

气田及凝析气田开发 新理论、新技术

李士伦 孙良田 郭平 孙雷 等著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

气田及凝析气田开发 新理论、新技术

李士伦 孙良田 郭平 孙雷 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

21世纪是天然气世纪,本书针对气田及凝析气田开发中存在的技术前沿问题,以凝析气藏、低渗气藏、水驱气藏为主要对象,以国家重点实验室开放基金“气田及凝析气田开发新理论、新技术及其应用”研究成果为基础,系统介绍了多孔介质中油气相态与渗流的理论和实验测试技术、五参量指数型势能模型及应用、气液固多相平衡理论与实验测试技术、多孔介质吸附测试技术与理论、考虑吸附和毛细凝聚的凝析油气渗流理论模型及应用、气井携液理论模型及应用,为适应大规模气田开发的成组气田开发最优规划和决策理论及应用等内容。

本书介绍了一系列新理论、新技术、新方法,可作为从事气田开发研究人员的参考书,也可作为从事气田及凝析气田开发研究的高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气田及凝析气田开发新理论、新技术/李士伦等著.

北京:石油工业出版社,2005.5

ISBN 7-5021-5017-X

I. 气…

II. 李…

III. ①气田开发 ②凝析气田-气田开发

IV. TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第034118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.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:11.75

字数:300千字 印数:1—1500册

定价:40.00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

前 言

从环保和优质能源出发, 21 世纪是天然气世纪。随着气田勘探开发的深入, 我国发现不同类型的复杂天然气藏愈来愈多, 如鄂尔多斯盆地的低渗透致密气藏, 塔里木高含蜡的牙哈凝析气藏, 以四川为代表的水驱气藏, 以塔里木、中原为代表的深层高温高压低渗凝析气藏, 还有为西气东输等大型天然气工程提供气源的成组气田开发等。由于气田开发类型复杂, 开发难度很大, 给气田、凝析气田开发带来严峻的挑战。

油气相态及渗流问题是气田开发的基础问题。凝析气藏、高含蜡气藏油气相态测试通常在没有多孔介质的空筒 (PVT 筒) 中进行, 实际上储层流体相态的变化都是在多孔介质中发生的, 研究多孔介质对相态的影响直接关系到目前采用的开发基础理论的可靠性; 近年来, 由于科学技术的进步, 先后用填充玻璃珠及石英砂进行了露点研究; 在多孔介质凝析油气饱和度研究中, 虽然有一些技术得到了应用, 如 CT 和核磁共振法, 但因温度与压力达不到地层情况而不能直接测试, 因此探索能在高温高压下直接测试多孔介质中油气饱和度的测试方法有重要意义; 在目前通用的凝析气藏开发渗流理论模型中, 未考虑多孔介质吸附和毛细凝聚对油气相态及渗流规律的影响, 而这正是多孔介质的基本特征之一, 也是开发工作者非常关心的问题。我国低渗透气藏较多, 天然气的吸附对储量有多大影响? 常规吸附技术主要应用于化工领域, 而多孔介质吸附有很大差别, 所以建立天然气真实储层岩心吸附的测试技术很有必要。在大港和塔里木高含蜡凝析气藏相态计算中, 用气液两相相平衡理论不能描述此类气藏的相态, 以致在低温区内不能进行计算或不能收敛到临界点。另外, 对高含蜡和高含硫的气藏、凝析气藏, 研究气液固三相相平衡有重要意义。

气井生产系统是气田开发的基本单元, 我国大部分气井生产常伴有油水产出, 通过研究分析, 发现传统的携液模型有其局限性, 发展新的更能描述实际生产条件的理论模型有重要的意义。

我国目前天然气气田很多, 但大多是中小型的, 为了适应开发规模和长输的需要, 需要进行多个气藏的成组开发, 如何进行成组气藏开发和优化是目前大家关心的热点问题。

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 (西南石油学院) 针对生产实际中存在的重大基础前沿问题, 设立了“气田及凝析气田开发新理论、新技术及其应用”的研究课题, 通过 5 年左右的攻关 (1999—2003), 完成了项目的全部内容, 取得了一大批创新成果。在多孔介质相态实验测试方法及理论模型研究方面, 考虑吸附及毛细凝聚的凝析油气渗流及井筒携液模型的建立和改进, 势能模型及气、液、固状态方程研究, 成组气田数值模拟和气田开发大系统一体化模型建立、求解及决策方法等方面取得了 12 个创新点, 发表了大批专著教材及学术论文, 由于成果显著, 此项目成果已获四川省科技进步一等奖。

本专著的特点是反映了我们目前在气田及凝析气田开发配套技术方面的最新研究动态, 也是多年来西南石油学院气藏工程研究组研究成果的结晶, 为了将此项优秀成果奉献给读者, 特将此项目的主要成果汇集于本书中, 全书共分 4 章, 第 1 章为油气相态研究新技术、新方法, 由郭平、李士伦、孙良田、贾春生、李闽、欧成华、梅海燕等编写, 主要论述了多孔介质对油气相态影响的实验与理论、气液固多相平衡测试与理论、五参量指数型势能模型

与应用、储层岩石对天然气的吸附等内容；第2章为多孔介质中凝析油气体体系相态特征、产状和渗流规律研究，由孙雷、李士伦、黄全华、何江川、杜建芬、张茂林、熊钰等编写，主要论述了同时考虑吸附及毛细凝聚的相态及渗流理论模型，以及对试井和生产动态分析的影响；第3章为气井携液及考虑相态影响的生产系统分析，由孙良田、李闽、刘建仪等编写，主要论述了气井携液模型及考虑相态影响的生产系统分析方法；第4章为成组气田（凝析气田）开发最优规划和决策理论及应用，由李士伦、雍岐东、杜志敏、孙瑜等编写，主要论述了成组气藏一体化规划模型建立、求解方法及应用；全书由李士伦、孙良田、郭平、孙雷同志主编。

在本专著成果的研究过程中，有许多博士、硕士、教师和实验工作人员曾参加过研究工作，主要有何江川、刘启国、苏畅、何行范、周守信、汪周华、孙风景博士及部分硕士；陈一键、易敏、邹振、赵晓峰、青华忠、况衍涛、张思永、吴莹等教师，在此深表感谢。

感谢为本研究提供帮助的中石油、中石化、中海油三大公司的有关领导及各相关石油公司企业领导和技术人员，也要感谢“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室（西南石油学院）的大力支持，才使本课题的研究得以顺利进行。

本研究属本学科的前沿研究，是一项新理论、新方法、新技术，一些理论与技术还需在大量的科学实验和生产实践中进一步检验与应用。此外编写中也难免出现不足之处，恳请读者批评指正，我们表示热忱的欢迎！

李士伦

2004年10月15日

目 录

第 1 章 油气相态研究新技术、新方法	(1)
1.1 多孔介质相态及凝析油采收率	(1)
1.1.1 多孔介质中凝析气衰竭试验及临界流动饱和度	(2)
1.1.2 平衡凝析油气相渗曲线测试	(16)
1.1.3 多孔介质中凝析油采收率研究	(22)
1.2 气液固多相平衡	(27)
1.2.1 固溶物的沉积机理和测定方法	(27)
1.2.2 固相沉积机理	(29)
1.2.3 固相沉积的室内测定	(33)
1.2.4 固相沉积的理论预测方法	(37)
1.2.5 清除方法	(56)
1.3 状态方程改进研究	(58)
1.3.1 五参量指数型势能模型	(58)
1.3.2 用五参量指数型势能模型预测流体的红外光谱及拉曼光谱	(58)
1.3.3 用五参量指数型势能模型建立流体的蒸气压公式	(59)
1.4 储层介质对天然气吸附研究	(61)
1.4.1 引言	(61)
1.4.2 多孔介质吸附测试研究	(61)
第 2 章 多孔介质中凝析油气体体系相态特征、产状和渗流规律研究	(74)
2.1 问题的提出	(74)
2.2 发展简史	(75)
2.3 多孔介质中的界面现象	(75)
2.3.1 凝析气混合物在储层多孔介质表面的吸附	(76)
2.3.2 凝析油混合物在储层多孔介质表面的吸附	(78)
2.3.3 多孔介质中的毛细凝聚现象	(79)
2.4 多孔介质中凝析油气体体系相平衡规律研究	(80)
2.4.1 多孔介质中凝析气藏的露点	(81)
2.4.2 多孔介质中凝析油气体体系的定容衰竭相平衡	(82)
2.5 多孔介质中凝析油气混合物渗流规律研究	(84)
2.5.1 多孔介质中凝析油气混合物渗流的特点	(84)
2.5.2 多孔介质中凝析油气渗流数学模型	(85)
2.6 多孔介质相态特征及渗流理论应用实例	(87)
2.6.1 多孔介质相态特征应用实例	(88)
2.6.2 多孔介质相态及渗流理论应用实例	(90)

第3章 气井携液及考虑相态影响的生产系统分析	(95)
3.1 气井携液研究	(95)
3.1.1 引言	(95)
3.1.2 气井携液最小流速和产量公式推导	(95)
3.1.3 与 Turner 携液模型比较	(98)
3.1.4 实例对比分析	(98)
3.1.5 简化公式	(99)
3.2 考虑相态影响的生产系统分析	(100)
3.2.1 气井生产系统分析方法	(100)
3.2.2 气井生产系统分析的主要数学模型	(104)
3.2.3 凝析气井生产动态系统分析方法	(114)
3.2.4 气井生产动态预测方法	(116)
3.2.5 气井生产动态系统分析实例	(119)
3.3 取得的主要认识	(126)
第4章 成组气田(凝析气田)开发最优规划和决策理论及应用	(128)
4.1 前言	(128)
4.1.1 研究的目的与意义	(128)
4.1.2 国内外研究现状及存在的问题	(129)
4.1.3 研究方法	(130)
4.2 成组气田规划的水动力学模型	(130)
4.2.1 渗流力学模型研究	(130)
4.2.2 物质平衡方程式与气藏衰竭的微分方程	(135)
4.2.3 气体井筒流动水动力学模型	(137)
4.2.4 地面管网水动力学模型	(138)
4.2.5 气田开发技术模型——一体化模型	(139)
4.3 成组气田开发经济数学模型	(140)
4.3.1 天然气的市场需求量预测	(140)
4.3.2 气田开发(规划)经济数学模型	(144)
4.4 成组气田开发大系统规划模型研究	(154)
4.4.1 成组气田开发大系统规划模型的建立方法	(154)
4.4.2 成组气田开发大系统总体规划模型——直接求解法	(155)
4.4.3 成组气田开发大系统分解协调规划模型——间接求解法	(158)
4.5 成组气田开发大系统综合决策方法研究	(160)
4.5.1 指标体系的建立	(160)
4.5.2 成组气田开发技术经济指标的计算方法	(160)
4.5.3 成组气田开发大系统决策方法——模糊灰元法	(163)
4.6 成组气田(藏)规划与决策方法研究实例	(166)
4.6.1 成组气藏规划方案的制定与决策方法	(166)
4.6.2 成组气藏(田)开发规划方案的指标计算	(168)
4.6.3 成组气田开发方案的优选	(169)

4.6.4 不确定性分析	(172)
4.7 取得的主要认识	(174)
参考文献	(175)

第 1 章 油气相态研究新技术、新方法

油气相态是开发的基础，直接影响气藏储量计算结果，是开发技术政策确定的重要依据。本章主要论述了多孔介质中凝析油气相态及凝析油采收率、气液固多相平衡实验与理论、势能模型与状态方程改进、储层介质对天然气吸附四个方面。

1.1 多孔介质相态及凝析油采收率

PVT 测试中凝析气藏衰竭开发中凝析油采收率是开发中的一个重要基础数据，目前国内均已形成相关测试标准，然而地层流体的相态变化是在多孔介质中发生的，研究多孔介质中的凝析气藏衰竭采收率无疑是有重要的指导意义。常规 PVT 筒中的 PVT 测定实验无法考虑多孔介质的影响，而实际凝析油气体体系相平衡过程和渗流过程发生在地下多孔介质中，孔隙介质壁面几乎紧挨着流体分子，流体与储层介质间会发生相互作用。由于储层颗粒细、孔隙小，使储层介质具有巨大的比面积，流体与储层介质间存在极大的多种界面，因而界面现象极为突出。与界面现象紧密相关的界面张力、吸附、润湿、毛细管压力等作用均会对流体在储层孔隙介质中的分布、渗流产生巨大影响。由于凝析油气体体系是低界面张力体系，两相之间产生相变和质量互换，它不同于传统的高界面张力油气体体系，在多孔介质中渗流时的渗流特征也不同，由于影响多孔介质中相态的因素很多，而且目前还未完全弄清楚，但采用油田实际岩心和流体进行衰竭试验对开发中凝析油采收率具有实际指导意义。

关于此研究，国内外有一些，但其结论相差很大，Trebin 和 Zadora 研究表明有多孔介质存在时露点比常规 PVT 筒中测得的露点高 10%~15%，Tindy 和 Raynal 用实验研究原油在多孔介质的饱和压力发现，比没有介质时高百分之几。而 Weinaug Cordell 用 C_1-C_3 二元体系做实验表明气液平衡不受干燥砂岩的影响。Oxford 和 Huntington 研究了多孔介质存在盐水时注 N_2 驱己烷的采收率，发现介质的存在对再蒸发过程影响甚微。在研究润湿性影响方面，Smith 和 Yarborough 的实验表明毛管结构对反凝析液的再蒸发没有影响。Clark 研究了粘土和部分饱和水的砂岩及粘土—砂岩充填介质中的轻石蜡体系的吸附及驱替以测定对平衡相行为的影响，发现影响较小。

阎庆来等用 C_1-C_3 二元体系进行实验研究，反映了多孔介质加速反凝析的进程，露点与无介质时相比提前了。而朱维耀、黄延章用同样流体体系进行实验研究表明，结论是有介质存在时露点压力略低于无介质时的露点压力，在临界点附近影响程度较小。

Brusilorsky 采用实际多元组分建立了毛管压力对油气相平衡影响的理论模型，得出如下结论：“表面曲率的影响使露点升高，使泡点下降；升高和下降的程度随曲率半径 R 的变小而增大，同一曲率半径下，压力越高影响程度越小。”

郭平曾在 SPE20180 论文研究的基础上引入湿润角，研究认为“随临界点的靠近，毛管压力影响变小；当油气湿润角为 $\pi/2$ 时，毛管压力对相态无影响；在闪蒸过程中当湿润角为 0 时使反凝析油饱和度上升，湿润角的不同也可能是造成实验结果不同的原因之一”。何江川等研究认为“在某一地层温度下，多孔介质的存在对露点的影响使凝析气藏真实露点升

高，其影响程度随地露压差的变大而变大”。

由于此问题既是一个基础问题，也是一个国际上具有争议的重要基础理论问题，研究从常规 PVT 和多孔介质中衰竭试验对比入手，根据实验找出采收率之间的差别，再采用超声波测试饱和度技术测试凝析油临界流动饱和度，再通过测试真实条件下凝析油气相渗曲线从渗流机理上对采收率差别进行解释，将相渗应用于数值模拟中，进一步证明了实验研究的可靠性。

1.1.1 多孔介质中凝析气衰竭试验及临界流动饱和度

采用超声波装置，可以确定岩心中的相态变化，岩心中的凝析油饱和度以及反映凝析油流动能力的重要参数——临界流动饱和度。为了研究凝析气在长岩心中的衰竭规律，分析束缚水存在对天然气和凝析油采收率的影响，本文进行了高低渗两组岩心的三次衰竭实验，实验采用超声波检测相变和凝析油饱和度。

1.1.1.1 地层流体 PVT 测试

(1) 实验流程

地层流体相态实验研究，是在加拿大 DBR 公司研制和生产的 JEFRI 带观测窗无汞高温高压地层流体分析仪中完成的，实验流程如图 1-1 所示。该流程主要由注入泵系统、PVT 筒、闪蒸分离器、密度仪、温控系统、气相色谱、电子天平和气体增压泵组成。各部分技术指标如下：

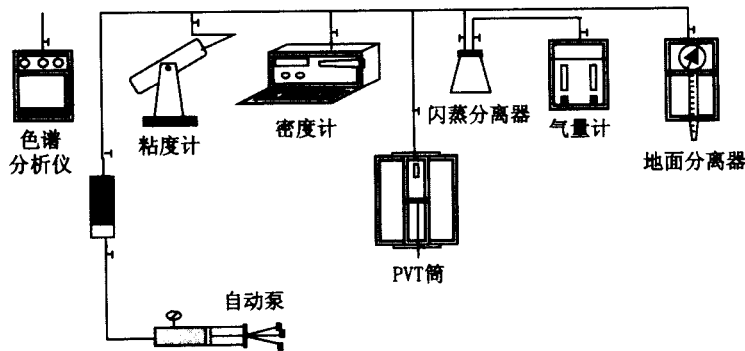


图 1-1 加拿大 DBR 公司 JEFRI 带观测窗无汞高温高压地层流体分析仪流程图

①注入系统：Ruska 全自动泵。

工作压力：0~70.00MPa；

工作温度：0~40.0℃；

分辨率：0.001mL。

②PVT 筒：包括一个带观察窗的主泵室和一个活塞式配样器。

工作压力：0~70.00MPa；

工作温度：0~200.0℃；

容积：主泵室 0~400mL。

③闪蒸分离器：Ruska 气量计和分离器。

工作压力：大气压；

配样器：0~600.0mL；

工作温度：常温；

体积计量精度：1mL。

④密度仪：Anton Paar 密度仪。

工作压力：0~40.00MPa；

工作温度：-10~70.0℃；

最高测量精度： $\pm 10\sim 6\text{g/cm}^3$ 。

⑤温控系统。

工作温度：0~200.0℃；

控温精度：0.1℃。

⑥气相色谱：美国 HP—6890 和日本岛津 GC—14A 色谱仪。

控温范围：0~399.0℃；

最低能检度： $3\times 10^{-2}\text{g/s}$ ；

最高灵敏度： $1\times 10^{-12}\text{A/mV}$ （满刻度）。

⑦电子天平：日本 TG—328A 电子天平。

最大称量：200g；

分辨率：0.1mg。

⑧气体增压泵：美国 Haskel 公司气体增压泵。

入口压力：0~25.00MPa；

出口压力：0~80.00MPa；

气源压力： $>0.20\text{MPa}$ ；

工作温度：室温。

(2) 流体 PVT 分析。

①流体配样。

根据行业标准 SY/T5543—2002，用西部 TH23 某井分离器油样和分离器气样按露点压力 50MPa 进行配样，配好的样品用于下面的相态分析。实验模拟地层温度 100℃，地层压力 55MPa。

根据本次实验室进行的流体相态特征观测如露点压力测试、等组成膨胀实验测试以及定容衰竭实验测试等表明配制的流体呈现为凝析气特征。这一特征可以从以下 PVT 参数及相态特征分析中看出。

②流体组成。

通过油气组成色谱分析及井流物组成计算，得到流体组成中 C_1 含量为 68.96%，中间烃 (C_2-C_6) 含量为 22.30%， C_{11} 含量为 3.72%，地层流体组成见表 1-1。

表 1-1 地层流体组成分布表

组 分	摩尔组成
CO ₂	0.25
N ₂	4.77
C ₁	68.96
C ₂	8.62
C ₃	4.33

续表

组 分	摩尔组成
iC ₄	0.99
nC ₄	1.55
iC ₅	0.66
nC ₅	1.21
C ₆	1.32
C ₇	0.53
C ₈	1.11
C ₉	1.07
C ₁₀	0.91
C ₁₁	3.72

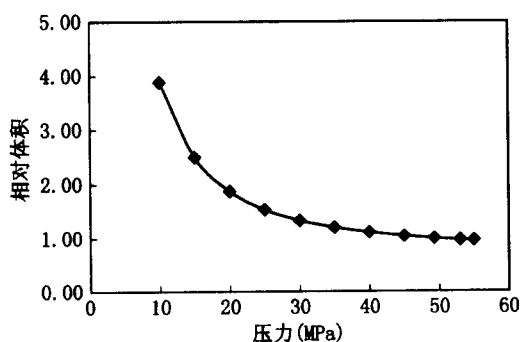


图 1-2 流体 PV 关系曲线

③等组成膨胀测试。

等组成膨胀实验 (CCE) 是为了测取凝析油气体系在地层条件下体积膨胀能力即弹性膨胀能量的大小和露点压力, 目的是获得凝析油气体系 PV 关系和露点压力等流体相态特征参数。CCE 过程相关的参数及变化趋势见图 1-2 和表 1-2。

由表 1-2 和图 1-2 可见流体在地层温度 100℃ 下的露点压力为 49.30MPa。

④定容衰竭测试。

定容衰竭实验 (CVD) 测试是为模拟凝析气藏衰竭式开发过程中的生产动态而设计的一项实验, 目的是预测凝析气藏衰竭开发过程中地层反凝析油饱和度变化以及天然气和凝析油采出程度的变化等动态参数。CVD 过程相关的参数及变化趋势见图 1-3 和表 1-3。

表 1-2 流体 PV 关系数据

压力 (MPa)	相对体积	偏差系数
55.00	0.9623	1.340
53.00	0.9702	1.302
49.30	1.0000	1.248
45.00	1.0456	
40.00	1.1111	
35.00	1.2004	
30.00	1.3293	
25.00	1.5336	
20.00	1.8749	
15.00	2.4998	
10.00	3.8884	

由表 1-3 及图 1-4 可见, 定容衰竭过程中, 反凝析液量随衰竭压力的降低起初有一个快速上升的趋势, 随后上升速度有所减缓。当流体衰竭压力降到 28MPa 时, 反凝析液量达到最大 33.66%, 随后随衰竭压力的降低反凝析液量开始呈逐渐减小的趋势。

定容衰竭过程中, 随衰竭压力的降低气油比变化见图 1-3。可见流体气油比随衰竭压力的降低而持续上升。天然气和凝析油累积采收率的变化如图 1-5 所示。流体在压力 7MPa 下, 天然气的采收率为 80.90%, 凝析油的采收率为 13.12%。

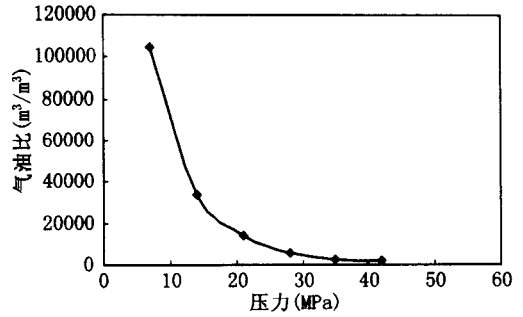


图 1-3 流体 CVD 过程气油比变化

表 1-3 流体定容衰竭数据

压力 (MPa)	气油比 (m³/m³)	天然气采收率 (%)	凝析油采收率 (%)	反凝析液量 (%)
49.30		0	0	0
42.00	2118	7.70	4.69	27.90
35.00	2821	15.68	8.35	33.55
28.00	6060	26.92	10.75	33.66
21.00	13760	42.09	12.17	32.65
14.00	34027	60.52	12.87	30.81
7.00	104604	80.90	13.12	27.60

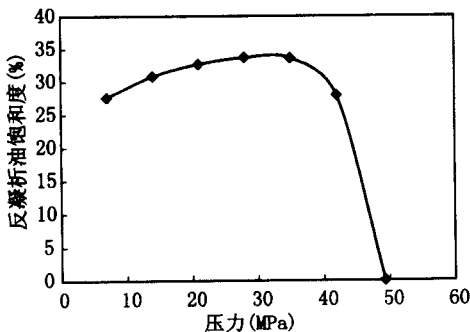


图 1-4 流体 CVD 过程凝析油饱和度

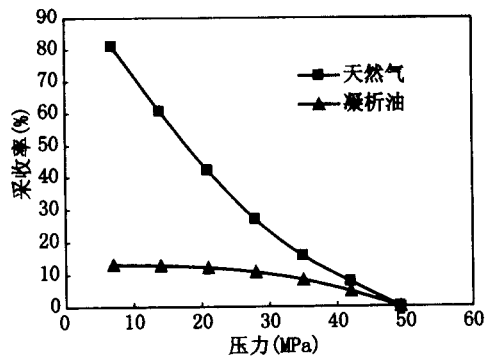


图 1-5 流体 CVD 过程天然气和凝析油采收率

1.1.1.2 岩心样品选择

(1) 岩心样品准备。

本次实验的高渗透 (高渗)、低渗透 (低渗) 两组岩心均为西部油气田的天然岩心。为了防止超声波的绕射传播, 对高渗、低渗两组岩心均选择了无破损且较长的 3 块孔渗相近的岩心进行组合。经打磨、清洗、烘干后对岩心的基本物性参数进行了测试, 测试结果见表 1-4、表 1-5。

表 1-4 高渗组实验岩心基本物性参数测试表

岩心编号	层位	岩心长度 (cm)	岩心直径 (cm)	孔隙体积 (cm ³)	孔隙度 (%)	渗透率 (10 ⁻³ μm ²)
TT101-2	K	4.67	2.49	4.75	20.89	624.13
TT101-3	K	4.88	2.49	5.4879	23.09	601.7
TT101-12	K	5.24	2.49	5.3609	21.01	683.11

表 1-5 低渗组实验岩心基本物性参数测试表

岩心编号	层位	岩心长度 (cm)	岩心直径 (cm)	孔隙体积 (cm ³)	孔隙度 (%)	渗透率 (10 ⁻³ μm ²)
TT101-10	K	4.84	2.48	4.3927	18.79	10.46
TT101-25	K	4.99	2.5	4.69	19.15	13.81
TT101-26	K	5.45	2.48	5.1107	19.41	33.72

高渗组岩心的平均渗透率为 $636.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均孔隙度为 21.66%，岩心总孔隙体积为 15.60cm^3 ，总长度为 14.79cm。低渗组岩心的平均渗透率为 $19.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均孔隙度为 19.12%，岩心总孔隙体积为 14.19cm^3 ，总长度为 15.28cm。

(2) 长岩心的排列方式。

对于长岩心驱替，普遍采用常规短岩心按一定的排列方式拼成长岩心。为了消除岩石的末端效应，每块短岩心之间用滤纸连接。经加拿大 Hycal 公司的 Tomas 等人论证，当岩心足够长，通过在每块小岩心之间加滤纸可将末端效应降低到一定程度。每块岩心的排列顺序按下列调和平均方式排列。由下式调和平均法算出 \bar{K} 值，然后将 \bar{K} 值与所有岩心的渗透率做比较，取渗透率与 \bar{K} 最接近的那块岩心放在出口站第一位；然后将剩余岩心的 \bar{K} 求出，将新求出的 \bar{K} 值与所有剩下的岩心 (n-1) 做比较，取渗透率与新的 \bar{K} 值最接近的那块岩心放在出口端第二位；然后依次类推便可得出岩心排列顺序。

$$\frac{\bar{L}}{\bar{K}} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_i}{K_i} + \dots + \frac{L_n}{K_n} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \quad (1-1)$$

式中 L——岩心的总长度，cm；

\bar{K} ——岩心的调和平均渗透率， μm^2 ；

L_i ——第 i 块岩心的长度，cm；

K_i ——第 i 块岩心的渗透率， μm^2 。

利用上述方法计算，表 1-4、表 1-5 中的岩心从出口端到入口端的排列顺序如表 1-6、表 1-7 所示。按表中的岩心顺序将各岩心装入长岩心夹持器中待用。

表 1-6 高渗组实验岩心排序结果表

岩心编号	层位	岩心长度 (cm)	岩心直径 (cm)	孔隙体积 (cm ³)	孔隙度 (%)	渗透率 (10 ⁻³ μm ²)
TT101-2	K	4.67	2.49	4.75	20.89	624.13
TT101-3	K	4.88	2.49	5.4879	23.09	601.7
TT101-12	K	5.24	2.49	5.3609	21.01	683.11

表 1-7 低渗组实验岩心排序结果表

岩心编号	层位	岩心长度 (cm)	岩心直径 (cm)	孔隙体积 (cm ³)	孔隙度 (%)	渗透率 (10 ⁻³ μm ²)
TT101-25	K	4.99	2.5	4.69	19.15	13.81
TT101-10	K	4.84	2.48	4.3927	18.79	10.46
TT101-26	K	5.45	2.48	5.1107	19.41	33.72

1.1.1.3 地层水

为了避免水敏效应，地层水为根据西部地区地层原始水样分析数据，在室内自行配制的，其总矿化度为 217900.3mg/L，水型为 CaCl₂型，其水分析结果见表 1-8。

表 1-8 地层水水质分析数据表

分析项目	矿化度 (mg/L)	分析项目	矿化度 (mg/L)
Na ⁺ K ⁺	68958	SO ₄ ²⁻	975.97
Ca ²⁺	13438	HCO ₃ ⁻	161.7
Mg ²⁺	1286.1	总矿化度	217900.3
Cl ⁻	133070	水型	CaCl ₂ 型

1.1.1.4 多孔介质中凝析油临界流动饱和度

利用超声波装置通过长岩心衰竭实验测试了高渗、低渗两组岩心有束缚水和无束缚水情况下的临界流动饱和度。即高渗组岩心含束缚水 27%，低渗组岩心不含束缚水和低渗组岩心含束缚水 34%。

(1) 测试原理。

多孔介质中的纵波声速：

$$v_p = \left[\frac{\lambda_0 + 2\mu}{\rho_s(1-\phi) + \rho_f\phi(1-\tau^{-1})} \right]^{1/2} \quad (1-2)$$

式中 λ_0 ——多孔介质的拉梅常数，Pa；

μ ——介质剪切弹性模量，Pa；

ϕ ——介质孔隙度，%；

ρ_s 、 ρ_f ——分别为介质骨架和流体的密度，kg/m³；

τ ——迂曲度。

孔隙介质中的声速不仅与多孔介质的体积弹性模量、剪切模量、密度、孔隙度和迂曲度有关，而且还依赖于饱和流体密度与体积弹性模量等。因此，当孔隙流体发生相变或饱和度变化时，孔隙介质中流体的弹性模量、密度、粘度及孔隙介质对流体的关联作用等都将随之发生变化，从而改变多孔介质的声学性质，即声速传播速度和衰减等。所以岩心中声波速度和衰减蕴藏着流体相态和饱和度等信息。声波经过整个岩心后的速度和衰减，必然反映出岩心中平均意义下的流体相态和饱和度。多次研究表明，在产生相变和饱和度变化时，波幅变化较为复杂，在本研究中，主要应用时差来进行分析，采用首波为标准来进行测试，保证了读取数据的准确性。

超声波测试岩心中流体饱和度原理是根据在相同压力、温度条件，岩心中油饱和度与声

波时差成线性变化关系来确定,为了能获得饱和度值,在进行实验前先对所用的实验岩心在地层条件下进行标定,在本研究中进行了3种标定,即高渗组岩心含束缚水27%,低渗组岩心不含束缚水和低渗组岩心含束缚水34%,标定结果见图1-6~图1-8,从图中可看出,其线性关系较好。

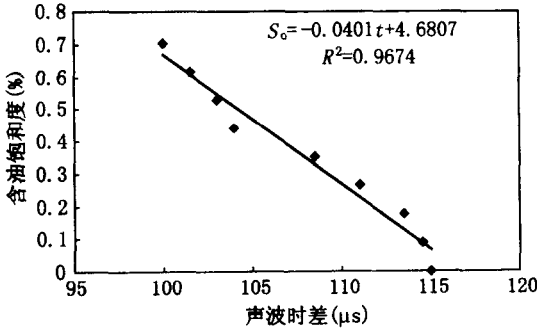


图1-6 高渗组岩心束缚水27%时的凝析油饱和度与声波时差关系

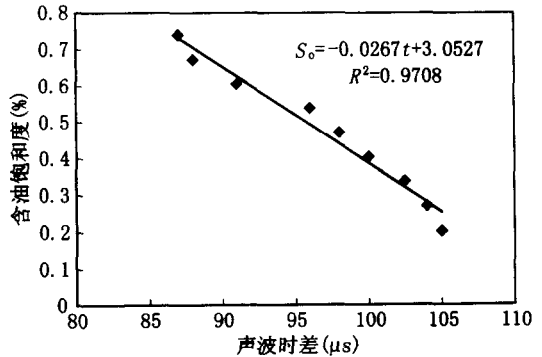


图1-7 低渗组岩心无束缚水时的凝析油饱和度与声波时差关系

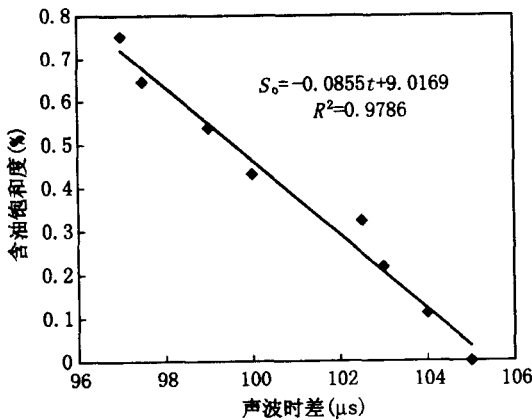


图1-8 低渗组岩心束缚水34%时的凝析油饱和度与声波时差关系

本次研究的多次重复实验证明当岩心的压力体系以及流体状态处于同一条件下时超声波信号具有相当好的重复性,这就确保了我们将标定曲线用于确定实际测试过程岩心中的凝析油饱和度的正确性。

在系统衰竭起始,压力高于露点压力时,超声波的时间和振幅信号不随着压力的降低而发生变化,表明系统处于单一的气相。随着压力的进一步降低,超声波波形和振幅由无变化到同时突然改变,表明岩心中的流体系统出现了相态变化,由此确定露点。露点时,超声波的时间并没有非常明显改变,说明相变区域流体性质接近,对声波的传播时间并没有影响。随后的一段时间,

声波的时间基本不变,但波形和振幅持续变化,初步判断此段为凝析气出现露点以后的雾区。随后,声波时间和波形以及振幅都随着衰竭压力的降低而变化,观察不到明显的突变。根据岩心出口端观察窗见第一滴油来判断临界流动饱和度点,然后根据此时的超声波时间来计算临界流动饱和度值。

(2) 实验流程。

长岩心衰竭实验是在加拿大 Hycal 长岩心驱替装置上完成的,实验流程如图1-9所示。此套流程主要由注入泵系统、长岩心夹持器、回压调节器、压差表、控温系统、液体馏分收集器、气量和气相色谱仪组成。其中1m长的三轴长岩心夹持器是长岩心驱替装置中的关键部分,主要由长岩心外筒、胶皮套和轴向连接器组成。该套装置中,岩心中的凝析气衰竭

速度由出口端压降速度控制，出口端压降速度由回压调节器的压降速度控制，回压调节器的压降速度由控制回压泵的退泵速度控制。各部分的技术指标如下：

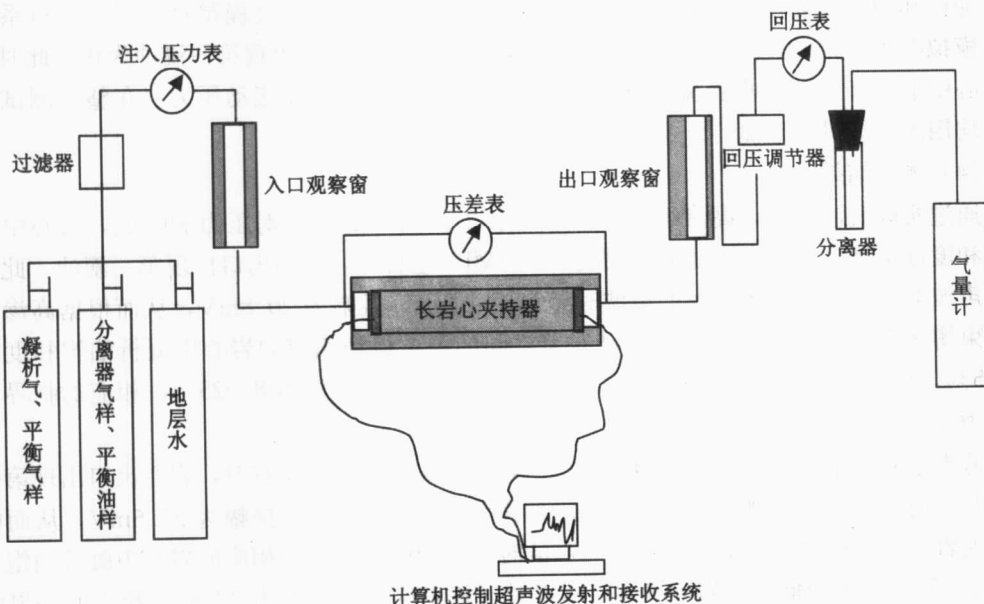


图 1-9 长岩心中凝析气衰竭实验流程图

①长岩心夹持器。

压力范围：0~70 MPa；

温度范围：0~200℃；

岩心长度：0~1000mm。

②注入泵系统：Ruska 全自动泵。

工作压力：0~70.00MPa，工作温度：室温，速度精度：0.001mL/s。

③回压调节器。

工作压力：0~70.00 MPa，工作温度：室温至 200.0℃。

④压差表。

最大工作压差：34.00 MPa，工作温度：室温。

⑤控温系统。

工作温度：室温~200.0℃，控温精度：0.1℃。

⑥气量计。

计量精度：1mL。

⑦气相色谱仪。

美国 HP6890 气相色谱仪进行天然气组分和组成分析。

⑧计算机控制超声波发生和接受控制系统。

工作温度：室温至 75℃，声时检测精度：0.05μs，振幅检测精度：0.1mV。

(3) 实验测试过程。

本次实验温度为地层温度 100℃，实验压力为地层压力 55MPa。