

油田开发提高采收率技术丛书

丛书主编 沈平平

EOOR

热力采油 提高采收率技术

张义堂 等编著

石油工业出版社

油田开发提高采收率技术丛书
丛书主编 沈平平

热力采油提高采收率技术

张义堂 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

《热力采油提高采收率技术》是《油田开发提高采收率技术丛书》的分册之一,专门介绍了稠油热采技术的内容。

本书共分五章,第一章概述了全球稠油储量、稠油分类、稠油开采技术、稠油产量及稠油在石油开发中的重要地位;第二章论述了高温蒸汽下的稠油油藏物性及开采特点;第三章介绍了热采提高采收率机理物理模拟研究方法;第四章介绍了热采数值模拟方法;第五章以较大的篇幅列举实例介绍了高轮次蒸汽吞吐技术中深层蒸汽驱技术、超稠油注蒸汽开采技术、水驱后注蒸汽开采技术、火烧油层开采技术、注采工艺及地面工程等。

本书可供从事稠油热采机理、油藏工程、数值模拟等研究的科研人员、技术人员及院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力采油提高采收率技术/张义堂等编著.

北京:石油工业出版社,2006.5

(油田开发提高采收率技术丛书)

ISBN 7-5021-5255-5

I. 热…

II. 张…

III. 热力采油—采收率(油气开采),提高—技术

IV. TE357.44

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第119982号

热力采油提高采收率技术

张义堂 等编著

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.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:18.75

字数:477千字 印数:1—3000册

定价:90.00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

《油田开发提高采收率技术丛书》

编 委 会

主 任 沈平平

副主任 闫存章 袁士义 罗治斌 张卫国 王元基 刘玉章

委 员 杨普华 胡永乐 张义堂 韩 冬 钟太贤 王红庄

俞 理 张正卿

编辑组成员

李春如 咸玥瑛 章卫兵 贾 迎 何 莉

序

我国东部已开发油田大多发现在陆相含油气盆地，油源来自湖相生油层，储层以陆相碎屑岩沉积为主，与国外海相沉积油田相比，纵向上和平面上非均质性严重，原油粘度较高，水驱采收率较低。我国分别于1990年和1996年开展了两次陆上油田提高石油采收率潜力评价及发展战备研究，明确了我国油田提高采收率潜力和工作方向，确定了化学驱为我国东部主力油田提高采收率的主攻方向。经过石油人几十年的共同努力，我国提高石油采收率技术，特别是化学驱提高采收率技术已达到国际领先水平，为减缓我国东部老油田的产量递减做出了重要贡献。

作为几十年从事油田开发提高石油采收率的研究工作者，自己亲历了我国提高石油采收率技术从无到有、从室内走入矿场、从简单的探索试验到进入大规模工业性应用阶段的全过程，深深感到我国已经初步形成了具有中国特色的提高石油采收率技术系列，有着深厚的理论基础和丰富的现场实践经验，需要总结出一套提高石油采收率系列丛书，以进一步推动我国提高石油采收率技术的发展。

《油田开发提高采收率技术丛书》共分6个分册，包括总论、聚合物驱、化学复合驱、热力采油、注气、微生物等目前主要的提高石油采收率方法，全书共300余万字。它是我国提高石油采收率科技工作者辛勤劳动和智慧的结晶，是近10年来提高石油采收率理论、技术、方法的总结和实践经验的积累与升华，适合广大油田开发工作者和石油高等院校的学生阅读。

提高石油采收率是油田开发永恒的主题，技术创新、科技进步是保持我国油气田开发业务发展的重要源泉。根据目前我国油田的开发形势，东部老油田大部分已进入高含水和高采出程度阶段，老油田开发难度越来越大，对提高采收率技术的要求越来越迫切和广泛，提高石油采收率技术在“十一五”和今后必将发挥越来越重要的作用。让我们继续努力，为进一步提高我国注水开发油田采收率，保持我国原油产量稳定和增长、满足国民经济发展对石油的需求做出新的、更大的贡献！

韩永臣

2005年9月

编 著 说 明

中国已开发油田多数已处于高含水和高采出程度阶段，东部多数老油田综合含水高达 85% 以上，可采储量采出程度达到 70% 以上。老油区经过多年加密调整和注水开采，依靠常规方法开采稳产难度越来越大。由于中国油田大多为陆相沉积，油藏非均质性严重，原油粘度较高，因而水驱采收率较低。目前中国注水开发油田平均采收率仅为 32%，有 68% 的地质储量依靠常规开发技术难以采出，只有依靠新技术才能进一步提高油田采收率。

根据 1999 年全国提高采收率潜力评价结果，在各种提高采收率方法中，聚合物驱覆盖储量 $29.1 \times 10^8 \text{t}$ ，三元复合驱覆盖储量 $32.7 \times 10^8 \text{t}$ ，注气提高采收率（包括混相、近混相和非混相）覆盖储量 $12.3 \times 10^8 \text{t}$ ，热力采油覆盖储量 $5.8 \times 10^8 \text{t}$ 。上述 4 种方法累计覆盖储量 $79.9 \times 10^8 \text{t}$ ，可平均提高采收率 14.8%，增加可采储量 $11.83 \times 10^8 \text{t}$ ，潜力巨大。

中国对油田开发提高采收率技术极为重视，投入了大量的人力、物力进行理论技术攻关研究和现场试验，取得了丰硕的研究成果，特别是通过“八五”、“九五”科技攻关以及国家 973 项目“大幅度提高石油采收率的基础研究”的研究，在国产化学剂研制、驱油机理研究、油藏精细描述、渗流规律和模拟研究及矿场先导性试验等方面取得了较大进展，大大促进了中国油田开发提高采收率技术的发展。目前热采和聚合物驱已经得到工业化应用，三元复合驱技术经历了从机理研究—表面活性剂主剂国产化—先导性试验—扩大先导性试验—工业性试验等 5 个关键步骤的全过程研究，初步具备了工业化应用条件。注气、微生物采油等提高采收率技术迅速发展，矿场试验已有良好开端。

由此可见，提高石油采收率技术在中国原油生产中发挥着越来越重要的作用，为适应中国油田开发形势的需要，总结提高采收率技术研究与应用的经验，进一步推动提高采收率技术的发展，2002 年在中国石油天然气集团公司和中国石油天然气股份有限公司领导的支持下，决定编辑出版《油田开发提高采收率技术丛书》，并成立了丛书编委会，沈平平为编委会主任，下设有副主任、委员和编辑组。

在丛书编写期间，编委会多次组织研讨会，确定了各分册的编写人员，邀

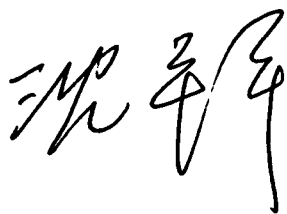
请了多名专家参加，研究确定了各分册四级提纲。各分册初稿完成后，编委会进行了研讨，并先后送交韩大匡院士和冈秦麟、杨普华等专家审阅，提出了许多宝贵的修改意见。前后用了3年的时间，各分册已陆续完成定稿，并相继出版。

丛书总论部分由沈平平、袁士义编写，曾多次组织专家讨论评审，最后由丛书编委会审查定稿。总论部分概述了国内外提高采收率研究与应用的历史及现状，简要介绍了中国近10年来聚合物驱、化学复合驱、热力采油、注气和微生物驱油等技术的进展以及现场应用情况，最后对中国提高采收率工作的发展进行了展望，提出了未来中国提高采收率研究的方向。

《油田开发提高采收率技术丛书》是一套系列性科技专著，是中国提高采收率工作者10多年经验的结晶。全书分为《总论》、《聚合物驱提高采收率技术》、《化学复合驱提高采收率技术》、《热力采油提高采收率技术》、《注气提高采收率技术》、《微生物提高采收率技术》6个分册，系统地反映了中国近年来提高采收率技术的最新科研成果，既包括科学研究工作的系统总结，也包括油田现场应用的经验积累。各分册都包含油田应用的具体实例，具有先进性、系统性及实用性，可供从事油田开发、油藏工程、三次采油工作的专业技术人员参考，也可供有关大专院校师生学习阅读。

编委会对所有参加本丛书编写、研讨和曾经给予支持帮助的领导和专家表示衷心感谢。同时，感谢石油工业出版社对本书所给予的大力支持。

限于编者水平，书中难免有错误或不当之处，恳请同行和读者批评指正。



2005年9月

前 言

《热力采油提高采收率技术》是针对稠油油藏采用热力开采技术提高采收率的一本专业书。

1958 年，在中国新疆准噶尔盆地发现了浅层稠油，1965 年在黑山浅层油藏进行了蒸汽吞吐试验，1967 年在黑山浅层油藏又开展了蒸汽驱试验；1982 年随着辽河高升稠油油藏蒸汽吞吐的成功，蒸汽吞吐成为辽河稠油油藏开采的主体技术，1984 年开始在新疆浅层稠油油藏进行蒸汽驱试验，并逐渐形成了工业规模。

中国陆上的稠油油藏主要分布在辽河油田、新疆油田、胜利油田、河南油田，此外，在华北油田、大庆油田、吉林油田、大港油田、吐哈油田、塔里木油田相继发现稠油油藏，油藏深度从 100 多米到 5000 多米，油藏类型包括砂岩、砂砾岩、石灰岩，油层厚度从几米到 100 多米，原油粘度从上百毫帕秒到几十万毫帕秒，有的油藏具有明显的边、底水，给热力开采增加了难度。目前，中国稠油年产量约占年原油总产量的 10%。全球稠油储量非常丰富，稠油资源量约为普通原油资源量的 3 倍。根据中国第二次全国资源的评价资料，中国稠油的资源量约有 $198.7 \times 10^8 \text{t}$ ，目前全国陆上仅探明约 $18 \times 10^8 \text{t}$ ，稠油勘探潜力巨大。随着稠油储量的不断发现，稠油将在原油产量中占有越来越重要的地位。

中国对稠油开采技术极为重视，投入了大量的人力、物力进行理论与技术攻关研究和现场实验，并取得了丰硕的成果。特别是通过“七五”“八五”“九五”科技攻关及国家 973 项目的研究，大大促进了热力采油技术的发展。稠油开采技术经过 20 多年的研发和矿场实验，已经形成了普通稠油蒸汽吞吐配套开采技术、超稠油蒸汽吞吐配套开采技术和蒸汽驱配套开采技术，蒸汽吞吐和蒸汽驱已成为稠油油藏的主要开采方式。本书重点论述了高温蒸汽下的稠油油藏物性及开采特点、热采提高采收率机理的物理模拟研究方法和热采数值模拟方法，同时对中国近些年来在稠油热采上取得的进展，如超稠油蒸汽吞吐、中深层蒸汽驱、高轮次蒸汽吞吐和水驱稠油油藏转注蒸汽开采等，进行了初步总结。

本书各章编写人员如下：

第一章 概述

张义堂

第二章	稠油油藏热物性及注蒸汽采油特点	张义堂	张 建
第三章	热采提高采收率机理物理模拟研究方法	沈德煌	陈亚平
第四章	热采数值模拟技术	吴淑红	张 建
第五章	各种热采提高采收率技术		
	高轮次蒸汽吞吐技术		高永荣
	蒸汽驱技术		李秀变
	超稠油注蒸汽技术		刘尚奇
	水驱油藏后注蒸汽开采技术		于立君
	火烧油层技术		陈亚平
	稠油注蒸汽采油工艺技术		常毓文

其中张义堂对第一、二、三章的内容进行了审定，并提出了修改意见，常毓文对第四、五章的内容进行了审定，并提出了修改意见。

本书是在编委会的组织领导下编写完成的，尤其是沈平平教授在组织编写过程中给予了高度的关心和指导，沈平平教授和岳清山教授对本书提出了很好的修改意见，在此一并表示谢意。

作者

2005 年 6 月

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 世界稠油资源	(2)
一、稠油的定义及分类	(2)
二、世界稠油的资源量	(2)
三、世界稠油开采状况	(3)
第二节 热力采油的发展史	(4)
一、蒸汽吞吐采油	(4)
二、蒸汽驱采油	(8)
三、超稠油的蒸汽辅助重力泄油开采技术	(10)
四、热水驱采油	(10)
五、火烧油层	(11)
第三节 热力采油的发展趋势	(12)
一、高轮次蒸汽吞吐阶段的开采技术	(12)
二、深层稠油汽驱采油	(13)
三、水驱稠油油藏转注蒸汽开采	(13)
四、超深层稠油、滩海及海上稠油的开采技术	(13)
五、水平井及多分支水平井开采稠油技术	(13)
参考文献	(14)
第二章 稠油油藏热物性及注蒸汽采油特点	(15)
第一节 水蒸气热物性	(15)
一、水的相态特性	(15)
二、水蒸气的饱和压力与饱和温度	(15)
三、水蒸气热焓特性	(16)
四、水蒸气比容的变化	(17)
五、水蒸气粘度	(18)
六、水蒸气热物性变化引出的思考	(19)
第二节 稠油热物性	(20)
一、稠油粘度对温度的敏感性	(20)
二、稠油密度及热膨胀系数	(21)
三、稠油比热	(22)
第三节 油层岩石的热物性	(22)
一、岩石的比热和热容	(22)
二、岩石的导热系数	(23)
三、岩石的热扩散系数	(25)
四、岩石的热膨胀系数	(25)

第四节 稠油在多孔介质中的渗流特征	(25)
一、稠油的流变性	(25)
二、油水粘度比对驱油效率的影响	(26)
三、岩石润湿性对驱油效率的影响	(27)
四、不同温度下稠油的渗流特征	(27)
第五节 注蒸汽驱油特点	(28)
一、降粘作用	(30)
二、热膨胀作用	(31)
三、蒸汽的蒸馏作用	(31)
四、蒸汽的脱油作用	(32)
五、油的混相驱作用	(32)
六、溶解气驱作用	(33)
七、乳化液驱油作用	(34)
八、高温对相对渗透率的影响	(34)
参考文献	(35)
第三章 热采提高采收率机理物理模拟研究方法	(36)
第一节 注蒸汽提高采收率技术物理模拟研究方法	(36)
一、原油流变特性研究	(37)
二、注蒸汽油层物性及高温相对渗透率特性研究	(39)
三、单管模型研究注蒸汽提高采收率的开采机理	(44)
四、原油注蒸汽蒸馏模拟研究	(50)
五、岩石及流体热物性参数	(55)
六、相似物理模拟技术	(58)
七、稠油油藏热水加氮气泡沫段塞驱物理模拟研究	(69)
八、X 射线断层扫描技术 (CT) 在稠油岩心驱替中的应用	(73)
第二节 火烧油层室内物理模拟实验	(78)
一、燃烧釜实验	(78)
二、燃烧管实验	(80)
参考文献	(83)
第四章 热采数值模拟技术	(85)
第一节 热采数值模拟技术概述	(85)
一、热采数值模拟技术发展	(85)
二、热采油藏模拟软件的主要功能	(87)
三、热采数值模拟配套技术	(87)
第二节 热采油藏模拟的基本数学模型	(88)
一、基本假设	(88)
二、基本微分方程	(89)
三、约束方程	(93)
四、定解条件	(94)
五、微分方程和求解变量说明	(94)

六、差分方程组	(95)
第三节 线性方程组的求解	(106)
一、D4 排序的 LU 分解法	(107)
二、 LU 分解法	(108)
三、不完全 LU 分解的正交极小化方法	(108)
第四节 热采数值模拟的主要方法	(109)
一、建立油藏数学模型	(109)
二、生产动态历史拟合	(112)
三、开发方式敏感性分析	(113)
四、数值模拟开发效果预测	(115)
第五节 相对渗透率曲线及其应用	(116)
一、相对渗透率曲线	(116)
二、相对渗透率曲线的归一化处理	(118)
三、不同温度条件下的相对渗透率曲线	(119)
四、相对渗透率曲线的滞后处理	(119)
五、历史拟合中对相对渗透率曲线的调整	(120)
第六节 稠油热采数值模拟主要输入参数	(121)
一、网格及油藏描述参数	(121)
二、流体参数	(122)
三、岩性数据	(122)
四、初始化数据	(122)
五、数值方法参数	(122)
六、井和动态数据	(122)
参考文献	(123)
第五章 各种热采提高采收率技术	(124)
第一节 高轮次蒸汽吞吐技术	(124)
一、中国稠油油藏高轮次吞吐的开采特点及状况	(124)
二、改善高轮次蒸汽吞吐效果的技术措施	(124)
三、多井整体蒸汽吞吐	(148)
四、提高油藏纵向动用程度	(150)
五、其他提高高轮次吞吐效果技术	(165)
第二节 蒸汽驱技术	(167)
一、蒸汽驱油藏筛选标准	(167)
二、蒸汽驱的操作条件	(173)
三、汽驱实例	(177)
第三节 超稠油注蒸汽技术	(198)
一、直井蒸汽吞吐技术	(198)
二、水平井蒸汽吞吐技术	(205)
三、蒸汽辅助重力泄油技术	(207)
四、水平裂缝辅助蒸汽驱 (FAST) 技术	(215)

五、超稠油开采的前沿技术	(218)
第四节 水驱油藏注蒸汽开采技术	(220)
一、水驱油藏注蒸汽的主要机理	(220)
二、水驱油藏注蒸汽的适应性	(223)
三、开发实例	(235)
第五节 火烧油层技术	(246)
一、火烧油层机理及特性	(246)
二、火烧油层室内实验及初步设计	(251)
三、火烧油层的生产动态特征	(257)
四、应用实例	(258)
第六节 稠油注蒸汽采油工艺技术	(279)
一、完井方式	(280)
二、井筒隔热技术	(280)
三、井筒降粘及举升技术	(280)
四、防砂技术	(282)
五、高温动态监测技术	(282)
六、高温调剖技术	(284)
参考文献	(285)

第一章 概述

热力采油是一项大幅度提高原油采收率的技术，主要包括蒸汽吞吐、蒸汽驱、热水驱、火烧油层等。热力采油主要用于稠油油藏，此外还用于高凝油油藏的开采，普通黑油油藏也开展过热力采油的尝试。热力开采石油是目前世界上规模最大的提高原油采收率（EOR）工程项目，据不完全统计^[1]，到2002年，正在开展的热力采油项目有154个，2002年热力开采的原油产量约达 $7360 \times 10^4 \text{t}$ （图1）。

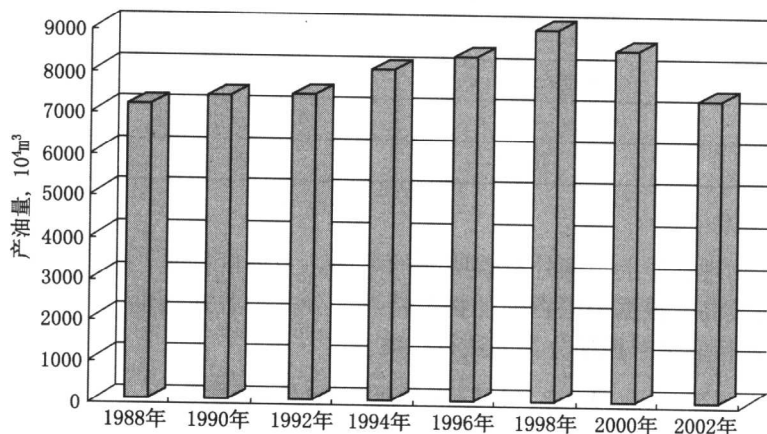


图 1.1 1988—2002 年世界热采稠油产量（前苏联地区除外）

热力采油的效果主要体现在加热降粘、热膨胀、轻烃蒸馏、岩石表面向水湿转变、油相渗透率增加、乳化驱替等等。图 1.2^[2]是注蒸汽热力采油各种机理对采收率（OIP）的贡献图，对于稠油，其粘度降低的贡献最为显著。

适合蒸汽吞吐的普通稠油油藏的采收率一般在 20% 原始石油地质储量（OOIP）以上，适合蒸汽驱的普通稠油油藏一般在 50% OOIP 以上，甚至达到 70% OOIP，适合火烧的普通稠油油藏的采收率最高可达 60% OOIP。

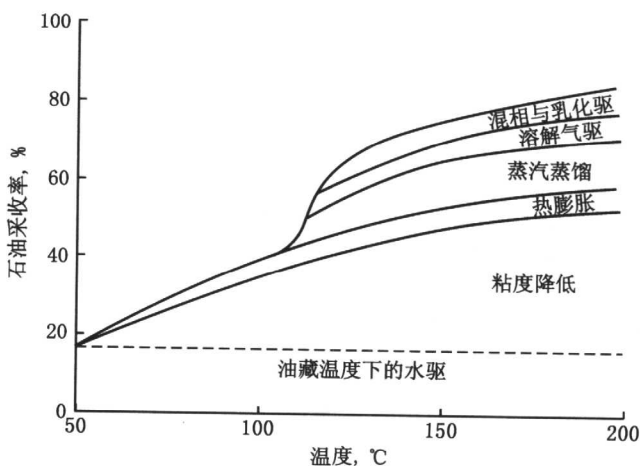


图 1.2 蒸汽驱采油中各重要机理的贡献（10°API~20°API 的重油）

热力采油既然是一项大幅度提高采收率的技术，它的应用范围有多大，它对世界石油能源的供给将发挥多大的作用？下面看看全球稠油资源量及开采状况就可以得出这样的结论：稠油将是 21 世纪能源的新星。

第一节 世界稠油资源

一、稠油的定义及分类

1976 年 6 月在加拿大召开的第一届国际重油及沥青砂学术会议上，讨论了相关的定义及分类标准。重油是指在原始油藏温度下脱气原油粘度在 $100 \sim 10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 或者在 15.6°C 及大气压下密度为 $934 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ 的原油。表 1.1^[3] 是联合国培训研究署 (UNITAR) 推荐的分类标准。

表 1.1 UNITAR 推荐的重油及沥青分类标准

	第一指标	第二指标	
	粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$	密度 ($60^\circ\text{F}^\text{①}$), kg/m^3	API 重度 (60°F), $^\circ\text{API}$
重油	$100 \sim 10000$	$934 \sim 1000$	$20 \sim 10$
沥青	> 10000	> 1000	< 10

注：① $1^\circ\text{F} = (\frac{5}{9}^\circ\text{C})$ 。

中国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，中国稠油的粘度相对较高。根据中国稠油的物理特点，分类为普通稠油、特稠油和超稠油，表 1.2^[3] 是中国石油行业关于稠油分类的试行标准。

表 1.2 中国石油行业稠油分类试行标准

稠油分类		主要指标	辅助指标
名称	类别	粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$	相对密度, 20°C , g/cm^3
普通稠油	I	$50^\text{①}$ (或 100) ~ 10000	> 0.9200
	亚类 I - 1	$50^\text{①} \sim 150^\text{①}$	> 0.9200
	I - 2	$150^\text{①} \sim 10000$	> 0.9200
特稠油	II	$10000 \sim 50000$	> 0.9500
超稠油 (天然沥青)	III	> 50000	> 0.9800

注：①指油层条件下粘度；其他指油层温度下的脱气油粘度。

二、世界稠油的资源量

据报导^①，目前常规石油和天然气各有 $(0.8 \sim 1.0) \times 10^{12}$ 原油当量桶的剩余储量，而

① 第七届重油及沥青砂国际会议论文集，Douglas Lanier，重油——21 世纪的主要能源，田浩泽。

稠油的地质储量约为 $6.3 \times 10^{12} \text{ bbl}^{\text{①}}$ ，即大约 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，巨大的资源量决定了稠油将可能成为 21 世纪的主要能源。表 1.3 列出了主要稠油生产国的稠油资源量（不含中东地区）。

表 1.3 世界主要稠油生产国稠油及沥青资源^{②[4]}

国 家	探明地质储量, 10^8 m^3		资源量, 10^8 m^3	
	稠 油	沥 青	稠 油	沥 青
美 国	165.4	35.6	(165.4)	92.4
加 拿 大	5.65	2814	11.25	4001
委内瑞拉	432.44	—	1905	—
前 苏 联	4	1211	135	2146.3
中 国	13	3	180	

注 1：稠油指 API 重度小于 20、粘度低于 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油；沥青指 API 重度小于 10、油藏条件下粘度大于 $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的原油。

注 2：委内瑞拉稠油资源包括稠油和沥青两部分。苏联地区勘探程度低，统计不完全。美国稠油资源量缺统计数据，计算资源总量时以已探明地质储量代替。

三、世界稠油开采状况

虽然分析家们多少年来就预计，稠油在满足世界能源需求中的作用会日益增加。但与此预计相反的是，稠油始终只占总产量的 10% 左右，因为开采稠油的高成本和政治方面的原因，生产者首选开采较轻的原油。表 1.4^[1] 是油气杂志每两年一次世界范围内 EOR 调查统计的各国稠油热采产量。图 1.3 是 1988—2002 年美国热采稠油的产量。

表 1.4 世界主要稠油生产国热采产量

单位： 10^4 m^3

热采类别	国 家	1988 年	1990 年	1992 年	1994 年	1996 年	1998 年	2000 年	2002 年
注蒸汽	美 国	2643	2577	2634	2413	2434	2547.5	2423.7	2122.2
	加拿大	916	668	667	713	659.2	872	1083	477.7
	特立达尼	16.7	13.6	9.4	45.0	46.7	53.9	9.6	9.6
	委内瑞拉	2440	2216	1623	1878	1899	2197.7	1890.7	1890.7
	德 国	52.0	72.1	71.6	51.3	57.5	57.5	54.8	
	印度尼西亚	377	841.6	1178	1538	1741	1798.9	1642.2	1392.7
	哥伦比亚	100.4	100.9	88.2	81.2	81.3	81.2	81.2	81.2
	中 国	455.8	733.4	958.0	1126.5	1307	1283.2	1245.5	1314.2
	前苏联				203.1				

① $1 \text{ bbl} = 0.16 \text{ m}^3$

② 第七届重油及沥青砂国际会议论文集。Edward J. Hanzlik, 美国的重油和沥青砂资源现状, 黎文发译; Vincenzo Paglione, 委内瑞拉的重油研究和开采经验, 商辉译; Ø. Haaland, R. klovning 和 T. sen, 世界超重油资源的前景——竞争与潜力, 范从五译; Rasim Diyashav 等, 苏联及俄罗斯重油和沥青砂的综合利用趋势的评述, 黄志强译。

续表

热采类别	国 家	1988 年	1990 年	1992 年	1994 年	1996 年	1998 年	2000 年	2002 年
火烧油层	美 国	37.9	35.3	27.3	14.6	26.0	27.7	16.1	13.8
	加拿大	47.2	39.3	47.5	36.3	36.3	36.3	36.3	36.2
	委内瑞拉								
	前苏联			25.7					
	印 度						2.1	2.1	2.1
热水驱	美 国	16.8	23.1	11.5	3.9	1.5	12.8	1.7	19.5
	加拿大		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55		
	德 国	8.0	5.3	4.3	4.6	4.5	4.5	4.9	
	荷 兰								
	前苏联				15.5				
热采共计		7103.8	7314.2	7322.5	8291.9	8294.55	8975.85	8491.8	7359.9

注：在热采总产量中除 1994 年包含苏联地区外，其他均不包括该地区。

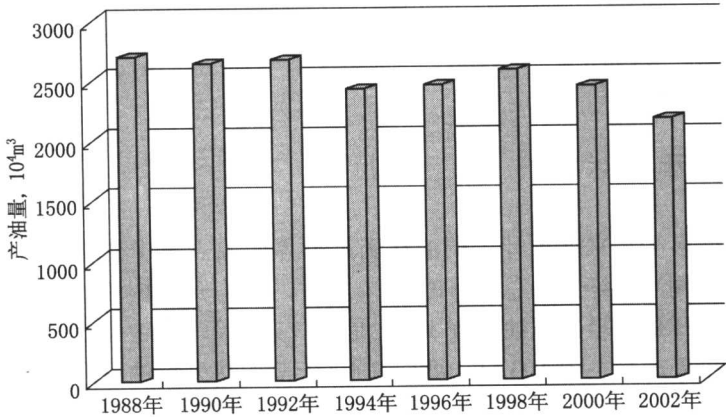


图 1.3 1988—2002 年美国热采稠油产量

第二节 热力采油的发展史

热力开采始于 20 世纪，美国在 20 年代先后多次开展了油层火烧矿场试验，30 年代又进行了蒸汽驱矿场试验。1959 年在委内瑞拉的 Mene Grande 油田首次成功地进行蒸汽吞吐。60 年代以后，注蒸汽开采稠油技术在一些著名的稠油油田得到了推广，如美国的中途日落油田、克恩河油田，加拿大的冷湖油砂区、阿萨巴斯卡油砂区、和平河油砂区，委内瑞拉的奥里诺科重油带，印度尼西亚的杜里油田，以及中国的辽河油田、新疆油田、胜利油田、河南油田等。下面分别介绍蒸汽吞吐采油、蒸汽驱采油、热水驱和火烧采油的发展史。

一、蒸汽吞吐采油

蒸汽吞吐工艺是 20 世纪 50 年代后期在委内瑞拉的美内·格朗德的蒸汽驱小型试验时