



蒸汽驱采油 物理模拟研究

新疆石油管理局油田工艺研究所

1983 3

国外稠油开采技术译文集第一集

蒸汽驱采油物理模拟研究

新疆石油管理局油田工艺研究所 编译
清华大学核能技术研究所
新疆石油管理局油田工艺研究所情报室编辑出版



国外稠油开采技术

译文集

(第一集)

**蒸汽驱采油
物理模拟研究**

字数：30万

编 译：新疆石油管理局油田工艺研究所

清华大学核能技术研究所

编辑出版：油田工艺研究所情报室

印 刷：新疆工学院印刷厂

乌铁四中印刷厂

编译出版说明

在研究关于新疆克拉玛依油田稠油蒸汽开采的物理模拟和数学模拟课题的过程中，我们调研了一些国外发表的有关资料。为了便于更多的同志较快地了解到这方面的情况，作为工作中的借鉴，我们对收集到的资料进行了选择，并拟定大致按四方面内容分集、编译、刊出：（一）蒸汽驱采油的物理模拟研究；（二）注蒸汽采油的数学模拟研究；（三）测量技术；（四）油层模拟。

《蒸汽驱采油的物理模拟研究》是该文集的第一集，它主要介绍了这个课题在国外的进展情况，其内容可归纳为以下三点：

1. 国外蒸汽驱采油及其研究的发展概况；
2. 油藏物理模拟的理论基础——相似理论；
3. 关于蒸汽驱采油物理模拟试验的几篇典型报告，包括最近的研究进展情况及成果。

本集中的各译文虽经校对及技术审核，但由于水平和时间所限，译文中难免存在错误和不妥之处，恳切希望读者批评指正并提出宝贵意见。

深切感谢新疆工学院领导及印刷厂全体同志对本集出版的大力协助。

一九八三年三月

（参加第一集编辑出版工作的同志有：杨良贤、郑明重、刘建初、付琪玮、江五洲、左萍、王远来、杨自霞、董建新、杨立强）

目 录

一、蒸汽注采	(1)
早期发展: 蒸汽吞吐	(1)
分析蒸汽吞吐的方法	(2)
蒸汽驱动的预测方法	(4)
蒸汽驱的油田发展	(5)
注蒸汽采油的选择和设计	(6)
重油和沥青砂的潜力	(7)
发展的限制	(9)
新的可能性	(9)
结论	(10)
参考文献	(10)
附录	(12)
二、油藏因次比例模型理论	(17)
关于因次成比例的油藏模型的文献综述	(18)
无因次群的推导方法	(19)
描述多孔介质中流动现象的方程类型综述	(20)
方程组的讨论	(20)
边界条件和初始条件	(23)
用检查分析方法推导无因次群	(24)
孔隙大小分布的相似	(27)
因次成比例油藏的可行性讨论	(27)
结论	(31)
参考文献	(33)
三、通过多孔介质流动的流动模型和比例定律	(34)
相似性	(34)
模 型	(35)
比 例	(36)
多孔介质中的比例定律	(37)
符号表	(40)
附录A: 用方程 (11) 推导无因次群	(40)
附录B: 多孔介质中流动的无因次群完整集合的推导	(42)
参考文献	(43)
四、水蒸汽在多孔介质中的流度	(44)
水蒸汽在多孔介质中的流动	(45)

蒸汽干度.....	(45)
流体流动的类型.....	(45)
有效蒸汽流量.....	(46)
试验装置和材料.....	(47)
实验方法.....	(48)
结果讨论.....	(49)
结论.....	(51)
参考文献.....	(52)
五、注蒸汽采油的实验室研究.....	(61)
引 言.....	(61)
实验方法.....	(61)
实验结果.....	(64)
注热水开采和机理.....	
蒸汽驱采收率.....	
蒸汽驱采收机理.....	
粘度下降和热膨胀.....	
蒸汽蒸馏.....	
气体驱动和溶解萃取效应.....	
高压蒸汽采收率.....	
岩芯的热性能.....	
估计蒸汽驱性能的方法.....	(73)
蒸汽前沿的推进.....	
注热水时温度分布.....	
采收率的预测方法.....	
结论.....	(76)
参考文献.....	(78)
附录.....	(78)
六、注蒸汽采油的实验研究.....	(80)
序言.....	(80)
实验方法.....	(80)
实验结果.....	(83)
蒸汽的不同注入率对生产的影响.....	
原油的不同粘度对采收率的影响.....	
蒸汽前沿对油饱和度的影响.....	
向油砂注水蒸汽的采收实验.....	
结束语.....	(86)
七、注汽采油实验室模型研究.....	(87)
前言.....	(87)
试验.....	(88)

比例的考虑.....	
装置和设备.....	
材料.....	
实验过程.....	
实验数据的处理.....	
讨论和建议.....	(92)
参考文献.....	(94)
附录A: 物理模型的比例.....	(97)
附录B: 盖层和底层厚度的估算.....	(99)
附录C: 热电偶的位置.....	(100)
八、以真空模型再现蒸汽过程.....	(103)
引言.....	(103)
比例参量.....	(104)
物理模型.....	(107)
实验方法.....	(112)
应用.....	(114)
参考文献.....	(124)
附录A: 比例参数的确定.....	(126)
附录B: 比例方法举例.....	(132)
九、实验室注蒸汽模型的比例精度.....	(139)
引言.....	(139)
毛细管压力成比例.....	(140)
中等粘性的油.....	
高粘性油.....	
数值计算和实验预测的比较.....	(141)
注入速度和压力的影响.....	(142)
结论.....	(142)
参考文献.....	(144)
附录A.....	(145)
附录B.....	(148)
附录C.....	(149)
十、实验室蒸汽驱油实验的数值模拟.....	(154)
引言.....	(154)
数值模型.....	(155)
物理模型.....	(155)
装置.....	
实验程序.....	
用于产油历史拟合的实验运行.....	

产油史拟合.....	(156)
拟合准则.....	
参数.....	
a. 数值参数.....	
b. 运行参数.....	
c. 物理和油层物性参数.....	
数值模拟的程序.....	
结果和讨论.....	(158)
冷水注采.....	
热水注采.....	
蒸汽驱动.....	
结论.....	(159)
参考文献.....	(160)
十一、蒸汽驱的界限和加强.....	(171)
引言.....	(171)
实验.....	(172)
结果的讨论.....	(173)
结论.....	(174)
参考文献.....	(174)
十二、蒸汽驱油按比例物理模型研究(加利福尼亚	
大学1977.9—1978.9第一年度报告).....	(183)
引言.....	(183)
基础知识.....	(185)
蒸汽驱的解析的和半解析的研究.....	(185)
蒸汽驱的物理模型研究.....	(187)
物理模型的按比例模化.....	(189)
按比例模化方法.....	(189)
按比例模化的实例.....	(196)
压力的比例模化.....	(197)
温度的比例模化.....	
时间的比例模化.....	
流量的比例模化.....	
蒸汽干度比例模化.....	
粘度的比例模化.....	
渗透率的比例模化.....	
模型的结构和实验步骤.....	(200)
珠子人造岩芯及其调节设备.....	
注入设备.....	
产出设备.....	

实验前的准备.....	
实验运行.....	
参考文献.....	(207)
附录.....	(213)
十三、蒸汽驱油按比例物理模拟研究 (南加利福尼亚	
大学1978.9~1979.9第二年度报告)	(214)
摘要.....	(214)
结果分析.....	(214)
蒸汽注入率的影响.....	
蒸汽干度的影响.....	
油粘度的影响.....	
从蒸汽区和热凝法水区的油采收量.....	
能量平衡.....	
渗透率的影响.....	
底水的影响.....	
底渗透层的影响.....	
具体油藏模拟.....	
参考文献.....	(241)
十四、洛伊德明斯特型重油油藏反七点蒸汽驱物理模型研究.....	(243)
引言.....	(243)
模化.....	(244)
目的.....	(245)
基础知识.....	(249)
A热水和蒸汽前沿的稳定性.....	(245)
B孔隙介质中的传热.....	(246)
C用均匀流体饱和的孔隙介质中的对流换热.....	
i) 自然对流的建立.....	
ii) 对流换热	
iii) 空隙介质中沸腾系统的对流.....	(247)
D物理模型.....	(248)
i) 蒸汽—水模型.....	
ii) 在含油的不按比例基本模型中注蒸汽	
iii) 按比例的或局部按比例物理模型.....	
按比例模化的准则和概念设计.....	(252)
A基本因素.....	
B次要因素.....	
i) 非均性质.....	
ii) 渗透性	
iii) 粘性指状推进.....	

iv) 自然对流和沸腾传热	.....	
V) 毛细管数的按比例模化	.....	
Vi) 油的粘度和油的性质	.....	
Vii) 井孔的按比例模化	.....	
实验装置	.....	(258)
A 物理模型	.....	
B 流体的注入系统	.....	
C 流出液处理系统	.....	
D 数据监测系统	.....	
材料和物性	.....	(260)
A 固体	.....	
i) 孔隙介质	.....	
ii) 盖层	.....	
iii) 底层	.....	
iv) 衬里和绝热层	.....	
V) 模型容器	.....	
B 液体	.....	
i) 水相	.....	
ii) 油相	.....	
C 流体与流体的相互作用以及固体—流体—流体的相互作用	.....	
实验步骤	.....	(363)
A 初始标准	.....	
B 实验运行	.....	
数据处理步骤	.....	(264)
A 体积平衡	.....	
i) 总的流体输入与输出的分析	.....	
ii) 流出液中水的份额	.....	
B 压力数据	.....	
C 温度数据和能量平衡	.....	
D 温度和产油的综合分析	.....	
结果和讨论	.....	(266)
A 不同实验运行的结果和共同特性	.....	
B 对模型功能的评价	.....	
i) 结果的重复性与数据的离散度	.....	
ii) 绝热层与热损失	.....	
iii) 早期水突破, 沟涌和水锥现象	.....	
iv) 蒸汽超越现象	.....	
V) 速度的按比例模化	.....	
Vi) 不按比例模化的情况	.....	

C 各变量的作用.....	
i) 注入量、蒸汽干度和输入焓的影响.....	
ii) 蒸汽体积就地乳化作用与采收率的相互关系.....	
iii) 完井间距的影响.....	
iV) 不同开采方案的影响.....	
a) 注蒸汽后注冷水.....	
b) 水驱后的蒸汽驱.....	
c) 压力循环和蒸汽吞吐.....	
结论.....	(276)
建议.....	(277)
A 硬件改进.....	
i) 油层模型.....	
ii) 蒸汽发生器.....	
iii) 聊送系统.....	
iV) 绝热层与衬里.....	
V) 热损失的监测.....	
Vi) 蒸汽干度的监测.....	
Vii) 乳化物品质的监测.....	
B 材料改进.....	
i) 孔隙介质.....	
ii) 油相.....	
iii) 水相.....	
C 基本研究和概念方面的改进要求.....	
参考文献.....	(279)
附录A, 热电偶的位置.....	(284)
附录B, 一次典型的蒸汽驱实验的详细分析.....	
A、实验观测和系统参数.....	
B、体积平衡与能量平衡.....	
i) 体积平衡.....	
ii) 能量平衡.....	
C 说明.....	
i) 对热平衡的一般评论.....	
ii) 纵向驱油效率和平均蒸汽饱和度.....	
iii) 温度分布和产出性能.....	

一、蒸汽注采

C·S·马修斯

周惠忠译 徐元辉校

注蒸汽采油在最近二十年内已变成一项公认的开采技术。在本文，我们将讨论这一技术的进展和展望，将讨论选择和设计注蒸汽采油的方法，还将考虑应用注蒸汽的制约以及改进的可能性。

本文中“注蒸汽采油”一词是在一般意义上讲的，除讨论蒸汽驱以外还将包括蒸汽吞吐（循环注入蒸汽）。

关于注蒸汽采油的各个方面已发表了许多文章，本文引用的广泛书目就是例证。最新的全面综述是法路克·阿里（Farouq Ali）和梅尔道（R·F·Meldau）发表的〔1〕。

1、早期发展：蒸汽吞吐

蒸汽注入得克萨斯油藏的记载可以追溯到1931年〔2〕。而连续的蒸汽驱直到1959—1960年才开始，当时壳牌公司分支机构在荷兰舒内比克（Schoonebeek）〔3〕、委内瑞拉美内·格朗德（Mene Grande）〔4〕、美国约巴·林达（Yorba Linda）〔5〕着手注蒸汽采油的小规模试验。现在在舒内比克和约巴·林达，蒸汽开采仍在进行，后面将要讨论。

（1）委内瑞拉

美内·格朗德的蒸汽驱小型试验导致了蒸汽吞吐工艺的发展〔4〕。当时为了试图减少地层压力而打开一口蒸汽注入井来采油，油却出人意外地以每天100—200桶的速度产出。这是第一口“蒸汽吞吐”井。这个工艺在委内瑞拉和美国都经历了重大发展。在1960—1970期间用注蒸汽产的绝大多数油都是用的这个工艺开采的。典型的是注几个星期的蒸汽，然后关井（浸泡）直到蒸汽凝结。然后开泵，并就产油。当油产量下降到低水平的时候，重复这一循环。

委内瑞拉的热采几乎仍然是全部来自蒸汽吞吐（95%）。这些厚而松的油砂与溶解气体驱结合起来，将获得令人满意的油采收率，并且每用一桶蒸汽采收到的油的比例也非常高。这样讲是公平的：蒸汽吞吐在委内瑞拉打开了重油的巨大新储量。在一些地区如北太·朱安纳（North Tia Juana），用原有的方法一点也不能采出重粘油。这个地区蒸汽吞吐开始的产油率是每天300—500桶。适于蒸汽吞吐的油一般在11—15°API的范围内，油藏条件下粘度为100—10000厘泊。蒸汽吞吐开始时油饱和度一般都高（75—85%），这是由于最初采收率（及最初开采速率）都低。

（2）荷兰

* 参考文献和插图在文末。

首批大规模蒸汽驱之一开始于1960年于荷兰的舒内比克油田^[3]。中等粘性油（180厘泊）的采收率相当成功。这无疑地促进了美国和委内瑞拉其它的蒸汽驱油田试验。取岩芯表明蒸汽注采残余饱和度低达8%^[4]。仅用热水驱扫的区域的残余饱和度约为35%。近来在舒内比克的一些试验是在高压高温下进行的。在这些工况下，现场产生CO₂和H₂S，因此必须发展新合金。这样舒内比克在油藏和冶金上都是开拓者。

（3）美国

美国商业注蒸汽采油开始于1960年在加利福尼亚的约巴·林达油田^[6]。这个油田先前的生产仅用井下加热器来达到。估计最初的产量为地层储量1亿桶的5%。在这个油田蒸汽吞吐成功变得很闻名以后，蒸汽吞吐很快在这个州展开起来。到1963年，这个州总共有29个蒸汽吞吐工程^[5]，而到1965年这个数字增长到267。注入15,000—25,000桶/井蒸汽得到100—200桶/天·井的最高产率，并且大约在一年内进行了下降的但仍然是商业性的开采。然后重复注入循环。尝试蒸汽吞吐相对讲是不贵的，许多经营者这样做了。到1967年，在加利福尼亚估计由蒸汽吞吐得到的额外油产量已达到120,000桶/天。在那时用了约408个蒸汽发生器^[5]。

在加利福尼亚以外，也广泛地尝试蒸汽吞吐。虽然在少数情况下获得成功，但与加利福尼亚相比得到的附加产量却非常少。在美国，加利福尼亚以外油通常是低粘度的。已证明水注采是最经济的辅助方法，蒸汽注采不能与之竞争，对于加利福尼亚的稠粘油，水注采的采收率低。这时蒸汽注采打开了大门。

早期试图将蒸汽注采应用美国沥青砂是特别的不成功。大部分是由于不利的油藏特点。如低油饱和度，大漏水层、断层或油粘度极高，使蒸汽注入率非常小。

（4）加拿大

加拿大首批持续蒸汽吞吐工程之一开始于1964年，用于冷湖（Cold Lake）沥青砂。许多年实验以后，在1980年产量达到7000桶/天的水平。在那时，经营者申请一个全尺寸的工程项目（140,000桶/天）。在写本报告时还没有批准。这个工程，包括制造高级设备，估计花一百亿美元。

蒸汽吞吐在更粘（1百万厘泊）的阿瑟巴斯卡（Athabasca）沥青砂里不太成功。在冷湖区粘度约比这低10倍。冷湖沥青也明显地有足够的溶解气体驱动冷油进入蒸汽强化采油的井。

（5）其它

法国和刚果也在进行蒸汽吞吐。西德，特立尼达，苏门答腊，阿根廷和巴西，吞吐将可能与在进行或计划中的蒸汽驱一起使用。

2. 分析蒸汽吞吐的方法

蒸汽吞吐是一种工艺过程，其油田应用胜过理论和实验室研究。就许多情况而言，在实际情况下试行蒸汽吞吐比进行研究来决定蒸汽吞吐是否可用更经济。主要的费用是把一台轻便蒸汽发生器运进油田和连接管路的费用。

经验的资料是蒸汽吞吐可否应用的首要指导。其中一些为^[5]：

1. 厚的均质砂油藏的反应最好，特别当重力泄油有效的时候。
2. 薄的(20至40英尺)可渗透性油藏，对几次吞吐循环直到压力耗尽前，反应也是好的，如果重力能使冷油流入，反应也是好的。
3. 薄油藏或由几个小砂层组成的厚油藏，如果压力低，反应就差。
4. 产水率很高及含水量很高的油藏，反应差。
5. 低渗透率或含高粘度(>10,000厘泊)油的油藏反应差。

这些资料导致了几种数学分析蒸汽吞吐的方法。包贝格(Boberg)^[7]把提高油产量与到井筒的径向加热距离联系起来。他的分析方法考虑传导和热流体的流动使加热过的区域冷却下来。对于一个典型的重油田，他的方法预测提高3—4倍最大产率。

包贝格的分析一般低估了蒸汽吞吐里达到的产率。这可能是因为他的分析没有考虑到从原油里被蒸汽驱出的溶解气体的增加，也没有考虑到非常热的区域外，低水平加热的影响。当油藏压力仍然相当高的时候，包贝格的方法似乎是最成功的。在这种情况下，气体释放加强的驱动是很小的。

欧文斯(Owens)和苏特尔(Suter)提出了一种非常简单的模型计算蒸汽吞吐的反应。他们提出：

$$\frac{\text{热产率}}{\text{冷产率}} = \frac{\text{热粘度}}{\text{冷粘度}}$$

一般，这个方法倾向于高估蒸汽的激励作用。在典型情况下，预计提高20—50倍。在不完全枯竭的油田，产油率提高的范围由在委内瑞拉一些厚油藏的6倍左右到在许多加利福尼亚油藏的10—20倍。(见表1)

现已发表了大量蒸汽吞吐的其它的模型。一般，这些都类似于包贝格的模型。所有这些模型都估计了每桶蒸汽的采油量。几个早期的油田结果示于表1(来自参考文献5)

在委内瑞拉，每一次循环注入的蒸汽一般都大于加利福尼亚，例如，在太·朱安纳注入约50,000桶。太·朱安纳典型的额外采油量与注入蒸汽的比约为3，这个比率与加利福尼亚比较成功的吞吐相符。

热油藏的数值模拟也可用来预测蒸汽吞吐的情况。通常，注入蒸汽前，并非这种模型所需要的输入参数都是已知的。因此这些模拟对于将油田的情况外推到后期的吞吐，或外推到不同的开采工况比对于事先的预测更为有用。

一般地讲，蒸汽吞吐不会导致高采收率。普通采收率的范围为地层储量的10—20%。然而，对于某些油藏条件，特别在重力泄油能提供经济的生产率的场合，蒸汽吞吐采收率可能是高的。已有报导，在加利福尼亚的约巴·林达上砾岩层，采收率为地层储量的35%。这个出色的采收率是由于在一个井距能非常密的(0.8英亩)厚(325英尺)而浅的油层里的重力泄油缘故。因此，横向井距比地层厚度密得多。在主太·朱安纳(委内瑞拉)油藏密集已得到了好的采收率。在这种油藏里由于油藏密集以及溶解气体的驱动，蒸汽吞吐的总采收率在25—30%的范围内。

占全世界目前蒸汽吞吐激励产量几乎一半的蒸汽吞吐将继续是重要的。蒸汽吞吐在初始注入性差的驱动工程中，作为开始注入手段，及在连续性差的油藏中，作为主要手段仍将是重要的。在有良好重力泄油的油田或油藏密集驱动的油田，吞吐也将保持其重要性。

3. 蒸汽驱动的预测方法

在美国蒸汽驱动作为一种方法发挥其重要性大约开始于1970年*。（*美国以外蒸汽驱动采相对来说仍然并不重要）那时，在加利福尼亚，蒸汽驱动的产量约为30,000桶/天。大约十年以后，蒸汽驱动开采量增加到超过150,000桶/天。在本节，我们将回顾那种产量的增长。我们以讨论蒸汽驱动预测方法作为开始。

与蒸汽吞吐性能预测价值较低成为对照，蒸汽驱性能预测是非常重要的。实施蒸汽驱动小型现场试验要花很多时间和钱。而且，若无某种数学或物理油藏模型，将小型试验放大到全尺寸是很困难的。因此蒸汽驱预测方法的进展与蒸汽驱的油田进展是携手并进的。

(1). 早期预测方法

威尔曼 (Willman) 等人^[9]或沃莱克 (Volek) 与普赖尔 (Prior)^[10]的实验室研究表明用蒸汽可得到高的潜在的驱替。在蒸汽凝结，水前沿，作为残油留下的原油的蒸汽蒸馏能在蒸汽扫过的区域造成很低的残油饱和度。对于大多数人们感兴趣的粘性原油来说，残油的饱和度在5—15%孔隙体积的范围以内。这要比水注能获得的残油饱和度低好多。这些早期实验室研究还表明，蒸汽驱替是一个高度稳定的过程。虽然蒸汽的粘度低，但它不能如不可凝结气体那样像手指一般伸出穿过集油带。蒸汽的“指头”很快的失掉热量并凝结，加热周围的岩石和流体。蒸汽前沿的这种稳定性是蒸汽注采的一个重要的优点。

蒸汽的残油饱和度的实验室测量是油田方案设计中的一个要素。六十年代早期的预测方法利用这些结果以及热流和热损失的分析解来估计温度分布，热效率和采收率。劳威利尔 (Lauwerier)^[11]和马克思 (Marx) 与兰根海姆 (Langenheim)^[12]的著作是所用的最早的热流分析解中的两篇。

为了用这些方法，必须从注入试验中确定蒸汽注入率。这样，对垂直驱替前沿（无蒸汽重力上窜现象）的均质油藏的情况，就能算出蒸汽驱扫出的油量。

迈赫尔 (Wyhill) 和斯泰格梅尔 (Stegemeier)^[13]补充了这些较早的分析方法，并为油田工程提出一种估计油一汽比的简单的方法。本文在后面将说明此方法。

(2). 按比例物理模型

这些模型用于蒸汽注采是在六十年代后期。这些模型能考虑油藏非均质性和蒸汽的重力窜流，因此比以前的分析方法优越。另外，他们能表示出什么地方需要另外加井，或什么地方改变开采策略可改进开采效果。

早期按比例模型需用高压容器封装模型，以便让盖层压力施于流动室。结果，模型很笨重。装填岩芯，饱和水和油以及排放达到汽驱开始时的主要工况，需要很多时间。这些早期模型里，常常使用相当于油田条件的蒸汽温度。

当表明在低温下用负压蒸汽能得到适当的按比例的结果时，引起了实验室模拟蒸汽注采的重大突破^[14]。这使填充床模型能用薄塑料片来封装，而真空使它变成刚性容器。这种技术使高压容器不必要了。而且，它让研究者看得见那儿正在发生驱替，那儿不在驱替。用于这种模型的注入和产出设备的略图示于图1。

虽然比例物理模型能用来准确地描绘蒸汽注采的大部份机理，但是装填和操作仍费时间，

而且常常受到合适的比例及个别油和砂的材料及流体的限制。需要相当多的时间，还要很小心地用合适大小的砂子或玻璃珠来装填模型，用油和水适当地饱和及实现蒸汽注入的模拟。近来，高效计算技术的发展，计算机速度及贮存量的增加已使蒸汽注入的数学模拟变得有效、可靠和迅速。它们也已能考虑附加机理的作用，如可溶气体对蒸汽驱动的影响。最近，热数字模拟方法已重复物理模型的结果。这对使用数学模拟提供了更多的信任。

(3).数值模拟

描写油藏油、水和水蒸汽流动以及传热的偏微分方程在五十年代就已建立。但在那个时候计算机贮存不够，速度太慢，不容许当蒸汽注入时联立求解这些方程，在这20年后不仅计算机速度和贮存飞跃的增长，而且有效的计算技术也发展了，柯茨 (Coats)、朱 (Chu) 和马尔柯 (Marcum) [16] 以及柯茨 [17] 已描述这些技术的一部分。

在目前发展阶段，可能模拟蒸汽驱动一个非均质油藏有代表性的一部分特性。被模拟的一部分可能包含有几个注入井和其周围的生产井，油藏的垂直和水平方向都是不均匀的，也能包括倾斜和重力的影响。

数值模拟目前是预测蒸汽注入性能最快、最精确和最有效的方法。这种模拟的一个问题是很难直观观察计算结果，计算机通常输出一大堆令人烦恼的纸张，给出大量的油产量、温度、饱和度分布等等的计算值，有时也给出一系列显示这些数据的二维图形。大量的输出本质上妨碍了数据的分析，一个方案的典型输出量大约是50万个数。

最近在这方面的一个改进是动视图方法，这是由壳牌公司研究者们发展的。借助于这个技术，大计算机的数值输出量用一个较小的计算机来加工处理，以便使加工的变数发展成为三维矩阵。这些数字结果转换为电视讯号，输入到彩色检验器，压力和温度的大小典型地表示为彩色谱。油、蒸汽和水的饱和度用三种不同颜色显示，如图2所示那样，温度、压力和单个流体饱和度可以按油藏剖面图或航行图的形式显示。

图2表示了在特定时间里饱和度，压力和温度的剖面图和累计注入和生产量图。图左边三个剖面图两边的垂直黑线表示注入和生产井的完井间距。饱和度剖面中可以清楚地看到蒸汽窜流，因为刚在其下面是高饱和水（来自蒸汽冷凝），同时生产井的温度仍然是低的，并且油产量也很低，如图上几乎是在横坐标上的绿色曲线所示，这是由于生产井仍然还是冷的缘故造成的。温度和饱和度剖面图显示，加热在蒸汽区和蒸汽冷凝区都已存在，但没有一个已推进到生产井。像注入推进那样，彩色检验器的输出可拍成一部可动的图片，计算结果可以通过录像机或电影重复放映。

这样，许多可能的注入和生产方案能经济地进行研究，结果的图示加快了现象的解释。同时使工程改进直观化。

4. 蒸汽驱的油田发展

(1). 早期驱动

工业界在1970年仍然在学着如何进行蒸汽驱。在几个垂直渗透率良好的油田里，观察到注入的蒸汽迅速地升到注入层段顶处的密封淤泥或页岩，然后在一个薄层里移动到生产井。在生产井见蒸汽后，注入井和生产井之间只能维持非常小的压差。因而油的产出不是由于“驱”，而更是由于“拽”。顶部蒸汽区紧下面的油被蒸汽加热，并且与蒸汽一起流到生产井。

由于井间压力梯度非常低,所需要的注入压力就非常低。因此早期蒸汽驱能以“极低的压力下连续注蒸汽”为特征。蒸汽注入率亦很低,通常仅仅高到足够维持生产井是热的而几乎不产出蒸汽。高注入率蒸汽驱主要是在七十年代出现的。

(2).高注入率蒸汽驱

对显著倾斜的油藏,实验室模型研究表明能用在上坡注蒸汽的办法将下面的油“驱”到生产井。这通常需要开头向下坡的一些生产井注入蒸汽来预热油。此类驱开始出现于1970—1980这一时期。例如在波索山油田(Mt. Poso)^[19]及密德威·森塞特油田(Midway—Sunset)^[20]。部分由于这些高注入率驱的结果,在美国蒸汽驱产量由1970年30,000桶/天增加到1980年150,000桶/天。

蒸汽驱能带来生产率引人注目的增加。在波索山油田,在强烈水驱的最后油的粘度是280厘泊。在油田生产1500桶/天油,含水99%的时候引入蒸汽。当前油产量是25000桶/天左右,估计在波索山油田蒸汽驱的采收率可超过地层储量的65%,与常规的水驱得到的38%成为对照。

美国最大的蒸汽驱是在克恩河(Kern River)(68,000桶/天)。其它大的驱是南贝尔拉吉(South Belridge)(38,000桶/天)、萨·阿尔多(San Ardo)(25,000桶/天)及密德威·森塞特(21,000桶/天)。在委内瑞拉的拉哥涅拉斯(Lagunillas)蒸汽驱产量为约8000桶/天。在荷兰舒内比克蒸汽驱产量预期在几年内达到9000桶/天。

加拿大和法国都在进行蒸汽驱,但至今产量很小。特立尼达、阿根廷和印度尼西亚都在计划蒸汽驱。印度尼西亚的计划是世界上最大的蒸汽驱,油产率为300,000桶/天。

5.注蒸汽采油的选择和设计

(1).判断标准

一些最成功的蒸汽注采的关键参数列于表2^[1]。符合工程成功的油藏特性范围很广。表3列了一个不适于蒸汽注采的因子的条目。此表可用来迅速地筛选工程。然而,一个工程可能违背这些因子中的一两项,仍然是成功的,只要其它所有因子特别有利。因此每一个有可能性的工程都应该根据其本身的长处进行估计。

(2).估算油—汽比

初步筛选后,下一步评论一个有可能的蒸汽注采是估算平均油—汽比。为此目的用迈希尔和斯蒂格梅尔^[13]的方法是合适的(见附录)。下列因子需要测量或计划:

- 1.盖层和底层的导热系数和平均热容量;
- 2.蒸汽区的平均热容量;
- 3.油藏的总厚度和净厚度及其孔隙度;
- 4.估计的蒸汽注持续时间(此可由注入率和注入蒸汽的总空隙体积估算);
- 5.井底条件下注入的蒸汽干度;
- 6.地层温度和蒸汽区温度;
- 7.由于蒸汽注引起的油饱和度变化。

由这些量能计算出无因次注入时间和无因次汽化焓。然后,能从表示这二个参数函数的: