



中国油藏管理技术手册

稠油热采技术

张锐 等 编著



石油工业出版社

稠油热采技术

张 锐 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本手册以稠油油藏热力开采的实践经验和应用研究为主,较系统的介绍了热力开采的主要技术原理和技术方法,阐述热力采油中应遵循的原则、程序和作法。手册中包括稠油油藏描述、油藏岩石和流体的热物理特性、热采试井方法、稠油油藏工程设计、油藏动态分析、采收率预测、蒸汽吞吐开采、蒸汽驱开采、火烧油层开采方法设计、经济评价、稠油开采前沿技术等内容。

本手册系统性、实用性较强,可作为石油工程师的参考书,也可作为石油高等院校的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

稠油热采技术/张锐等编著.

北京:石油工业出版社,1999.4

(中国油藏管理技术手册)

ISBN 7-5021-2463-2

I. 稠…

II. 张…

III. 稠油开采:热力采油

IV. TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35684 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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 20 $\frac{3}{4}$ 印张 548 千字 印 1—2000

1999 年 4 月北京第 1 版 1999 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2463-2/TE·2027

定价: 40.00 元

序 言

《中国油藏管理技术手册》是油藏开发管理的一套重要书籍，这套手册的出版发行对于改善油藏经营管理、提高油田开发水平具有十分重要的意义。

“油藏经营管理”（Reservoir Management）在国外是 70 年代兴起的，主要强调地质与工程多种专业的协同，搞好油藏的整体开发和优化经营“油藏管理”是指对油藏的整体经营管理，具体内容包括科学地认识油藏，对油藏进行定量化的描述，了解油藏的特性，并进行油藏评价和开发可行性研究，制定出油藏的最佳开发方案，即用较少的投入得到最大的经济效益和较高的油藏最终采收率，油藏经营管理也包括油（气）投入开发后的科学管理，包括油藏动态分析、监测和开发调整以及开发方式转变，如由一次开采转入注水开发，再由注水开发（二次开采）进入三次采油。由此可见，油藏管理技术的内容十分广泛，这次我们重点选择编写以下八个分册，分别出版：

- 第一分册 油藏描述
- 第二分册 油层物理实验技术
- 第三分册 油藏工程设计
- 第四分册 油藏动态监测和开发分析
- 第五分册 油藏数值模拟
- 第六分册 三次采油技术
- 第七分册 稠油热采技术
- 第八分册 油田开发经济评价

本套手册的编制强调科学性和实用性，着重介绍技术方法的应用，系统地总结了我国油田多年来油藏经营管理的经验，吸取了最新国外油田的开发技术，具有权威性和法规性。本手册的出版为我国油田开发的广大工程技术人员、科研设计人员，特别是

油藏工程技术人员提供了一套得心应手的工具书。

中国石油天然气总公司

开发生产局

1995 年 8 月

《中国油藏管理技术手册》编委会名单

主 任 王乃举

副主任 周成勋

编 委 王乃举 周成勋 潘兴国 崔耀南

吕德本 叶敬东 张卫国

前 言

本手册为《中国油藏管理技术手册》第七分册。

稠油油藏以其储集层中饱含高粘度重质原油或天然沥青而区别于一般油藏。重质原油由于粘度高，在油层中流动性能差，有的甚至不能流动，因而正确的认识和合理的开发稠油油藏，则是稠油油藏工程的重要任务。

从 20 世纪初至今，随着热力开采技术的发展，稠油油藏工程作为一门新学科在实践中得到了发展。与此同时，稠油的巨大资源，促进了研究工作的不断深化，稠油油藏工程理论的发展，又正指导着稠油开采方法的改进以及开采领域的拓宽，稠油油藏工程是当今较为活跃的学科之一。我国稠油工业化开采起步较晚，但发展较快，在高速发展形势下，本手册中所提出的一些观点和方法有些尚不成熟，有待实践的检验，并有必要与稠油界同事们作初步有意义的讨论，这正是编写本手册的基本考虑。

关于稠油热采中的一些理论、技术和方法，国外发表了不同的读本。近两年国内也出版了有关专家的著作。本手册在此基础上，意在探讨稠油热采的主要机理；讨论稠油热采中应遵循的原则和作法；阐述稠油油藏工程的技术和方法。在论述中，有的选用了部颁标准，并力求技术方法的科学性、系统性、实用性、可操作性。

本手册由张锐组织编写、提出整体结构并进行审核、修改。各章节编写人分别为：第一、二章：张锐、朱汇、梁人初；第三章：赵郭平；第四章：刘尚奇；第五章：何中、刘尚奇、张锐；第六章：廖广志；第七、九、十一章：张锐；第八章：蒲海洋、张锐；第十章：沈燮泉；第十二章：张锐、薄启亮、刘尚奇；附录由梁人初整理。由于作者水平有限，本手册难免有不足和错误，恳请广大读者批评指正。

误，恳请广大读者批评指正。

在本手册出版之际，衷心感谢编委和专家们在编写过程中提出的宝贵意见，衷心感谢前中国石油天然气总公司开发局王乃举局长、周成勋总工程师、石油工业出版社等同志对本手册的关心和支持。

编 者

1996 年 11 月初稿

1998 年 9 月完稿

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 稠油资源	(1)
第二节 稠油开采方法简述	(3)
第三节 稠油热采概况	(6)
第二章 稠油油藏描述	(16)
第一节 稠油油藏一般地质特征	(16)
第二节 稠油油藏类型	(28)
第三节 稠油油藏描述内容	(33)
第四节 稠油油藏描述的阶段要求	(59)
第三章 稠油特性及油藏岩石、流体的热物理特性	(63)
第一节 水蒸气的热物理特性	(63)
第二节 原油的热物理特性	(73)
第三节 油藏岩石的热物理特性	(78)
第四节 温度对油藏岩石渗流特性的影响	(84)
第四章 注蒸汽热采试井	(87)
第一节 热采试井原理	(87)
第二节 压降试井分析方法	(93)
第三节 注入能力试井	(98)
第五章 稠油油藏工程设计	(105)
第一节 油层加热理论与计算方法	(105)
第二节 注蒸汽采油原理	(114)
第三节 注蒸汽开发油藏工程设计	(136)
第四节 稠油油藏水平井应用设计	(190)
第五节 蒸汽辅助重力泄油工程设计	(208)
第六节 注蒸汽开发设计程序流程	(226)
第六章 油藏动态预测方法	(231)

第一节	注蒸汽开采产量预测方法	(231)
第二节	注蒸汽开采油汽比预测方法	(259)
第三节	热力开采动态分析方法	(262)
第七章	稠油油藏注蒸汽开发采收率预测	(282)
第一节	影响采收率的因素分析	(282)
第二节	采收率预测方法	(302)
第八章	蒸汽吞吐开采及其实例	(310)
第一节	蒸汽吞吐开采机理	(310)
第二节	蒸汽吞吐开采油藏地质条件及其影响	(314)
第三节	井筒热损失计算	(325)
第四节	蒸汽吞吐开采注汽参数的影响	(335)
第五节	蒸汽吞吐开采特征	(342)
第六节	蒸汽吞吐开采主要工程技术	(342)
第七节	蒸汽吞吐开采实例及其效果评价	(356)
第八节	提高吞吐效果的技术措施	(407)
第九章	蒸汽驱开采及其实例	(414)
第一节	蒸汽驱开采机理	(414)
第二节	蒸汽驱实验基础	(418)
第三节	蒸汽驱油藏筛选	(430)
第四节	蒸汽驱实施策略	(445)
第五节	蒸汽驱先导试验及效果评价	(452)
第十章	火烧油层开采方法	(518)
第一节	火烧油层驱油机理及特点	(518)
第二节	火烧油层筛选标准	(521)
第三节	火线位置的确定方法	(523)
第四节	火烧动态评价指标及方法	(537)
第五节	火烧油层方案设计	(547)
第十一章	经济评价	(555)
第一节	热采项目经济评价方法	(555)
第二节	热采项目财务估算	(556)
第三节	热采项目盈利分析	(560)

第四节	热采项目的风险分析.....	(564)
第五节	经济评价步骤与实例.....	(568)
第十二章	稠油开采前沿技术.....	(579)
第一节	工业化应用技术新进展.....	(579)
第二节	稠油开采前沿技术.....	(602)
第三节	稠油开采展望.....	(629)
附录		(631)
附录 A	稠油热采工程常用单位名称.....	(631)
附录 B	国际单位制与工程单位制的单位换算表.....	(633)
附录 C	常用单位换算系数.....	(635)
附录 D	各种稠油、合成油的燃烧热值.....	(638)
附录 E	天然气中常见气体的主要物理化学性质.....	(639)
附录 F	各种物体的热物理性质.....	(640)
附录 G	饱和水与饱和水蒸汽表.....	(648)

第一章

概 述

“稠油”是指在油层温度下脱气原油粘度大于 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、相对密度大于 0.92 的原油^[1]，国外称之为“重油”（Heavy Oil、Heavy Crude Oil）。

稠油由于其粘度高、流动性能差，甚至在油层条件下不能流动，因而采用一般常规开采方法很难经济有效地开发。从 20 世纪初开始，热力采油已逐渐成为开采这类原油的有效方法。

稠油分布范围广，由于蕴藏有巨大的稠油资源量而被世界各产油国所重视，随着热力开采技术的发展，开采规模在逐步扩大，产量在不断增长，稠油热采在石油工业中已占有较重要的位置。正如 1991 年在委内瑞拉召开的第五届国际重油会议所提出的那样“重油及沥青砂——21 世纪的烃能源”，重油开采将日益显示出重要的战略地位。

第一节 稠油资源

世界蕴藏有巨大的稠油资源，据有关专家估计比常规原油资源高数倍至十余倍，具有替代常规石油能源的战略地位^[2]。稠油资源分布广，几乎所有产油国都有发现。据调研资料，世界上重油（含特重油）资源丰富的国家有加拿大、委内瑞拉、美国、前苏联等，其重油地质储量及沥青砂资源约 $(4000 \sim 6000) \times 10^8\text{m}^3$ （含预测资源量）。加拿大重油油砂最为丰富，阿尔伯塔盆地是主要的分布区，有阿萨巴斯卡等 8 个重油大油田，地质储量 $(2680 \sim 4000) \times 10^8\text{m}^3$ ；委内瑞拉 4 个已知重油聚集（区）带，地质储量约 $(490 \sim 930) \times 10^8\text{m}^3$ （而预测重油资源共约 $3000 \times$

10^8m^3)；美国重油和特重油油田地质储量约 $(90 \sim 160) \times 10^8\text{m}^3$ ；前苏联总的勘探和认识程度较低，约有 300 个特重油油田，重油储量约 $1200 \times 10^8\text{m}^3$ ；中国重油沥青资源分布广泛，已在 12 个盆地（凹陷）发现了 70 多个重质油田（表 1.1、表 1.2）。虽然中国含油气区不具备像加拿大阿尔伯塔特盆地、委内瑞拉马图林盆地那样的形成巨型重油沥青区带的地质条件，但是，中国大部分含油气盆地重质油多与常规油有共存和有规律过渡分布的特征，重油资源非常丰富，约占总石油资源的 25% ~ 30% 以上。

表 1.1 世界稠油及沥青资源分布

地 区	稠 油		沥 青	
	探明储量 $10^8\text{bbl}^{①}(10^8\text{m}^3)$	远景资源量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	探明储量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	远景资源量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$
北 美	349.7(55.5)	142.9(22.7)	17085.5(2716.6)	8648.1(1375.0)
中 美	0.08(0.013)	0(0)	—	—
南 美	1434.6(227.7)	1725.0(273.8)	1.22(0.2)	0
欧 洲	50.1(7.9)	230.7(36.6)	1309.3(208.2)	0
非 洲	26.2(4.2)	0(0)	10.7(1.7)	0.31(0.05)
中 东	584.2(92.7)	220.8(35.0)	0.13(0.02)	0
亚 洲	145.2(23.0)	708.0(112.4)	6638.1(1055.5)	0
东南亚	24.7(3.9)	35.9(5.7)	0.11(0.02)	0.01(0.001)
大洋洲	0	0(0)	+	0
全世界统计	2614.6(415.0)	3063.3(486.2)	25045.0(3982.2)	8648.4(1375.1)

注：该表中稠油指°API 重度小于 20、粘度低于 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的原油，包括°API 重度小于 10 的特重油；沥青是指油藏条件下粘度大于 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的原油。

表 1.2 世界主要稠油生产国稠油及沥青资源量

地 区	稠 油		沥 青	
	探明储量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	远景资源量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	探明储量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	远景资源量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$
美 国	334.2(53.1)	105.9(16.8)	228.2(36.3)	337.6(53.7)
加 拿 大	15.5(2.5)	37.0(5.9)	16857.3(2680)	8310(1321)
委内瑞拉	1380.7(219.5)	1725(274.3)	—	—
印度尼西亚	22.1(3.5)	22.6(3.6)	—	—
前苏联地区	25.2(4.0)	849.0(135.0)	7616(1211)	—
中 国	50.9(8.1)	—	32.7(5.2)	1098.7(174.7) ^①

注：稠油与沥青的划分同上表，但中国的数据将“八五”未动用的储量作为稠油储量，未动用储量作为沥青储量。

①按总石油资源量的 20% 计算，第二次资源评价中，中国总石油资源量为 $940 \times 10^8\text{t}$ (50% 概率)，该数据包括稠油和沥青。

第二节 稠油开采方法简述

稠油油藏一般采用热力开采，就其对油层加热的方式可分为两类。一是把热流体注入油层，如注热水、蒸汽吞吐、蒸汽驱等；另一类是在油层内燃烧产生热量，称就地（层内）燃烧或火烧油层（火驱法）。

一、热水驱

注热水是注热流体中最简便的方法，操作容易，与常规注水开采基本相同。注热水主要作用是增加油层驱动能量，降低原油粘度，减小流动阻力，改善流度比，提高波及系数，提高驱油效率。此外，原油热膨胀则有助于提高采收率，从而优于常规注水开发，与注蒸汽相比，其单位质量携带热焓低，井筒和油层的热损失大，开采效果较差。特别是当注入速度低而油层又薄，影响更为严重，因而限制了该方法的使用。但对于高凝油油藏或原油

粘度较低的稠油油藏，注热水也有成功的实例。

二、蒸汽吞吐

蒸汽吞吐是指向一口生产井短期内连续注入一定数量的蒸汽，然后关井（焖井）数天，使热量得以扩散，之后再开井生产。当瞬时采油量降低到一定水平后，进行下一轮的注汽、焖井、采油，如此反复，周期循环，直至油井增产油量经济无效或转变为其他开采方式为止。

与蒸汽驱对比，蒸汽吞吐投资少、工艺简单、生产费用低、采油速度快，是有效的提高稠油油藏采油速度的一种主要方法。但其采收率低，为此，一般情况下蒸汽吞吐后转为蒸汽驱开采。

三、蒸汽驱

蒸汽驱是注热流体中广泛使用的一种方法。蒸汽驱是指按优选的开发系统——开发层系、井网（井距）、射孔层段等，由注入井连续向油层注入高温湿蒸汽，加热并驱替原油由生产井采出的开采方式。当瞬时油汽比达到经济界限（一般为 0.15）时，蒸汽驱结束或转变为其他开采方式。

四、火烧油层

火烧油层是将空气或氧气由注入井注入油层，先将注入井油层点燃，使重烃不断燃烧产生热量，并驱替原油至采油井中被采出。按其开采机理有三种不同的方法：干式向前燃烧法；湿式向前燃烧法；反向燃烧法。

1. 干式向前燃烧法

干式向前燃烧法是由注气井向油层连续注入空气或氧气点火，并使燃烧前缘向周围生产井推进。原油被燃烧前缘的烟气和共存水汽化形成的蒸汽所驱替，前缘推进方向与注入气体流动方向相同。

2. 湿式向前燃烧法

湿式向前燃烧法是干式向前燃烧一段距离，使油层积蓄一定热量后，在注空气同时掺入适量水，使燃烧前缘向生产井推进。湿式燃烧既有蒸汽驱特点，又具有干式向前燃烧的特点。与干式

燃烧相比其优点是：

(1) 由于蒸汽比空气携带热焓值大，因而能更为有效地进行热量的传递；

(2) 燃烧前缘的蒸汽带比较大，可更有效地驱扫油层，提高驱油效率；

(3) 燃烧区内燃料消耗量低，可降低空气注入量，提高了经济效益。

3. 返向燃烧法

返向燃烧法的燃烧过程是空气流动方向与燃烧前缘的运动方向相反。即注气井连续注入空气一直到与生产井沟通，然后由生产井点火燃烧，燃烧前缘向注气井方向燃烧，而被加热的油则被驱替至生产井采出。由于下列原因，此方法难以实现：

(1) 一般烧掉的是轻质组分，重质焦油却残留在砂层中；

(2) 点火时生产井井底结构易受损坏；

(3) 注入井附近最后将发生自燃，变成向前燃烧；

(4) 过程难于控制，驱油效率低，使此法无法投入应用。

蒸汽吞吐、蒸汽驱以及火烧油层是当前国内外开采稠油较为普遍采用的方法，其优缺点对比见表 1.3。

表 1.3 蒸汽吞吐、蒸汽驱与火驱对比

工艺	优缺点	优点	缺点
	内容	与蒸汽驱比较	与蒸汽驱比较
蒸汽吞吐		①油产量反应早；②可用于粘度高的重油油藏；③与油藏连续性关系不大；④裂缝影响不大；⑤钻井灵活性较大	对驱油能量小的油藏适应性较差
		与火驱比较	与火驱比较
		①驱油机理易于明白；②产出油的处理问题少；③容易操作	①不适宜深而薄的油层；②需给蒸汽锅炉供淡水

续表

工艺	优缺点	优点	缺点
	内容	与蒸汽驱比较	与蒸汽驱比较
蒸汽驱		与蒸汽吞吐比较	与蒸汽吞吐比较
		①能驱扫蒸汽吞吐所不能驱到的油；②较适宜于驱油能量缺乏的油藏；③采收率高	①与油藏连续性，和热的沟通的关系比较大；②初始产量反应不好；③钻井灵活性较小；④如有裂缝则可能产生不利的效果
		与火驱比较	与火驱比较
		①易操作；②驱油机理简单易掌握；③产出油处理问题少	①不适宜深而薄的油藏；②需供给蒸汽锅炉淡水
火驱		与蒸汽驱比较	与蒸汽驱比较
		①理论上采收率高；②适合用于相对薄的油藏；③产出水不需要处理，便可用于注水	①产出油较难处理；②操作较困难；③驱油机理复杂
		与蒸汽吞吐比较	与蒸汽吞吐比较
		①由于无井筒热损失更适宜于较深的油藏；②更适宜于驱油能量缺乏的油藏	①需要原油在初始条件下可流动；②无增产反应；③钻井灵活性小；④油藏若有裂缝则不利

第三节 稠油热采概况

一、世界稠油热采概况

稠油热采早在 20 世纪初就开始了工业性试验。1931 年在美国得克萨斯州伍德森附近的威尔森、斯旺两个油矿进行了蒸汽驱现场试验，1934 年在前苏联进行了火烧油层试验，1959 年在委内瑞拉由壳牌公司在明格兰德油藏进行了蒸汽吞吐。60 年代之后，由于热力开采技术的发展，稠油资源比较丰富的美国、加拿大、委内瑞拉等国开始了工业化生产。