



稠油蒸汽驱

4

水平井热采工艺

后续火烧新工艺 化学剂应用工艺



中国石油天然气总公司情报研究所

一九九〇年五月

稠油蒸汽驱 4

后续火烧新工艺
水平井热采新工艺
化学剂应用工艺

中国石油天然气

石油大学(北京)

E345

001-4

所

51636



稠 油 蒸 汽 驱

4

TE345

001-4

水平井热采工艺
后续火烧新工艺
化学剂应用工艺

主 编 张 朝 琛
责任编辑 司 艳 姣



200418850



中国石油天然气总公司情报研究所

一九九〇年五月

正文设计：段利君

责任校对：李方 段利君

稠油蒸汽驱(4)

水平井热采工艺
后续火烧新工艺
化学剂应用工艺

开本787×1092毫米1/16·印张18¹/₄

字数：45万 印数：2000

油情(单)89020 工本费：7.00元

编辑：中国石油天然气总公司情报研究所
印刷：北京通县向阳印刷厂
发行：中国石油天然气总公司情报研究所
邮政编码：100013(北京和平里七区十六号楼)



选 编 说 明

开发和利用稠油、重质油、沥青油以及焦油砂资源,既是本世纪可采储量接替的重要手段,更是解决下一世纪烃类资源可能短缺问题的战略措施,因此需要坚持不懈地了解、引进有关热采的新技术、新思路和新动向。

在本文集(稠油蒸汽驱第四册)里,我们主要选译了下述几个方面的技术进展报告,希望能引起读者的注意。

1. 水平井蒸汽驱

水平井经过相当年日的技术积累,今天已并非意外地成为重要的开发技术方向,1988年全世界大约钻了200口水平井,预计1989年将翻一番。据莫勒工程公司估计,到2000年,西方国家所钻的5万多口井中有25%将是水平井。美国、加拿大等国对如何在稠油蒸汽驱中应用水平井技术已做了不少研究。在蒸汽驱中,水平井的主要作用是增强重力排泄作用和克服或减轻重力越顶问题。其作用应引起我们的重视,为此介绍了几篇有关水平井在蒸汽驱中的应用和研究概况的文章,以资借鉴。目前水平井钻井技术已臻成熟,但水平井固井、完井、测井、采油等技术问题尚待进一步解决,开发方案的模拟更待深入。

2. 注蒸汽与火烧油层技术的结合

注蒸汽(蒸汽吞吐和蒸汽驱)和火烧油层是热力采油的不同领域。前者的主要优点是生产响应快,但不足之处是热效低、最终采收率低。因此在注蒸汽开采之后还需要用其它方法进一步提高采收率。而火烧油层方法的长处则是热效和最终采收率均较高,它之所以未得到广泛应用,是因为技术太复杂、地下过程无法控制。本文集介绍的在蒸汽吞吐和蒸汽驱之后使用的升压扩烧、放喷卸压的热采新工艺,不仅同时具备了注蒸汽法和火烧油层法的优越性,而且尤其引人注意的是,后续火烧新工

艺能变不利为有利,能充分利用注蒸汽后遗留下来的支离分割的热窜流沟道、裂缝、高渗夹层等原本不利于热采的因素,再加上合理部署注采井阵列和采用巧妙的注采策略,证明可以获得较高的热效和产量,估计最终可获得30%的重油采收率,这是值得重视的,遵照总公司有关领导的意图,文集中译介了加拿大冷湖地区狼湖(Wolf Lake)和玛格丽特湖(Marguerite Lake)沥青油藏在蒸汽吞吐之后改用注氧升压扩烧、放喷卸压火驱法的热采方案和实施情况。这些资料是英国石油公司所属的加拿大资源公司赠与的。

3. 油田范围内的热采过程监测、研究和实施

热采过程监测始终是一个值得重视的技术课题。热采过程中地下管系、设备、材料、地层等均承受着高温的作用,这些部分的完整性直接关系到热采项目的成败。所以热采过程中地层内及井内工艺状况监测,包括放射性示踪、温度监测、压力和流量监测等方法都是提高热采工艺水平的重要措施。本文集也选译了几篇这方面的文章。

4. 化学剂在热采中的应用

化学剂在稠油蒸汽驱中的应用日渐广泛。用各种化学剂(起泡剂、粘土稳定剂等)改善驱油效果,用乳化剂作为调整剖面的堵剂,用溶剂作为蒸汽驱的助剂以提高扫油效率,用放射性示踪剂监测汽驱范围和方位等,都是热采技术的另一发展动向,即热采的化学化。所以本文集也选了一些技术报告以反映当前的进展。

编 者

一九八九年九月

目 录

水平井热采

- 一、水平井热采工艺述评.....张朝琛译 (1)
- 二、水平井注蒸汽开采稠油的模拟.....李方明译 (20)
- 三、克恩河(Kern River)油田水平井注蒸汽先导性试验.....朱恩灵译 (32)

后续火烧新工艺

- 四、升压/放喷扩烧法：已有窜沟油藏的采收方法张朝琛译 (50)
- 五、升压/放喷扩烧法—开采已有窜沟油藏的方法齐玉龙译 (70)
- 六、油砂层内注氧火烧驱油试验.....孙为群译 (94)
- 七、Marguerite湖注氧火驱项目A阶段的一些作业问题吕学谦译 (106)
- 八、狼湖(Wolf Lake)沥青油田的热力开采.....杨普华译 (124)
- 九、蒸汽吞吐/火烧油层项目的测温结果解释司艳姣译 (144)

热采过程的监测、研究和实施

- 十、冷湖油砂蒸汽吞吐优化过程的数值模拟.....吴 湘译 (174)
- 十一、用压力和流量数据检测冷湖地区注汽井的套管损坏.....王同良译 (190)
- 十二、法国Marienbronn油田注蒸汽开采稠油的现场试验吕建华译 (200)
- 十三、大斜度油藏的蒸汽驱油策略.....滕学顺译 (208)
- 十四、生产井产层敞开段对蒸汽驱动态的影响.....钱兴坤译 (222)

化学剂在热采中的应用

- 十五、80年代带添加剂蒸汽驱油的现场项目.....刘 宁译 (230)
- 十六、用作蒸汽驱封堵剂的乳状液的热稳定性及施用方法.....金静芷译 (244)
- 十七、蒸汽驱项目放射性示踪结果的解释.....顾文娟译 (259)
- 十八、溶剂对用蒸汽采收重质油的影响.....张 文译 (272)

三十秒提要

水平井与直井相比,其优越性是肯定的,对于将水平井用于注蒸汽采油,由于它能增强重力排替作用和减轻蒸汽越顶问题,所以也必定能提高注蒸汽采油的采收率。本文通过大量模拟研究、实验研究和一些现场试验资料,着重评述了蒸汽吞吐、蒸汽驱和蒸汽辅助重力排替与水平井结合使用的效果。评述时考虑了几种不同的水平井布井组合方式以及水平井与直井的组合方式。同时还提醒我们,水平井的应用必须考虑经济问题。

水平井热采工艺述评

Joshi S.D.
(Phillips Petroleum Co.)

张朝琛 译

摘 要

本文是评述水平井开采重质油和焦油砂的工艺现状。评论内容包括讨论水平井工艺的油藏工程、钻井以及完井等方面的问题。也涉及有关的现场资料。本文只限于讨论蒸汽驱-水平井工艺的结合使用。现有资料表明,对焦油砂的采收石油而言,利用水平井使蒸汽促其重力排替,乃是一种卓有成效的采油机理。对于重质油的采收问题,靠水平井来实施蒸汽促其重力排替和形成蒸汽驱,显然其采收率要比光靠直井时高得多。此外,在蒸汽驱大规模开始后会出现蒸汽越顶的现象,运用水平井却可以减弱其重力分异作用并从底部各分层中将油采出。

一、引 言

在以往10年,若干现场研究项目曾经报导,水平井可以用于开采常规石油、重质油以及焦油砂储集层(参看表1)。一般说来,水平井已经成功地用于增加采油速度和减少水锥与气锥问题。尽管水平井可以只靠泵(不用蒸汽)的辅助就可以采出重度为 12°API 的重质油,但若采出粘度更高的石油,看来需要将水平井与某种干度的蒸汽结合起来使用。表2列举了9个水平井-热采项目。此表展示出,将水平井与蒸汽驱、循环注蒸汽促产以及用蒸汽促其重力排替,已经在一些先导性试验中用于开采重质油及焦油砂储集层。目前,可供利用的试验结果为数仍很有限。

当前,工艺上已可钻成2000英尺长的水平井筒。这些较长的井筒可用于增加产油量;而水平井与油藏的较大的接触面积,有助于注入一个较大的蒸汽段塞。然而,水平井的钻井费用则是打直井的1.5到2倍左右。

表1 已钻成的水平井

年份	公司	油田	井数	深度(英尺)	触及储层长度(英尺)	(水平/竖井)费用比	说明
1937	.....	Yarega, 苏联	多	.....	最多1000	.....	矿坑法辅助蒸汽驱
1941	Leo Ranney等	McConnesville 俄亥俄州	6	.....	1000	.....	从一坑道中钻入
1942	.....	Franklin 重油田	4	388	1000	很贵	从坑道钻入
1942(?)	.....	Venango 县, 宾州	4	388	600	.....	
	.....	Midway Sunset 加州	2	1100	70	.....	从现有竖井钻入, 用井下马达及挠性钻杆
1946	.....	Round山油田	9	1850	56	.....	" " "
1952	.....	Kern 县, 加州	1	1200	50	.....	从一口井钻 6 个排油孔
1952	.....	Midway Sunset 加州	?	3700	50	.....	" " "
1952	委内瑞拉石油集团公司	La Pas 油田	?	10000	50—100(?)	.....	目的是减少气锥而钻
1952	长滩石油开发公司	委内瑞拉西部 Wilmington 油田	8	3500到 4800	50	.....	每井中有6—8个排油孔, 在某些井中所钻若干排油孔可穿入好几层油
1957	.....	苏联	1	1000	300	.....	生产井
1967	.....	中国	1	3800	1800	.....	产量比竖井多5—10倍
1968	.....	Marcovo	1	7200	1800	.....	但 7 天内即坍塌
1977	Conoco	东西伯利亚, 苏联	6	.....	1700最大	.....	.....
1978	ESSO, 加拿大	Tisdale, 怀俄明州 Cold Lake 艾伯塔省	1	1558	1000	8—12	从坑道钻入
1979	Texaco	Fort McMurry 艾伯塔省, 加拿大	3	415	1000	5—6	从地表钻入未胶结砂层
1979	ESSO, 加拿大	Mackenzie 河 艾伯塔省, 加拿大	1	1803	1880	.....	蒸汽促产
1980—81	ELF-Aquitaine 和IFP	Lacq 油田 法国西南	1	2195	330	4.3	蒸汽促产, 现已停止
	" "	" "	1	4100	1214	3.5	.....
	" "	" "					从地表钻入

续表

年份	公 司	油 田	井 数	深度(英尺)	触及油层长度(英尺)	(水平/竖井) 费用比	说 明
1981—83	ELF-Aquitaine 和IFP	Rospo海域 意大利	1	4500	1988	2.1	钻入裂缝灰岩, 产量比竖井 高15倍, 减少水锥
	"	Castera Lou 法国南部	1	9500	1300	2.1	不仅增产, 而且减少灰岩 油层的水锥
1980—84	ARCO	Empire Abo区 新墨西哥州	2	6200	300—400	2	从地面钻成的新井
1981—84	ARCO	"	8	6200	"	每井25万美元	从现有竖井钻入
1982—84	ARCO	Douglas东南 Garfield县, 俄州	1	6500	"	"	从现有低产竖井钻入裂缝性 密西西比灰岩
1985	FSSO, 加	Cold Lake 艾伯塔省, 加拿大	1	1558	3330	.....	周期注汽促产
1985	Petrobrass	Fazenda Belam 油田	1	1000	554	.....	产量比周围竖井高5倍
1985	Sohio	McMullen县 得州	1	10300	1908	.....	长程水平井
1985	"	Glasscock县 得州	1	.....	295	.....	短程排油孔
1985	"	Prudhoe湾 阿拉斯加州	1	8989	1400	2	产量比周围井高3倍
1986	"	"	1	9000	.....	1.4	" " "

表2 水平井—蒸汽联用的现场项目

公司及年代	位 置	参考文献	水 平 井		利用蒸汽方法	累积产油量 (桶)	汽/油比	情况及说明
			井 数	长度(英尺)				
Yerga	苏联	Butler, 1984	很多	最长300英尺	.....	.....	.....	正在进行/矿坑法
Signal油公司 (1965—66)	犹他州Carbon县 Sunny Side	Marchant, 1984 Combs, 1987	3	370英尺、但 50英尺穿入产层	周期注汽 及蒸汽驱	566	23	已停, 油为9—10°API 从露头一侧钻入
加拿大石油公司 及其他公司	加拿大, 艾伯塔省 Fort McMurry	Towson, 1984	1	330英尺测深	周期注汽	.....	16	已停, 约10°API油 从露头一侧钻入
MAISP-I(1978)			2	120英尺	及蒸汽驱			
HOPCO (1979)	加州, Kern县	Rintoul, 1982 油气杂志, 1982	4	430	周期注汽	1997	.....	已停, 13°API油 从一直井钻入
ESSO-I(1979)	加拿大, 艾伯塔省	Bezair和Markiw (1979)	1	1000	周期注汽	.....	.....	正在进行约10°API油
ESSO-II(1985)	Cold Lake	Baldwin等, 1983 MacDonald, 1985	1	3200	及蒸汽辅助 重力非替			" " " "
Texaco(1979)	加拿大, 艾伯塔省 Fort McMurry	Loxam, 1982 Pugh, 1982 石油周刊, 1986	3	1000	周期注汽 及蒸汽驱	.....	.....	已停, 约10°API油 从地表直接钻入
(1986)	加州	.....	1	.....	周期注汽	.....	.....	正进行, 13°API油
Petrobrass (1985)	巴西Fazenda Belam油田	EOR周刊 1985	1	544	(1)	75桶/天	.....	14°API油
计划项目 MAISP (1985—87)	加拿大, 艾伯塔省 Athabasca焦油 砂	Best等1985	356	.....	.....	.....	.....	矿坑/直井项目 10°API油

本文汇总了现有的实验室、理论上的及现场的成果。为了完整起见,本文也包括对水平井的钻井及完井方法的议论。本文评述了水平井-蒸汽驱工艺的现状。

二、蒸汽采油方法

水平井可用于进行循环注蒸汽促产,连续蒸汽驱,以及用蒸汽辅助重力排替等各种开采方法。在许多重质油藏及焦油砂储集层中,循环注蒸汽促产方法需要建立起初始的蒸汽注入能力。下面评述各种不同的采收技艺。

1. 循环注蒸汽促产法

Coats(1984)介绍了一种物理模拟法,用于研究以水平井进行注蒸汽促产石油。Toma等人(1984)的实验室实验指出,沥青油的采收率取决于井中的轴向压力降。若利用各种溶剂和二氧化碳,则采收率还可进一步提高。

Gussis(1984)用数值研究的方法,比较了直井与水平井用蒸汽促产的动态。该储集层的性质如下:原油重度 12° API,厚度 $h=100$ 英尺。在这一分为5层的模型中有4个分层的垂向渗透率被假定为其水平渗透率之半。在剩下的一个分层中,垂向渗透率是水平渗透率的10分之1。此水平井假定有840英尺长。如图1所示,在一个周期(90天;7天采油,17天注汽,4天焖蒸,以及62天采油)终了时,从水平井累积采出的油量,大约是直井的5倍。尽管如此,水平井与直井产量之间的巨大差别,在随后的吞吐周期中会逐步缩小。

Gussis(1985)对三种不同的水平井布局的产油量进行了数值比较,此油的重度为 12° API。正如图2所示,每一布井网络都是用8口水平井从80英亩面积100英尺厚的储层中采油。这种热采井网及其用蒸汽周期促产的做法如下:1)四对2000英尺长的水平井,井距相隔218英尺,位于油藏底部。钻成这样的井是为了能在两个毗邻的井之间形成线性驱替。这种布井格局可以在9.3年内采出27%的原始石油储量。2)4口2000英尺长的水平井钻于油藏顶部,4口则在油藏底部,在毗邻线性驱的井间相隔2000英尺。这种方式可以在9.0年内采出26.5%

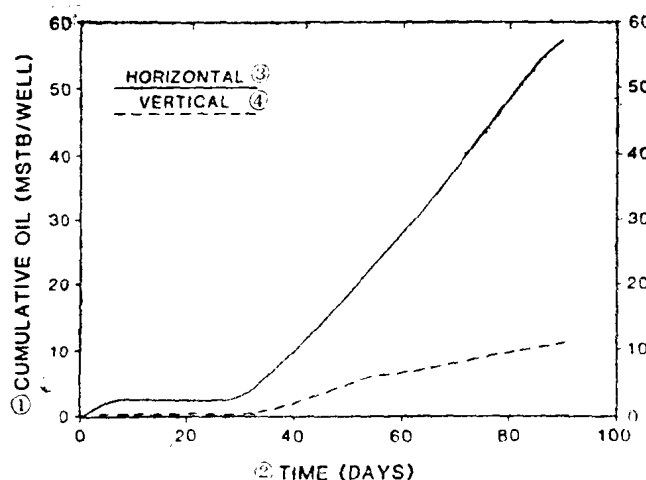


图1 用水平井及直井进行周期性蒸汽促产情况的比较(Gussis, 1985)

①累积采油量,千库存桶/井;
②时间,天;③水平井;④直井

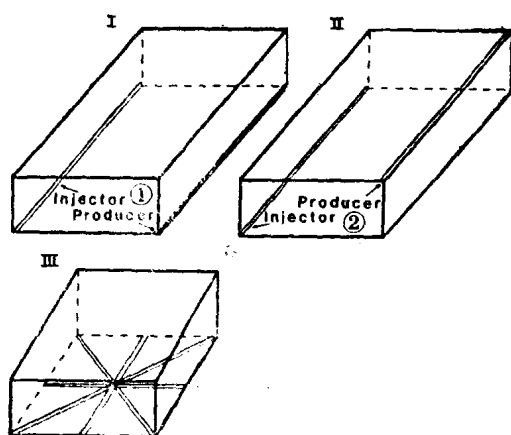


图2 各种水平井布局的示意图

①注入井;②产油井

的原始石油储量。3) 8口井在这一80英亩见方的排油区内从中心向外呈径向分布。在方形区对角线上的井筒要比在方形区中心线上的要长一些。这种格局可以在9.0年内产出20.8%的原始石油储量。

从采出量的立场,最好的方案是I式布局,也即用位于油藏底部的相互平行的水平井形成线性驱油。在II式布局中,靠近油藏顶部的注汽井,势必使大量的热能丧失于盖层周围。在III式布局中,按径向钻成的井在外缘处彼此相隔较远,所以使外边界的波及程度太差,所以也就使采收率变坏。

2. 蒸汽驱

有一项实验室研究及少数数值研究报告讨论了用水平井进行蒸汽驱, Huygen 及 Black (1982)的实验室研究表明,用一口射孔的水平井持续注蒸汽,是一种有效采收粘性沥青油的方法。在他们的布井方案中,两口直井与水平井两端相交。一口直井作为连续注汽井而另一口则作为产油井。按Huygen和Black(1982)的布井方案,垂直裂缝会大大地降低石油的采收率。

数值模拟的结果在下列各篇文章中有报导: Rial(1984)考虑的是 15° API重度的原油, Huang 和 Hight(1985)考虑的是 13° API重度的油, Gussis(1983)则是针对重度为 12° API的油,而Khosla和Cordell(1985)及Jain和Khosla(1985)则都是考虑重度约为 10° API的粘性艾伯塔沥青油。下列各段将把数值模拟的结果做一个概括。

Rial(1984)对两口直井之间的蒸汽驱进行模拟,油藏是加州型的Kern河油藏,假定面积 $A=2.5$ 英亩,而厚度 $h=80$ 英尺。垂直的注入和采出井位于一个立方体排油区两个对边的中央。Rial还模拟了一口330英尺长水平注汽井和垂直产油井之间的蒸汽驱。在一个立方排油区内,水平的注汽井位于沿油藏底部的某一侧,而垂直的生产井则在其对边的中央。在5年内,水平井直井方案可产出64%的原始石油储量,相比之下若仅用直井方案则只能采出51%的原始石油储量。此外,在15年内,此水平模型可采出71%的原始石油储量,但用直井则只能采出58%的储量。

为了开发一个125英尺厚, 13° API油田,Huang和Hight(1985)对若干种水平井-直井组合方案进行数值化研究。他们对于一个18.5英亩的油藏,用最好的布井格局。在7年内可采出72.2%的原始石油储量。最好的布井方式是在油藏底部附近有4口水平生产井,它们是从方形排油区四个角逐步钻向中央部位。这一布井方案还包括5口垂直的注汽井,一口在中心而其余四口则位于四边的中点。

在7年中,Huang和Hight(1985)的模拟表明,可以采出 13° API重度的油达72.2%,而Rial(1984)的结果是, 15° API的油采收率为67.8%。虽然这些采收率是可以比较的,但Rial的预测中采收率之所以稍低,是由于在他的模型中考虑了重力分异作用。在Rial的四层性模型中,上面两层的渗透率是5000毫达西,而下部两层的渗透率则是2000和1400毫达西。与此相反,Huang和Hight采用的水平渗透率均为3000毫达西,垂向渗透率都是900毫达西。从上述所介绍的石油采收率的比较可以看出,除了重力分异作用外,在水平井-直井组合中间进行蒸汽驱,表明其石油采收率是较高的。

Huang和Hight(1986)以数值法探讨了在一个已全面用直井进行蒸汽驱并且有明显的蒸汽越顶的项目中如何利用水平井的问题。他们的模拟假定,油藏为125英尺厚,重油重度为 13° API,水平及垂向渗透率分别为3000和900毫达西。一个供参照的基本例子是直井开采方

案, 它包括一个 9 点法 18.5 英亩井距的直井方案。正如图 3 所示, 这些直井在 15 年内可采出 64.7% 的原始石油储量。但是, 饱和度分布剖面显示出, 有一个明显的蒸汽越顶现象, 以致在下部各层中留下了 60% 的油饱和度。用一个反 13 点井网代替 9 点井网, 似乎可在较短时间 (11 年) 内就可获得相同的总采收率。这种井网转换仍然会在底部各层中留下较多的残油, 而且仍然显出明显的蒸汽越顶现象。为了减缓这种蒸汽越顶, 在按 13 点法开采 6 年后, 沿方形排油区的边缘打了 8 口 374 英尺长的水平井。引入的这 8 口水平生产井加上那些垂直生产井, 不仅可使此项目的开发年限缩短为 9 年, 而且还使总采收率增加一个百分点, 达到 65.9% 原始石油储量。由于水平井有很大的运送流体的能力, 所以曾按中心为注汽井, 四口加密井也均转成注入井的方案进行了一次模拟运算。这种 13 点的水平井-直井方式 (5 口垂直注汽井, 8 口垂直产油井, 8 口水平产油井), 在 11 年中可采出 74.9% 的原始石油储量, 这比前面谈过的任何一个方案的采收率都要高。水平井有较高的波及效率, 尤其是在底部各层, 所以采收率才能达到较高水平。这些结果表明, 水平井可用于已全面蒸汽驱的油田, 它能减少重力分异作用, 改善波及效率, 并采出更多的油。

Gussis(1985)也曾对用各种水平井布局开采 12° API 原油的蒸汽驱进行过模拟。图 2 已绘示这些布井格局中的若干种情况。Gussis 注意到, 初始是循环定期注蒸汽, 随后是在两个 2000 英尺长, 相隔 416 英尺 (20 英亩) 的井之间进行蒸汽驱, 在 9 年中采出 42% 的原始石油储量。这一采收率明显地低于 Rial(1984) 在 9 年内采出 69% 的数值, 更低于 Huang 和 Hight(1985) 在 7 年内采出 72.2% 的采收率值。Gussis 的采收率偏低主要是

是由于他的原油粘度较高 (12° API), 相比之下 Rial 用的是 15° API 的油, 而 Huang 及 Hight 则是 13° API 的原油。另外, Gussis 的井距亦较大, 而且布井方式也有所不同, 所以才会导致采收率偏低。这些结果表明, 在两口长的水平井之间进行蒸汽驱, 对于开采高粘度油并不一定是有效的。用一套水平井-直井组合来进行蒸汽驱, 可能会比平行的水平井方案有更高的采收率。

用蒸汽驱开采高粘性原油, 尤其是用平行的水平井组时效率不高, Khosla 和 Cordehl (1985) 及 Jain 和 Khosla(1985) 也已用数值研究结果予以证实。这两组研究者用蒸汽驱开采焦油砂所得到的石油采收率很低。

Khosla 和 Cordell(1985) 曾对加拿大的艾伯塔省的 Athabasca 焦油砂沉积层中的 McMurray 层的沥青油开采进行过数值研究。这些作者对平均每井 5.93 英亩的排油区内 49 英尺厚的储集层进行模拟。在所有的计算中, 水平井的长度均假定为 1640 英尺。其结果得自两类储集层: 1) 底水提供了良好的注入率; 以及 2) 没有底水, 所以蒸汽的注入率极小。表 3 比较

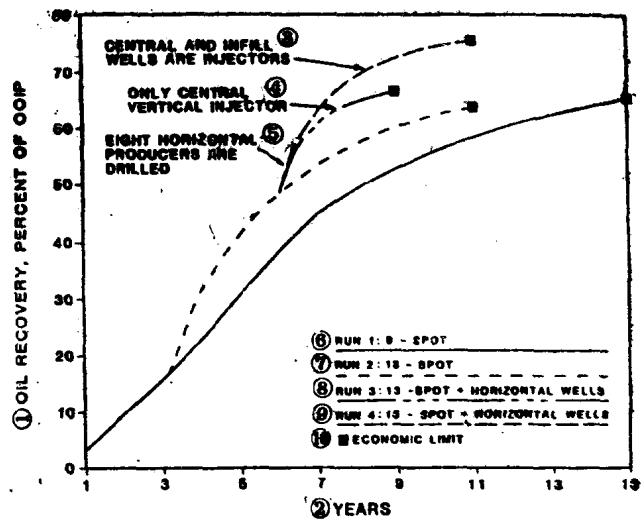


图3 在正进行的蒸汽驱项目中, 用与不用水平井的各种开采方案的比较(Huang和Hight, 1986)

①石油采收率, %原始石油储量; ②年; ③中心井和加密井均为注汽井; ④仅中心井为直井注汽; ⑤钻成 8 口水平产油井; ⑥第一轮: 9 点法; ⑦第二轮: 13 点法; ⑧第三轮: 13 点法加水平井; ⑨第四轮: 13 点法加水平井; ⑩经济极限

了不同场合下所能采出的油量。在所有场合下，起初所有的井都用蒸汽促产。他们用一套平行的水平井格局，这些水平井位于储层底部附近，彼此之间相距 148 英尺。这种布局可以在 3 年内采出约 85% 的原始石油储量，但要假定在含油层带及底水层中的水平渗透率都是一样的。然而，倘若底水层的渗透率是油层渗透率的两倍的话，那么采出的原始石油储量就只有 15.8%。这就表明，注入的蒸汽大多进到底水中去了。如果这些水平井间距离加一倍为 295 英尺，而且在注汽井与产油井之间有一高渗性夹层，那么大部分注入的蒸汽都从此高渗性夹层穿越，形成早期汽窜，采收率只剩 25.4%。这些结果都表明，在沥青油储集层中，如果底水层的渗透率等于或小于油层的渗透率，并且不存在高渗透夹层，而且井距也很近时，那么用水平井进行蒸汽驱采油才会成功。于是，在沥青油储层中用蒸汽驱办法就很有限。与此相反，Khosla 和 Cordell (1985) 却发现，如用下节所述的用蒸汽来辅助重力排替的过程，不管有无底水层，都会比周期注蒸汽促产或蒸汽驱具有更高的采收率。例如，一口 1640 英尺长的水平井连同两口垂直的注汽井，依靠蒸汽辅助重力排替的办法，可以在 4 年内采出 77% 的原始石油储量。

表3 利用水平井的不同采油方案产出沥青油量的比较(Khosla和Cordell, 1985)

布井方案	排油区 (英亩)	作业寿命 (年)	累积油汽 比	平均产量 (桶/天)	采收率 (%原始石油储量)
A. 在两口长 1640 英尺的水平井之间蒸汽驱					
i) 井间相隔 148 英尺渗透率均匀	5.6	3	0.23	353	85.0
ii) 井间相隔 148 英尺有一高渗夹层	5.8	3	0.10	69	15.8
iii) 井间相隔 295 英尺有一高渗夹层	11.7	3	0.14	221	25.4
B. 用两口注汽竖井及一口长 1640 英尺 水平产油井进行重力排替					
i) 底水层很厚	5.9	4	0.16	245	73.8
ii) 在底层中有沥青油层	5.9	4	0.20	300	77.0

Jain 和 Khosla (1985) 探讨了从一口水平井和一口与其相交的直井进行连续的蒸汽循环的可能性。此法类似于 Conoco 公司的“FAST”法，该法是让蒸汽经过一条水平裂缝快速地进行循环 (Britton 等, 1983)。为了产出沥青油，与蒸汽辅助重力排替的方法相比，连续注蒸汽进行循环的方法在热力学上发现其不是有效的。通过对下列三种布井方式的比较，从其结果可以看出蒸汽辅助重力排替的方法的有效性：1) 经过一口 985 英尺长的水平井和相交的直井进行连续注蒸汽循环，在 6 年内可以达到日产 79 桶/天的水平。2) 在相距 197 英尺的两口 490 英尺长的水平井中进行蒸汽驱，在 7 年内产量可达 138 桶/天的水平；以及 3) 用一口 1310 英尺的水平产油井连同两口垂直注汽井，注汽井与水平井两端的距离相等，按此法进行蒸汽辅助重力排替，则可以 315 桶/天的速度生产 7.5 年。

上述结果表明，从采收率的立场来看，用水平井来进行蒸汽辅助重力排替是一种开采焦油砂储层的最好办法。这种方法及其诱人的动态出现理由有如下述。

3. 蒸汽辅助重力排替

在周期注汽促产过程及蒸汽驱过程中，即使重力排替在产油上发挥着一定作用，大部分

采出的油靠的仍是储层的压力梯度。在周期注汽中，指的是储层与生产井之间的压力梯度，而在蒸汽驱中，则是注采井之间的压力梯度决定了产油速度。另外一方面，在蒸汽辅助重力排替的过程中并没有压力降落，只有在注采井之间的重力头，油就只靠重力排替作用而产出。重力排替的速率因受到蒸汽的加热作用而增强，因为它使油的粘度降低了。即使如此，产油速度也只不过是0.3桶/天/英尺(井长)的水平而已。产油速度之所以足够高，靠的是水平井筒长达1000到3000英尺的缘故。

储层中没有外加的压力梯度，就可以减少蒸汽窜流，改善波及效率，和得到较高采收率。由于重力排替过程与其他任何采油过程相比具有较好的驱替效率(残油饱和度较低)，所以其采收率还会进一步改善。

Butler 及其合作者(1981a, 1981b, 1984, 1985a, 1985b)引入了一种用蒸汽靠水平井辅助重力排替的概念。这一过程与浴池中发生的情况极其相似，即蒸汽上升而水下滴。图4引自Joshi和Threlkeld(1985)和Joshi(1986)的文章，表明热油和蒸汽在两口平行的水平井之间逆向对流情况。这一对水平井位于靠近油柱底部的地方，上面一口为注汽井，下面一口是产油井。这对水平井要尽量靠近到井间没有压力降，彼此之间只剩重力头。两井之间压降要控制在最低限度是为防注入蒸汽出现短路。

蒸汽辅助重力排替除了有较高的波及与驱替效率外，其他一些好处是：1)与周期注汽及蒸汽驱相反，热油一旦被从地层驱出就随即产出；2)油、凝析水及蒸汽流各自形成独立的通道，所以油流有较好的相对渗透率；3)在蒸汽早期窜通情况下，可以停注一定时期的蒸汽、然后再重新开始，而不致于使此法的效率有明显降低。这一方法的缺点是：1)需要一个相对较厚的油柱(≈50英尺)；2)若干油层中间若隔着厚而连续分布的页岩阻渗层，那么就需要在每一分层中都钻水平井以便泄油。

图5展示三种可能的布井格局以供现场采用。Butler 及其合作者(1981a-b, 1984)建立了一个半解析性解以计算用平行的水平井时的产油量与油气比。他们还确定了一些可用于把实验室数据放大到现场数值的无因次参数。他们用艾伯塔的Cold Lake 沥青油所做的实验室实验证明，与理论分析值相当一致。Griffin和Tronfimenkoff(1984)建立了一个解析模型，可用于计算注汽直井与水平产油井的产油量。他们的实验室结果是用沥青油做的，与理论解都能较好地吻合。Joshi和Threlkeld(1985)和Joshi(1986)的室内研究结果表明，垂向裂缝有助于蒸汽垂直向上升起，所以有较高的初始采收率及较高的初始“油气”比。Joshi(1986)用17° API油所作的实验室结果表明，那些非连续分布的页岩阻渗层对蒸汽辅助重力排替法的影响很小。他的结果还指出，对于非连续页岩阻渗层的油藏来说，垂直注汽井及水平生产井是一种最应优先选用的布井方案。所有的实验结果都指出，对于所有这些布井方案，即使是存

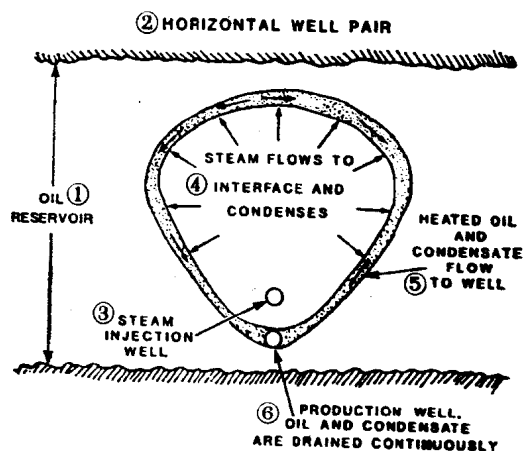


图4 蒸汽辅助重力排替的概念

①油藏；②水平井对；③注汽井；④蒸汽流向界面并凝析成液；⑤热油及凝析液流往产油井；⑥产油井，油与凝析液不断地泄入

在非连续页岩阻渗层，其波及效率也都是高的。上面指出的这种较高波及效率，在一些数值模拟中(Jain和Khosla, 1985; Khosla和Cordell, 1985)均得到证实。Jain 和Khosla 的数值模拟表明，蒸汽辅助重力排替法比周期注汽或蒸汽驱的采收率要高一些。正如表3所示，Khosla和Cordell(1985)的模拟也证明，在开采沥青油上，蒸汽辅助重力排替的动态最突出。

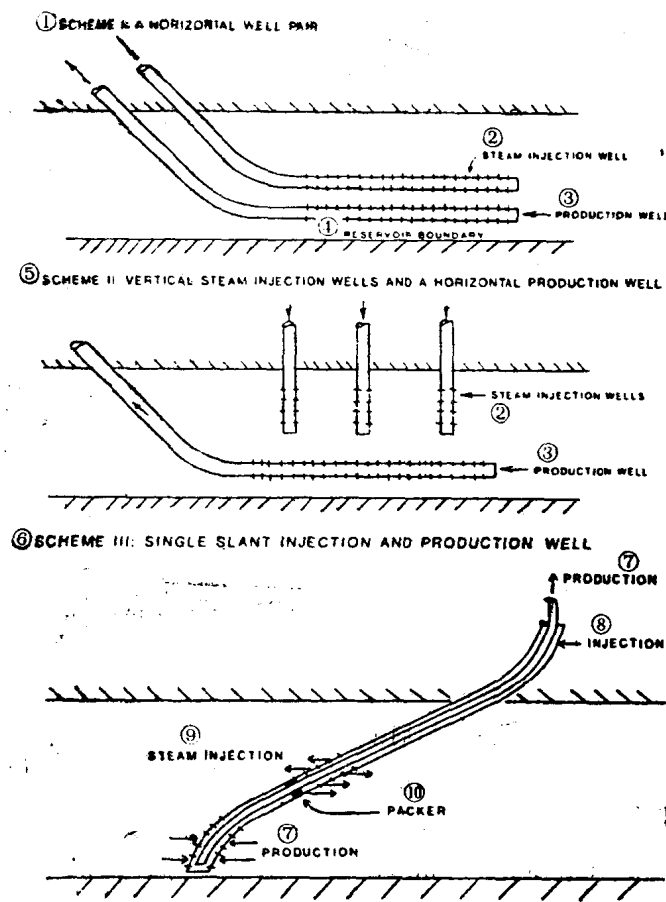


图5 用于蒸汽辅助重力排替的各种布井方案

①方案I，一对水平井；②注汽井；③产油井；④储层边界；⑤方案II：一些注汽直井及一口水平产油井；⑥方案III，单口斜向注采井；⑦产油；⑧注汽；⑨注入蒸汽；⑩封隔器

图6比较了预测蒸汽辅助重力排替情况的数值与解析解。正如该图所示，Jain 和Khosla (1985)用数值法算出的汽油比，是 Butler 及其合作者(1981a-b, 1985a-b)用解析解算出值的两倍。此外，用数值法及解析法算出的产油量却显示出同样的变化趋势及几乎是同样的数值，只不过数值法计算的比解析解要落后500天而已。Jain及Khosla(1985)用下列三方面因素来阐明这种不协调出现的缘故：1)解析解系假设从第1天起在水平井上方覆盖着一个热的平面；2)解析模型不能像数值模型那样将储层的非均质性包括在内；3)数值模型中网格的规模对产油量有影响，但终该井一生的累积产量则不受其影响。

尽管在数值和解析模型之间有某些龃龉，但在作初步的项目评价时，简单的解析模型作为导向来说已相当精确。

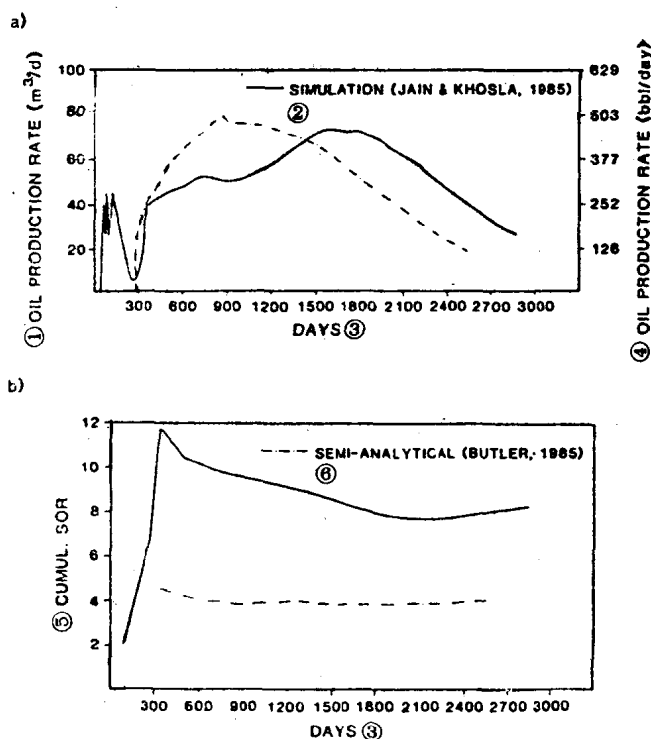


图6 用水平井进行蒸汽辅助重力排替的数值解与解析解的比较(Jain和Khosla, 1985)

①产油量(m^3 /天); ②模拟(Jain和Khosla, 1985); ③天; ④产油量, 桶/天; ⑤累积汽油比; ⑥半解析法(Butler等, 1985)

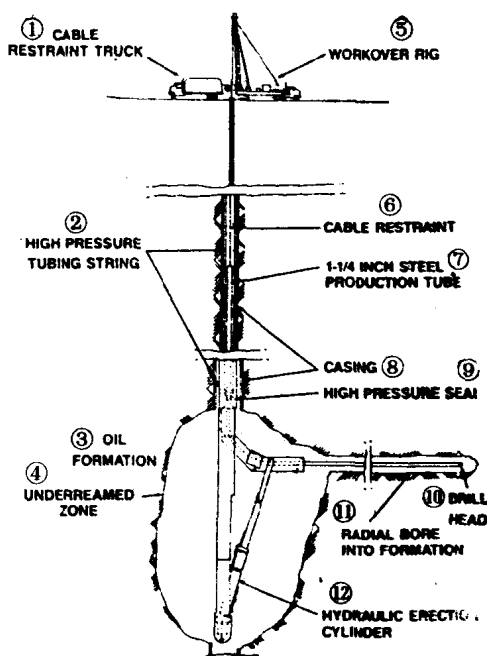


图7 短程排油孔的钻井方式示意图(Dickinson等, 1986)

①钢丝绳减震拖车; ②高压油管柱; ③油层; ④扩孔段; ⑤修井钻机; ⑥钢丝绳减震器; ⑦1 1/4英寸产油管; ⑧套管; ⑨高压密封; ⑩钻头; ⑪进入地层的径向孔眼; ⑫水力支撑柱塞

4. 其他方法

Dismukes(1985)建议用水平井进行一种连续蒸汽焖泡法。此法建议经过内有若干U形管的井筒进行注蒸汽循环, 以代替把蒸汽注入地层的办法。蒸汽从U形管一侧进入井筒, 而其凝析液则从热交换器的U形管的另一侧返回地面。储层受热靠的主要是热传导。作者估计有15到20%的原始石油储量可在15到20年内采出。

有些专利介绍用电力、微波及无线电频率通过水平井筒对油砂进行加热(Perkin, 1984)。

三、水平井钻井

正如表1所示, 在近10年来若干家公司都钻成不少水平井眼。起初, 水平钻井都是用一个直井及坑道来开发浅油藏, 有如Best等(1985), Smith和Butler(1979)和Quinn及Duncan(1976)等人所介绍的那样。但是, 钻井工艺方面的新进展, 已促使能从地表钻成水平井。技术进步成功地解决了诸如钻头加重压、定向控制以及钻杆的起下和组接等问题。在这类井的测井及完井方面的进步更其明显。当前, 实用的工艺可分类如下: 1)短程100—200英尺长排油孔的钻进(SDHD); 2)中程, 100—700英尺长的排油孔的钻进(MDHD); 以及3)1000—2500英尺长的水平井的钻进(LHWD)。