

俄克拉何马州Osage县北布尔邦克A区块 聚合物驱方案的综述与评价

D.R. Zornes, et al.
Phillips Petroleum Co.

吴 维 译
唐养吾 杨普华 校

摘 要

1980年9月在北布尔邦克A区块开始实施聚合物驱方案。首先在1440英亩(582.7公顷)方案区域内的36口井中注入淡水进行预冲洗。在该区天然裂缝砂岩油层采用Phillips公司的深部聚合物—柠檬酸铝—聚合物方法,获得了经济的增产油量。到1985年中期,采油速度由方案前低于15000桶/月(2385米³/月)提高到现在的平均30000桶/月(4769米³/月),生产水—油比由100多降到50以下。假定经济极限为单井产量2桶/天(0.31米³/天),聚合物方案的设计总累积采油量为440万桶(地面)(67万米³),大约为方案前预计的85%。

化学剂注入顺序包括由500ppm的柠檬酸铝交联剂增效的500ppm活性聚合物,250ppm聚合物,50ppm聚合物,淡水后置液,最后注入产出的盐水。在36口井中共注入417万磅(1890吨)聚丙烯酰胺。在84口生产井中监测了淡水和聚合物的产出情况并设法把它们与采油效果联系起来。

本文概括总结了聚合物驱方案的设计、实施、监测、生产动态反应及投资费用。本文还提出了扩大北布尔邦克区的方案或将Phillips聚合物方法应用于其它油藏时应考虑的技术和经济因素。

前 言

生产历史和试验区位置

位于俄克拉何马州Osage县Shidler附近的北布尔邦克区,在将近35年的注水期间,已生产出1.5亿桶(2300万米³)以上的原油(图1)。该油田于1920年5月发现,原始储量接近6.71亿桶(1.066亿米³)。一次和二次采油后仍有将近3.5亿桶(5560万米³)的原油留在地下,因而把北布尔邦克区作为三次采油的对象进行了广泛的实验研究。在1965年进行了一次小规模蒸汽驱先导性试验,结果令人失望。1977年开始在北布尔邦克区的40和49区块进行了一次先导性聚合物驱试验,增产原油持续了12年以上^[1]。1975年在北布尔邦克区的97区块开

始的表面活性剂/聚合物先导试验,目前仍在持续增产^[2-5]。然而,在北布尔邦克大规模应用表面活性剂驱在经济上是不合算的,特别是在严重非均质地区,大规模应用更不合算^[6]。由于聚合物驱的实施费用比较低,通过改善波及效率可以提高高度非均质区域内的采收率,因而,选择了聚合物驱作为商业规模的扩大性试验^[7]。本文是北布尔邦克1440英亩(582.7公顷)A区块1980年9月开始的聚合物驱方案的概述与小结。

油 藏 描 述

北布尔邦克油田的走向近于北西向,长12英里(19.3公里),宽4到5英里(6.4到8.0公里),含油面积24000英亩(9712.4公顷)。生产层深度3000英尺(914.4米),属于Cherok ee页岩的宾夕法尼亚布尔邦克砂岩组。J.C. Trantham等人的地质研究表明^[8],布尔邦克砂岩油藏属于河流成因,它是由河道垂向加积和侧向侧积形成的块状砂体,砂体内部很少有间断。强油湿砂岩^[9]包含着北西向的节理系统和/或裂缝系统。注入压力接近0.5磅/英寸²/英尺(11.3千帕/米)时,这些节理或裂缝很容易张开并扩展^[7]。

北布尔邦克区的岩心资料表明,油层的高渗透区具有最大的垂向渗透率分布,油藏北半部的渗透率一般比南半部高,非均质性也比南半部严重。试验区的岩心剖面(图2)表明,非均质性主要由于地层上部几英尺厚的岩心渗透率大于1达西,而下部的渗透率平均小于100毫达西。预计聚合物驱的效果最好,可以改善垂向和水平的波及效率。

Webb城周围地区(位于42区)的等厚图(图3)表明,在42-W21井的布尔邦克砂岩的有效厚度达到63英尺(19.2米),9个方案区块面积内的平均厚度超过40英尺(12.1米)^[7]。

表 1 聚合物驱区内井的取心资料

井 号	厚 度 (英尺)	总流动能力 (毫达西-英尺)	渗透率变化 系 数*	平均渗透率 (毫达西)	平均孔隙度 (%)
33W21	31.0	25,406	0.9	820	24.7
34-4A	51.0	16,403	0.8	322	21.3
34W23	28.8	807	0.6	28	18.2
35W21	50.0	4,714	0.6	94	19.4
35W23	40.6	1,054	0.6	26	16.5
41-17	50.0	20,412	0.9	408	21.1
41W21	36.0	36,347	0.9	1,010	25.2
41W25	43.6	20,241	0.9	464	21.3
41W31S	46.7	5,383	0.5	115	18.2
42W21	63.0	11,104	0.8	176	19.7
42W25	51.0	24,145	0.7	473	25.2
43-14A	41.5	12,058	0.8	291	19.6
43W25	46.7	9,073	0.8	194	20.3
50W27	43.3	8,124	0.8	188	17.2
51W23	42.4	1,183	0.5	28	14.7
51W27	59.0	7,588	0.9	129	18.3
52W27	48.0	3,050	0.7	64	14.6

* 数字是近似的。在很多情况下,数据不符合对数正态分布。

41区块油层的孔隙度最高，除51区块和52区块以外，多数区块都超过了18%。渗透率（图4）和流体的流动能力与孔隙度有同样的变化趋势，即在41区块最高，向东降低^[7]。表1列出了方案区的典型岩心分析资料。

基本情况

先导性试验方案

1970年和1971年在40和49区块的160英亩（64.7公顷）面积内开始了聚合物驱先导性试验（4口注入井和12口生产井），以评价Webb城周围高度非均质地区改善垂直和平面波及效率的效果。文献^[1]、^[7]报道了先导性试验的详细情况。4口封闭生产井的采油动态（图5）清楚地表明，通过聚合物驱方法增加了原油产量，而且几年来生产水油比稳定。

地区选择

由于聚合物驱先导性试验在高度非均质的40-49区块获得成功，于是对北布尔邦克的北部进行了研究，选择了9个区块1440英亩（582.7公顷）作为商业性推广试验区。根据以下标准对北部每个区块进行了筛选：

1. 总的初始产能；
2. 一次与二次采油量之比；
3. 区块内井的总流动能力；
4. 注水期间的累积生产水油比。

根据这些标准选择了9个试验区块（图1），它们紧邻最初聚合物先导试验区，并认为这9个区块具有对聚合物驱作出有利反应的高渗透带。

由于在选择区块内有几口井报废了，需要钻20口新生产井和注水井，共需要大修23口井和转产6口井，以便重新建立原先水驱时采用的20英亩（8.1公顷）的交错行列井网，图6示出了最后得到的井网图。5口井取了心，全部新井均进行了测井。而且还钻了6口污水处理井，这些井钻到了较深的Arbuckle灰岩，以便处理产出的高含盐度水（接近90000ppm溶解固体含量），在试验工程的大部分期间内，这些高含盐度水都是用低含盐度Ark-Burbank水（700ppm溶解固体含量）驱替出来的。

方案设计

利用一个可以垂向窜流的两维线性模型对聚合物驱面积内的每个区块进行了油藏模拟研究。应用岩心分析资料获得初步的模拟层，然后根据对水驱油生产历史拟合的需要加以修改。用最好的水驱历史拟合参数和适当的实验室数据在模型中研究多次预冲洗^[10]、交联剂以及聚合物的注入顺序。模拟结果和初步的经济分析表明，40%孔隙体积的聚合物段塞的浓度由500ppm呈对数下降，在经济上是可行的。由一定比例换算后的复合模拟结果，推导出最终产油量，预计方案的总产量为499.2万桶（79.4万米³），生产期需要11年以上。这个生产预测包括了继续注水采出的油量229.2万桶以及实施三次采油方案采出的油量270万桶（43万米³）（占总产量的54%）。产量预测时，假设在预计的11年生产期间内注入速度基本不变，

大约为63000桶/天（10016米³/天）。

实验室的工艺设计

Phillips研究人员应用取自33-W29和41-W28井的岩心进行了实验室试验，以帮助选择用于驱替的专门聚合物及最佳交联剂（柠檬酸铝）的浓度和注入顺序^[11]。Phillips聚合物—柠檬酸铝—聚合物方法的注入顺序是：先注入聚合物，然后是柠檬酸铝，最后注入聚合物溶液。该方法可形成聚合物、柠檬酸铝和聚合物的顺序层。这种顺序层可形成交联聚合物网络或胶状结构，增加了水的流动阻力。

平行于层理面切割岩心柱，然后抽提，用环氧树脂密封，按常规用人工配制的油田盐水驱替到残余油饱和度（油田盐水中可溶固体总量9万ppm左右）。接着在岩心中按顺序注入：预冲洗淡水，聚合物，水隔离段，柠檬酸铝，水隔离段，第二次注入聚合物，最后用预冲洗时用的淡水和人工配制的油田盐水进行彻底的后冲洗。阻力系数（RF）为水的初始流量与聚合物溶液的流量之比，而剩余阻力系数（RRF）为水的初始流量与注完聚合物和/或注完柠檬酸铝后的水的流量之比，一般说来注聚合物后对淡水的残余阻力系数平均为8左右。而在这些试验中，在注柠檬酸铝过程结束后的残余阻力系数约为44。聚合物吸附量平均为100磅/英亩-英尺（0.037公斤/米³）。铝的滞留量约为175磅/英亩-英尺（0.064公斤/米³）。第二个聚合物段塞的聚合物滞留量为250磅/英亩-英尺（0.092公斤/米³）。第二次聚合物滞留仅出现在首先与柠檬酸铝溶液接触的油层部分。

根据实验室试验，油藏模拟结果的比较和对价格的考虑，为这项方案购买了液体乳状聚合物产品Dow i-357（Dowell 1000E）和浓度为2.9%的柠檬酸铝（Magnablend股份有限公司生产）。

方案实施

矿场施工

在9个区块1440英亩（582.7公顷）的方案区内，共包括36口注入井和84口生产井^[14]。共建立了两个独立的聚合物混合站，其中41站用于西部的6个区块，43站用于东部的3个区块。把液体乳状聚合物（30%活性聚丙烯酰胺）由生产厂装运到铁路线附近，再用专用罐车分别送到每个混合站的储罐中，罐的容量为545桶（86.6米³），能加热和保温。聚合物储罐的设计能将乳状聚合物的温度保持在50—140°F（283—335°K）之间，以便尽量减少寒冷天气的处理问题。用氮气覆盖大罐，使氧气引起的降解减至最低。聚合物连续循环，以防止由于重力沉淀作用引起的分离。Moffitt等人报道了聚合物混合和稀释过程的细节^[15]。由原来钻在Arkansas河附近的（现在位于Kaw水库下面）几口水源井获得Ark-Burbank淡水（700ppm溶解固体含量）。在施工初期为了减少聚合物溶液的机械剪切，需要改变管线布置，仅仅在这时发生过与注聚合物有关的油田施工问题。

在17天内注完了柠檬酸铝段塞。因此，将浓缩溶液用卡车运送到油田后，即储存在500桶（79.5米³）的压裂罐中。用Ark-Burbank淡水把柠檬酸铝稀释成500ppm浓度的有效溶液。

6口Arbuckle灰岩裸眼井的产出盐水处理能力降低了（最初水的总处理量为60000桶/天[9539米³/天]），这是因为产出的水中带有油。生产井产出的液体中带有聚合物，而且随产出的淡水的百分率增大，盐水的水压头降低^[15]。采用了各种处理方法都收效不大。最后只得将试验区产出的水重新注入到附近的非聚合物驱区块。同时把不含聚合物的100%盐水输送到处理井，以确保试验区内的注入能力不受处理井处理能力的限制。

质 量 控 制

从每个铁路罐车和每个卡车罐车取出液体乳状聚合物样品进行分析。由研究人员确定产品的粘度、稀释浓度下的粘度、筛网系数和固体百分含量，以确保注入聚合物的质量^[15]。每个罐车的柠檬酸铝都要取样分析细粒杂质，并进行“快速凝胶”试验，以证实交联剂质量是在技术要求之内。研究人员进一步分析了柠檬酸铝中的铝（原子吸收）和柠檬酸盐（红外光谱）的含量，以确保其浓度和摩尔比（1.8—1.0）也保持在技术要求之内。

在泵站，把丙烯醛（由Baker化学公司提供的一种杀菌剂）加入到淡水中，以最大限度地减少硫酸还原菌的形成。为了防止聚合物氧化降解，在聚丙烯酰胺混合站上游约一英里处往Ark-Burbank水中加入除氧剂——亚硫酸氢铵。

流 体 注 入 顺 序

在表2和表3中分别详细列出了41和43区块的混合注入站注入流体的顺序和注入量。1980年9月29日在试验工程区的西部2/3面积内（41区块的注入站）开始注淡水预冲洗，大约两个月以后，在试验区东部1/3面积内（43区的注入站）开始预冲洗^[15]。设计的淡水预冲洗是为了尽量减少对盐敏感的聚合物段塞受到盐水的损害。在存在高矿化度水的情况下，特别是在含有二价离子的情况下，聚合物—柠檬酸铝—聚合物体系的效果降低。油藏模拟^[10]表明，由于高矿化度盐水垂向窜流并与聚合物混合，聚合物将受到损害，只有经过相当长时间的预冲洗（3年或更长时间）后才能得到明显的改善。因此，为了施工方便和经济上的考虑，认为13.46%和8.63%孔隙体积的预冲洗较为合适。1981年4月25日开始在41区块和43区块的两个混合站注入第一个聚合物段塞（500ppm有效物）。设计第一个聚合物段塞的目的是为了让它们吸附到油层岩石上，以便与阴离子键合和/或提供与铝交联的位置。在注入了4%孔隙体积的（聚合物总量的18%）500ppm的有效聚集体后，于1981年7月6日结束了第一聚合物段塞的注入工作^[15]。接着注入了很短的淡水隔离段，以便将聚合物溶液从井底附近驱走。然后注入总量为402万磅（182.3万公斤）、铝浓度为500ppm的柠檬酸铝Ark-Burbank水溶液^[15]。聚合物—柠檬酸铝—聚合物这一注入顺序的目的在于使聚合物分子交联为层状凝胶网络结构，以便大大地提高剩余阻力系数。该过程优先在油藏中的裂缝和高渗透率带起作用，因此，减少了注入液体流向生产井的直接通道，增加后续流体的波及效率，并可降低抽油井的液面。图7所示的11口井由于注入速度已经很低，而井口压力相当高，因此没有注柠檬酸铝。在柠檬酸铝之后接着注入第二淡水隔离段，以防止聚合物在井底附近凝胶和交联。在柠檬酸铝和淡水隔离段之后，于1981年8月27日再次开始注入有效浓度为500ppm的聚合物。为更换管道，500ppm的聚合物注入中断了几天，改为用三缸注入泵在下游注入浓缩聚合物，代替了原来设计的在注入泵的上游注入。使后面的聚合物段塞的剪切降至最低，要比最初用来形成剩余阻力系数吸附层的第一个聚合物段塞更为重要。根据油层模拟

所制定的原设计方案，把淡水中的聚合物有效浓度降低到250ppm，然后降低到50ppm。在方案的36口注入井中共注入了417万磅（1890吨）的Dow i-357聚合物。在注完50ppm聚合物段塞之后，于1983年后期，开始注Ark-Burbank淡水进行后冲洗（表2和表3）。实验室研究表明，在注入淡水的条件下，凝胶聚合物的剩余阻力系数仍旧比在注入产出的高矿化度盐水条件下的高。因此，43区块和41区块的混合站分别于1985年元月8日和6月7日一直连续

表 2 41区块注入系统的流体注入顺序

注 入 流 体	开始日期	持续时间 (天)	体 积 (桶)	纯有效化学剂量 (磅)	占总孔隙 体积*百分数 (%)
淡水预冲洗	80年9月29日	211	9,127,000	—	13.46
第一批聚合物500ppm	81年4月28日	69	2,984,800	480,000	4.40
淡水隔离段	81年7月6日	17	717,400	—	1.06
柠檬酸铝	81年7月23日	16	544,900	92,810	0.80
淡水隔离段	81年8月8日	19	537,600	—	0.79
第二批聚合物500ppm	81年8月27日	12	522,200	90,350	0.77
淡水	81年9月8日	22	329,800	—	0.49
聚合物500ppm	81年9月30日	236	7,990,000	1,382,405	11.78
聚合物250ppm	82年5月25日	215	6,939,500	623,570	10.24
聚合物50ppm	82年12月27日	338	10,171,500	172,674	15.00
淡水后冲洗	83年11月30日	555	17,134,367	—	25.27
回注生产的盐水	85年6月7日	到1985年8月仍在进行			

41区块注入聚合物总量2,748,999磅。

*：根据孔隙体积6780万桶计算。

表 3 43区块注入系统的流体注入顺序

注 入 流 体	开始日期	持续时间 (天)	体 积 (桶)	纯有效化学剂量 (磅)	占孔隙体积 百分数* (%)
淡水预冲洗	80年12月5日	144	2,570,800	—	8.63
第一批聚合物500ppm	81年4月28日	69	1,231,800	240,000	4.13
淡水隔离段	81年7月6日	17	292,100	—	0.98
柠檬酸铝	81年7月23日	17	133,700	22,773	0.45
淡水隔离段	81年8月9日	18	275,000	—	0.92
第二批聚合物500ppm	81年8月27日	35	579,500	99,976	1.94
淡水	81年10月1日	7	130,200	—	0.44
聚合物500ppm	81年10月8日	194	3,417,800	589,642	11.47
聚合物250ppm	82年4月20日	202	3,470,500	400,199	11.65
聚合物50ppm	82年11月8日	310	5,255,000	95,407	17.63
淡水后冲洗	83年9月14日	482	7,345,277	—	24.65
回注生产的盐水	85年1月8日	到1985年8月仍在进行			

43区块注入聚合物总量：1425224桶。

* 根据孔隙体积2980万桶计算。

注淡水，在此之后再次注产出的油层盐水。原方案设计的注入速度大约为63000桶/天(10016米³/天)。然而在注聚合物阶段，由于聚合物粘度升高和阻力效应，平均总注入速度仅在45000桶/天(6559米³/天)的范围内。降低注入速度是为了保持注入压力低于油层的破裂压力梯度。

特殊处理和注入

由1982年8月25日起的57天内，注入到52区块的聚合物浓度从250ppm增加到750ppm，注入的有效聚合物总量大约为100000磅(45359公斤)^[15]。由于在52区块停工时间较长，使该区块内的聚合物累积注入量大大落后，因此，需要采取一些特殊处理措施。为了减少高吸水能力注入井的注入量，1982年还成功地应用了几个小规模柠檬酸铝处理工艺。以前的矿场研究表明，所有机械截流阀都使聚合物发生明显的剪切降解^[15]。因此，使用这些截流阀是不合要求的。在这些小规模的特殊处理中，先在淡水中稀释1到10桶浓缩柠檬酸铝，停止注入聚合物，然后从罐车中把柠檬酸铝泵入到选择的注入井内。再继续注聚合物几小时，然后再关井24小时左右。应用该方法成功地降低了几口井的注入能力，使注入井网达到平衡^[11,15]。采用该技术的唯一企图是使注入流体分流，不再进入吸收高的那部分油藏。

方案的监控和反应

对方案中的每口井都按一定时间间隔采集产出水的样品。研究人员分析这些水样的含盐量和聚合物浓度。关于这些，Bruning等人已作了评述^[11]。遗憾的是，由于此方案包括的井数较多，不可能按所希望的那样经常取样，因此，每口井的淡水和聚合物的突破时间，以及实际产出量有些不太可靠。根据每口井的生产试验(通常每月进行两次)和总的生产时间，把每个选油站实际销售的油量分配给每一口井，以此确定试验区内油井的采油速度。流体注入量也根据试井以及在聚合物混合站所用的总Ark-Burbank水量进行分配。

淡水生产

注入的Ark-Burbank淡水既作为预洗液，也作为柠檬酸铝和大量聚合物段塞的溶剂，同时也作为一种便宜的示踪剂。定期采集产出水样，分析几种阳离子的浓度(Na⁺、Mg²⁺、Ba²⁺和Fe³⁺)、氯化物百分含量，pH值和比重^[15]。该数据是取样频率的函数，可用来计算每口生产井采出淡水的百分数。根据含盐量数据和每口井的采出盐水的速度计算各井的淡水累积采出量。在41区块混合站注入淡水预冲洗时，很快发生淡水突破。41区块注入淡水7天后，3口生产井的含盐量降低。一个月后，有10口生产井的含盐量明显降低，同该天然裂缝油层预测的结果一致^[15]。最早的淡水突破发生在33、34和50区块。淡水突破较晚的井是在25、26、27和41区块以及东部的油井，在这些地区，两个月以后才出现淡水突破。然后到1985年2月，33、41和42(表3)区块产出的水量占总产水量的一半。正如所料，在唯一完全封闭的42区块，其淡水产出量最高(17.6%)。各区块产出的和注入的淡水量有一定的相互关系，仅有少数例外(图8)。25、26和27区块没有注淡水，它们主要受33、34和35区块最北部注入井排的影响。33和42区块产出的淡水百分率明显地比根据相对注入量预测的百分率大。52区块是低流动能力区块，产出的淡水量比预测的要小。

表 5 列出了淡水累积产量最大的10口生产井的资料。其中 7 口井位于42和33区块。51-1 井的邻井开始注水近两年以后, 51-1 井的淡水产量最高 (95%淡水)。经检测, 试验区内84口井的淡水含量都很高。

表 4 到1985年 2 月各区块的淡水注入量和采出量以及占总量的百分数

区 块	注 入 量		采 出 量	
	(百万桶)	(%)	(百万桶)	(%)
25	0	0	0.64	2.3
26	0	0	0.46	1.6
27	0	0	0.17	0.6
33	9.07	11.1	4.68	16.6
34	7.68	9.4	2.21	7.8
35	6.04	7.4	1.46	5.3
41	11.60	14.2	3.80	13.4
42	10.29	12.6	4.97	17.6
43	10.21	12.5	2.77	9.9
50	8.25	10.1	2.79	9.9
51	8.58	10.5	2.78	9.9
52	9.97	12.2	1.44	5.1
总 计	81.69	100.0	28.17	100.0

表 5 采出淡水最多的10口生产井

序 号	井 号	采 出 数 量 (千桶)	在产出盐水中的淡水 最大含量 (%)	占总采出量的百分数 (%)
1	41-1	883.7	90	3.14
2	42-03	867.7	85	3.08
3	33-03	807.8	76	2.87
4	33-01	708.9	80	2.52
5	42-1	705.7	87	2.51
6	42-2	650.2	91	2.31
7	42-10	643.6	80	2.29
8	50-5	638.5	82	2.27
9	33-11	619.7	83	2.20
10	43-3	612.6	78	2.18

聚合物的采出

1981年 4 月28日, 41区块和43区块的注入系统开始注有效浓度为500ppm的聚合物^[15]。24天以后, 34-11井最先见到聚合物突破, 再次显示出裂缝性油层的特性。一般来说, 淡水突破较早的那些井, 也是聚合物突破较早的井, 而且产生的聚合物也较多, 如图 9 所示。值得注意的是, 在10口聚合物突破井中 6 口井 (34-12、34-11、35-06、50-04、50-05 和 50-15) 正好与未注入柠檬酸铝的注入井相邻。截至1985年 2 月, 在84口生产井中有44口井

都检测到了聚合物。1983年后期，注聚合物是不连续的。在1984年5月采集到的产出水样，基本上均未检测到聚合物。

表6列出了聚合物产出最多的10口生产井的资料。其中3口井(51-12、50-15和50-05)与未注柠檬酸铝的注入井相邻。这10口井均处于相邻的两个生产井排，即方案试验区南部的第二排和第三排上。大约在注聚合物后的7个月，即1981年11月在另一口生产井34-29井检测到了最大的聚合物浓度(112ppm)。

各区的聚合物累积注入量和采出量列在表7中。到1985年2月，产出的聚合物量大致相当于注入量的3.8%。唯一完全封闭的42区块采出的聚合物量几乎占采出总量的1/4。42、43、50和51等四个区块注入的聚合物总量仅占46%，而产出的聚合物总量却为75%。在25和

表6 产出聚合物最多的10口生产井

序号	井号	聚合物开始采出的日期	数量(磅)	最大浓度(ppm)	占总采出量的百分数(%)
1	42-3	82年4月6日	10,704	57	6.7
2	51-12	81年9月22日	9,542	81	6.0
3	43-3	82年4月6日	8,379	48	5.3
4	51-11	82年4月6日	7,494	51	4.7
5	42-04	82年7月19日	6,567	62	4.1
6	42-1	82年7月19日	6,047	51	3.8
7	50-15	81年6月5日	5,990	69	3.8
8	41-1	82年12月2日	5,850	63	3.7
9	43-4	82年7月19日	5,825	48	3.7
10	50-05	81年8月25日	5,671	75	3.6

表7 到1985年2月各区块注入聚合物数量和产出数量以及占总量的百分数

区块	注入量		产出量	
	(千磅)	(%)	(千磅)	(%)
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	2.8	1.7
33	446.6	10.7	10.3	6.5
34	350.6	8.4	16.9	10.7
35	338.1	8.1	5.3	3.4
41	587.7	13.6	5.9	3.7
42	542.6	13.0	37.2	23.5
43	521.8	12.5	25.4	16.0
50	384.0	9.2	26.2	16.5
51	480.0	11.5	27.7	17.5
52	542.6	13.0	0.9	0.5
总计	4174.0	100.0	159.0	100.0

26区块采出的流体中还未检测到聚合物。在41区块和52区块各只有一口井即41-1和52-28井产出了聚合物。

采油动态

试验方案区采用 Phillips 聚合物—柠檬酸铝—聚合物方法后，平均采油速度有了明显提高（图10）。到1982年末，采油速度从方案前的不到15000桶/月（2384米³/月）增加到1982年末的最大值36000桶/月（5723米³/月），翻了一番多。至1985年5月，平均采油速度仍达到32000桶/月（5087米³/月）。43和41区块的注入站，分别在1985年1月和6月恢复注入高矿化度盐水。根据北布尔邦克97区块的表面活性剂/聚合物驱先导性试验的经验^[5]，预计这一改变不会使递减速度加快。显然，相当一部分增产的油量来自新井^[15]。由于上述影响，在1981年初，采油速度由大约15000桶/月（2384米³/月）增加21000桶/月（3338米³/月）以上，1981年3月到8月出现的产量递减，主要是由于注入速度指标定得低以及盐水处理能力降低引起的。在1981年的四季度，首先检测到聚合物驱的效果。此时，采油速度从不到15000桶/月（2384米³/月）增加到2000桶/月（3497米³/月），采出的水油比相应下降到80以下。

1980年1月1日到1984年11月，方案的总累积产油量为153.7万地面桶（24万米³），假定每口井的经济极限为2桶/天（0.31米³/天），试验工程区内的总储量为287万地面桶（45万米³）。到2003年2月，试验工程的总采油量将达到440.7万地面桶（70万米³）。到1984年11月，大约56%的产油量（85.4万桶〔13.57万米³〕）属于试验工程的增产油量。假设一个不太乐观的经济界限为单井5桶/天（0.79米³/天），到1984年7月，计划方案的总产油量将为350.5万地面桶（55.7万米³）。据分析，专门的操作费用可能使实际的经济极限变化范围将在2—5桶/天（0.31—0.79米³/天）之间，以后将根据实际情况作出关闭生产井的决定。

应用递减曲线的最佳拟合分析方法，计算了每口生产井的增产油量，以便进行比较和评价。增产油量最大的10口井（列在表8中），从1980年1月到1985年2月的增产油量几乎占增产油量的54%。其中，只有2口井33-16和35-04井，不位于三个中心区块（41、42和43区）。这10口井中有4口井位于唯一的完全封闭的42区块。在这10口增产油量最多的井中，多数井的水油比在1982年中期到1983年中期最低，小于20。图11和图12，分别表示一口新井（43-03井）和一口老井（42-01井）的动态反应。

把每口井的增产油量加起来，即获得表9中各个区块的开采结果。42区块封闭的重要性是很明显的。该区块内的8口井，采出了总增产油量的27.9%。图13示出了42区块极好的开采动态反应。三个中心区块（41、42和43区）占总增产油量的62.5%，三个北部区块（33、34和35）和三个南部区块（50、51和52区）分别占19.3%和18.8%。在25、26和27区块的井无明显的增产油量。

图14示出了三类井的井位，即产聚合物最多的，产淡水最多的和增产油量最多的井，每类都有10口井。中心区块（42）和三个中央区块（41、42和43区）的重要性是显而易见的。中央区块中有4口井（41-01、42-01、42-03和43-03）属于三类都是产出量最多的井；产出聚合物最多的10口中有5口井不属于另两类之列。统计分析了大量油层参数、聚合物和淡水的注入量及采出量。除了增产油量，Lorenz系数和封闭程度之间存在一定关系外，其它资料都无明显的相互关系。可以预料，具有较高非均质性和封闭性区块。通过聚合物驱方法

可以获得较多的增产油量。

表 8 增产油量最多的生产井

序号	井号	产 量 (桶)	占总产量的 百分比 (%)	最低水油比	最低水油比 的日期
1	43-03	96,056	10.7	8.7	82年6月
2	42-03	76,712	8.5	11.6	82年9月
3	41-01	67,307	7.5	13.0	83年3月
4	43-14	49,365	5.5	9.6	84年2月
5	42-10	36,272	4.0	19.6	83年9月
6	41-01	35,417	3.9	16.1	82年7月
7	42-11	32,834	3.7	12.1	82年7月
8	42-02	32,671	3.6	14.3	85年4月
9	33-16	29,568	3.3	20.3	83年6月
10	35-04	28,760	3.2	11.0	83年5月

表 9 各区块增产的油量(到1985年2月占总增产油量的百分数)

区 块	产 油 量 (千桶)	占总产油量的百分数 (%)
25	1.2	0.1
26	3.7	0.4
27	-10.6	-1.2
33	54.1	6.0
34	65.7	7.3
35	53.5	6.0
41	110.0	12.3
42	250.4	27.9
43	200.7	22.3
50	82.7	9.2
51	67.8	7.5
52	18.7	2.1

注 入 井 动 态

注入 Phillips 聚合物—柠檬酸铝—聚合物体系，确实能使注入速度明显降低，方案试验区注入井的井口压力显著上升，这证明了聚合物体系提高了高渗透孔道和高渗透带内的流动阻力，因而提高了水平和垂直方向上的波及效率，这是原油增产的主要原因。表10列出了42区块4口井的注入速度和井口压力的典型数据。井口压力一般都随着聚合物的注入而上升。注入速度与原设计的63000桶水/天（10,016米³/天）相比，到1983年7月降到了45200桶水/天（7186米³/天）。在两年淡水后冲洗期间，井口压力仍然是较高的，但总的流体注入速度明显增加，到1985年5月达到52000桶水/天（8267米³/天）。预计在重新注盐水以前，注入能力还会继续增加，但重新注盐水后，凝胶聚合物层的残余阻力系数会被高矿化度盐水将部分降解。

在几口注入井周期地进行降压试验，以监测地下流体的流动能力、平均油层压力变化和井筒的趋肤效应。根据分析^[15]，在注入250ppm聚合物阶段，流度一般降到淡水预冲洗时测得的流度的25%到50%。在500ppm聚合物注入期间，平均油层压力上升。而在250ppm聚合物注入期间，油层压力趋于稳定。在整个降压试验过程中，趋肤系数保持相对固定为-5.5，这表明注入聚合物和柠檬酸铝时，井底附近没有发生明显的堵塞。

表 10 北布尔邦克聚合物驱方案42区块注入井注入速度和井口压力

日期	42W25		42W28		42W29		42W30		注入相
	桶水/天	磅/英寸 ²	桶水/天	磅/英寸 ²	桶水/天	磅/英寸 ²	桶水/天	磅/英寸 ²	
81年1月16日	1805		1885	16	1926		2005		淡水预冲洗
81年6月15日	1870	160	1440	90	2531	160	2160	170	第一批聚合物
81年8月5日	2924	200	1915	125	2640	205	2381	190	柠檬酸铝
81年10月7日	2713	350	1841	280	2717	280	2404	280	第二批聚合物， 500ppm
81年12月2日	1461	360	1673	325	1994	265	1764	265	第二批聚合物， 500ppm
82年11月2日	790	460	1470	430	2950	390	2350	430	第二批聚合物， 250ppm
83年7月2日	390	510	950	500	2220	500	1980	480	第二批聚合物， 50ppm
83年11月23日	660	410	1040	410	2450	390	1870	400	淡水后冲洗
84年7月15日	995	503	861	500	2355	506	1907	480	淡水后冲洗
84年11月2日	896	440	832	465	1897	405	1843	445	淡水后冲洗
85年5月22日	1156	495	580	485	1868	475	1925	490	回注产出的盐水

方案成本

这一节包括以前公布的试验方案费用与实际工程费用的比较。实际费用以1979年美元价格表示，采用适当的历史通货膨胀系数，这样就可以直接与原估算值对比。

井和地面设备成本

井和地面设备的成本（表11）包括新井、大修、转注、管线、泵、混合设备、大罐、以及为混合聚合物而修建的建筑物。根据以1979年美元表示的费用记录确定的实际成本，大约比原方案费用少25%。为这个项目专门花费的费用包括在这些数字中。

化学剂成本

化学剂总成本主要包括聚丙烯酰胺和柠檬酸铝的成本。聚丙烯酰胺价格为每磅有效物1.6美元（3.55美元/公斤），每磅柠檬酸铝溶液价格为0.23美元（每公斤溶液0.51美元）。聚合物购买价格定期调整。与Dow公司签定的每个购买合同反应出原材料和能源成本的变化。化学剂的实际成本比原设计大约低20%。

表 11 增加的费用总计(1979年美元)

项 目	原 方 案	到1984年实际费用
油井和地面设备费用	5,735,300	4,388,719
化 学 剂	7,977,000	6,321,945
采油成本	5,757,500	22,636,201 ⁽¹⁾
小 计	19,469,800美元	33,346,865美元
每桶油的化学剂费用	2.95美元 ⁽²⁾	1.98美元 ⁽³⁾
每桶油的总费用	7.21美元 ⁽²⁾	10.46美元 ⁽³⁾

- (1) 包括到2003年计划增加的采油成本。
 (2) 计划11年生产期增产的油量为2,700,000桶。
 (3) 计划23年生产期增产的油量为3,186,879桶。

采 油 成 本

表11所示的采油成本是试验方案区内继续注水所增加的成本。方案的持续时间和成本增加这两个因素是造成实际成本超过原设计成本的主要原因。

注水时有51口生产井,为实现20英亩(8公顷)井距,总共需要84口生产井,因此,方案开始实施时还需要补充33口生产井。假定经济极限为每口井2桶油/天(0.31米³/天),那么原注水生产井到1993年中期就没有经济价值了。因此,1993年以后,全部84口生产井的采油成本都包括在方案增加的成本中。假定再以每口井2桶油/天(0.31米³/天)作为经济极限,原方案预计生产11年,而实际要延长到23年。这是因为实际注入速度比预测的低,产量增长的幅度不如设计的大,而递减的速度比原来设计的低。部分原因是由于在方案设计中应用了二维模拟。其次,如表12所示,在1980—1983年期间采油成本显著增加,这主要是由于劳动力、电力、燃料、井的维修、化学剂处理等的成本增加了。成本增加还与聚合物驱试验区内的腐蚀有关。

表 12 北布尔邦克区聚合物驱方案的采油成本分配

项 目	1980 (美元)	1981 (美元)	1982 (美元)	1983 (美元)
劳 动 力	32,827	75,495	90,847	96,584
材料和供应	20,282	68,118	16,614	42,951
化学剂处理	59,000	81,179	113,000	183,000
电 力	28,252	69,491	76,622	80,053
燃 料 和 水	297,538	781,815	822,449	711,991
盐 水 处 理	27,667	13,802	45,540	11,021
地 面 维 修	400,212	274,378	299,729	367,736
钻杆、管线、泵、零部件等	154,853	510,130	1,201,299	921,415
修 井	29,818	78,358	60,214	61,321
运 输	42,599	90,673	137,325	135,842
其 它	5,181	6,772	12,473	(491)
总 计	1,098,229	2,050,211	2,876,112	2,611,423

成本小结

表11示出了增产每桶原油的化学剂成本及总成本，并与原设计进行了比较。这些成本明显地低于原油的平均销售价格（表13）。标准贴现现金流量分析表明，因从投资中可以取得合适的利润，因此该方案是经济的。

推广应用

最近考虑在北布尔邦克区推广这个聚合物驱方法。遗憾的是，目前预测的原油价格比较低，前期投资（Front-end）以及方案见效的时间长，这些因素加在一起，使得在目前经济条件下推广这个方案的经济价值处于边缘状态。只有改进工艺方法或设计和/或提高预期的原油价格，才可能最终产生一个推广的方案。

表 13 北布尔邦克区平均原油销售价格

年	原油价格(美元/桶)
1980	38.20
1981	36.15
1982	32.95
1983	30.20
1984	30.00

结论

根据北布尔邦克A区聚合物驱方案的经验得出以下结论：

1. 在高度非均质的北布尔邦克区采用Phillips聚合物—柠檬酸铝—聚合物方法进行聚合物驱，在经济上和技术上都是有吸引力的。
2. 从1980年1月到1984年11月，试验工程的总累积产油量为153.7万地面桶（24万米³）。假设每口井的经济极限是2桶油/天（0.31米³/天），方案区的总储量为287万地面桶（43万米³）。
3. 完全封闭的42区块的总增产油量占目前增产油量的25%以上。新的或推广方案都应设计成使完全封闭井或区块数达到最大。
4. 井口压力的增加和注入能力的降低，都说明了聚合物驱方法在高渗透带造成了流动阻力，从而提高了油层的波及效率。在推广方案中，也应预计到油层注入能力的降低。
5. 压力降实验说明，聚合物—柠檬酸铝—聚合物方法可以在油田成功地应用，而不会在井底附近产生明显的堵塞问题。
6. 根据聚合物突破时间，看来柠檬酸铝交联有助于最大限度地减少聚合物直接流向生产井。

参 考 文 献

1. Clampitt, R. L., and Dodd, T. B.: "An Economic Polymerflood in the North Burbank Unit, Osage County, Oklahoma", SPE No. 5552, presented at the Fall Meeting, Society of Petroleum Engineers, Dallas Texas, 1975.
2. Phillips Petroleum Company: North Burbank Unit Tertiary Recovery Pilot Test, BERC/TPR76-2 (July 1976).
3. Phillips Petroleum Company: North Burbank Unit Tertiary Recovery Pilot Test Second Annual Report, May 1976 - May 1977, BERC/TPR-77/5, (August 1977).
4. Phillips Petroleum Company: North Burbank Unit Tertiary Recovery Pilot Test Third Annual Report, May 1977 - May 1978, BERC/TPR-78/8, (August 1978).
5. Lorenz, P. B., Trantham, J. C., Zornes, D. R. and Dodd, C. G.: "A Postflood Evaluation of the North Burbank Surfactant/Polymer Pilot", SPE/DOE 12695, presented at the Fourth Symposium on Enhanced Oil Recovery, Society of Petroleum Engineers/Department of Energy, Tulsa, Oklahoma, (April 1984).
6. Trantham, J. C.: "Prospects of Commercialization Surfactant/ Polymerflooding, North Burbank Unit, Osage County, Oklahoma", SPE 9816, presented at The Second Joint Symposium on Enhanced Oil Recovery, Society of Petroleum Engineers/ Department of Energy, Tulsa, Oklahoma, (April 1981).
7. Trantham, J. C. and Moffitt, P. D.: "North Burbank Unit 1,440-Acre Polymer Flood Project Design", SPE/DOE 10717, presented at the Third Joint Symposium on Enhanced Oil Recovery, Society of Petroleum Engineers/Department of Energy, Tulsa, Oklahoma, (April 1982).
8. Trantham, J. C., Threlkeld, C. B., Patterson, R. L., Jr.: "Reservoir Description for a Surfactant/Polymer Pilot in a Fractured, Oil-Wet Reservoir - North Burbank Unit Tract 97", J. Pet. Tech. (September 1980), 1647-1656.
9. Trantham, J. C. and Clampitt, R. L.: "Determination of Oil Saturation After Waterflooding in an Oil-Wet Reservoir The North Burbank Unit Tract 97 Project", SPE 5802, presented at the Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma (March 1976).
10. Pang, H. W., Fleming, P. D., and Boneau, D. F.: "Design of Preflush for Commercial Scale Polymerflood in the North Burbank Unit", SPE 9779, presented at the Second Joint Symposium on Enhanced Oil Recovery, Society of Petroleum Engineers/Department of Energy, Tulsa, Oklahoma (April 1981).
11. Bruning, D. D., Hedges, J. H. and Zornes, D. R.: "Use of the Aluminum Citrate Process in the Commercial North Burbank Unit Polymerflood", presented at the Fifth Tertiary Oil Recovery Conference, University of Kansas TORP, Wichita, Kansas (March 1983).
12. Gall, J. W.: "Subterranean Formation Permeability Correction," U. S. Patent 3,762,476 (October 2, 1973)
13. Needham, R. B., Threlkeld, C. B., and Gall, J. W.: "Control of Water Mobility Using Polymers and Multivalent Cations", SPE 4747, presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, (April 1974).
14. Thomas, C. P.: "The Mechanism of Reduction of Water Mobility by Polymers in Glass Capillary Arrays", SPE Journal (June 1976) 130-6.
15. Moffitt, P. D. and Mitchell, J. F.: "North Burbank Unit Commercial Scale Polymerflood Project-Osage County, Oklahoma", SPE 11560, presented at the 1983 Production Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma (February 1983).

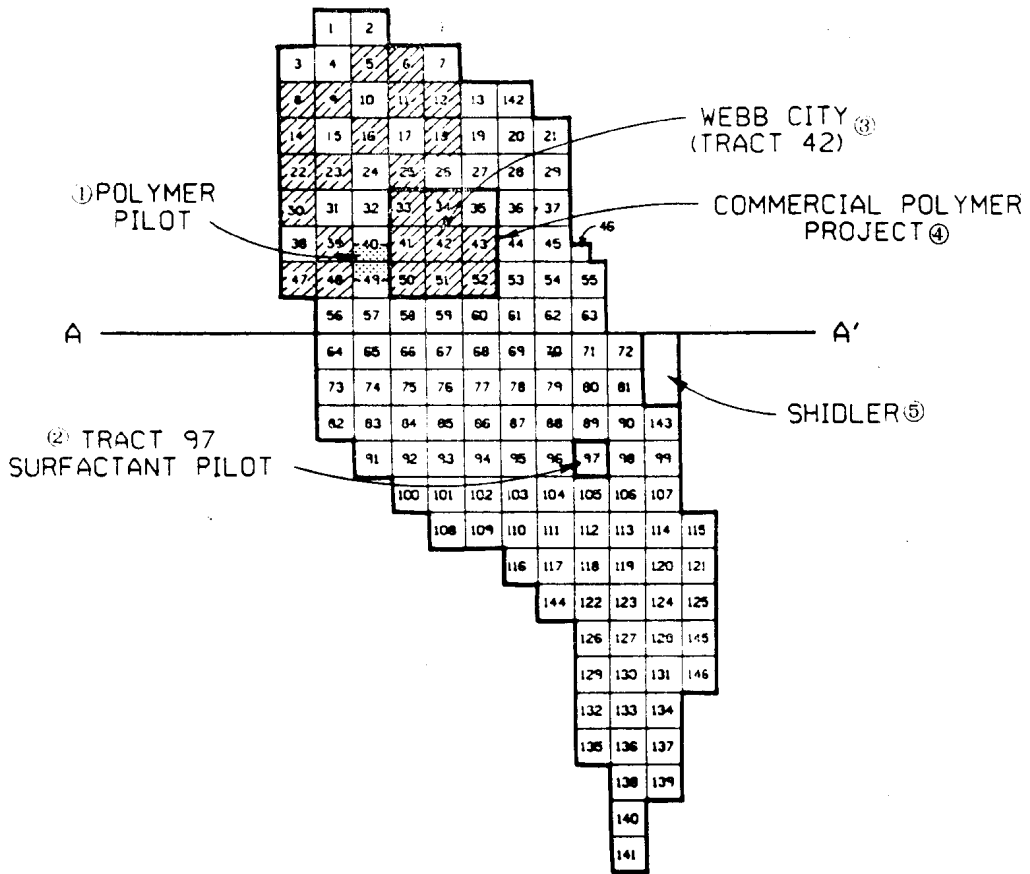
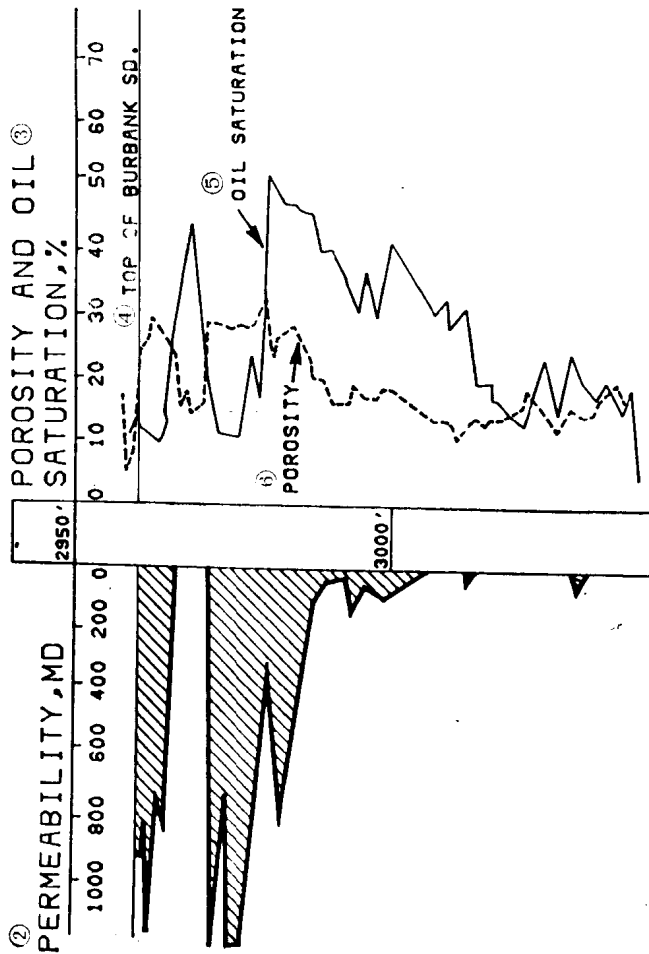


图 1 北布尔邦克化学驱活动范围

- ① 聚合物先导性试验区；② 表面活性剂先导性试验区；③ Webb 市 (42 区块)；
④ 工业聚合物驱 方案区；⑤ 地名

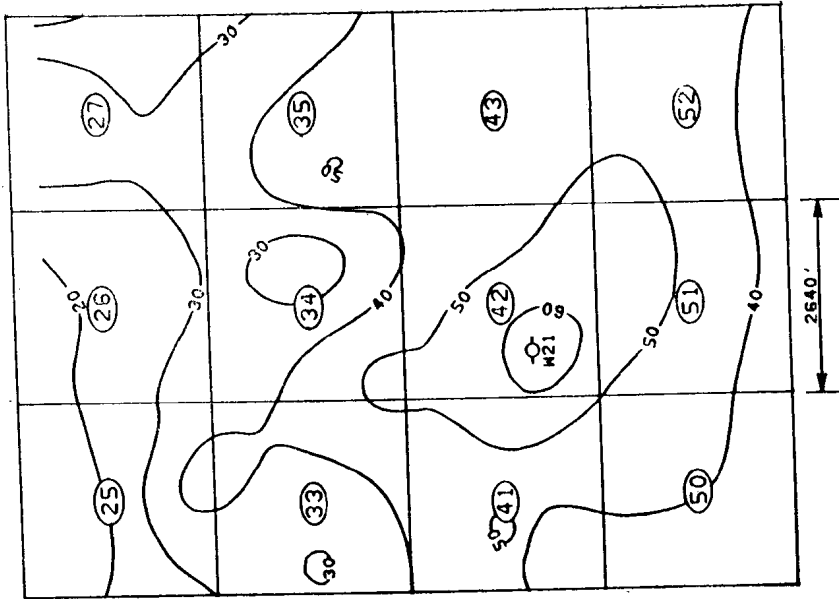
① NBU 41-17



⑦ TD3046'

图 2 北布尔蒙克区典型的岩心剖面

①北布尔蒙克区41-17井; ②渗透率, 毫达西; ③孔隙度和含油饱和度, %; ④Burbank砂岩顶;
⑤含油饱和度; ⑥孔隙度; ⑦总深, 3046英尺



① CONTOUR INTERVAL 10 FEET

图 3 试验方案区等厚图

① 等值间隔10英尺