

庞彦明 郭洪岩 杨知盛 罗中华 编译

国外油田 注气开发实例

GUOWAI
YOUTIAN
ZHUQI
KAIFA
SHILI

石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS



国外油田注气开发实例

庞彦明 郭洪岩 杨知盛 罗中华 编译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收集了近年来国外油田注气开发的室内研究和矿场试验的新工艺、新技术和新进展,共24篇。主要包括注气室内实验及机理、数值模拟及设计、注气工艺和矿场试验等。适合从事油田开发的管理人员、工程技术人员、以及大专院校石油工程专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

国外油田注气开发实例/庞彦明等编译.
北京:石油工业出版社,2001.4
ISBN 7-5021-3343-7

I. 国…

II. 庞…

III. 油田注气-油田开发-案例-国外

IV. TE357.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 19488 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)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 411 千字 印 1—1500

2001 年 4 月北京第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3343-7/TE·2504

定价: 30.00 元

序 言

油田的注气开发技术已有一百年的发展历史。在这项技术的发展过程中，从室内实验研究到先导性矿场试验，再到工业性推广等各个阶段都取得巨大的发展；从注气开采机理到动态预测数值模拟，再到注气开采工艺等各个方面也都形成了系统的理论和较完善的技术。世界上已有上千个注气工程，美国的注气采油量占 EOR 总产量的 40%。

与国外相比，中国的注气开发技术起步较晚，发展很慢。1965 年首次在大庆油田开展 CO₂ 驱先导试验，1985 年在华北油田雁翎开展了注氮气现场试验，1998 年在长庆靖安油田开展了注天然气现场试验。

中国西部原油密度小、粘度低、大多数属挥发油，且埋藏深，具有注气混相驱的有利条件，同时西部天然气资源非常丰富，近几年陆续发现了一批大型气田，这为中国西部地区开展注气开采带来很好的前景。

中国东部地区大部分特低渗透油藏，注水开发问题较大，注不进，采不出；注水压力高，套损严重；经济井距下建立不起来有效的驱动压力梯度，单井产量很低；采收率低，效益差。由于特低渗透储层注水的难度，使人们考虑到注气，东部地区虽然天然气资源不很发育，但各油田也加大了天然气的勘探力度，将来用注气开采特低渗透储层也必将有新的展。

本书收集了国外油田近几年开展注气研究与试验的新工艺、新技术和新进展，包括注气室内实验与机理研究、注气方案设计与数值模拟、注气工艺等，以及收录了大量的油田注气实例，愿本书能为从事油田注气开发的工程技术人员提供一点帮助。

编者

2000 年 5 月

目 录

一、注气室内实验及机理

注入剂组分和压力对富集烃气驱的影响·····	(3)
北海水淹油层高压注气的试验和模拟·····	(18)
气体混相驱中产出烃类组分和注入剂再现的定量评价·····	(26)
注气提高石油采收率过程中残余油饱和度的对比和预测·····	(37)
一个多次接触混相油气注入的放大比例研究实例·····	(46)
润湿性对近混相注气提高石油采收率的影响·····	(57)

二、注气数值模拟及设计

对阿曼 SAFAH 油田混相和非混相注气的评价·····	(69)
混相与近混相注气的选择·····	(84)
水驱轻质油油藏注空气的可行性研究·····	(95)
Coyanosa Wolfcamp 油田气体回注方案的组分模拟·····	(109)
在墨西哥湾岸区轻质油油藏中注空气提高采油量的关键·····	(117)
RUTH—挪威提高采收率研究与开发综合方案·····	(131)
预测油田混相水气交替驱动态的新方法·····	(141)
马拉开波湖Ⅲ/Ⅳ断块 Lagunillas 储层的注气数值模拟研究·····	(154)

三、注 气 工 艺

美国阿拉斯加 Kuparuk River 油田同时注水注气先导性试验及对地面 管线的影响·····	(171)
--	-------

四、油田注气矿场试验

通过注气提高石油采收率方法对波及效率的改善·····	(185)
阿曼 SAFAH 油田注气·····	(191)
Dolphin 油田：小型挥发性油藏气体混相驱成功的实例·····	(197)
Prudhoe 湾非常规混相驱提高石油采收率经验·····	(208)
一项开发油环的注气技术·····	(219)
Powder River 盆地油田混相气注入·····	(222)
加拿大 Brazeau River Nisku 油田干气混相驱方案的动态评述·····	(225)
美国加州 Elk Hills 油田压力递减油藏中低压注气提高采收率方法·····	(234)
美国加州注气项目综述·····	(244)

一、注气室内实验及机理

注入剂组分和压力对富集烃气驱的影响

J.J. Shyeh - Yung 等

摘要 本文介绍了实验室三次采油气驱效果和相态研究所研究的烃气注入剂组分和压力对局部驱油效率的影响。在本研究中，由于干气富集，注入剂组分的变化可使液化石油气（LPG）达到 60%。此外，岩心驱替压力也从 3800psi 降到 300psi。多次接触相态试验表明：这些注入剂的范围是由接近一次接触混相，直到与油接近混相。

在研究条件下，气驱残余油饱和度（ S_{om} ）由于压力下降而增加，即注入剂富集量被降低。在低压条件下， S_{om} 对其富集量不如在高压条件下敏感。至于贫注入剂， S_{om} 对其压力不如富注入剂的敏感。同时，岩心驱替石油采收率仍高于水驱残余油为 50% 的（即高于 15% 的原始石油地质储量），即使干气注入剂无任何富集。在较低富集量和/或在较低压力下，通常能够观察到较低的注入剂混相，是由于含气饱和度较低。在油田近混相驱中，在局部驱油效率与气体波及效率之间可以协调。

我们还发现，对所有注入剂和原油混合物来说，都有低界面张力（IFT）存在。平衡 IFT 为 1dyn/cm（达因/厘米），高于一般表面活性剂驱方法所需要的，似乎低到足以有效地驱替石油。提取油轻组分，是采出某些石油的缘故。混相和近混相的残余油，实际上都是不含比 C_{15} 还轻的石油组分。

一、前 言

烃气驱方案往往都离不开将 LPG 与干气（主要是甲烷）流掺混在一起，以获得最佳的注入剂组分。工业上常见的实践是在不低于最小的混相富集（MME）条件下来消耗注入剂组成，并为满足形成多次接触混相所需的不低于最小的混相压力（MMP）条件下来保持压力。这些最小混相条件，一般都是根据细管测试结果或状态方程计算结果来确定的。一种较贫的注入剂——在干气中没有多少 LPG 富集的注入剂，其价钱要比较富的注入剂便宜，这是因为 LPG 通常都要比干气更为值钱。低压处理对降低注入剂花费也是具有潜力的，这是因为注入剂密度较低（一定体积的气体质量并没有多大），而且在低压条件下还可降低气体压缩费用。注气过程所用的注入剂组分比 MME 的要贫（稀释），而所用的压力比 MMP 的要低，因此在本文中称为近混相驱。

以往对 CO_2 混相驱机理的研究表明，混相驱的应用推广，只是在气驱中影响三次采油的某些机理之一。在三次采油的气驱中，活跃水的存在，处于非零 IFT 的气驱油，非常不利的流度比，和岩心中的非均质性，对原油在孔隙内绕流都是起作用的。然而，某些绕流油，可通过提取油组分采出后，就变成流动的气。因此，压力的综合影响，还不如在细管测试中所见到的明显，而在这样情况下，应用推广混相驱都对采收率起着举足轻重的作用，同时水和岩心的非均质性也都不存在。此外，在低压条件下，还降低了 CO_2 的流度，这是因为在低压条件下， S_{om} 较大，所以也就导致了较低的 CO_2 饱和度。

为了检查近混相驱与烃气的潜力，而着手了实验室岩心驱替研究。在岩心驱替研究中，研究了烃注入剂组成，压力和流量等影响。为了确定岩心驱替研究中所采用的几种注入剂与原油之间混相条件，还进行了相态测试。

此研究的目的是有步骤地测得在控制得当的代表实际油藏的条件下，烃气驱局部（波及区）的驱油效率。如果有可能，在已知饱和度条件下，还有确定出气体相对渗透率。进行多次接触测试的目的，是测得平衡相的组成和性质，以提供对岩心驱替效果进行解释所需要的辅助资料。测得的注入剂密度作为预测岩心驱替效率的对比参数。

有些研究人员还曾研究过烃气近混相驱。Burger 等给出了高粘度比二次采油气驱中最佳富集可能低于 MME。Thomas 等报道过，注入剂—油—IFT 在近混相条件下可能有所降低，而零 IFT 对在实际孔隙介质中有效驱替过程，是不需要的。此外，二维模拟研究还证明：注入剂的富集远不如与油一次接触混相所需要的，这种情况由于在非均质油藏模型中大大改善了波及效率，往往就获得最佳的石油采收率。Prieditis 和 Brugman 还给出了 CO_2 驱动态预测，由于采用在油藏条件下的岩心驱替中所测得的气流量，可能大受影响。

二、试 验

曾进行了两种类型的试验，并在本文中进行了描述。一种类型的试验是在相态装置中进行的注入剂—油多项接触测试，另一种类型的试验是在岩心驱装置中进行的油藏条件下的三次采油驱替测试。上述系统在下文中都作了描述。

1. 相态装置和程序

图 1 为装入恒温箱中的相态装置示意图。该装置所包括的几个浮动活塞汽缸，均在高压条件下控制着注入剂—油的混合物。其浮动活塞，通过水泵入或泵出容器（槽）的一端而运动。

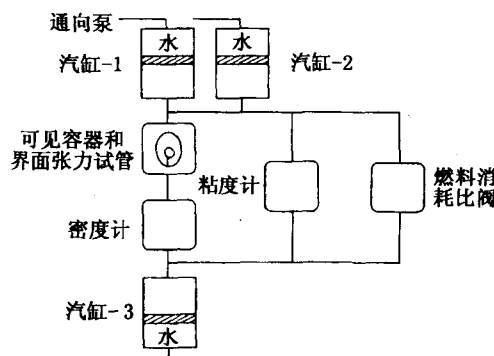


图 1 压力、体积、温度 (PVT) 装置

烃注入剂和油混合物，通过在恒温和恒压条件下使混合物在汽缸 1 和汽缸 2 之间循环往复而保持平衡。蒸汽相上升越过液相，并加速两相混合物平衡。此平衡过程继续到蒸汽相和液相都是均匀的，而且各相的性质又不随时间的推移而改变为止。若平衡完成，则混合物就被推进汽缸 1 中去。

PVT 装置包括几个测量装置。其烃混合物的相，由于水泵入或泵出汽缸 1 和汽缸 3，而穿过测量装置流动。压力是用压力传感器测得的，而温度是用温差电偶测得的。相体积都是通过将烃混合物推进汽缸 3 中去测得的。然后，将混合物通过可视容器（槽）从汽缸 3 推进到汽缸 1 中去。蒸汽相的体积是根据蒸汽—液体界面穿过可视容器（槽）时，从汽缸 1 顶部所排驱出来的水的体积算得的。液相的体积，是通过差求得的。这两相的体积，都务必加以调整，以求得各相滞留在管子、阀门和测量装置中的体积。密度是用摆动管式密度计测得的。相粘度是通过各相流经小型—ID 管子，所测得的压降而测得的。相组成是通过将各相以少量直接注入到超临界流体色谱仪 (SFC) 测得的。注入所使用的是高压、高温阀。饱

和压力是通过在高压下即是以只存在一相随后使压力缓慢下降从而使混合物保持平衡测得的。其饱和压力也就等于在可见容器（槽）中可观察得到的初始饱和压力或压降条件下的压力。

两相混合物的 IFT 是通过首先将可视容器（槽）灌满液体测得的。继而，将整个流体混合物，从汽缸 1 通过粘度计推进到汽缸 2 中去，从而使蒸汽相处于汽缸 3 的顶部。然后，再将汽缸 3 中的蒸汽相，以低的流动速度，向上推进，穿过小型-ID 管子（0.005in 或 0.01in），其末端在可视容器（槽）中是可见得到的。当流量足够低时，其蒸汽相可从管子中的不连续泡沫呈现出来。如果应用此装置，每个单位时间内通过管子的泡沫的数量就可求得，而 IFT 可通过悬浮液滴法估算出来。

2. 岩心驱替装置

图 2 为岩心驱替装置的简易流程图。脉冲自由活塞驱替泵以恒定流量将预定的流体输送到传输槽以外。取自圣安德烈斯组的露头岩心，都是环氧树脂涂层和浇注起来的，在高压岩心夹持器内侧，采用的是低熔点铅—铋合金。压力控制是通过往复（振动）回压调节器来完成。从岩心流出来的油、水和气等流出物，都是按规定的程序穿过多谱振荡器开关阀，同时在实验室计算机控制下进入试管。从油和水分离出来的采出的气体体积，是用自动化气体流量计测得的。图 2 所示出的加在回压调节器前面的设备，都要在恒温空气浴中加热或封闭。在每个系列驱替测试过程中，装置温度、装置压力、总压降和平均岩心（2in 排出孔）压降都是通过计算机在数字数据记录器上进行监测。

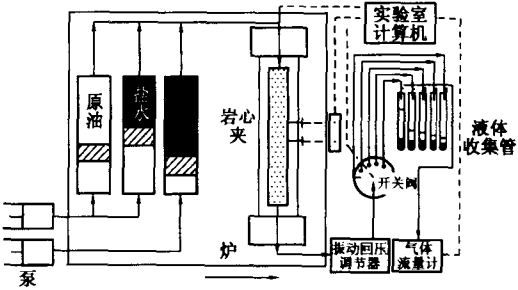


图 2 储层条件岩心驱替装置

3. 流 体

用于本研究的混合含气原油，是通过把合成溶解气在气油比为 147cm³/cm³ 标准条件下添加到取自油田的商品油样而配制的。脱气原油、溶解气、混合含气原油和从混合原油中在室内条件下闪蒸出来液体和蒸汽等组分均在表 1 中列出。这些岩心流动试验中所用的盐水，都是含 7.3% 总矿化度（重量）的合成盐水。脱气商品原油，被用来将盐水从岩心中驱替出来，以获得在实验室试验条件下的束缚水饱和度。然后，再用混合含气原油将脱气原油置换出来。

表 1 原油组分

组 分	完全分离的油 mol, %	溶解气 mol, %	混合的含气原油 mol, %	分离的液体 mol, %	分离的气体 mol, %
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
N ₂	0.00	3.16	1.38	0.00	2.32
C ₁	0.00	48.89	27.63	0.23	46.53
C ₂	0.00	20.40	13.43	0.55	22.27
C ₃	0.00	12.43	7.93	0.92	12.74
i-C ₄	0.00	2.71	1.56	0.51	2.26
n-C ₄	2.37	6.70	4.00	1.59	5.56
i-C ₅	1.5	3.06	1.63	1.72	1.57

续表

组 分	完全分离的油 mol, %	溶解气 mol, %	混合的含气原油 mol, %	分离的液体 mol, %	分离的气体 mol, %
n-C ₅	2.29	2.65	2.34	3.08	1.83
C ₆	4.96		2.26	3.96	1.1
C ₇	10.39		4.99	9.89	1.63
C ₈	11.56		5.49	11.66	1.26
C ₉	8.61		3.88	8.78	0.52
C ₁₀	8.08		3.5	8.23	0.25
C ₁₁	5.58		2.34	5.64	0.07
C ₁₂	4.62		1.89	4.64	0.00
C ₁₃	4.68		1.91	4.68	0.00
C ₁₄	3.87		1.59	3.9	0.00
C ₁₅	3.5		1.46	3.59	
C ₁₆	2.61		1.05	2.57	
C ₁₇	2.44		0.97	2.38	
C ₁₈	2.33		0.96	2.35	
C ₁₉	2.17		0.88	2.15	
C ₂₀	1.77		0.66	1.62	
C ₂₁	1.53		0.59	1.45	
C ₂₂	1.33		0.54	1.32	
C ₂₃	1.22		0.48	1.18	
C ₂₄	1.07		0.42	1.02	
C ₂₅	1.04		0.42	1.02	
C ₂₆	0.85		0.33	0.81	
C ₂₇	0.91		0.35	0.85	
C ₂₈	0.78		0.29	0.72	
C ₂₉	0.68		0.25	0.61	
C ₃₀₊	6.46		2.6	6.83	
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99

用于这些气驱的注入剂，都是由甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷和少量的氮所组成的高压烃气。为了方便起见，这些注入剂分别标出 LPG 为 60%、40%、20% 和 0%。实际组成都是用气相色谱法 (GC) 测得的，而且有些可能与典型的 LPG 和干气的混合物不一致。例如，标明为 0% LPG 的注入剂为纯甲烷，而不是 94% 的甲烷，这种情况就是典型的干气组成。在表 2 中所列出的是注入剂组成（以摩尔分数表示）及其性质。

表2 烃注入剂组分和性质

组 分	60%液化石油气		40%液化石油气		20%液化石油气		0%液化石油气	
甲烷	0.378		0.506		0.768		1.000	
乙烷	0.457		0.432		0.176		0	
丙烷	0.098		0.033		0.010		0	
丁烷	0.054		0.011		0.006		0	
戊烷	0.000		0.000		0.003		0	
氮气	0.013		0.018		0.037		0	
压力 psi	μ cP	ρ cm ³	μ cP	ρ cm ³	μ cP	ρ cm ³	μ cP	ρ cm ³
3800	0.037	0.300	0.029	0.243	0.023	0.183	0.020	0.142
3500	0.034	0.288	0.027	0.230	0.022	0.171	0.019	0.126
3000	0.030	0.263	0.024	0.205	0.020	0.150	0.018	0.115

4. 岩 心

在大多数岩心驱替试验中所采用的是,通过在原油中浸泡的混合润湿处理而成的圣安德烈斯—露头碳酸盐岩岩心。其岩心的大小为1in×1in×18in。对盐水的绝对渗透率为 $120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙度为21.8%。此岩心的总孔隙体积为 68.7cm^3 ,束缚水饱和度约为30%。为了排除岩心可变性影响,并允许对岩心驱替结果进行直接比较,以确定对试验变量的敏感性,此岩心几乎适合于所有的岩心驱替。

第二块圣安德烈斯露头岩心,其大小与上述第一块的一样,被用于所完成的两个试验,以研究岩心方位的影响。第二块岩心与第一块岩心都是从同一露头区块截取下来的。第二块岩心对盐水的绝对渗透率为($160 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),孔隙度为20.6%,以及束缚水饱和度约为30%。

5. 岩心驱替程序

在岩心中所进行的驱替试验,目的是模拟根据推测在油藏中所出现的事件。反复驱替值得注意的是要保持束缚水饱和度(S_{wir})和水驱残余油饱和度(S_{orw})。表3列出的是典型的驱替程序、流动速度和注入剂的用量。

表3 标准驱替程序

1	计量进入抽空清洁岩心的盐水	-150ft/d	1.5 孔隙体积
2	脱气原油冲洗和再循环,然后浸泡	-100ft/d	2~10 孔隙体积
3	含气油驱替脱气原油	-2ft/d	2 孔隙体积
4	用油田盐水向上水驱	-4ft/d	3 孔隙体积
5	向下气驱 1PVI气之后,双倍流速	-2ft/d -4ft/d	1 孔隙体积 5 孔隙体积
6	降低至大气压		
7	清洗岩心,以便测量最终含量	-100ft/d	10 孔隙体积

在原始含盐水饱和度步骤以后,岩心中的盐水在高流动速度(高流量)和室内温度下,

为脱气原油所取代。脱气原油，在室内温度下，在岩心中连续不断地循环，直至含盐水饱和度降低，接近其目的层束缚水饱和度为止。这一过程通常要花费 2~3 天时间才能完成。然后接通烘箱，并在 200°F 下循环继续到下一天，以使目的层的束缚水饱和度达到大约 30%。接下来，将岩心在 200°F 下关闭，需等待几天时间。在这些油驱和循环步骤结束时，岩心才会被恢复到混合—润湿状态。在束缚水条件下的石油渗透率就是在此状态下测得的，而且与步骤 3 所测得的一致。

在原油浸泡期之后，岩心中的脱气原油，在所预期的试验压下，慢慢为含气原油所取代（步骤 3），并且定期关闭。在每次关闭期以后监测岩心流出物气油比（GOR），以确保脱气原油从岩心中完全流出。含气原油取代脱气原油，直到所测得的流出物 GOR 与注入剂的 GOR 匹配为止，以及直到同样的 GOR 在关闭前后为止。在束缚水条件下的石油渗透率，是用含气原油重新测得的。岩心准备步骤 1，2 和 3（表 3）通常都需要花费大约两周时间。

在水驱和气驱中所采用的都是实际油藏的流量。这些驱替都是垂直进行的，以使重力上窜影响降低到最小程度。将采出的油和水的体积记录下来，以确定平均油和水饱和度，随所注入的孔隙体积（PVI）的变化而变化。在 1 个 PVI 后，气驱流量翻了一翻。在 6 个 PVI 气体后，每次气驱的端点流度都是根据压降计算出来的。通常，水驱需要 1 天时间，而气驱则需要 4 天时间。

在每次气驱过程中，都要取得 10~15 个采出的油样。油组成都是通过全油—GC 分析方法—利用毛细管柱所进行的指纹对比，定性分析方法进行分析的。从某些气驱所采出的气组成，是利用人造岩心（填充毛细管柱）通过在线 GC 进行分析的。

气驱完成后，将岩心降压或吹排，并履行清洗程序（步骤 6 和 7）。这些步骤所需时间约为 1 周。岩心经过用大量温热的三氯乙烷（甲基氯仿）溶剂冲洗和减压后，再用氮吹洗，并通夜抽空。来自岩心的洗涤物，含有三氯乙烷，原油和少量水，并在室内温度下，由于连续的氮气流吹洗而蒸发，直到所剩下的含油体积保持不变为止。最终的残余油饱和度，是根据该体积经蒸发后而确定的。该岩心还可准备在此条件下在另一项试验中利用。经过清洗后，岩心可用盐水重新饱和，并对其盐水渗透率进行检查。其清洗程序要反复进行，即使盐水绝对渗透率比以前的值明显偏高。

三、效果和讨论

在本节中，介绍并讨论了三次多项接触相态试验和 20 次岩心试验的效果。对温度为 200°F，压力为 3800psi 条件下的 0%，40% 和 60% LPG 注入剂—油混合物，和一个岩心驱替压力，进行了三次多次接触试验。在岩心驱方案中所试验的变量包括注入剂组成，压力，流量和岩心方位。有 4 种不同的烃注入剂组成为在干气中约为 60%，40%，20% 和 0% LPG 的混合物。每种注入剂组成所采用的 3~4 种不同压力，介于 3000~3800psi。三种不同的流量（为重力稳定临界流量的 0.1~9.2 倍），被用来研究重力对其效果的影响。所进行的一个水平驱替，以进一步证实重力的影响。利用高压氮进行两个非混相三次采油气驱所得出的结果也进行了介绍。

1. 相态试验

图 3 给出了在油藏压力（3800psi）和温度（200°F）下两个拟三元相图。较大的相图，系指油和 0% LPG 注入剂的混合物，而较小的相图，是指油和 40% LPG 注入剂的混合物。

对 0% LPG 注入剂和油混合物的相图，是在试验中通过构成三个正向间歇接触确定下来的。正向间歇接触大体上所模拟出的流体在驱替中的状况，也正是快速流动的蒸汽相与油藏中顺流油流接触时。首次接触的构成，是因为油与足够 0% LPG 注入剂混合原因，以致形成了两相。首次接触的蒸汽和液相的组成，如图 3 所示，并与系线相连，用“1”标明。第二次接触（“2”）是通过第一次接触的蒸汽相与新鲜油接触构成的，而第三次接触（“3”），是通过第二次接触的蒸汽相与新鲜油接触构成的。如果构成了更多正向接触，形成的蒸汽相和液相，就会继续发生变化，直到含有这两相的系线延伸到油组成点为止。因为蒸汽相和液相的组成，在这条极限系线达到前，不可能聚合，所以 0% LPG 注入剂很可能并不是与油构成的多次接触混相。这个结构可用状态方程计算证明。

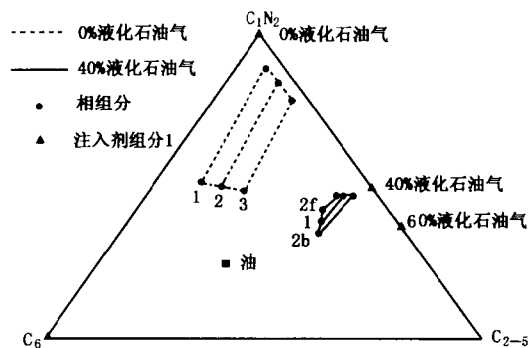


图 3 3800psi 和 200°F 时的拟三元相图
(示出了油与含 0% 和 40% 液化石油气注入剂
多次接触混合物的气相和液相组分)

对 40% LPG 注入剂与油混合物的相图，是在试验中通过所形成的初次接触（图 3 中标明“1”），一次辅助正向接触（“2f”）和一次辅助反向接触（“2b”）而确定下来的。反向接触由上次接触的液相与新鲜注入剂相混合组成的。从图 3 可以看出，液相和蒸汽相的组成都是沿正向接触方向汇聚的。因此，40% LPG 注入剂很可能就是多次接触与油混相的。

而且对油与 60% LPG 注入剂的混合物还进行了试验。对此混合物在 200°F 下的最大饱和压力和压力为 4150psi，且在注入剂—油之比为 9 时才出现。当该混合物的压力达到 3800psi 时，所以可测得液相的组成，是因为该组成在其蒸汽相仍然呈现雾状。因为油藏压力仅仅略低于其最大饱和压力，所以 60% LPG 注入剂几乎是与油构成的一次接触混相。

对油与 20% LPG 注入剂的混合物来进行试验。然而，状态方程计算结果表明，20% LPG 注入剂并不是与油的多次接触混相。

2. 表面张力

图 4 示出在 3800psi 和 200°F 时油与 0% 和 40% LPG 注入剂混合物所测得的 IFT。图 4 中的 6 个实点中的每 1 个都与图 3 中的系线相对应。IFT 与相密度差，随系线长度缩短而缩小。此外在图 4 中所包括的是取自某文献中一些烃和氮的 IFT 数据。油与 60% LPG 注入剂混合物的 IFT 太低（<0.01dyn/cm）而用仪器无法测得。通常，对烃混合物来说，所得出的结果都与文献中的数据十分一致。

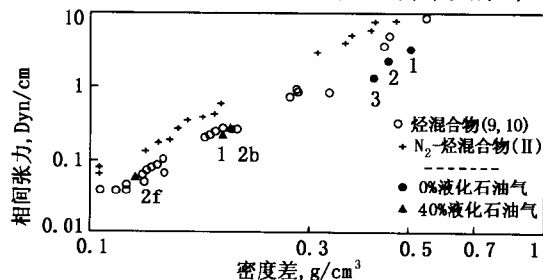


图 4 实测的油和注入（含 0% 和 40% 液化石油气）的多次接触混合物相间张力与其他相间张力对比

混合物的 IFT 太低（<0.01dyn/cm）而用仪器无法测得。通常，对烃混合物来说，所得出的结果都与文献中的数据十分一致。

对 0% LPG 注入剂与油的第三次正向接触来说，其 IFT 约为 1dyn/cm。40% LPG 注入剂与油混合物的 IFT（0.06~0.3dyn/cm）低于 0% LPG 注入剂混合物的 IFT，因此，用 40% LPG 注入剂驱替石油，要比用 0% LPG 注入剂有效得多。

3. 对岩心驱 S_{orm} 的测定

在本文中，在气驱残余油饱和度条件下，

混相残余油饱和度 (S_{orm}) 是可交替采用的, 而即使有些气驱明显是不混相的。 S_{orm} 可通过下述两种单独的方法确定之:

- (1) 在岩心降压和清洗过程中来确定采出残余油体积;
- (2) 估算出岩心内外的油体积 (即利用物质平衡方法)。

我们已经有选择地报导了根据岩心降压和清洗所测得的脱气含油饱和度作为最终 S_{orm} 。进行此选择有两条理由: 第一, 我们认为, 气驱残余油是脱气的, 这在下述段落中进行了讨论; 第二, 这是一个最直接的测定, 而且不太可能受物质平衡或试验误差的影响。在 1PVI 条件下剩余油饱和度 (S_0), 是通过在 1PVI 后, 将采出的油量添加到最终的 S_{orm} 中去而计算出来的。对油藏条件岩心驱替来说, 物质平衡所截流的脱气原油大约为 95% ~ 105%。对油藏条件的气驱来说, 所报道的 S_{orm} 值的最大误差, 估计约为 $\pm 2\%$ PV。

在压降期间测得的气组成表明, 经过泄压的气主要是由注入剂及少量溶解气所组成的。例如, 在 6PVI 甲烷后, 从岩心中所采出的经过泄压的气, 就是由 99% 以上的甲烷所组成的。从这种经过泄压的气组成来看, 可以估计出, 在每 1cm^3 甲烷岩心驱残余油中就残存着 10cm^3 溶解气, 这与原始含气原油的 $158\text{cm}^3/\text{cm}^3$ (在室内条件进行水驱期间所测得的) 是一致的。此外, 仅存在溶解气中的戊烷, 在经过泄压的气中并未测得。我们得出的结论是: 注入剂所脱出的轻质组分, 曾导致气驱残余油, 在 6PVI 气后, 实际上脱去了溶解气组分和中间油组分。实际上, 对气驱残余的 GC 指纹分析表明, 这种情况比原始地面脱气原油要重得多。因此, 石油体积系数曾一直在确定 S_{orm} 中被采用。

4. 注入剂组成对 S_{orm} 的影响

表 4 至表 7 给出了注入剂组成和压力对岩心驱替动态的影响。我们观察出, 在恒压下 S_{orm} 随注入剂富集量增加而成线性递减。

表 4 含 60% 液化石油气注入剂的岩心驱替

压力 psi	油 驱	水 驱	气 驱			
	残余水饱和度	剩余油饱和度 3PVI	油饱和度和 1PVI	剩余油饱和度和 6PVI	水饱和度和 6PVI	流度 (ft/d)/(psi/ft)
3800	0.361	0.261	0.025	0.018	0.512	6.4
3500	0.336	0.278	0.061	0.054	0.523	3.4
3300	0.242	0.353	0.079	0.071	0.412	5.1
3000	0.291	0.308	0.095	0.080	0.048	5.4

表 5 含 40% 液化石油气注入剂的岩心驱替

压力 psi	油 驱	水 驱	气 驱			
	残余水饱和度	剩余油饱和度 3PVI	油饱和度和 1PVI	剩余油饱和度和 6PVI	水饱和度和 6PVI	流度 (ft/d)/(psi/ft)
3800 ^①	0.310	0.288	0.065	0.056	0.427	8.7
3800	0.312	0.308	0.062	0.050	0.494	7.1
3500	0.338	0.292	0.108	0.089	0.506	5.0
3000	0.326	0.277	0.102	0.079	0.519	2.1

①与 2 号岩心水平连通。

表 6 含 20%液化石油气注入剂的岩心驱替

压力 psi	油 驱	水 驱	气 驱			
	残余水饱和度	剩余油饱和度 3PVI	油饱和度和 1PVI	剩余油饱和度和 6PVI	水饱和度和 6PVI	流量 (ft/d)/(psi/ft)
3800	0.312	0.295	0.113	0.087	0.518	5.1
3500	0.344	0.269	0.11	0.089	0.559	2.0
3000	0.320	0.293	0.126	0.106	0.485	5.5

表 7 不含液化石油气注入剂的岩心驱替

压力 psi	油 驱	水 驱	气 驱			
	残余水饱和度	剩余油饱和度 3PVI	油饱和度和 1PVI	剩余油饱和度和 6PVI	水饱和度和 6PVI	流量 (ft/d)/(psi/ft)
3800 ^①	0.338	0.233	0.105	0.084	0.552	5.4
3800	0.322	0.298	0.133	0.112	0.499	4.1
3500	0.322	0.316	0.132	0.114	0.505	3.7
3000	0.301	0.347	0.116	0.109	0.485	3.5
2000	0.31	0.288	0.229	0.224	0.384	4.0

①与 2 号岩心水平连通。

在图 5 和图 6 中, 分别示出 3800psi 和 3000psi 在 PVI 下注入剂富集是对 S_{orm} 的影响。而且图 5 和图 6 中所示出的, 是在 1PVI 下气驱剩余脱气原油饱和度。气驱残余油饱和度(即石油采收率), 看起来在 3800psi 的高压下比在 3000psi 的低压下, 对其富集量更为敏感。在低富集量条件下, 烃气通过三次采油岩心驱替所获得的石油采收率仍然是相当高的。如果没有任何富集时, 干气也极为有效。其水驱残余油的石油采收率为 58%~64%。

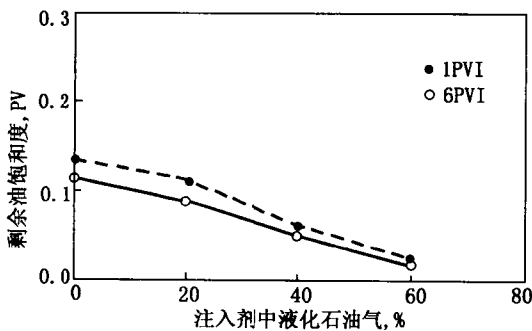


图 5 在 3800psi 时, 注入剂组分和气驱 PVI 对残余油饱和度的影响

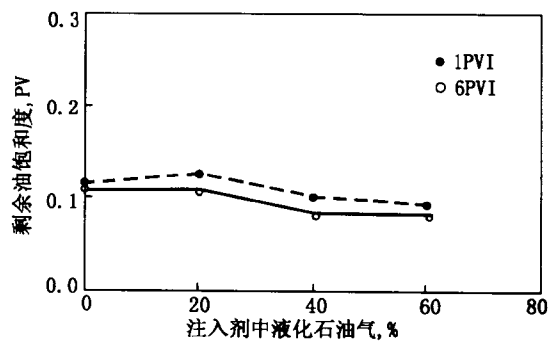


图 6 在 3000psi 时, 注入剂组分和气驱 PVI 对残余油饱和度的影响

在图 7 和图 8 中所示出的是, 在这些油藏条件气驱中所测得的标准流体产出量的两个实例。图 7 示出, 在 3800psi 下使用 60% LPG 注入剂实施气驱的流体产出量。石油是靠注入剂流动的, 并形成了一条大的集油带。图 8 示出, 在 3800psi 下, 实施 0% LPG 驱的流体产出量数据。在这个干(贫)注入剂流动试验中, 其集油带的大小, 比其富注入剂情况的小得多。有更多的油为驱替前缘所绕流, 而且有些被绕流的油是在气窜后采出的。对所实施的各

个气驱井，虽然总的三次采油量大部分在首次注气的孔隙体积范围内达到了，但晚些时候（气窜后）采出的滞留油量，其干注入剂的比富注入剂的要大。

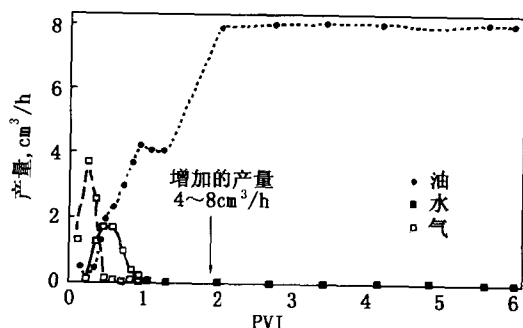


图7 在3800psi时，使用含60%液化石油气注入剂三次注气的产液量

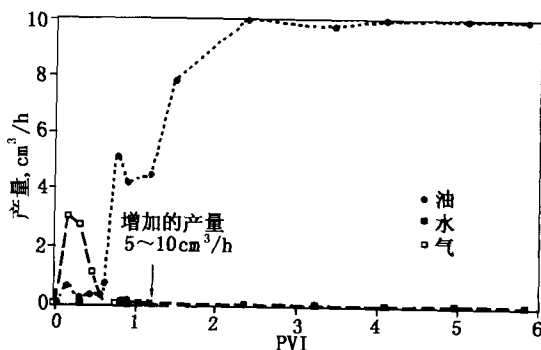


图8 在3800psi时，使用无液化石油气注入剂三次注气的产液量

四、压力对 S_{orm} 的影响

仅在大于800psi的范围，即3000~3800psi下，对压力的影响进行了研究。若油田上出现压力变化大的现象，其压力的影响可能就是至关重要的问题。

图9、图10和图11示出使用不同注入剂情况下压力对 S_{orm} 的影响。使用60%LPG（图9）和40%LPG时， S_{orm} 随压力增大而递减。使用干注入剂，20%LPG（图10）和0%LPG（图11）情况下，即使在3000~3800psi的压力下， S_{orm} 几乎也不会受到影响。对压力的依存关系，看来在更多的混相条件下，使用60%LPG注入剂，比使用干注入剂更强些。在2000psi下，完成了一个辅助性的，即0%LPG岩心驱。一个更高的 S_{orm} 是实施这种低压甲烷驱测得的，并且在6PVI低压甲烷后，气驱残余油仍然滞留了更多的溶解气。此外，在2000psi下甲烷驱过程中并未观察到集油带。上述三个图均表明，在2000psi下使用0%LPG注入剂，其驱替都是非混相的。

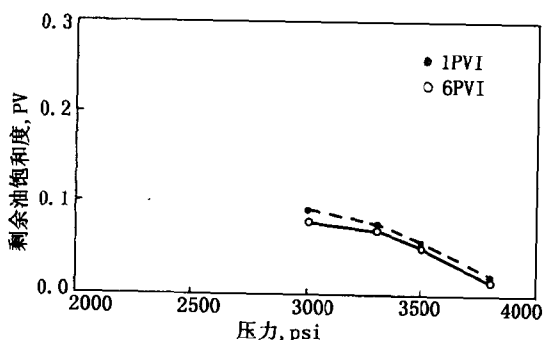


图9 使用60%液化石油气注入剂，气驱压力和PVI对残余油饱和度的影响

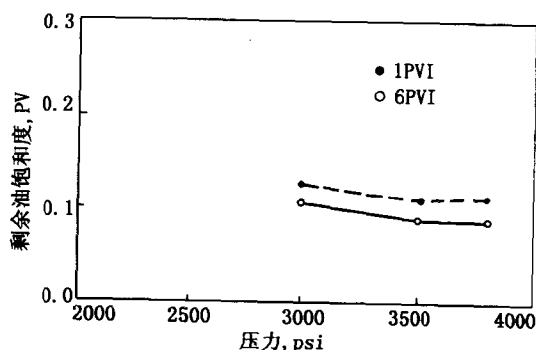


图10 使用20%液化石油气注入剂，气驱压力和PVI对残余油饱和度的影响

1. 注入剂密度对 S_{orm} 的影响

图12示出了注入剂组成和压力对气驱残余油饱和度的综合影响。其结果表明，有更多的油都可以在高压下用富注入剂采出来。然而，使用干注入剂所获得的石油采收率，即在低