

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助



复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏相态 理论与应用

郭平 郭肖 付玉 编著
刘建仪 汤勇 汪周华



科学出版社

复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏相态理论与应用

郭 平 郭 肖 付 玉
刘建仪 汤 勇 汪周华 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要对富地层水烃类相态特征、凝析气藏气液固多相体系相态、多孔介质中高温高压凝析油气相态、高温高压气-液-元素硫多相共存体系复杂相态、高含硫气藏水合物生成与分解、油藏注气相态变化等进行理论和应用研究,获得复杂油气藏相态理论与应用,指导实际复杂油气藏开发。

本书可供油田类科研院所和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂油气藏相态理论与应用/郭平等编著. —北京:科学出版社, 2017.03

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042921-6

I. ①复… II. ①郭… III. ①复杂地层-油气藏-研究 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 309795 号

责任编辑:张 展 罗 莉/责任校对:刘莉莉 刘 勇

责任印制:罗 科/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:398 284

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



丛书编写委员会

主 编：赵金洲

编 委：罗平亚 周守为 杜志敏

张烈辉 郭建春 孟英峰

陈 平 施太和 郭 肖

丛 书 序

石油和天然气是社会经济发展的重要基础和主要动力,油气供应安全事关我国实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴中国梦的全局。但我国油气资源约束日益加剧,供需矛盾日益突出,对外依存度越来越高,原油对外依存度已达到 60.6%,天然气对外依存度已达 32.7%,油气安全形势越来越严峻,已对国家经济社会发展形成了严重制约。

为此,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》对油气工业科技进步和持续发展提出了重大需求和战略目标,将“复杂地质油气资源勘探开发利用”列为位于 11 个重点领域之首的能源领域的优先主题,部署了我国科技发展重中之重的 16 个重大专项之一“大型油气田及煤层气开发”。

国家《能源发展“十一五”规划》指出要优先发展复杂地质条件油气资源勘探开发、海洋油气资源勘探开发和煤层气开发等技术,重点发展天然气水合物地质理论、资源勘探开发和安全开采技术。国家《能源发展“十二五”规划》指出要突破关键勘探开发技术,着力突破煤层气、页岩气等非常规油气资源开发技术瓶颈,达到或超过世界先进水平。

这些重大需求和战略目标都属于复杂油气藏勘探与开发的范畴,是国内外油气田勘探开发工程界未能很好解决的重大技术难题,也是世界油气科学技术研究的前沿。

油气藏地质及开发工程国家重点实验室是我国油气工业上游领域的第一个国家重点实验室,也是我国最先一批国家重点实验室之一。实验室一直致力于建立复杂油气藏勘探开发理论及技术体系,以引领油气勘探开发学科发展、促进油气勘探开发科技进步、支撑油气工业持续发展为主要目标,以我国特别是西部复杂常规油气藏、深海油气以及页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气资源为对象,以“发现油气藏、认识油气藏、开发油气藏、保护油气藏、改造油气藏”为主线,油气并举、海陆结合、气为特色,瞄准勘探开发科学前沿,开展应用基础研究,向基础研究和技术创新两头延伸,解决油气勘探开发领域关键科学和技术问题,为提高我国油气勘探开发技术的核心竞争力和推动油气工业持续发展作出了重大贡献。

近十年来,实验室紧紧围绕上述重大需求和战略目标,掌握学科发展方向,熟知阻碍油气勘探开发的重大技术难题,凝炼出其中基础科学问题,开展基础和应用基础研究,取得理论创新成果,在此基础上与三大国家石油公司密切合作承担国家重大科研和重大工程任务,产生新方法,研发新材料、新产品,建立新工艺,形成新的核心关键技术,以解决重大工程技术难题为抓手,促进油气勘探开发科学进步和技术发展。在基本覆盖石油与天然气勘探开发学科前沿研究领域的主要内容以及油气工业长远发展急需解决的主要问题的含油气盆地动力学及油气成藏理论、油气储层地质学、复杂油气藏地球物理

勘探理论与方法、复杂油气藏开发理论与方法、复杂油气藏钻完井基础理论与关键技术、复杂油气藏增产改造及提高采收率基础理论与关键技术以及深海天然气水合物开发理论与关键技术等方面形成了鲜明特色和优势,持续产生了一批有重大影响的研究成果和重大关键技术并实现工业化应用,取得了显著经济和社会效益。

我们组织编写的“复杂油气藏开发丛书”包括《页岩气藏缝网压裂数值模拟》《复杂油气藏储层改造基础理论与技术》《页岩气渗流机理及数值模拟》《复杂油气藏随钻测井与地质导向》《复杂油气藏相态理论与应用》《特殊油气藏井筒完整性与安全》《复杂油气藏渗流理论与应用》《复杂油气藏钻井理论与应用》《复杂油气藏固井液技术研究与应用》《复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践》《复杂油藏化学驱提高采收率》等 11 本专著,综合反映了油气藏地质及开发工程国家重点实验室在油气开发方面的部分研究成果。希望这套丛书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考资料,为提高我国复杂油气藏开发水平发挥应有的作用。

丛书涉及研究方向多、内容广,尽管作者们精心策划和编写、力求完美,但由于水平所限,难免有遗漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

国家《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》将稳步提高国内石油产量和大力发展天然气列为主要任务,迫切需要稳定东部老油田产量、实现西部增储上产、加快海洋石油开发、大力支持低品位资源开发、加快常规天然气勘探开发、重点突破页岩气和煤层气开发、加大天然气水合物勘探开发技术攻关力度并推进试采工程。国家《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》将非常规油气和深层、深海油气开发技术创新列为重点任务,提出要深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料,完善煤层气勘探开发技术体系,实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发;突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术,开展先导钻探和试采试验;掌握深—超深层油气勘探开发关键技术,勘探开发埋深突破 8000 m 领域,形成 6000~7000 m 有效开发成熟技术体系,勘探开发技术水平总体达到国际领先;全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力,实现 3000 m、4000 m 超深水油气田的自主开发。近日颁布的《国家创新驱动发展战略纲要》将开发深海深地等复杂条件下的油气矿产资源勘探开采技术、开展页岩气等非常规油气勘探开发综合技术示范列为重点战略任务,提出继续加快实施已部署的国家油气科技重大专项。

这些都是油气藏地质及开发工程国家重点实验室的使命和责任,实验室已经和正在加快研究攻关,今后我们将陆续把相关重要研究成果整理成书,奉献给广大读者。



2016 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 常规油气藏相态测试实验研究	1
1.1.1 油气藏相态研究常用实验装置及功能、条件	1
1.1.2 油气藏相态实验测试内容与参数	9
1.2 油气藏相平衡理论	11
1.2.1 气液平衡计算方法	11
1.2.2 常用状态方程	19
1.2.3 相态模拟常用软件与拟合方法	25
参考文献	29
第2章 凝析油气藏相态研究	31
2.1 多孔介质中高温高压凝析油气相态	31
2.1.1 多孔介质中的界面现象	31
2.1.2 多孔介质中凝析油气体系相平衡规律研究	36
2.2 凝析气藏气液固多相体系相态	40
2.2.1 激光测试固相沉积点技术	40
2.2.2 考虑有机固相沉积的相态理论模型	41
2.3 凝析油气藏开发实例	45
2.4 凝析油气真实相渗研究	47
2.4.1 临界流动饱和度测试原理	48
2.4.2 平衡油气相渗曲线测试方法	49
2.5 考虑吸附影响的渗流理论模型及应用	51
2.5.1 考虑吸附现象作用的三维四相多组分模型	51
2.5.2 模型应用	53
参考文献	58
第3章 高含硫气藏相态研究	61
3.1 高含硫天然气物性参数计算模型优选	61
3.1.1 天然气偏差因子计算及校正	61
3.1.2 天然气黏度计算及校正	64
3.2 元素硫在高含硫天然气中溶解度	67
3.2.1 元素硫在高含硫天然气中溶解度预测模型	67
3.2.2 高含硫气体硫溶解度缔合模型研究	71

3.3 富含 H_2S 天然气相平衡热力学模型	78
3.3.1 高含硫气样混合物气-液相平衡热力学模型	78
3.3.2 硫与含 H_2S 混合气体气-液-固相平衡热力学研究	87
3.4 硫沉积对储层伤害实验研究	87
3.4.1 衰竭过程中硫沉积对储层伤害的实验	87
3.4.2 硫沉积影响因素实验分析	91
3.5 高含硫混合物气液和气液固相平衡热力学研究	93
3.5.1 高含硫混合物气液相平衡	93
3.5.2 高含硫混合物气液固相平衡	96
3.5.3 高含硫混合物气液和气液固相平衡计算方法	99
3.6 高含硫气藏气固耦合渗流综合数学模型	105
3.6.1 气固耦合综合数学模型建立	105
3.6.2 数值模型	109
3.6.3 实例应用	116
参考文献	118
第4章 高含 CO_2 气藏相态研究	120
4.1 含 CO_2 天然气相态特征及理论模拟方法	120
4.1.1 含 CO_2 天然气 PVT 相态实验测试	120
4.1.2 含 CO_2 天然气物化参数测试	123
4.1.3 含 CO_2 天然气 PVT 相态理论	137
4.2 含 CO_2 天然气-地层水体系相态特征	148
4.2.1 地层水对相态的影响	148
4.2.2 不同 CO_2 含量天然气中含水量实验	150
4.2.3 烃-水- CO_2 混合物相平衡模型及应用	151
4.2.4 图版的绘制	157
4.3 多孔介质条件下含 CO_2 天然气相态特征	169
4.3.1 不考虑多孔介质的 PVT 相态实验测试	169
4.3.2 考虑多孔介质的 PVT 相态实验测试	172
4.3.3 多孔介质影响的实验结果对比与分析	176
第5章 酸性气藏水合物相态研究	178
5.1 高含硫气藏水合物生成与分解	178
5.1.1 水合物热力学平衡实验	178
5.1.2 水合物生成影响因素	183
5.2 高酸性气体水合物热力学预测模型	184
5.2.1 水合物相化学势改进	184
5.2.2 水相活度计算	185
5.2.3 水-气-电解质-醇类相平衡计算	186

5.2.4	含抑制剂体系冰点的确定	188
5.2.5	改进后的水合物预测模型	188
5.2.6	水合物热力学预测模型实验评价	188
5.3	复杂多相体系物质平衡模型	190
5.3.1	复杂多相平衡热力学平衡模型及求解	190
5.3.2	逸度模型	192
5.3.3	复杂多相体系相平衡模型应用	192
5.4	酸性气藏水合物应用实例	195
5.4.1	普光某井井筒水合物预测	195
5.4.2	地面节流水合物预测及防治	195
	参考文献	197
第 6 章	油藏注气相态研究	199
6.1	注入气对油藏相态影响研究	199
6.1.1	理论模型	200
6.1.2	实例计算	201
6.1.3	对现场注气指导性意见	205
6.2	PVT 筒中注入气与原油扩散研究	206
6.2.1	PVT 筒中气油扩散理论模型	207
6.2.2	PVT 筒中多组分扩散实验	208
6.3	多孔介质中注入气与原油扩散研究	217
6.3.1	多孔介质中气油扩散理论模型	217
6.3.2	多孔介质中扩散系数实验	219
6.4	超前注气长岩心实验研究	224
6.4.1	流体及岩心样品	224
6.4.2	实验测试流程及方法	225
6.4.3	实验测试结果及分析	226
6.5	油藏注气吞吐实例分析	228
6.5.1	油藏流体相态拟合	228
6.5.2	单井吞吐注气模型及历史拟合	231
6.5.3	单井注 CO ₂ 吞吐方案设计	235
6.6	小结	250
	参考文献	251

第1章 绪 论

1.1 常规油气藏相态测试实验研究

1.1.1 油气藏相态研究常用实验装置及功能、条件

流体相态研究是认识油气藏特征、合理编制开发方案等的重要基础。随着油气藏勘探开发技术水平的提高,目前发现部分油气藏温度及压力越来越高,而且部分气藏流体采出的过程中,相态变化极其不稳态,因此需对油气藏相态进行实验研究。目前国内外相态常用测定包括:井流体组成的测定、恒质膨胀实验、定容衰竭实验、 p - T 相图计算。而相态实验常用的实验装置主要包括两大类:常规相态测试分析仪和天然气水合物仪。

1.1.1.1 常规油气藏流体相态测试分析仪

目前,国内外进行油气藏流体相态研究都是从现场获取油气藏流体样品,然后在实验室进行配样,用特定的实验设备对其进行研究,以获取相关实验数据,所采用的实验设备主要有以下几种。

1. 法国 ST 仪器公司 PVT 设备

法国 ST 公司超高压流体 PVT 测试系统(图 1.1)可对高温、超高压条件下不同气油比的原油、挥发油、凝析气、干气等油气藏流体样品进行样品检测、地层流体配样和 PVT 分析与测试,开展超高压条件下的油气藏地层流体相态特性实验研究,为超高压油气藏开发机理研究提供基础数据支持;也可用于沥青质沉降测试和气体水合物研究。

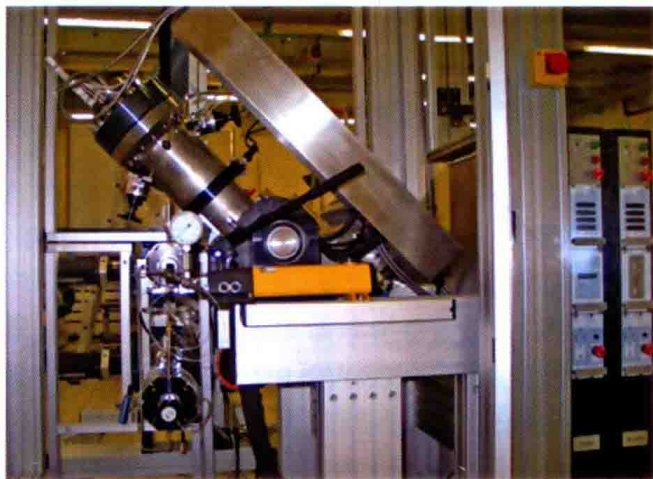


图 1.1 法国 ST-PVT 相态分析实验装置

1) 高压物性分析仪适用的实验

(1) 原油和挥发性油的 PVT 研究, 包括恒定温度下的恒质膨胀实验 (CCE)、恒定温度下的差异脱气实验、分离实验 (不同温度下的多级实验)。

(2) 凝析气和干气 PVT 研究, 包括恒质膨胀实验 (CCE)、定容衰竭实验 (CCE)。

(3) 在油藏条件下的配样 (包括井下样和分离器样)。

(4) 高温高压黏度测试。

2) 主要技术参数及特点

法国 ST-PVT 相态分析装置带有一个 240mL 断面可视可摄像的高温高压 PVT 室, 温度范围为常温至 200℃, 测试精度为 0.1℃; 压力范围为 0.1~150MPa, 测试精度为 0.01MPa; 液体沉积为 0.005mL; 泡露点可重复性为 0.035MPa; 具有较强的抗腐蚀能力, 抗 H₂S 腐蚀能力可高达 20%以上。

除此之外, 还有一系列的配套系统, 包括高温高压配样系统、GOR 测定系统、气体注入系统、固相沉降测试系统、泡沫注入测试系统、高温高压毛细管黏度计、界面张力测试系统等。

2. 美国千德乐公司 PVT 设备

美国千德乐公司生产的 3000-GL 型 PVT 分析仪 (图 1.2) 系统包括 PVT 筒、计量泵、计算机数据采集等, 可用于研究油、气、油气混合物以及化学组分的 PVT。

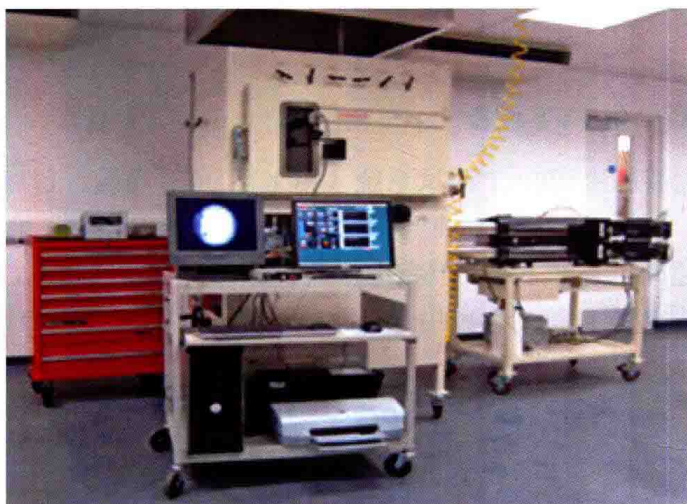


图 1.2 3000-GL 型 PVT 分析仪

3000-GL 型 PVT 分析仪组成包括原油釜和凝析气釜 (图 1.3 和图 1.4), 原油釜最高工作压力、温度分别为 103MPa、200℃, 凝析气釜 1000mL 压力可达 20000psi (约为 137MPa, 1psi=6.89476010³Pa); 压力分辨率为 1psi, 压力的全量程非线性度为 0.05%, 热效应为全量程的 0.05%, 漂移误差为全量程的 0.2%; 使用高精度的热阻温度传感器, 温度分辨率为 0.1℃, 准确度为 0.5℃, 控制精度为 0.2℃。

该设备主要的特点有:

(1) 安全特性、直接体积测量特性和热稳定性。

- (2) 开发出 1L 凝析气分析室及其他模块, 双样品室设计。
- (3) 大体积凝析室, 可精密测量很微量的凝析液。
- (4) 没有来自黑油实验的污染。



图 1.3 原油釜

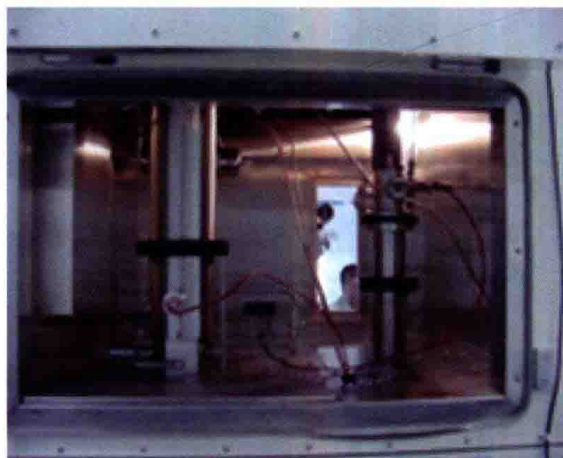


图 1.4 凝析气釜

3000-GL 型 PVT 常规基础实验包括:

- (1) 闪蒸实验——即 CCE (等质量膨胀或等组成膨胀) 实验, 或 p - V (压力-体积) 实验;
- (2) 泡点测试;
- (3) 微分分离实验——也叫 DV (微分蒸发) 实验;
- (4) 露点测试——也叫 CCE (等质量膨胀或等组成膨胀) 实验, 或 p - V (压力-体积) 测试, 主要用于天然气或凝析气;
- (5) 等体积衰竭实验——也叫 CVD 实验, 主要用于天然气和凝析气。

3. 法国万奇技术公司 PVT 设备

法国万奇 Fluid Eval500 PVT 相态分析仪用于研究油藏温度和压力下烃类流体的相态特征。通过更换分析头 (油头、气头和可视头), Fluid Eval500 系统可以进行黑油、挥发油、膨胀油、凝析油、天然气以及水合物 (加冷却系统) 的研究 (图 1.5 和图 1.6)。视频跟踪监测系统精确测定气液界面、泡点和露点, 全程记录实验过程, 可实现自动化操作。

1) 该套设备主要特点

- (1) 准确性。空气浴加热方式确保了系统温度的均一性和准确性, 不会在观察面或窗口产生局部冷凝; 视频跟踪监测系统自动跟踪样品气液界面, 确保读数准确。
- (2) 通用 PVT 釜, 易于更换分析头。通过更换分析头, 系统适用于各种流体分析。
- (3) 非常高效率的均质化。转向机构和磁力搅拌的结合使均质化 (搅拌) 非常快捷。
- (4) 高性能内置泵。PVT 筒内的内置泵提供高精度的体积计量和可重复性。
- (5) 自动控制和数据自动采集软件。实验过程和数据采集由计算机和专业软件完成。数据可以图形方式显示, 并储存在数据表中, 也具有计算、报告和宏指令功能。



图 1.5 黑油、水合物分析模式



图 1.6 气体凝析物、天然气分析模式

(6) 无汞设备。电动活塞替代了汞产生 PVT 筒内的压力，同时完成精确的体积置换。

(7) 低维护成本。设备的设计不需要经常维护。

2) 设备组成及性能参数

Fluid Eval500 PVT 相态分析仪设备的主要组成有：烘箱、转向机构、PVT 釜、油头、气头、可视头、磁力搅拌系统、视频数据采集系统、内置高压泵、精确排气控制阀、控制面板、数据采集监测工作站、计算软件。

Fluid Eval500 PVT 相态分析仪设备主要性能指标和技术参数如下。压力：20000psi；温度：室温 200℃ 左右；釜体积：500mL；气头体积：20mL；可视头体积：140mL；搅拌：磁力搅拌；电源：220V AC 50/60Hz；压力精度：0.01MPa；温度精度：0.2℃；体积精度：0.01mL；泡点重复性：±5psi；露点重复性：±5psi；空气浴校准温度：0.2℃；筒校准温度：0.2℃；防腐蚀能力：20% H₂S、50% CO₂。

4. 加拿大 DBR-PVT 分析仪

该系统包括恒温空气浴，适于室温+200℃ 的温度控制。全可视无汞 PVT 室，最大工作压力达 10 000psi (70MPa)。在相态实验过程中，为了保证准确的流体测量还配有阀门、管线和接口。适用于黑油、挥发油和凝析气地层流体。数字式压力和温度显示：所有的润湿部件为抗腐蚀材质；电源要求为 230V AC 50/60Hz (图 1.7)。

1) 设备主要组成部件

(1) 小体积隔离活塞。油藏条件下的实验过程中，浮动活塞把液压流体从可视容器内的实际地层样品中分离出来。

(2) 磁搅拌器。这个装置嵌入在可视 PVT 室的上端盖，并在实验过程中可直接搅拌流体样品来帮助建立压力平衡。



图 1.7 加拿大 DBR-PVT 分析仪结构图

(3) 相态数据采集系统。包括台式 PC 机、不低于奔腾 4 的处理器，带 17" 监视器、图形显示和用户定义的操作参数。

(4) CCD 摄像测高仪。在实验过程中，利用与支架上电动滑轨连接在一起的 CCD 照相机，可使操作者的可视观察准确并精确测量流体体积。

(5) 高压电动计量泵。电动泵：单缸，体积为 500cc ($1\text{cc}=1\text{cm}^3$)，最大工作压力为 20000psi。

(6) 带 GOR 装置的气量计。该仪器可以精确地测量大气压下的气体样品，包括 10L 不锈钢瓶，配有与压力传感器和 RS-232 接口相连的浮动活塞。

2) 主要设备系统性能特点

(1) DBR 相态系统 (PVT) 具有全部可视的优点。通过 DBR 室的双面玻璃窗，即安装在室前和室后的全长玻璃窗，室的顶部直到底部可被观察。

(2) DBR 室容易操作。在前后观察窗上，DBR 室的设计采用了自我增能密封，可以增加密封性。

(3) DBR 室是垂直定向。垂直定向与全可视的结合，DBR 室可以进行非常精确的相体积测量。

(4) DBR-PVT 室使用一个内玻璃筒来装盛需研究的样品。提高了相体积测量的精度，省去了大量花在不同温度压力条件下的室的校准时间。

(5) DBR-PVT 系统使用 HEISE 压力传感器，HEISE 压力传感器更精确，在相当长的时间内无须校正。

(6) DBR 相态系统 (PVT) 提供了两种不同的体积测量系统。无论 DBR 的数字测高仪还是以测高仪为基础 DBR-CCD 系统，均在 DBR 室的内部利用线性编码器完成相体积的测量。

3) DBR-PVT 系统的先进功能

DBR 固体监测系统 (SDS) 用于沥青和石蜡固体生成的测定。

(1) 磁性搅拌器。可提供高效搅拌并可排除由于大的死体积所造成的问题与错误，它

也可以减少建立相平衡所需要的时间,这意味着 DBR-PVT 系统的用户能够在较少的时间內做更多的工作。

(2) DBR 电磁黏度计。与旧的落球式黏度计或毛细管黏度计相比,它可提供更快更精确的高温高压黏度测量。

(3) DBR 的 PVT 装置的突出特点。它不仅可以精确地测量黑油,而且能够精确地测量轻质油、凝析油和天然气。由于 DBR 仪器的优质性能,其高压物性测量仪器符合国际认可的标准,目前世界各大油田公司均选用了 DBR 公司的 PVT 仪器。

1.1.1.2 天然气相态测试仪

目前水合物测试装置主要针对沉积岩水合物,主要包括:水合物基础物性测试装置、水合物合成分解实验装置。前者属于水合物静态测试装置,通过声、光、电、磁、力等方式检测其特性和存在形态;后者属于动态测试装置,主要测试温压条件变化过程中其动态变化规律。

1. 动态测试装置

动态法实验装置是一种流动式实验设备,气体从入口进入实验系统,而后与装置中的水混合,混合物在一定的温度压力下生成天然气水合物^[1]。

实验装置如图 1.8 所示,实验装置主要包括反应釜、恒温水浴、温度与压力测量仪表、流量计和数据采集系统等。装置的核心是高压反应釜,容积为 1L,最大工作压力为 20MPa,工作温度为 $-15\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。采用无级调速永磁旋转搅拌装置,叶片采用双层布置,转速调节范围为 $0\sim 1000\text{r/min}$ 。反应釜的温度由恒温水浴控制,恒温水浴的控温精度为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。反应釜内的温度由 2 个 Pt100 铂电阻测量,压力调节阀前后的压力由 2 个 0.25 级精度的压力表测量,压力调节阀前的压力表测量范围为 $0\sim 25\text{MPa}$,压力调节阀后的压力表测量范围为 $0\sim 10\text{MPa}$ 。为确保进入反应釜气流的稳定并防止气流回流造成危害,在实验装置中设置了一个缓冲罐。缓冲罐的容积为 12L,最高使用压力为 15MPa。水合物形成过程中的耗气量由流量计测定,其重复精度和准确度均为量程的 $\pm 0.2\%$ 。流量显示仪表可同时显示瞬时流量和累积流量。利用数据采集系统进行流量、温度和压力的采集,从而分析其开采过程中相态变化特征。

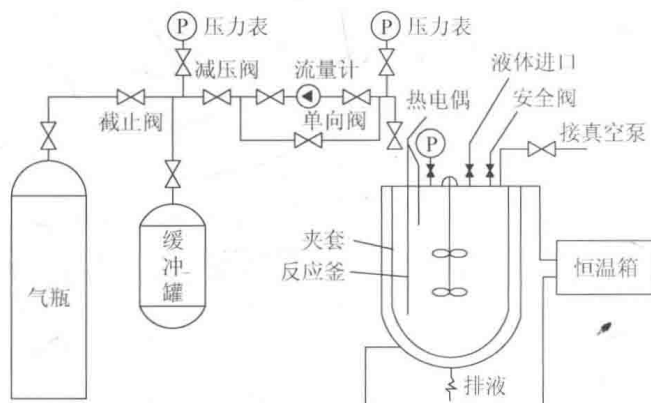


图 1.8 动态法实验装置示意图

2. 静态测试装置

静态法实验装置在水合物的研究史上有很重要的地位。该类装置主要包括反应釜、压力和温度测量系统、数据采集系统、恒温空气浴、搅拌与体积调节装置及气相色谱分析仪等,以美国地质调查局的天然气水合物及沉积物测试实验装置 GHASTLI 为例(图 1.9)^[2]。

(1) 高压釜。实验装置的核心部件是安装在恒温空气浴中的全透明高压蓝宝石釜。高压釜的最大工作体积为 60cm^3 , 最高工作压力为 20MPa , 温度工作范围为 $-90\sim 150^\circ\text{C}$ 。为了观察高压釜内的水合物晶体, 在空气浴外有一个冷光源, 用两根光导纤维管将光照射到高压釜上。高压釜内的活塞可以将实测体系与增压流体隔开, 采用乙醇水溶液(体积比 1:1)作为增压流体。用高压手动活塞计量泵调节压力。

(2) 恒温空气浴。在 $-20\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, 控温精度、均匀度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。

(3) 搅拌装置。在高压釜体外有一个永久磁铁环作上下往复运动, 同时在高压釜内有一个磁性感应搅拌子, 可以随着磁铁的运动而对高压釜内气液两相进行充分的搅拌。搅拌速度一般为 15 次/分钟。

(4) 温度和压力测量系统。体系的温度由 Pt100 型精密铂电阻测定, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。体系压力由一个精度为 0.1 级、压力量程为 $0\sim 25\text{MPa}$ 的 HEISE 精密压力表和一个可变量程压力传感变送器共同测定, 测压误差为 $\pm 0.025\text{MPa}$ 。温度和压力由自行设计的计算机数据自动采集系统采集和储存。

反应釜内的参数(压力、温度、容积)、空气浴温度、循环流量及搅拌速度等参数可由计算机数据采集系统自动采集和储存。

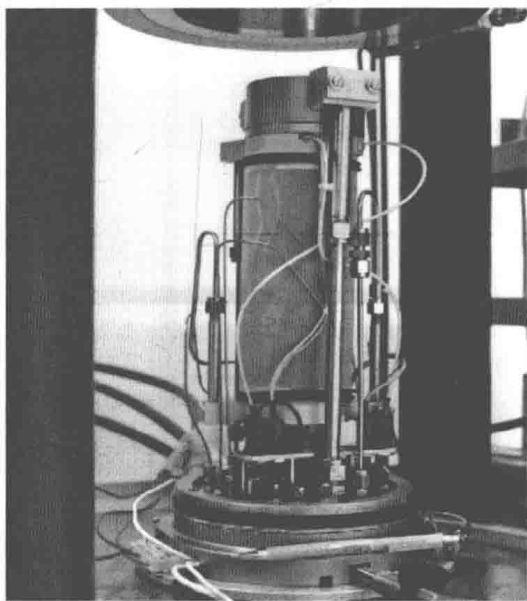


图 1.9 美国地质调查局的天然气水合物及沉积物测试实验装置 GHASTLI

3. 我国天然气水合物仪

以我国海油天然气水合物仪为例, 该天然气水合物仪一般由高压系统、冷却系统和测

试系统三部分组成（图 1.10），根据各自的研究需要加工组合。

- （1）高压系统。由高压釜、搅拌装置、配气瓶和搅拌装置组成。
- （2）冷却系统。由制冷机组、空气恒温箱、防冻液和温度控制系统组成。
- （3）测试系统。这部分是实验室的关键，因为它显示实验测试的结果，主要由压力、温度、光学、声学、电学监测和摄像部分组成。

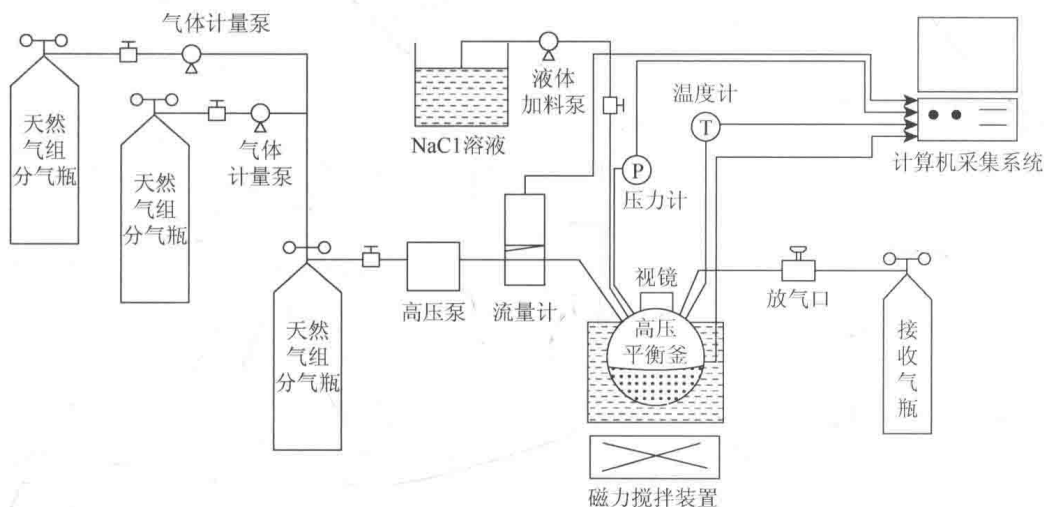


图 1.10 天然气水合物模拟装置图

1) 该装置的主要特点及功能

- （1）设计压力高。设计压力高，使实验系统能够适应深水区域的天然气水合物的研究。
- （2）可视化程度高。不仅可以直接看见高压装置内的相变情况，还能通过光纤在不同部位进行摄像，直接获得实验现象的第一手资料。
- （3）测试手段多。根据水合物沉积层具有高声波速度的特征，采用超声波发射设备随时记录相的变化，判断水合物的形成或分解。

（4）自动化程度高。所有仪表均采用数值显示，并通过计算机软件自动采集。

2) 水合物仪技术指标要求

以青岛海洋地质研究所海洋天然气水合物低温高压实验室为例，技术指标如下：

（1）压力（ p ） $\leq 30\text{MPa}$ 、温度（ T ） $\geq 263\text{K}$ 。主要考虑到我国南海陆坡、台湾岛南部海域和冲绳海槽的水深都小于 3000m；同时也考虑到青藏高原多年冻土区（如羌塘盆地和甜水湾盆地）天然气水合物勘探开发的研究需要以及海水的腐蚀，高压釜采用钛合金 TC4 锻造加工而成。400mL 高压釜釜体开设 2 个管式视镜，便于安装摄像系统和光学检测系统；1000mL 高压釜釜体开设 5 个管式视镜，便于安装摄像和其他检测系统。

（2）记录所有的检测参数，主要参数为压力、温度、光强、声速和电阻。光学检测系统主要用于 400mL 的高压釜，声学 and 电学检测系统用于沉积物实验 1000mL 的高压釜。全部检测数据都进入主控计算机内储存。

（3）可视化高压釜采用光纤自发光摄像系统观测，硬盘录像机可记录所有的影像资料。

（4）安全性好。由于天然气是易燃易爆气体，又在高压状态下，所以设立泄漏、超压