



稠油蒸汽驱

1

热采工程



学(北京)

45

-1

石油工业部科学技术情报研究所

一九八七年一月

TE345
001-1

31858



稠油蒸汽驱

1

热采工程



主 编：张 琛
责任编辑：白 仲 华
助理编辑：王 国 清

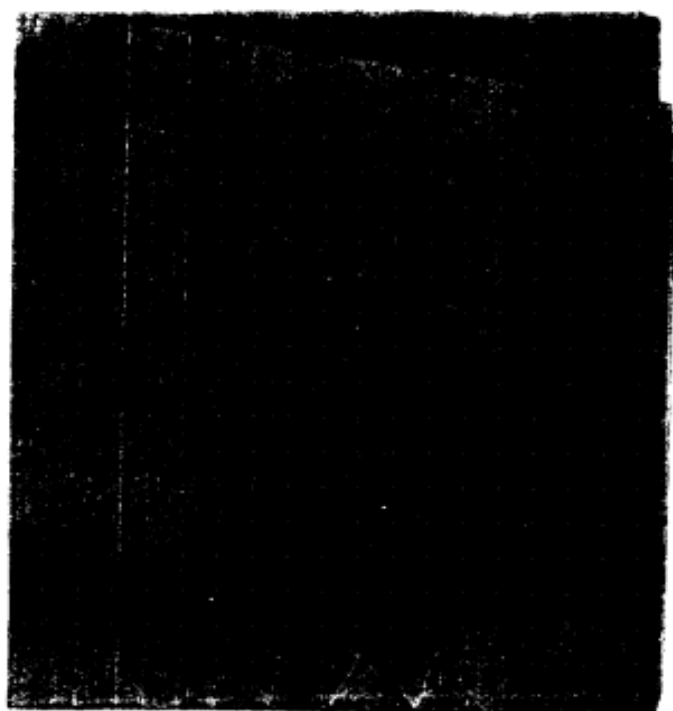


200807314

石油工业部科学技术情报研究所

一九八七年一月

31858



稠油蒸汽驱 1 (热采工程)

开本787×1092毫米 1/16 印张13.5	编辑：石油工业部科学技术情报研究所
字数：34万 印数：1—3000	出版：石油工业部科学技术情报研究所
1987年1月北京第一次印刷	印刷：工程兵机械学校印刷厂
油情(单)87001 工本费：2.50元	发行：石油工业部科学技术情报研究所
	(北京和平里七区十六号楼)

编 选 说 明

国外运用热力方法采油已证明是行之有效的办法,尤其是注热蒸汽进行吞吐及驱替已成为开采各种稠油资源的现实可行的措施。我国稠油资源及环境与美国克恩河油田为代表的浅层稠油,加拿大的阿萨巴斯卡油区为代表的近地表的重质油砂,委内瑞拉的奥里诺科油砂带为代表的沥青油藏不尽相同。辽河油田、胜利油田及克拉玛依油田的稠油,在深度、粘度、储层岩性等方面各具特点;辽河高升油藏稠油热采已取得较好效果,新疆及胜利的热采试验前景也较好,热力采油的规划和产量将日受重视。

考虑到稠油热采技术论文及国际会议文集很多,为了节省读者时间,宣传热采前景,介绍热采技术进展,探讨热采技术配套情况,了解热采技术经济环境,遵照部领导指示,我们将陆续选编一些比较有代表性的文章,希望能为读者提供有关热蒸汽驱油现状和经验,前景和发展,关键和配套技术等方面的稍为系统的参考材料。第一册选编的译文少数曾在其他刊物发表,这次选入时已重新校订以便使体例等尽量保持一致;人名、油田名、地层名以及州以下地名,则参照第二届北京国际石油工程会议文集的体例均用原文。一些摘译的文章题目是编者加上去的。

每篇文章前面添写的“三分钟提要”,旨在提请读者适当注意该文的主旨及选编目的。

目 录

1. 注蒸汽驱油	何百平 译(1)
2. 现场蒸汽驱项目的工艺述评	徐之辉 译(16)
3. 用相关分析法预测蒸汽驱油采收率	王国清 译(41)
4. 蒸汽驱的三维模拟方法	吴少融 译(55)
5. 应用电视彩色图象解释和展示油藏数值模拟结果	宣敏华 译(85)
6. 油层、层理裂缝和倾角对蒸汽驱波及效率和所需热量的影响	杨长枯 译(96)
7. 各种提高采收率(EOR)方法对水的需求和用途	顾文娟 译(113)
8. Placerita油田采用蒸汽和电力联合发生装置	高贵生 译(127)
9. 热采过程试井数据的计算机化分析法	刘懋宁 译(135)
10. 用地震方法监测热采前沿	吕学谦 译(171)
11. 美国本土热力采油的环境和前景	金静芷 译(180)
12. 蒸汽热采工艺的新进展	唐 红 译(200)
13. 热采工艺的配套技术	唐养吾 译(207)

三 分 钟 提 要

这是一篇对热采的综合述评，包括蒸汽驱油的演进，筛选，以及设计方法，制约因素，可能的改进。它能够给人以比较明确的概念。文章提出的注蒸汽的筛选条件是比较好的。

注 蒸 汽 驱 油

Charlec S. Matthews
Shell Oil Co.

何百平 译
甘克文 校

摘 要

本文首先讨论了注蒸汽的发展历史，其次对周期性蒸汽吞吐和蒸汽驱方法的现状作了概述，最后讨论了注蒸汽开采重质原油和沥青砂的潜力以及局限性和改进的可能性。

引 言

在过去二十年中注蒸汽已成为一种肯定的采油方法。本文将讨论此方法的沿革和展望，以及选择和设计注蒸汽的方法，还将研究采用注蒸汽方法的局限性以及改进的可能性。

本文中注蒸汽这个术语是广义的，即除了蒸汽驱外，还将讨论蒸汽吞吐（周期性注蒸汽）。

已经提出了许多有关注蒸汽方面的论文，本文所附的大量参考文献证实了这一点。Farouq Ali 和 Meldau^[1]的论文是最近期的全面论述。

早期发展——蒸汽吞吐

据记载，早在 1931 年，得克萨斯州的一个油藏中就注过蒸汽^[2]。然而，直到 1959—1960 年间，当壳牌公司各附属机构在 Schoonebeek（荷兰）^[3]，Mene Grande^[4]（委内瑞拉）和 Yorba Linda^[5]（美国）等油田进行注蒸汽先导性试验以前，蒸汽驱虽然得到鼓励，但并未起步。目前，Schoonebeek 油田和 Yorba Linda 油田的注蒸汽仍在进行，下文将进行讨论。

委内瑞拉

Mene Grande 油田的蒸汽驱先导性试验, 导致了蒸汽吞吐方法的发展^[4]。当试图释放地层压力, 把一口注蒸汽井开井产油时, 意外地得到了 100—200 桶/天产油量。这口井就是第一口“蒸汽吞吐”井。委内瑞拉和美国对此法都做了很大的改进。在 1960—1970 年间, 大部分注蒸汽采出的原油都是用此法得到的。典型的蒸汽吞吐方法是往井中连续注几个星期蒸汽, 然后关井(浸焖)待到蒸汽已冷凝下来。然后下泵产油。当产油量降至规定下限时, 则再次重复这一过程。

委内瑞拉热采法的产油量几乎全部(95%)是用蒸汽吞吐方法得到的。由于这些厚的、未固结砂层的压实作用连同溶解气驱一起, 使之可在很高的油/汽比条件下得到了令人满意的采油量。可以说蒸汽吞吐法解放了委内瑞拉大量的重油储量。在一些地区, 如 Tia Juana 油区北部, 重质稠油完全不能用一次采油方法采出。该区用蒸汽吞吐方法开采时, 初期产油量达 300—500 桶/天。通常 API 重度为 11° — 15° 的原油, 油藏条件下粘度为 100—10,000 厘泊, 比较适于用蒸汽吞吐开采。由于一次采收率(和初期的采油速度)偏低, 因此, 在开始进行蒸汽吞吐时的原油饱和度普遍仍很高(75—80%)。

荷兰

1960 年荷兰 Schoonebeek 油田开始采用蒸汽驱^[3], 这是第一批大规模蒸汽驱中的一个。这种中等粘度(180 厘泊)原油的开采是十分成功的。这无疑促使在美国和委内瑞拉出现更多的蒸汽驱现场试验。取心结果表明蒸汽驱可使残余油饱和度降低到大约 8%。只被热水驱扫过的油层, 其残余油饱和度约为 35%。后来, 在 Schoonebeek 油田进行的一些试验是在高压和高温下进行的。在这些条件下, 会就地生成二氧化碳和硫化氢, 因此曾不得不研制出一些新的合金。可以说, 无论在油藏热采还是在金属管线的研制方面, Schoonebeek 油田都是先驱。

美国

美国于 1960 年在加利福尼亚州的 Yorba Linda 油田上开始大规模注蒸汽^[6]。以前, 该油田只有采用井下加热器才能出油。估算的一次采收率为 5% (地质储量为 一亿桶)。蒸汽吞吐方法在该油田上取得成功的消息被传开以后, 很快就在全州展开。截至 1963 年, 该州共有 29 个蒸汽吞吐采油项目, 到 1965 年, 蒸汽吞吐采油项目增至 267 个。一口注入蒸汽 15,000—25,000 桶的井, 最高日产油量可达到 100—200 桶/天, 然后产量随着递减, 但商业性开采仍可维持大约一年时间。接着再重复进行这种注汽。试用蒸汽吞吐方法相对要便宜, 而这正是许多采油商之所以这样做的。据估计, 至 1967 年采用蒸汽吞吐方法使加利福尼亚州增产原油达 120,000 桶/天。当时使用的蒸汽发生器就有 408 台。

加利福尼亚州以外的地区也广泛地进行了蒸汽吞吐试验。虽然在少数场合下也取得了一些效果, 但与加利福尼亚州相比, 所能增产的油量很少。加利福尼亚州以外的美国其他地区, 原油通常是低粘度的。注水已被证实是增加产油量最经济的方法。注蒸汽无法与之竞争。对于加利福尼亚州又稠又粘的原油, 注水开采的采收率很低。这就为注蒸汽打开了大门。

早期试图应用注蒸汽法开采美国沥青砂的尝试完全失败了。这主要是由于沥青砂层的含油饱和度低, 存在高渗透条带、裂缝或极高的原油粘度等不利的油层特征所决定的, 使得注入的蒸汽量非常低。

加拿大

1964年在Cold Lake沥青砂开展的蒸汽吞吐项目是加拿大第一批得到鼓励的蒸汽吞吐项目之一。经过多年试验,1980年日产油水平达到7000桶/天。当时,经营者申报了一个全面注蒸汽的开发项目(140,000桶/天),但是,在写本文时,该方案尚未得到批准。包括制造各种高级的设施在内,估计要花费100亿美元。

更稠的(一百万厘泊)Athabasca沥青砂用蒸汽吞吐开采是不成功的。Cold Lake重油的粘度为它的几十分之一。Cold Lake沥青砂中似乎还存在足够的溶解气可将冷油驱至蒸汽吞吐井中。

其他国家

法国和刚果也在搞蒸汽吞吐。西德、特立尼达、苏门答腊、阿根廷和巴西可能将蒸汽吞吐和正在进行或拟议中的蒸汽驱结合采用。

蒸汽吞吐的分析方法

蒸汽吞吐方法的矿场应用已走在理论和实验室研究前面。在很多情况下,对一个具体的场合中“试一试”蒸汽吞吐比进行确定其是否可用的研究更经济些。主要的开支用在移动和联接轻便式蒸汽发生器上。

经验观察是应用蒸汽吞吐法的首要指导原则。这些是:

1. 厚的均质砂层油藏对蒸汽反应最好,尤其是当重力泄油特别有效时更是如此。
2. 薄的(20—40英尺)渗透性油藏,在压力耗尽前的几次吞吐周期反应较好;如果重力能将冷油驱入井底,效果也较好。
3. 薄油藏,或者是由若干砂层组成的厚油藏,如果压力低,反应差。
4. 高产水量和高含水油藏的反应差。
5. 低渗透率或含高粘度(大于10,000厘泊)原油的油藏反应差。

通过这些观察,得出几种方法,可对蒸汽吞吐进行数学分析。Boberg^[7]认为,采油量的增长与从井筒向外加热的径向距离有关。他的分析方法允许通过热传导和排除热流体的办法使加热区冷却。用他的方法预测一个典型的重油油田,最高产油量可提高3—4倍。

Boberg方法通常低估了蒸汽吞吐所能达到的产量。这可能是由于他的分析没有考虑被蒸汽从原油中排出的溶解气所增加的驱动能量和高热区外轻度加热的作用。当油藏压力仍相当高时,似乎Boberg方法算的最准。在此情况下,因释放气体不断增长的驱替作用较小。

Owens和Suter^[8]提出一个非常简单的计算蒸汽吞吐反应的模式:

$$\frac{\text{注蒸汽后产油量}}{\text{注蒸汽前产油量}} = \frac{\text{注蒸汽后原油粘度}}{\text{注蒸汽前原油粘度}}$$

总的来说,此法过高地估计了蒸汽激采的效果。在个别情况下,此法预测的产量可增加20—50倍。一些局部衰竭油田的产油量增长范围,可由委内瑞拉某些厚油藏的6倍到加利福尼亚州许多油藏的10—20倍(见表1)。

曾提出许多其他有关的蒸汽吞吐的分析模式。总的来说,这些模式与Boberg的相似。所有这些模式都可以计算出注入每桶蒸汽的采油量,表1列出了一些油田早期的结果(引自参考文献5)。

在委内瑞拉每个周期注蒸汽量一般都比加利福尼亚大。例如,Tia Juana油田大约为

表 1 加利福尼亚州不同油田蒸汽吞吐典型井动态汇总

油 田	生产层	日产油量(桶/天)			射开有 效砂层 (英尺)	注入蒸 汽 量 (桶)	循环 周期 (月)	采 油 量		每桶蒸 汽增产 油 量
		注蒸汽前 (Q冷)	注蒸汽后 (Q热)	Q热 Q冷				总产量 (桶)	每桶蒸 汽产量	
亨廷顿滩 Huntington Beach	TM	15	160	11	40	4,500	15	29,000	6.5	5.0
圣阿尔多 San Ardo	Lombardy	25	360	14	220	14,000	18	50,000	3.6	2.8
克恩河 Kern River	China	3	140	47	22	4,400	6	11,600	2.62	2.5
中途-日落 Midway-Sunset	Potter (A)	10	110	11	250	6,000	5	9,240	1.54	1.29
克恩河 Kern River	Kern River	14	65	4.6	220	6,500	5	4,730	0.73	0.43
科阿林根 Coalinga	Temblor	3	52	17.3	107	9,000	5	4,300	0.48	0.40
中途-日落 Midway-Sunset	Tulare	5	56	11	240	12,000	6	4,640	0.38	0.31
中途-日落 Midway-Sunset	Potter(B)	5	35	7	250	7,700	4	3,000	0.39	0.29
白狼 White-wolf	Reef Ridge	30	85	2.4	75	14,000	4	6,750	0.48	0.23
博索河湾 Poso Creek	Etchegoin	7	20	3	80	6,700	6	2,660	0.40	0.21

* 头三十天平均值

50,000 桶。在 Tia Juana 油田上增产原油与蒸汽量的代表性比值约等于 3。这个比值相当于加利福尼亚较成功的蒸汽吞吐。

油藏热采数值模拟器也可用来预测蒸汽吞吐动态。通常，此模型要求的所有输入参数在注蒸汽前是未知的。因此，用这些模拟器将油田动态外延至较长的期限或不同的操作条件比进行事前预测更有利。

总的来说，蒸汽吞吐无法得到高的采收率，正常情况下，采收率为原始地质储量的10—20%，然而在某些油藏条件下，特别是重力排油能达到经济产油量时，则蒸汽吞吐可以获得较高的采收率。据报导，Yorba Linda 油田（加利福尼亚）上砾岩层的采收率达到了地质储量的35%。这个优异的采收率是由于在此厚（325 英尺）而浅的地层中重力排油的结果，而且该油藏的井距也非常密（0.8 英亩）。因此，井距比产层厚度小得多。在 Tia Juana 油田的主体上（委内瑞拉），靠油藏的压实作用也得到了令人满意的采收率。由于油藏的压实作用和溶解气驱，蒸汽吞吐的总采收率为25—30%。

蒸汽吞吐方法仍归是重要的，其采油量几乎占目前世界注蒸汽采油量的一半。在蒸汽驱项目中，当井的初期注入能力低时，蒸汽吞吐可做为一个启动手段，而当油藏的连通性较差时则可用它作为主要的开采手段，因此，蒸汽吞吐将仍然是重要的。在重力排油良好或可靠油藏的压实作用驱油的油藏中，它也仍将是重要的。

蒸汽驱预测方法

在美国，大约于 1970 年蒸汽驱已开始发展成为一种重要的驱油方法（在美国以外，相对来说，蒸汽驱产油量并不占重要位置）。那时，加利福尼亚蒸汽驱产油量约为 30,000 桶/天。大约十年之后，蒸汽驱产油量提高到 150,000 桶/天以上。在本节中将追溯这一产油量增长过程。现在从论述蒸汽驱预测方法开始。

蒸汽吞吐动态预测价值不大，预测蒸汽驱动态则非常重要，因为进行蒸汽驱先导性试验要花费许多时间和资金。此外，不经过某些类型的油藏数学或物理模型的模拟，将先导性试验区便推广到全油田是困难的。因此，研究蒸汽驱预测方法应与蒸汽驱的矿场进展密切配合。

初期预测方法

Willman 等人^[9]或 Volek 和 Pryor^[10]进行的实验室研究工作有助于说明用蒸汽驱替是大有潜力的。在蒸汽冷凝前沿遗留的残余原油靠蒸汽对它的蒸馏作用可以使蒸汽波及地区的残余油饱和度降到很低。对于大多数值得关注的稠油热驱试验表明,残余油饱和度范围为孔隙体积的 5—15%。这比注水所能达到的残余油饱和度低得多。这些早期的实验室研究还表明,蒸汽驱替是一个非常稳定的过程。尽管蒸汽粘度低,但它不像非冷凝性气体那样能“指进”穿过汇集油带。“指进”的蒸汽会很快失掉热量并冷凝,使周围的岩石和流体受热。蒸汽前沿的这种稳定性是注蒸汽的一个显著优点。

实验室测定蒸汽驱的残余油是矿场项目设计中的一个环节。六十年代初期的预测方法就是将这些残余油测定资料与热流和热损失的解析解结合起来使用,以估算温度分布,热效率和采收率。Lauwerier^[11]以及 Marx 和 Langenheim^[12]的研究成果是两个最早可供使用的热流解析解。

为了采用这些方法,必须从试注中确定出蒸汽注入量。然后计算出均质油藏在壁立的驱替前沿(蒸汽未因重力分异而越顶)情况下,蒸汽所能驱替出的油量。

Myhill 和 Stegemeier^[13]发展了这些早期的解析方法并且提出了一个矿场项目设计中计算油/蒸汽比的一个简单方法。本文后面将叙述此方法。

标配物理模型

在六十年代末,用这些模型进行注蒸汽试验。这些模型考虑了油藏非均质性和蒸汽的重力越顶,因此比以前的解析法优越。其次,这些模型能够指出在哪里需要打加密井或在哪里应改变操作方针以改善效果。

初期的标配模型,要求用高压容器将模型封起来,以便能向岩样室施加覆岩层压力,因此模型是笨重的。向模型内填砂,用水和油饱和模型,并且将模型消耗性开采到适合开始蒸汽驱的状况都很费时间。在这些初期的模型中,常常采用与矿场条件等值的温度。

当证明在低温和小于大气压的蒸汽压力下也可以得到完全按标配比例的结果时,室内模拟注蒸汽的研究工作出现了重大的突破^[14]。这就有可能用薄塑料膜来封闭人造油层模型,并且施加真空后即成为坚实的外壳。用此法就不需要高压容器了。再有,此方法可允许研究人员观看是否出现驱替。图 1 是这种模型所采用的注入和采出设备简图。

尽管标配物理模型能用来精确地展示注蒸汽的大多数机理,但是模型的充填和操作仍很费时间,并且往往为了要获得与特定的原油和砂层完全成比例的合适材料和液体而大受限制。用适当尺寸的砂粒和玻璃珠充填模型,用油和水适当地饱和模型以及进行注蒸汽模拟都需要大量的时间并需特别小心。最近,由于卓有成效的计算技术的发展以及计算机存储能力的增大和运算速度的提高,使得注蒸汽的数学模拟更有成效、可靠和快捷。数学模拟也能考虑一些附加机理的效应,诸如蒸汽驱中溶解气的作用等等。最近,热力数值模拟器已能重现物理模拟的结果。这更增强了采用数学模拟的信心。

数学模拟

在五十年代,就提出了描述油藏内油、水和蒸汽以及热流的偏微分方程。然而,那时计算机存储能力不足,计算速度太慢,不能够随着注蒸汽进展及时解出这些方程。在以后的二十多年间,不仅计算机运算速度和存储能力极大地提高了,而且也研究出有效的计算技术。Coats, Chu 以及 Marcum^[16]和 Coats^[17]都曾介绍过一些这样的技术。

在目前的发展阶段,已能够模拟一个非均质油藏有代表性部位的蒸汽驱动态。模拟的这

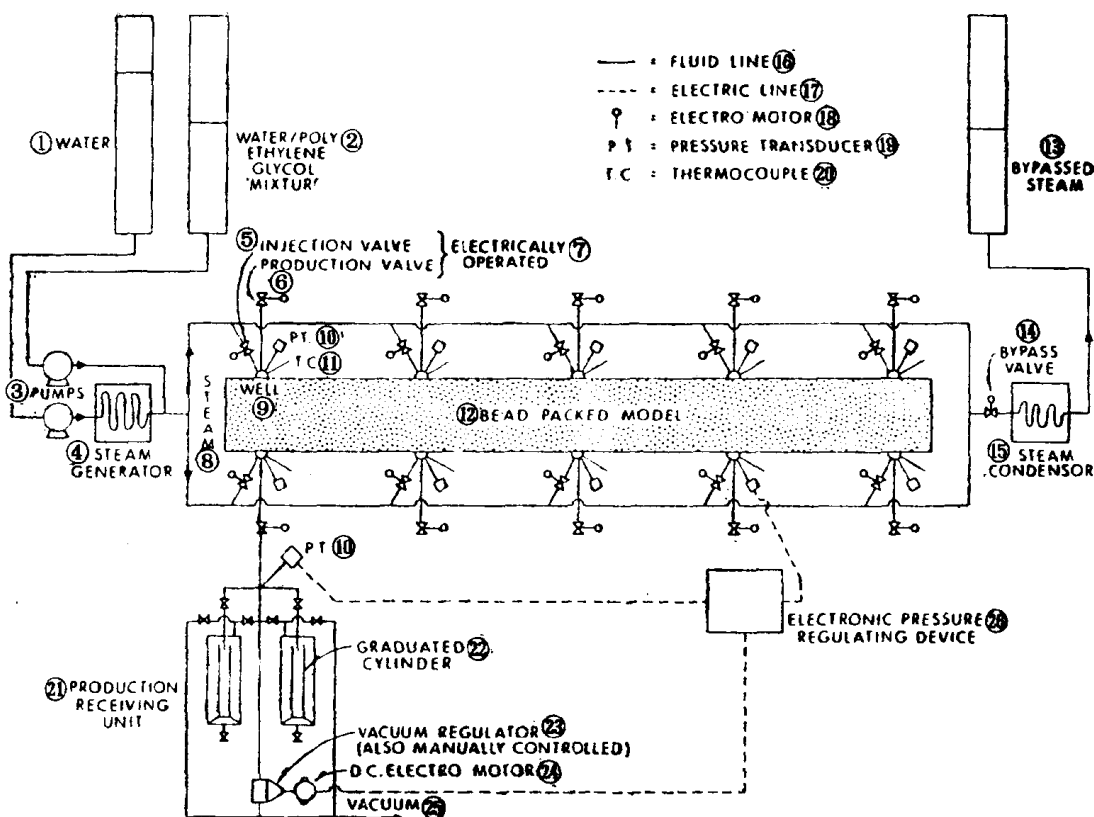


图 1 真空模型图

①水；②水/聚乙烯，乙二醇混溶液；③泵；④蒸汽发生器；⑤注入阀；⑥采出阀；⑦电动的；⑧蒸汽；⑨井；⑩压力转换器；⑪热电偶；⑫封闭油层模型；⑬分流出的蒸汽；⑭分流阀门；⑮蒸汽冷凝器；⑯液体输送管线；⑰电线；⑱电动机；⑲压力转换器；⑳热电偶；㉑产物接收装置；㉒刻度筒；㉓真空调节器（也可人工控制）；㉔直流电动机；㉕真空；㉖电子压力调节器。

一部位可包括若干口注入井及其周围的产油井。这种模拟的油藏在纵向上和水平方向上都可以是非均质的。倾角以及重力的影响也可包括在内。

现在，油藏数学模拟是最快、最精确和最有效的预测注蒸汽动态的方法。将结果形象化是模拟中一个很难解决的问题。通常，计算机输出的是印有大量计算数据，包括产油量，温度，饱和度分布等一大堆令人沮丧的记录纸。在某些情况下，虽然也可提供一系列有关这些数据的二维曲线。但浩瀚的输出数据妨碍了对它们进行分析。通常，一次运算大约输出50万个数据。

在这方面最近所做的一项改进是 Shell 研究公司研制出的动态直观显示方法（Dynamic Visual Display）^[18]。该方法是将一个大计算机的输出用一个较小的计算机进行处理，编制这些过程变量的二维矩阵。并将这些数字结果转换成电视信号，输给彩色图象监控器。通常，用色谱表示压力和温度的强度，用三种不同的颜色表示油、蒸汽和水的饱和度。温度、压力和各种流体的饱和度可以在油藏横剖面上或平面图上表示出来，如图 2 所示。

图 2 是饱和度、压力和温度的横剖面图以及某一特定时间的累积注入和采出曲线。左边三个横剖面图中，两端的垂直黑粗线表示注入井和产油井的完井井段。在饱和度横剖面图中，蒸汽的越顶作用明晰可见，紧接在其下面的是由蒸汽冷凝生成的高含水饱和度也一目了然。此时，产油井的温度仍然是低的。此时的产油量也很低，如图中绿线所示，该线几乎横躺在横轴上。事实上这是由于产油井仍然是冷的缘故。温度和饱和度横剖面图表明，在蒸汽

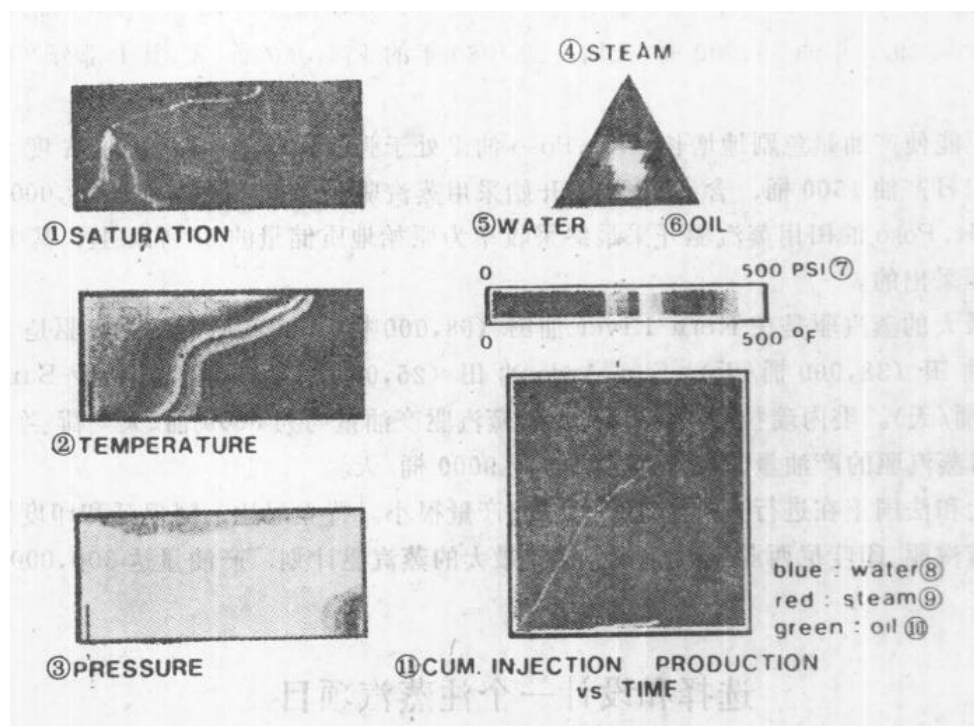


图 2 热采动态直观显示

①饱和度；②温度；③压力；④蒸汽；⑤水；⑥油；⑦磅/英寸²；⑧蓝：水；
⑨红：蒸汽；⑩绿：油；⑪累积注采量随时间而变。

带和蒸汽冷凝液带范围内都已被加热，但是无论哪一带都还没有推进到产油井。

随着蒸汽驱替的推移，可用电影或摄象机拍摄彩色图象监控器输出的图象。借助于录象磁带或影片可复查其计算结果。

用这种方法可经济地研究许多可能的注入和生产方案。用图象显示的计算结果提高了解释速度并且使得技术上的改进直观化。

蒸汽驱的现场进展情况

早期蒸汽驱

直到 1970 年，工业界还在学习如何进行蒸汽驱。在一些垂向渗透率好的油田上，曾观察到注入的蒸汽迅速升至注入井段顶部起封隔作用的粉砂层或页岩层，然后沿某一个薄层通向产油井。蒸汽突进到产油井后，在注入井和产油井之间就只能保持非常小的压差。因此，原油不是靠“顶推”而是更多地靠“拉扯”而被采出的。位于越顶蒸汽层下部的原油被蒸汽加热，并随着蒸汽一起流向产油井。

由于井间压力梯度很低，要求的注入压力也很低。因此，很多早期的蒸汽驱，具有“甚低压连续注蒸汽”的特点。蒸汽注入量也不高，通常刚好能维持热量传到产油井并采出少量蒸汽。高速注入蒸汽驱主要出现于七十年代。

高速蒸汽驱

实验室模型研究表明，在倾角明显的油藏中可以采用在上倾部位注蒸汽将油沿下倾方向“推”往产油井。这往往要求在初期就向位于下倾部位的一些产油井中注蒸汽以预热原油。

这种驱动形式于1970—1980年间开始出现,例如 Mt. Poso 和 Midway-Sunset 油田。美国蒸汽驱产油量从1970年的30,000桶/天增长到1980年的150,000桶/天,其中部分产量是高速驱替的结果。

蒸汽驱能使产油量急剧地增长。Mt. Poso 油田处于强烈水驱末期,原油粘度为280厘泊。当油田日产油1500桶,含水99%时开始采用蒸汽驱。目前产油量约为25,000桶/天。据估计,Mt. Poso 油田用蒸汽驱开采最终采收率为原始地质储量的65%以上,其中38%是靠天然水驱采出的。

美国最大的蒸汽驱是在 Kern River 油田 (68,000桶/天)。其他大的蒸汽驱是在 South Belridge 油田 (38,000桶/天), San Ardo 油田 (25,000桶/天) 和 Midway-Sunset 油田 (21,000桶/天)。委内瑞拉 Lagunillas 油田蒸汽驱产油量约为8000桶/天。荷兰 Schoonebeek 油田蒸汽驱的产油量预期几年后可达到9000桶/天。

加拿大和法国正在进行蒸汽驱,但是目前产量很小。特立尼达,阿根廷和印度尼西亚也打算采用蒸汽驱。印度尼西亚制订了一个世界最大的蒸汽驱计划,产油量达300,000桶/天。

选择和设计一个注蒸汽项目

准则

表2给出了一些油田注蒸汽最成功的关键物性^[1]。成功项目的油藏物性范围很广泛。表3列出了不利于注蒸汽的因素,此表可用来快速筛选汽驱项目。然而,如果一个项目的这些因素中即使有一、二条不利,仍然可能成功。因此,应当根据每一个可能项目自身的实际长处作出评价。

表 2 注蒸汽有成效的油田

油田州	深度 (英尺)	油藏压力 (磅/平方 英寸)	有效厚 度 h (英尺)	原油粘度 μ_o (厘泊)	渗透率K (毫达西)	Kh/ μ_o (毫达西·英 尺/厘泊)	含油饱 和度 (%)	孔隙度 (%)	油/蒸汽 比 (桶/桶)	采收率占 地质储量 (%)
Kern River CA	900	35	60	4,000	4,000	60	50	35	0.25	68
Inglewood CA	1,000	120	43	1,200	6,000	220	64	39	0.50	50
Brea B CA	4,600	110	189	6	70	2,200	49	24	0.21	—
Coalinga CA	1,500	300	50	100	1,000	500	57	31	0.36	39
Yorba Linda CA	2,100	200	32	85	500	188	49	30	0.21	62
San Ardo Auginac CA	2,350	250	150	2,000	3,000	225	—	39	—	—
Mount Poso CA	1,800	100	60	280	15,000	3,210	58	33	0.21	65
Yorba Linda CA	650	—	325	6,400	600	30	63	30	0.49	55
South Belridge CA	1,100	180	91	1,600	3,000	170	75	33	0.28	60
Midway-Sunset CA	1,600	50	350	4,000	4,000	350	60	32	0.60	65
Schoonebeek 荷兰	2,600	120	83	180	5,000	2,300	85	30	0.37	50
Slocum TX	535	110	40	1,300	3,500	1,080	60	38	0.18	57
Smackover AR	2,000	5	20	75	5,000	1,330	80	36	0.33	—
Tia Juana 委内瑞拉	1,600	300	125	5,000	2,800	70	85	38	0.83	45
Winkelman Dome WY	1,200	210	73	900	600	50	75	25	0.20	50

CA——加利福尼亚州 TX——得克萨斯州 AR——阿肯色州 WY——怀俄明州

表 3 不利于注蒸汽的因素

1. 含油饱和度小于40%
2. 孔隙度小于20%
3. 油层厚度小于30英尺
4. 渗透率小于100毫达西
5. 有效厚度与总厚度之比小于50%
6. 油层中有些含油饱和度非常低的高渗透夹层将作为易窜的贼层
7. 极高的原油粘度
8. 有裂缝存在
9. 油层中渗透率变化大
10. 注入井与采油井之间储层连通性差
11. 高压深层和没有足够上覆岩层的浅层如不压裂就不能注入蒸汽

估算油/蒸汽比

在初步筛选之后, 评价一个可能的注蒸汽项目的下一步骤是估算平均油/蒸汽比。Myhill 和 Stegemeier^[13]的方法适用于此目的(见附录)。需要测定或估算下列参数:

1. 盖层和基层岩石的导热能力和平均热容量;
2. 蒸汽带的平均热容量;
3. 油藏总厚度和有效厚度及其孔隙度;
4. 估算注蒸汽的期限(这可由蒸汽日注入量和要注入的孔隙总容积来估算);
5. 注入蒸汽在井底条件下的干度;
6. 地层温度和蒸汽带温度;
7. 注蒸汽引起的含油饱和度变化。

根据这些参数, 可计算出无因次注入时间和无因次汽化热焓量。然后从这两个参数的相关图中读出油/蒸汽比。

从此图中求出的油/蒸汽比是理论值。Myhill 和 Stegemeier 指出, 实际的油/蒸汽比范围约为计算值的70—100%。

模拟、试注和经济分析

在大量投资注蒸汽之前, 应进行实验室模型或计算机模拟研究。参考文献14、16和17对这两种方法都做了讨论。模拟还可研究井距和井网、完井井段、注采制度、压力水平、蒸汽吞吐规模以及其他许多变量的影响。

参考文献21给出了一个用油藏模拟器改进油田动态的例子。

掌握了模拟结果, 即可进行经济评价。此评价通常与蒸汽注入量关系很大。预测此注入量的方法仅仅是近似的, 因此, 在所研究的油藏内的一些关键井中, 进行试注, 是“必须”的。

同时必须仔细地作地质和油藏研究。有许多注蒸汽失败的例子, 如果驱替前进行仔细研究是能够指出其缺陷的。造成失败的一些原因如下:

1. 有效厚度小于原来估计值, 尤其是在夹有泥质层段的砂层中;
2. 含油饱和度小于原来估计值, 尤其是共存水相对较淡时;
3. 油藏连续性差;
4. 接近上倾的气顶或底水。

蒸汽驱的最后一道试验是一个先导性试验。与注水的先导型试验相比, 蒸汽驱的先导性试验常常至少在实质上应是半定量化的。其理由是先导型试验区被含有冷的稠油地层所包围, 而且因为重油油藏的一次采油量低, 因此地层往往含油饱和度高。由于这堵稠油围“墙”

的存在，加热的原油通常将流入一口蒸汽吞吐（和已受热的）产油井。

在一次先导型试验期间，特别是有观察井时，油藏数学模拟有相当大的价值。例如，模拟可以指明在某些井中需要搞更大型的蒸汽吞吐，或上倾部位的采油应予停止以迫使蒸汽沿地层下倾方向移动。在此阶段，为了取得成功，研究人员，工程人员和操作人员三者之间需要互相配合。

重油和沥青砂潜力

资源

世界沥青砂和重油资源非常丰富。加拿大和委内瑞拉各自都拥有约一万亿（ 1×10^{12} ）桶资源（重油和沥青砂重油地质储量）。沥青砂的埋藏深度范围从露天采矿深度到几千英尺。包括美国在内的许多其他国家都有些较小的沥青砂矿床。

然而，在评价这些大量资源的潜力时要特别慎重。特别是这些沥青质重油的地下储量资源根本不能与石油可采储量等同起来。“石油可采储量”是指可经济地开采量，而“资源”是指地下的储量。在许多情况下，资源非常大，而可采储量可能等于零。许多沥青砂资源都具有饱和度低或层薄等特点，因此采用热法开采会导致热能全部损失。在许多沥青砂中，重油的地下粘度非常之大，以致不压开地层不可能注入任何液体。

表 4 中的数据表明开采沥青砂和重油的困难程度。美国石油委员会于 1976 年对全美国的重油潜力作了详细研究。正如表中所示，注蒸汽的潜在产量是非常低的。据估计，此法只能采出全美重油资源的 4 % 以下。甚至目前世界上最大的热法采油区加利福尼亚州，据估计只有约 7 % 的重油储量可被采出。除了上述理由外，造成采收率低的原因是：存在裂缝、低孔隙度或低渗透率以及“贼层”。适于注蒸汽的地区，原油采收率要很高才行（甚至 60 %）。不适于注蒸汽的地区，原油采收率则很低。加利福尼亚州重油总采收率只有 7 % 表明，由于上述原因注蒸汽并不能普遍适用，因而平均采收率低。

表 4 美国潜在的可采油量(以十亿桶为单位)
(据美国石油委员会1976年研究)

	重油地质储量	注蒸汽的可能采油量
加利福尼亚州	61	4.2
全美国	140	5.2

以1976年每桶原油价格25美元为依据(1981年每桶50美元)

表 4 中的数字未包括美国的沥青砂。据估计，沥青砂资源为 300—500 亿桶地质储量。尽管对沥青砂已做了很多研究，并且有大量的先导型试验项目，但是，至今还没有一个大的现场项目是成功的。因此，虽然资源可能很大，而可采储量仍然很小。

毫无疑问，价格和新工艺将使这些资源中的一部分成为可采储量，这也许需要许多年和艰苦的努力。开发目前经济条件下还不能开采的重油和沥青砂将向后代提出挑战。

加拿大的开采活动

如上所述，加拿大有非常大的重油和沥青砂资源。在 Lloydminster 地区，用常规的方法开采某些重油已经多年。注蒸汽规模不大，据报导采收率很低。

在 Cold Lake, Peace River 和 Athabasca 地区资源量很大。Cold Lake 所用蒸汽吞吐目前产油约为 7000 桶/天。此矿区正在进行许多别的先导性试验项目。Peace River 目前正在进行大型蒸汽驱试验。Peace River 沥青砂有点特殊,在沥青砂底部为可动水饱和的高渗透层。这为注入的蒸汽提供了一条通道,使粘度为 200,000 厘泊的重油能被加热。此储集层垂直渗透率也高,因此进入井底的蒸汽有上升的趋势,并且加热整个砂层厚度。

关于 Peace River 的这点论述应该有助于讲清重油和沥青砂的开采问题。每个储集层都有独特之处,各有其有利和不利之处。如何利用油藏内在的特征去取得成功是研究人员和工程师所面临的任务。没有一种普遍适用的重油开采方法。每个储集层的最好开采方法来自从事这一研究的科学家和工程师的才智。

在作者写本文时,巨大的 Athabasca 沥青砂矿尚未具备工业性的就地开采条件。Athabasca 浅层沥青砂目前正在商业性试采。对于较深的矿床,虽然进行了广泛地矿场试验和研究,仍未能使其沥青砂的生产具有商业价值。这仍然是石油科学家和工程师面临的重大挑战之一。

正如所述,希望搞出一个唯一的开采 Athabasca 的方法做为取得成功的关键的想法是错误的。Athabasca 沥青砂不是一个均质矿床,其深度、厚度和页岩夹层的数量都是不同的。一些地方砂层连续性好,在另外一些地方则不好。含水和重油的饱和度在平面上和纵向上都有变化。重油组分也不一样。因此,很可能需要研究出适合各个区的多种多样的开采方法。

委内瑞拉的开采活动

像加拿大一样,委内瑞拉拥有非常大的重油资源。估算地质储量为了一万亿桶。但是,为了确定这些资源的特征,要补钻许多井。像在 Athabasca 一样,钻井将可能指出这个沥青带也是由很多不同类型的储集层组成,每个储集层具有不同的砂层与重油特性。

已着手进行开采方法的研究。Jobo 区的注蒸汽先导性试验于 1981 年开始。将重质沥青油改质的规划也正在进行。或许能证实沥青带是一个能维持多年的主要能源。

潜力

目前世界注蒸汽的产油量约为 450,000 桶/天。根据规划的项目数来看,到 1990 年美国注蒸汽的产量很可能提高到 500,000 桶/天。世界其他国家注蒸汽日产 250,000 桶/天看来是合理的,则全世界注蒸汽的产量将达到 750,000 桶/天。在九十年代,加拿大的 Cold Lake, Peace River 油区和委内瑞拉的沥青油矿床带商业性项目很容易将这个�字翻一翻。沥青带和重油资源是如此庞大,以致在二十一世纪将能多年维持日产几百万桶的生产水平。

限制发展的因素

在美国有许多因素若凑在一起将使注蒸汽采油量无法达到其最大潜力。现将其中某些因素分述如下。

1. 为取得向大气排放许可证要拖延时间

在美国以往为取得安装和使用蒸汽发生器的许可证需要三年或更长的时间。过去这些困难一部分是由于在漫长的拖延期间,有关法规发生了变化而引起的。这就有必要重新进行研究和修改索取许可证的申请,见下述。

2. 排气规定

随着新法规的颁布,就需要进行新的工程研究。这又导致要变更所提出的方案,而这又要做补充研究和修改。目前排气规定是以颗粒的大小为基础。以前的规定是以颗粒总含量为基础。新的规定需要做新的研究和新的补偿计划。为了解决硝化物(NO_x)和颗粒排放的控制问题,加利福尼亚的石油工业界正在进行许多合作研究。这些研究应有助于提供基础资料和加深对问题的了解。希望这将导致做出有深远意义的成本/收益比的规定。

3. 洗涤器的废液处理

加利福尼亚大多数蒸汽发生器的燃油中含有百分之几的硫。目前用碱性洗涤器除掉废气中的二氧化硫。据估计,含二氧化硫的洗涤废液总量达到 150,000 桶/天。随着对过时的发生器进行改造并安装新的发生器,废液量还要增加。为了保证废液处理达到环境保护要求,又比较经济,要求石油工业界和政府共同努力。

4. 供水

每采一桶油大约需要四桶水。油田蒸汽发生器可以用质量差的水,实际上常常将采出水回收利用。因此,对于产生蒸汽来说,不存在水的问题。然而,二氧化硫洗涤器要求淡水。虽然用水量不大,但要求很严格。在某些地区,这可能是个问题。

5. 税收

美国联邦政府不但不鼓励开采重油,反而通过对每桶重油大约要 3—4 美元的“暴利税”来加以限制。据美国石油委员会 1976 年研究,这将使得 1990 年美国热法采油产量减少大约 300,000 桶/天。

新的可能性

制备蒸汽的其他燃料

在蒸汽驱中,采出原油大约三分之一要用于制备蒸汽。在蒸汽吞吐中这个比例要小些,在大的装置中用石油焦或煤部分或全部代替油作燃料是可能的。煤的流化床燃烧是这种大规模制备蒸汽有希望的方法之一。

已提出太阳能蒸汽发生器。目前,太阳能蒸汽发生器所需面积大,投资非常高,大约为常规蒸汽发生器的 100 倍。注入量的日变化将导致较高的注入压力和温度以及较高的热损失。在注入量受渗透率限制的储层中,日注入量的变化将降低注入能力,因而降低产能。

当有足够天然气时,油田蒸汽发生器用天然气作燃料可以有效地利用能源。每燃烧一英热单位的天然气大约可采出相当于 3—5 英热单位的重油。用天然气做燃料还可消除油田的大部分排放问题。

热 电 联 供

在高于注蒸汽所需的压力和温度下发生蒸汽,则首先可用来发电。通过发电机涡轮膨胀以后,低压蒸汽可注入地下开采重油。形成蒸汽之前,在涡轮中烧掉的燃料,为进一步增高整个联产环节的效率提供额外的可能性。

井下蒸汽发生器