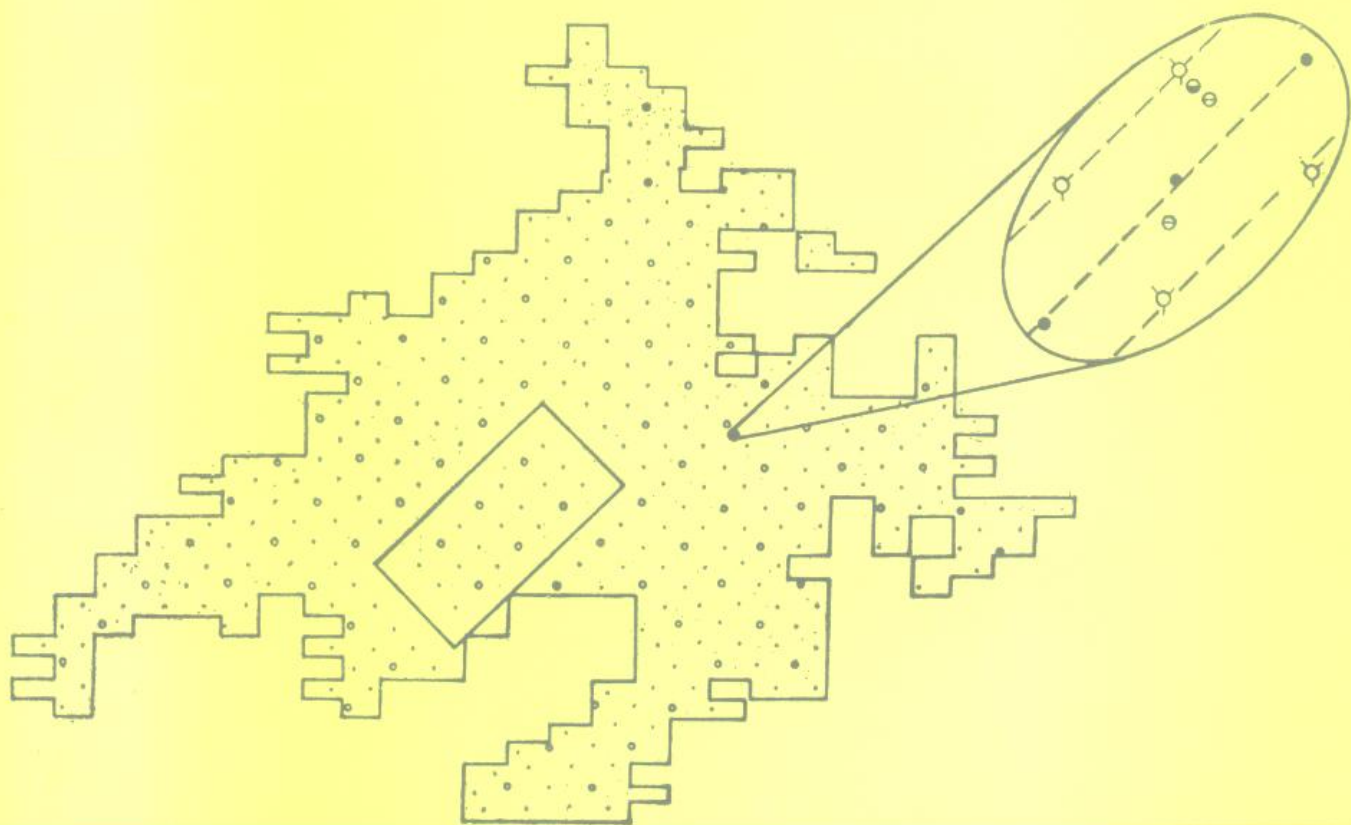


# 油田注气开采技术

主编 高振环 刘中春 杜兴家

主审 陈静惠



北京)

/

上

石油工业出版社

121047  
TE 341  
004

# 油田注气开采技术

主编 高振环 刘中春 杜兴家  
主审 陈静惠



石油0111443



石油工业出版社

(京)新登字 082 号

### 内 容 提 要

本书以国内外油气田开采经验为基础,集理论与应用于一体,系统而全面地介绍了注气提高原油采收率的机理和方法。

本书由两部分组成,第一部分是注气开采的基本原理,详细介绍了各种注入气的性质及典型室内实验方法;探讨了各种驱油机理及适于注气开采的地质条件;并参阅国外最新资料,在注气油藏数值模拟方面有了较新的突破。第二部分为注气开采工艺,这部分系统地介绍了气的来源、工艺流程及设计、注气监测技术,并对国内外注气施工中出现的問題进行了详细分析,提出了相应的解决措施,最后介绍了工程中的主要设备——压缩机的选择依据。

本书可供从事油气田开发的技术领导、现场工程技术人员及有关研究人员作为参考用书,亦可作为石油高校有关专业师生的学习参考。

DP47/17

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

油田注气开采技术/高振环等主编. -北京:石油工业出版社, 1994. 3

ISBN 7-5021-1185-9

I. 油...

II. 高...

III. ①石油开采-油田注气②油田开发-油田注气

IV. TE34TE. 357. 7

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

大庆石油学院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开 20 $\frac{3}{4}$ 印张 518 千字 印 1—2,000

1994 年 3 月北京第 1 版 1994 年 3 月北京第 1 次印刷

定价: 18.80 元

## 序 言

注气开采技术始于本世纪初,美国首先提出并开始了室内研究。经过近一个世纪的发展,许多国家在大量室内试验研究的基础上,已先后进行了现场的工业性试验,并取得了相当辉煌的收效。我国这方面起步较晚,在本世纪60年代中期,首次在大庆油田开始CO<sub>2</sub>驱室内研究和大规模的矿场试验,后来胜利油田等也做了一些室内研究工作。由于缺乏近期和长远规划,中间几经中断,且缺少专门人员及有关设备,使得这方面的研究一直落后于其它国家。大量研究工作已经证明,对于水驱效果不好的低渗透油层,气驱效果却是可观的。我国有一定数量的低渗透性油层、小油体、小断块油藏,在等待着应用注气开发技术获得更多的原油产量。

目前,国内的石油老前辈和专家们,根据我国石油工业发展的需要,提出在“九五”期间开展气驱的建议,这对于我国油田开发迈向新的台阶有着极为重要的意义。鉴于这种前提,我们编写了这本书。目的在于,把国外室内研究、工程技术应用最新成果,概括性、有重点地予以系统地分析介绍,同时收集大量基础数据及基本研究方法,作为我国油田注气开发技术研究和应用的借鉴。

本书共分两部分,第一部分为注气开采的基本原理,为能更好地分析驱油机理及进行动态预测,这里首先介绍了基本的相态及相平衡计算;第三章从详细介绍各种注入气的性质开始,探讨了注气驱油机理、混相条件的预测及影响因素,同时给出大量的基础数据;第四章,以国外大量的矿场试验为基础,分析了注气的物理—地质因素,并提出了初步的适宜范围;为了确定流体的性质、气驱的相特征及驱油效果,第五章介绍了典型的室内试验方法,包括试验设备、试验注意事项及结果解释;第六章,注气开采能否获利,关键问题之一是动态预测的准确性,本章首先概括地论述了现代数学模型的优点和限制,并参阅国外最新资料,对模拟过程提出一些突破性的见解。

第二部分是注气开采工艺,此部分中首先对注入气的来源问题作了专门的讨论;第八章介绍了注入工艺流程及其设计的基本理论;第九章总结国外现场施工经验,详细分析了施工中出现的腐蚀、沥青沉淀等问题的原因,提出了相应的解决措施;第十章为及时掌握注气开采的动态,介绍了国外注气监测技术;第十一章,探讨了注气工程中主要设备——压缩机的选择依据,为工程应用提供了方便。

本书以理论与实践结合为基本指导原则,即包括注气研究中所必需的基础理论,又论述了实践应用中所必备的知识,同时提供了国外新工艺、新技术及大量基础数据及基本研究方法。本书如能成为从事油田注气开发人员的帮手,将是我们的最大心愿。

编 者

1993年12月

# 目 录

## 第一部分 注气开采基本原理

<b>第一章 注气开采的发展史</b> .....	1
§ 1.1 早期注气工程 .....	1
§ 1.2 初接触混相驱注气工程 .....	3
§ 1.3 多次接触混相驱替 .....	4
§ 1.4 二氧化碳驱的兴起 .....	16
§ 1.5 氮气、烟道气注气工程.....	17
§ 1.6 我国油气田应用注气技术的展望.....	18
<b>第二章 相态描述及相平衡计算</b> .....	23
§ 2.1 单组分相态.....	23
§ 2.2 混合物的相态.....	25
§ 2.3 三元相图.....	28
§ 2.4 相平衡的定量计算.....	31
<b>第三章 注气开采机理</b> .....	40
§ 3.1 注入气的物理性质.....	40
§ 3.2 烃类气驱开采机理.....	61
§ 3.3 二氧化碳驱油机理.....	73
§ 3.4 氮气、烟道气驱油机理.....	85
§ 3.5 混相压力的影响因素分析及其预测方法.....	89
<b>第四章 注气开采的物理—地质因素</b> .....	104
§ 4.1 油层及原油性质 .....	104
§ 4.2 构造条件 .....	107
§ 4.3 天然裂缝油藏实施 CO <sub>2</sub> 三次驱油先导性试验分析 .....	109
<b>第五章 典型的室内试验</b> .....	117
§ 5.1 MMP 的测定方法 .....	117
§ 5.2 确定相态、流体性质的实验方法 .....	126
§ 5.3 岩心驱替试验 .....	137
<b>第六章 注气工程动态预测</b> .....	140
§ 6.1 油藏模拟方法 .....	140
§ 6.2 凝析或汽化气驱混相过程中体积变化的影响 .....	147
§ 6.3 径向系统中三组分、两相流动理论 .....	169
§ 6.4 考虑冲击干扰的影响时最佳溶剂段塞的确定 .....	176

## 第二部分 注气开采工艺

<b>第七章 注入气的来源及净化处理</b> .....	200
------------------------------	-----

§ 7.1	烃溶剂的来源 .....	200
§ 7.2	烟道气的产生 .....	203
§ 7.3	氮气的制造 .....	204
§ 7.4	二氧化碳的来源 .....	205
<b>第八章</b>	<b>注气工艺流程</b> .....	<b>213</b>
§ 8.1	流体流动和管路 .....	213
§ 8.2	烃溶剂混相驱油田设施设计 .....	227
§ 8.3	二氧化碳混相驱的注入设施设计 .....	230
§ 8.4	注水和注 CO <sub>2</sub> 井的完井设计 .....	239
<b>第九章</b>	<b>注气开采技术措施</b> .....	<b>247</b>
§ 9.1	防腐工艺措施 .....	247
§ 9.2	二氧化碳驱油中垢的形成及预防 .....	252
§ 9.3	水化物形成及预防措施 .....	254
§ 9.4	混相驱中沥青质和石蜡的沉淀与沉积 .....	274
§ 9.5	混相驱中的调剖措施 .....	277
<b>第十章</b>	<b>混相驱的监测技术</b> .....	<b>279</b>
§ 10.1	综合监测技术 .....	279
§ 10.2	监测技术的应用 .....	282
§ 10.3	测定注入气在套管外位置的方法 .....	289
<b>第十一章</b>	<b>压缩机</b> .....	<b>294</b>
§ 11.1	往复压缩机 .....	296
§ 11.2	离心压缩机 .....	308

# 第一部分 注气开采基本原理

## 第一章 注气开采的发展史

### § 1.1 早期注气工程

回注天然气是最早提出的改善石油开采的方法。据文献记载,早在1900年以前,就已开始用注气来保持地层压力了。但是,由于当时技术水平有限,气体压缩困难,加之广泛采用注水方法比较可行且成本又低,所以,主要保持地层压力的方法仍为注水。但对于那些水敏地层及储层性质差、非均质性严重,水驱效率低、原油储量开采又极不均衡的地层,用水作为驱替介质会产生许多不良后果,这就促使人们利用天然气来代替水。自从注气这一方法问世以来,付诸生产实际的注气工程数以百计,逐一介绍是不可能的,这里只选择一个现场效果较好并有分析价值的例子作简要介绍。

前苏联的皮特柯夫油气田,注气初期采用注天然气保持地层压力取得了很好的效果。该油气田位于乌克兰喀尔巴阡山东南部的喀尔巴阡山褶皱块交接部,处于前喀尔巴阡山区拗陷的内带。地质剖面由上白垩统、古新统、始新统、渐新统和中新统地层所组成(如图1-1所示)。

该油藏的深部褶皱构造曼尼利特组的生产层由砂岩、泥岩、粉砂岩互层组成,其中以粉砂岩和泥岩为主。生产层总厚度为140~325m,平均厚度为250m,平均有效厚度28m。含油夹层数有的可达20层。油层为砂层,厚度为0.5~20m。油层连通孔隙度为7%~13.5%,平均为10.2%。中曼尼利特亚组渗透率为 $0.001\sim 0.007\mu\text{m}^2$ ,下曼尼利特亚组渗透率为 $0.001\sim 0.07\mu\text{m}^2$ 。

曼尼利特生产层原油为低硫、高胶质、高蜡原油。按化学成分划分,属于环烷原油。在地层条件下,原油运动粘滞系数为 $1.96\times 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$ 。地面原油的平均相对密度为0.867。

该油藏于1951年进行试采,1957年投入工业开发。工艺方案规定:油藏以溶解气驱开发,按三角井网钻井,井距600m。在开发期间,井数有所增加,图1-2为主要开发指标的变化图。从图中可看出,地层压力随时间明显下降。为了证明保持地层压力的可能性,1958~1971年期间进行了试注水。但是,由于注水井吸水量低(在井口压力15.0~17.0MPa下为 $10\sim 40\text{m}^3/\text{d}$ ),油藏在这一开发阶段只好放弃注水。试注气是在1962~1963年间进行的,1964年即已开始了工业性注气。对于此油藏来说,有一个极为有利的注气条件,即在下伏始新统—古新统地层中,发现了大量天然气储量,这一发现为利用凝析气藏释放出来的气体注入油藏

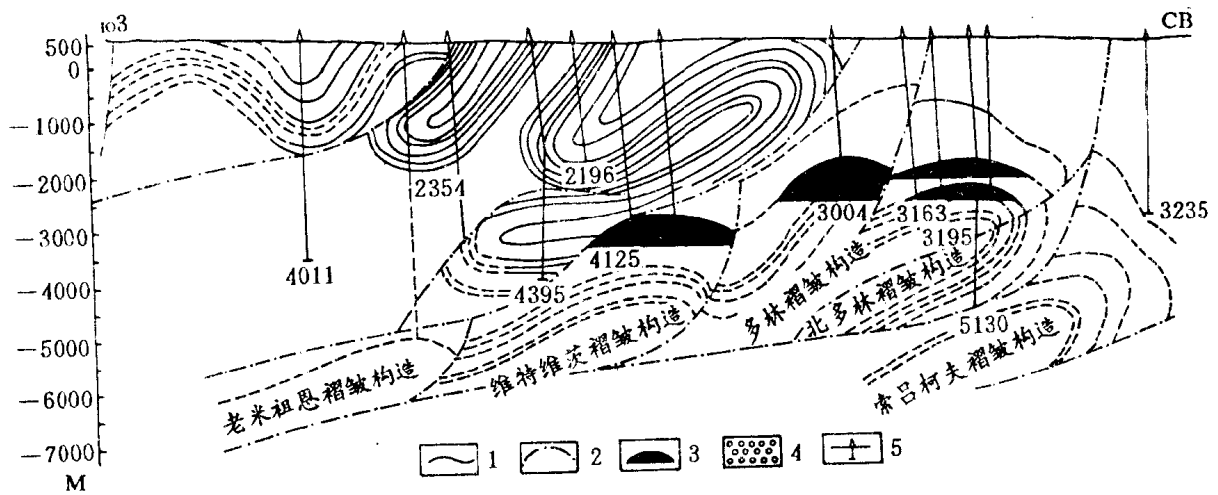


图 1-1 热洛纳雅—纳萨维扎地质横剖面图  
1—地质界面；2—构造断层；3—油藏；4—气藏；5—井

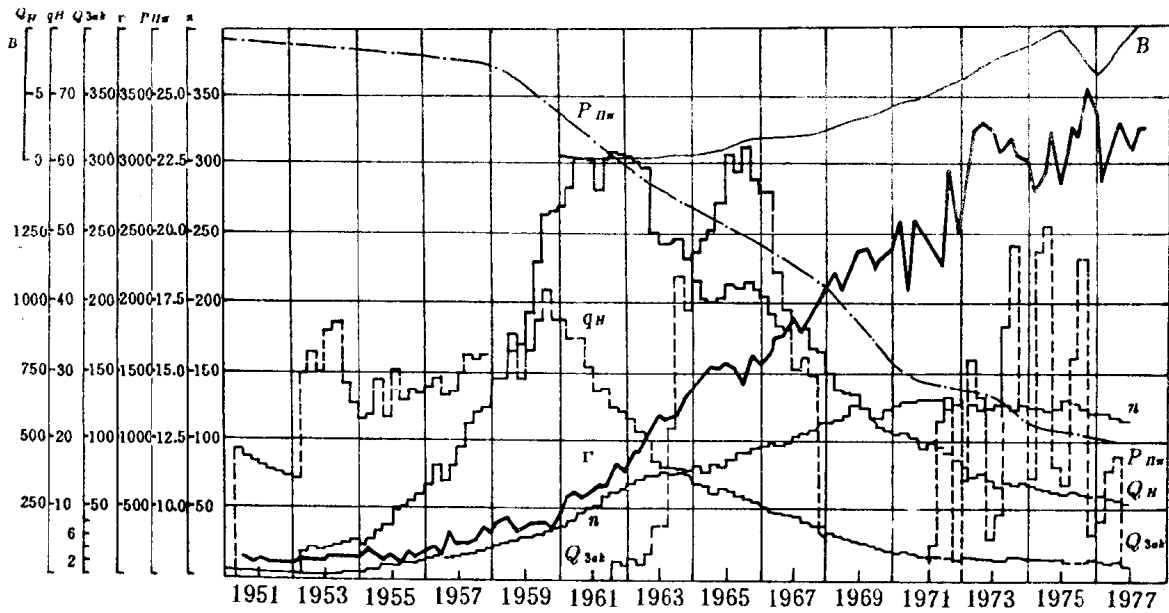


图 1-2 皮特柯夫油田深部褶皱构造主要开发指标变化图  
 $Q_H$ —原油总产量, t/d;  $q_H$ —单井油产量, t/d;  $P_{II}$ —储层压力, MPa;  
 $r$ —油气比,  $m^3/t$ ;  $n$ —生产井井数;  $Q_{300}$ —注气量,  $m^3/d$ ;  $B$ —含水量, %



提供了可能性。

在 1962~1968 年间，注入油藏中凝析气藏的气体达  $19.8 \times 10^9 \text{m}^3$ 。注采比由 1.9% 增至 84.2%。注气期间，油藏开发状况得到明显改善：地层压力和产油量的递减速度下降；油气比上升速度减缓；周围生产井排的产油量和注入井吸入能力增加。在集中注入了大部分气体的油藏顶部，地层压力稳定在 14MPa。全油藏地层压力的递减速度，比流体开采速度较高的情况下有所下降。在 1965~1968 年保持地层压力的高潮阶段，产油量递减速度比工业性注气前和停注气后的要更缓慢。同时又看到无论是单井还是全油藏，油气比上升速度均下降。与溶解气驱开发相比，注气增产的原油达  $8.57 \times 10^5 \text{t}$ ，节省开采费用近 610 万卢布，见表 1-1。

表 1-1 皮特柯夫油田在注气条件下采油费用的节省

年份	采油成本, %		在采用保持地层压力条件下 每吨原油费用 节省卢布	采油量, $10^4 \text{t}$		节省的 采油费 千卢布
	不采用保持 地层压力法	采用保持 地层压力法		采用保持 地层压力法	不采用保持 地层压力法	
1963	100.0	100.0	0.04	511.8	505.8	20.5
1964	124.9	112.6	0.49	414.1	352.1	202.9
1965	146.8	119.3	1.04	359.5	247.5	373.9
1966	206.9	126.9	2.94	367.7	190.7	1081.0
1967	253.5	145.7	3.95	335.6	163.6	1325.6
1968	276.5	163.3	4.15	308.6	154.6	1280.7
1969	341.3	222.7	4.37	247.9	146.9	1083.3
1970	361.5	301.7	2.28	195.9	149.9	446.7
1971	399.2	361.6	1.50	181.3	154.3	272.0
					总计	6086.6

因此，尽管地质条件复杂，皮特柯夫油田注气仍然取得了良好的效果，这证明了低渗透非均质多油层油田采用注气强化开发有着良好的前景。

## § 1.2 初接触混相驱注气工程

在很早以前，人们就认识到：用上述天然气或水驱替之后，由于毛细管力和界面张力的作用，仍有部分石油滞留在储层的基质孔隙中。如果能找到一种消除界面张力的方法，那么驱替流体就会波及整个油藏体积，从而完全采出地下原油。寻求并注入一种与油藏中石油及地层水都能混相的溶剂，就可以提供一种消除界面张力的方法。通过岩心试验证明，使用丙烷溶剂可以将原油从孔隙介质中完全采出，但当时认为用这种溶剂采油是不切实际的，主要是溶剂的回收问题，用非混相驱替回收，最终将留下未能回收的溶剂，这样，用昂贵的未能回收的溶剂去取代残留在地下的原油，自然是不上算的。

一直到大约 1950 年，石油工程师才真正搞清有关孔隙介质中“混相驱替”的定量关系。根据有关机理和定量关系，人们很快就发现在使用溶剂或“混相”法去开采原油时，无须使

溶剂对原油进行完全置换，也就是无须使溶剂注满地层。由美国大西洋炼油公司（现称大西洋富田公司）首次提出用有限量溶剂的切实可行的方法叫“丙烷段塞法”。该方法是在适当的高压条件下可以形成一连续相，这就是说，有可能形成一个组成上从油藏原油变到天然气的整体单一相的烃类过渡带（见图 1-3）。其定量关系我们将在以后的章节里讨论。如果溶剂段塞设计正确，它就能推动前面的油和水，并完全驱替出所有的接触油。由于注入的溶剂与原油一经接触就能混溶，混相压力低，因此，又常常把这种方法称为一次接触混相，也叫初接触混相。

这种方法提出以后，在美国进行了 50 多个现场试验，大部分是在 50 年代和 60 年代进行的，其开始的高峰年限是 1957~1958 年。现场试验的细节列于表 1-2、表 1-3 中。表 1-2 所列的混相驱是在没有注过水的油藏中进行的，表 1-3 所列的是在试验前进行过注水开发或天然水驱开发的油藏。

溶剂段塞的规模，由最小不到 1% 烃孔隙体积到高为 15%~20% 烃孔隙体积。大部分工程的段塞为 1%~6% 烃孔隙体积。原油重度的变化范围为 30°~51°API，大部分为 36°~42°API。

初接触混相驱仅适用于一定类型的油藏和原油，这将在以后的章节中讨论。与其它烃类混相所用的注入流体相比，液化石油气溶剂在较低的压力下就能达到混相，这一点，再加上单位驱替效率高，是初接触混相法的主要优点。因为所要求的混相压力较低，把这一方法用于对其它方法来说太浅的油藏是有相当大潜力的。

初接触混相驱最致命的缺点是液化石油气成本高，要降低工程成本，就必须采用较小的段塞，然而段塞太小，会由于其它因素影响（如段塞气体被地下气体稀释或不利流度比造成段塞逸散等）而达不到混相驱替的效果，所以对于初接触混相驱最关键的问题是最佳溶剂段塞的确定。

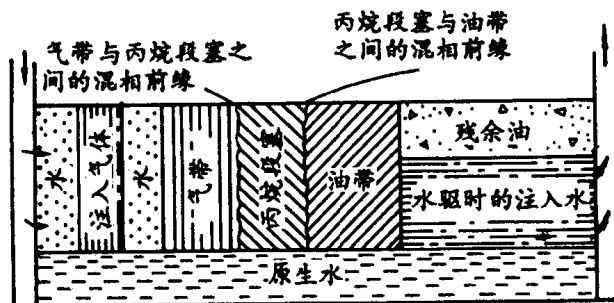


图 1-3 液化石油气段塞驱工艺 (Herbeck 等 1976)

### § 1.3 多次接触混相驱替

在油气相态研究中发现，气体与石油接触时，石油中某些较轻的组分可以蒸发而进入气相。同时如果气相中富含轻烃组分，则可以通过凝析而进入液相。这样在用富气（含  $C_2 \sim C_6$  组分较高的天然气）或贫气（含  $C_2 \sim C_6$  组分较少的烃类气体）驱油时，它们与石油一接触就会造成接触前缘的气相或液相中的轻质组分逐渐增加。直到达到某一程度时，会在前缘出现

表 1-2 初接触混相驱工程

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比 $\mu_0 / \mu_R$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模, % 烃孔隙体积	采收率, % 原始原油地质储量	现状
秘鲁圣佩德罗断块 D	国际石油公司	1957	LPG	39	10		2300	164	20	12	10 增加	已结束成功
德克萨斯西潘汉德	德蒙利罗克公司	1952	LPG 储存采油						600			已结束出油反映好
俄克拉何马塞米诺尔城	卡特石油公司	1953	LPG←G	37	3	30	3500	22		8.5	>7.5 增加	已结束出油反映好
德克萨斯奇冈湖	温索罗波公司		LPG 储存采油									已结束
俄克拉何马伊拉姆	太阳石油公司		三采 LPG←G									
怀俄明砂溪	莫比尔石油公司		LPG←G									
俄克拉何马利奥纳德	阿莫科采油公司		LPG←G									已结束成功
德克萨斯普拉贝雷趋向带	菲利普石油公司		LPG									已结束
德克萨斯卡姆波山	福兰克巴特石油公司	1957	LPG									已结束反映差
德克萨斯潘汉德	城市服务公司	1957	LPG←G						320			
德克萨斯威尔巴格瑞古拉	城市服务公司	1957	LPG←G						26			
德克萨斯三坝	阿莫科采油公司	1957	LPG←G						160			已结束不成功

续表 1-2

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比 $\frac{\mu_0}{\mu_s}$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模, % 烃孔隙体积	采收率, % 原始原油地质储量	现状
德克萨斯帕克斯宾层	莫尔比石油公司	1957	LPG←G	45	0.38	5	10400	21	6400	4	14 增加	已结束有效益
德克萨斯梯森那卡纳尔勃拉切	德士古公司	1957	LPG←G						先导性			
怀俄明草地溪拉克塔 B 油藏	科诺克公司	1957	LPG←G ←G/W		0.42	10	7300	9.5	400	7		已结束效益小
德克萨斯斯劳德博伊德矿区	阿尔克石油和天然气公司	1958	LPG←G	30	1.3	13	5000	40	320	0.6	4 增加	
德克萨斯瑞康	科诺克公司	1958	LPG←G ←G/W						120			
加利福尼亚中途日落 29-D	加利福尼亚亚斯坦德公司	1958	LPG←G	31	0.84	13	5300	20	160	10	51 最终采收率	
加利福尼亚瑞奥勃莱沃	秀波瑞尔公司	1959	LPG←G	38	0.28	5	1120	60	300	12		
加利福尼亚盖加拉山	加利福尼亚联合石油公司	1959	LPG←G									
加利福尼亚帕鲁马	西方石油公司	1959	LPG←G									
俄克拉何马伊尔克城 M 层	壳牌开发公司	1959	LPG←G						先导性			
俄克拉何马葵花	德克石油公司	1959	LPG←G						40			

续表 1-2

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比 $\mu_0 / \mu_s$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模, % 烃孔隙体积	采收率, % 原始原油地质储量	现状
俄克拉何马东瓦树干	德克石油公司	1959	LPG←G						40			
德克萨斯潘汉德	斯格利公司	1959	LPG←G						160			
路易斯安娜巴斯肯顿	太阳石油公司	1962	LPG←G		0.4	4	3800	20	3口井			已结束重力分离不好
阿尔伯塔帕宾那宾鲁博斯梯克卡狄姆	阿莫克采油公司	1964	LPG←G /W				5000		2240			
德克萨斯西朗契霍瓦德格拉斯科克	莫尔比石油公司	1964	高隆起 LPG←G	31	1.4		5500		480			成功有效益
加利福尼亚北科尔斯利委	阿尔克石油与天然气公司	1967	LPG←G	36	0.41		9500		624			已结束有效益
阿尔伯塔帕宾那卡狄姆	德士古公司	1972		32	2		5000		5540			已结束部分成功
德克萨斯沃森	壳牌石油公司	1959	LPG←G	30	1.2	12	5000	250	160			
阿尔伯塔北帕宾那卡狄姆单元	莫尔比石油公司	1959	LPG←G	37		14	5000	16	13000	1~1.7		已结束效果差
阿尔伯塔威泽特湖	德士古公司	1969	垂向 LPG←G	39	0.5		6200	650	4800	7.4	84 设计的最终采收率	成功有效益
阿尔伯塔伦堡地区	维瑞斯公司		垂向 LPG←G									

续表 1-2

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比 $\mu_0 / \mu_a$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模, % 烃孔隙体积	采收率, % 原始原油地质储量	现状
德克萨斯基兰	皮特鲁谢尔公司		LPG 储存采油									已结束 反映差
德克萨斯西潘汉德	德蒙萨罗克公司	1956	LPG 储存采油									
德克萨斯米利堪礁	太阳石油公司	1956	LPG←G				6000		300	1.5		
阿尔伯塔北帕宾那卡狄姆单元	莫尔比石油公司	1957	LPG←G	37		14	5000	16	10	7.1	72 最终采收率	已结束 成功
加利福尼亚新亥尔波特雷洛	太阳石油公司	1957	LPG←G									
新墨西哥比斯梯	太阳石油公司	1957	LPG←G		0.9	10	4900	130	1600	5.5	5.5 最终采收率	已结束
俄克拉何马绍特江克森	科诺克公司	1957	LPG←G						640			
俄克拉何马伊尔克城 P1	壳牌开发公司	1957	LPG←G						先导性			

注: LPG—液化石油气; G—干气; LPG←G—气驱液化石油段塞; LPG←G/W—交替注水注气驱动溶剂段塞。

表 1-3 初接触混相驱三次采油试验

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比, $\mu_0 / \mu_B$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模 <sup>①</sup> , % 烃孔隙体积	增加的采收率 <sup>②</sup> , % 原始原油地质储量	原油/总段塞, 地面桶/地下桶	原油/纯段塞, 地面桶/地下桶
堪萨斯伯克特开发单元	菲利浦石油公司	1958	LPG←G ←W	42	—	25	2100	30	10	10	7.0	0.67	
内布拉斯加约翰逊	俄亥俄石油公司	1958	LPG←G	37	1.1	18	4600	10	164	5.5	33	约7	
德克萨斯南沃德	阿尔克石油和天然气公司	1959	LPG←G ←W	35	4	40	2400	32	10	7.5	11.4	1.5	2.2
科罗拉多阿丹那克拉 A	加利福尼亚联合石油公司	1962	LPG←G	44	0.42	6.5	5500	28	1口注入井 2口注入井	约14		0.36	1.7
科罗拉多阿丹霍夫 A	加利福尼亚联合石油公司	1963	LPG←G /W	44	0.42	6.5	5500	28	80	约9.4		0.47	0.93
加利福尼亚南库亚马希伯特	阿尔克石油和天然气公司	1963	LPG←G ←W	35	17	23	4300	60	80	7.4	13.5	1.6	>3
科罗拉多菲格里开发单元	莫比尔石油公司	1964	LPG←G /W	37	3	30	4900	8	785	3.3	3.5	0.9	

① 试验波及地带;

② 根据递减曲线分析估算的最终采收率;

③ 整个油田为原始原油地质储量的 19%;

④ 由于试验的性质难以确定试验波及地带。

LPG←G—气驱液化石油气段塞; LPG←G/W—交替注气注水驱驱动液化石油气段塞。

一个互相混合的混相带 (见图 1-4, 1-5)。这种富气或贫气与石油多次接触混相现象, 按注入气体的贫富程度又可以分别称为富气驱、贫气驱或干气驱 (驱动的气体几乎全部为甲烷)。

由于天然气是一种优质能源, 也是一种重要的化工原料, 在很多国家很难找到足够的烃类气体来进行油藏的混相驱。只有那些在国内有着足够的天然气来源的国家, 才有可能进行

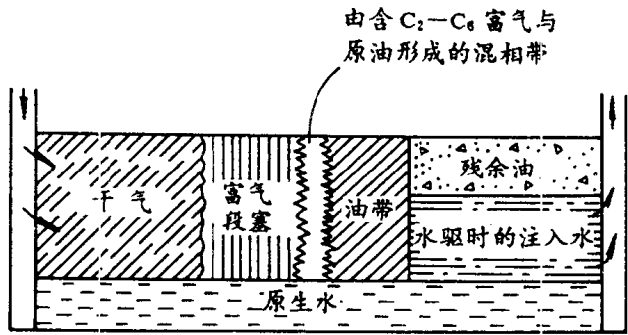


图 1-4 干气驱工艺 (Herbeck 等 1976)

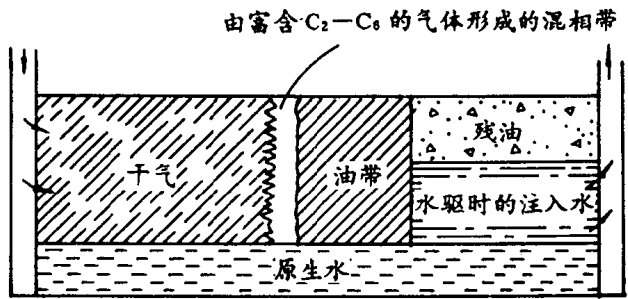


图 1-5 富气驱工艺 (Herbeck 等 1976)

烃混相驱采油。自六十年代以来，美国、阿尔及利亚、加拿大、智利、利比亚、波兰、前苏联等国家相继开展烃类混相驱油研究。美国、加拿大由于气源供应限制，发展缓慢，规模也小。阿尔及利亚和利比亚进行过规模较大的高压烃类混相驱油的工业性试验，试验都取得了成功。

阿尔及利亚在哈西·梅萨乌德油田从 1964 年起开始将产出的伴生气高压回注形成混相驱。从 1974~1980 年逐步扩大试验。到 1982 年底，共注气  $6.66 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，用高压气混相驱已采出原油  $1.22 \times 10^8 \text{t}$ ，即占油田累计采油量的 28%。近三年来，60% 以上的原油是靠注气混相驱采出的。

利比亚的印蒂萨尔“D”油田顶部注气进行烃类混相驱油，底部注水维持混相压力，日注气能达到  $2.1 \times 10^7 \text{m}^3$ ，日产量最高达  $5500 \text{m}^3$ ，预计最终采收率可达 80%

近年来，美国和加拿大进行工业性矿场试验的油田数量有较大增长。70 年代迄今，加拿大已完成或正在继续进行的矿场试验有二十几个，其中有些已见成效。美国现行的烃类混相驱方案共 26 个，年增产原油  $1.96 \times 10^6 \text{m}^3$ 。见表 1-4，1-5。

富气驱工艺基本上驱替了全部接触的残余油，可重新获得油层中失去的混相性；该工艺成本比丙烷段塞驱工艺成本低，能在低于干气驱动压力下形成混相；大的段塞基本上消除了段塞设计问题。但该工艺扫油效率低，厚地层中容易出现重力超覆现象；天然气成本高；粘性指进可导致段塞逸散。

干气驱工艺的驱替效率也接近 100%；干气成本比丙烷或富气低，在失去混相性情况下可重新形成混相性；由于连续注气，不存在确定段塞大小的问题；可循环和反复注气。但由于此工艺要求油层原油必须富含  $\text{C}_2 \sim \text{C}_6$  组分，因此适用范围较小；需要高的混相压力，面积扫油效率和重力分层交差。



表 1-4 凝析气驱现场工程

油田	操作者	开始年份	工程类型	原油重度, °API	原油粘度, cp	粘度比 $\mu_0$ / $\mu_w$	深度, ft	厚度, ft	面积, 英亩	段塞规模, % 烃孔隙体积	采收率, % 原始原油地质储量	现状
路易斯安那哈亚尼斯维尔	哈亚尼斯维尔操作者指挥部	1953	LPG←R G←G ←W						3200			
德克萨斯布朗	美国埃克森公司	1956	RG						1300			
德克萨斯布朗	美国埃克森公司	1959	RG						480			
德克萨斯西利桑 20B-07	美国埃克森公司	1957	RG← G/W	40		12	6000		877	52	50~54 (最终采收率)	接近完成 鼓舞人心
德克萨斯斯特拉顿	南部矿业公司	1957	RG									
加利福尼亚南科尔斯里维	俄亥俄公司	1957	RG									
怀俄明伊尔克	阿莫科采油公司											
德克萨斯米德兰德农场	阿莫科采油公司	1960	RG←G ←G/W	41	0.3		8350		600	2		已完成成功 有效益
路易斯安那利道尔	阿尔科石油和天然气公司	1962	三次采油			11	10100	13.5	640	15		已结束
阿尔伯塔金穗	帝国石油公司	1964	垂向 RG←G	37	0.8		5672	550	1305	7	3.1 (增加)	已完成 有效益