

地下储气(油)库 工程技术与实践

申瑞臣 田中兰 袁光杰 主编

DIXIA CHUQI(YOU)KU GONGCHENG JISHU YANJIU YU SHIJIAN



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

地下储气（油）库 工程技术与实践

申瑞臣 田中兰 袁光杰 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了枯竭油气藏储气库工程技术、盐穴储气库工程技术和地下储气(油)库工程新技术新方法,反映了我国近年来在储气(油)库方面的最新研究成果。

本书适应于从事储气(油)库设计、施工和管理的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

地下储气(油)库工程技术研究与实践/申瑞臣等主编.

北京:石油工业出版社,2009.4

ISBN 978-7-5021-6999-2

I. 地…

II. 申…

III. ①地下储气-工程技术

②地下储油-工程技术

IV. TE822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012799 号

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.com.cn

编辑部:(010) 64523583 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.25

字数:340 千字 印数:1—1000 册

定价:55.00 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

《地下储气（油）库工程技术研究与实践》编委会

主 编：申瑞臣 田中兰 袁光杰

副主编：王凤田 魏伶华 魏东吼 杨海军 丁云宏 袁进平

何爱国 金根泰 路立君 夏 焱

编 委：王启京 齐奉中 班凡生 李 祥 余金海 陈 俊

吴国明 杨 松 杨恒林 屈 平 张全力 徐显广

庄晓谦 徐鸣雨 蓝海峰 曾维合 董建辉 李 萍

李景翠 王开龙

序

油气地下储备库在欧美发达国家已经有近一个世纪的历史，已经形成了天然气工业体系中不可或缺的重要组成部分，而我国地下储气库才经历十多年的发展历程，石油地下储备库，特别是深部地层石油储备库的建设更是处于空白状态。特定的地质条件，决定了我国在建设油气地下储备库的过程中既要借鉴国外经验，又要针对复杂地质条件进行建库技术和理论上的创新与发展。目前世界上的主要地下储库类型包括：枯竭油气藏储气库、含水层储气库、盐穴储气库、废弃矿坑储气库、盐穴储油库以及核废料储库等，其中地下储气库是世界上建造数量最多的一种地下储库类型，达到 634 座左右。地下储气库是将从天然气田采出的天然气选择异地重新注入地下可以保存气体的空间而形成的一种人工气田或气藏。地下储气库主要建设在靠近下游天然气用户城市的附近，用途是保障下游用户的调峰需要。

由于地下储气库在调峰和保障供气安全上具有不可替代的作用，因而地下储气库的建设受到许多国家的重视，天然气生产和消费大国都把地下储气库的建设作为整个天然气上下游一体化利用的一个重要组成部分进行总体规划。欧美国家都在不断加大储气库的建设力度，增大储气量，除了常规的调峰应急外，已经开始研究建立天然气的战略储备。美国已经就长输管网地下储气库建立相关的法律加以约束，欧洲国家也有立法的趋势。

中国的地下储气库建设起步较晚。20 世纪 70 年代在大庆油田曾经进行过利用气藏建设气库的尝试，而真正开始研究地下储气库是在 20 世纪 90 年代初。随着陕甘宁大气田的发现和陕京天然气输气管线的建设，为了确保北京、天津两大城市的安全供气，国内才开始系统地研究地下储气库建设技术。截至目前国内已初步建成大张坨、板 876、板中北、板 808、板 828 和板中北等地下储气库，另外为了保证西气东输管线、西气东输二线、川气东送管线等国家重要输气管线的安全运行和我国东部沿海城市的安全供气，江苏金坛盐穴储气库、江苏刘庄枯竭气藏储气库、河南平顶山盐穴储气库、江西麻丘含水层储气库、湖北潜江盐穴储气库等多种不同类型的地下储气库已开始逐步规划建造。通过国内近 20 年对地下储气库技术的研究与实践，目前已初步形成了从钻井、完井、注采到运行的一套相对成熟的枯竭气藏建库工程技术。在盐穴储气库工程技术方面形成了已有溶腔改造技术、盐穴储库固井技术、盐穴井筒及腔体密封检测技术、盐穴造腔及腔体形态控制技术等。同时，由于我国目前在枯竭油藏储气库、含水层地下储气库和盐穴储油库的工程技术方面涉足的还很少，在多夹层盐岩、深层盐岩（2000m 以上）等地质条件苛刻的地层中建造盐穴储气库的技术还很成熟，还需要深入研究。

要推动我国经济、能源与安全的协调发展，必须充分运用不断发展的新理论、新方法和新技术，研究解决地下储气（油）库工程领域面临的种种问题。《地下储气（油）库工程技术研究与实践》以中国石油集团钻井工程技术研究院、中国石油学会组织的地下储气（油）

库工程技术国际研讨会中提交的论文为基础，经过编者认真筛选，从中选出若干有代表性的成果出版成册。这些论文大都是长期从事储库工程技术研究和生产的科研人员和工程技术人员多年来取得的成果和经验的总结，既有理论深度，也有实践的检验，是一本具有很高学术和应用价值的参考书。特别适合于从事地下储库工程技术研究的专业人员、高等院校师生、研究院所和相关企业的科技和管理人员参考使用，亦为推动地下储库事业的发展做出应有的贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '孙宁' (Sun Ning), written in a cursive style.

2009 年 3 月

前 言

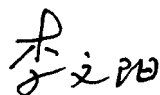
据预测分析,到2010年我国石油和天然气供需缺口分别达到1.7亿吨和300亿立方米,2020年将分别达到2.7亿吨和800亿立方米以上。中国目前已经成为世界第二大石油消费国,也是目前世界上第二大石油进口国。尽快建立我国地下油气储备体系,对于保障油气资源安全和稳定供应,保障国民经济可持续稳定发展都具有十分重要的意义。石油的战略储备关系到国家的能源安全,而天然气的安全供气不仅关系到能源供给安全,还关系到中国千万个家庭的日常生活。因此进行石油天然气的战略储备势在必行。

参考国际能源署(IEA)的“石油的战略储备量为90天净石油进口量”的通常做法,我国已经启动了国家石油战略储备计划。如此大规模的石油战略储备如果完全建设于地面,其安全性、经济性显然和当今国际潮流相左,从国外经验看,具备建库地质条件的国家,都把地下石油储备库作为本国石油战略储备的主要手段。因此从中国的具体国情出发,结合中国的特定地质条件,建设中国的地下石油战略储备势在必行。与石油相比,天然气地下储备库的建设更是在全世界范围内的普遍共识,天然气的储备全部依赖于地下储气库的建设。按目前天然气储气库工作气量约占世界总天然气消费量20%计算,到2015年,中国天然气消费量将达到1200亿立方米,根据中国的具体地质条件,未来10年内,预计将需要建设地下储气库15~20座,工作气量240亿立方米。到2020年,储气库的工作气量将达到320亿立方米,需要建设的地下储气库将达到30座以上,因此储气库的建设工作任重而道远。

根据中国天然气资源与市场的匹配及未来积极利用海外天然气的战略部署,中国将可能形成四大区域性联网协调的储气库群:东北储气库群、长江中下游储气库群、华北储气库群、珠江三角洲LNG-地下储气库群,我国油气地下储备库具有巨大的需求空间,但是也面临着巨大的技术挑战。我国建设天然气地下储气库的主要需求在我国东部和南部,但我国东部断陷盆地形成复杂破碎的断块构造加上储层复杂多变的陆相河流相沉积,难以寻找到合适的构造,加上我国东部气藏少而小,可建库的地质资源有限。而我国南方中小型盆地储盖组合的复杂,给低幅度小构造的含水层建设储气库带来很大的技术难度。我国东部地区尚未发现盐丘,这就使我国利用盐穴建设油气地下储备库的对象只能选择陆相沉积的盐层,这样的盐层多呈现层状、单层厚度较小,夹层较多,含盐量较低的特性,决定了我国利用盐穴建造地下油气储备库同样存在较大的技术挑战。

经过近20年对地下储库工程技术的系统研究,中国天然气地下储气库技术已取得了一定的进步,主要表现在我国气藏改建地下储气库技术已初步形成,盐穴储气库的研究取得了长足的进步,枯竭油藏和含水层构造改建地下储气库技术已开始探索。但是无论是枯竭油气藏储气库,还是含水层和盐穴储气库,均是在地下形成一个人造气藏,与开发天然气田相比还要解决气库地质及工程密封、高速高压多周期注采、数十年的使用寿命等众多技术难点,

因此今后必须要继续加大对地下储气库工程技术的攻关力度。为了总结多年的研究成果和施工经验，进一步推动国内储库工程技术领域的发展，中国石油学会石油工程专业委员会、中国石油集团钻井工程技术研究院组织了“地下储气（油）库工程技术国际研讨会”，共收到国内外论文近 40 篇，经过反复审稿、与作者的多次商榷修改，最终优选了 29 篇有代表性的论文成册出版。本书分为枯竭油气藏储气库工程技术、盐穴储气库工程技术、地下气（油）储库工程新技术新方法三个篇章，供各位学者、专家、工程技术人员在科研与生产中参考。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '李之阳' (Li Zhiyang).

2009 年 3 月

目 录

第一篇 枯竭油气藏储气库工程技术

枯竭油藏及含水构造改建储气库注采机理研究·····	(3)
储气库老井封堵用超细水泥浆体系的研究与应用·····	(15)
地下储气库定向井井下复杂情况分析·····	(20)
大港储气库定向井固井技术研究·····	(25)
枯竭油气藏改建地下储气库钻采工艺技术·····	(32)
永 22 含硫潜山油气藏储气库水平井钻井技术 ·····	(38)
地下储气库地面设施风险评估及注采井安全性评价·····	(45)
不压井更换管挂技术在储气库气井维护中的应用·····	(52)
大张坨凝析气藏改建地下储气库地面工程配套技术·····	(55)
庆深气田防气窜封堵固井技术·····	(61)
地下储气库抽油机井杆管偏磨力学机理研究及综合治理认识·····	(66)
凝析油气藏改建地下储气库可行性研究技术·····	(73)

第二篇 盐穴储气库工程技术

盐穴储气库快速造腔技术研究·····	(83)
Thermodynamic and rock mechanics calculations in the planning and operation of the gas storage cavern Epe of E. ON Ruhrgas AG ·····	(91)
盐穴地下储气库工程配套技术·····	(103)
已有采卤溶腔建设储气库评价与改造技术·····	(109)
提高已有采卤井固井质量的配套技术研究·····	(116)
盐穴储气库密封测试方法研究·····	(122)
盐腔改成储气库的钻完井施工技术·····	(128)
盐穴矿区地表变形观测与预计·····	(133)
盐穴储气库水溶建腔数值模拟研究·····	(143)
自振空化射流造腔机理与试验·····	(149)
金坛盐穴地下储气库注采完井及注气排卤技术研究·····	(154)
盐岩层大直径高效取心技术研究·····	(163)

第三篇 地下储气 (油) 库工程新技术新方法

盐穴储气库腔体机械完整性检测技术·····	(175)
CO ₂ 深埋做储气库垫层气的混合效应模拟 ·····	(179)
考虑稳定性的盐穴储气库溶腔几何形状的设计方法研究·····	(185)
含水层储气库地质选址与钻完井技术研究·····	(192)
气态保护层控制盐穴储库腔体形态计算方法研究·····	(199)

第一篇 枯竭油气藏 储气库工程技术

枯竭油气藏地下储气库是实现季节性调峰的最有效和最经济的方式，世界上已有的大部分地下储气库都属于这种类型。尤其是在美国，枯竭油气藏地下储气库更是占绝对优势。到 2000 年底，全世界共有 602 座地下储气库，其中枯竭油气田型占 76.7%；枯竭油气藏型地下储气库的基本原理是：通过油气田原有的生产井和建库时增加的气井往枯竭油气层中注入天然气或从中采出天然气。由于枯竭油气层以前就是油和（或）气的聚集区，故其孔隙度和渗透率一般能满足储气库的要求。

枯竭油气藏地下储气库又可分为枯竭气藏储气库、枯竭凝析气藏储气库和枯竭油藏储气库，其中枯竭气藏储气库最为理想。由于枯竭气藏储气库的运行条件与原气田的开采条件很相似，在建设储气库时可以最大限度地利用气田原有的生产设施，因而与枯竭凝析气藏及枯竭油藏相比，将枯竭气藏转化为储气库所需的改造工程量最小。此外，从枯竭气藏储气库中采出的天然气的洁净度高，在采气作业时对天然气进行处理的工作量较小，因而其运行费用也比枯竭凝析气藏储气库及枯竭油藏储气库低。

中国的地下储气库起步较晚，20 世纪 70 年代在大庆油田曾经进行过利用气藏建设气库的尝试，而真正开始研究地下储气库是在 20 世纪 90 年代初，随着陕甘宁大气田的发现和陕京天然气输气管线的建设，才开始研究建设地下储气库以确保北京、天津两大城市的安全供气。到目前为止，为保证北京和天津两大城市的调峰供气，在天津市附近的大港油田利用枯竭凝析气藏建成了 6 个地下储气库，即大张坨、板 876、板中北、板 808、板 828 和板中北地下储气库，另外国内正在或者准备建造的枯竭气藏储气库群有华北苏桥枯竭气藏储气库群、江苏刘庄枯竭气藏储气库群、云南上法枯竭气藏储气库群等。

通过一系列的工程建设，目前国内气藏改建地下储气库的技术已基本成熟。枯竭油藏改建地下储气库技术近年来发展迅速，针对陕京输气管线、忠武线的油藏目标改建地下储气库进行了一系列基础研究，

在注排机理、渗流机理、建库方式、建库周期、井网部署、方案设计等方面取得了一定成绩，但目前仍不完善，还存在一些问题亟需解决。

枯竭油气藏的最大特点是储层压力低，在枯竭油气藏中建设地下储气库，将面临钻井、固井、完井施工过程中如何有效保护储层、提高储库密封性及承压能力等方面的技术问题。本篇着重介绍的是国内在枯竭油气藏建储气库方面所开展的理论研究和实践过程中所取得的成果，内容涉及注采机理、老井封堵、定向井钻井、水平井钻井、风险与安全等几个方面。

枯竭油藏及含水构造改建储气库注采机理研究

郭 平¹ 黄 琴¹ 杜建芬¹ 王皆明²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学);

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院)

摘 要 在我国用气紧张的地区气田较少,但有一些枯竭油藏和含水构造,将这些枯竭油藏和含水构造改建成储气库是目前新建储气库的重要趋势之一。本文采用实验方法研究储气库建设与运行过程中多次注采渗流规律、应力敏感性、多次注采后库容和渗流能力变化,采用理论模拟方法研究了不同类型流体枯竭油藏改建储气库后多次注采过程中的采出气组成变化。研究表明高含水油藏及含水构造在气水互驱过程中渗流规律与经典教科书中不一样,气相渗透率渗吸过程比排驱过程的低,而水相渗透率则渗吸比排驱过程的高;对封闭型油藏和含水构造,随注采周期的增加,液相饱和度下降,库容上升,渗流能力也上升;对高、中、低 GOR 三种原油油藏储气库,在注采过程中,随注采周期的增加,采出气组成变化均表现为由富到贫的变化规律。

关键词 储气库 渗流规律 应力敏感 库容 注采机理

一、引言

地下储气库的容量大,储气压力高,储气成本最低,是当今世界上主要的天然气储存方式和手段。在世界天然气储存设施总容量中,地下储气库的容量占 90% 以上。目前,天然气地下储气库主要类型包括四种,即枯竭油气藏储气库(占 75.87%)、含水层储气库(13.98%)、盐穴储气库(9.65%)和废弃矿坑储气库(0.5%)^[1,2]。

对于管网附近没有废弃气藏或废弃气藏库容量不能满足用气要求的地区,如忠武线、涩宁兰及西气东输、甚至华北地区,含水层和油藏储气库的建设就显得十分重要^[3-5]。我国主要气田分布在西部,而用户主要在东部或中部地区,因此无法直接找到合适的气藏来改建储气库;水层储气库的建设国内尚无先例,技术上有一定的难度,而且勘探风险较大,在储气库渗流机理方面国外有较好的技术及经验;高含水油藏改建储气库,此方面国外尚无直接报道;盐穴储气库的发现和建设存在较大的勘探风险,而且成本较高。但东部或中部地区有高含水油藏,并且有不少地质资料及油井资料和设施可以利用,投资少,建设风险也低。因此,根据我国高含水油藏特点,本文研究高含水后期油藏改建储气库渗流机理及运行机理有重要的现实意义和理论意义。

二、高含水油藏与含水构造多次注采渗流规律实验

1. 实验原理

实验采用非稳态法,非稳态法测定气水相对渗透率是以一维两相渗流理论和气体状态方

程为依据, 用非稳态恒压法对岩样气驱水实验, 在实验过程当中, 记录岩样出口端各个时刻的产水量、产气量和两端压差等数据, 再根据一定的计算方法, 计算出岩样的气、水相对渗透率和对应的含水饱和度, 绘制气水相对渗透率曲线^[6-9]。

2. 实验流程

实验流程如图 1 所示。

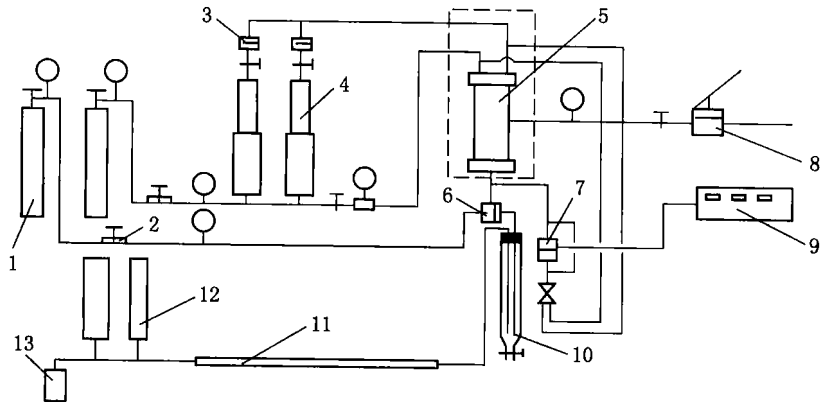


图 1 气水互驱实验流程图

1—高压气源; 2—压力调节器; 3—过滤器; 4—增压器; 5—岩心夹持器;
6—回压阀; 7—压力传感器; 8—手压泵; 9—数值记录仪; 10—水计量管;
11, 12—气计量管; 13—平衡瓶

3. 实验条件

岩样尺寸: 使用的岩样直径 25mm, 长度 25~50mm 的柱状岩样。水: 采用的配置的地层水, 矿化度为 10000mg/L。气体: 天然气。温度: 常温。

4. 高含水油藏气水互驱条件下渗透率变化

1) 实验过程

选用人造岩心, 以饱和水—油驱水—水驱油—气驱水—水驱气—气驱水—水驱气的过程, 采用非稳态方法, 测试相渗曲线变化。测试完毕后测试岩心的孔渗变化, 气水互驱实验流程图见图 1。

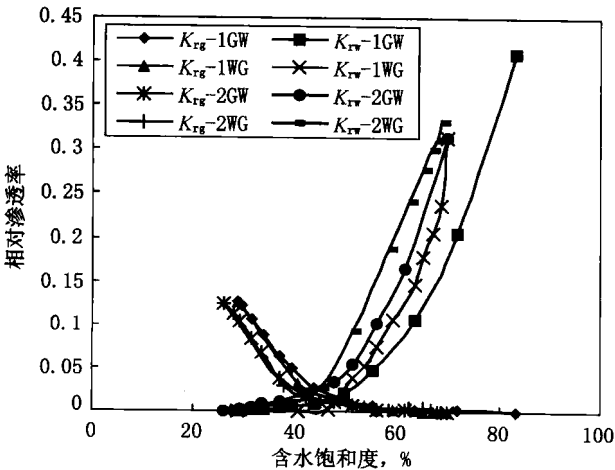


图 2 含油构造气水互驱相对渗透率对比曲线

2) 实验数据

岩样编号 3 - 5, 岩样长度 7.04cm, 岩样孔隙体积 13.1249 cm³, 孔隙度 37.68%, 测定温度 23℃, 水矿化度 10000 mg/L, 残余油饱和度 16.83%, 岩样直径 2.51cm, 绝对渗透率 $674.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 水的黏度 1.15mPa·s, 注入气、天然气、气体黏度 0.011mPa·s。

3) 实验结果与分析

图 2 是含油构造气水互驱相对渗透率对比曲线。

从图 2 可以看出, 吸吮过程 (水驱

气)与排驱过程(气驱水)对比,含水油藏第1次和第2次具有相同的变化规律,即吸吮过程的气相渗透率比排驱过程的低,而水相渗透率则是吸吮过程比排驱过程的高。

从不同周期渗流能力对比来看,第1次气驱水时气相相对渗透率比第2次高,水相相对渗透率第1次比第2次低,而在水驱气过程中,第1次水驱气气相相对渗透率比第2次高,水相相对渗透率第1次比第2次略高,这种过程类似于强水驱气藏,由于有气相的加入,造成渗流过程变得复杂,气相渗透率降低,但对封闭型油藏,随注采周期的增加含水饱和度是下降的。

因此注采能力会随周期数增加而上升。在两次气水互驱过程中,残余油饱和度为16.83%,束缚水饱和度呈下降趋势(28.38%~25.76%),残余气饱和度有所上升(13.21%~14.42%)。总体表现为两相区饱和度范围略有变小,说明边水活跃的油藏改建储气库后,随注采周期的增加注入气有一定的损失。

5. 含水构造气水互驱条件下渗透率变化

1) 实验过程

用类似气水相渗测试方法进行研究,饱和水后,采用气驱水—水驱气—气驱水—水驱气过程,测试相对渗透率的变化,测试完毕后测试岩心的孔渗变化,气水互驱实验流程图见图1。

2) 实验数据

岩样编号4-2,岩样长度7.05cm,岩样孔隙体积13.1902cm³,孔隙度37.81%,测定温度23℃,水矿化度10000mg/L,岩样总体积34.8855cm³,岩样直径2.51cm,绝对渗透率673.47×10⁻³μm²,水的黏度1.15mPa·s,注入气、天然气、气体黏度0.011mPa·s。

3) 实验结果与分析

图3是含水构造两次气水互驱条件下的相对渗透率对比曲线。

从图3可以看出,两次气水互驱条件下渗流能力具有相同的变化规律,排驱过程(气驱水)比吸入过程(水驱气)的气相相对渗透率高;水相相对渗透率则是排驱过程比吸入过程的低。对气驱水过程,第1次气驱水气相相对渗透率比第2次高,水相相对渗透率第1次比第2次低;而对水驱气过程,第1次水驱气气相相对渗透率比第2次高,水相相对渗透率第1次比第2次低;实验过程与强水驱过程相近,说明随注采周期的增加会造成注采能力下降,当然这只是在相同含水饱和度下。

在边水不活跃的情况下,实际注采过程中含水饱和度是下降的,因此注采能力均会随注采次数的增加而增加。

看束缚水变化,在2次互驱过程中,束缚水饱和度有所下降(35.06%~34.48%),残余气饱和度有所上升(14.08%~18.08%);总体表现为两相区饱和度范围变小,说明含水构造也同样存在注入气量损失的问题。在含水构造中,由于不存在残余油的影响,气、水相的相对渗透率比含水油藏的气、水相的相对渗透率更高,而且不可动的液相饱和度小,因此,就注采能力和建库

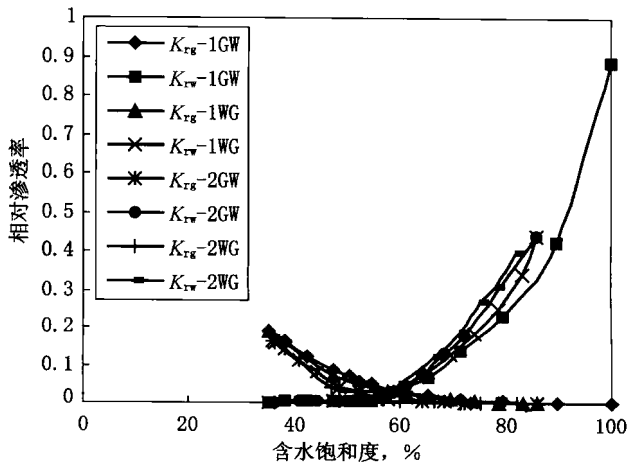


图3 含水构造相对渗透率对比曲线

容量而言，选用含水构造作为储气库比选用含水油藏更有优势。

三、多次升降压条件下岩心应力敏感实验

地层应力敏感性是指油气层的渗透率随有效应力的变化而发生变化的现象。储层岩石的上覆岩层压力与地层孔隙流体压力的差值就为储层岩石的有效应力，即净上覆压力。净上覆岩层压力的增加，不断改变着储层岩石的受力状态。根据岩石力学理论，从一个应力状态变到另一个应力状态必然要引起固体物质的压缩或拉伸，产生变形。储层岩石的变形主要表现为孔隙和岩石骨架的压缩和拉伸。一般来说，岩石骨架的变形非常微小，因而可以忽略不计，但储层岩石孔隙的变形随净上覆岩层压力的变化非常明显，不能忽略不计^[14-18]。

1. 岩心应力敏感实验流程

岩心应力敏感实验流程如图 4 所示。

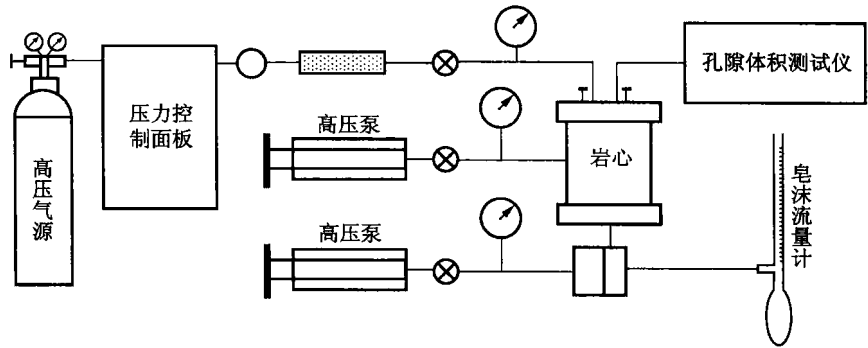


图 4 岩心应力敏感实验流程图

2. 渗透率与净上覆压力的关系

1) 实验方法及实验条件

该实验是研究储气库内部流体压力降低和升高而上覆岩层压力保持不变时渗透率的变化情况，本次实验是从低到高增加净上覆岩层压力，最大净上覆岩层压力为 40MPa，温度为常温。

2) 实验过程

实验采用人造岩心，岩心的基本参数见表 1。采用 4 个回合的净上覆岩层压力上升与下降来测试渗透率的变化。实验设定的净上覆压力点为 2MPa、4MPa、7MPa、10MPa、15MPa、20MPa、30MPa、40MPa。

表 1 岩心基本参数

岩心编号	岩心长度, cm	岩心直径, cm	第一次升压前的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
10-4	7.52	2.50	167.84
2	6.11	2.43	609.59

3) 实验结果与分析

从图 5 和图 6 可以看出，多次升降压（多次注采）后，岩石的渗透率会下降，且在净上覆压力增加的早期，从 2MPa 到 20MPa，渗透率下降幅度比较大；随着净上覆压力的继续

增加, 从 20MPa 到 30MPa, 渗透率下降幅度逐渐变缓; 从 30MPa 到 40MPa 渗透率几乎没有多大变化, 说明净上覆压力的变化对渗透率的影响已经到了极限。随着净上覆压力上升和下降次数的增加, 渗透率随净上覆压力的变化越来越小。

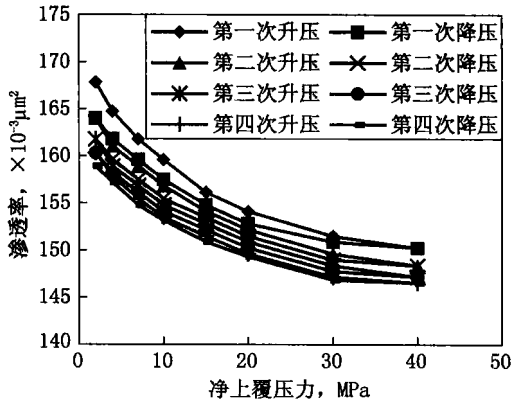


图 5 10-4 号岩心应力敏感曲线

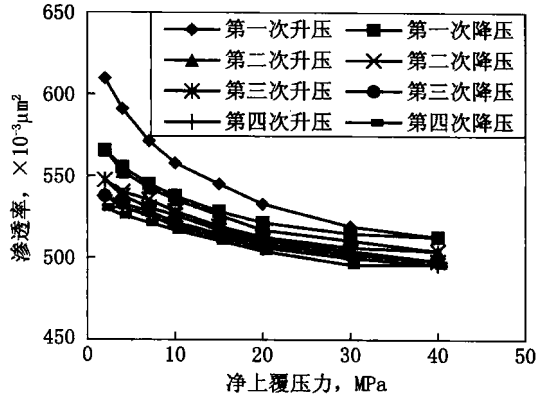


图 6 2 号岩心应力敏感曲线

3. 孔隙度、压缩系数与净上覆压力的关系

1) 实验原理

在岩心夹持器内建立两个相互独立的静水压力系统, 即围压和内压。其中围压模拟地层岩样所承受的上覆岩石所产生的覆盖压力, 内压则模拟油 (气) 藏流体的压力。在测定时, 扩大内压系统的体积, 使内压降低, 根据体积的增大及传压介质的弹性膨胀量, 计算出由内压降低引起的岩石孔隙收缩量, 根据公式计算出岩石的压缩系数和孔隙度。实验流程见图 4。

2) 实验条件

岩样尺寸: 使用的岩样直径 25mm, 长度 25~50mm 的柱状岩样。温度: 常温。

3) 实验结果与分析

图 7、图 8 为 2 号、10-4 号岩样孔隙度与净上覆压力之间的关系曲线; 图 9、图 10 为 2 号、10-4 号岩样压缩系数与净上覆压力曲线。

从图 7、图 8 可以看出, 随着净上覆压力的增加, 孔隙度具有明显的下降趋势。具体表现在, 随着净上覆压力的增加, 孔隙度值下降的比较快, 当压力达到 20MPa 后, 孔隙度下

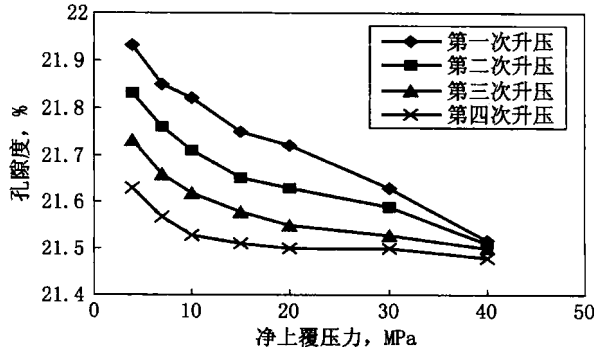


图 7 2 号岩样孔隙度与净上覆压力关系曲线

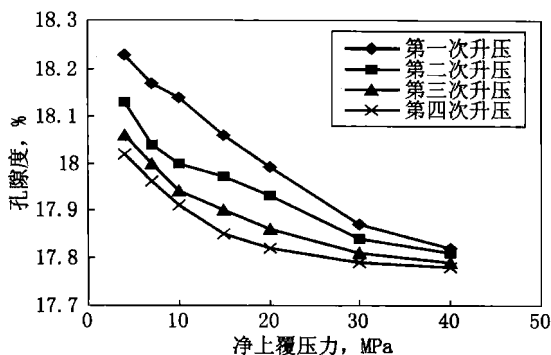


图8 10-4号岩样孔隙度与净上覆压力关系曲线

降就比较缓慢了。原因在于：渗透率较高的岩样，其骨架比较疏松，起初随着压力的增加，压实作用比较明显，孔隙度下降快；随着净上覆压力的继续增加，岩样中可供压缩的空间减少，孔隙度下降趋于平缓。而且，随着净上覆压力改变次数的增加，孔隙度变化也趋于平缓。

从图9、图10可以看出，随着净上覆压力的上升，岩石压缩系数呈下降趋势；上覆压力低时岩石压缩系数变化较大；升压后期由于岩石可压缩性减小，岩石压缩系数变化减小。

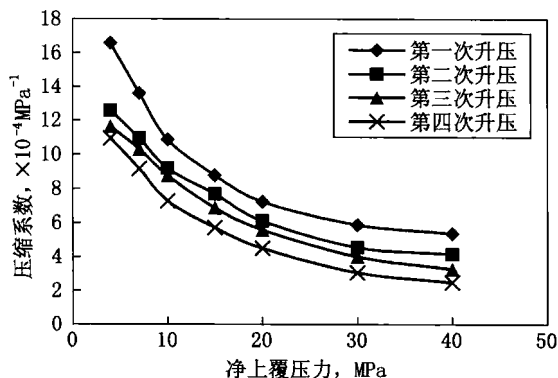


图9 2号岩样压缩系数与净上覆压力曲线

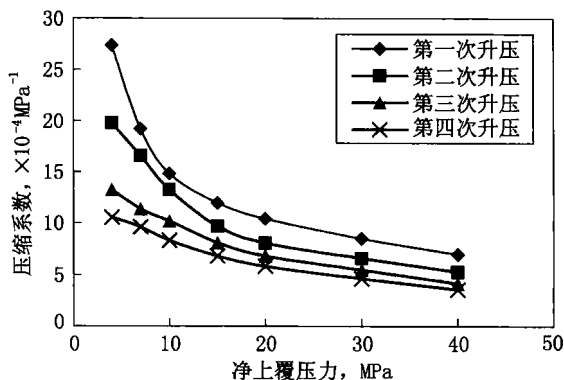


图10 10-4号岩样压缩系数与净上覆压力曲线

四、多次注采后库容及渗流能力测定实验

经过多次注采以后，岩心中的油、气、水饱和度和岩心的渗透率势必会发生变化。针对油藏和含水构造，进行了多次注采后库容及渗流能力测定的实验。