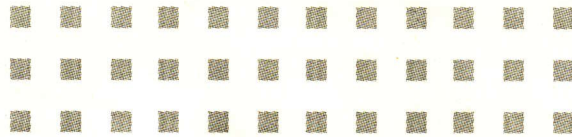


姚 军 王子胜 著

# 缝洞型碳酸盐岩油藏 试井解释理论与方法

---

Theory and Method for Well Test Interpretation  
in Fractured-vuggy Carbonate Reservoirs



中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法/姚军,王子胜著. —东营:中国石油大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5636-2544-4

I. 缝… II. ①姚…②王… III. 碳酸岩油气田—试井—研究 IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 019734 号

书 名: 缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法  
作 者: 姚 军 王子胜

---

责任编辑: 刘 洋  
封面设计: 九天设计

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)  
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>  
电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)  
排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心  
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司  
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791,8392563)  
开 本: 185×260 印张:21.25 字数:537 千字  
版 次: 2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷  
定 价: 52.00 元

# 序

姚军教授所著的《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》将要由中国石油大学出版社出版了。该书是作者在碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法领域多年积累的研究成果的基础上总结提炼而成的,集中体现了该领域理论与方法研究的现状、前沿和发展趋势,具有鲜明的时代特色。同时该书又非常注重理论的基础性、系统性和完整性,为读者真正理解试井解释理论与方法提供了重要基础。

全书内容共分八章。第一章系统地介绍了试井解释的一些基本概念、基本理论和基本方法,详细阐述了一些公式和模型的建立过程,内容全面、翔实,这是该书的一个特色。第二章讲述了双重介质油藏试井解释的一些基本理论与方法,并对最新发展起来的双重介质流线试井解释理论进行了介绍。第三章至第五章在分析缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间、储层特征、渗流机理和岩石力学性质的基础上,创造性地建立了多种三重介质、压敏介质和复合介质等缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释模型,并采用解析和数值方法进行了求解。第六章在分析以上模型的基础上,形成了负表皮、窜流阶段判断、压敏油藏试井解释方法以及非线性模型中直线外边界的处理方法。第七章针对碳酸盐岩油藏中有限底水的存在,形成了底水油藏试井解释方法。第八章介绍了以上理论与方法及相应的软件在各大油田的应用,并进行了实例分析。

该书的特色可以归纳为以下几个方面:

1. 内容新颖,具有前沿性和针对性。该书是在作者近年来的科研成果基础上总结提炼而成的,内容新颖。针对国内近年来投入开发的缝洞型碳酸盐岩油藏,形成了适合这类油藏的试井解释理论与方法。有关成果曾于2005年获石油石化协会科技进行二等奖。

2. 基础性、系统性和完整性很强。该书的第一章和第二章系统地介绍了试井解释的一些基本概念、理论和方法,使该书的理论系统比较完整,同时也为读者深刻理解该书的内容奠定了基础。

3. 理论与方法的实用性。理论结合实际是对应用基础研究工作的基本要求。理论研究成果必须拿到实际中去检验,要求所形成的理论和方法具有较强的实用性。该书很好地体现了这一要求,形成了能够解决矿场生产难题的方法和技术。

4. 内容的丰富性。从试井解释的基础理论与方法,到针对性很强的缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释理论与方法,再到试井解释软件的研制和矿场应用,该书为读者提供了丰富的信息和知识。

姚军教授的专著在具有很强的针对性的同时,兼顾了试井解释理论与方法的基础性与完

整,既可以作为各院校教学的参考书,也可以作为现场工作人员的工具书,为他们提供研究问题和解决问题的思路和方法。

随着我国海相碳酸盐岩油藏勘探开发工作的深入和扩展,姚军教授的专著将会在我国油田开发中发挥越来越大的作用,为我国石油工业的宏伟发展做出贡献。

姚军

2007年11月11日  
北京

# 序 2

随着我国国民经济的快速发展,对能源尤其是石油的需求量越来越大,许多非常规油藏开始投入开发,缝洞型碳酸盐岩油藏就是其中非常特殊的一类。这类油藏由于多期构造、岩溶等作用,形成孔、缝、洞交错叠合分布的复杂油气储集空间,使得其渗流机理、压力动态等都变得异常复杂,目前成熟的针对砂岩油藏和裂缝性碳酸盐岩油藏的试井解释理论与方法已无法满足矿场实测资料解释的需要。

由姚军教授所著的《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》一书从基本的试井解释理论与方法出发,结合缝洞型碳酸盐岩油藏中孔、缝、洞的渗流机理、岩石性质以及油藏地质特征等,建立了溶洞-井筒连通、缝洞-井筒连通、孔缝洞-井筒连通、压敏和复合介质以及有限底水体积油藏等多种试井解释物理模型和数学模型;在对数学模型进行分析的基础上,形成了以Laplace变换、数值求解和隐式插分格式数值求解为基础的数学模型求解方法;针对该类油藏中油井的表皮系数为负值且绝对值较大,导致在压力计算中早期数据出现振荡现象的问题,通过等效井径方法,并对其他有关参数进行相应的处理,有效地解决了该问题;同时通过对压力动态的分析,形成了一阶压力导数“凹陷”类型判断和压敏油藏压力试井解释方法;在对压敏油藏非线性试井数学模型进行研究的基础上,解决了该类油藏中线性外边界的问题;基于软件工程的思想,研制开发了缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释软件,在中国石化塔河油田四、六区重点区块,胜利油田的埕岛、富台油田等进行了广泛的应用,共解释 57 井次,解决了现有软件无法对一些复杂油藏测试数据进行解释的问题,且解释结果可靠,更加符合这类特殊油藏的地质和储层特征。

塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏的投入开发,揭开了我国此类油藏开发的序幕。对该类油藏渗流机理和试井解释理论与方法进行研究,将为其合理、高效开发提供坚实的理论基础和决策依据。

试井解释是评价地层和测试井参数、动态特征的有效手段。我相信,姚军教授所著的《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》一书将会在今后我国缝洞型碳酸盐岩油藏的开发中大有用武之地,发挥越来越重要的作用。

士  
子 P13

# — 前 言 —

目前世界已探明储量中碳酸盐岩油气藏储量占 50%，产量占 60% 以上。我国海相碳酸盐岩油气资源量大于  $300 \times 10^8$  t 油当量，石油资源量约为  $150 \times 10^8$  t，但探明率仅 8%。缝洞型碳酸盐岩油藏占探明储量的  $2/3$ ，是增储上产的主要阵地。缝洞型碳酸盐岩油藏一般具有储集空间类型多样化、储集体连通性差、流体流动状态及油水关系复杂等特点，储层经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造、多期成藏等过程，形成了与古风化壳有关的碳酸盐岩缝洞型油藏。由于对缝洞体发育规律和油藏流体流动特征的认识程度低，导致此类油藏钻井成功率低、采收率低、产量递减快。

油气田开发动态监测解释水平在一定程度上决定了科学、高效开采的程度，作为油藏工程师“眼睛”的试井解释方法是油气藏动态监测的重要方法。然而，由于储层不仅发育有溶蚀孔隙、微裂缝和大裂缝，还发育有大型的溶蚀孔洞，加上埋藏深和处于高温高压下，岩石具有明显的压敏效应，流动规律异常复杂，因此只考虑裂缝和基岩孔隙系统的双重介质试井解释方法的适用性非常差，甚至不适用。这样就有必要基于缝洞型碳酸盐岩油藏的流动模式和孔缝洞发育特点，发展一套适合于缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释方法。

本书是作者近 10 年来在该领域系统研究的成果，内容包括试井解释模型建立、求解理论与方法、压力特征分析、流动形态识别以及自动拟合方法等。本书共分八章。第一章简要介绍了试井解释的基础理论、基本概念和基本方法，为后续试井解释方法的开展作了理论上的铺垫；第二章介绍了基于双重介质假设的传统碳酸盐岩裂缝性油藏的试井解释方法，以及新研究的成果——碳酸盐岩裂缝性油藏的流线数值试井解释方法；第三章介绍了碳酸盐岩缝洞型油藏五个典型的试井解释模型及其求解方法，阐述了其流动形态及其在压力导数曲线上的特征；第四章介绍了考虑压力敏感效应的单孔隙介质、双重孔隙介质和缝洞孔隙介质油藏的试井解释模型、求解方法以及在压力曲线和压力导数曲线上的特征；第五章介绍了单孔隙介质、双重孔隙介质以及缝洞型孔隙介质的复合油藏试井解释模型、求解理论与方法，以及压力和压力导数曲线的响应特征；第六章重点介绍了对缝洞型碳酸盐岩油藏的内外边界条件的处理方法；第七章系统介绍了底水油藏试井解释模型、数值求解方法及其压力特征；第八章介绍了基于上述理论编制的缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释软件及其在油田的应用。

本书各章节的编写工作如下：第一章、第二章、第三章及第六章由姚军编写，第四章、第五章、第七章及第八章由王子胜编写。姚军负责全书的统稿工作。

在本书出版之际，向中石化股份有限公司油田勘探开发事业部、科技开发部和西北分

公司等单位的领导及专家的大力扶持表示感谢。每次项目汇报和学术交流他们都给予好的指导和建议,使得书中的研究成果得以提升,并且为书中理论和方法的应用提供了大力支持。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211工程”建设经费的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,本书定有许多不完善和欠妥之处,敬请各位专家批评指正。

作者

2007年11月

## 目 录

<b>第一章 试井基本理论与解释方法</b> .....	1
第一节 试井分析概述.....	1
第二节 试井分析基本概念.....	3
第三节 常规试井分析方法.....	19
第四节 压力导数曲线及其应用.....	28
第五节 现代试井分析方法.....	43
第六节 测试数据的预处理.....	48
第七节 变流量试井分析方法.....	51
第八节 碳酸盐岩油藏渗流基本方程.....	55
第九节 试井自动拟合解释原理与方法.....	64
本章小结.....	85
<b>第二章 碳酸盐岩裂缝性油藏试井解释理论与方法</b> .....	86
第一节 双重介质油藏拟稳态窜流试井解释方法.....	86
第二节 双重介质油藏不稳态窜流试井解释模型及其求解.....	103
第三节 双重孔隙介质流线试井解释方法.....	114
本章小结.....	122
<b>第三章 碳酸盐岩缝洞型油藏的试井解释方法</b> .....	123
第一节 溶洞-井筒连通模型.....	123
第二节 裂缝和溶洞-井筒连通模型.....	139
第三节 裂缝、溶洞和基岩-井筒连通模型.....	154
第四节 非达西渗流试井解释模型.....	161
本章小结.....	171
<b>第四章 变形介质油藏试井解释模型及其求解方法</b> .....	173
第一节 单孔隙压敏油藏试井解释模型.....	174
第二节 双重孔隙压敏油藏试井解释模型.....	177
第三节 三重变形介质试井解释模型.....	186
本章小结.....	205
<b>第五章 复合油藏试井解释模型及其求解方法</b> .....	206
第一节 单孔隙介质复合油藏试井解释模型.....	207
第二节 双重介质复合油藏试井解释模型.....	211

第三节 三重介质复合油藏试井解释模型·····	216
本章小结·····	225
第六章 边界条件的处理方法·····	226
第一节 考虑井筒储存和污染效应时压力求解方法·····	226
第二节 外边界对压力响应的影响分析·····	232
第三节 非线性渗流有界问题的求解方法研究·····	238
第四节 压敏油藏试井解释方法·····	248
本章小结·····	253
第七章 底水油藏试井解释模型及求解方法·····	254
第一节 理论模型的建立·····	254
第二节 求解方法及参数处理方法·····	255
第三节 具有底水的均质油藏·····	258
第四节 具有底水的双重孔隙介质油藏·····	262
第五节 具有底水的双重渗透介质油藏·····	271
第六节 具有底水的油藏模型求解方法·····	275
第七节 底水油藏参数敏感性分析·····	278
本章小结·····	286
第八章 碳酸盐岩油藏试井解释软件及其应用·····	287
第一节 碳酸盐岩油藏试井解释软件介绍·····	287
第二节 碳酸盐岩油藏试井解释软件的应用·····	298
本章小结·····	322