

水平井开采 技术译文集

上册



石油工业出版社

水平井开采技术译文集

上 册

罗英俊 等译 崔耀南 等校

石 油 工 业 出 版 社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书精选了近年来有关水平井开发油气田的最新技术论文。上册的主要内容是水平井技术综述、水平井与现有直井网的最优化井网、水平井动态预测及其压力分析。中册的主要内容是水平井采油工艺技术、热采技术和增产工艺措施。本书的特点是一篇文章阐述一个问题。它具有广泛的可读性和实用性，是现场开发、采油工程技术人员以及管理设计人员的技术参考书，也可作为大专院校师生学习新技术、新工艺的参考书。

水平井开采技术论文集

上 册

罗凤波 等评 崔耀南 等校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京市海澱吳海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本30¹/₄印张 768千字 印1—2,000

1992年2月北京第1版 1992年2月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0533-6/TE·509

定 价: 7.80元

目 录

50/56/23

第一部分 水平井技术综述	(1)
水平井的技术回顾	(1)
水平井和排驱孔技术的综述	(21)
Troll油田开发: 水平井与直井比较	(44)
普鲁德霍湾水平井的应用	(60)
第二部分 水平井与直井的最优化井网	(76)
在稠油油藏中合理的布水平井井网可以提高原油采收率	(76)
第三部分 油藏工程及水平井动态预测	(82)
水平井钻井的油藏工程问题	(82)
东泥盆系页岩层中水平井、大斜度井和直井的模拟研究	(93)
通过数学模拟预测水平井和斜井的产量	(105)
含不连续页岩层油层中直井和水平井的动态: 两个北海油田的数值模拟研究	(122)
低渗透性储层中垂直和水平水力裂缝与水平井眼的动态比较: 数值研究	(133)
水平井见水前水脊的二维解析模型	(144)
✓ 利用水平井开发低渗透油藏	(159)
预测低渗透性气藏中水平井开采动态的分析曲线	(171)
水平井生产预测方法	(182)
预测溶解气驱油藏水平井动态的方法	(207)
预测水平井动态的一些实用公式	(221)
非均质地层中水平井和直井的推进理论研究: 亚临界产量和临界产量	(238)
水平井和直井的动态参数比较	(258)
多相流相关式与印度直井和斜井的实测数据比较	(272)
第四部分 水平井试井	(283)
打开程度不完善斜井的假表皮系数	(283)
各向异性介质中水平井的压降和压力恢复分析	(298)
水平井压力分析	(331)
水平井的不稳定压力分析	(348)
水平井压力特征分析	(372)

存在和不存在气顶或水层时水平井压力不稳定特征	(397)
天然裂缝油藏水平井不稳定压力特征	(417)
水平井不稳定压力分析和井底流入动态	(437)
非均质天然裂缝油藏中水平井的不稳定压力分析	(462)

第一部分 水平井技术综述

水平井的技术回顾

S.D. Joshi 王国清 译

摘 要

这篇文章回顾了应用水平井来开采重油和焦油砂的技术状况,文中讨论了水平井的油藏工程、钻井和完井技术,对现有的油田数据进行了讨论。这个回顾仅限于蒸汽与水平井的结合技术。现有数据表明,对于焦油砂采油来说,应用水平井进行蒸汽辅助重力泄油是一种有效的采油机理。对于重油开采来说,应用水平井进行蒸汽辅助重力泄油以及应用水平井进行蒸汽驱所获得的原油采收率要比应用直井进行蒸汽驱所获得的原油采收率高得多。另外,对于产生严重蒸汽超覆现象的成粘蒸汽驱来说,应用水平井可以减少重力分异,并可采出底层原油。

一、引 言

在前10年间,几个油田研究已经表明,水平井可用于开采常规原油、重油和焦油砂储藏(见表1)。一般情况下,水平井对于提高原油产量、减小水锥、气锥现象都是比较成功的。尽管只需抽油泵的配合,水平井就可以用于开采API重度为12°的重油,但对于开采高粘油来说,蒸汽与水平井的某种结合是必要的。表2列出了9个水平井的热采方案,从表中可以看出,水平井与蒸汽驱、周期性蒸汽吞吐以及蒸汽辅助重力泄油相结合已用于开采试验区中的重油和焦油砂储层。现在看来,只有有限的结果是有效的。

目前,应用现有的钻井技术能够钻出长度为2000ft的水平井眼,采用这些长井眼是为了提高原油产量;另外,水平井与产层之间具有较大的接触面积,这有助于注入较大的蒸汽段塞。然而,水平井的钻井成本大约比直井的钻井成本高1.5~2倍。

这篇文章总结了应用水平井的现有实验、理论和油田应用结果,为全面起见,文中还讨论了水平井的钻井和完井方法,这篇论文是水平井-注蒸汽工艺技术的回顾。

表1 水平井钻井

年	公司	油 田	井数	深度 ft	油藏连通长度 ft	水平井/直井成本	备 注
1937	—	Yarega, 苏联	多口	—	1000最大	—	采用坑道注蒸汽
1941	Leo Ronney等	Mecconnesville Ohio	6	—	1000	—	通过隧道钻井
1942	—	Franklin重油 油田 Venango	4	388	1000	非常昂贵	通过隧道钻井

续表

年	公 司	油 田	井数	深度 ft	油藏连通长度 ft	水平井/直井成本	备 注
1942 ()	—	County, PA Midway Sunset San Joaquin, 加利福尼亚州	2	1100	70	—	通过现有的直井, 利用井下电动机和 挠性钻杆进行钻井
1946	—	Round Mount- ain Field, Ke- ru County 加利福尼亚州	9	1650	55	—	
1962	—	San Joaquin Valley, 加利福 尼亚 (Midway Sun Set)	1	1200 3700	50 50	—	从一口直井出发在 地层中钻出 6 个水 平泄油孔眼从一口 直井出发在地层中 钻出 6 个水平泄油 孔眼
1962	委内瑞拉 石油特许有限公司	La Pas Field 委内瑞拉西部	?	10000	50~100 ()	—	钻水平井减少气锥
1962	长峰石油 开发公司	洛杉矶盆地 (威尔明顿)	8	3500到 4800	50	—	从每口直井出发钻 6~8口水平泄油 孔。在某些井,为 了达到许多层,在 相应的深度钻几个 水平泄油孔眼
1967	—	苏联	1	1000	200	—	生产井
1967	—	中国	1	3600	1600	—	一口水平井的产量 超过一口直井产量 的5到10倍,但只 持续7天
1968	—	Marcovo 西伯利亚东部, 苏联	1	7200	1800	—	—
1977	Conoco	Tisdale 怀俄明州	6	—	1700(最大)	—	从隧道钻井
1978	Esso加拿大	Cold lake Alberta	1	1558	1000	8~12	从地面钻至未固结 沙岩,注蒸汽
1979	Texaco	Fort McMurray Alberta 加拿大	3	415	1000	5~6	注蒸汽,目前关井
1979	Esso加拿大	Normal Well Under Maken- zie River, Alberta 加拿大	1	1603	1860	—	—

续表

年 度	公 司	地 点	井数	深度 ft	油藏连通长度 ft	水平井/直井 成本	备 注
1980~ 1981	Elf-Aquitaine & IFP	Lacq Field 法国西南部	1	2195	330	4.3	从地面开钻
			1	4100	1214	3.5	从地面开钻 钻至具有裂隙的石灰岩。
1981~ 1983	Elf-Aquitaine & IFP	Rospo Mare, 意大利海上	1	4500	1988	2.1	产油量超过直井的 15倍。减少水锥。
	Elf-Aquitaine & IFP	Castera Lod, 法国南部	1	9500	1300	2.1	在石灰岩地层中不仅增产而且减少水锥
1980~ 1984	ARCO	Empire Abolition 新墨西哥	2	6200	300~400	2	从地面钻新井
1981~ 1984	ARCO	Empire Abolition 新墨西哥	2	6200	300~400	250000美元/井	通过现有的直井开钻
1982~ 1984	ARCO	South east Douglas Carfidd County, 俄克拉何马	1	5500	300~400	250000美元/井	从现有的低产量直井钻入裂缝性密西西比石灰岩
1985	ESSO 加拿大	Cold Lake Alberta 加拿大	1	1558	3330	—	蒸汽吞吐
1985	Petrobras	Fazehde Belam 油田	1	1000	554	—	比周围的直井产量高6倍
1985	Sohio	McMullen Co., 得克萨斯	1	10300	1908	—	长的水平井
1985	Sohio	Glassok Co., 得克萨斯	1	—	295	—	短的泄油孔眼
1985	Sohio	普拉德霍湾 阿拉斯加	1	8889	1400	2	与常规井相比原油 产量增加3倍
1985	Sohio	普拉德霍湾 阿拉斯加	1	9000	—	1.4	与常规井相比原油 产量增加3倍

表 2 水平井—油田注蒸汽方案

公司及年份	地理位置	资料来源	井数	长度, ft	注蒸汽工艺	累计采油量, bbl	汽油比 (SOR)	现状备注
Yerga Signal Oil Co. (1965~1966)	苏联 Sung Side Carbon 县 犹他州	Butler, 1984 Marchant, 1984	许多	300 (最大)	—	—	—	在生产/通过坑道 停产, 原油API 重度为9~10°, 从 岩层露头的一边钻 井
Petro-Canada 和其它公司 MAISP-I (1978)	Fort McMurry, Alberta 加拿大	Towson, 1984	1	330(中)	周期注蒸汽 和蒸汽 驱	—	16	停产, 原油API重 度大约为10°, 从 岩层露头的一边钻 井
Hopco (1978)	Kem County, 加利福尼亚	Rintoul, 1985	4	430	周期注蒸汽	14907	—	停产, 原油API重 度为13°, 通过竖 井钻井
ESSO-I (1979)	Cold Lake, —	油气杂志, 1982 Bezair & Mar- kiw, 1979 Baldwin 等人, 1983 MacDonald, 1985	4 1 1	730 1000 3200	周期注蒸汽 及蒸汽 重力泄油	—	—	生产, 原油API重 度大约为10° 生产, 原油API重 度大约为10°
Texaco (1979)	Fort McMurray Alberta 加拿大的	Loxam, 1982 Pugh, 1982 Oilweek, 1986	3	1000	周期注蒸汽 及蒸汽 驱	—	—	停产, API重度为 10°, 从地面钻井
(1986)	加利福尼亚	—	1	—	周期注蒸汽	—	—	生产, 原油API重 度为13° 原油API重度为 14°
Petrobras (1985)	Fazenda Belam 油田, 巴西	EOR Week 1985	1	544	()	75 bbl/d	—	—
计划的方案 MAISP (1985- 87)	Athabasca 焦油砂, Alberta 加拿大	Bestetal 1985	365	—	—	—	—	坑道/竖井方案, 原油的API重度为 10°

二、注蒸汽热采工艺

水平井可用于进行周期性蒸汽吞吐、连续性蒸汽驱和蒸汽辅助重力泄油工艺, 在许多重油和焦油砂储藏中, 为了使油井获得初期蒸汽注入能力, 有必要先采用周期性蒸汽吞吐, 下面对各种开采方法进行回顾。

1. 周期性蒸汽吞吐

1984年, Coats描述了一个物理模拟器, 该模拟器用于研究水平井注蒸汽。Toma 等人 (1984年) 的实验室实验结果表明, 沥青的采收率依赖于一口油井的轴向压降, 采用溶剂和二氧化碳可以进一步提高采收率。

1984年, Gussis通过数值研究来对比一口直井与一口水平井的蒸汽吞吐生产动态, 其油藏特性如下: 原油的API重度为 12° , $h=100\text{ft}$ 。在研究中, 采用的油藏模型分为5层, 假设其中4层的垂直渗透率是水平渗透率的一半。另外一层, 其垂直渗透率是水平渗透率的十分之一, 假定水平井的长度为840ft。如图1所示, 在第一个周期结束后 (共90天, 其中生产7天, 注蒸汽17天, 吸收加热4天, 再生产62天), 其中水平井的累计采油量大约比直井的累计采油量高5倍。然而, 在较为成功的注蒸汽周期中, 水平井与垂直井之间的产量差别将会由大变小。

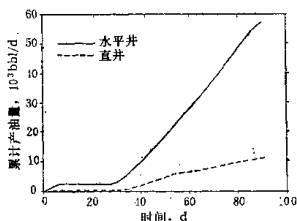


图1 应用水平井和直井进行周期性蒸汽吞吐的对比 (Gussis, 1985)

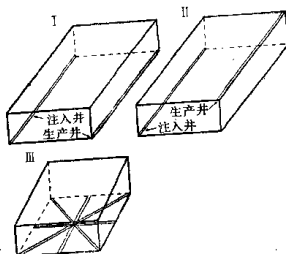


图2 各种水平井布井方案

1985年, Gussis将三套不同的水平井井网进行了数值对比, 这三套水平井井网都是用于开采API重度为 12° 的原油。如图2所示, 对每套井网来说, 泄油面积为80英亩, 油藏厚度为100ft, 采用8口水平井。其井网描述和周期性蒸汽吞吐的两个方案如下: (1) 在油藏底层有4对长度为2000ft的水平井, 井距为218ft。钻这些水平井的目的是为了在两口相邻的水平井之间的2000ft范围内形成线性驱动。采用该井网, 在9.3年内就可采出原始储量的27%。(2) 在油藏顶层钻4口长为2000ft的水平井, 并且在油藏底层钻4口水平井, 其中两口相邻的线性驱动井之间的距离为2000ft。采用该井网, 在9年内可采出原始储量的26.5%。(3) 从一个面积为80英亩的正方形区域的中心向外钻8口水平井。正方形对角线上的水平井比正方形中心线上的水平井长。采用该井网, 在9.0年内可采出原始储量的20.8%。

从采收率的角度来考虑, 方案1是最佳的选择, 即在油藏的底部布置平行的水平井进行线性驱。在第二个井网中, 布置在油藏顶部附近的注入井将会产生大量的热损失, 这些损失热量被上覆岩层吸收。在第三个井网中, 在径向钻井井眼的外边界, 水平井的端点之间的距离较大, 这会导致油藏外边界的扫油效率较差, 因此, 该井网的采收率较低。

2. 蒸汽驱

通过一个实验室研究和几个数值研究给出了应用水平井进行蒸汽驱的结果。1982年, HuYgen和Black的实验研究表明, 通过一口单独射孔的水平井连续的进行蒸汽循环对于开采粘性沥青是一种有效的工艺。在他们的井网中, 两口直井与水平井的端点相交, 其中一口直井做为注入井连续地注蒸汽, 而另一口直井做为生产井。垂直裂缝的存在, 大大的减小了采用HuYgen和Black (1982) 井网的采油量。

下面报道数值模拟的研究结果: Rial (1984) 研究了API重度为 15° 的重油, Huang和Hight (1985) 研究了API重度为 13° 的重油, Gussis (1983) 研究了API重度为 12° 的重油, Khosla (1985) 研究了Alberta的粘性沥青, 其API重度大约为 10° 。下面一段简要介绍一下数值模拟结果。

Rial (1984) 模拟了Kern River (加利福尼亚有代表性的油藏) 油田两口直井之间的蒸汽驱, 设油藏面积 $A=2.5$ 英亩, 油藏厚度 $h=80$ ft。垂直注入井和生产井分别布置在立方体泄油区相对两个面的中心。Rial还模拟了一口330ft长的水平注入井和一口垂直生产井之间的蒸汽驱。在立方体泄油区内, 水平注入井沿着一个边布置在油藏底部, 而垂直生产井布置在与其相对的面的中心。在5年内, 一个水平-直井网采出原始储量的64%, 相比之下, 直井网在5年内只采出原始储量的51%。另外, 在15年内, 水平井模拟采出原始储量的71%, 相比之下, 直井模拟在15年内只采出原始储量的58%。

为了研究一个厚度为125ft、原油API重度为 13° 的油田, Huang和Hight (1985) 对几个水平井-直井结合井网进行了数值研究。他们采用18.5英亩的井网, 结果发现, 在7年内, 所布置的最好井网采出原始储量的72.2%。最好的井网包括4口水平生产井和5口垂直注入井, 其中4口水平生产井在油层底部附近, 这4口水平生产井是从正方形泄油面积的4个角径向延伸至中心。另外的5口垂直注入井, 其中一口在井网中心, 其余4口分别布置在正方形泄油面积的四条边的中心。

Huang和Hight (1985) 的模拟结果表明, 在7年内采出72.2%的原油, 该原油的API重度为 13° 。而Rial (1984) 的研究结果表明, 在7年内只采出67.8%的原油, 该原油的API重度为 15° 。尽管采收率之间相差不大, Rial的预测之所以产生较低的采收率, 主要是由于他在模型中引入了重力分异。在Rial的4层模型中, 顶部两层的渗透率是5000md, 而底部两层的渗透率分别为2000md和1400md。相比之下, Huang和Hight采用一个均匀的水平渗透率为3000md, 垂直渗透率为900md。上面的原油采收率对比表明, 尽管存在重力分异作用, 水平井-直井相结合的蒸汽驱仍将获得较高的原油采收率。

Huang和Hight (1986) 对水平井在一个已经采用直井蒸汽驱的油藏中的应用进行了数值研究, 其中原来的直井蒸汽驱产生了严重的蒸汽超覆现象。在模拟研究中, 假设油层厚度为125ft, 原油的API重度为 13° , 油层的水平和垂直渗透率分别为3000md和900md。直井采油的基本方案包括一个九点法井网, 井网密度为18.5英亩, 为直井网。如图3所示, 采用直井采油, 在15年内, 总共可采出原始储量的64.7%。然而, 含油饱和度曲线表明, 在蒸汽驱油过程中, 出现了严重的蒸汽超覆现象, 使得底层的剩余油饱和度达到60%。采用反十三点法井网来代替九点法井网, 在较短的时间内 (11年) 几乎获得与九点法井网完全相同的采收率。采用这个井网, 其底层仍然剩下很高的残余油饱和度, 而且可以看出, 仍然出现了严重的蒸汽超覆现象。为了减轻蒸汽超覆现象, 在采用十三点法井网生产6年后, 沿着正方形泄油面积的边缘布置8口长度为374ft的水平井。这8口水平生产井与垂直生产井一起不仅使开

采期缩短到9年,而且使整体原油采收率提高1%,从而使原油采收率达到85.9%。由于水平井的携液能力很强,因此,将水平井与中心注入井一起进行模拟,而且还把4口加密井转化为注蒸汽井。这个十三点法水平-直井网(6口垂直注入井,8口垂直生产井和8口水平生产井)在11年内采出原始储量的74.7%,该采收率明显的比前面提到的其它井网的原油采收率高。水平井具有较好的扫油效率。特别在底层,其效果更好,从而获得较高的原油采收率。这些结果表明,将水平井用于已经进行蒸汽驱的油藏中可以减小重力分异、改进扫油效率而且可以采出更多的原油。

Gussis(1985)还模拟了以各种排列方式布置的水平井的蒸汽驱,其中采出原油的API重度为12°。图2给出了其中的一些排列方式。Gussis指出,在开始进行周期性蒸汽吞吐以后,在两口长度为2000ft、间距为416ft(20英亩)的水平井之间进行蒸汽驱,9年内可采出原始储量的42%。这个采收率值比Rial(1984)的采收率值(9年内采收率为69%)低得多,而且比Hight(1985)的采收率(7年内采收率为72.2%)低得多。Gussis的采收率低主要是由于他采用的原油粘度高(API重度为12°),而相比之下,Rial采用API重度为15°的原油,Huang和Hight采用API重度为13°的原油。另外,Gussis采用的井距大而且采用不同的布井方式,这也可能是造成采收率低的原因。这些结果表明,在网口较长的水平井之间进行蒸汽驱对于开采高粘油来说,其效果很差。把水平井与直井结合起来进行蒸汽驱所获得的原油采收率比采用相互平行的水平井进行蒸汽驱要好。

利用蒸汽驱来开采高粘油,特别是在两口相互平行的水平井之间进行蒸汽驱,其效果很差,这一结论由Khosla和Cordell(1985)以及Jain和Khosla的数值结果进一步得以证实。这些研究人员利用蒸汽驱来开采焦油砂都得到了非常低的原油采收率。

Khosla和Cordell(1985)已经报道了从McMurray层开采沥青的数值结果,该层位于加拿大Alberta的Athabasca值油砂矿中。作者对一个厚度为49ft、单井泄油面积为5.93英亩的储藏进行了模拟。在所有的计算中,都假设水平井的长度为1640ft。对两种类型的储藏获得了模拟结果:(1)存在底水,具有较好的注入低力;(2)没有底水,以至注入能力最低。表3对比了不同条件下所获得的原油产量。在所有的情况下,开始都是采用蒸汽吞吐,他们采用相互平行的水平井,布置在储藏底部附近,其中水平井之间的间距为148ft。结果表明,采用这种布井方式3年内大约采出原始储量的85%,这里假设油层和底水层的水平渗透率相同。然而,如果底水层的渗透率是油层渗透率的两倍,那么,只能采出原始储量的15.8%,这表明,大部分蒸汽都注进了底水层。如果水平井之间的距离只是原来的两倍,达到295ft,而且在注入井和生产井之间存在一个高渗透率薄间层,那么,注入的蒸汽大部分都将进入这个高渗透间层,从而导致早期汽窜,因此,在这种情况下只采出原始储量的25.4%。这些结果表明,如果底水层的渗透率等于或低于油层渗透率,不存在高渗透薄间层而且井距比较

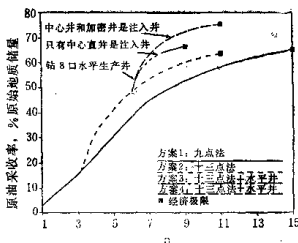


图3 在一个已采用蒸汽驱的油藏中,存在和不存水平井时的各种方案对比 (Huang和Hight, 1986)

小,那么,在沥青储藏中利用水平井进行蒸汽驱将是成功的。因此,把蒸汽驱用于沥青储藏还存在某种限制条件。相比之下,Khosla和Cordell(1985)经研究发现,对于下一节中所描述的蒸汽辅助重力泄油工艺来说,不管是否存在底水层,其采收率都比周期性蒸汽吞吐或蒸汽驱高得多。例如,利用一口长度为1640ft的水平井和两口垂直注入井,通过蒸汽辅助重力泄油,4年内可采出原始储量的77%。

表3 利用水平井通过不同的布井方式开采沥青的对比(Khosla和Cordell, 1985)

布井方式	泄油面积 英亩	开采期 年	累计油 汽比	平均原油产量 bbl/d	采出原始储量的 百分数, %
两口长度为1640英尺的 水平井之间的蒸汽驱					
(1)井距为148ft,渗透 率均匀分布	5.6	3	0.28	153	85.0
(2)井距为148ft,存在 一个高渗透薄间层	5.8	3	0.10	69	15.8
(3)井距为295ft,存在 高渗透薄间层	11.7	3	0.14	221	25.4
采用两口垂直注入井和 一口长度为1640ft的水 平生产井进行重力泄油					
(1)底层富含水	5.9	4	0.16	145	73.8
(2)底层富含沥青	5.9	4	0.26	304	77.6

Jain和Khosla(1985)研究了通过一口水平井和一口与之相交的直井连续进行蒸汽循环的可能性。该过程与Conoco的快“过”程相似,在这个“快”过程中,蒸汽通过水平裂缝快速循环(Britton等人,1983)。与蒸汽辅助重力泄油相比,采用蒸汽连续循环工艺开采沥青,其热效率很低。对比下面三个布井方案及其结果可以看出蒸汽辅助重力泄油的效率:(1)通过长度为985ft的水平井和与之相交的直井连续地进行蒸汽循环,其产量为79bbl/d,生产6年;(2)在两口长度为490ft、间距为197ft的水平井之间进行蒸汽驱,以138bbl/d的产量生产7年;(3)采用一个长度为1310ft的水平生产井和两口垂直注蒸汽井进行蒸汽辅助重力泄油,其中直井与水平井的两个端点之间的距离相等,结果以315bbl/d的产量生产7.5年。

以上结果表明,从采收率的角度出发,通过水平井进行蒸汽辅助重力泄油方法来开发焦油砂储藏其效果最好。采用该工艺产生了较好的油井动态,其工艺过程和原因由下面给出。

3. 蒸汽辅助重力泄油

在周期性蒸汽吞吐和蒸汽驱过程中,尽管重力泄油在开采过程中起着一定的作用,但大部分原油是靠油藏中的压力梯度采出的,在蒸汽吞吐过程中,由油藏与生产井之间的压力梯度来确定原油产量。在蒸汽驱油过程中,由注入井与生产井之间的压力梯度来确定原油产量。另外,在蒸汽辅助重力泄油过程中,除了流体重度不同而产生的压差外,在注入井和生产井之间没有降压,原油完全靠重力排泄采出,通过蒸汽加热、减小原油粘度来提高泄油速

度。甚至在一口井的单位井筒长度的原油产量只有 $0.3\text{ bbl/d}\cdot\text{ft}$ 时, 还可以采用 1000 到 3000ft 长的井筒来获得足够高的原油产量。

由于油藏中没有外部压力梯度, 减小了蒸汽窜槽, 改进了扫油效率, 从而获得较高的原油采收率。与其它开采工艺相比, 由于重力泄油工艺的驱油效率较高, 从而使原油采收率得到进一步的提高。

Butler 及其合作者 (1981a, 1981b, 1984, 1985a, 1985b) 引入了采用水平井并进行蒸汽辅助重力泄油的概念。该工艺过程与浴缸中发生的情况非常相似, 在浴缸中, 蒸汽上升而水

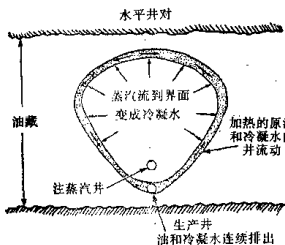


图 4 蒸汽辅助重力泄油概念

各自独立的流动通道, 这对原油流动的相对渗透率非常有利; (3) 在早期汽窜的情况下, 可以停注一个周期的时间, 然后再重新开始注入, 以使工艺效率不致受到严重损失。该工艺过程的缺点如下: (1) 需要一个较厚的油柱 (大约 50ft)。(2) 对于被较厚的连续页岩隔层分开的几个油层, 可以要求在每个产油层都钻水平泄油孔。

图5给出了5种可能的布井方案在油田中应用的示意图。Butler 及其合作者 (1981a~b, 1984) 研究出一种半解析解, 用于计算平行水平井的原油产量和油汽比。他们还确定了无量纲参数, 目的是把实验室数据按比例扩大到现场数据, 他们采用 Alberta Cold Lake 油田的沥青进行实验室实验, 所获得的结果与理论结果非常一致。Griffin 和 Tronfimenkoff (1984) 研究出一种解析模型, 应用这一模型可以计算由一口垂直注入井和一口水平生产井组成的方案的原油产量, 他们采用沥青进行实验室实验所得到的结果与理论解非常一致。Joshi 和

Threlkeld (1985) 以及 Joshi (1986) 给出的, 这是在两口平行的水平井采油过程中热油与蒸汽的反向逆流示意图。这对水平井布置在油柱底部附近, 其中注入井在上面, 生产井在下面。这两口井之间尽可能靠近些, 使得二者之间除了由流体重量不同而产生的压差外没有压降; 使两口水平井之间具有最小的压降可以缩短注蒸汽周期。

蒸汽辅助重力泄油除了具有较高的扫油和驱油效率外, 该工艺的其它优点如下: (1) 与蒸汽吞吐和蒸汽驱相反, 热油一经驱替就出来了; (2) 原油、冷凝水和蒸汽几乎都有

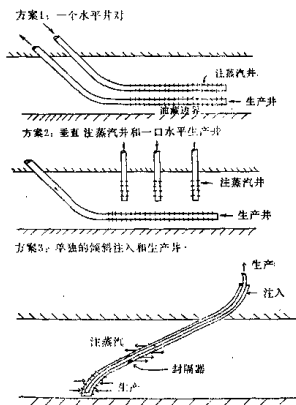


图 5 各种蒸汽辅助重力泄油布井方案

Threlkeld (1984) 两人的实验结果以及 Joshi (1986) 个人的实验结果都表明, 垂直裂缝有助于蒸汽的垂向上升, 从而得到较高的初始原油采收率和较高的初始油气比。Joshi (1986) 采用 API 重度为 17° 的原油进行实验, 结果表明, 不连续页岩隔层对蒸汽辅助重力泄油影响最小。他的研究结果还表明, 对于存在不连续页岩隔层的油藏来说, 最好采用垂直注入井和水平生产井方案。所有的实验室研究结果都表明, 对于所有的井网来说, 其扫油效率都很高, 甚至于存在不连续页岩隔层的油藏中也是如此。上面所提到的高扫油效率还由数值模拟 (Jain 和 Khosla, 1985; Khosla 和 Cordell 1985) 得以证实。Jain 和 Khosla 的数值模拟结果表明, 采用蒸汽辅助重力泄油所得到的原油采收率 (占原始储量的百分数) 比蒸汽驱或蒸汽吞吐都高。如表 3 所示, Khosla 和 Cordell (1985) 的模拟结果还表明, 采用蒸汽辅助重力泄油来开采沥青, 其性能很好。

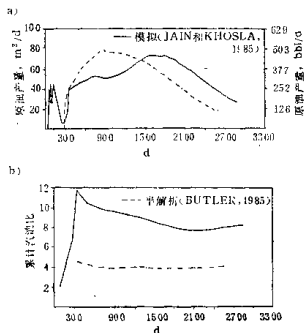


图 6 应用水平井进行蒸汽辅助重力泄油的数值解与解析解的对比

图 6 中把蒸汽辅助重力泄油工艺的数值模拟结果与解析解预测结果进行了对比。从图中可以看出, Jain 和 Khosla (1985) 通过数值模拟所获得的汽油比大约是采用 Butler 及其合作者 (1981a~b, 1985a~b,) 的解析解所获得的汽油比的两倍。另外, 由数值模拟获得的原油产量与解析计算所获得的原油产量有相同的趋势, 而且数值大致相同, 只是数值模拟结果比解析计算结果延长大致 500 天。Jain 和 Khosla (1985) 认为, 这种差异是由下面三种因素造成的: (1) 解析解假设从第一天起水平井的上面就出现了一个热平面, (2) 解析模型忽略了油藏非均质性, 而数值模型考虑了油藏的非均质性; (3) 在数值模型中, 网格块的大小影响原油产量, 但油井整个开采期的累计产油量不受影响。

尽管数值模型与解析模型之间有一定的差距, 但原则上, 在初始方案评价过程中, 简单的解析模型就足够精确了。

4 其它方法

Dismukes (1985) 建议采用水平井连续地进行蒸汽加热方法。该方法不是向地层中注蒸汽, 而是建议通过井筒来循环蒸汽, 其井筒由几个 U 形管组成。蒸汽从 U 形管的一个腿进入管中, 而且冷凝水通过 U 形管换热器的另一个腿返回地面。在此过程中, 主要靠热传递来加热油藏。作看估算, 采用这种方法, 在 15 到 20 年内大约可采出原始储量的 15~20%。

某些专利描述了在水平井筒中 (Perkin, 1984) 应用电、微波和无线电频率来加热油砂的方法。

三、水平井钻井

从表1可以看出,在前10年中,已经有几个公司都钻了水平井。正如Best等人(1985)、Smith和Butler(1979)、Quinn和Duncan(1976)所描述的那样,最初,水平井钻井是在浅层中采用竖井和坑道来进行。然而,由于钻井技术的最新进展,促进了从地面钻水平井技术的发展。技术的进步已经成功地解决了一些问题,例如,钻压、方向控制、钻杆的阻力和卡钻问题。这些井的测井和完井技术也得到大大的提高。现在把比较适用的技术分类如下:(1)较短的,长度为100~200ft范围的水平泄油孔钻井(SDHD);(2)中等长度、长度为100~700ft范围的水平泄油孔钻井(MDHD);(3)1000~2500ft长的水平井钻井(LHWD)。

1. 短泄油孔钻井(SDHD)

Dickinson和Dickinson(1985)、Pendleton和Ramesh(1985)、Rintoul(1985)以及Dickinson等人(1986)描述了长度为100~200ft的水平泄油孔的钻井过程,这些水平泄油孔是在未固结地层中用水喷流的办法开钻的。如图7所示,这是一个短的径向泄油孔,该泄油孔是通过一口现有直井的套管下扩并眼部分来完钻的。这项工艺过程包括下面几个操作步骤:(1)在套管中铣一个5~10ft的窗口,并用水喷流的办法在套管下扩开一个直径为4ft的空穴;(2)在井眼中下入一个造斜器,并对准泄油孔方向安装好;(3)用一个专门研制的管子,通过水喷流的办法钻开一个直径为4in的水平泄油孔;(4)关掉生产管柱的底部孔眼;(5)拆除并转动造斜器,而且按照下一个钻孔所需要的角度重新安装好;(6)采用第1到第5步钻第二个水平泄油孔。可以将生产管柱射孔,并采用砾石充填控制出砂(Pendleton和Ramesh, 1985)。一般要在套管下扩并眼中下入一个割缝衬管。这些作者还简要描述了适用于这些水平泄油孔的特殊测井仪器。

2. 中等长度水平泄油孔钻井(MDHD)

60年代初期,Stromont(1953)和Eastman(1954)描述了水平泄油孔钻具。近来,Stramp(1980)、Holbert(1981)和Gorody(1984)讨论了通过一口现有的直井来钻长度为200~700ft的水平泄油孔问题。就象上面文献中描述的那样,首先采用一个铣刀在已有的套管中铣开一个窗口,然后,“扭动”钻铤、增加角度以便实现最优钻压造斜,并钻入地

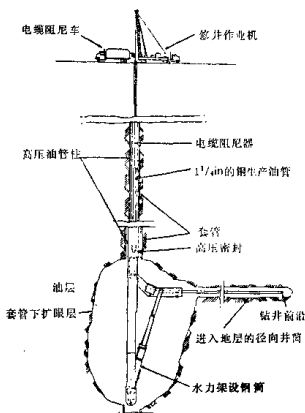


图7 短泄油孔钻井示意图
(Dickinson等, 1986)

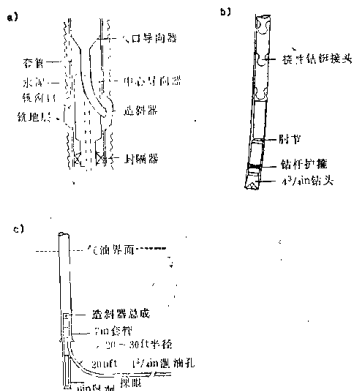


图 8 中等长度水平泄油孔钻井示意图

(a) 造斜器总成示意图; (b) 转动钻铤示意图; (c) 孔眼示意图

层中, 其中在径向上转动30ft, 每英尺转动3°。连续造斜达到85°角, 而后再用第二套井下装置来钻其它的水平泄油孔。得克萨斯东部公司销售一种类似的钻井技术 (Gorody, 1984)。

Holbert (1981) 的理论计算表明, 钻井的水力因素和摩擦相结合使水平泄油孔的最大长度被限制在600到1200ft之间。到目前为止, 得克萨斯东部报道了一口已完钻的最长的水平泄油孔, 其长度为700ft (Gorody, 1984)。近来, 技术已得到发展, 即通过插入一割缝衬管来完成这一并眼。为了阻止淤泥和沙子进入井中, 把一个直径足够小的钢丝网过滤器缠绕在衬管上, 特别在一个未固结地层中更加必要。该系统的主要缺点是, 难以使大部分直井钻具进行较陡的、曲率半径为20~30ft的转动。这里还可以提出一些井的处理作业问题。

3. 较长的水平井钻井 (LHWD)

法国石油研究院 (IFP) 和Elf Aquitaine已经发展了长度为2000ft的水平井的钻井、完井和测井技术。到目前为止, 他们已在欧洲钻了4口水平井 (Giger, 1982; Giger和Jourdan, 1984; 以及Reiss, 1985)。其中多数都是在未固结砂岩中完钻的, 井深在2000到1000ft之间。Rospo Mare并位于意大利海上, 该井从一个裂缝性灰岩层中开采API重度为12°的重油。在深度大约为6000ft的地层中, 把带有一个弯接头的标准钻头与井下泥浆马达相结合来钻一口长度为2000ft的水平井。把一个割缝衬管下入井眼中, 而且还研究出了一种特殊的钻井技术 (Baron和Wittrish, 1985)。Dorel (1983) 描述了他们成功地利用水泥进行选择性完井, 而且在法国的一口长度为1086ft的水平井Lacq91成功地进行了高含水层的堵水作业。