

# 油气藏

# 改造 论文集



中国石油油气藏改造重点实验室 编

YOU QI CANG GAI ZAO LUN WEN JI

石油工业出版社

# 油气藏改造论文集

中国石油油气藏改造重点实验室 编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书收集了油气藏改造重点实验室近两年发表各类文章 80 余篇,反映了低渗油气藏改造领域内近期的研究成果和学术发展动态。内容包括:一、水力压裂裂缝延伸机理与岩石力学专题;二、油藏模拟与水力压裂设计技术专题;三、酸压与基质酸化设计技术专题;四、储层改造工作液专题;五、高能气体压裂改造技术专题;六、储层改造现场实践专题。

本书对从事低渗油气藏改造,特别是从事压裂酸化技术工作的科研人员 and 生产人员具有一定的参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

油气藏改造论文集/中国石油油气藏改造重点实验室编.  
北京:石油工业出版社,2001.6

ISBN 7-5021-3416-6

I. 油…

II. 中…

III. 油气藏-改造-研究-文集

IV. P618.13-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 036054 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 30.5 印张 776 千字 印 1—1000

2001 年 6 月北京第 1 版 2001 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3416-6/TE·2546

定价:98.00 元

## 《油气藏改造论文集》编委会

主 任：罗英俊

副主任：李文阳 蒋 阗 李联奎

成 员：吴 奇 杨洪志 胡博仲 金忠臣 刘宏斌  
孟慕尧 曾兴球 岳登台 刘玉章 王鸿勋  
陈 勉 李 湜 张士诚 翟云芳 单文文  
俞绍诚 丁云宏 卢拥军 汪绪刚

## 《油气藏改造论文集》编写组

主 编：单文文 丁云宏

副主编：汪永利 李联奎 陈 勉 高合明

李笑萍 田和金 曾 斌

50707/05

## 序

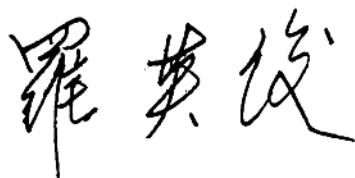
中国石油天然气股份有限公司上市后,能否持续发展成为很多人关注的一个问题。稳定原油产量和加快天然气产量增长是中国石油天然气股份有限公司持续发展的基础。低渗透储量占了中国石油天然气股份有限公司未动用储量的50%左右。因此,高效开发低渗透未动用储量对中国石油天然气股份有限公司的持续发展具有重要意义。低渗透油气藏的开发常常必须通过增产改造措施才能取得经济开发价值,油气藏改造技术的发展是高效经济开发低渗透油气藏的重要保障。

低渗透油气田的开发关键是技术思路如何确定,这一点十分重要。要把低渗油气田开发好,油藏是基础、工艺是关键,单井产量是核心,效益是追求的目的。要充分认识开发动用低渗透油气藏的重要性和紧迫性。对低渗透油气藏的开发,必须坚持非常规的开发方式,要根据油藏的特点,突出针对性和运作的灵活性。努力降低低渗透油气藏开发的成本,提高低渗透油藏的开发效益。

低渗透油气藏改造技术经过“七·五”、“八·五”和“九·五”的攻关,已经发展并形成了一系列的适用配套技术,这些技术在油田的应用中,取得了显著的经济效益,为经济有效开发低渗透油气田提供了技术支持。

《油气藏改造论文集》收集了油气藏改造重点实验室近两年来发表的文章,比较全面地反映了目前我国低渗油气藏改造的研究成果和技术现状,对总结和推广低渗油气藏改造方面的研究成果有很好的推动作用。

油气藏改造重点实验室作为中国石油天然气股份有限公司在低渗油气藏改造方面的新技术、新理论、新方法研究中心、学术交流中心和人才培养中心,要认真担负起开发好低渗油气藏的重任,为中国石油天然气集团公司和中国石油天然气股份有限公司的持续发展作贡献。



中国石油天然气股份有限公司副总裁  
中国石油油气藏改造重点实验室学术委员会主任  
罗英俊  
二〇〇一年五月

## 前 言

重点实验室的建设是中油集团公司和中油股份公司为了可持续发展所采取的重大步骤,根本目的是实现技术创新战略,创造出一批高水平的科技成果,成为集团公司在相关领域的研究核心。中国石油天然气集团公司油气藏改造重点实验室以中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化技术服务中心为主体,联合中国石油勘探开发研究院采油所、石油大学(北京)、西安石油学院、大庆石油学院与西南油气田分公司组成。该重点实验室致力于水力压裂油藏工程、水力压裂力学、压裂酸化材料学,油气藏改造试井与综合评价,高能气体压裂增产机制和碳酸盐岩储层酸化的研究,其目标是成为中油股份在油气藏改造方面的新理论、新方法、新技术研究中心,学术交流中心和人才培养中心,不断推动油气藏改造技术的发展。该重点实验室经过两年的技术攻关,取得了一系列的研究成果。

《油气藏改造论文集》收录了油气藏改造重点实验室近两年来在国内外主要学术刊物和股份公司部分重要学术会议上发表各类文章共计 80 篇。全书分为六个专题,一、水力压裂裂缝延伸机理与岩石力学专题,二、油藏模拟与水力压裂设计技术问题,三、酸压与基质酸化设计技术问题,四、储层改造工作液专题,五、高能气体压裂改造技术专题,六、储层改造现场实践专题。这六个专题涉及到了油气藏改造技术的方方面面,比较全面地反映了油气藏改造重点实验室近两年来的研究成果和学术发展动态,是一本以理论为基础,紧密结合生产实际,对生产实际具有一定指导价值的学术文集,可供从事低渗透油气田开发的同志参考。

在本书的编辑出版过程中,得到了油气藏改造重点实验室学术委员会各位委员的大力支持和指导,得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院、石油大学(北京)、大庆石油学院、中国石油勘探开发研究院、西安石油学院、中国石油西南油气田分公司等单位的大力支持,石油工业出版社的咸月英、张书芹两位编辑和其他工作人员也为本书的出版付出了艰辛的劳动,在此一并表示感谢。

本书由于时间紧,水平有限,疏漏和错误之处在所难免,敬请各位专家和读者给予批评指正。



中国石油油气藏改造重点实验室主任  
单文文

二〇〇一年五月

# 目 录

## 专题一 水力压裂裂缝延伸机理与岩石力学

|                                                                                    |                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 岩石的压缩性与孔隙弹性.....                                                                   | 单文文 申卫兵(3)                                     |
| Porosity Change of Low Permeability Formation Rock During<br>Well Production ..... | Zhang Baoping Shan Wenwen Jiang Tian et al(10) |
| 不同应力条件下岩石断裂韧性的研究 .....                                                             | 张保平 田国荣 申卫兵等(15)                               |
| 泥页岩水化膨胀的实验研究 .....                                                                 | 张保平 单文文 田国荣等(20)                               |
| 不同煤阶煤岩力学参数测试 .....                                                                 | 申卫兵 张保平(24)                                    |
| 差应变(DSA)与古地磁方法结合确定地应力方向的应用研究<br>.....                                              | 田国荣 张保平 申卫兵(29)                                |
| 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析 .....                                                              | 陈 勉 庞 飞 金 衍(33)                                |
| 水力裂缝几何形态研究进展 .....                                                                 | 陈 勉(40)                                        |
| 松软地层水力压裂缝宽预测 .....                                                                 | 朱礼军 陈 勉 金 衍(47)                                |
| 地应力岩石 Kaiser 效应测试技术改造低渗透储集层 .....                                                  | 曾立新(51)                                        |
| 深层岩石力学性质的试验方法 .....                                                                | 曾立新(56)                                        |
| 深部地应力测试技术及其在钻井工程中的应用 .....                                                         | 高合明 刘建东 沈露禾(60)                                |
| 古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用 .....                                                          | 侯守信 田国荣(64)                                    |
| 支撑剂在缝中运移机理研究 .....                                                                 | 姚 飞 王晓泉(71)                                    |
| 重复压裂时水力裂缝的垂向延伸 .....                                                               | 姚 飞(76)                                        |
| 水力裂缝起裂延伸和闭合的机理分析 .....                                                             | 姚 飞 王晓泉(81)                                    |
| 粘滞剩磁(VRM)岩心定向的应用 .....                                                             | 侯守信 田国荣(87)                                    |

## 专题二 油藏模拟与水力压裂设计技术

|                                          |                   |
|------------------------------------------|-------------------|
| 注采动态法在复杂断块砂岩油藏(含水力裂缝)数值模拟中的应用<br>.....   | 蒋廷学 郎兆新 单文文等(95)  |
| 低渗油藏中压裂井动态预测方法研究综述.....                  | 蒋廷学 单文文 郎兆新(107)  |
| 经济技术因素在储量资产化过程中的作用——油气产量经济下限的确定<br>..... | 成荣霞 蒋 闾 陈 作(112)  |
| 注水开发油藏油水相对渗透率变化规律.....                   | 张大为 闫宝珍 曾照英(119)  |
| 水平井五点法矩形井网的产能计算及其井网优化.....               | 赵春森 翟云芳 曹乐陶等(123) |
| 聚合物驱渗流考虑弹性效应的理论研究.....                   | 翟云芳 佟斯琴 卓兴家等(128) |
| 低渗透油藏脉冲试井资料的解释方法.....                    | 刘振宇 张大为 曾昭英等(133) |
| 模糊数学在压裂设计中的应用.....                       | 蒋廷学 田占良(137)      |
| 评价油井重复压裂前剩余可采储量的 GM(1,1)模型 .....         | 蒋廷学 李 斐(144)      |

|                              |             |       |
|------------------------------|-------------|-------|
| 复杂断块砂岩油藏中估算水力裂缝方位的动态分析方法及其应用 | 蒋廷学         | (150) |
| 由瞬时停泵压力估算裂缝闭合压力的现场方法研究       | 蒋廷学 王欣      | (154) |
| 油藏数值模拟技术发展综述                 | 蒋廷学 杨艳丽     | (161) |
| 压裂优化设计的一些实用分析方法              | 蒋廷学         | (165) |
| 最小主应力对水力压裂设计的影响              | 姚飞 曾斌       | (173) |
| 利用油藏模拟方法确定水力裂缝方位             | 姚飞 曾斌       | (179) |
| 全三维压裂设计软件在超深井压裂设计中的应用        | 王晓泉 王振铎 卢拥军 | (185) |
| 超深低渗透底水油藏压裂增注油藏模拟研究          | 王振铎 王晓泉     | (190) |

### 专题三 酸压与基质酸化设计技术

|                                         |              |       |
|-----------------------------------------|--------------|-------|
| 应用环境扫描电子显微镜定位观察酸蚀过程                     | 李素珍 汪绪刚 程兴生等 | (197) |
| 白云岩储层多级交替注入酸压设计计算软件研究                   | 李小蓉          | (201) |
| 用人工模拟裂缝装置研究盐酸/白云岩反应速率的影响因素              | 李力           | (206) |
| 利用酸液动态滤失实验研究确定酸压施工用酸量                   | 段国彬          | (212) |
| $^{19}\text{F}$ NMR 法研究砂岩基质酸化中的氟铝、氟硅配合物 | 王宝峰 赵忠扬 薛芳渝  | (216) |
| 砂岩酸化设计模型的研究及发展                          | 王宝峰          | (222) |
| 砂岩基质酸化中的化学平衡研究                          | 王宝峰 赵忠扬 薛芳渝  | (227) |
| 砂岩基质酸化中的短岩心和长岩心流动模拟试验研究                 | 王宝峰 蒋卫东 董雷等  | (234) |

### 专题四 储层改造工作液

|                                                                       |                                              |       |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|
| 八角场低渗气田大型水力压裂工作液优化设计                                                  | 崔明月 单文文 丁云宏等                                 | (243) |
| 香豆胶压裂液交联过程动态研究                                                        | 宋兴福 卢拥军 叶贞成等                                 | (261) |
| ESEM 在苯甲酸暂堵剂筛选评价中的应用                                                  | 李素珍 汪绪刚 程兴生等                                 | (266) |
| 水基植物胶压裂液流变特性研究与应用                                                     | 卢拥军 蒋闾 陈彦东等                                  | (271) |
| 压裂液流变性研究的新进展                                                          | 李文魁 张杰 张新庆                                   | (278) |
| 酸液滤失模拟实验方法研究                                                          | 潘琼                                           | (284) |
| 白云岩储集层酸液滤失机理研究                                                        | 杨旭 潘琼                                        | (287) |
| 轮南油田超深井重复酸化增注工作液                                                      | 舒玉华 张汝生 蒋卫东                                  | (292) |
| 乙酸在酸化工作液中的作用                                                          | 许志赫                                          | (297) |
| 酸化液缓蚀剂对地层伤害的实验研究                                                      | 张汝生 郭彬 杨振周                                   | (301) |
| 砂岩基质酸化中土酸与高岭土的化学反应                                                    | 王宝峰 赵忠扬 薛芳渝                                  | (304) |
| 砂岩基质酸化中 HF 与石英的反应动力学                                                  | 王宝峰                                          | (311) |
| $\text{CO}_2$ 泡沫压裂液的流变特性研究                                            | 陈彦东 卢拥军 田助红等                                 | (316) |
| 超深井压裂液体系研究与应用                                                         | 卢拥军 陈彦东 王振铎                                  | (320) |
| 压裂用起泡技术与起泡剂 FL-36                                                     | 卢拥军 丛连铸 梁利等                                  | (328) |
| 一种新型硼交联压裂液的室内研究与现场应用                                                  | 卢拥军 杜长虹 丛连铸                                  | (335) |
| A Case Study of Boron Crosslinked Fracturing Fluid in Ultra-Deep Well | Lu Yongjun Chen Yandong Zhao Zhongyang et al | (342) |

## 专题五 高能气体压裂改造技术

|                                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| 复合射孔压裂技术的应用研究·····                | 吴晋军 马荣华(359)      |
| “压胀松动”增产技术现场实验研究·····             | 田和金 薛中天 张 杰等(363) |
| 液体药高能气体压裂及其发展方向·····              | 刘发喜 张新庆(370)      |
| 子长油矿 4207 裸眼井“压胀松动”增产技术现场实验 ····· | 张 杰 田和金 王爱华等(375) |

## 专题六 储层改造现场实践

|                               |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| 低渗气藏增产改造技术在勘探开发中的应用·····      | 陈 作 丁云宏 蒋 阔等(383) |
| 低渗边际油藏压裂技术的研究与应用·····         | 丁云宏 陈 作 陈国强等(393) |
| 川东石炭系气藏完井增产措施地质效果分析·····      | 罗邦林(400)          |
| 应用高浓度土酸进行酸化试油·····            | 周海民 魏国新 徐敏杰(406)  |
| 异常高压、高温低渗油藏压裂增效技术研究与应用 ·····  | 陈 作 田助红 曾 斌(413)  |
| 影响重复压裂效果的因素分析·····            | 蒋廷学(419)          |
| 阿南油田中高含水期重复压裂的研究与应用·····      | 蒋廷学 田占良 赵 强(424)  |
| 复杂断块油田压裂的特点与思路·····           | 蒋廷学(432)          |
| 高砂比压裂与裂缝强制闭合技术的现场应用·····      | 蒋廷学(437)          |
| 中国煤层气勘探开发现状及问题剖析·····         | 李安启 路 勇 李祐佑(443)  |
| 塔里木东河 1 油田高温超深注水井酸化技术研究·····  | 蒋卫东 舒玉华 张汝生等(447) |
| DH 油田超深注水井压裂酸化增注技术研究与应用 ····· | 王振铎 崔明月 王晓泉等(453) |
| 超深、致密砂岩气藏压裂优化技术研究 ·····       | 陈 作 田助红 曾 斌(461)  |
| 玉门油田复杂岩性油藏增产改造技术研究与实践·····    | 胥 耘 刘永山(467)      |
| 水力压裂中有效支撑缝高对压后效果的影响研究·····    | 王永辉 路 勇(474)      |

**专题一**  
**水力压裂裂缝延伸机理**  
**与岩石力学**

---



# 岩石的压缩性与孔隙弹性<sup>①</sup>

单文文 申卫兵

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院)

**摘 要** 本文阐述了岩石压缩性与孔隙弹性的基本概念以及在研究石油工程问题中的重要性。指出考虑孔隙结构的压缩性时必须考虑岩石基质、岩块(包括孔隙)以及岩石孔隙体积的压缩系数,介绍了表征岩块和孔隙体积变形的四个系数  $C_{bc}$ 、 $C_{bp}$ 、 $C_{pc}$ 、 $C_{pp}$  以及它们之间的关系,并给出了实验室中求取岩石压缩系数和孔隙弹性系数的方法和部分实验结果。

**主题词** 岩石 压缩系数 孔隙弹性

## 引 言

石油勘探开发中所接触的地层岩石都具有孔隙,而孔隙中又充满了具有压力的流体,因此,在研究地层岩石的变形时简单地应用作为连续介质的固体力学变形理论是不够的,要充分考虑到它的孔隙结构这一特点。地层岩石作为研究单元体,包括三个部分结构:(1)石基质(骨架);(2)孔隙(裂隙);(3)孔隙中含有的具有一定压力的流体。岩石表现的宏观力学性质应该与这三部分的结构特性有关。一般来说,在处理石油工程问题时,岩石是作为线弹性体,它的本构关系满足线弹性的应力应变关系。但实际上岩石的变形还受孔隙变形的影响,对某些类型的岩石,如多孔砂岩,孔隙压力的影响尤为显著。Biot 最早研究孔隙弹性,导出了控制孔隙弹性特性的弹性方程并引入了 Biot 系数,用来确定孔隙压力对岩石变形的影响。

## 一、岩石的压缩性

石油工程中岩石属多孔介质,进行岩石的压缩性研究时必须考虑三种类型的压缩系数:(1)岩石基质(骨架)的压缩系数;(2)岩块体积(包括孔隙)的压缩系数;(3)岩石孔隙体积压缩系数。

岩块体积(包括孔隙)  $V_b$  与孔隙体积  $V_p$  的变形和所受的外力(平均静水压力)  $\sigma_c$  及孔隙内部压力  $p_p$  有关,因此:

$$dV_b = \left( \frac{\partial V_b}{\partial \sigma_c} \right) p_p d\sigma_c + \left( \frac{\partial V_b}{\partial p_p} \right) \sigma_c dp_p \quad (1)$$

$$dV_p = \left( \frac{\partial V_p}{\partial \sigma_c} \right) p_p d\sigma_c + \left( \frac{\partial V_p}{\partial p_p} \right) \sigma_c dp_p \quad (2)$$

① 致谢:参加实验室工作的还有张保平、侯守信、田国荣,对他们在此研究工作中的支持与合作表示感谢。

两式分别除  $V_b$ 、 $V_p$ ，并令  $C_{bc} = -\frac{1}{V_b}(\frac{\partial V_b}{\partial \sigma_c})p_p$ ； $C_{bp} = \frac{1}{V_b}(\frac{\partial V_b}{\partial p_p})\sigma_c$ ； $C_{pc} = -\frac{1}{V_p}(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma_c})p_p$ ； $C_{pp} = \frac{1}{V_p}(\frac{\partial V_p}{\partial p_p})\sigma_c$ ，(1)、(2) 式成为：

$$\frac{dV_b}{V_b} = -C_{bc}d\sigma_c + C_{bp}dp_p \quad (3)$$

$$\frac{dV_p}{V_p} = -C_{pc}d\sigma_c + C_{pp}dp_p \quad (4)$$

求得上述  $C_{bc}$ 、 $C_{bp}$ 、 $C_{pc}$ 、 $C_{pp}$  四个系数，岩块和孔隙体积的变形也就求得了。

实验室中，如果实验时外部静水压力与内部孔隙压力以同样的量增加，即  $d\sigma_c = dp_p$ ，且假设岩石基质是均匀和各向同性的，那么这种受力状况使岩石骨架不产生任何剪切变形，只能产生均匀的膨胀或压缩。

设  $V_s$  为岩石基质体积，定义  $C_s = -\frac{1}{V_s}(\frac{\partial V_s}{\partial \sigma_c})_d(\sigma_c - p_p) = 0 = -\frac{1}{V_s}(\frac{\partial V_s}{\partial p_p})_d(\sigma_c - p_p) = 0$  为岩石基质(骨架)的压缩系数，这时应该有：

$$\frac{dV_b}{V_b} = \frac{dV_p}{V_p} = \frac{dV_s}{V_s} \quad (5)$$

由(3)式：

$$C_{bp} = C_{bc} - C_s \quad (6)$$

由(4)式：

$$C_{pp} = C_{pc} - C_s \quad (7)$$

根据功的互易定理(Betti's reciprocal theorem)可得：

$$d\sigma_c(\frac{\partial V_b}{\partial p_p})\sigma_c dp_p = -dp_p(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma_c})p_p d\sigma_c \quad (8)$$

并设岩石孔隙度为  $\phi$ ，则  $V_p = \phi V_b$ ，从而可得：

$$C_{bp} = \phi C_{pc} \quad (9)$$

$$\text{将(9)式代入(6)式：} C_{pc} = \frac{C_{bc} - C_s}{\phi} \quad (10)$$

$$\text{将(10)式代入(7)式：} C_{pp} = \frac{C_{bc} - (1 + \phi)C_s}{\phi} \quad (11)$$

从实验室中可求出  $C_{bc}$  和  $C_s$ ，如果知道岩心孔隙度  $\phi$ ，通过上述式子便可求出四个常数  $C_{bc}$ 、 $C_{bp}$ 、 $C_{pc}$  和  $C_{pp}$ ，因而也就求得了岩块体积与孔隙体积的变形。

正确测定岩石的孔隙压缩系数对估算一次采收率是很重要的。

在一次采油过程中，随着地层压力下降，储层中的油、气、水将会膨胀，同时岩石颗粒受到的压力将增大，岩块受到压实，孔隙体积将会减小。这部分的减小量必然相应于从油藏采出与之等量的液体。因此，一次采油过程中依靠油藏本身能量可能采出的油量主要包括油、气的膨胀量(包括气顶气的膨胀量)和原生水膨胀及孔隙体积减少量。

对溶解气驱油藏、特别对于低饱和油藏，主要靠油及溶解于其中的气体的膨胀来获得产量。其累计采油量的公式(依据油藏物质平衡)为：

$$N_p B_o = \frac{NB_{oi}(C_o S_o + C_w S_{wc} + C_f) \times \Delta p}{1 - S_{wc}} \quad (12)$$

式中  $N_p$ ——累计原油产量(地面);  
 $N$ ——原始地质储量(地面储罐油);  
 $B_o$ ——压力降到  $p$  时原油地层体积系数;  
 $B_{oi}$ ——原始原油地下体积系数;  
 $C_o$ ——原油压缩系数;  
 $C_w$ ——水压缩系数;  
 $C_f$ ——孔隙压缩系数;  
 $S_{wc}$ ——束缚水饱和度;  
 $\Delta p$ ——压力下降,  $\Delta p = p_i - p$ ;  
 $p_i$ ——原始地层压力;  
 $p$ ——目前压力。

对于上述低饱和度的溶解气驱油藏,物质平衡必须考虑束缚水和孔隙压缩系数的影响,因为这些压缩系数的量级与液体油本身相同。

设  $C_e = \frac{C_o S_o + C_w S_{wc} + C_f}{1 - S_{wc}}$  表示有效饱和度加权压缩系数。因此,一次采收率为:

$$\frac{N_p}{N} = \frac{B_{oi} C_e \Delta p}{B_o} \quad (13)$$

如果在实验室中用静水加压与单轴应变测得的岩石孔隙压缩系数相差  $K$  倍,即:

$$C_e' = \frac{C_o S_o + C_w S_{wc} + K C_f}{1 - S_{wc}} \quad (14)$$

于是造成的有效压缩系数的相对误差为:

$$\eta = \frac{|C_e - C_e'|}{C_e} = \frac{|1 - K| C_f}{C_o S_o + C_w S_{wc} + C_f} \quad (15)$$

此  $\eta$  也是造成一次采收率的相对误差,例如,如果  $C_w = 3.0 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ ,  $S_{wc} = 0.20$ ,  $C_f = 25 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ ,  $C_o = 11.3 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ ,  $K = 1.6$ , 则  $\eta = 15/34.64 = 43.3\%$ , 因而一次采收率的估算将产生 43% 的误差。

## 二、孔隙弹性

对充满液体的各向同性的弹性介质,本构方程可具体地写为:

$$\epsilon_{ij} = \frac{(1 + \nu)(\sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij}/3)}{E} + \frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{9K} - \frac{p_p \delta_{ij}}{3H} \quad (16)$$

式中  $E$ ——模量;  
 $\nu$ ——泊松比;

$K$ ——模量,其大小为  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ ;

$p_p$ ——压力;

$\delta_{ij}$ ——onecker 记号;

$H$ ——Biot 引进的新的模数。

与不含孔隙流体的弹性介质的本构方程相比,多了最后一项,这最后一项意味着是由孔隙压力引起的变形,它依赖于由 Biot 引入的新的模量  $H$ 。由于方程(16)的第一项主要依赖于有效的剪切模量,而与孔隙压力无关,后两项和体积应变有关。因此,体积变形为:

$$\theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} = \frac{p_c}{K} - \frac{p_p}{H} = \frac{p_c - Kp_p/H}{K} \quad (17)$$

定义  $\alpha = \frac{K}{H}$ , 此  $\alpha$  反应了孔隙压力对变形的影响。

此后,Geertsma(1957)和 Skempton(1960)定义:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (18)$$

式中  $K$  和  $K_s$ ——岩块体积和岩石骨架(颗粒)的体积模量。

一般称  $\alpha$  为 Biot 系数,也称孔隙弹性系数,也可定义为  $\alpha = 1 - \frac{C_s}{C_b}$ ,  $C_s$  是岩石颗粒(骨架)的压缩系数,  $C_b$  是岩石的体积压缩系数。

孔隙弹性系数对于油、气井的生产预测以及地应力的计算是很重要的。根据测井,目前大多数水平应力的计算利用如下公式:

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_V - \alpha p) + \alpha p \quad (19)$$

式中  $\nu$ ——泊松比;

$\sigma_V$ ——垂向应力;

$\alpha$ ——孔隙弹性系数;

$p_p$ ——孔隙压力。

如果考虑 3000m 的井深垂向应力是 70MPa,测得的泊松比值是 0.3,孔隙压力是 35MPa,那么若  $\alpha = 0.9$ , 计算的水平应力将是 48MPa;如果  $\alpha = 0.6$ , 计算得到的水平应力将是 42MPa,虽然相对于水平应力仅是 12% 的误差;但三维水力压裂模拟中关心的是层与层之间的应力差,而这些差别通常小于 7MPa,因而  $\alpha$  值的错误将在层与层之间的应力差上产生将近 100% 的误差。

### 三、实验室研究

#### 1. 实验室模拟的基本条件

在研究过程中,我们假设岩石是均质且各向同性的。取出地下一定深度的岩石单元体分析,所受的力和边界条件基本有两类:(1)三向受力的边界条件,见图 1。上覆层压力一般假设为一个主应力  $\sigma_1$ 。水平方向主应力为  $\sigma_2, \sigma_3$ 。特殊简化情况下可考虑静水压力边界条件,平均静水压力为:  $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 。(2)单轴变形的边界条件见图 2。在油田的动态开发过程中,

可以认为上覆层压力(一个主应力方向)保持不变,而侧向应变  $\epsilon = 0$ 。

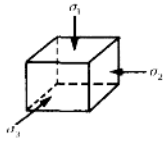


图1 三向受力的边界条件

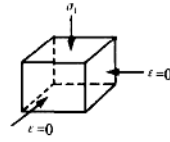


图2 单轴变形的边界条件

## 2. 岩石压缩系数的测定

实验室中测定岩石的压缩系数一般通过加静水压力求取。这种实验方法简单,但与油田开发过程中岩石的实际变形有较大的差别。可以通过模拟油层的生产过程求得比较符合实际的岩块压缩系数,即在实验室中利用单轴变形条件测得。图3和图4是廊坊分院压裂酸化中心利用美国 TerraTek 公司三轴岩石力学测试仪进行单轴应变实验的加载曲线和变形曲线。从图3中看到,单轴应变实验模拟油田生产过程即孔隙压力逐步下降时,为保持径向应变不变,围压(即施加的水平应力)也逐步下降,但下降速率比较缓慢。这说明了油层在生产过程中,由于孔隙压力的下降会导致油层水平应力的下降。表1反映了单轴应变实验和静水加压实验得出的不同结果。

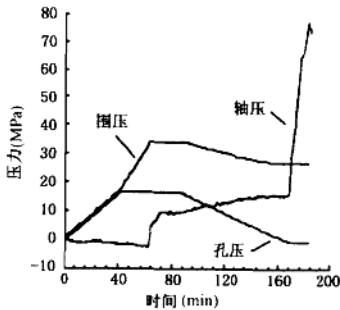


图3 时间—压力曲线

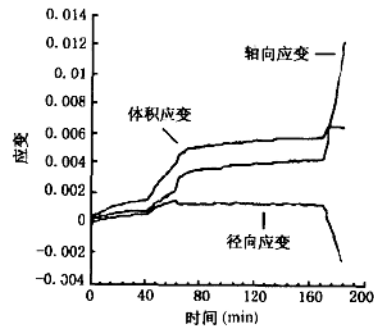


图4 时间—应变曲线

表1 不同实验方式得到的结果比较

| 实验方式                      | 体积压缩系数 $C_{bc}$ (1/MPa) | 颗粒压缩系数 $C_g$ (1/MPa)   | Biot 系数 |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 单轴应变 ( $\epsilon_r = 0$ ) | $1.087 \times 10^{-4}$  | $2.534 \times 10^{-5}$ | 0.77    |
| 静水加压                      | $1.711 \times 10^{-4}$  | $2.266 \times 10^{-5}$ | 0.87    |

## 3. 孔隙弹性系数的测定

实验室中可通过实验测得岩石的颗粒压缩系数以及岩石的体积压缩系数并利用公式(18)计算得到孔隙弹性系数。图5是加载过程中时间—压力曲线,图6是实验加载过程中压力—体积应变曲线,中间体积应变变化缓慢的曲线是围压与孔隙压力以相同速率加载得到的。这可以用来计算岩石的颗粒压缩系数。表2是部分砂岩岩样孔隙弹性系数的实验结果。

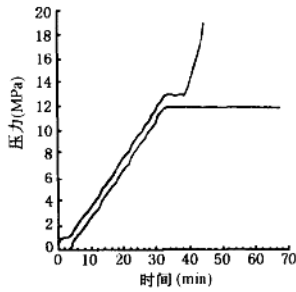


图 5 时间—压力曲线

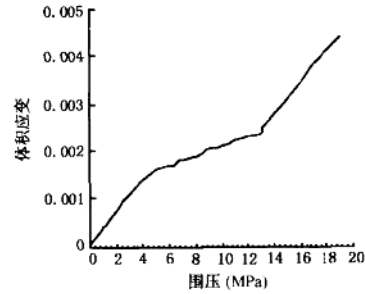


图 6 围压—体积应变曲线

表 2 Biot 系数计算结果

| 序号 | 岩性 | 深度<br>(m) | 实验 条件       |             | 体积压缩系数<br>(1/MPa)      | 颗粒压缩系数<br>(1/MPa)     | Biot 系数 $\alpha$ |
|----|----|-----------|-------------|-------------|------------------------|-----------------------|------------------|
|    |    |           | 围压<br>(MPa) | 孔压<br>(MPa) |                        |                       |                  |
| 1  | 砂岩 | 3300      | 60          | 40          | $1.477 \times 10^{-4}$ | $4.0 \times 10^{-5}$  | 0.73             |
| 2  | 砂岩 | 3300      | 58          | 38          | $9.30 \times 10^{-5}$  | $1.92 \times 10^{-5}$ | 0.79             |
| 3  | 砂岩 | 2823      | 50          | 29.5        | $1.58 \times 10^{-4}$  | $2.64 \times 10^{-5}$ | 0.83             |
| 4  | 砂岩 | 2828      | 50          | 29.5        | $1.92 \times 10^{-4}$  | $2.55 \times 10^{-5}$ | 0.87             |
| 5  | 砂岩 | 2830      | 50          | 29.5        | $2.53 \times 10^{-4}$  | $2.55 \times 10^{-5}$ | 0.90             |
| 6  | 砂岩 | 2830      | 50          | 29.5        | $2.43 \times 10^{-4}$  | $3.41 \times 10^{-5}$ | 0.86             |
| 7  | 砂岩 | 2835      | 50          | 29.5        | $2.85 \times 10^{-4}$  | $3.76 \times 10^{-5}$ | 0.87             |
| 8  | 砂岩 | 2835      | 50          | 29.5        | $2.13 \times 10^{-4}$  | $3.50 \times 10^{-5}$ | 0.84             |
| 9  | 砂岩 | 2851      | 50          | 29.5        | $1.29 \times 10^{-4}$  | $3.49 \times 10^{-5}$ | 0.73             |
| 10 | 砂岩 | 2842      | 50          | 29.5        | $1.473 \times 10^{-4}$ | $4.6 \times 10^{-5}$  | 0.69             |
| 11 | 砂岩 | 1480      | 27.5        | 19.9        | $1.29 \times 10^{-4}$  | $6.23 \times 10^{-5}$ | 0.52             |
| 12 | 砂岩 | 1508      | 24.6        | 13.3        | $2.18 \times 10^{-4}$  | $7.53 \times 10^{-5}$ | 0.65             |
| 13 | 砂岩 | 3065      | 45          | 25          | $2.45 \times 10^{-4}$  | $1.89 \times 10^{-5}$ | 0.92             |
| 14 | 砂岩 | 3072      | 55          | 25          | $1.52 \times 10^{-4}$  | $2.95 \times 10^{-5}$ | 0.81             |
| 15 | 砂岩 | 3072      | 45          | 25          | $2.54 \times 10^{-4}$  | $4.27 \times 10^{-5}$ | 0.83             |

实验结果表明,孔隙弹性系数并不是一个常数。它随围压和孔压的变化而变化。表中大部分砂岩岩样的孔隙弹性系数在 0.7~0.9 之间。

## 四、结 论

(1)在石油勘探开发中,研究岩石的压缩性必须考虑岩石基质(骨架)、岩块整体体积和岩石孔隙体积的压缩性。表征这些变形的系数为  $C_{bc}$ 、 $C_{bp}$ 、 $C_{pc}$ 、 $C_{pp}$ ,它们之间存在一定的关系。实验室中可通过实验求出  $C_{bc}$  和岩石基质(骨架)压缩系数  $C_s$ ,然后通过关系式求出其它类型