



海上采油工艺技术系列丛书

海上稠油热采技术 探索与实践

HAISHANG CHOUYOU RECAI JISHU
TANSUO YU SHIJIAN

陈明◎主编

石油工业出版社

海上采油工艺技术系列丛书

海上稠油热采技术探索与实践

陈 明 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了海上稠油热采的基本理论、多元热流体热采增产机理、油藏研究方法,简要介绍了多元热流体热采关键装备和流程,重点阐述了注采工艺、热采完井防砂工艺,并结合现场应用实例提出了海上稠油热采技术展望。

本书可供海洋石油开发技术人员以及采油工艺技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

海上稠油热采技术探索与实践/陈明主编.

北京:石油工业出版社,2012.9

(海上采油工艺技术系列丛书)

ISBN 978-7-5021-9199-3

I. 海…

II. 陈…

III. 海上油气田-热力采油

IV. TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 173485 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523537 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.25

字数:462 千字 印数:1—1500 册

定价:93.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《海上稠油热采技术探索与实践》

编 委 会

顾 问:陈 壁 丘宗杰 李 勇 张凤久 董伟良

主 编:陈 明

副主编:赵顺强 刘良跃 刘光成

编 委:(按姓氏笔画排序)

山金城	文 权	王国栋	刘义刚	刘刚芝
刘怀增	刘建忠	孙永涛	孙福街	杨海林
范白涛	赵利昌	赵春明	俞 进	姜 伟
徐文江	喻贵民	潘亿勇		

主要撰写人:(按姓氏笔画排序)

山金城	马增华	王少华	文 权	刘义刚
刘海涛	刘新峰	孙玉豹	孙永涛	祁成祥
杨 兵	李云鹏	李劲松	余焱冰	邹 剑
张 伟	张 岭	张凤义	张海龙	陈月飞
林 涛	周法元	段凯滨	柴晓平	徐文江
高建崇	高彦才	唐晓旭	崔 刚	

统稿组组长:徐文江

副组长:余焱冰 山金城

组员:孙永涛 邹 剑 林 涛 柴晓平 周法元
张海龙 马增华 孙玉豹 刘新峰 杨 兵
张 伟

前 言

在中国海洋石油总公司(简称中国海油)“建设国际一流综合能源公司”战略目标的指引下,在自主创新、支撑发展、引领未来的科技方针引导下,经过全体干部员工的共同努力,“十一五”期间,中国海油成功建成了“海上大庆油田”。

进入“十二五”,面对中国海油长期可持续发展的重大问题,新一届党组提出了“二次跨越”的发展战略,要求将增储上产、解放低渗和稠油储量作为重大发展战略举措之一。

作为中国海油重要资源的稠油储量,按照稠油热采标准初步筛选,符合热采条件的地质储量高达 $9.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,地层原油黏度大于 $450 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 而不得不进行热采开发的地质储量达 $6.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。按照热采采收率至少提高 10% 计算,上述稠油油田大约可以增加可采储量 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,潜力和影响非常大。

稠油热采作为目前非常规稠油开发的主要技术手段,虽然已在美国、委内瑞拉、加拿大、中国(辽河油田、新疆油田、胜利油田)广泛应用,形成了以蒸汽吞吐、蒸汽驱、蒸汽辅助重力泄油(SAGD)、热水驱、火烧油层等技术为代表的技术框架,但面对海上生产设施和作业条件、大井距和丛式井及高速开采、安全环保要求高等特殊条件,无论是海上稠油热采的油藏综合技术(例如,井型井网选择、热采数值模拟和注采参数优化、开发程序和技术策略、热采效果评价及指标预测方法),还是配套的热采工艺技术(例如,海上热采装备技术、热采井筒举升工艺、热采安全保障技术、热采防砂完井工艺),都对工艺技术实施提出了特殊的挑战。

经过中国海油开发生产技术人员艰苦努力,海上稠油热采自 2008 年起历时 4 年时间,终于取得了阶段性成果。

为了及时总结实践经验,用经验指导新的工作,我们组织编写了《海上稠油热采技术探索与实践》,作为海上采油工艺技术系列丛书的第三本。

《海上稠油热采技术探索与实践》全书共分七章。第一章从多元热流体物理化学特征、降黏机理、保压增能机理、提高波及效率作用机理、协同增产机理第 5 方面介绍了基本理论。第二章从数值模拟、注热参数优化、单井开发指标计算、方案设计等方面介绍了热采油藏工程分析方法。第三章从多元热流体发生器、水处理装置、基于平台和 LIFTBOAT 的热采工艺流程等方面介绍了热采关键装备与流程。第四章从热采采油树、井下工具、注采管柱、隔热工艺、防膨工艺、防腐工艺等方面介绍了注采工艺。第五章从完井工艺、防砂工艺、防砂器材方面介绍了热采防砂完井工艺。第六章从老井热采及装备验证、新井热采及防砂完井验证、规模热采及效益验证方面介绍了现场实践情况。第七章对海上热采技术进行了展望。

在本书编写过程中,得到了中海石油(中国)有限公司领导的大力支持、鼓励,在资料收集

和整理过程中,得到了中海油田服务股份有限公司油田生产事业部、中海能源发展股份有限公司采油技术服务分公司、江苏大江石油科技有限公司的大力支持,中海油田服务股份有限公司张永会同志为本书封面提供了摄影作品,编者在此表示衷心感谢。

本书以技术和实践经验总结为主。使用对象主要是从事海洋石油开发生产的技术人员,也可以作为相关采油工艺技术研究人员的参考用书。

《海上稠油热采技术探索与实践》的编写,虽参考了许多文献及资料,并经有关专家多次审查和修改,但由于编者水平有限,不足之处望读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

目 录

第一章 基本理论	(1)
第一节 渤海油田稠油物性	(2)
第二节 多元热流体物理化学特征	(12)
第三节 多元热流体开采机理	(34)
第二章 油藏工程	(65)
第一节 多元热流体数值模拟	(65)
第二节 注采参数优化	(94)
第三节 产能预测	(102)
第四节 多元热流体开发方案设计	(111)
第三章 关键装备与热采工艺流程	(123)
第一节 多元热流体发生器	(123)
第二节 水处理装置	(130)
第三节 基于平台的热采工艺流程	(136)
第四节 基于 LIFTBOAT 的热采工艺流程	(142)
第四章 注采工艺	(150)
第一节 热采采油树	(150)
第二节 井下工具	(155)
第三节 注采管柱	(169)
第四节 隔热工艺	(174)
第五节 防膨工艺	(184)
第六节 腐蚀防护工艺	(190)
第五章 完井工艺	(203)
第一节 稠油热采完井工艺概述	(203)
第二节 海上热采完井工艺设计	(212)
第三节 防砂器材与完井管柱设计	(228)
第四节 热采完井工艺现场应用	(239)
第六章 现场实践	(246)
第一节 老井热采及装备验证试验	(246)
第二节 新井热采及防砂完井验证试验	(253)
第三节 规模热采及效果评价试验	(262)
第四节 经济评价及效益分析	(270)

第七章 技术展望 (277)

 第一节 海上稠油油藏开发模式 (277)

 第二节 区块整体热采技术 (277)

 第三节 提高热吞吐采收率技术 (278)

 第四节 辅助重力泄油技术 (279)

 第五节 热驱技术 (279)

 第六节 热采关键装备技术 (280)

 第七节 井下安全控制工具 (280)

 第八节 注采一体化研究 (281)

附录 单位换算 (282)

第一章 基本理论

稠油因其重质组分含量高、黏度大、流动性差,开采难度大,主要依靠热力采油方法进行开采。热力采油运用热工学的理论和方法,通过加热油藏降低地下原油黏度、溶解和溶化油层堵塞、改善地层的渗流特性,从而提高原油在地层的渗流能力,提高稠油产量和采收率。

常用热力采油技术包括吞吐式热采(蒸汽吞吐、多元热流体吞吐)、蒸汽驱(或热水驱)、蒸汽辅助重力泄油(Steam Assisted Gravity Drainage, SAGD)、火烧油层(In-situ Combustion)、电磁加热、热化学法等。吞吐式热采技术因其具有一次投资较少、工艺技术较简单、增产快、经济效益好等优点,所以是目前普遍采用的热力开采技术。经过多年的发展,吞吐式热采技术不断向采用更大接触面积的水平井等复杂结构井、复合增产[如 CO_2 —蒸汽吞吐、 N_2 —蒸汽吞吐、 CO_2 或 N_2 泡沫蒸汽吞吐、烟道气—蒸汽(泡沫)吞吐、轻烃—蒸汽吞吐等]及化学调剖辅助开采等方向发展。概念设计期室内试验技术包括:核能—井下蒸汽发生技术;技术发展期应用试验包括:智能井技术—直井蒸汽驱;技术成熟期商业化应用包括:水平井蒸汽吞吐—直井蒸汽吞吐。智能井技术的范围界定有待商榷,因为国外已经出现了相对成熟的智能井系统,而国内还处于研发阶段。所以对于将发展阶段是否严格地分为三个阶段还有待进一步商讨。图1-1为热力采油技术的发展历程。

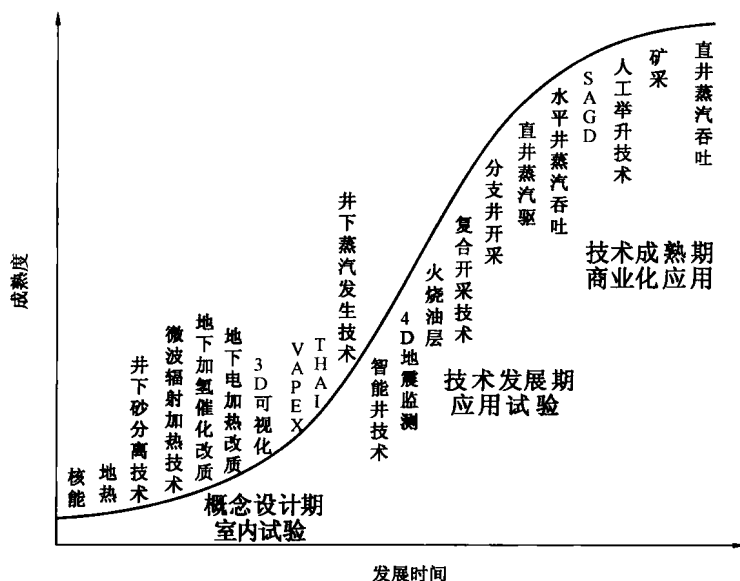


图 1-1 热力采油技术的发展历程

多元热流体吞吐是一项蒸汽(或热水)与气体复合吞吐开采的技术,该技术利用航天火箭发动机的燃烧喷射机理,以工业柴油、原油或天然气为燃料,在火箭动力采油设备的高压燃烧室内与高压空气混合燃烧,加热注入水,形成由蒸汽、 CO_2 及 N_2 组成的多元热流体,进行吞吐

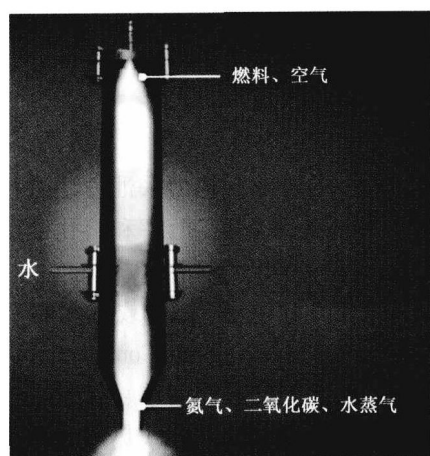


图 1-2 多元热流体产生原理示意图

采油。图 1-2 为多元热流体产生原理示意图。

渤海油田稠油储量丰富,截至 2009 年 12 月底,渤海稠油探明储量为 $20.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。地层原油黏度为 $50 \sim 350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的稠油目前主要依靠常规注水开发,地层原油黏度在 $350 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上的稠油采用天然能量开发和注水开发,采油速度和采收率低,经济效益差,探索此类稠油的有效开发技术,对整个渤海油田上产、稳产具有重要作用;形成合理的海上稠油开发模式,对渤海油田稠油储量的解放、储采比提高具有战略意义。

针对海上稠油油田开发生产的实际情况,中国海洋石油总公司自 2008 年开始在渤海南堡 35-2 油田进行了多元热流体单井吞吐的探索和试验,取得了明显的增产效果,实现了海上稠油高效开发的

突破。

本章主要介绍了渤海典型稠油的性质及多元热流体的组成和性质,基于室内实验和数值模拟的研究成果分析探讨了多元热流体增产机理,主要包括热降黏和气体降黏、增能保压、提高驱油效率和波及效率、减小热损失、气体辅助重力驱等。

第一节 渤海油田稠油物性

一、稠油的定义及分类标准

(一) 稠油的定义

高黏度的重质原油,国际上又称为重油 (Heavy Oil),我国俗称稠油(图 1-3),这是相对稀油而命名的。

稠油与普通原油(轻质原油)相比,既具有石油共性,又具有自己的特性。稠油是一种复杂的、多组分的均质混合物,由烷烃、芳香烃、胶质和沥青质组成。烷烃、芳香烃是石油中相对分子质量较小、相对密度较低的组分。胶质和沥青质为高相对分子质量化合物,并含有硫、氮、氧等杂原子。稠油与普通原油相比,稠油中的胶质、沥青质含量高,轻烃含量小。从稠油体系结构上看,稠油是一个连续分布的动态稳定胶体体系,沥青质和胶质组成分散相,芳香烃和烷烃则构成连续相。

由于沥青质具有极强的缔合性,胶质在沥青质表面形成稳定的空间烷基链层,直接影响动态胶体体系中沥青质的聚集性和分散性。图 1-4(a)显示,3 个甚至更



图 1-3 稠油

多的沥青质聚集体表现出聚集成有序结构的趋势,它们对应于图 1-4(b)中的模型晶粒。这些从不同方向相互靠近的有序聚集体,又呈现无序的状态。而胶质形成稳定的烷基侧链具有抑制沥青质聚集体进一步靠近的作用。胶质主要通过范德华力、电荷库仑力及烷基侧链带来的斥力在沥青质表面形成空间稳定层。胶质的化学组成及含量对原油物理化学性质有较大影响。胶质含量的高低与稠油的黏度直接相关,稠油高黏度的主要原因就在于其中的高相对分子质量胶质组分。胶质、沥青质的含量是影响稠油的黏度以及密度的最重要组分。

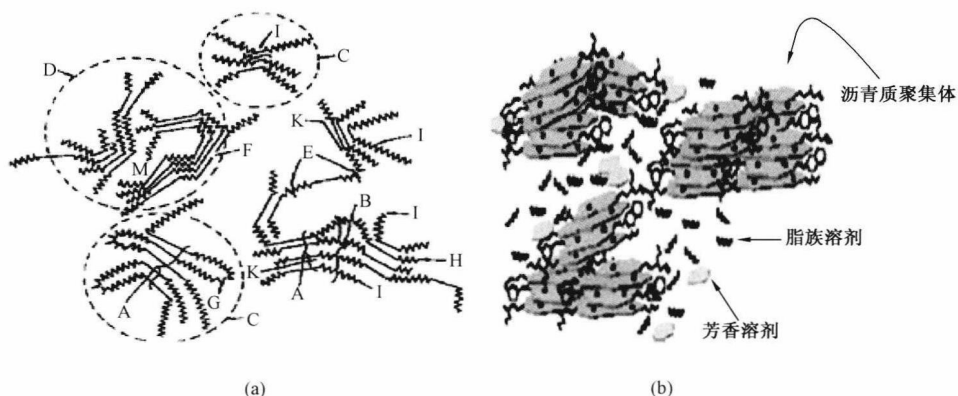


图 1-4 沥青质分子聚集示意图

A—晶粒;B—侧链;C—微粒;D—胶束;E—弱键;F—空穴;
G—分子内堆集;H—分子间堆集;I—胶质;K—石油卟啉;M—金属

(二) 稠油的分类

1. 国外稠油分类

1982 年 2 月联合国训练研究署(UNITAR)在委内瑞拉组织专家讨论推荐了稠油的分类标准(表 1-1),即在油层温度下,黏度为 $100 \sim 10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油划为稠油,将黏度大于 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油划为沥青。此分类标准更是针对稠油和沥青的区别而言的,也包括了普通原油与稠油的界限。各国在此基础上又进行了较细的分类,如委内瑞拉将稠油分为三类,黏度为 $100 \sim 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油为第一类,黏度为 $1000 \sim 10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油为超稠油,黏度为 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上的原油称为沥青;法国根据密度将稠油分为三级;我国则根据国内具体情况,将稠油分为三类四等。

表 1-1 由 UNITAR 推荐的重质原油及沥青质分类标准

分类	第一指标		第二指标
	黏度($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	密度(15.6°C)(kg/m^3)	重度(15.6°C)($^\circ\text{API}$)
重质原油	$100 \sim 10000$	$934 \sim 1000$	$10 \sim 20$
沥青质	> 10000	> 1000	< 10

此国际分类标准中突出强调了下列几点:

- (1) 将原油黏度作为第一指标,将原油密度作为辅助指标。
- (2) 原油黏度统一采用油藏温度下的脱气原油黏度,用油样测定。
- (3) 稠油或重油的黏度下限为 $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、上限为 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,黏度超过 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$



的原油称为沥青,这是大致的界限,主要是根据美国加利福尼亚的重油资料确定的。

2. 中国稠油的分类

我国的稠油在物理性质上与国外有着明显的不同,主要区别是:相同密度的稠油,国内稠油黏度相对较高。原中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院刘文章根据中国重质原油(稠油)的特点,经过多年研究,推荐了中国稠油的分类标准,如表 1-2 所示。

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)	相对密度	
普通稠油	I	50 ^① (或 100)~10000	>0.9200	—
	亚类	I-1	>0.9200	可以先注水
		I-2	>0.9200	热采
特稠油	II	10000~50000	>0.9500	热采
超稠油	III	>50000	>0.9800	热采

① 油层条件下的黏度。

在分类标准中,黏度为第一指标,如果黏度超过分类界限而密度未达到,也按黏度来分类。

第一类为普通稠油,黏度低限值为 150mPa·s(脱气油),或 50mPa·s(油层条件下),黏度高限值为 10000mPa·s(脱气油),相对密度在 0.9200(22°API)以上。这类稠油又分为两个亚类,油层条件下原油黏度在 150mPa·s 以下的可以先注水开发,黏度在 150mPa·s 以上时适宜于热采开发。

第二类为特稠油,黏度低限值取 1×10^4 mPa·s,高限值取 5×10^4 mPa·s,相对密度大于 0.9500(15°API)。对于这种稠油,可以采用吞吐式热采技术,这在国内外已有成功实例。但是,对于原油黏度为 $(1 \sim 5) \times 10^4$ mPa·s 的油藏进行蒸汽驱技术难度较大,采收率也较低。

第三类为超稠油,黏度在 5×10^4 mPa·s 以上,相对密度在 0.9800(13°API)以上。对于这类稠油,在油层原始条件下基本不能流动,常规注蒸汽开采方法的经济效益降低,技术难度较大。

3. 海上稠油的特点

渤海油田稠油储量丰富,占渤海油田总储量的 70% 以上,主要分布在旅大、南堡、绥中、埕北等油区。按我国稠油分类标准,多为黏度为 150~10000mPa·s 的普通稠油,也有诸如旅大 16-1 的特稠油田。表 1-3 给出了渤海主要稠油油田的原油黏度和密度情况。

表 1-3 渤海油田部分区块原油黏度数据

油田	地面密度(g/cm ³)	地面黏度(mPa·s)
南堡 35-2	0.94~0.97	929~3700
埕北	0.98	4851
绥中 36-1	0.96	1055.8
旅大 16-1	0.99~1.01	11875~20104
蓬莱 19-3	0.92~0.96	29~640
秦皇岛 32-6	0.96~0.98	90~1357

二、渤海稠油的基本性质与特性

稠油与普通原油即轻质原油之间存在着某些特殊的差别,稠油一般具有下列特性:

- (1)稠油中的胶质和沥青质含量高,轻质组分少。中国主要稠油油藏原油中的轻质组分含量一般仅为 10% 左右,而沥青质及胶质含量一般为 25% ~ 50%。随着胶质与沥青质含量的增多,稠油的相对密度(密度)及黏度也相应增加。
- (2)稠油黏度随原油密度增加而增加。大量的统计资料表明,稠油黏度随原油密度增加而增加,但线性关系较差,原因是各稠油油藏的沥青质含量和胶质含量不同。当沥青质及胶质总含量一定时,沥青质含量越多,原油密度越大;胶质含量越多,原油黏度越大。
- (3)稠油中的硫、氧、氮等原子含量较多。美国、加拿大及委内瑞拉的重油中含硫量高达 3% ~ 5%;相对于其他国家来说,中国稠油的含硫量比较低,一般仅有 0.5% 左右,最高为 2%。
- (4)稠油中含有稀有金属。一般稠油中含有镍、钒和铁,这对炼制工艺提出了一些特殊的要求。委内瑞拉及加拿大的稠油中镍、钒含量较高,尤其是钒的含量高达每升几百毫克,甚至每升上千毫克。
- (5)稠油中石蜡含量一般比较少。国外绝大多数稠油含蜡量比较少,一般只有 5% 左右。中国多数稠油的含蜡量比较少,但也有极少数油田产“双高”原油,即胶质、沥青质含量高,石蜡含量也高,表征为高黏度、高凝点原油。如辽河油区的张一块油田所产稠油石蜡含量大于 10%,大港枣园油田石蜡含量高达 20%。
- (6)同一稠油油藏,原油性质在垂向油层的不同井段及平面上的不同区域大多有一定差别,需要对油藏进行精细的研究和描述。
- (7)稠油的黏度对温度很敏感,随着温度增加稠油黏度急剧下降。

(一)渤海稠油的基本性质

渤海稠油与陆地油田的稠油特性大体相似,主要有以下特点。

(1)渤海油田稠油中轻质馏分很少,而胶质、沥青质含量很多,常规油(即稀油)中沥青质含量一般不超过 5%,但稠油中沥青质含量可达 10% ~ 30%,个别特超稠油可达 50% 或更高,而且随着胶质、沥青质含量增加,原油的密度及同温度下的黏度随之增加。据统计,大多数稠油中轻质馏分在 10% 以下,一般仅为 5% 左右。渤海油田南堡 35 - 2 稠油的黏度不是很高,但原油中胶质、沥青质含量较高,见表 1 - 4。

表 1 - 4 南堡 35 - 2 油田油品性质

区块	地下黏度(mPa · s)	地面黏度(mPa · s)	地面密度(g/cm ³)	胶质含量(%)	沥青质含量(%)
南堡 35 - 2 油田	449 ~ 753	929 ~ 3755	0.966 ~ 0.978	13.6 ~ 20.4	5.4 ~ 10.7
平均量	636	2150	0.973	17.6	6.7

图 1 - 5 是渤海地区稠油油藏或区块的原油胶质、沥青质含量与密度的关系图。从图 1 - 5 可以看出,渤海油田稠油密度随着胶质、沥青质含量的增加而增大。

(2)渤海油田稠油的黏度随着密度的增加而增加,原油密度的大小与其含沥青质及金属元素的多少有关,而原油黏度的高低主要取决于其胶质含量的多少。大量的统计资料表明,稠

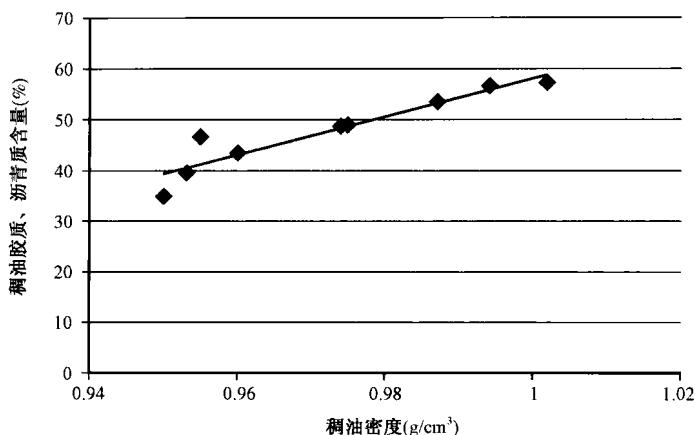


图 1-5 渤海油田稠油胶质、沥青质含量与稠油密度关系图

油黏度随原油密度增加而增加,原因是各稠油油藏的沥青质含量和胶质含量不同。当沥青质及胶质总含量一定时,沥青质含量越多,原油密度越大;胶质含量越多,原油黏度越大。渤海油田稠油中金属元素含量少,而沥青质、胶质含量变化大,沥青质含量较低(一般不超过 10%),而胶质含量较高(一般超过 20%)。因此,原油密度较小,但原油黏度较高。图 1-6 是渤海油田某区块的原油密度与原油黏度的关系图。由图 1-6 可知,原油黏度随着密度的增加而增加的趋势十分明显,但线性关系较差。

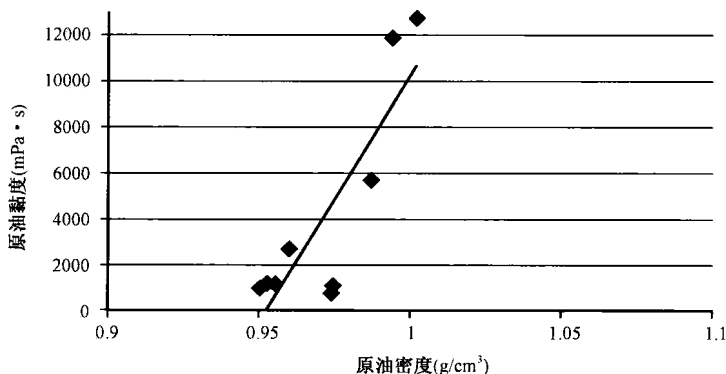


图 1-6 渤海油田某区块的原油黏度与原油密度的关系图

(3) 渤海油田稠油中烃类组分低。稠油与稀油的重要区别是其烃类组分上的差异。我国陆相稀油中,烃的组成(饱和烃+芳香烃)一般大于 60%,最高可达 95%;而稠油中烃的组成一般小于 60%,最少在 20% 以下,从表 1-5 可以看出,饱和烃与芳香烃的含量在 40% 左右。

表 1-5 南堡 35-2 油田脱气原油组分分析

单位: %

井号	饱和烃	芳香烃	非烃	沥青质
B14m	26.62	17.30	27.19	28.71

(4)渤海油田稠油中含硫量低(表1-6)。在我国已发现的大量稠油油藏中,稠油中的含硫量都比较低,一般小于0.8%。

(5)稠油中含蜡量中等(表1-6)。渤海油田大多数区块(如旅大、绥中、埕北、秦皇岛、南堡)原油的含蜡量为4%~9%,远低于稀油油田的含蜡量(一般含蜡量在30%以上)。

表 1-6 渤海油田原油组分含量及物性

油田	原油密度 (地面 20℃) (g/cm ³)	原油黏度 (地面 50℃) (mPa·s)	胶质含量 (%)	沥青质 含量 (%)	含硫量 (%)	含蜡量 (%)	初馏点 (℃)	凝固点 (℃)
旅大 16-1	0.994	11875.0	48.67	8.08	0.49	7.29	240	15
	1.002	12718.0	47.85	9.48	0.59	9.48	240	15
	0.975	1080.2	42.44	6.83	0.47	7.44	215	0
	0.974	777.0	40.02	8.80	0.45	5.60	201	-2
	0.987	5704.0	44.68	8.82	0.41	4.18	201	12
绥中 36-1	0.953	1195.0	31.43	8.17	0.37	3.47	176	-5
埕北	0.955	1198.2	41.06	5.6	0.45	6.02	158	3
秦皇岛 32-6	0.943~0.965	229~1167	18.88~42.50	3.7~6.8	0.23~0.35	0.80~9.53	235~280	-8
南堡 35-2	0.963~0.965	2145~3381	38.2~40.8	5.1~5.9	0.38~0.51	4.5~8.1	279~299	8

(6)渤海油田稠油凝固点较低。大多数稠油油藏属于次生油藏,由于石蜡的大量脱损,以及浅部氧化作用强烈,因此,稠油性质表现为胶质沥青含量高、蜡含量及凝固点低的特点,见表1-6。

(二)渤海稠油的热特性

稠油的热特性主要包括黏温特性、蒸馏特性、热膨胀性和热裂解性。

1. 黏度对温度的敏感性

黏度反映了流体在流动过程中内摩擦阻力的大小,原油的黏度直接影响它在地下的流动和渗流能力,所以原油黏度是反映原油流动性能的重要参数之一。原油的黏度与胶质、沥青质的含量密切相关,通常原油含胶质、沥青质越多,其密度越大、黏度越高,并且原油的黏度对其流变性有很大影响。

通常稠油黏度可通过 HAAke VT550 黏度计等实验仪器测定。表1-7测定了含气稠油和脱气稠油的黏度,由此可以看出,含气稠油黏度较脱气稠油黏度低。

表 1-7 不同温度下南堡稠油黏度测定结果

温度(℃)		56	80	120	180	240
含气稠油	黏度(mPa·s)	1043.4	264.9	77.8	40.3	31.9
	降黏率(%)	—	74.6	92.5	96.1	96.9
脱气稠油	黏度(mPa·s)	1681.0	380.0	122.9	80.5	56.3
	降黏率(%)	—	77.4	92.7	95.2	96.7

工程上也可以通过经验公式求取含气稠油和脱气稠油的黏度。对于黏度不太高的普通稠油,可以通过下式估算脱气原油黏度:

$$\mu = 10^{x-1} \quad (1-1)$$

$$x = T^{-1.163} e^{(6.982 - 0.04658\rho_{API})} \quad (1-2)$$

式中 μ ——脱气稠油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 T ——温度 $^{\circ}\text{C}$;
 ρ_{API} ——重度, $^{\circ}\text{API}$, $^{\circ}\text{API} = 141.5/\rho_o - 131.5$;
 ρ_o ——原油密度, g/cm^3 。

对于油藏条件下的含气稠油黏度,可通过下式计算:

$$\mu_o = A \cdot \mu^B \quad (1-3)$$

式中 μ ——地层温度下脱气稠油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 A, B ——经验系数, $A = 10.7 \times (5.615R_s + 100)^{-0.515}$, $B = 5.44 \times (5.615R_s + 150)^{-0.338}$;
 R_s ——溶解气油比, m^3/m^3 。

稠油的黏度随温度变化十分敏感,温度升高,黏度急剧下降。这既是它的一般特性,也是其热特性。通常油层温度每升高 10°C ,稠油黏度会降低一半。这是由于黏度代表流体流动的内摩擦力,而内摩擦力决定于流体的内聚力,影响稠油内聚力的主要因素又与胶质、沥青质分子相互形成氢键和分子平面重叠堆砌聚集体有密切关系。随着温度升高,粒子的布朗运动加剧,使这种聚集体的有序程度降低,结构变得松散,原油内聚力降低,黏度也就减小。

对于常规原油而言,由于黏度—温度曲线作用不大,往往被人们忽视。但对于稠油来说,黏度—温度曲线十分重要,正是由于稠油升温降黏的敏感性,稠油热采才得以广泛应用。

热采工程中常用的沃尔特(Walther)方程导出的黏度与温度的关系式为:

$$\lg(\mu_o + a) = A - B \lg(1.8t + 492) \quad (1-4)$$

式中 μ_o ——原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 t ——温度, $^{\circ}\text{C}$;
 A, B ——黏度—温度曲线的截距和斜率,为常数;
 a ——经验系数,一般取 1.05。

利用沃尔特(Walther)方程导出渤海油田与陆地油田的原油黏度与温度的关系曲线,渤海油田原油黏度随着温度的升高,黏度呈现逐渐下降的趋势。

由图 1-7 可知,不同油田脱气稠油黏度有着很大区别,从几百到几十万毫帕秒,但当温度超过 150°C 以后,黏度均可降到 $10\text{mPa} \cdot \text{s}$ 左右,呈现为稀油状态。

由图 1-7 可以看出,稠油黏度—温度曲线在 ASTM 坐标中基本呈现直线关系,所以在油田开发初期,只有一个黏度—温度点时,可以参考其他油田的黏度—温度曲线,通过划平行线的方法,初步确定本油田的黏度—温度曲线。

另外,同一区域不同油田稠油的黏度—温度曲线在 ASTM 坐标中,也呈现出近似于平行线的特点。

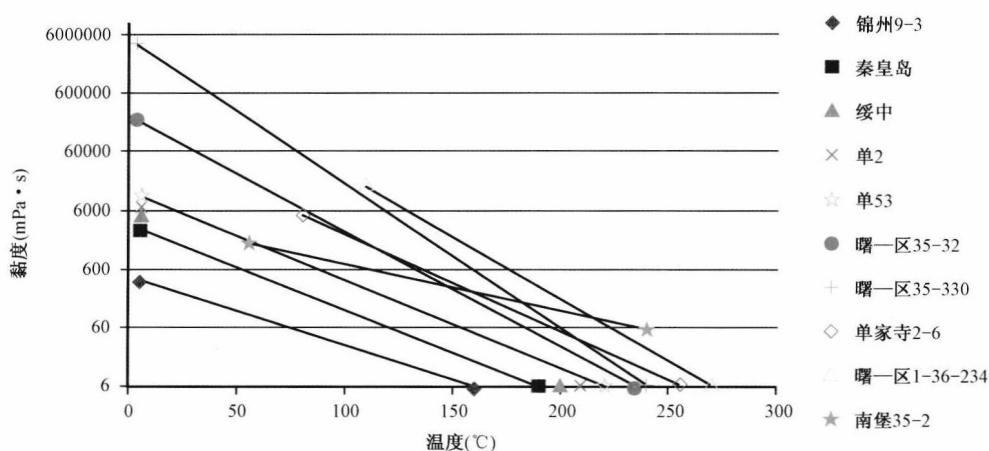


图 1-7 渤海油田与陆地油田原油黏度与温度的关系曲线

2. 稠油的蒸馏特性

原油开始出现汽化的最低温度称为原油的初馏点(有时也称作泡点),一旦温度大于或等于初馏点时,原油中的轻质组分就将分离为气相,而重质组分仍保持为液相。

3. 热膨胀性

稠油受热时体积发生胀大的现象称为稠油的热膨胀。衡量热膨胀性的指标称为热膨胀系数,其是指稠油体积随温度的变化率,定义如下:

$$C_{\alpha} = \frac{dV_o}{V_o dT} = - \frac{d\rho_o}{\rho_o dT} \quad (1-5)$$

式中 C_{α} ——热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

V_o ——原油体积, cm^3 ;

ρ_o ——原油密度, g/cm^3 ;

T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

稠油热采过程中,油层温度将大幅度升高,如热流体驱可使油层温度升高 200°C 以上,原油、水及岩石的体积膨胀将产生不可忽视的驱油作用,其中原油的热膨胀系数最大 ($10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$),它相当于水的 3 倍多 ($3 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$),相当于岩石的 10 倍 ($10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$),当温度增加 200°C 时,原油体积将增加 20%。

4. 热裂解性

当温度升高一定值时,稠油中的重质组分将会裂解成焦炭和轻质组分(轻质油和气体),热裂解生成的轻质组分对改善地下稠油的驱油效果起到了很大的作用。

(三) 渤海稠油的流变特性

流体流动中剪切应力与剪切速率的关系称为流体的流变性。原油的流变性取决于原油的组成,即取决于原油中溶解气、液体和固体物质的含量以及固体物质的分散程度。原油属于胶体体系,固体物质(蜡晶、沥青质为核心的胶团)构成了该体系的分散相,而分散介质则是液态烃和溶解于其中的天然气。当原油中固体分散相的浓度很大时,原油具有明显的胶体溶液性