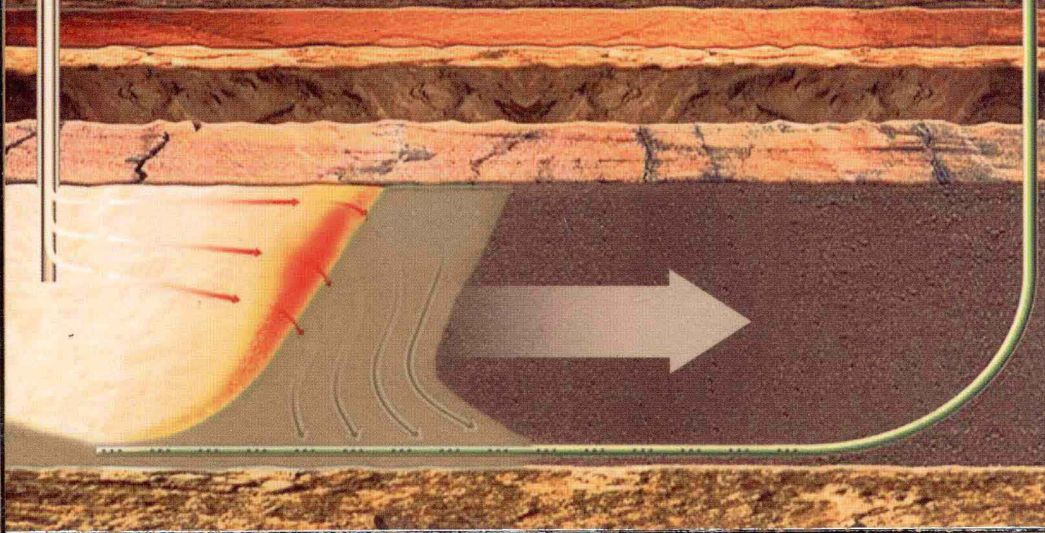




火烧油层理论与实践

IN-SITU COMBUSTION
THEORY & PRACTICE

◎ 主编 宁 奎 袁士宝 蒋海岩

中国石油大学出版社

火烧油层理论与实践

In-Situ Combustion Theory & Practice



主 编	宁 奎	袁士宝	蒋海岩
副主编	孙希勇	张弘韬	杨长林
	王修文		

中国石油大学出版社

内 容 提 要

《火烧油层理论与实践》一书以辽河油田火烧油层的矿场实践为基础,结合近年来国内外火烧油层矿场实践经验,系统详尽地介绍了火烧油层区块和井组的筛选模式,点火及管火、控火新技术,效果预测,评价系统,前缘监测技术,以及火烧油层中遇到的其他问题及解决方法,便于读者系统完整地了解火烧油层技术实施过程及应该注意的问题。

本书可供从事稠油热采技术研究的研究生、院校有关教师、科研工作者以及现场工作人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

火烧油层理论与实践/宁奎,袁士宝,蒋海岩编著.

—东营:中国石油大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5636-3295-4

I. ① 火… II. ① 宁… ② 袁… ③ 蒋… III. ① 火烧油层 IV. ① TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 201582 号

书 名: 火烧油层理论与实践

作 者: 宁 奎 袁士宝 蒋海岩

责任编辑: 阙青兵 (电话 0532—86981538)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: zhiyejiaoyu_qqb@163.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546—8392565, 8399580)

开 本: 180×235 印张: 14.5 字数: 309 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

前言

PREFACE

随着国民经济的发展以及原油价格的不断攀升,石油工作者在努力提高水驱采收率的同时,把注意力逐步转向非常规石油资源上,稠油以其可观的资源量日益受到石油工作者的重视。

中国对稠油开采技术极为重视,展开了“七五”、“八五”、“九五”科技攻关和 973 项目的研究并取得了丰硕的研究成果。经过二十多年的研究和实践,蒸汽吞吐热采技术已经趋于完善,但是蒸汽吞吐后的接替技术问题也凸现出来。无疑,火烧油层技术以其广泛的适应性成为候选开发方式之一。本书是以辽河油田杜 66 北块蒸汽吞吐后进行火烧油层的矿场实践为基础,围绕生产实践中遇到的实际问题展开专项课题研究,通过火烧油层采油技术的理论研究与现场试验,总结提出了火烧油层采油技术的油层筛选推荐标准及模式、油层热力点火技术、燃烧方向监测技术、综合调整控制以及配套辅助工艺技术,为蒸汽吞吐开发后期的稠油区块转变开发方式、提高原油采出程度、进行火烧油层采油技术现场大面积推广与应用奠定了基础。

本书由辽河油田火驱项目部宁奎总工程师与西安石油大学袁士宝组织撰写。第一章、第二章由宁奎、袁士宝编写,第三章第一至第三节、第四章和附录由蒋海岩编写,第三章第四节、第五章及第六章第一节由孙希勇、张弘韬、杨长林、王修文编写,第六章第二节及第七章由袁士宝编写,部分文献调研和翻译工作由研究生田相雷、吴婷完成,在此对他们的工作表示感谢。

本书撰写过程中得到了中国石化胜利油田滨南采油厂李金发高级工程师、中国石油辽河油田分公司相关领导以及中国石油大学(华东)石油工程学院采油工程系领导的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

作 者

2009 年 12 月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	(1)
一、稠油开采技术现状	(2)
二、稠油开采技术发展趋势	(11)
三、火烧油层在热采中的地位	(12)
第二章 火烧油层原理及现状	(14)
第一节 火烧油层驱油机理和适用范围	(14)
一、工艺过程	(14)
二、油层燃烧方式	(17)
三、火烧油层适用范围	(20)
第二节 火烧油层技术的发展概况及趋势	(21)
一、火烧油层发展历程	(21)
二、国外目前活跃的火烧油层项目	(25)
三、我国火烧油层发展现状	(33)
四、现场实践的教训	(37)
五、火烧油层技术发展趋势	(38)
第三章 火烧油层适应性及油藏工程设计	(50)
第一节 蒸汽吞吐(CSS)后储层的特点	(50)
第二节 CSS后火烧油层适应性分析	(53)
一、建立蒸汽吞吐后的数模模型	(53)
二、火烧油层数值模拟建模	(55)
三、火烧油层模拟结果	(57)
四、蒸汽吞吐后火烧油层可行性分析	(58)
第三节 火烧油层油藏工程设计	(59)
一、蒸汽吞吐转火烧时机的选择	(59)
二、井网设计	(59)
三、火烧油层注采参数设计	(62)

第四节 杜 66 北块火烧油层矿场实践·····	(63)
一、杜 66 北块简况及开发历史·····	(63)
二、杜 66 北块油藏描述及剩余油分布·····	(64)
三、杜 66 北块火烧油层方案设计·····	(83)
第四章 火烧油层区块筛选模式及效果预测新方法·····	(87)
第一节 稠油油藏火烧油层参数敏感性分析·····	(87)
一、物性影响因素分析·····	(87)
二、操作参数敏感性分析·····	(98)
三、筛选方法的建立·····	(104)
第二节 稠油油藏火烧油层筛选模式·····	(106)
一、辽河稠油油藏分类·····	(106)
二、辽河油区稠油开发历史·····	(110)
三、稠油区块火烧油层筛选模式·····	(114)
四、实例分析·····	(116)
第三节 火烧油层效果预测方法·····	(118)
一、基于 SVM 的火烧油层效果预测新方法·····	(118)
二、基于灰色理论的火烧油层动态预测·····	(125)
第五章 火烧油层采油工艺技术实践·····	(129)
第一节 油层点火工艺技术·····	(129)
一、油层点火影响因素分析·····	(130)
二、层内自燃点火方法·····	(130)
三、电点火方法·····	(138)
四、化学点火方法·····	(141)
第二节 工艺管柱及地面注采系统·····	(143)
一、单层注气管柱设计·····	(143)
二、分层注气管柱设计·····	(143)
三、生产井管柱设计·····	(144)
四、举升工艺设计·····	(145)
五、郑 408 地面注采设备配套·····	(146)
第三节 管火技术·····	(146)
一、火线推进影响因素分析·····	(146)
二、管火的原则·····	(149)
第四节 控火技术·····	(149)
一、控火要从方案着手·····	(150)
二、控火要从管火做起·····	(150)
三、侧重油层·····	(150)

四、控火要和火线监测、动态分析结合起来	(153)
五、控火的操作原则	(153)
第五节 QHSE 措施	(153)
一、重视安全生产和环境保护工作	(153)
二、火烧油层风险分析	(154)
三、火烧油层风险防范对策	(154)
第六节 辅助工艺措施	(156)
一、火烧调剖暂堵工艺技术	(156)
二、采油井降黏技术	(157)
三、油井防砂、固砂工艺技术	(158)
四、火烧油层防腐技术	(158)
第六章 火烧油层监测及效果评价技术	(160)
第一节 火烧油层监测技术	(160)
一、常规数据监测	(160)
二、燃烧前缘监测	(161)
三、杜 66 北块火烧油层监测方式优选	(181)
第二节 火烧油层采油效果评价	(185)
一、先导试验区井组火烧油层效果描述	(186)
二、火烧油层开发效果的单因素评价	(188)
三、火烧油层开发技术效果的综合评价	(191)
四、火驱采油效果经济评价	(197)
第七章 火烧油层筛选与评价软件系统	(207)
一、各模块的主要功能	(207)
二、软件操作介绍	(208)
附录 热力学参数计算和选取办法	(213)
参考文献	(219)

第一章 绪 论

目前世界稠油资源已探明地质储量 $3\,000 \times 10^8$ t 以上。稠油资源丰富的国家有加拿大、委内瑞拉、美国、前苏联、中国、印度尼西亚等,其稠油年产量高达 1.27×10^8 t。稠油将是 21 世纪的重要能源。过去稠油开发主要集中在美洲大陆,有的国家已有百年历史。近 20 年来我国的稠油开发业开始崛起,目前已探明稠油储量约 16.5×10^8 t,稠油年产量达 $1\,300 \times 10^4$ t,占全国原油产量的 8%。其中辽河油田是我国最大的稠油生产基地,其探明稠油储量 $10.544\,9 \times 10^8$ t,动用地质储量 $8.388\,4 \times 10^8$ t,2006 年稠油年产量 747×10^4 t,占辽河油田总产量的 61%。

稠油的开采、集输及加工技术与常规轻质原油有很大差别,因此稠油的分类直接关系到稠油油藏开采潜力的评价及开采方式的选择。多年来,国内外许多石油专家对稠油的分类标准进行了研究。1982 年 2 月,在第二届国际重油及沥青砂学术会议上对稠油提出了统一的定义和分类标准,主要内容为:

(1) 重质原油和沥青是存在于孔隙介质中的油或类似石油的液体或半固体。

(2) 这种油可以用黏度和密度来表示特性。

(3) 采用黏度对重质原油和沥青砂规定界限,当缺少黏度测定数据时,则采用重度值(API 度)。

(4) 重质原油是指在原始油藏温度下脱气后黏度为 $100 \sim 10\,000$ mPa·s 或者在 $15.6\,^{\circ}\text{C}$ ($60\,^{\circ}\text{F}$) 及标准大气压下密度为 $934 \sim 1\,000$ kg/m³ (API 度为 20°) 的原油。

(5) 沥青砂是指在原始油藏温度下脱气油黏度超过 $10\,000$ mPa·s 或者在 $15.6\,^{\circ}\text{C}$ ($60\,^{\circ}\text{F}$) 及标准大气压下密度大于 $1\,000$ kg/m³ (API 度为 20°) 的石油。

(6) 除上述以外的原油,分为中质原油及轻质原油。

(7) 重质原油及沥青砂主要由碳氢化合物组成。这类油一般只含少量具有高挥发性及易于蒸馏出的碳氢化合物,往往相对分子质量大的脂族烃及萘烷碳氢化合物含量高,沥青含量高,而且含有氧、氮及硫的化合物。有证据表明,在油藏中,当微生物侵入某些中质及轻质原油时,这些原油中的轻馏分便消失了。另外还认为,某些重质原油及沥青砂是由于含氧的地下水侵入油藏产生氧化反应而形成的。

(8) 重质原油及沥青砂在世界上分布广泛,埋藏深度最深达五千多米。在各种地质构造及地质年代的地层中,各种气候的陆上及近海地区都有重质油分布。

(9) 埋藏浅的沥青砂矿可以采用露天开矿技术开发,对埋藏深的重质原油及沥青砂矿藏,热力方法是主要的开采方法。

UNITA 推荐的重质原油及沥青分类标准见表 1-1。

表 1-1 UNITA 推荐的重质原油及沥青分类标准

分 类	第一指标	第二指标	
	黏度 ^① /(mPa·s)	密度(60 °F)/(kg·m ⁻³)	API 度(60 °F)/(°)
重质原油	10 ² ~10 ⁴	934~1 000	20~10
沥 青	>10 ⁴	>1 000	<10

注：① 指在油藏温度下的脱气油黏度，用油样测定或计算出。

由于我国稠油的沥青质及金属含量较低，胶质含量很高以及其他原因，稠油的黏度高，而相对密度较低。根据我国稠油的特点提出的稠油分类标准见表 1-2。

表 1-2 中国稠油分类标准

稠 油 分 类		主要指标	辅助指标	开采方式
名 称	类 别	黏度/(mPa·s)	密度(20 °C)/(g·cm ⁻³)	
普通稠油	I	50 ^① (或 100)~10 000	>0.920 0	可以先注水
	亚类	I-1	50 ^① ~150 ^①	可以先注水
		I-2	150 ^① ~10 000	热 采
特稠油	II	10 000~50 000	>0.950 0	热 采
超稠油	III	>50 000	>0.980 0	热 采

注：① 指油层条件下的黏度，其他指油层温度下的脱气油黏度。

一、稠油开采技术现状

目前，稠油开采技术基本包括以下几种：蒸汽吞吐，蒸汽驱，火烧油层，蒸汽辅助重力泄油(SAGD)，出砂冷采，露天采矿式开采。其他方法包括高频加热、电阻加热、微生物提高采收率及溶剂萃取等。

1. 蒸汽吞吐技术(Cyclic Steam Stimulation, Steam Huff and Puff)

蒸汽吞吐技术(见图 1-1)开采机理相对简单，主要是加热近井地带原油，使之黏度降低，当生产压力下降时，为地层束缚水和蒸汽的闪蒸提供气体驱动力。

蒸汽吞吐技术是在同一口井中注蒸汽和采油，所以又叫做单井吞吐采油，在单井吞吐采油的每一个吞吐周期中包括注汽、焖井和生产三个阶段。

1) 注汽阶段

在注汽阶段，由锅炉产生的高温高压蒸汽经地面管线由井口沿井筒注入油层。在这一阶段主要控制注汽量、注汽速度、注汽压力和蒸汽干度四个参数。

注汽量是指注入油层蒸汽的总量。注汽速度是指单位时间内注入油层的蒸汽量，它的高低直接影响着热能的利用率。注汽速度高有利于减少井筒的热损失和漏失到非目标层的热能。在注入相同量的蒸汽时，高速注汽与低速注汽相比对油层加热的范围较大，但是注汽速度高需要较高的注入压力，当注入压力超过某一极限值(油层的破裂压力)时，可能会压裂油层，对油层有破坏作用，还会引起汽窜和油井出砂等问题，所以

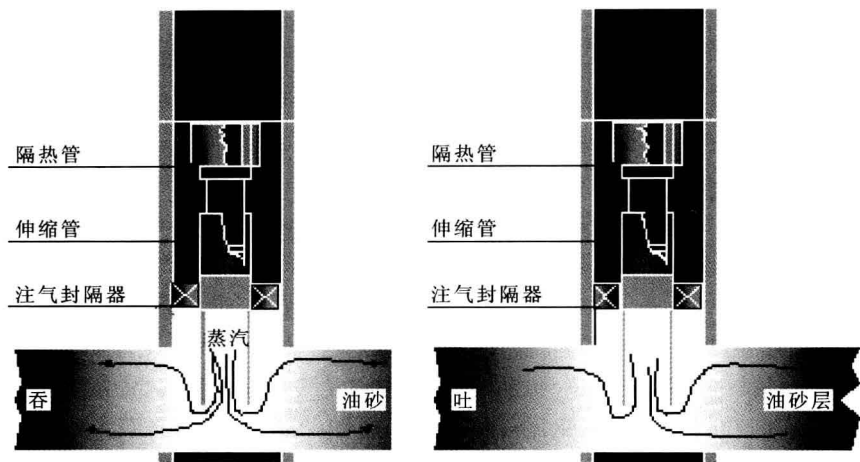


图 1-1 蒸汽吞吐技术示意图

要综合考虑各种情况,确定合适的注汽速度。蒸汽干度是衡量蒸汽含热量的指标,蒸汽干度越高,单位蒸汽量的含热量就越多。

2) 焖井阶段

焖井是指注蒸汽后停注关井,使蒸汽与油层岩石和流体进行热交换的过程。为了提高蒸汽热能的效率,必须进行焖井。焖井时间长短也是影响蒸汽吞吐效果的一个重要因素。若焖井时间过长,则热能传递到非目的层或向油层纵深传热过多,井底附近油层温度下降太大,原油的黏度会升高;焖井时间过短,则热量没有得到充分的交换,使得蒸汽热能作用半径小。两种情况均会影响吞吐周期的产量。

合理的焖井时间由现场实际来确定,一般在 1~14 天。对于注汽量不大、蒸汽扩散快、注入压力相对低的油井,焖井时间可适当缩短;对于注汽量大、注入压力高的低渗透油层,焖井时间也可适当延长。

3) 生产阶段

焖井结束后,开井进行生产,生产方式多种多样,采用何种方式主要以最大限度地利用热能和提高吞吐周期的产油量为目标。

蒸汽吞吐油井在一个吞吐周期的采油过程中不再向油层提供热能,所以一般在开井初期产量较高,随着生产时间的持续,油层温度逐渐降低,原油黏度回升,油井产量也随之下降。另一方面,对同一口油井,不同的吞吐周期内产量也不一样。一般在前两个周期产量较高,这是因为此时油藏中含油饱和度和油层压力高的缘故,随着吞吐周期次数的增加,产量逐渐递减,且每一周期的有效生产时间也相应缩短。

油井注汽焖井后,有大量蒸汽集中于近井地带,随着热量的传递,蒸汽温度下降冷凝成热水,所以油井含水变化很大。在同一吞吐周期,随着生产时间的持续,含水率呈下降趋势。在不同的吞吐周期,生产时间相同的情况下,越往后含水率越高,这是因为周期注汽量随着周期次数的增加而增大,油层含水饱和度逐渐上升,而含油饱和度则逐

渐下降。

蒸汽吞吐技术投资少,见效快,适应性强,尤其对于油层厚度较大、边底水体积较小的中深层稠油油藏蒸汽吞吐可获得较好的开发效果,它也是我国现阶段稠油开发的主要开采方式,其采油速度可达 $2\%\sim 8\%$ 。蒸汽吞吐产量占稠油总产量的 85% 左右,但它的采收率相对较低,一般不超过 30% 。

2. 蒸汽驱技术(Steam Flooding)

蒸汽驱技术是指由注入井连续向油层注入高温湿蒸汽,在注入井周围形成蒸汽带,注入的蒸汽将地下原油加热并驱替到周围生产井后产出,是注热流体中广泛使用的一种方法。

蒸汽驱是按一定的注采井网,从注入井注入蒸汽将原油驱替到生产井的热力开采方法。与蒸汽吞吐相比,蒸汽驱需要经过较长时间才能见到效果,费用回收期较长。

在蒸汽驱生产过程中,从注蒸汽到蒸汽突破油井,最后淹没油井,一般经历以下三个阶段。

1) 注汽初始阶段

油层注入蒸汽后,大量的蒸汽热能被注入井井底附近的油层吸收,逐步提高油层的温度,油层压力稳定地回升。由于热能还没有传递到生产井附近,生产井周围的油流阻力仍然很大,油井产油量低。

2) 注汽见效阶段

随着累积注汽量的增加,油层能量和热量得到了很好的补充,大量蒸汽热能已传递到生产井周围,使原油的流动能力得到提高,原油产量上升,注汽见效,生产井进入高产阶段。在此阶段,如果是均质油层,则应增大生产压差以提高产油量和蒸汽驱效益;对于非均质严重的油藏,当产油量突然上升很快时,意味着蒸汽将突破油井,应予以高度重视,以防蒸汽过早进入油井造成汽窜。

3) 蒸汽突破阶段(汽窜阶段)

随着开采时间的延长,油层中的原油逐步被驱替出来,蒸汽和热水在油层中向生产井推进,到一定时间蒸汽驱前缘突破油井,蒸汽和热水进入油井随同原油一起被采出来。在此阶段,由于蒸汽突破油井后油气流动阻力迅速下降,蒸汽注入压力急剧下降,且蒸汽的流动能力远超过原油的流动能力,使得产油量下降,油气比降低,含水率迅速升高。

目前蒸汽驱技术(见图 1-2)已成为世界范围内开采稠油的最主要技术之一。国外采用蒸汽驱大规模开发的两个主要稠油油田是美国的克恩河油田和印度尼西亚的杜里油田。克恩河油田蒸汽驱平均油气比达 0.32 ,采收率达到 62.4% ,杜里油田预测最终采收率可达 55% ,这说明蒸汽驱技术已趋于成熟,并广泛用于稠油开发。我国稠油开采主要依靠蒸汽吞吐,蒸汽驱产量仅占 5% 左右,除新疆九区浅层开展规模性汽驱获得较好效果外,中深层稠油油藏的蒸汽驱开采仍处于室内研究和现场试验阶段。

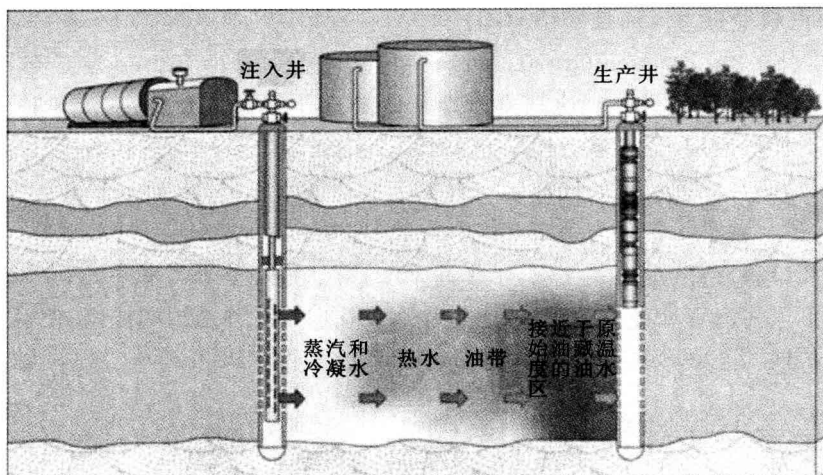


图 1-2 蒸汽驱技术示意图

3. 火烧油层技术(In-Situ Combustion)

火烧油层技术是最早用来提高采收率的方法之一,是一种注空气采油的方法。把空气注入油藏后,同时发生两种现象——驱油和油的氧化。根据驱替效率和氧化强度可以把注空气法分为四种类型:① 高温氧化非混相空气驱(HTO-IAF);② 低温氧化非混相空气驱(LTO-IAF);③ 高温氧化混相空气驱(HTO-MAF);④ 低温氧化混相空气驱(LTO-MAF)。高温氧化非混相空气驱就是通常所说的火烧油层(ISC)法。

注蒸汽热力采油技术由外部热源向油层提供热量,而火烧油层则是在油层中燃烧部分原油来产生热量,这一特点决定了该技术的适用范围大于注蒸汽热力采油方法。这一技术的细节将在后续章节中讲述。

火烧油层技术(见图 1-3)室内实验效果良好,但由于工艺复杂,现场试验时遇到严重窜通、腐蚀、砂堵、乳化等问题。一般火烧油层是在蒸汽驱不适用的情况下才使用,更适用于具有中等密度原油的薄层或深层油藏,目前已成为蒸汽吞吐后稠油油藏开发的重要接替技术之一。

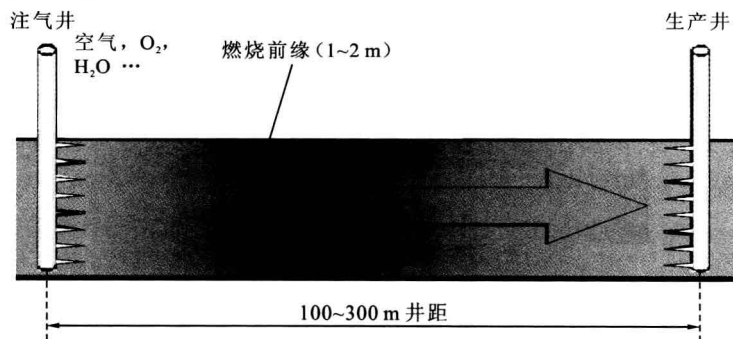


图 1-3 火烧油层技术示意图

4. 蒸汽辅助重力泄油技术(SAGD)

SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)概念首先是由 Bulter 博士于 1978 年提出的。SAGD 技术(见图 1-4)的基本原理是以蒸汽作为加热介质,在流体热对流及热传导作用下加热油层,依靠重力作用开采稠油。它可以有不同的应用方式:一种是平行水平井方式,即在靠近油藏的底部钻一对上下平行的水平井,上面水平井注汽,下面水平井采油;另一种是水平井与垂直井组合方式,即在油藏底部钻一口水平井,在其上方钻一口或几口垂直井,垂直井注汽,水平井采油;第三种是单管水平井 SAGD,即在同一水平井内下入注汽管柱和抽油管柱,通过注汽管柱向水平井最顶端注汽,使蒸汽腔沿水平井逆向扩展。通常 SAGD 可以获得超过 50% 的采收率和 0.25~0.40 的油汽比。

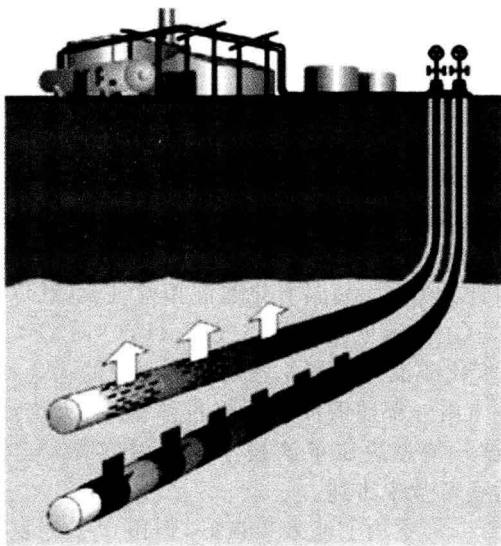


图 1-4 SAGD 技术示意图

5. 稠油出砂冷采技术

以前大部分稠油是用热采方法采出的。到了 1986 年,为了降低采油成本,提高稠油开采经济效益,当时加拿大的一些小石油公司率先开展了稠油出砂冷采的探索性矿场试验。其主要做法是不注蒸汽,也不采取防砂措施,射孔后直接用螺杆泵进行开采。矿场试验取得了令人意想不到的效果,于是出砂冷采的概念就在这种情况下建立起来了。到了 20 世纪 90 年代中期,稠油出砂冷采已成为热点,除了众多中小石油公司外,一些大石油公司也纷纷涉足这一领域。在国际上,尤其是在加拿大,有关研究机构竞相开展相应的理论研究,提出了冷采高产的主要机理是地层中蚯蚓洞和泡沫油。1995 年以来的有关石油开发的大型会议均将稠油出砂冷采作为重要的交流内容。

稠油出砂冷采技术(见图 1-5)不需要向油层注入热量,属于一次采油范畴,允许油藏出砂、井筒携砂采油,大幅度提高了稠油常规产量。从室内实验、矿场试验及应用成

果来看,稠油出砂冷采的增产机理主要有四方面:① 大量出砂形成“蚯蚓洞”网络,极大地提高了稠油流动能力;② 稠油以泡沫油形式产出,减少了流动阻力;③ 溶解气膨胀,提供了驱动能量;④ 远距离的边、底水存在,提供了补充能量。

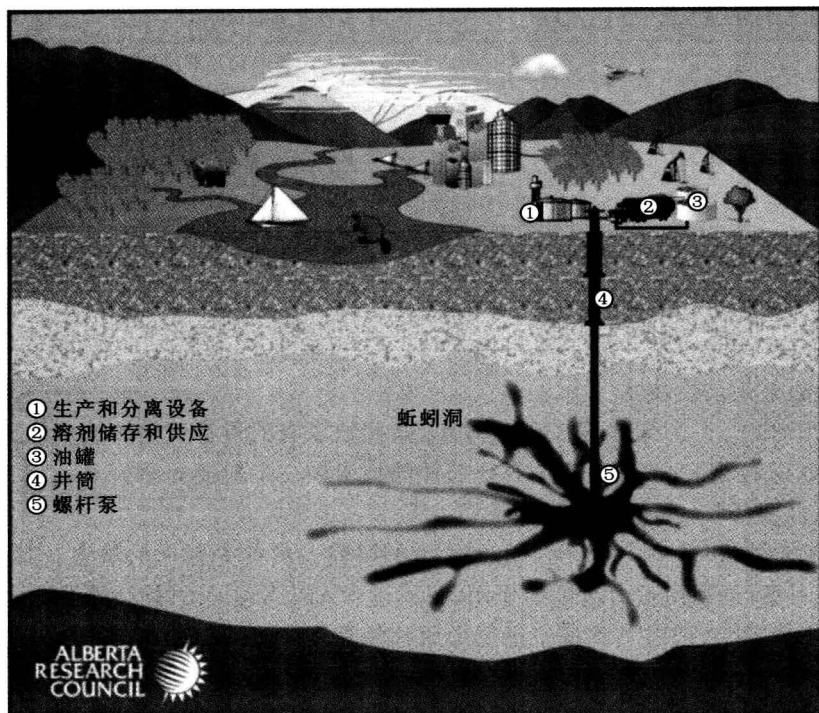


图 1-5 稠油出砂冷采示意图

经过多年的发展,稠油出砂冷采已显示出良好的经济性。加拿大、委内瑞拉有许多采用常规降压开采方式无法出油的稠油油藏,采用出砂冷采技术后采油成本大大低于蒸汽吞吐及其他开采方式。稠油出砂冷采技术已由摸索、试验阶段转入工业化推广应用阶段。

我国在河南、新疆、华北、辽河、吉林等油田开展了稠油油藏出砂冷采矿场试验,取得了卓有成效的研究成果和良好的矿场试验效果,填补了国内在该技术领域里的空白,其中新疆、吉林油田获得了明显的增产效果。

6. 露天采矿式开采

露天采矿式开采方法适用于浅层沥青砂露天开采和处理具有经济吸引力的油藏。目前世界上仅有的两处工业规模的露天采矿厂均位于加拿大艾伯塔省阿萨巴斯卡沥青砂矿区。

表 1-3 列举了目前世界上不同稠油开采方式的应用情况。

表 1-3 目前世界上不同稠油开采方式的应用情况

应用技术	应用油田	实施效果
蒸汽驱	美国的科恩河油田	采收率大于 50%
	印度尼西亚的杜尔油田	采收率达 50%
SAGD	加拿大的 Tangle flags 油田	有七个商业化开采油田,日产超过 2 万吨,年产千万吨,采收率超过 50%,高达 70%
火烧油层	加拿大的狼湖油田	是世界上大规模蒸汽吞吐转火烧油层的工业试验区,预计采收率在 60%以上
	罗马尼亚的 Suplacu de Barceau 油田	采收率大于 55%
	美国的 Midway Sunset 油田	空气油比为 1 500~2 000 Nm ³ /t
出砂冷采	加拿大,委内瑞拉	操作费用为 3.0~4.6 美元/桶,采收率小于 20%
露天开采	加拿大的阿萨巴斯卡	后期油砂处理成本高

7. 稠油开采前沿技术

近年来出现了一些新的稠油开发技术,这些技术有的得益于钻井技术的进步,有的得益于新概念的引入,这里对几项有代表性的技术做一下简要介绍。

1) 超临界萃取技术(VAPEX)

VAPEX 是 20 世纪 70 年代末由加拿大的研究人员首先提出的概念。其开采机理同 SAGD 一样,是利用重力泄油的作用,只不过 VAPEX 注入的是烃类溶剂,注入井在生产井之上,所注入的溶剂降低了地层中原油的黏度,于是在重力作用下稀释的原油获得流动能力,流入下部的水平生产井,被泵送至地面。而在注入井周围的空隙里,由于原油已经被稀释排出,所以充满了汽化的溶剂,形成了汽腔,随着生产的继续,越来越多的原油被采出,汽腔会慢慢向上扩展。VAPEX 技术的优缺点见表 1-4。

表 1-4 VAPEX 技术的优缺点

VAPEX 的优点	VAPEX 的缺点
无须产生蒸汽	溶剂的压缩问题
无须进行水处理/水循环利用	溶剂的损失
低燃料消耗	油藏的非均质性可能对其有不利影响
降低二氧化碳的排放	油井和设备的设计尚未经验证
或许可应用于薄油层或底水油藏	
可进行现场改质	

目前该技术正处于现场试验和研究阶段,加拿大正在三种不同类型的油藏中进行 VAPEX 的先导试验。该项技术应用成功的关键除了精细的油藏描述外,还要研究所注入溶剂与原油的配伍性,以提高溶剂在油层中的扩散程度。在目前的研究水平下,尚未对 VAPEX 的适用条件有明确的结论,根据室内实验和油藏模拟,认为 VAPEX 适用于水平和垂向渗透率较高的油藏,而对油藏的深度、油藏是否有气顶或底水没有特别的

界定,但对于原油性质,包括黏度以及与溶剂的配伍性,都需要进行着重研究与试验才可以确定。

2) THAI 技术

THAI(Toe to Heel Air Injection)技术(见图 1-6)是将一口垂直空气注入井与一口水平生产井组合在一起,在生产过程中会产生一个垂直的燃烧前缘,通过燃烧油层中的部分原油产生热量来降低原油黏度,使原油具有一定的流动性,原油通过重力泄油作用流入水平生产井。

理论上该方法的最终采收率可达到 80% 左右,而且它适用于薄油层开发,也可作为蒸汽吞吐后的接替技术。但从现场操作上来看,该项技术具有相当的难度,因此应用前必须进行充分的风险评估。加拿大在 2006 年进行了 THAI 技术的先导试验。

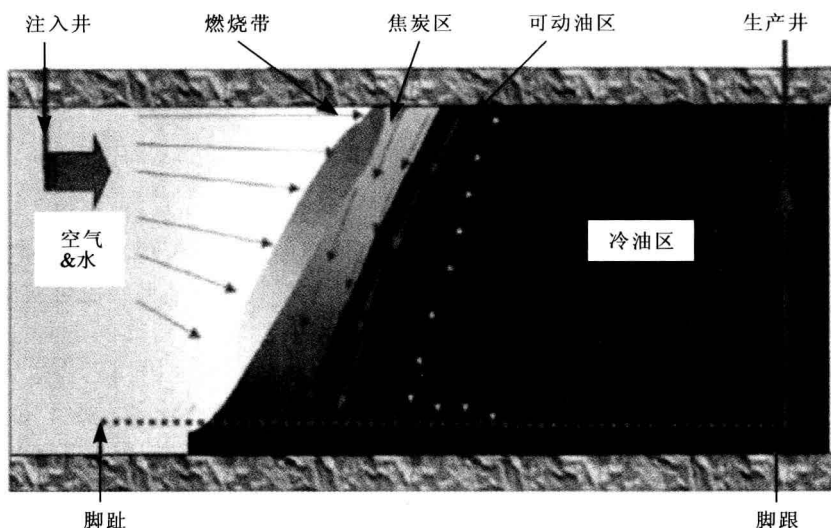


图 1-6 THAI 技术示意图

3) 稠油水热裂解技术

人们通常认为,注蒸汽开采稠油主要是利用蒸汽的潜热来加热油层,使稠油的流动性增强,从而使之易于采出,主要是发生了物理作用。而实际上,在蒸汽与稠油油藏发生物理作用的同时,高温的水或蒸汽还能与稠油在油层条件下发生化学作用。20 世纪 80 年代初,Hyne、Viloria 等人采用溶液热力分解作用描述了在 200~300 °C 温度范围内稠油与水、蒸汽之间发生的一系列化学反应,这些反应包括酸聚合反应、有机硫化物裂解、水煤气转变反应及加氢脱硫反应等。Hyne 等人把稠油与水或蒸汽及砂之间的这一系列化学作用称之为“水热裂解反应”。

在国内,郑焰等人也提出了油层催化裂化开采稠油的思路,但没有关于深入研究的报道。刘永建、范洪富等人采用辽河杜 84、杜 32 等区块特、超稠油油样进行了水热裂解实验研究。实验结果表明,辽河低硫稠油能够发生水热裂解反应,反应特征与 Hyne 等人的研究结果基本一致,反应活性与委内瑞拉稠油相当。稠油在蒸汽作用下有大量

的 N_2 、 CO_2 、 CH_4 及少量的 C_2H_4 、 C_3H_6 等烯烃产生,这也说明了稠油发生了水热裂解反应。含硫或低硫的齐 108 稠油可以发生水热裂解反应。他们还对反应的特征及添加剂进行了研究,发现添加某些金属盐类及其他化学助剂可以明显促进稠油的热裂解反应,使稠油黏度大大降低,品质得以改善。他们在世界上首先开展了水热裂解现场应用实验,取得了很好的降黏和增产效果。

国外发表了许多与稠油的轻质化相关的文章和专利。例如,1988 年 Patel 等人发表了用热水($340\text{ }^\circ\text{C}$)处理稠油以产生轻质油的专利;1989 年 Gregoli 等人发表了用超临界水处理原油、油砂和沥青以产生轻质油的专利;2000 年 Cordova 发表了利用油溶性催化剂提高稠油品位的专利。这些专利为我们研制水热裂解催化剂提供了理论依据。

刘永建等人先后考察了铝、铬、钒、锰、铁、钴、镍和铜等金属离子对辽河稠油水热裂解的催化作用。在一个典型的实验中,选用 0.01 mol/L 的二价铁离子作为催化剂,可使辽河稠油在 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下黏度降低 75% ($80\text{ }^\circ\text{C}$) 左右,沥青质含量降低 7% 以上,总组成和硫含量变化情况与 Hyne 等人的研究结果相似。

4) 水平井技术

利用水平井技术开采稠油是稠油开发技术发展(见表 1-5)的一种趋势。一方面是因为在当今的技术发展方向中越来越注重将重力泄油的机理充分应用于各种稠油开采方式中。另一方面是因为在水平井应用上有以下几点好处:① 水平井段可接触到更大面积的油层;② 对于水平井注蒸汽开采,水平井段可以控制蒸汽运移的走向,避免蒸汽超覆;③ 应用水平井开采薄油层的优势显而易见。目前,世界范围内已经进入商业化应用或正在试验的水平井开采技术包括水平井冷采、水平井水驱、多分支井冷采、SAGD、VAPEX、水平井蒸汽吞吐、THAI,等等。其中 SAGD、VAPEX、THAI 都是利用了重力泄油的机理。

表 1-5 稠油开发技术的发展

类 型	热采方式	冷采方式
1985 年以前商业化应用的稠油开发技术		
水 平 井	—	—
直 井	蒸汽吞吐 蒸 汽 驱	—
目前已商业化应用或正在现场试验或室内研究的稠油开发技术		
水 平 井	SAGD 水平井蒸汽吞吐 THAI	冷 采 水 驱 VAPEX 惰性气体注入
直 井	蒸汽吞吐 蒸 汽 驱	出砂冷采 压力脉冲

水平井技术的发展归功于水平井钻井、完井、修井技术的不断发展,人工举升技术