蒸气萃取开采稠油技术

刘喜林　赵政超　刘德铸　等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书作者结合辽河油田的具体情况,筛选了萃取剂,开展了蒸气萃取开采稠油物理模拟研究和数值模拟研究,内容包括:萃取剂吞吐采油机理;不同含水饱和度、不同注入参数条件下萃取剂吞吐的采油效果;地层非均质性及油井类型对萃取剂吞吐采油效果的影响;萃取剂吞吐数值模拟等。为今后进一步开展蒸气萃取采油技术提供了科学理论依据。

本书可供从事油田开发、油藏管理、三次采油工作的技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

蒸气萃取开采稠油技术/刘喜林等编著.
北京:石油工业出版社,2002.9
ISBN 7-5021-3917-6

Ⅰ.蒸…
Ⅱ.刘…
Ⅲ.稠油开采-注蒸汽-技术
Ⅳ.TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 065113 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京乘设伟业科技排版中心排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
*
850×1168 毫米 32 开本 4 印张 105 千字 印 1—1000
2002 年 9 月北京第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3917-6/TE·2829
定价:14.80 元

前　言

蒸气萃取技术(VAPEX)是近十几年来国内外开展研究的采油技术之一。在2000～2001年室内研究的基础上,结合国内外该技术的研究进展,编写了这本《蒸气萃取开采稠油技术》,书中主要包括一些基本概念、基本原理、国内外研究状况、采用的研究方法、物理模拟、数值模拟研究等内容,通过这些研究内容,来加深大家对该技术的认识。

由于蒸气萃取技术在国内外未见到有关矿场应用的介绍,这两年的研究是在有限的国内外技术资料及现有的室内实验条件下进行的,还不够系统、全面,且由于目前国内稠油开采技术真正能在矿场应用的不多,因此将本书奉献给大家,一方面给大家提供一些可供参考的内容;另一方面也希望各位读者提出宝贵意见,以利于对该项技术进行更深入、细致、全面的研究。

全书由刘喜林、赵政超、刘德铸、檀德库、马达波、马昌明等编著,上篇由刘喜林、赵政超、马达波、马昌明、刘新会、尚根华、宋辉、黄立信、郑德温、刘富海、刘建山、岳玉堂执笔;下篇由刘德铸、檀德库、马达波、马昌明、刘丽、郝英敏、徐艳芝、秦艳红、马德胜、蒋有伟、王俊执笔。

参加研究工作的单位是中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司钻采工艺研究院、中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所。

本书不当之处,敬请批评指正。

作者

2002年1月

目　　录

绪论…… (1)

上篇　萃取剂吞吐物理模拟研究

第一章　基本概念及基本原理…… (5)
　第一节　基本概念…… (5)
　第二节　蒸气萃取开采稠油技术基本原理…… (5)
第二章　国外技术现状及研究方向…… (7)
　第一节　国外实验方法…… (7)
　第二节　国外开展的研究工作内容…… (8)
第三章　辽河油田重点稠油区块的地质分析 …… (10)
　第一节　辽河油田地质概况及开发现状 …… (10)
　第二节　适合 LPG 采油的稠油区块…… (12)
第四章　萃取剂及原油组分分析 …… (16)
　第一节　萃取剂的筛选 …… (16)
　第二节　原油分析 …… (17)
　第三节　萃取前后原油中胶质、沥青质含量分析…… (20)
第五章　萃取剂相变过程与微观渗流机理 …… (21)
　第一节　LPG 相变过程 …… (21)
　第二节　LPG 吞吐采油微观机理 …… (26)
第六章　萃取剂吞吐模拟实验研究 …… (35)
　第一节　实验装置 …… (35)
　第二节　实验步骤 …… (36)
　第三节　辽河油田不同原油吞吐实验 …… (37)
　第四节　结果分析 …… (44)
第七章　含水饱和度对萃取效果的影响 …… (51)

第一节　蒸汽吞吐建立含水饱和度 …… (52)
第二节　注入速度对萃取效果的影响 …… (53)
第三节　注入量对萃取效果的影响 …… (55)
第四节　闷井时间对萃取效果的影响 …… (57)
第五节　含水饱和度对萃取效果的影响 …… (59)
第六节　小结 …… (60)
第八章　萃取剂 + 蒸汽吞吐采油效果研究 …… (62)
第一节　核磁共振实验原理 …… (63)
第二节　不同 LPG/ 蒸汽注入比对蒸汽吞吐效果的影响
…… (66)
第三节　萃取剂 + 蒸汽吞吐后剩余油分布研究 …… (68)
第九章　不同韵律地层对萃取效果的影响 …… (72)
第一节　实验模型 …… (72)
第二节　实验流程 …… (73)
第三节　实验过程 …… (74)
第四节　不同韵律地层对萃取效果的影响 …… (74)
第十章　油井类型对萃取效果的影响 …… (79)
第一节　实验模型及过程 …… (80)
第二节　实验结果 …… (80)

下篇　萃取剂吞吐数值模拟研究

第十一章　概述 …… (87)
第十二章　油藏基本条件及试验区块的选择 …… (88)
第一节　油藏基本条件 …… (88)
第二节　试验区块的选择 …… (93)
第十三章　地质模型的建立及历史拟合 …… (94)
第一节　地质模型的建立 …… (94)
第二节　历史拟合 …… (96)
第十四章　萃取剂吞吐数值模拟…… (101)

第一节　萃取剂吞吐机理数值模拟研究…… (101)
第二节　萃取剂吞吐注采参数优化研究…… (105)
第三节　萃取剂吞吐效果预测…… (112)
第十五章　萃取剂吞吐经济指标评价…… (115)
第一节　萃取剂吞吐生产指标预测…… (115)
第二节　萃取剂吞吐经济指标评价分析…… (116)
附录　套管容积计算表…… (118)
参考文献…… (119)

绪　　论

目前稠油开采的主要工艺技术是蒸汽吞吐和蒸汽驱技术。蒸汽吞吐技术是一种相对简单和成熟的注蒸汽开采技术,目前在委内瑞拉、美国和加拿大以及国内稠油开采中被广泛应用,但以蒸汽吞吐为主的热力采油技术经过多轮次蒸汽吞吐后,采油效果变差,急需寻找相应的接替技术,以便进一步地提高稠油、超稠油的采出程度。

近年来,蒸汽吞吐技术的发展主要是应用各种助剂,如蒸汽中加入表面活性剂(即高温泡沫剂)、天然气以及溶剂来改善吞吐效果。注入泡沫剂能够调整蒸汽的吸汽剖面;注入天然气可以降低原油粘度,增加油层的加热体积,在回采过程中更好地发挥气驱作用,提高注入水的回采率;注入溶剂的目的主要是针对超稠油油藏,起到溶解降粘作用。以上措施都可以增加稠油的周期产量及气油比。20 世纪 90 年代以来这些方法在很多油田得到了大规模的推广应用,使得蒸汽吞吐井的动用程度明显提高,吞吐开采生产周期延长,吞吐采收率由单一蒸汽吞吐的 15%提高到 20%以上。

蒸气萃取技术(VAPEX)用于稠油吞吐是最近十年提出来的一种新的改善稠油开采效果的新技术,LPG(液化石油气)辅助蒸汽吞吐除了能起到增加地层能量,回采时发挥气体助排作用外,它的另一个作用,也是在吞吐中最重要的作用就是 LPG 作为一种轻烃类气体,在适当的温度、压力条件下,它能够和原油达到拟混相甚至超临界状态,大大降低原油粘度,增加蒸汽吞吐效果;由于 LPG 的露点压力较小,一般在 0 .9MPa 左右,在较低的压力下它就可以液化,对地层能量虽然增加不多,但它和原油有着很好的混溶能力,注入后很容易和地下原油混溶;由于它的泡点压力也不高,大约在3 .0MPa 以下,因此在 LPG 降压回采时,LPG 很容易从原油中分离出来,起到溶解气驱的作用。

超临界萃取技术作为一种比较成熟的技术早已用于食品、药品工业,但超临界技术作为一种全新的工艺技术用于稠油萃取开采原油的研究还刚刚开始,技术上还存在一些问题。加拿大 Calgary 大学进行了大量的实验研究,他们主要以乙烷、丙烷以及丁烷为萃取剂,并进行了矿场试验研究,取得了较好效果;Edmonton 国家石油研究院多年来一直在进行稠油油砂超临界萃取实验,萃取效果非常好;国内在这方面的研究也做了不少,中国科学院化学研究所在“八五”期间曾用丙烷进行超临界萃取稠油的室内实验研究,并对丙烷与原油混合后的粘度和密度变化进行了研究,但没有进行现场试验。

辽河油田作为国内最大的稠油油田,蒸汽吞吐、蒸汽驱以及辅助蒸汽驱提高稠油开采技术在国内一直处于领先地位,这些技术对辽河油田的增产、稳产发挥了巨大的作用,但随着生产的不断进行,采出程度不断提高,层间矛盾日益突出,以蒸汽吞吐为主的热力采油技术已越来越不能满足生产的需要,蒸汽的回采率下降很快,导致蒸汽吞吐的效果越来越差,目前急需寻找相应的接替技术,以便大幅度地提高稠油、超稠油的采出程度。辽河油田的科研工作者通过对国内外的新技术进行了大量的调研,根据油田自身的特点,适时提出了采用超临界流体技术,用 LPG 作为萃取剂开采稠油研究。

经过 2000 年和 2001 年两年的室内研究,对蒸气萃取开采稠油技术获得了一点初步的认识,为该项技术的进一步研究、探索提供了一些基础内容。

上　　篇

萃取剂吞吐物理模拟研究

第一章　基本概念及基本原理

第一节　基本概念

萃取:利用不同物质在选定溶剂中溶解度的不同以分离混合物中各组分的方法。用溶剂分离液体混合物中的组分称液液萃取,又称溶剂萃取,习惯上萃取仅指液液萃取。

萃取剂:萃取所用的溶剂,要求对液体或固体混合物中的组分具有选择性的溶解能力。

萃取率:被萃取物质在有机相中的总量与被萃取物质在两相中的总量之比,常以 $E\%$ 表示。

$$E\% = D/(D + V_{水}/V_{有}) \times 100\%$$

式中　D——分配比;

$V_{水}$——水相体积;

$V_{有}$——有机相体积。

蒸气萃取是在油藏条件下,利用液态溶剂或超临界流体对原油中油组分有较大的溶解度,而对胶质、沥青质几乎不溶的特性,在油藏中发生萃取过程,使原油分为被抽提油液相和重质油沉积相,由于重力作用和密度的差异,使一部分油被采出。

第二节　蒸气萃取开采稠油技术基本原理

蒸气萃取开采稠油技术基本原理是:将气化的萃取剂注入稠油油藏中,在合适的温度和压力条件下,它能溶解到原油中,在原油中扩散,稀释原油,降低原油粘度,促进原油流动,从而提高稠油采收率。

该工艺技术具有以下优点:

(1)该技术是一项可以对热力采油技术加以补充,甚至是全面替代的新工艺。由于该工艺属于非热力采油技术,可以极大地节约能源,同时省去了水处理环节,节省水资源,避免了环境污染。

(2)该技术对薄层、有底水或含水饱和度高、有垂直裂缝、孔隙度低和导热性差的稠油油藏有着独特的优势,可大大提高油藏的采收率。

(3)该技术在采油过程中使用的萃取溶剂,可以循环使用,并可以在开采终止阶段基本全部回收,节约了开采成本。

(4)由于在油藏内发生脱沥青,这将大大改善采出油的品质,使其粘度和重金属的含量大幅度降低,这为采出油的地面集输及炼制提供了便利。

(5)该工艺过程中沉积的沥青是否堵塞油藏,影响原油的流动是一个令人担忧的问题,但是 Das 及 Butler 所作的赫尔—肖氏试验给出了沥青的沉淀不会影响原油在油藏中流动的结论。试验表明:丙烷气溶解在界面处的沥青中,并通过界面扩散,当丙烷浓度超过一定值时,沥青开始沉淀,脱沥青的稀释油向下泄出,当界面扩散时,丙烷气跑到沉积层后面,并与新沥青相接触。该过程就这样继续下去。因此脱沥青作用不会阻止原油从油层中流出,相反,由于降低了粘度,提高了流速,产量可提高 30%～50%。

(6)该技术可以灵活地采用多种注采系统加以应用,如单水平井吞吐,成对水平井注采,单直井、多直井注采,直井与水平井注采等。这为现存的开采效果不佳的水平井及直井提供了转换开采方式,同时也最大限度地节省了钻井的费用。

第二章　国外技术现状及研究方向

蒸气萃取(VAPEX)工艺技术是由加拿大石油专家 Butler 等人首先提出,并开展室内研究。该工艺与蒸汽辅助重力泄油(SAGD)工艺密切相关。

随着常规油藏的逐渐枯竭,世界石油工业的一个主要目标是放在开发稠油储量上。据介绍,加拿大稠油的原始石油地质储量(OOIP)是 $4000\times10^8\ m^3$ (27000×10^8 bbl),这相当于所有海湾国家全部的常规原油储量。大多数情况下,稠油粘度很高,很多油藏中,如加拿大 Athabasca 油藏,原油粘度在地层条件下为几百万毫帕秒,中国辽河油田的杜 32 块、杜 84 块,原油粘度也达到几十万毫帕秒。常规开采工艺只能采出其储量的 5%～6%,由于流度比差,驱扫工艺不能明显地提高采收率,然而,稠油粘度随温度发生变化,温度增加,粘度明显下降,这就是稠油热采工艺的基本原理,但在热采工艺中,上覆层和下伏层都将导致巨大的热损失。

第一节　国外实验方法

一、线源赫尔—肖氏容器

该容器由成对玻璃板构成,两板间距由一块理想厚度的铜隔片固定,在该容器中,三面用环氧胶密封,垂直一侧敞开,玻璃板的规格是 10cm×9cm,金属隔片中的空间为 8cm×8cm,除另有要求外,大多实验用的隔板的厚度为 254mm,这些带有隔板的玻璃板用环氧树脂粘在一起,三面密封,牢固地固定在铝框架中,容器敞开面对应一侧一角上有一个注油孔,油经该孔注入,靠重力作用流到敞开面一侧。

二、实验装置

图 2—1 是利用赫尔—肖氏容器进行的实验装置图，后面又利用二维、三维比例模型进行了实验。

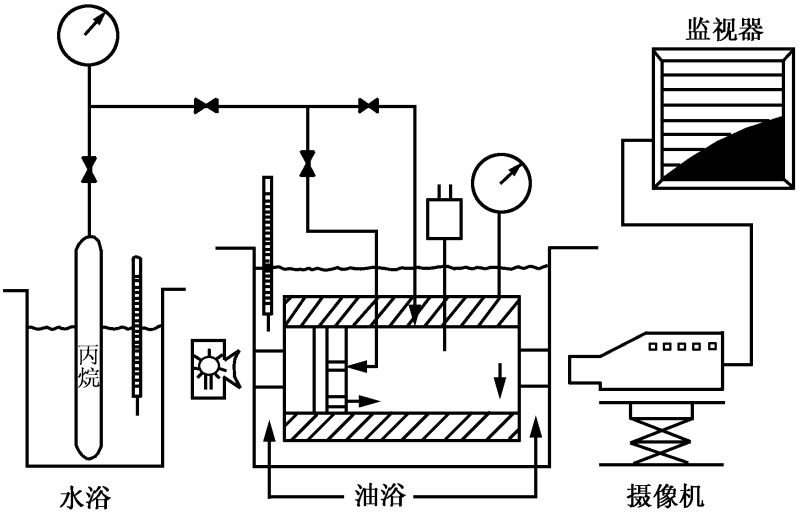


图 2—1　实验装置

第二节　国外开展的研究工作内容

一、利用赫尔—肖氏容器研究沥青沉积对 VAPEX 工艺的影响

以丙烷作为萃取溶剂，丙烷蒸气溶解在界面处的稠油中，并扩散，当丙烷浓度超过一定值时，沥青开始析出，并以薄夹层的形式附在玻璃板上，脱沥青的原油向下排泄，随着界面的移动，丙烷蒸气运动到沉积层后面，与新的稠油接触，该过程周期性地进行。

Dubey 和 Wazman 观察到，石英砂和粘土可能通过氢键吸收沥青，因此，在油层中，沉积的沥青会仍吸附在油层基岩上，如果用一对水平井进行注入和生产，油通过重力泄油，原油流动形式将与赫尔—肖氏容器中观察到的相似。由于沥青沉积在砂粒上，可能会出现润湿反转，又由于油层的一部分已排泄过，所以润湿反转在沥青将要沉积的界面新位置处发生的流体流动或脱沥青过程将不

会产生严重影响,因为脱出的沥青仅占孔隙空间的 20% 以下,丙烷会旁流,接触新的稠油,这样,脱出的沥青不会阻止原油流动。

二、物理大比例模型研究

使用大的 2D 比例模型进行 VAPEX 工艺实验,模型内部体积为 21 .7cm×69 .8cm×3 .45cm。

经丙烷萃取后的劳埃德明斯特和冷湖稠油粘度分别降低 50 和 300 倍。

脱沥青后的冷湖原油中钒、镍和铁的含量从 270 μg/ g 降至 10 μg/ g。

三、底水对萃取效果的影响

溶剂蒸气注入含底水油藏,含水层促进大面积连续上升溶剂室的形成,这样可以为溶剂蒸气和原油的扩散混合提供很大的面积,从而可以加速采油,提高最终采收率。

四、不同溶剂蒸气注入

利用乙烷、丁烷做溶剂,乙烷的优点是比丙烷廉价,蒸气压力高,可以在 3 .5MPa 下使用。

根据油藏温度、压力确定用乙烷、丙烷、丁烷做溶剂。

第三章　辽河油田重点稠油区块的地质分析

第一节　辽河油田地质概况及开发现状

辽河油田稠油资源比较丰富，平面上首先集中分布在辽河断陷盆地西部凹陷西斜坡带，由北向南为牛心坨油田、高升油田、曙光油田、欢喜岭油田，其次为西部凹陷东部陡坡带和中央隆起南部倾没带，由北向南为冷家堡油田、小洼油田和海外河油田。纵向上发育了10套稠油层系，自下而上为中上元古界的大红峪组、下第三系沙河街组牛心坨、高升、杜家台、莲花、大凌河、兴隆台、于楼油层、东营组马圈子油层、馆陶组绕阳河油层。

截止到2000年底，辽河油区累计探明含油面积198km^2，稠油地质储量98478×10^4t，占辽河油区总储量的46%，其中普通稠油(20℃地面脱气原油密度为0.934～0.95g/cm^3，50℃地面脱气原油粘度为300～10000mPa·s)57820×10^4t，占58.7%，特稠油(20℃地面脱气原油密度为0.95～0.98g/cm^3，50℃地面脱气原油粘度为10000～50000mPa·s)27336×10^4t，占27.8%，超稠油(20℃地面脱气原油密度大于0.98g/cm^3，50℃地面脱气原油粘度大于50000mPa·s)13322×10^4t，占13.5%；目前已动用含油面积128.4 km^2，稠油储量71460×10^4t，占稠油储量的72.6%；未动用储量27018×10^4t，占27.4%。

热采动用稠油地质储量56653×10^4t，其中热采普通稠油地质储量45285×10^4t，特稠油地质储量6624×10^4t，超稠油地质储量6744×10^4t，分别占热稠油地质储量的69.3%，11.7%，19.0%；常规开发稠油地质储量14031×10^4t，占稠油地质储量的19.9%。

共投入开发 78 个稠油开发单元,49 个开发区块,其中常规开发的稠油开发单元 15 个,开发区块 11 个,热采稠油开发单元 63 个,开发区块 38 个。

截止到 2000 年 12 月,辽河稠油投产总井数 8183 口,开井数 5787 口,日产油 23855t/d,日产水 47203 t/d,年产油 851.14×10^4t,累积产油 10370.96×10^4t,其中常规稠油投产总井数 1219 口,开井数 885 口,日产油 2927 t/d,日产水 5699 t/d,平均单井日产油 3.3 t/d,年产油 130.74×10^4t,累积产油 1659.74×10^4t,综合含水 68.8%,年采油速度 0.93%,采出程度 11.83%;热采稠油投产总井数 6963 口,开井数 4899 口,日产油 20892 t/d,日产水 41503 t/d,平均单井日产油 4.3 t/d,年产油 720.21×10^4t,累积产油 8711.03×10^4t,共吞吐 59033 轮次,平均单井吞吐 8.4 轮次,综合含水 63.5%,累积注汽 12494.05×10^4t,年度油汽比 0.49,累积油汽比 0.67,年采油速度 1.38%,采出程度 15.54%,目前,处于产量递减阶段区块平均单井日产油 1.7～3.8t/d,平均采出程度 19.38%,处于稳产阶段区块平均单井日产油 4.1～4.3t/d,平均采出程度 23.42%,处于上产阶段区块平均单井日产油 6.7～11.8 t/d,平均采出程度 5.15%,主力区块地层压力 3～6MPa;蒸汽驱试验投产总井数 102 口,开井数 86 口,平均单井日产油 2.4 t/d,一般 1.7～4.4 t/d,日产油 208t/d,日产水 1113 t/d,年产油 10.8×10^4t,累积产油 155.3×10^4t,综合含水 85.2%,累积注汽552.82×10^4t,年度油汽比 0.37,累积油汽比 0.28(表 3—1、表 3—2)。

表 3—1　辽河稠油产量分类结果

储量及产油量	Ⅰ类普通稠油	Ⅱ类普通稠油	特稠油	超稠油	合计
动用储量,10^4t	14807	46362	6086	4205	71460
占比例,%	20.72	64.88	8.52	5.88	
年产油,10^4t	131	515	71	134	851
占比例,%	15.36	60.38	8.35	15.75	
累积产油,10^4t	1660	7398	995	318	10371
占比例,%	16.01	71.33	9.59	3.07	

表 3—2　辽河不同类型稠油年度产量统计表

年度	年产油, 10^4t				年产油比例, %		
	热采普通、特稠油	常规稠油	超稠油	合计	热采普通、特稠油	常规稠油	超稠油
1985	59 .2	100 .3		159 .5	37 .1	62 .9	0 .0
1986	118 .5	122 .3		240 .8	49 .2	50 .8	0 .0
1987	189	136 .2		325 .2	58 .1	41 .9	0 .0
1988	339	71		410	82 .7	17 .3	0 .0
1989	436 .6	21 .5		458 .1	95 .3	4 .7	0 .0
1990	478 .1	101 .5		579 .6	82 .5	17 .5	0 .0
1991	496 .2	101 .3		597 .5	83 .0	17 .0	0 .0
1992	570 .3	92 .3		662 .6	86 .1	13 .9	0 .0
1993	632	90 .8		722 .8	87 .4	12 .6	0 .0
1994	627 .2	97 .7		724 .9	86 .5	13 .5	0 .0
1995	676 .8	166 .9		843 .7	80 .2	19 .8	0 .0
1996	681 .4	180 .6	3 .12	865 .1	78 .1	20 .9	0 .4
1997	638 .0	166 .1	41 .9	846	74 .1	19 .6	5 .0
1998	613 .1	163 .7	66 .7	843 .47	70 .8	19 .4	7 .9
1999	635 .7	129 .43	70 .4	835 .5	72 .1	15 .5	8 .4
2000	584 .8	130 .74	135 .4	850 .95	64 .4	15 .4	15 .9
合计	7775 .9	1872 .37	317 .5	9965 .72	77 .0	18 .8	3 .2

第二节　适合 LPG 采油的稠油区块

通过国外研究表明,萃取工艺对油藏不存在太多特殊的要求,这使得该工艺在辽河油田有广泛的应用范围。为筛选试验区块,对辽河油田部分稠油区块油藏地质参数进行了汇总(见表 3—3),并结合目前国外现有的研究成果及辽河油田实际情况,确定了以下几条筛选标准: