

聚丙烯酰胺垂向波及方法改善 OK油田扫油效率和采收率

H. Surkalo, M.J.Pitts
Surtek Inc.
B. Sloat, D.Larsen
Tiorco Inc.

梅佑黔 译
杨普华 校

摘 要

OK油田位于美国怀俄明州的Campbell县。产油层深度约8050英尺(2454米)。油田为Universal Resources公司经营。油层的Dykstra-Parsons变异系数高达0.85,流度比为2.5。该油藏一次采油大约历时两年,采出原始地质储量的3.8%(0.03倍孔隙体积)。最终一次采油量估计为原始地质储量的11.8%(0.09倍孔隙体积)。在一口单井中注了三个月的水。当时,曾用阳离子和阴离子聚丙烯酰胺以及铝交联的方法处理注水井,以改善垂向波及系数。后又将两口生产井转为注水井,并在注水的同时用化学剂进行了处理。根据1985年6月的资料,一次采油和聚合物扩大注水采油的总采收率是原始地质储量的41.9%(0.31倍孔隙体积)。用化学方法采油净增的油量估计为671,035桶。

为了对化学采油方法作出评价,设计了实验室径向岩心驱动试验,试验结果指出:化学方法具有采出更多原油的潜力。将控制流度的聚合物和碱—聚合物注入从相邻两个油田取得的岩心和流体中,采出的油量分别比注水多0.1和0.15倍孔隙体积。在OK油田,表面活性剂体系(胶束—聚合物和低浓度表面活性剂—聚合物驱)比注水多采0.31倍孔隙体积的油。

引 言

OK油田位于Powder River盆地的东北部,怀俄明州的Campbell县(图1),原油产自Minnelusa层。Minnelusa层是Powder River盆地内100多个油田的产油层。其特点是一次采油能采出原始地质储量的5—8%,通常对注水反应迅速,在1至6个月内就可见到注水效果。二次采油的采收率高,为原始地质储量的45%。

使用聚合物进行流度控制和剖面调整已在Minnelusa层获得成功^{[1][5]}。到目前为止,已有22个聚合物驱开始实施。Mack和Duvall的一份报告^[1]对其中六个聚合物驱与十六个注水采

油的结果进行了比较。他们认为聚合物技术在Minnelusa油田的实施缩短了注水时间并改善了水驱效率。

本文主要讨论OK油田垂向波及聚丙烯酰胺聚合物驱的设计和动态。

油田的发现

OK油田位于怀俄明州，距Gillette东北大约15英里（11—T51N—R—70W）。1973年11月第一口见油井（Ollie 14—11）钻到8168英尺（2490米），在Minnelusa砂层完井并射孔，该层泵抽日产无水原油475桶（75.5米³/天），含极少量气。

地质情况和油层特性

产油、产气的Minnelusa层分布在Powder River盆地的东部和东北部。地层时代为早宾夕法尼亚纪—早二叠纪。Minnelusa层总共有7个小层（A到F层），第一次勘探的目的层为

表 1 OK油田的油层参数

生 产 层	Minnelusa
平均深度(英尺)	8077(2,462)
岩石性质	
平均孔隙度(%)	18.6
平均空气渗透率, 毫达西(微米 ²)	290(0.286)
渗透率范围, 毫达西(微米 ²)	1到3600(0.001~3.56)
渗透率变异系数	0.85
液体性质	
原生水(%孔隙体积)	0.234
水粘度, 厘泊(帕·秒) [168°F, 517磅/英寸 ² (绝对)]	0.35(0.00035)
地层体积系数, 油层桶/地面桶(米 ³ /米 ³)	1.047(1.047)
油密度(克/厘米 ³)	0.8808
API重度	29.2
原油粘度, 厘泊(帕·秒) [168°F, 517磅/英寸 ² (绝对)]	3.6(0.0036)
原油饱和压力, 磅/英寸 ² (千帕)	517(3564)
溶解油气比, 英尺 ³ /桶(米 ³ /米 ³)	30(5.3)
油藏参数	
总面积, 英亩(米 ²)	267(1,080,510)*
平均有效厚度, 英尺(米)	22.25(6.8)
总孔隙体积, 英亩—英尺(米 ³)	5935(7,320,757)*
总孔隙体积, 桶(米 ³)	8,564,566(1,361,657)
原始地质储量, 地面桶(米 ³)	6,260,000(996,534)
原始井底压力, 磅/英寸 ² (千帕)	3250(22,408)
井底温度, °F(°C)	168(75.6)

* 原文中数据换算错误。——译者注

A和B层，第二次勘探的目的层为C层。Minnelusa层由浅海、风成和盐滩（萨布哈）砂岩，碳酸盐岩和蒸发岩组成。产油砂岩是以白云岩和硬石膏胶结的白色结晶砂岩为特征。

Minnelusa层的表面受到侵蚀，在其上为不渗透的红色Opeche页岩所覆盖。存在着几种圈闭类型，如砂岩尖灭、砂岩透镜体内的渗透性隔档，前-Opeche层剥蚀、构造闭合以及向古隆起楔形尖灭^[2]。

OK油田的产层为Minnelusa B砂层，平均深度为8077英尺（2462米）。生产层通常为一连续分布的砂体，但有一些硬石膏夹层存在。砂岩层是由硬石膏胶结的粉细到中等粒度、分选好的石英砂岩组成。该砂岩以粒间孔隙为主，有少量粒内孔隙和微孔隙，由于量少，对油层性质无多大影响。岩石中存在着自生高岭石、伊利石和蒙脱石，但含量不大。

取10%作为孔隙度下限，图2为OK油田纯油层等厚图，平均厚度取值为22.5英尺（6.8米），油田面积为267英亩（1,080,510米²）。生产井和注入井钻穿的产层厚度变化范围在17到48英尺（5.2至14.6米）之间。OK区块大约占267英亩中的245英亩（1,080,510米²中的991,478米²）。

在OK油田生产层的下面有一含水层，它大约相当于总砂岩体积的38%。平均油水接触面为8100英尺（2469米）。

油田原始地质储量（以标准状况下脱气油计）为6,268,000桶（996,530米³）。为不饱和原油，没有气顶存在。表1列出岩石、流体和油藏参数。

油田开发和一次采油

为确定OK油田范围，总计钻了15口井，其中8口已试油，7口为干井。1973年12月钻完第一口见油井（Ollie 14—11）后，在两个月内又钻完一口生产井（Ollie 2—11）。继后钻了三口干井（3—11、1—10以及2—14井）。1974年10月补钻了作为生产井的Ollie 4—11井和Stevens-Federal 22—11井。1975年3月钻了另外三口干井（33—11、ODC1—14以及41—15井）。1975年10月钻了第一口注水井Ollie 5—11井，并按注水井完井。最后一口干井是在1978年8月以前钻的。1978年8月和1982年10月在OK区块内又钻了另外两口生产井（Ollie 6—11和Ollie 8—11井）。OK区块以外地区钻的唯一一口生产井为Dyco C—2井，该井是在1982年5月钻的。

1974年3月，Ollie 14—11和Ollie 2—11井一次采油达到的峰值产量为每月24,500桶（3895米³）。由于1974年3月以后采油量迅速递减（图3），认为一次采油的机理是流体膨胀。到1975年10月止，上述井一次采油的累积采油量仅为236,156地面桶（37,546米³），相当于原始地质储量的3.8%。根据图3所示递减曲线预测，最终一次采油量约为739,624地面桶（117,591米³），相当于原始地质储量的11.8%。

聚合物驱设计

聚合物驱设计的两个主要根据是渗透率的变化和流度比。渗透率变化主要影响垂向扫油效率，而流度比则主要影响面积扫油效率。OK油田渗透率的变化值在1至3600毫达西（0.001至3.561微米²）之间。根据图4 Ollie 4—11井的渗透率对数正态分布计算的Dykstra-Parsons

渗透率变异系数为0.85。由图5的相对渗透率曲线计算的流度比为2.5。

面积扫油效率与其说是通过流度控制，不如说是通过井的位置控制才能达到最大值。根据1975年的油层描述，提出并实施了在靠近砂岩透镜体边缘南面钻一口注水井(Ollie 5—11)的计划。该井北面的其他注水井将由水淹的生产井转注。

为了确定一个垂向波及聚合物驱方案能否提高采收率，使用了数值模拟器（二次采油解析模型SRAM）进行预测，以比较水驱和聚合物驱的结果。这是一个拟稳态、线性模型(SRAM)，由许多不连通的层组成，驱替为活塞式的。预测结果示于图6中，结果表明：在OK油田应用垂向波及聚合物驱技术将比注水多采403,000桶油（64,071米³），而少采1,451,000桶（230,690米³）水。

OK区块选择了一种垂向波及聚合物驱方案，以提高采收率。对垂向波及有影响的化学剂注入顺序是：

1. 首先注入一种阳离子聚合物。阳离子聚合物吸附在岩石表面上，从而为后来的注入剂提供粘附地带。
2. 然后交替注入阴离子聚合物和铝，以降低高吸水能力层的渗透率。
3. 化学剂注完后注水，一直持续到经济极限。

所有的化学产品均由Tiorco股份有限公司提供。

双管岩心驱替实验产出液的变化表明（如图7）：采用交联聚丙烯酰胺的垂向波及技术可以使流体转向。在这一实例中，流体流经两个岩心的量是相等的。

溶解聚合物和铝盐的水是从深度为2342至2398英尺（714至731米）的Fox Hills层（白垩纪砂岩）中得到的。

聚合物扩大注水的采油效果

OK油田1975年10月开始首先在Ollie 5—11井注水。1976年1月在Ollie 5—11井开始采用聚合物改善垂向波及方法。向Ollie 5—11井注入化学剂的顺序列于表2。

表2 Ollie 5-11井化学剂注入顺序

化学剂名称	化学剂用量 磅/公斤	注入量 桶/米 ³	聚合物浓度 毫克/升
阳离子聚合物	23,000/10,433	172,387/27,407	381
阴离子聚合物	300/136	63,325/10,068	226
铝	8700/3947	4304/684	...
阴离子聚合物	5800/2631	69,372/11,029	239
铝	600/272	27,127/4313	...
阴离子聚合物	7300/3311	132,785/21,111	157
铝	600/272	27,235/4330	...
阴离子聚合物	16,000/7259	286,643/45,573	160
铝	302/137	610/97	...
阴离子聚合物	5800/2631	183,475/29,170	90
阴离子聚合物	12,000/5443	260,341/41,391	132

油层对注入Ollie 5—11井的水反应迅速。OK油田注水的头一个月产油量从每月2000桶(318米³)增至7000桶(1113米³)。在Ollie 5—11井进行化学剂处理前,油田产油量已增加到大约每月22,000桶(3498米³)。该井用化学剂处理后,1976年至1977年期间的产油量增加到每月平均28,750桶(4571米³)。1978年产油量以13.1%的年递减速度开始下降。

1979年5月Ollie 2—11井的水油比达到8,于是转为注入井,在注水的同时,该井用垂向波及化学法处理。表3列出了处理顺序。Ollie 2—11井的转注和处理的结果,使产油量在两个月内从每月23,200桶(3689米³)增至30,000桶(4769米³)。月产油量按1980年的平衡表计算,其峰值达到38,500桶(6121米³)。在1981年全年和1982年上半年,产油量以每年43%的速度迅速递减。

1982年7月最后一口转注井为Ollie 4—11井。在转注前水油比为18。注水时对该井进行了化学处理,以改善垂向波及效率。Ollie 4—11井注化学剂的顺序列于表4中。在该井转注后的头六个月内,OK区块的产油量保持每月10,500桶(1669米³)不变。1983年1月产油量以每年32%的递减速度开始下降,一直继续到1985年6月。这比Ollie 4—11井未用化学剂处理前产油量年递减43%要小得多。

表3 Ollie 2—11井化学剂注入顺序

化学剂名称	化学剂用量 磅/公斤	注入量 桶/米 ³	聚合物浓度 毫克/升
阳离子聚合物	5000/2268	20,010/3181	714
阴离子聚合物	7325/3322	67,695/10,763	309
铝	315/143	...	...
阴离子聚合物	16,925/7677	180,381/28,678	268
铝	2520/1143	...	...
阴离子聚合物	16,050/780	236,151/37,545	194
铝	1147/520	...	...
阴离子聚合物	14,650/6645	195,470/31,077	214
铝	2032/922	...	...
阴离子聚合物	8800/3992	84,293/13,402	298
铝	1945/882	...	...
阴离子聚合物	38,950/17,667	375,243/59,659	296
铝	204/92	204/32	...
阴离子聚合物	3725/1690	34,446/5476	309
铝	430/195	614/98	...
阴离子聚合物	2875/1340	32,349/5143	254
铝	262/119	353/56	...
阴离子聚合物	3875/1758	36,698/5835	301

1982年5月Ollie 4—11井转注后的产油量,仅指OK区而言(因在OK区外面又钻了Dyco C—2井),据1985年3月资料,该井产油65,714桶(10,448米³),同时产出了至少12,885桶水(2049米³)。

钻Dyco C—2井促进了OK区在Dyco井和Ollie 5—11井之间钻Ollie 8—11井。该井仅生产了两个月,产水1000桶(160米³),含少量油。

表 4 Ollie 4—11井化学剂注入顺序

化学剂名称	化学剂用量 磅/公斤	注入量 桶/米 ³	聚合物浓度 毫克/升
阴离子聚合物	2075/941	9184/2460	645
铝	396/178	386/61	48,852
阴离子聚合物	1525/692	7947/1263	548
阴离子聚合物	650/295	9416/1497	197
铝	203/92	287/46	33,608
阴离子聚合物	850/385	9581/1523	253
阴离子聚合物	1375/624	14,635/2327	268
铝	362/164	475/76	36,282
阴离子聚合物	1700/771	18,130/2882	267
阴离子聚合物	1625/737	14,629/2326	317
阴离子聚合物	775/351	8383/1333	264

Ollie 8—11井产水说明，注聚合物在产液层中取得了十分有效的扫油效果。Ollie 8—11井产出水氯化物的矿化度为1600毫克/升。而在Ollie 5—11井注水前，Ollie 4—11井产出水氯化物的矿化度为6400毫克/升。较低的氯化物矿化度说明在Ollie 8—11井周围油藏范围内已被Fox Hills的水（氯化物矿化度为50毫克/升）驱扫到了。

根据1985年6月的资料，OK区已采出2,563,659桶油（407,589米³），相当于原始地质储量的40.9%，OK油田至少已采出2,629,373桶油（418,057米³），相当于原始地质储量的41.9%。OK区累积产水1,924,096桶（305,907米³），而油田产水至少是1,936,981桶（307,955米³）。累积水油比为0.75。累积注采比为1.04。

在图6（译者注：原文为图7，有误）中绘出了OK区实际月产油量与二次采油解析模型预测结果的比较。根据二次采油解析模型的预测：OK区到1985年6月应增产油605,321桶（96,238米³），每桶油的成本（化学剂和服务费用）为1.01美元（6.35美元/米³）。如果包括Dyco C—2井，增产油量应为671,035桶（106,686米³），每桶油的成本则为0.91美元（5.72美元/米³）。

注入化学剂

不论注聚合物还是注水，均未遇到麻烦。因注入速度受供水的限制，导致日注入量间断。在注入开始后的3—4小时内注入压力高达1200磅/英寸²（表压）[8274千帕（表压）]。当向贮水罐供水时，因停注，压力降至0磅/英寸²（0千帕）。由此引起的间歇注入使聚合物和铝有可能优先进入高渗透层。流体优先进入高渗透层是由于在停注期间流体浸入孔隙介质时形成低压的结果。由于注入速度低，聚合物的作用，特别是胶凝作用，更有可能达到最大限度。

设备和现场操作

OK油田原来使用的供料系统是GACO装置[7]。这种装置不适合混合聚合物，以致将未

水合的聚合物团块注入井中。因此，用一台POL-E-DUC干固体送料器代替了GACO装置。POL-E-DUC装置有一个喷射系统，可以润湿每一个聚合物颗粒并消除未水合的聚合物带来的麻烦。然后将充分水合过的聚合物溶液按比例送到注入泵的吸入端。图8为POL-E-DUC装置示意图。

化学方法提高采收率的潜力

鉴于垂向波及方法改善注水采油获得成功，化学方法具有采出更多原油的潜力。因此，在室内进行了岩心驱替试验，以评价两个相邻油田的流度控制聚合物驱和碱-聚合物驱以及OK油田的表面活性剂驱。

Wallace油田，流度比为2.5。径向岩心驱替的采收率表明，流度控制聚合物方法将比注水多采出0.10倍孔隙体积的油（图9）。在Kuehue Ranch油田，碱-聚合物驱比注水多采出0.15倍孔隙体积的油，与聚合物驱相比，在接近60%的注入阶段，含油量是聚合物驱含油量的两倍^[10]。图10绘出了这一结果。表面活性剂驱，不论是胶束-聚合物驱，还是低浓度表面活性剂-聚合物驱，在使用OK油田流体的径向岩心驱动试验中均比注水多采出0.31倍孔隙体积的油^[11]。

尽管各种化学采油技术的实验室岩心驱替试验结果都表明它们在实际应用上是可行的，但在油田实施前还是要进行充分的经济分析。

结 论

1. OK油田的聚合物扩大注水工程项目认为是成功的。到1985年6月1日止，OK区总共采出油量为原始地质储量的40.9%（0.30倍孔隙体积），而OK油田总采油量为原始地质储量的41.9%（0.31倍孔隙体积）。

2. 根据Ollie 8—11井产出水的氯化物矿化度的变化以及含油饱和度从0.73降至0.42孔隙体积，可以认为面积扫油是有效的。

3. 累积水-油比0.75和高采收率表明：只要回注很少量的水即可采油。

4. 累积注采比为1.04表明在聚合物扩大注水采油中达到了注采平衡，无液体损失或由其它作用生产的油。

5. 改善扫油效率的方案在经济上是成功的，OK区增产油量为605,321桶（96,238米³），每桶油的施工成本为1.01美元（每立方米油的施工成本为6.35美元）。OK油田至少增产油671,035桶（106,686米³），每桶油的施工成本为0.91美元（每立方米油的施工成本为5.73美元）。

换 算 系 数

英尺	0.3048米
桶	0.1589873米 ³
英亩	4046.856米 ²
磅/英寸 ²	6.894757千帕
磅	0.4535932公斤

厘泊	0.001帕·秒
英尺 ³ /桶	0.1781085米 ³ /米 ³
英亩-英尺	1233.489米 ³
(°F-32)/1.8 = °C	
毫达西	0.0009869233微米 ²

参 考 文 献

- Mack, J.C. and Duvall, M.L.: "Performance and Economics of Minnelusa Polymer Floods," SPE paper #12929 presented at the Rocky Mountain Regional Mtg. of SPE, Casper, WY, May 21-23.
- Tholstrom, K.V.: "Performance History and Operation of Two Minnelusa Reservoirs - West Semlek Field, Crook County, Wyoming," SPE paper #6164 presented at the 1976 Annl. Fall Tech. Conf. & Exhib. of SPE, New Orleans, October 3-6.
- Mack, James C.: "Improved Oil Recovery - Product to Process," SPE paper #7179 presented at the 1978 Rocky Mtn. Regional Mtg. of SPE, Cody, WY, May 17-19.
- Whatley, W.F.: "Development History and Waterflood Performance of a Heterogeneous and Highly Undersaturated Minnelusa Reservoir," API 875-24-G, presented at the 1970 Spring Mtg. of the Rocky Mtn. Dist., Div. of Prod., Denver, CO, April 27-29.
- Gill, D.: "Rockies Flood Projects Add to Production," Western Oil Reporter (Sept. 1983).
- Brock, J.R.: "Proposed OK Minnelusa Unit," Universal Resources Corporation (April 1975).
- Nugent, G.E., Bessenyei, Z., and Sloat, B.: "Sensitive Clay Sands Respond to Chemical Oil Recovery," Petroleum Engineer (Nov. 1975.)
- Sloat, B.: "How to Get More for Your Chemical Dollar," Petroleum Engineer (Nov., 1977).
- Oil & Gas Commission, State of Wyoming, March 1985.
- Pitts, M.J.: "A Study of Enhanced Oil Recovery in the Minnelusa," multi-client study (June 1984).
- Pitts, M.J.: "OK Minnelusa Sand Unit Applicability to Enhanced Oil Recovery Agents," report to Universal Resources Corporation (Dec. 1981).

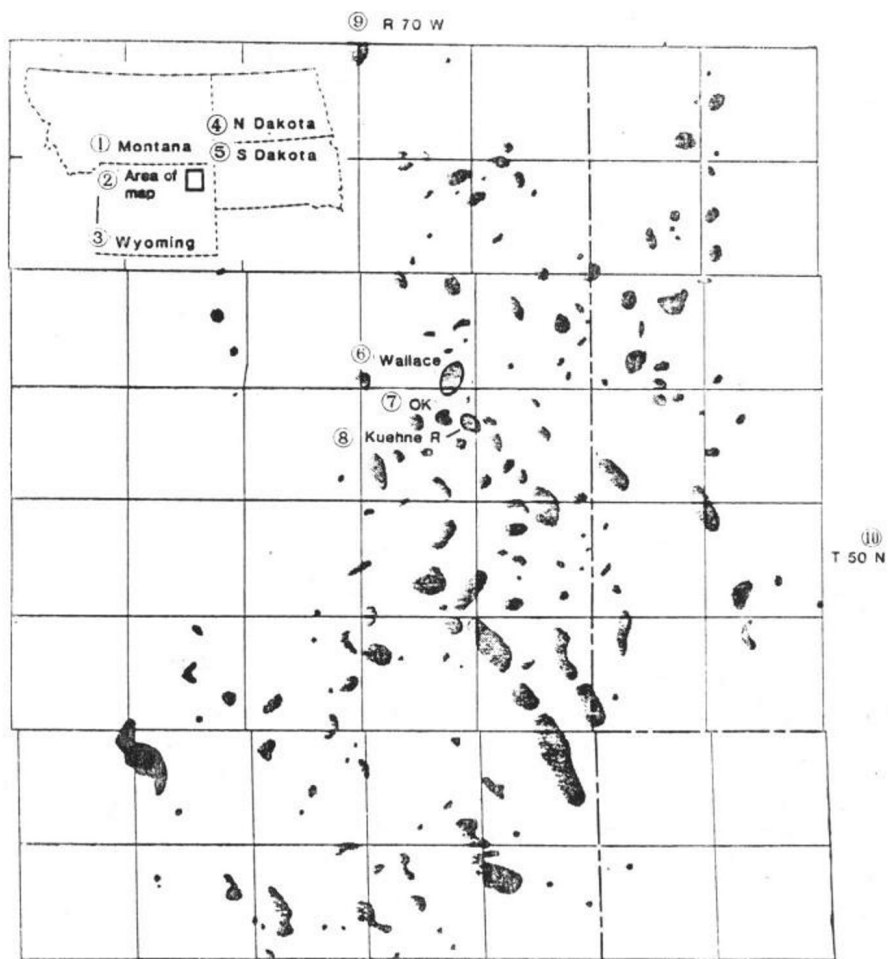


图 1 OK油田、Wallace油田以及Kuehne Ranch油田的分布位置

①蒙大拿；②图的面积；③怀俄明；④北达科他；⑤南达科他；⑥、⑦、⑧油田名称；⑨、⑩座标

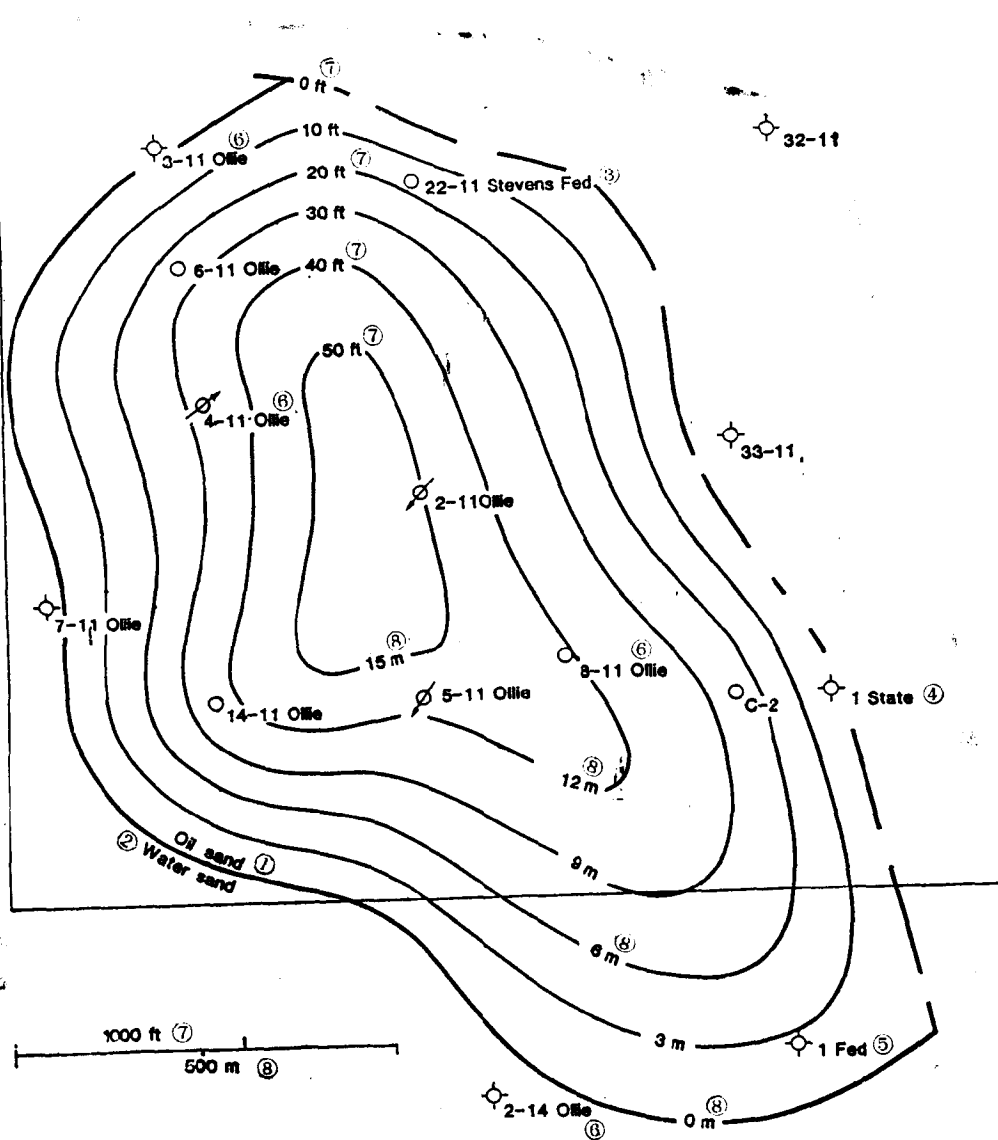


图 2 OK油田纯油层等厚图和井位图

①油砂；②水砂；③、④、⑤、⑥井号；⑦英尺；⑧米

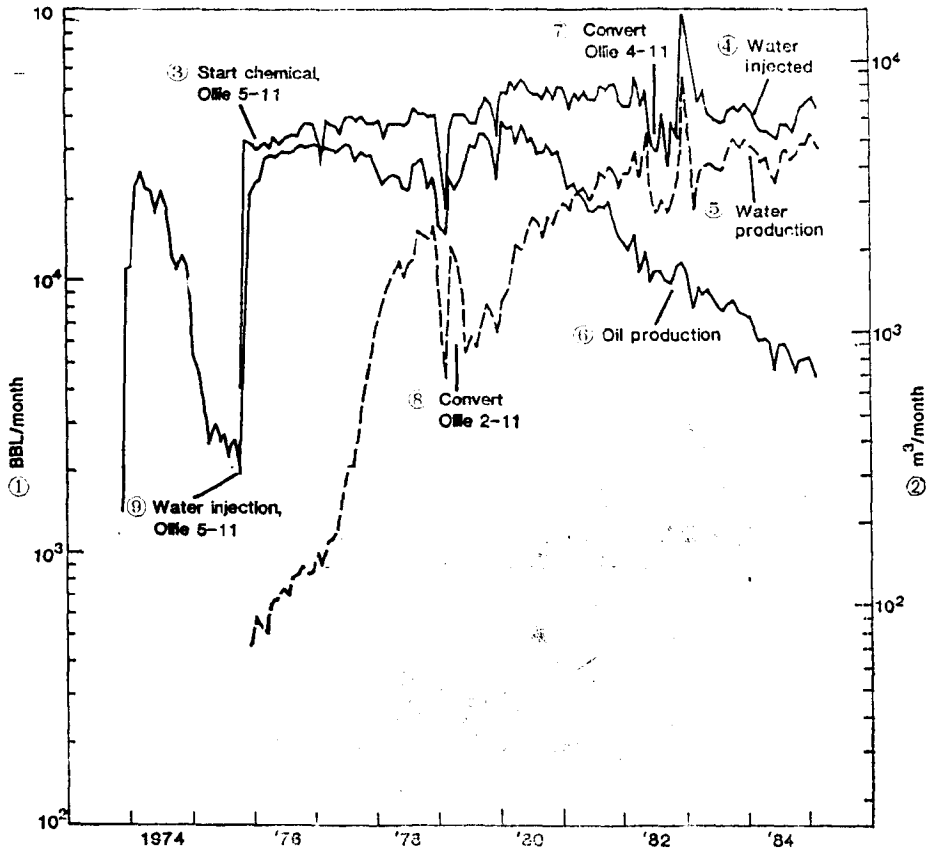


图 3 月产油、产水以及注水量

①桶/月；②米³/月；③Ollie 5-11井开始注聚合物；④注入水量；⑤产水量；⑥产油量；
⑦Ollie 4-11井转注；⑧Ollie 2-11井转注；⑨Ollie 5-11井注水

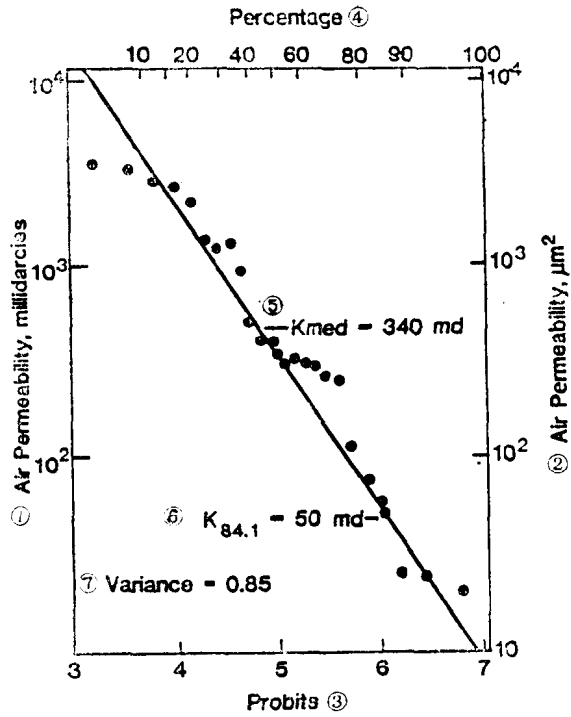


图 4 渗透率对数正态变化

①空气渗透率，毫达西；②空气渗透率，微米²；③概率单位；④百分数；⑤渗透率中值，毫达西；
⑥概率84.1对应的渗透率，毫达西；⑦变异系数

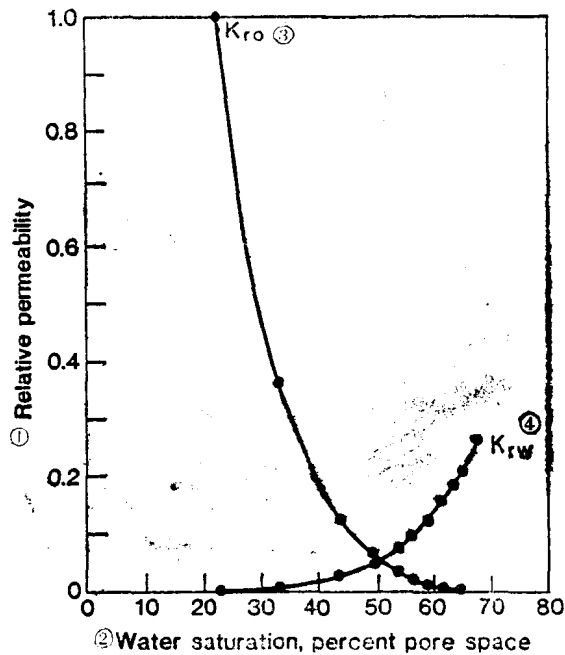


图 5 相对渗透率曲线

①相对渗透率；②水饱和度，孔隙体积百分数；③油相相对渗透率；④水相相对渗透率

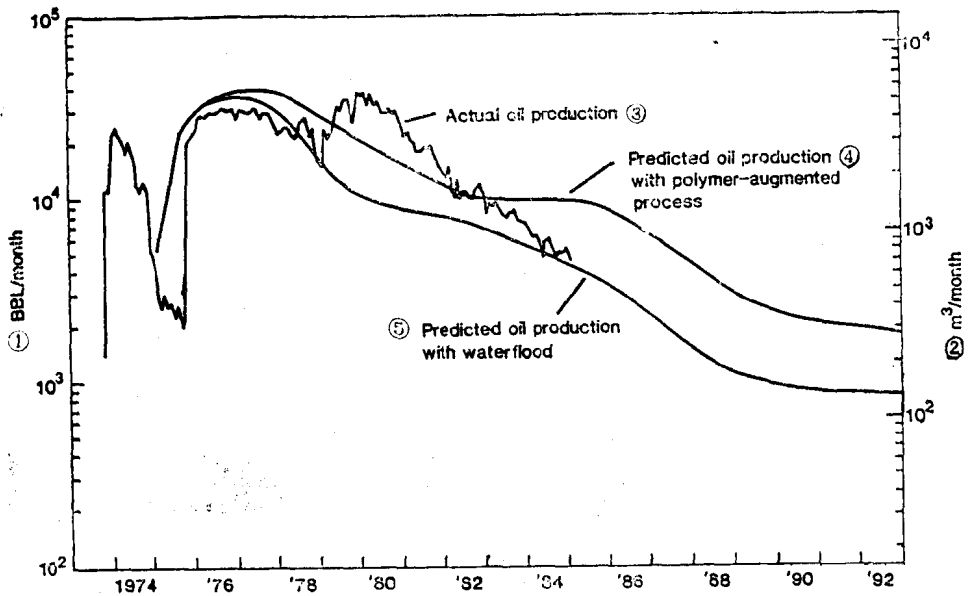


图 6 实际月产油量和二次采油解析模型预测的产油量比较

①桶/月；②米³/月；③实际产油曲线；④预测的聚合物注水产油曲线；⑤预测的注水产油曲线

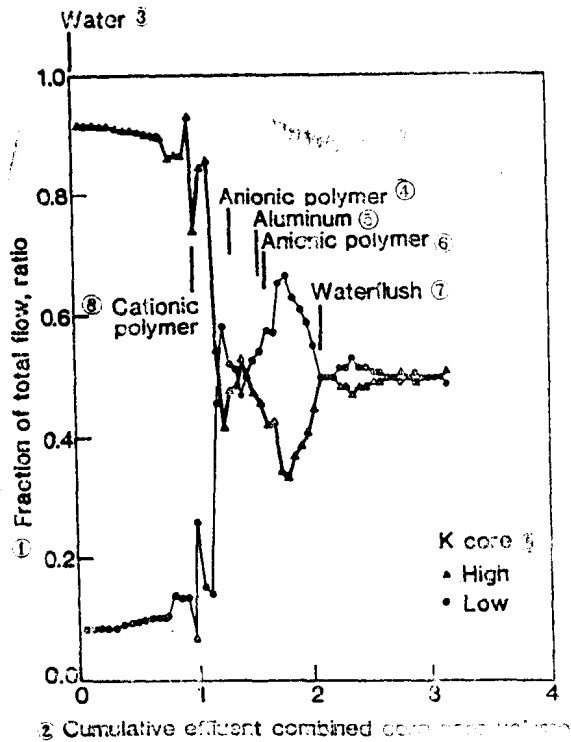


图 7 双管岩心驱替中通过单管的流体分流量

①占总流量的分数，比率；②累积流出量所占的双管岩心孔隙总体积；③水；④阴离子聚合物；⑤铝；⑥阴离子聚合物；⑦水冲洗；⑧Kuehne Ranch油田的岩心，▲高渗透率，○低渗透率

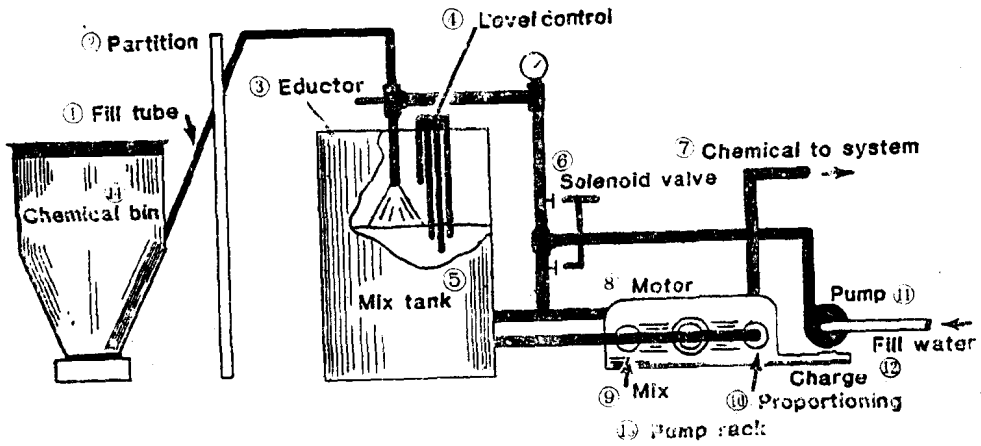


图 8 Poly-E-Duc 固体干粉送料装置

①装料管；②隔墙；③喷射装置；④水平控制；⑤混合罐；⑥电磁阀；⑦化学剂至注入设备；⑧电动机；⑨混合；⑩按比例进料；⑪泵；⑫进水管；⑬泵架；⑭化学剂储存箱(带盖)

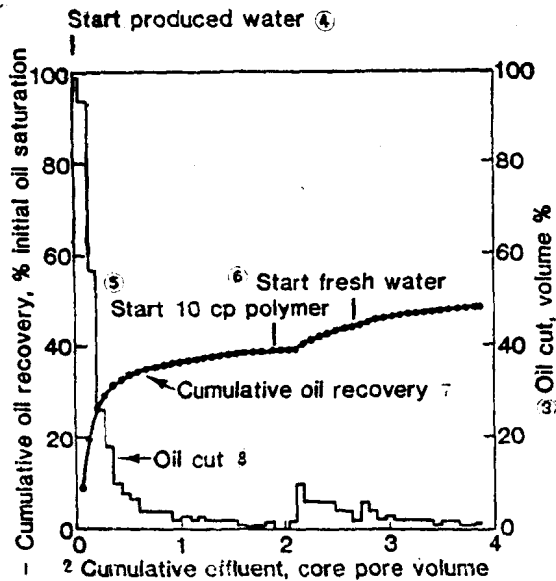


图 9 Wallace油田聚合物岩心驱替采油量和含油变化曲线

①累积采油量，%原始含油饱和度；②累积流出液量，岩心孔隙体积；③含油量，%体积；④开始产水；⑤开始注10厘泊的聚合物溶液；⑥开始注淡水；⑦累积采油量；⑧含油量

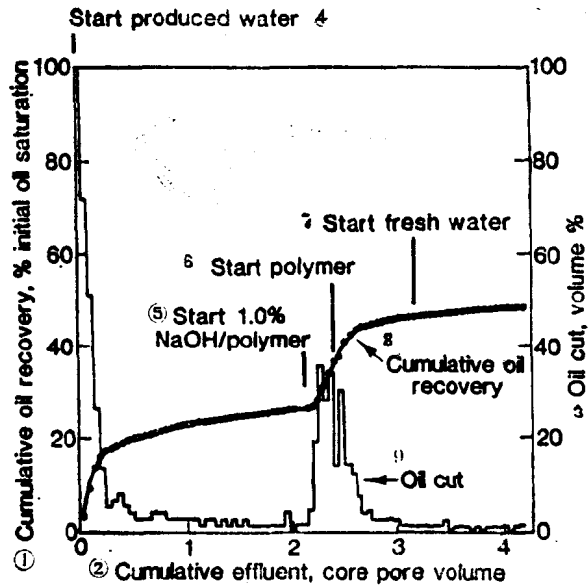


图 10 Kuehne Ranch 油田碱—聚合物岩心驱替试验采油量和含油关系曲线

- ① 累积采油量，%原始含油饱和度；② 累积流出液量，孔隙体积；③ 含油量，%体积；④ 开始产水；
 ⑤ 开始注 1.0% NaOH/聚合物；⑥ 开始注聚合物；⑦ 开始注淡水；⑧ 累积采油量曲线；⑨ 含油量曲线