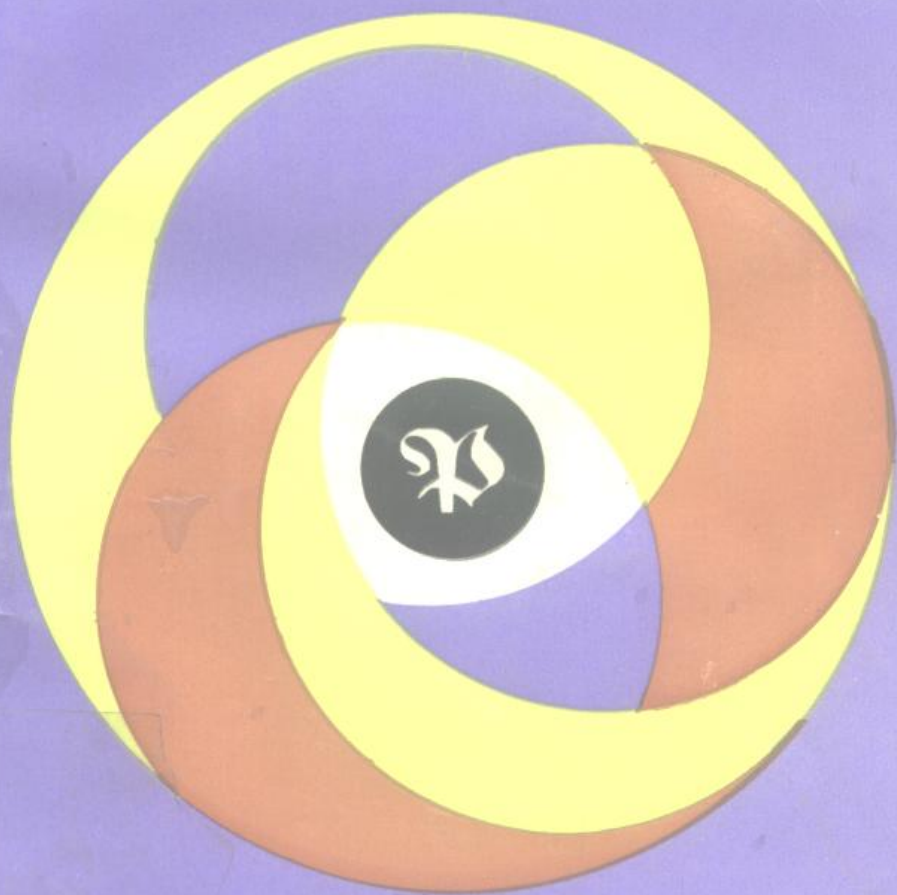


# 注蒸汽热力采油

陈月明 编著



(北京)

7.44

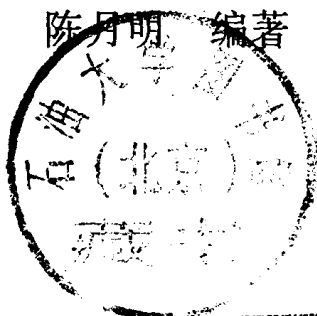
03

石油大学出版社

书号	123967
分类号	TE357.44
种号	003

# 注蒸汽热力采油

陈丹明 编著



石油0117193

石油大学出版社

蒸汽采油

## 内 容 提 要

本书是按照石油院校石油工程等专业的教学需要编写的。全书系统地介绍了注蒸汽热力采油的基本原理和计算方法,主要包括:油藏岩石和流体的热物性、温度对油气水三相相对渗透率影响的计算、地面和井筒的热损失、蒸汽吞吐和蒸汽驱产能预测及蒸汽驱物理模拟和数学模拟等八章内容。

本书既可作为石油院校有关专业的教材,也可供从事热采工作的科研人员和工程技术人员参考。

DPSG/11

## 注蒸汽热力采油

陈月明 编著

\*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

山东省东营新华印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/32 8.5 印张 220 千字

1996 年 2 月第 1 版 1996 年 3 月第 2 次印刷

印数 801—2500 册

ISBN 7-5636-0822-2/TE·168

定价:12.00 元

# 前 言

注蒸汽热力采油是开采稠油(或重油)行之有效的办法。在国外,自70年代以来,注蒸汽热力采油已进入工业性应用阶段。我国自80年代以来,已先后在辽河、新疆、胜利和河南等油区的稠油油田推广应用,并取得显著的经济效益。目前,开采稠油已成为我国原油产量构成的重要组成部分,且有逐步增长的趋势。

注蒸汽热力采油是一项复杂且技术难度大的系统工程,它涉及到油藏地质、油藏工程、采油工程、传热学和经济分析等多门学科。因此,注蒸汽热力采油需要各学科互相配合,协同作战,在油藏工程部门组织下,各负其责才能达到经济、有效地开发稠油的目的。

随着科学技术的发展,为使更多的稠油油藏,如油层深度大于1000m,地面原油粘度大于 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,油层厚度小于10m的油藏投入开发,就要进行稠油油藏开发可行性、蒸汽吞吐和蒸汽驱产量预测方法等研究,以便进行科学管理。

作者自1984年以来,一直在从事教学的同时参加各油区的稠油油藏科研工作,并于1986年开设“注蒸汽热力采油”课程,把作者的研究成果与国内外专家的研究成果相结合进行讲授,以期让学生在掌握热采基本原理和产量预测等基本方法的同时,了解国内外在热力采油方面的科研状况,以便毕业后能较快适应油田的各项工作。

经过多年的教学和大量的科研实践,使本书内容更加丰富,理论与实践结合更加紧密,且更便于学生掌握。

本书共分八章。由于课时的限制,故对注汽井防砂技术、注汽隔热管柱、热封隔器等内容未作介绍,有需要这些方面知识的读

者,请参考有关书籍。

本书虽经多次教学实践,在正式出版前又经仔细地纠错补漏,但由于作者水平和时间所限,错误在所难免,恳请读者和同行批评指正。

在本书整理、修改过程中,得到我校 93 级研究生侯健同志的大力协助,石油大学(北京)郎兆新教授对全书进行了审核,并提出不少宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

陈月明

1995 年 9 月于山东省东营市

# 目 录

## 前言

<b>第一章 注蒸汽热力采油简介</b> .....	(1)
§ 1.1 稠油(或重油)的概念 .....	(1)
§ 1.2 注蒸汽热力采油的基本方法 .....	(3)
§ 1.3 注蒸汽油藏的筛选标准 .....	(4)
§ 1.4 国内外注蒸汽热力采油发展概况 .....	(6)
复习题 .....	(9)
参考文献 .....	(9)
<b>第二章 油藏岩石和流体的热物理性质</b> .....	(10)
§ 2.1 油藏岩石的导热系数 .....	(10)
§ 2.2 油藏岩石的比热、热容量和热扩散系数 .....	(19)
§ 2.3 油藏流体的热物性参数 .....	(25)
复习题 .....	(35)
参考文献 .....	(35)
<b>第三章 温度对油气水三相相对渗透率影响的计算方法</b> ...	(36)
§ 3.1 油气水三相相对渗透率的计算公式 .....	(39)
§ 3.2 温度变化时三相相对渗透率的计算方法 .....	(42)
§ 3.3 相对渗透率的解析表达式 .....	(48)
复习题 .....	(50)
参考文献 .....	(52)
<b>第四章 地面管线的热损失</b> .....	(53)
§ 4.1 架空管线的热损失 .....	(56)
§ 4.2 地下埋管的热损失 .....	(59)
§ 4.3 井口蒸汽干度的计算 .....	(61)

复习题 .....	(62)
参考文献 .....	(63)
<b>第五章 井筒热损失 .....</b>	<b>(64)</b>
§ 5.1 不考虑井筒压力变化的热损失计算 .....	(64)
§ 5.2 考虑井筒中压力变化的热损失计算 .....	(77)
复习题 .....	(84)
参考文献 .....	(85)
<b>第六章 蒸汽吞吐井生产能力预测方法 .....</b>	<b>(86)</b>
§ 6.1 Boberg 和 Lantz 的预测计算方法 .....	(86)
§ 6.2 考虑蒸汽超覆的计算方法 .....	(103)
§ 6.3 蒸汽吞吐井产量特征及影响因素 .....	(115)
§ 6.4 吞吐井生产时的井筒工况分析 .....	(125)
复习题 .....	(140)
参考文献 .....	(140)
<b>第七章 蒸汽驱生产能力预测方法 .....</b>	<b>(142)</b>
§ 7.1 蒸汽驱最佳注入速率 .....	(143)
§ 7.2 半经验产量预测方法 .....	(152)
§ 7.3 蒸汽驱解析解模型 .....	(157)
复习题 .....	(170)
参考文献 .....	(171)
<b>第八章 蒸汽驱的物理模拟和数学模拟 .....</b>	<b>(173)</b>
§ 8.1 蒸汽驱的数学描述 .....	(174)
§ 8.2 物理模拟 .....	(183)
§ 8.3 数学模拟 .....	(208)
复习题 .....	(232)
参考文献 .....	(232)
<b>附录一 饱和水蒸汽性质表及回归公式 .....</b>	<b>(235)</b>
<b>附录二 地下埋管经过地层的热传导 .....</b>	<b>(242)</b>
<b>附录三 奥尔基捷维斯基(Orkiszewski)方法 .....</b>	<b>(247)</b>

附录四 加热面积公式(6-16)的推导.....	(255)
附录五 单位换算表.....	(258)
主要参考书目.....	(264)



# 第一章 注蒸汽热力采油简介

## § 1.1 稠油(或重油)的概念

稠油是指粘度很大的原油,重油是指密度很高的原油。粘度和密度通常呈正比关系,即粘度大,密度一般就高。因此,我们讲稠油,也就意味着讲重油。

联合国训练署于1979年6月在加拿大召开了第一届国际重油及沥青砂会议,1981年2月在美国纽约召开了专家会议,会上通过了关于重油和沥青砂的标准:

(1) 重油是指在原始油藏温度下,脱气油粘度为 $100 \sim 10000 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,或在 $15.6^\circ\text{C}$  ( $60^\circ\text{F}$ )及大气压下的密度为 $0.934 \sim 1.000 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

(2) 沥青砂是指在原始油藏温度下,脱气油粘度大于 $10000 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,或在 $15.6^\circ\text{C}$  ( $60^\circ\text{F}$ )及大气压下的密度大于 $1.000 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

我国利用注蒸汽热力采油开始于80年代初期,经过近10年的努力,已制定出一套适合我国实际情况的稠油分类标准,见表1-1。

通常我们讲稠油是指Ⅰ类以上的普通稠油。

我国蕴藏着丰富的稠油资源。截止到1990年底,据统计我国总共探明和控制的稠油储量约 $16.4 \times 10^8 \text{t}$ ,其中辽河油区为 $6.78 \times 10^8 \text{t}$ ,占41.35%;新疆油区为 $6.66 \times 10^8 \text{t}$ ,占40.64%;胜利油区为 $2.11 \times 10^8 \text{t}$ ,占12.88%;河南为 $0.32 \times 10^8 \text{t}$ ,占1.98%,其它油区(大港,江汉,二连)为 $0.52 \times 10^8 \text{t}$ ,占3.16%,见图1-1。因此,开发稠油对我国具有重要的现实意义。

表 1-1 我国稠油分类标准

稠油分类		主要指标 粘度(mPa·s)	辅助指标 相对密度(20℃)
普通稠油	I	50*~100*	>0.9000(<25°API)
	II	100*~10000	>0.9200(<22°API)
特稠油		10000~50000	>0.9500(<17°API)
超稠油(天然沥青)		>50000	>0.9800(<13°API)

\* 指油藏条件下的原油粘度；  
无\* 指油藏温度下脱气油的粘度。

开发稠油目前存在很大困难,这主要由于:

(1) 在油藏条件下,由于原油粘度太大,因此,无法用常规开采方法(即所谓冷采)。无论采用多大的生产压差,原油也不能从油层流入井中,属于难开发油藏。

(2) 由于油流不能入井,因而无法取得地层原油样品,无法测得地层压力、温度等资料,给油藏性质研究带来困难。

因此,我国在 60、70 年代,对稠油有一种说法:“油稠,人愁,原油不流”,因而,见稠就怕、见稠就舍,致使大量的稠油资源无法利用。

自 80 年代初开始,我国引进国外注蒸汽热力采油的方法以来,在广大科技干部和工人的共同努力下,1990 年我国稠油热采产量达  $733 \times 10^4 \text{t}$ ,1991 年又增加到  $830 \times 10^4 \text{t}$ 。随着我国石油工业的发展,注蒸汽热力采油已成为开发稠油的重要手段。

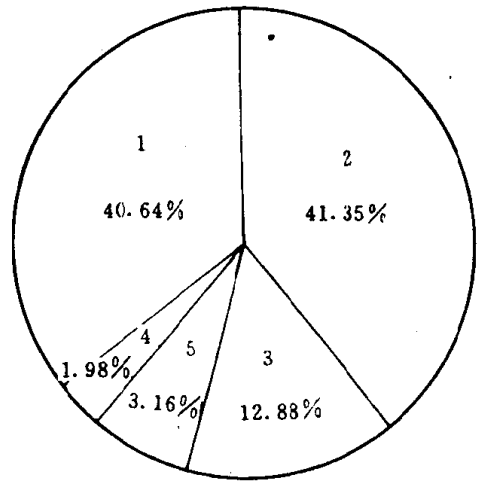


图 1-1 我国稠油储量与分布状况  
1-新疆油区;2-辽河油区;3-胜利油区;  
4-河南油区;5-其它油区

## § 1.2 注蒸汽热力采油的基本方法

注蒸汽热力采油的基本方法有两种:蒸汽吞吐与蒸汽驱。

### 1. 蒸汽吞吐

蒸汽吞吐(Huff and Puff; Steam Soak; Cycle Steam Injection; Steam Stimulation)是指在本井完成注蒸汽、焖井和开井生产三个连续过程,从注蒸汽开始至油井不能正常生产为止,即完成一个过程,称为一个周期。根据油藏实际情况,可吞吐若干个周期。

### 2. 蒸汽驱

蒸汽驱(Steam Drive; Steam flooding)是指按一定井网(根据开发方案要求),在注汽井连续注汽,周围油井以一定产量生产。注入的蒸汽既是加热油层的能源,又是驱替原油的介质。当油汽比(即注入 1t 蒸汽采出的原油量)达到一定经济极限时(一般为 0.15t),则蒸汽驱结束。

蒸汽吞吐和蒸汽驱是既有区别又有联系的两个过程。蒸汽吞吐一方面可采出一定量的原油,另一方面通过蒸汽吞吐采出一定量原油后,地层压力降低,进一步发挥蒸汽的膨胀作用,为蒸汽驱作了必要的准备。同时,由于蒸汽吞吐属于衰竭式开采,为进一步提高采收率,蒸汽驱是蒸汽吞吐发展的必然结果。

蒸汽吞吐和蒸汽驱所以能开采稠油主要有以下原因:

(1) 蒸汽是一种热能,注入地层后,能大大提高油层温度。随着油层温度升高,可以产生以下效应:

- ① 原油粘度大大降低,增加了原油的流动系数。
- ② 油层岩石和流体体积膨胀,增加了弹性能量。
- ③ 原油中的轻质油分易挥发,它进入汽相使原油便于流动,即起到所谓抽提作用。
- ④ 油相相对渗透率有增加的趋势,从而增加了原油的流动能力。

(2) 蒸汽是一种物质,注入地层后,有以下效应:

① 提高地层压力,增加了驱油能量。

② 清除井壁污染,降低了井底附近阻力。因此,蒸汽吞吐有利于出油,蒸汽驱时减少了注汽井的流动阻力。

综上所述,注蒸汽热采效果的好坏主要取决于蒸汽热量的利用程度,即从蒸汽发生器出来的热量,能尽可能多地注入油层;注入油层的热量尽可能多地加热油层;而从油层返至井筒携带出来的热量尽可能地减少。热损失主要包括以下几部分:

(1) 地面管线的热损失;

(2) 井筒的热损失;

(3) 上下盖、底层的热损失;

(4) 注入蒸汽的超覆现象;

(5) 生产井带出的热量。

为了提高热能的利用程度,减少热能损失应采取以下措施:

(1) 地面保温。

(2) 井筒采用绝热管柱,环空采用空气或充以氮气,底部应安装封隔器。

(3) 注入蒸汽要有一定的速率,以减少井筒和上下盖、底层的热损失。

(4) 生产时要有一定速率,以减少生产井的热损失。

### § 1.3 注蒸汽油藏的筛选标准

注蒸汽热力采油不仅取决于地面蒸汽发生器等的状况,更主要取决于油层状况,因此,针对目前技术条件,对油藏条件要进行筛选。只有在不超越目前科学技术发展的客观水平下,稠油油藏才能进行开发。

关于筛选标准,应从以下几方面进行考虑:

(1) 油层要有足够的储量。不仅要有一定的面积、有效厚度和

储量丰度,而且孔隙度、原始含油饱和度也要大于某一数值。

(2) 油层条件下要有一定的流度,即油层绝对渗透率要大于某一数值,地层油粘度要小于某一数值。

(3) 尽量减少热损失。即油层深度要小于某一数值,油层有效厚度要大于某一数值,有效厚度与总厚度之比要大于某一数值。

(4) 没有强烈的边、底水和气顶作用。

(5) 油层中没有明显的裂缝存在。

目前,国外一般的筛选标准见表 1-2,我国的筛选分等标准见表 1-3。

表 1-2 国外一般筛选标准

项 目	筛 选 标 准
油层深度 (m)	<1000
油层有效厚度 (m)	>10
有效厚度/总厚度 (%)	>50
孔隙度 (%)	>20
原始含油饱和度 (%)	>40
油层绝对渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	>200
原油粘度 (mPa · s)	<4000

表 1-3 我国筛选标准分等指标

油藏地质参数	一 等		二 等 特殊吞吐技术
	常规吞吐	蒸汽驱	
(1) 原油粘度 (mPa · s)	50~10000	50~10000	10000~100000
相对密度	>0.9200	>0.9200	0.9200~1.000
(2) 油层深度 (m)	150~1500	150~1000	150~1000
(3) 油层纯厚度 (m)	>5.0	>10.0	>10.0
纯厚/总厚	>0.4	>0.5	>0.4
(4) 孔隙度 $\phi$	>0.20	>0.20	>0.20
含油饱和度 $S_{oi}$	>0.50	>0.50	>0.50
$\phi \times S_{oi}$	>0.10	>0.10	>0.10
储量系数 [ $\times 10^4 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{m})$ ]	>10.0	>10.0	>10.0
(5) 渗透率 ( $\mu\text{m}^2$ )	>0.25	>0.25	>0.25

表 1-4 我国蒸汽驱先导试验区地质参数

试验区 参 数	克拉玛依油田 九 <sub>3</sub> 区	克拉玛依油田 九 <sub>1</sub> 区	高升油田	单家寺油田* 单 2 区
原油粘度 (mPa·s)	5466	3100	5000	3800
相对密度	0.929	0.927	0.95	0.97
油层深度(m)	242	185	1600	1100
油层纯厚度(m)	8.4	15	20~60	59.4
纯厚/总厚		0.375		0.80
孔隙度	0.32	0.327	0.24	0.30
含油饱和度	0.61	0.693	0.55	0.65
渗透率( $\mu\text{m}^2$ )	3.40	4.16	1.20~3.80	3.0~15.0

\* 单家寺具有强烈边、底水的作用。

应当说明,随着科学技术的进步,筛选标准将会不断地被修改。总的来说,其筛选指标的要求将会不断降低。

现列出我国几个蒸汽驱先导试验区的地质参数,以分析其有利条件和不利条件(见表 1-4)。

从表 1-4 可以看出,克拉玛依油田的特点是油层浅;单家寺油田的特点是油层厚度大,但有强烈的边底水作用;高升油田油稠,油层也较深,所以开采条件最好的是克拉玛依油田。

## § 1.4 国内外注蒸汽热力采油发展概况

根据国外文献调研,早在 1931 年,美国 Texas 州的一个油藏就注过蒸汽,但真正工业性的应用是在 1960 年以后。

蒸汽吞吐最早开始的时间、国家和油田,如表 1-5 所示。

表 1-5 早期蒸汽吞吐的油田

时 间	国 家	油田名称
1960 年	委内瑞拉	Mene Grande
1960 年	荷兰	Schoonebeek
1960 年	美国	Yorba Linda
1964 年	加拿大	Cold Lake

蒸汽驱主要在美国进行。1970 年左右转为蒸汽驱的油田有 Mt. Poso、Midway-Sunset；1980 年左右转为蒸汽驱的油田有 Kern River、South Belridge、San Ardo。

目前，国外进行稠油热采的主要国家是美国、委内瑞拉、加拿大和俄罗斯。

随着注蒸汽热力采油的矿场实践，多种科研活动也随之发展起来，主要有：

1. 初期产量预测模型

- (1) Marx-Langenheim 推导了加热区范围的解析解。
- (2) Boberg-Lantz 蒸汽吞吐产量预测模型。
- (3) Myhill-Stegemier 蒸汽驱产量预测模型。

2. 按比例物理模型

- (1) 高压物理模型。
- (2) 低压物理模型。
- (3) 真空物理模型。

3. 数值模拟

50 年代就提出了描述油藏内油、水、蒸汽以及热流的偏微分方程组，但由于当时计算机的存储小和运算速度低，因而进展缓慢。至 60 年代末，提出了一维、二维蒸汽驱模型，到 70 年代末又提出了三维、高隐式蒸汽驱模型。

我国早在 1965 年就在胜利、新疆、吉林等地开辟了注蒸汽小

型试验区,但由于当时注汽设备、井筒隔热设备及工艺等不完善而告失败。1978年,在辽河油区发现高升油田后,组织了稠油攻关指挥部。1980~1982年,随着我国的改革开放,对国外情况有了较多了解后,注蒸汽热力采油取得了较大发展,并先后在北京石油勘探开发研究院、辽河、胜利、新疆组建了研究队伍。

1982年9月,原石油部按国家“六五”攻关要求,确定蒸汽吞吐为国家攻关项目,并在辽河、新疆、胜利取得了较好的成绩。辽河油田属1600m以内的深井,克拉玛依油田属500m以内的浅井,胜利油田多为1000m的中深井,对它们进行的蒸汽吞吐工艺均取得成功,并获国家科技进步一等奖。

1986~1990年“七五”期间确定蒸汽驱为国家攻关项目,也取得了较好成绩。从“七五”攻关来看,已取得以下八个方面的成绩:

- (1) 稠油油藏的物模和数模研究。
- (2) 注汽井完井技术(管内防砂)。
- (3) 注汽管柱、耐热封隔器、预应力隔热管技术。
- (4) 抽稠技术。
- (5) 注汽井井口装置。
- (6) 稠油油藏物理化学性质对蒸汽驱效果的影响。
- (7) 稠油油藏热物理参数测定及研究。
  - ① 高温、高压导热系数仪。
  - ② 热膨胀测定仪。
  - ③ 多功能气-液平衡测定仪。
- (8) 蒸汽驱化学添加剂研究。
  - ① 薄膜扩散剂(TFSA)。
  - ② 泡沫封堵剂。

1991~1995年,“八五”期间确定水平井采油为国家攻关项目,其中对于稠油的热采水平井也进行了攻关研究,并取得较好的效果。

鉴于我国尚有一部分超稠油尚未动用,因此,随着科学技术的



发展,对超稠油的研究和开发终将提到议事日程上来。

## 复 习 题

1. 试分析注蒸汽热力采油提高原油产量的机理。
2. 根据筛选标准,分析我国新疆、胜利、辽河主要稠油油田开发的可行性。
3. 试述注蒸汽热力采油存在的问题及攻关方向。

## 参 考 文 献

- [1] M. A. Carrigy. Thermal Recovery from Tar Sands, JPT, 1983, Dec.
- [2] C. S. Matthews. Steamflooding, JPT, 1983. Mar.
- [3] Chich chu. State of the Art —— Review of Steamflood Field Project.
- [4] 稠油热采技术——“七五”攻关成果总结, 1990. 10.