

油 藏 注气开采 动 力 学

R. 奈德拉 R.P. 尼尔森 合著

5.3

石 油 工 业 出 版 社

87
TE355.3
1
3

油藏注气开采动力学

R. 桑德拉 合著
R. F. 尼尔森

张 晓 宜 译

P128/07

石 油 工 业 出 版 社



426819

中译本前言

由美国海湾出版公司出版、拉斐尔·桑德拉和拉尔夫·尼尔森合著的《油藏注气开采动力学》一书，是一本针对性较强的石油开采专业读物。作者以理论和实践相结合的方式，系统地阐明了油田开采中有关注气采油的理论分析和现场实施的关键问题。本书的特点是：

1. 用一些国外的典型油田实例，说明注气采油方法的实施效果和发展趋势；

2. 系统扼要地探讨了各种注气采油方法的机理和计算方法，并对经济效果作出评价；

3. 重点介绍了应用物质平衡法理论和方程解决注气采油的历史拟合和动态预测问题；

4. 书中所附问题具有高度的启发性，能帮助读者深入思考，有助于达到理论和实际结合的目的。

因此，本书中译本的出版，相信将为我国油藏工程和采油工程专业技术人员提供一本很有用的教材或参考书，有助于他们解决工作中的一些理论问题与实际问题。

童宪章

1984年12月16日

目 录

第一章 注气的历史	(1)
1.0 早期注气工程	(1)
1.1 琼斯 (Jones) 砂岩油田	(3)
1.2 迈尔西克斯 (Mile Six) 油田	(5)
1.3 弗里奥 (Frio) 砂岩油田	(7)
1.4 布鲁克哈文 (Brookhaven) 油田	(9)
1.5 混相驱替	(10)
1.6 采用面积井网注混相段塞驱油——派克斯 (Parks) 油田.....	(11)
1.7 借助重力作用的丙烷段塞驱油——巴斯肯顿 (Baskinton) 油田	(13)
1.8 高压混相驱油——第31区块 (Block 31) 油田.....	(14)
1.9 富气 (凝析气) 驱油——西利格森 (Seeligson) 带状油田	(15)
1.N 符号和单位	(17)
参考文献	(19)
第二章 物质平衡法	(20)
2.0 简介	(20)
2.1 零维方程	(21)
2.2 积分式物质平衡方程	(24)
2.3 解MBE的积分式	(30)
2.4 重力分离	(39)
2.5 微分的物质平衡方程	(48)
2.6 解微分MBE	(52)
2.N 小结	(58)
参考文献.....	(63)

第三章 气-油非混相驱替	(64)
3.0 引言	(64)
3.1 巴克利-莱弗里特模式	(64)
3.2 测定相对渗透率	(71)
3.3 递减曲线分析	(71)
3.4 重力分离	(72)
3.5 逆流时的修正	(76)
3.6 迪茨模式	(82)
3.7 界面的稳定性	(85)
3.8 水平波及系数	(87)
3.9 垂向波及系数	(91)
3.10 流度比	(96)
3.11 相似模拟法	(102)
3.N 结语	(107)
参考文献	(112)
第四章 伴有物质传递的气驱油过程	(114)
4.0 引言	(114)
4.1 混相过程的热力学研究	(116)
4.2 汽化气驱和凝析气驱	(122)
4.3 注 CO ₂	(126)
4.4 弥散模式 (The Dispersion Model)	(127)
4.5 最佳溶剂段塞大小的选择	(137)
4.6 混相驱替时油藏动态预测	(150)
4.7 局部混相驱替油藏动态预测	(158)
4.N 结语	(164)
参考文献	(171)
附录	(173)
附录A 具体问题组	(173)
附录B 把韦尔奇切线法推广用以说明均一的和流动的驱替相原始 饱和度的情况	(189)
译后记	(191)

第一章 注气的历史

1.0 早期注气工程〔16〕

为了提高原油采收率而向油藏注气,可以追溯到大约1890年,地点是宾夕法尼亚州的维南戈县。在这次人们所知最早的注气中,作业者约翰·丁斯莫尔有意识地把一个已部分枯竭的砂岩油藏与另一个位于其下部的尚未枯竭的砂岩气藏沟通。几年之后,他又安装了“气泵”,把一些油井部分地抽空,而将由此获得的气体排入另外一些井内。在1910年左右压缩机变得很常用了,人们也常将空气注入井内,或者仅是空气,或者混以从油井产出的天然气。压缩机具有双重作用,即凝析套管头汽油和提供把天然气回注油藏所需的压力。宾夕法尼亚和西弗吉尼亚两州于1910年之前就已经实施注天然气和(或者)注空气。到了1911年,俄亥俄州也开始注气了。其后15年内,在其他一些州,如肯塔基、伊利诺斯、俄克拉何马、堪萨斯和得克萨斯,也都开始了“再加压”工程。

应当指出,早先的(大约1930年以前的)再加压工程是用于非常枯竭的油田,因此应当看成为“二次采油”作业。二次采油的一般定义是:当油藏以其原始能量产油到达其经济生产界限之后所应用的一种能提高油藏剩余能量的采油方法。同时,早期的注气采用低压,一般在100磅/平方英寸以下,而且是注入浅层。不过1884年颁布的第308,522号美国专利提到了使用1,000磅/平方英寸的压力。在产油井安装真空泵曾风行一时,一则在于用它生产较贵的套管头汽油,另外在于靠它至少能暂时提高原油的产量。后来,人们越来越清楚地认识到这种办法对于最终采收率并无明显改善,因此在那些进行再加压的现场,真空泵大都被放弃了。

如上所述，注入空气和天然气，或者称之为再加压，早先仅限于在二次采油中应用。当时注气井相对生产井的位置并不遵循一定的布井格局，因为某些生产井可以转为注入井。在二十年代之前，油藏的流体运动数学并无大的发展。达西定律虽于1856年即已问世，但主要是土壤和水力学方面的工程师加以应用〔3〕。不过，石油生产者对流体的运动还是大体有所了解。鉴于注入的气体会或多或少地按辐射状流向周围生产井这一事实，他们充分认识到为了防止原油流越租块界限，必须打“补充井”。

人们越来越清楚地看到在单个租块进行作业的困难，尤其在那些曾经实施再加压作业的地方。在俄克拉何马州的诺瓦塔县，最先尝试把整个油田的大部分作为一个整体来进行作业，不过由于必须继续记录各租块的产量，它还不能算是一个严格的一体化注气工程。第一次实现通常意义的一体化注气，是在加利福尼亚州的凯特尔曼山油藏。有许多准则（例如油田面积、产层容积、总的油井生产能力等等）曾用来决定各个租块拥有者的应得权益。从二十年代末期至三十年代初期，随着对油藏特性日益迅速的了解，人们认识到，从经济和保护资源的角度出发，对不同的油田显然需要不同的技术才能进行最有效的作业。下文将进一步讨论这个问题。要作到这一点，就必须把各个油田作为一个整体来制定作业方针，这就需要实现一体化。

尽管人们早就对达西定律，对孔隙度和渗透率的概念以及对流体的特性有了大体上的了解，然而直到二十年代末期才有人认真试图把这些科学方法应用到石油生产中去〔7〕。此后十年中在石油工业领域应用科学方法发展很快，特别是因为这些通用的方法在其他工业领域早就被运用了。孔隙度和渗透率的概念在制陶、土壤和水文工程方面已应用了几十年之后，大约在1930年，石油工业才开始从油井广泛采取岩心，同时在实验室测定孔隙度、渗透率和流体饱和度。直到希尔瑟斯（Schilthuis）发表油藏物质平衡方程〔15〕，石油工业才真正开始应用化学工程师早就知道

了的物质平衡方法。

达西定律与傅立叶的热传导定律及欧姆的电传导定律之间的相似性，以及各连续方程的相似性，使得马斯卡特（Muskat）等人有可能迅速地推导出孔隙介质中流体运动和压力分布的方程〔13、14〕。当威科夫（Wyckoff）和博塞特（Botsset）〔20〕在1936年的著作中和莱弗里特（Leverett）〔10〕在1939年的著作中提出相对渗透率和“残余饱和度”的概念之后，“毛细保持位”（Capillary retention）及“贾敏效应”的重要性下降了。1942年，由巴克利（Buckley）和莱弗里特把连续方程和流动方程应用到分离的各相〔1〕，使得在孔隙介质中一相被另一相驱替的现象首次有了科学的解释。极为奇怪的是，用基本上一样的方程对重力条件下的逆流进行研究，却是从1959年才开始的，这些方程是分别由吉尔摩（Gilmour）〔5〕，以及由谢尔登（Sheldon）、宗德克（Zondeck）和加德韦尔（Gardwell）各自推导出来的。

已经有了一些特定的函数用来表述烃类混合物的物理特性和气液相关系，烃类混合物的这些性能对油藏动态的计算很有用。这样的函数的例子包括有以地面原油体积为准的地层体积系数和溶解度之间的函数，以及一些特殊的“平衡常数”。自从物质平衡和流体运动方程首次用于石油生产之后，在相平衡条件以及在油藏的温度和压力条件下测定这些函数以及其他流体特性数据，诸如气和油的粘度，已成为标准实验室的常规工作了。

自从注气问世以来，付诸生产的注气加压工程数以百计，逐一介绍是不可能的。这里只能选一些现场效界较好并且有分析价值的例子作一简要的介绍，有关这些例子的问题可以在后面各章及本书附录A中找到。

1.1 琼斯（Jones）砂岩油田〔4〕

位于阿肯色州的琼斯砂岩油田是在1937年9月发现的，就注气而言，它可以算得上是资格较老、设计较好的油田之一了。该油田是一个背斜圈闭，呈梨形，覆盖面积为4,000英亩，长4英

里，宽1.5英里，其穹窿中心顶部深约7,250英尺。水界深7,370英尺，油气界面深7,270英尺。估计产油层的体积为15万英亩-英尺，原始天然气层的体积为4,000英亩-英尺，7,300英尺深处油层的原始压力为3,520磅/平方英寸，温度为198°F，天然气溶解度为765标准立方英尺/地面桶，地层体积系数为1.45油藏桶/地面桶。在压力为300—3,520磅/平方英寸范围以内，后两个量可以用下列公式算出：

$$R_s = 0.1875p + 105$$

$$B_o = 0.00008p + 1.168$$

平衡时天然气的地层体积系数可用下式估算：

$$Bg^{-1} = 0.348p - 22, \text{ 标准立方英尺/油藏桶}$$

油藏的平均孔隙度是0.202，平均渗透率是400毫达西，但由于油藏中还含有一些分散态的页岩，其实际值的变化幅度相当大。经过足够的时间，适当考虑了水侵的影响，然后用物质平衡法估算的原始地质储量为地面油1亿桶。水侵量似乎与油层原始压力的递减量成正比，即每月每递减1磅/平方英寸压力值就侵入80桶水。

该油田的某些数据列于表1。从1941年开始把气注入气顶，当时压力平均值已降至1,542磅/平方英寸。在早期开采阶段，压力递减值大致上与原油产量成正比，即每采出9,500桶原油，压力下降1磅/平方英寸。从1941年7月到1955年3月回注了绝大部分天然气，压力大致稳定在略低于1,500磅/平方英寸的水平上。从1944年7月开始在下倾部位进行小规模注水，两年之后增加了注水量。大约在1955年3月急剧减少注气，同时把油气比高的油井关闭。到1957年底不再注气，但还继续注水。油藏的平均压力从1954年的1,200磅/平方英寸升到1962年的1,800磅/平方英寸。所有在1957年底之后仍然生产的油井的油气比接近溶解油气比。截至1962年1月止，采收率达到原始地质储量的65%，预计最终采收率可达70%。

表1 琼斯砂岩油田资料

油气比, 标准立方英尺/地面桶					水, 千桶			
各 年	油层压力	月产	月 纯	累计纯	产 量	纯产量	油 产 量	百万 桶
月 末	磅 / 平方 英寸 (绝对)	量	产 量	产 量			百万地面 桶	
9-37		750	750	750	0	0	0	0
7-38	3133	950	950	917	0	0	2.82	0.1
7-39	2533	1350	1350	1054	0	0	8.75	0.9
7-40	1973	2150	2150	1331	0	0	14.00	2.1
7-41	1542	1334	955	1512	5	5	19.01	3.9
7-42	1510	1730	141	1256	94	94	23.72	5.8
7-43	1490	2238	97	1082	306	306	27.92	7.8
7-45	1493	3312	-36	863	1110	963	34.99	11.8
3-47	1471	3468	229	763	1163	621	40.43	15.2
3-48	1454	3666	397	759	2367	- 46	43.70	17.2
3-49	1429	4648	755	737	3925	-804	46.90	19.3
3-50	1432	4393	638	726	5393	-1749	49.41	21.3
3-51	1335	4600	770	723	4037	-3328	51.84	
3-53	1335	6000	1100	718	5091	-7950	55.36	
3-55	1405	3500	1150	731	6166	-13476	58.17	
3-57	1440	1200	1000	742	7646	-21012	60.51	
3-59	1750	352	352	736	10172	-26797	62.64	
3-61	1940	474	474	725	13215	-30291	64.87	

1.2 迈尔西克斯 (Mile Six) 油田 (12)

秘鲁的迈尔西克斯油田是一个通过注气获益的范例，经典的教科书都要提到它，该油田的特点是利用了重力作用的好处。该油田于1927年发现，1933年9月开发，几乎从开发的一开始就将天然气回注气顶。这是个单斜构造的油藏，表面大致上好像椭圆的一个象限，构造倾角约为17°，气顶就在“焦点”附近，边水位于弯曲的“边缘”，沿着“长半轴”有一断层。砂岩总体积为54,000英亩-英尺，原始气顶约占总体积的8%。绝对渗透率平均值为1,000毫达西，产层平均孔隙度为0.163。估计原始平衡时

原油和天然气的粘度分别为1.32和0.0134厘泊，密度分别为0.78和0.08克/毫升，地层体积系数分别为1.25油藏桶/地面桶和0.0025油藏桶/标准立方英尺。从以上数字推算出的原油地质储量为5,000万地面桶。

油藏的原始压力约为930磅/平方英寸，开发的第一年压力略有下降，为850磅/平方英寸，这个压力一直保持到1946年发生井喷时为止，井喷使压力跌至750磅/平方英寸。该油田的生产油气比平均值在1934年至1938年为400标准立方英尺/地面桶（或许为原始溶解度），在1939年至1941年为600标准立方英尺/地面桶，继而在1945年增至最高值，约为2,300标准立方英尺/地面桶，此后跌至约为1,200标准立方英尺/地面桶的水平。油气比平均值的升高显然由于有些油井在油气“前缘”通过之后仍继续生产的缘

表2 迈尔西克斯油田生产数据

年 份	油 气 比 (年平均数)		油层压力, 磅/平方英寸(绝对)	累计原油产量(年末 数字), 百万地面桶
	产 出	注 入		
1933			930	0
1934	300	300	840	3.7
1935	300	400	850	7.8
1936	300	600	840	12.5
1937	400	700	840	17.5
1938	400	550	860	20.7
1939	700	800	860	22.5
1940	600	800	870	23.7
1941	600	700	860	24.8
1942	1100	1200	860	25.7
1943	1900	1800	850	26.5
1944	2300	2300	830	27.1
1945	2400	2500	825	27.5
1946	1200	1400	760	28.0
总计				30.0(?)

故，因为产量已达最终产量的85%，同时这一不规则的油气“前缘”已接近油藏的底部。然后，对有些油井重新处理和修整，并进行选择性射孔，从而生产主要控制在饱和油带。在井喷发生后不久，有少量水侵入边缘的油井，不过在井喷被控制之后，水又退去。气油界面和水油界面似乎完全保持着水平状，几乎没有水的侵入。表2列出一些平稳生产的数据〔2〕。

1.3 弗里奥 (Frio) 砂岩油田〔4〕

弗里奥砂岩油田位于德克萨斯州南部，它含有多个生产层带。我们对其中“D-5油层”的注气工程概况作一简略的介绍。这是一个平缓地往东北向延伸（倾角约为 0.5° ）的不对称的大型鼻状构造。其西北向的倾角为 1.5° ，这一翼是主要的产油带，油藏的这一翼被油水接触面封闭。其北翼和南翼被渐变成页岩的砂岩透

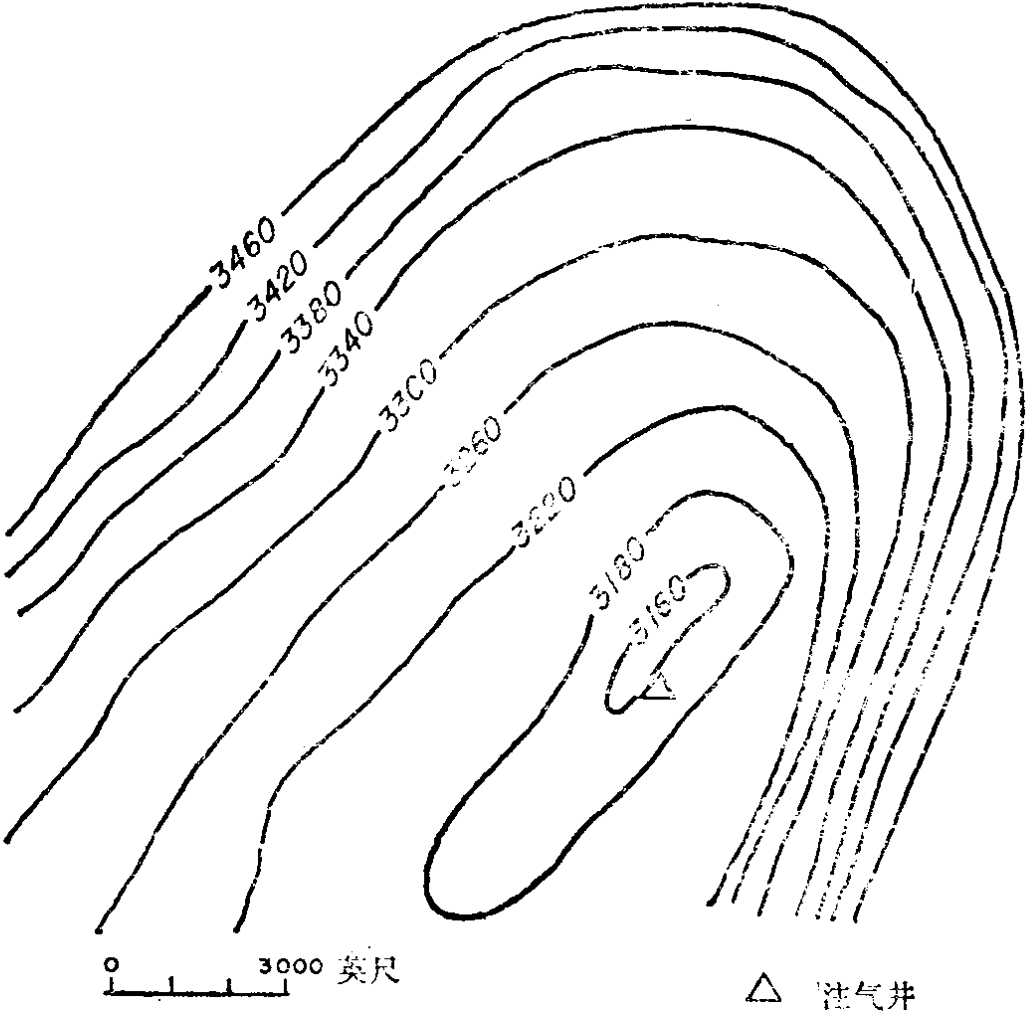


图1.1 弗里奥砂岩油藏

镜体所封闭，东翼则被平行于构造轴线的很陡的折皱或断层所封闭（见图1.1）。油层的平均深度为3,750英尺。油藏的面积为1,870英亩，其平均厚度为10.1英尺。原始气顶的面积为400英亩，其平均净厚度为10.6英尺，这样可以得出气顶与油藏的平均面积比值为0.225，其他有关数据如下： $\phi=0.23$ ； $k=194$ 毫达西（平均值）； $S_w=0.24$ ，假定 S_w 均匀和不变； $p_i=1,590$ 磅/平方英寸； $B_o=1.06+0.000073p$ ； $B_{oi}=1.1768$ ； $R_s=35+0.178p$ ； $R_{si}=319$ 标准立方英尺/地面桶； $Temp=150^{\circ}F=614^{\circ}R$ ； $Z=0.995-0.00015p$ ； $Z_i=0.757$ ； $B_g=3.07Z/p$ ； $B_{gi}=0.00146$ ；这样 $N=2.174$ 万地面桶； $G_{soln}=69.6$ 亿标准立方英尺； $G_{cap}=39.4$ 亿标准立方英尺。饱和油粘度 $\mu_o=0.86-0.00014p$ ；饱和天然气粘度 $\mu_g=0.0115+0.000003p$ ；较简单的粘度比 $\mu_o/\mu_g=70-0.02p$ 。

生产和注气数据列于表3。

表3 生产与注入数据

年 末	累计石油产量 百万地面桶	累计天然气产量 10亿标准立方英尺	累计注入天然气量 10亿标准立方英尺	累计产水量 百万桶
1940	0.148	0.103	0.	0.
1941	.425	.239	.304	0.007
1942	.893	.432	.974	.010
1943	1.469	.962	2.218	.013
1944	2.126	2.037	2.874	.021
1946	3.193	4.852	4.548	.040
1948	4.353	8.434	6.343	0.72
1950	4.937	11.077	8.207	.114
1952	5.572	14.09	10.32	.182
1954	6.018	16.56	12.65	.251
1956	6.419	18.30	13.11	.307
1958	6.737	19.65	13.51	.363
1960	6.939	20.73	13.66	.424

尽管倾角不能十分影响各孔隙中的驱替效率，但是它显然是足以在注入气的前端提供一个相当好的“前缘”，也就是足以在很大程度上“消除”地层的不均质性。

1.4 布鲁克哈文 (Brookhaven) 油田〔4〕

位于密西西比州的布鲁克哈文油田是一个原始不饱和油田的例子，它在饱和度、压力和溶解气量方面变化甚大。该油田为一背斜型构造，有若干断层，因而使构造部分地不连续。由于整体连通性差，水驱作用不大。原始状况可以归纳如下：压力为4,500—4,700 磅/平方英寸，溶解气量为 100—500 标准立方英尺/地面桶，孔隙度（平均值）为0.256，含水饱和度为 0.45，原油比重为 26—40°API，平均地层体积系数为 1.25，油砂体积为 207,000英亩-英尺，油层平均厚度为30英尺，油层深约10,000英尺，温度为250°F，地层倾角2°。从上述数据可得出原始石油地质储量为1.8亿地面桶，以后分析将限于该油田的“第四区块”，它的油砂体积为55,500英亩-英尺，原始石油地质储量为 4,800 万地面桶。

该油田于1946年初开发，并且于1948年开始注气，当时已从第四区块生产了240万地面桶原油，地层压力则已降至2,000磅/平方英寸。注气之后使前缘之后的平均压力维持在2,850磅/平方英寸左右。在该压力及油藏的温度条件下，对于饱和原油，其 $B_o=1.4$ ， $R_s=647$ ， $\mu_o=0.54$ 厘泊；对于平衡天然气，其 $\mu_g=0.019$ 厘泊， $B_g=0.00121$ 油藏桶/标准立方英尺。对于未饱和原油，其 R_s （平均值）=433， $B_o=1.30$ ，原油相对渗透率及油气渗透率比如下所示（ $S_w=0.45$ ）：

S_g :	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
K_{ro} :	1	0.43	0.25	0.13	0.07	0.03	0.01
K_g/K_o :	0	0.01	0.075	0.33	1.5	5.5	40

从开始注气至1952年10月，在注入气前缘的前面又采出原油 241万地面桶，而从前缘的后方采出原油304万地面桶，同期注入

天然气140亿标准立方英尺，采出天然气112亿标准立方英尺。据估计，在1952年10月，有24,600英亩/英尺砂岩位于注气前缘的后方，侵入水的水量为70万桶。估计“波及”系数为0.55，它在附录A中被列为一个专题论述。总的说来，油井在气体前缘通过之后并不关闭，而使之继续生产到气油比为50,000标准立方英尺/地面桶时为止。

1.5 混相驱替

几乎在刚出现石油工业的时候，人们就认识到：在使用非混相流体如天然气、空气或水驱替之后，一定“残余饱和度”的原油会滞留在油藏。然而通过岩心试验，人们也认识到：使用象石脑油这样的溶剂可以将原油从孔隙介质中完全采出。但在现场用溶剂采油被认为是不切实际的，因为下一步再用非混相驱替回收溶剂时，终究会留下未能回收的或者说一定“残余饱和度”的溶剂。这样，就是用未能回收的溶剂去取代未能采出的原油，那溶剂必须非常便宜才行，可是还从未找到过这样的溶剂。

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，虽然化学工程师对这一关系早就十分清楚了，根据这些有关的机理和定量关系，人们很快就明了在使用溶剂法或“混相”法开采原油时，无需使溶剂对原油进行完全的置换或者将溶剂注满油层，第一个仅用有限量溶剂的切实可行的方法叫“丙烷段塞法”，它是由大西洋炼油公司（现称大西洋富田公司）提出的〔8〕。

如果溶剂（即丙烷）不停地注入并流经油藏，它将与原油溶为一体，这样也就会有一个原油与溶剂比率连续变化的过渡带。在这过渡带的前部，烃相基本上全是油藏的原油，在过渡带中，溶剂对原油的比率按照与流向相反的方向变大，过渡带的上游部分的成分基本上是纯溶剂。过渡带在流经地层的同时不断变大，其定量关系将在第四章中讨论。

假定这个过渡带在从油井产出之前都处于被“推”着的状态，

那么从理论上讲，油藏中所有的原油都可以采出，因为这些原油都在过渡带之前移动。这样看来，问题在于找到一种便宜的或者能便宜地加以回收的“推剂”。如果使用非混相物，比如水或者空气（或者低压天然气）去驱替溶剂，如上所述，就会留下残余饱和度的溶剂，这意味着由于溶剂损失而要支付高得惊人的费用。大西洋公司的方法的好处是，在适当的高压条件下可以形成一连续相，连续相的成分从液态丙烷变到天然气。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，中间是大量的液化石油气丙烷。上述大西洋公司的方法已被称之为“丙烷段塞法”，这是因为在压力足以使随后注入的天然气保持单相的情况下，注入的溶剂是有限量的（段塞）。天然气“推剂”又被某些更便宜的物体如空气（或注空气后注水，或者交替注气和注水）推入，不过，由于将形成一膨胀中的天然气-空气过渡带，天然气带应当足够宽，这样才能避免空气-天然气和天然气-丙烷过渡带在体积上不断增长出现迭接而丧失其混相性。

在有些场合，有可能“就地”形成混相驱以取代溶剂“段塞”。一种可能性就是实行“富气驱”，这时注入的天然气中含有足够的可凝析的轻质烃类（即丙烷和丁烷），在油藏压力下与油藏的原油接触时形成混相带。这种驱替情况也被称之为“凝析气驱”。另一种可能性就是“高压气驱”或“汽化气驱”，这时油藏原油中较多的挥发性组分进入气相，通过油气反复接触而形成一个混相带。“就地”形成混相驱替的方法的原理将在第四章中讨论。

1.6 采用面积井网注混相段塞驱油——派克斯（Parks）油田〔11〕

派克斯油田位于德克萨斯州的密德兰德（Midland）县，这是一个宾夕法尼亚石灰岩双背斜油田，一边被断层封闭，其余的边界均尖灭。油水接触面位于薄的一边，物质平衡法计算表明很

少有小侵现象。孔隙是由化石所形成，平均孔隙度为0.068，平均渗透率为2.5毫达西，倾角约为1°，产油层净厚度为20英尺，总厚度为61英尺，深度约为10,000英尺。产油面积为6,400英亩，含水饱和度为0.33。根据这些数据资料及原始地层体积系数1.93计算出原始石油地质贮量为2,300万地面桶。油田最初在压力为4,560磅/平方英寸时处于未饱和状态，原始原油的泡点为3,500磅/平方英寸。在从1951年至1957年7月这个油田开发的最初阶段，采出了300万地面桶API45°的原油，大约还采出150亿标准立方英尺天然气，这时，地层压力降至1,900磅/平方英寸，地层体积系数为1.50，原油的粘度为0.384厘泊。按照油藏的原始条件，即压力为4,560磅/平方英寸，温度为174°F时，原油的粘度为0.22厘泊。

由于地层倾斜并且渗透率低，实行二次采油就需要一组面积井网，因而作出这样的井位布置：把15口注入井打在油田边缘附近，8口注入井打在油田的较靠内部位。从1957年7月到1958年7月，注入了154万桶丙烷（相当于油气所占孔隙体积的4%），接着注入天然气，同时把地层压力维持在混相所要求的压力之上。然后注水以提高波及系数。截至1960年7月止，在这个小规模注水试验中注入了68.7亿标准立方英尺天然气和256万桶水，累计采出了420万地面桶原油，248亿标准立方英尺天然气和11万桶水。从丙烷突破时计算，垂直波及系数为50%，这大约是斯蒂尔斯（Stiles）法计算结果的4倍。尽管文献提到了三个可对比的孔隙带，不过还是没有给出渗透率剖面图。曾用电位模型测得面积波及系数，不过未给出这些数据。一张图表明，突破时的面积波及系数大约是70%。按设想的水在气之后注入或者水与气同时注入的情况，再假定单元流度比，然后计算出全部波及系数。计算中假定在丙烷突破后，为了消除前缘指进，许多井应当关闭；同时还假定突破后继续在其他各井开采。这样，预计最终采收率至少可达55%，而水驱的采收率则是41%。