

美国加利福尼亚州 Buena Vista 油田轻油蒸汽驱的数值模拟

K.C. Hong

Chevron Oil Field Research Co.

王弥康 译

油 工 校

摘 要

1985年初,美国Chevron公司在加利福尼亚州Kern县 Buena Vista Hills油田上,对108英尺(32.9米)厚的 Wilhelm砂岩油藏中重度为 27°API (0.89克/厘米^3)的轻质原油开始了一项先导性的蒸汽驱试验。这一先导性试验项目的目的层,平均深度为2,500英尺(762米),试验区面积为65英亩($263,000\text{米}^2$),包括12个反五点井网。Chevron公司首次把蒸汽驱应用于轻质油藏,为了对设计、施工和作业提供动态预测和其他有用的资料,完成了计算机模拟研究。

利用组分蒸汽驱模型对油藏的八分之一五点井网地区进行了三维模拟。根据原油的真实沸点曲线分析用三维模拟组分模拟油代表油藏的原油。

研究表明,由于原油的粘度低和挥发性高,这种原油注蒸汽获取的效益在机理上不同于重油注蒸汽。原油粘度的降低是重油注蒸汽开采的主要机理,而对轻质油藏而言,蒸汽的蒸馏作用是改善轻油开采的主要机理。蒸汽的重力超覆推进在重油油藏中占主要地位,而在轻质油藏中蒸汽更象以活塞式驱替向前推进,因而油藏扫油效率较高。此外,在低压缩性轻质油藏中进行蒸汽驱,几乎立即就可在油井产量上见到对注蒸汽的反应。

所进行的研究进一步表明,用蒸汽驱大约能经济地采出50%原油原始地质储量。其中三分之一强可能是靠蒸汽的蒸馏机理采出的。

一、引 言

注蒸汽是当今使用的主要的提高采收率方法,估计它占全世界提高采收率总产量的78%^[1]。在蒸汽驱和蒸汽吞吐这两种注蒸汽方法中,前者的产量在注蒸汽采油量中所占的比例一直在不断增加。

从六十年代中期以来就使用了蒸汽驱,主要从比较浅的油藏[井深小于1,500英尺(457米)]中开采重质原油[重度低于 20°API (大于 0.93克/厘米^3)]。后来这一方法推广到原油API重度较高和油层深度较大的油藏。许多先导性试验项目已经证明,蒸汽驱可以从较深的油层中有效地开采较轻的原油^[2,3]。在世界范围内,蒸汽驱在这类油藏中的应用正在增

长^[1]；当充分证实其有效性的时候，这种方法会大大地增加全世界的原油可采储量。

由于轻油在油藏条件下的粘度低和挥发性高，估计蒸汽驱开采轻油的主要机理不同于重油油藏。实验室工作已经证明，蒸汽对轻油的蒸馏作用可能是一种有效的采油机理^[4]。Shell公司早期的现场试验已经证明，轻质油藏蒸汽驱能达到很低的残余油饱和度^[2]。其他一些因素，如油层压力高和原油初始粘度低等，使轻质油藏在蒸汽驱条件下的特性不同于重质油藏^[5]。

为了增加这类轻质油的可采储量，美国的Chevron公司已经开始对开发蒸汽驱工艺发生兴趣。1981年该公司在加州Kern县Buena Vista Hills油田成功地进行了六个月的注蒸汽试验。试验表明，蒸汽能以有效地开采原油所必需的注入量和干度注入油层。试验还表明，轻质油藏与重油油藏不同，它几乎可以立即见到注蒸汽的有效反应。

在这些试验结果的鼓舞下，Chevron公司在1985年初对27°API (0.89克/厘米³) 重度的原油进行了蒸汽驱试验。这一先导性试验项目在65英亩(263,000米²)面积上包括12个反五点井网，目的层是平均深度为2,500英尺(762米)、厚度为108英尺(32.9米)的Wilhelm砂岩。如果成功的话，先导性试验将向相邻的含油面积扩大。

Chevron公司首次把蒸汽驱应用于轻质油藏，为了得到有关设计、施工和作业方面一些有用的资料，进行了计算机模拟研究。该研究的具体任务是：

1. 查明蒸汽对原油的蒸馏作用的动态特点及其对改善采收率的作用；
2. 为先导性试验项目最佳运行方式求得有用的资料；
3. 通过提供动态预测，有助于对该项目的技术和经济可行性作出评价。

本文介绍数值模拟研究的结果，并讨论每种采油机理在轻油油藏蒸汽驱中的重要性。

二、油藏模拟计算机程序

本研究使用的是称为ISCOM^[6]的热力模拟计算机程序。这一模拟计算机程序是为模拟火烧油层而研制出来的；但只要去掉化学反应项，该模拟计算机程序就能用作为注蒸汽模拟计算机程序，它能充分地考虑轻油各种组分的影响。

三、油藏和流体模型

1. 操作数据

蒸汽驱先导性试验的目的层是108英尺(32.9米)厚的Wilhelm砂岩，即Shallow pool油藏的最上面的油层组。这一砂岩被认为是块状结构，有一个厚的不渗透页岩把它与下面的一组油层隔开。蒸汽注到砂岩下面的2/5层段，注入量为每个井网715桶/天(114米³/天)冷水当量。注到砂面处的蒸汽的温度和干度分别为650°F(343°C)和75%。

2. 油藏网格

图1表示本研究所选用的模型的垂向和横向结构。该项目共有12个反五点井网；但是假设用一个面积为5.3英亩(21,450米²)的平均井网来代表油藏。由于井网内的对称性，只需要模拟井网的八分之一。图1是这个适当尺寸的最小对称单元的俯视图；所示的面积实际上代表项目总面积的1/96(五点井网的1/8和12个五点井网的1/12)。模型中所用的任何生

产或注入数据必须乘以 96，才能得到整个项目的数据。

图 1 所示的模型总共含有 110 个有效单元。横向有 22 个单元（ 7×4 个 x-y 单元减去 6 个不起作用的单元），垂直共计 5 层。用 4 层 22 英尺（6.7 米）厚和顶部一层 20 英尺（6.1 米）厚，模拟 108 英尺（32.9 米）厚度的 Wilhelm 砂层。

3. 油藏性质

模拟研究中所用的油藏数据列在表 1 中。模型中油藏性质假定是均匀的。假定垂向渗透率是水平渗透率的 50%。估算的地层压缩系数是 5.0×10^{-5} [磅/英寸²]⁻¹ (7.25×10^{-6} 千帕⁻¹)。这一数值比典型重油油藏的“海绵状”地层的数值至少低一个数量级。油藏倾角可以忽略（小于 5°）。

表 1 模拟 Buena Vista Hills 油田所用的油藏数据

井网面积（重五点井网），英亩(米 ²)	5.3(21,450)
注入井与生产井之间的距离，英尺(米)	340(104)
砂岩厚度，英尺(米)	108(32.9)
孔隙度，%	34.0
横向渗透率，毫达西	86.0
垂向渗透率，毫达西	43.0
原始油层压力，磅/英寸 ² (绝对)（千帕）	130(896)
原始油层温度，°F(°C)	112(44.4)
原始含水饱和度，%	68.0
原始含油饱和度，%	32.0
地质储量（五点井网的八分之一） 10^3 地面桶(10^3 地面米 ³)	6.05(9.5)
压缩系数，	
水，[磅/英寸 ²] ⁻¹ $\times 10^{-6}$ (千帕 ⁻¹ $\times 10^{-6}$)	3.1(0.45)
油，[磅/英寸 ²] ⁻¹ $\times 10^{-6}$ (千帕 ⁻¹ $\times 10^{-6}$)	5.0(0.725)
地层，[磅/英寸 ²] ⁻¹ $\times 10^{-6}$ (千帕 ⁻¹ $\times 10^{-6}$)	50(7.25)
注入蒸汽温度，°F(°C)	650(343)
注入蒸汽干度，%	75

水-油和气 液相对渗透率曲线表示在图 2 上。与温度有关的束缚水饱和度和端点相对渗透率列在表 2 中。这些数据是由实验室的岩心蒸汽驱试验得出的。

表 2 与温度有关的束缚水饱和度和端点相对渗透率数据

温度 °F(°C)	S_{wc}	S_{gc}	S_{orw}	S_{org}	S_{gr}	K_{rwro}	K_{rocw}	K_{rgro}
120 (49)	0.340	0.040	0.250	0.360	0.160	0.112	0.620	0.780
650 (343)	0.550	0.040	0.040	0.000	0.160	0.074	0.670	0.900

4. 流体性质

原油特征用一真实沸点曲线（TBP）表示，后者是由原油的气体色谱（GC）分析得出的。图 3 的真实沸点曲线表明，原油体积的 50% 将在 650°F（343°C）时蒸发出来。以前的研究^[4]已经指出，原油可以用三个拟组分来适当表示。这样，原油体积分成三部分馏分：

轻和中等馏分各占40%，重馏分占20%。如图3所示，用每种馏分的特征温度导出每种拟组分的有代表性的性质。

表3给出模拟中所使用的流体性质。占混合物体积40%的轻组分重度为45°API(0.80克/厘米³)，占另外40%的中等组分的重度为21°API(0.93克/厘米³)，不挥发的重组分重度为15°API(0.97克/厘米³)。这些重度的体积平均值为28.4°API(0.888克/厘米³)，稍高于测量值27°API(0.893克/厘米³)。

表 3 Buena Vista Hills 原油的三种组分

	轻	中 等	重
平均分子量	127	309	743
密度, 磅/英尺 ³ (千克/米 ³)	50.0(801)	57.9(927)	60.3(966)
重度, °API	45.1	21.0	14.9
体积百分数, %	40	40	20
摩尔百分数, %	63.4	30.1	6.5
原油平均重度, °API	—	28.4	—

研究中所用的液体粘度数据是从参考文献^[8]中查得的，列在表4中。每种组分的粘度是温度的函数，见表4。112°F(44.4℃)时三种粘度的幂律平均值为4.3厘泊(0.0043帕·秒)，很接近于实验室测得的数值5.0厘泊(0.005帕·秒)。气相粘度用关系式

$$\mu = 0.0136 + 2.112 \times 10^{-5} (T - 32) \text{ 厘泊}$$

来计算，式中T为华氏温度。

表 4 模拟中所用的液体粘度

温 度 °F(°C)	粘 度, 厘 泊		
	轻 组 分	中 等 组 分	重 组 分
75(24)	0.70	140	20,000
110(43)	0.50	75	10,000
150(66)	0.40	10	850
200(93)	0.32	4.4	120
300(149)	0.21	1.6	13
400(204)	0.15	0.84	4
500(260)	0.10	0.55	1.9
650(343)	0.03	0.33	0.9

在模拟中计算了蒸汽—液体的平衡，用的是 Antoine 方程[8]的蒸汽压关系式，该方程对每种拟组分都有具体的系数。这些系数是从参考文献^[8]中查得的。

四、模拟结果和讨论

1. 注水

为了建立用于比较预测动态的基础，首先用计算机程序模拟等温水驱，注入水的温度

与原始油层温度相同, 即 112°F (44.4°C)。每个井网的恒定注水量为 715 桶/天 ($114\text{米}^3/\text{天}$), 或者说八分之一五点井网的注水为 89.4 桶/天 ($14.3\text{米}^3/\text{天}$)。

图 4 的累计产油量与时间的关系曲线表明, 八分之一五点井网的注水最大采油量为 5,270 桶 (838米^3)。这样的采油量是在水-油比达到 100 时采出的, 仅占原始地质储量 (OIP) 的 9%。

2. 组分原油的蒸汽驱

由三种拟组分组成的挥发性混合物原油注蒸汽时, 比注水有高得多的采收率 (见图 4)。蒸汽驱可从八分之一五点井网中采出高达 35,000 桶 ($5,560\text{米}^3$) 的原油。然而, 并不是所有的原油都是经济地采出的。凭经验估计, 当蒸汽注入量与产油量的瞬时比值变为 10 时, 就认为蒸汽驱不经济了。达到这一极限蒸汽-油比 (LSOR) 之后产出的原油认为是不经济的。

瞬时蒸汽-油比与时间的关系曲线 (图 5) 表明, 对于组分原油, 开始注蒸汽后约 1,700 天达到极限蒸汽-油比。如图 4 所示, 在极限蒸汽-油比为 10 时的累计产油量等于 30,000 桶 ($4,770\text{米}^3$)。蒸汽驱可以经济地采出的原油体积为八分之一五点井网原始地质储量的 50%。可以把这一采收率值与注水时获得的 9% 作比较。

产油量随时间的变化曲线表示在图 6 中。注蒸汽开始后短短的两个月时间产量就从 0 提高到 7 桶/天 ($1.1\text{米}^3/\text{天}$)。然后逐渐地提高, 2.5 年后达到最大值 30 桶/天 ($4.8\text{米}^3/\text{天}$)。轻油蒸汽驱的这一特点, 与高粘度重油蒸汽驱的特点形成鲜明对照^[9]。在一个典型的重油油藏中, 注蒸汽开始以后六个月或更长时间才会见到产量反应。

产量反应的差别可用岩石压缩性和原油的粘度来解释。典型的重油油藏岩石是“海绵”状的未固结的砂层, 有很高的岩石压缩系数, 而轻油地层是相当致密的岩石, 压缩系数只有 $5 \times 10^{-5}[\text{磅}/\text{英寸}^2]^{-1}$ ($7.25 \times 10^{-6}\text{千帕}^{-1}$)。地层压缩系数小, 使压力波传播到生产井非常快, 因此很早就见到产量对注蒸汽的反映。由于原油在原始油藏条件下的粘度也低 [5厘泊 ($0.005\text{帕}\cdot\text{秒}$)], 因此一获得驱动力 (压力), 原油很容易流入生产井中。对比之下, 重油粘度高, 热波抵达以前, 原油不容易流动, 而热波抵达需费六个月或更长的时间。

轻油蒸汽驱从这一机理得到的好处是早期见到注蒸汽的反应, 增加了总产油量的时间价值。

3. 脱气原油的蒸汽驱

为了估算蒸汽对原油的蒸馏作用在轻油开采中起多大作用, 模拟了这样一种情况——假设原油是不挥发的 (脱气原油)。原油的其他性质与组分原油一样。这一模拟的结果表示在图 4 至图 6 中。

产油量与时间的关系曲线 (图 6) 表明, 脱气原油的产油量远低于组分原油情况下的产油量。这说明了蒸汽对原油的蒸馏作用明显地改善了蒸汽驱的产量。另外, 脱气原油情况下达到极限蒸汽-油比值为 10 的时间要比组分原油早 160 天左右 (见图 5)。由于这两个不利因素, 经济极限时 (开始注蒸汽后 1,540 天) 的累计采收率只有 19,000 桶 ($3,020\text{米}^3$), 或者说在脱气原油情况下采收率只有原始地质储量的 32%。

组分原油和脱气原油之间采收率的差别 (18%), 可以认为是蒸汽蒸馏机理所起的作用。这超过了重度为 27°API 原油蒸汽驱获得的采收率的三分之一。

4. 蒸汽的蒸馏作用

蒸汽的蒸馏作用对采收率的显著贡献, 已由采出原油的组分特性进一步作了证实。图 7

表明,注蒸汽的前两年期间采出原油的成分保持与原始原油的相同。但两年之后轻馏分含量明显地增加,在第4—5年达到体积的77%。这表明轻质蒸馏液富集带已抵达生产井。

蒸汽注入后蒸发了轻馏分,轻馏分在蒸汽前缘前面的未受热区内凝结下来,形成了一个蒸馏液富集带。这一富集带把未受热的原油混相地向生产井方向驱替。当蒸馏液富集带抵达生产井时,采出的原油比原始原油要轻得多。蒸汽洗过区内留下的原油是不太好的较重的碳氢化合物。

5. 蒸汽带推进和原油驱替

在 Buena Vista Hills 原油蒸汽驱条件下,气体带主要由气相蒸汽组成,其中含有少量蒸发的烃类。因此,不同地点随时间变化的气体饱和度剖面近似地代表蒸汽带的推进。因为在蒸汽带内含油饱和度最低(由于蒸汽有低的残余油饱和度);不同地点随时间变化的含油饱和度剖面也近似地反映蒸汽带的推进。

根据模拟时计算出来的气体和含油饱和度剖面得到的 Grinell 彩色图(图8),表示蒸汽带随时间的推进和向生产井驱替的原油。各图形表示连接注入井和生产井的垂直面上的饱和度。气体饱和度剖面在图的左边,含油饱和度剖面在图的右边。如图上部给出的柱状色度所示,颜色越亮,表示饱和度越高。

图8中的气体饱和度和含油饱和度剖面表明,在蒸汽驱大部分时间内,蒸汽带是以近乎活塞式驱替推进。在前2—3年内蒸汽前缘看来似乎是垂直平面,注蒸汽三年以后,重力指进开始发展,其后不久蒸汽就突入生产井。当发生蒸汽突破时,至少有2/3油层已被蒸汽扫洗过,它的含油饱和度已降至20%以下。

蒸汽前缘的活塞式推进和较好的油层垂向波及效率是轻质油藏蒸汽驱独有的特征,这是轻质油藏有别于典型重质油藏的地方。重油和两相蒸汽之间密度和粘度的巨大差别,造成蒸汽在重油油藏具有重力超覆的流动特征^[9]。蒸汽的重力超覆在轻质油藏中不大明显,因为在轻质油藏中低粘度原油对两相蒸汽的流度比,以及流体和高压蒸汽之间的密度差别都比较有利,允许气体以活塞式驱替推进。由于油层渗透率低(86毫达西),要使蒸汽移动需要高的总压[800—1,200磅/英寸²(5,516—8,274千帕)]。因此,两相蒸汽的密度要比一般有高渗透率的重油油藏高得多。

五、结 论

根据研究结果,可以得出下列结论:

1. Buena Vista Hills Wilhelm 砂岩用蒸汽驱可以经济地采出50%的原始地质储量。
2. 在轻质油藏中蒸汽对原油的蒸馏作用以及蒸汽前缘前面轻馏分蒸馏液富集带的形成,是主要的采油机理。靠这些机理采出的原油占蒸汽驱采收率的三分之一强。
3. 轻质油藏蒸汽驱的动态特征是早期见到产量对注蒸汽的反应,以及蒸汽前缘以活塞式驱替向前推进。早期见到产量对注蒸汽的反应是由于轻质油藏地层压缩系数低的缘故。蒸汽前缘以活塞式驱替推进,是由于轻质油藏原油粘度低和注入压力高的关系。
4. 早期产量反应改善了采出原油的时间价值,而蒸汽前缘以活塞式驱替推进,则可以达到比较高的油层垂向波及效率。

参 考 文 献

1. "Annual Production Report," Oil and Gas J. (April 2, 1984) 83-105.
2. Volek, C. W., and Pryor, J. A., "Steam Distillation Drive, Bres Field, California," J. Pet. Tech. (August 1973) 899-906.
3. Konopnicki, D. T., et al., "Design and Evaluation of the Shiells Canyon Field Steam-Distillation Drive Pilot Project," J. Pet. Tech. (May 1979) 546-552.
4. Hsueh, L., Hong, K. C., and Duerksen, J. H., "Simulation of High Pressure and High Temperature Steam Distillation of Crude Oils," The Proceedings of the Second International Conference on Heavy Crude and Tar Sands, Caracas, Venezuela (Chapter 96) McGraw-Hill, New York (1984).
5. Doscher, T. M., and Ghassemi, F., "The Influence of Oil Viscosity and Thickness on the Steam Drive," J. Pet. Tech. (February 1983) 291-298.
6. Rubin, B., and Buchanan, W. L., "A General Purpose Thermal Model," SPE 11713 presented at the 1983 California Regional Meeting, Ventura, California, March 23-25, 1983.
7. Chu, C., and Trimble, A. E., "Numerical Simulation of Steam Displacement - Field Performance Application," J. Pet. Tech. (June 1975) 765-776.
8. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Sherwood, T. K., "The Properties of Gases and Liquids," 3rd edition, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York City (1977) 629-665.
9. Hong, K. C., and Ault, J. W., "Effects of Noncondensable Gas Injection on Oil Recovery by Steamflooding," J. Pet. Tech. (December 1984) 2160-2170.

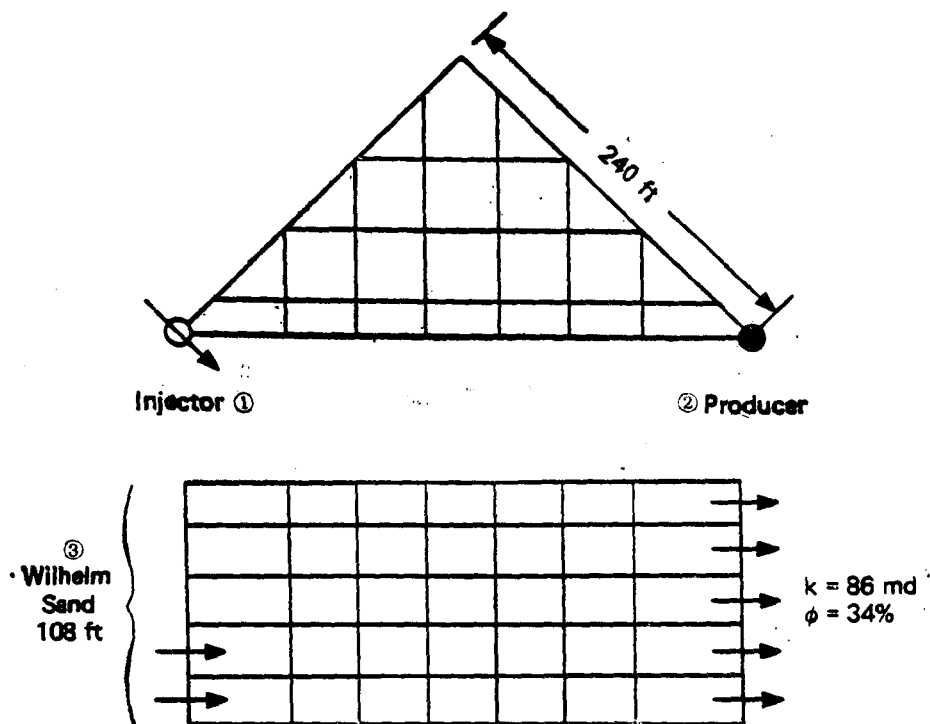


图 1 Buena Vista Hills Wilhelm 油砂岩五点模型的八分之一

①注入井;②生产井;③Wilhelm砂层厚度 108英尺

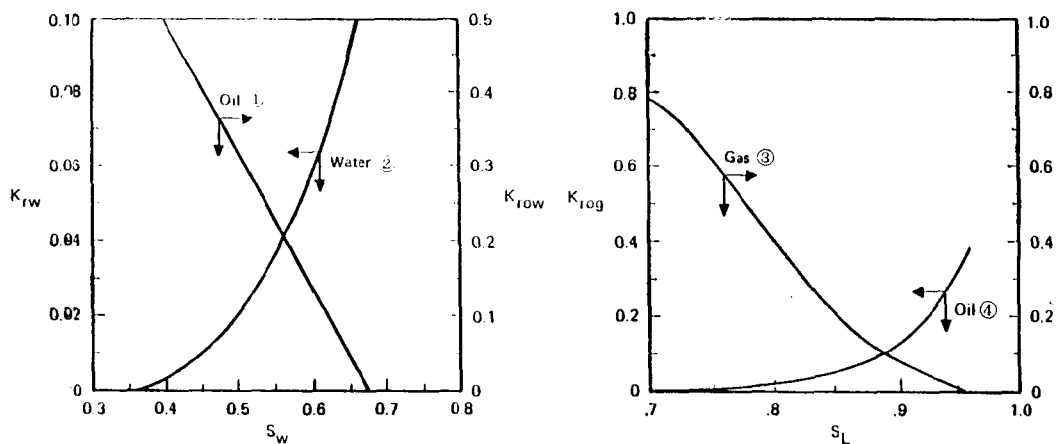


图 2 Buena Vista Hills Wilhelm砂岩的相对渗透率曲线

①油;②水;③气体;④油

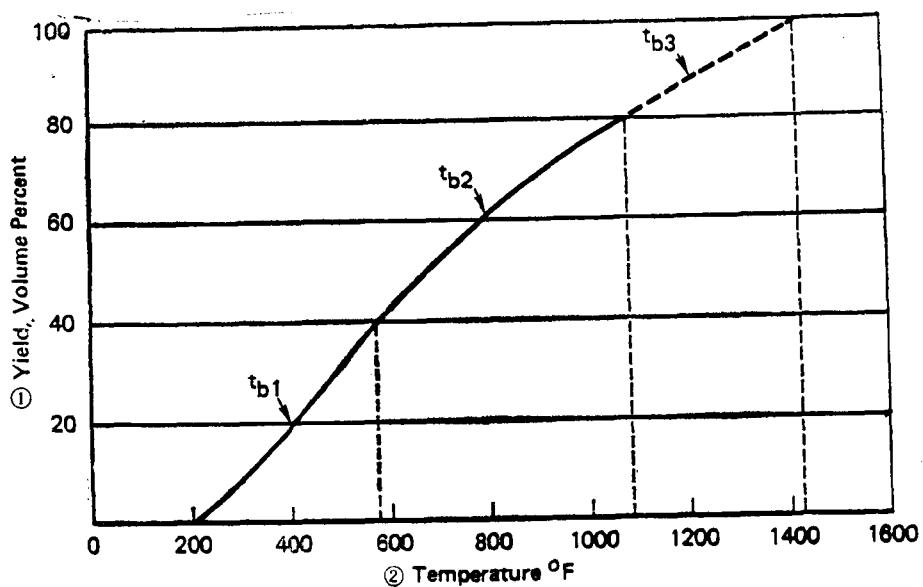


图 3 Buena Vista Hills原油的真实沸点曲线

①馏分体积百分数;②温度, $^{\circ}\text{F}$

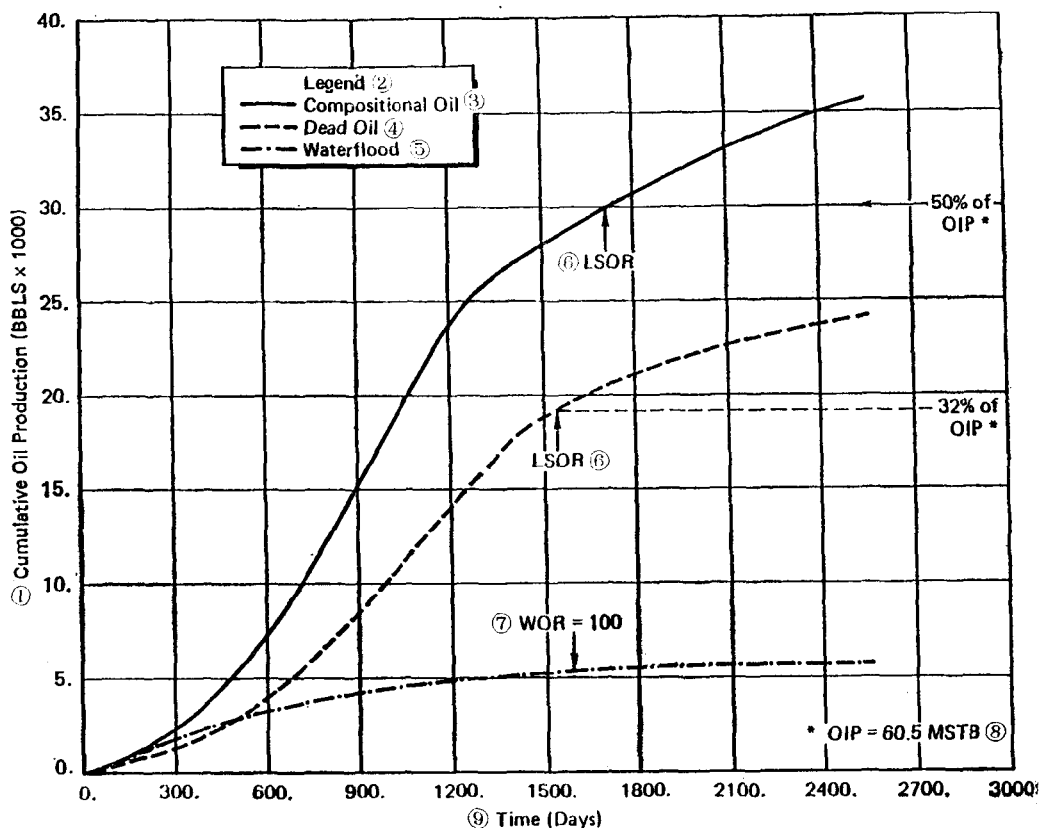


图 4 Buena Vista Hills 轻油蒸汽驱累计产油量
 ①累计产油量(桶×1,000); ②图例; ③组分原油; ④脱气原油; ⑤注水; ⑥极限蒸汽原油比; ⑦水油比; ⑧地质储量=60.5千地面桶; ⑨时间, 天

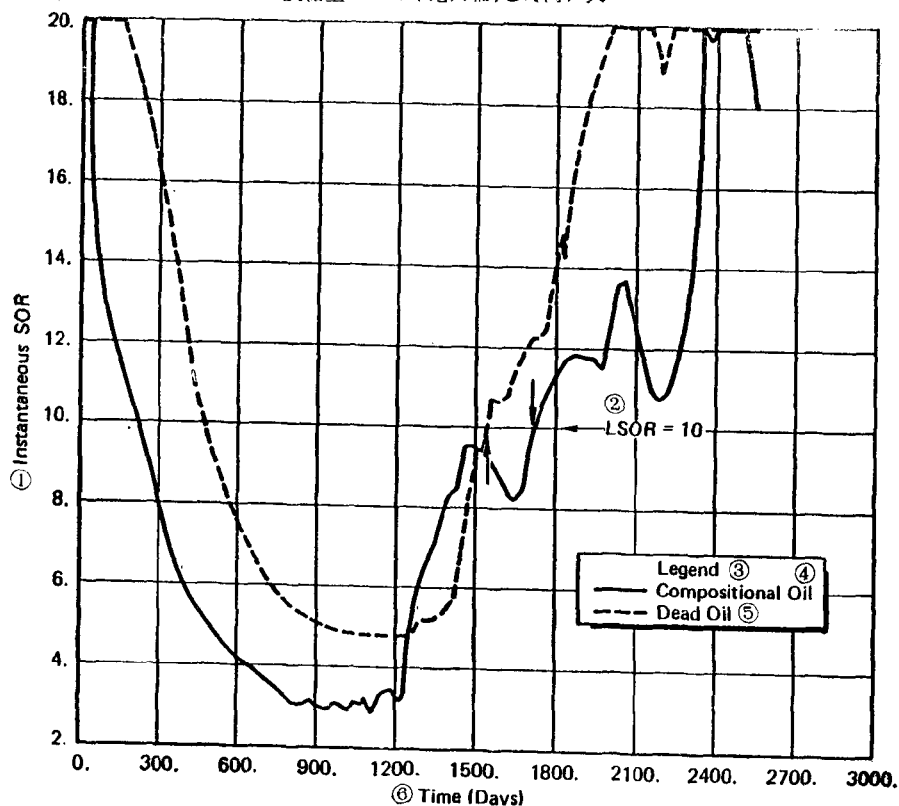


图 5 Buena Vista Hills 轻油蒸汽驱瞬间蒸汽原油比
 ①瞬间蒸汽原油比; ②极限蒸汽原油比; ③图例; ④组分原油; ⑤脱气原油; ⑥时间, 天

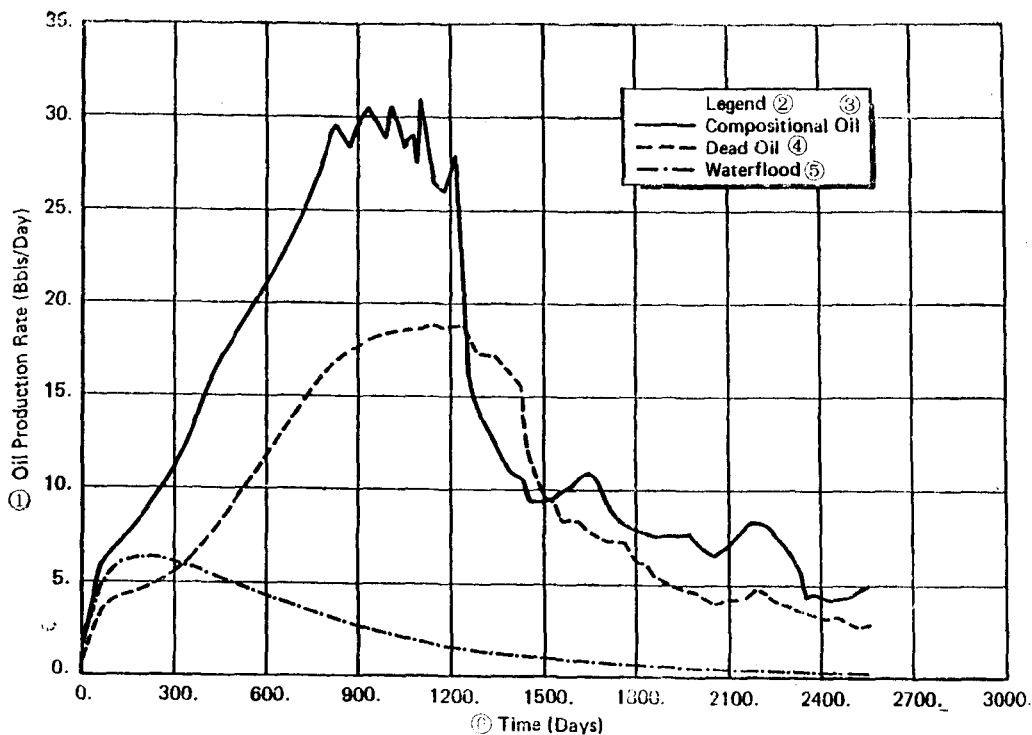


图 6 Buena Vista Hills 轻油蒸汽驱原油日产量变化曲线
①原油日产量(桶/天);②图例;③组分原油;④脱气原油;⑤注水;⑥时间, 天

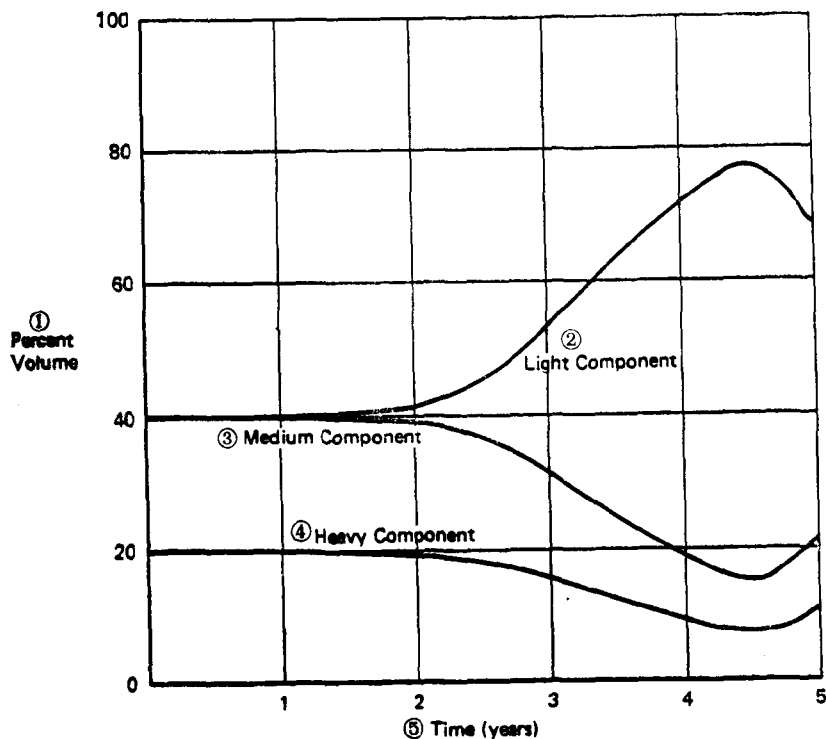


图 7 Buena Vista Hills 轻油蒸汽驱采出原油的组成
①体积百分数;②轻组分;③中等组分;④重组分;⑤时间, 年

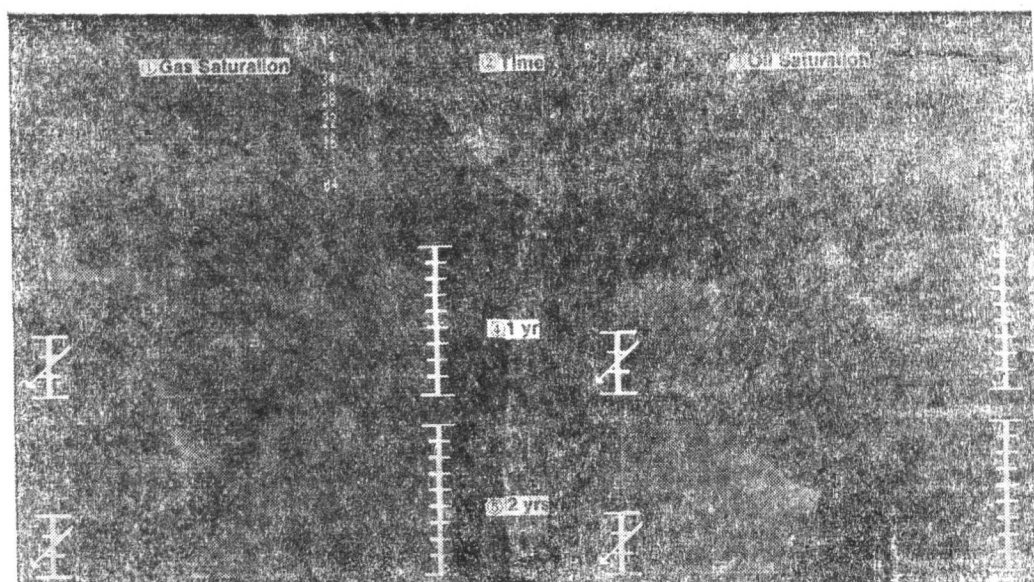
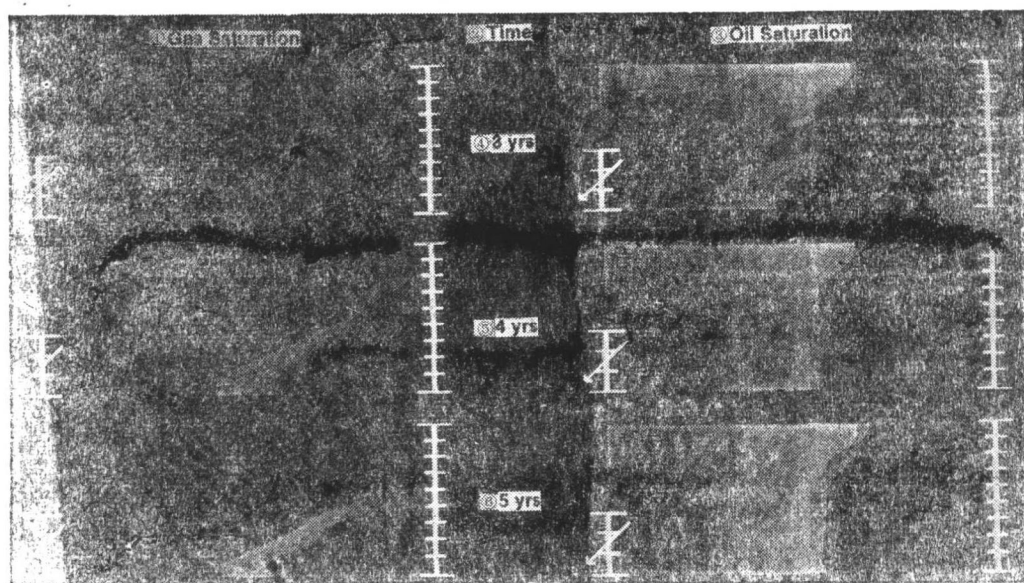


图 8 Buena Vista Hills 轻油蒸汽驱含气和含油饱和度图
①含气饱和度;②时间;③含油饱和度;④一年;⑤两年



续图 8

①含气饱和度;②时间;③含油饱和度;④三年;⑤四年;⑤五年