



高等院校石油天然气类规划教材

# 热力采油原理与设计

刘慧卿 © 编著



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

# 热力采油原理与设计

刘慧卿 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书以热力采油的基本原理和系统设计为主线,充分考虑稠油热力采油过程的非等温特征,内容涵盖热力采油技术的基本原理和设计方法,包括高温和非等温状态下油藏岩石和流体热物理性质及注蒸汽热力采油技术原理;注蒸汽热力采油油藏工程设计与调整;火烧油层技术原理与设计;热力采油注采工艺设计;热力采油技术数学模拟和物理模拟方法。

本书可以作为石油高等院校石油工程专业学生的教材,也可供从事油气田开发工程的技术人员学习和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热力采油原理与设计/刘慧卿编著.  
北京:石油工业出版社,2013.12  
(高等院校石油天然气类规划教材)  
ISBN 978-7-5021-9846-6

- I. 热…
- II. 刘…
- III. 热力采油—高等学校—教材
- IV. TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 258734 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:331 千字

---

定价:26.00 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

# 前 言

随着世界石油需求量的不断增加,发现大型新油田的机会日益减少,且现有老油田的常规开采效率较低,人们已经把注意力投向提高采收率(EOR)技术。提高采收率方法是增加老油田产量的一种经济有效的途径,有可能将采收率平均提高到65%以上。在气驱、化学驱、热力采油等传统 EOR 方法中,热力采油是技术成熟且开采高黏度重质原油最有效的方法。根据美国《油气杂志》1996 年调查统计,其中热力采油产量占三次采油总产量的 59.1%。在世界各主要产油国的 EOR 产量中,美国 EOR 产量所占比例最大,一般占 40%左右。而美国 EOR 产量中,热力采油方法占 EOR 产量的 60%以上。尽管非混相气驱( $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  及天然气)的比例在迅速增长,热力采油产量的比例有所下降,但实际产量基本保持稳定。

稠油热采早在 20 世纪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注蒸汽现场试验,1934 年在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。20 世纪 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。

早在 20 世纪 60 年代,中国就在新疆克拉玛依油田开展了蒸汽吞吐和蒸汽驱试验,并先后在新疆、胜利、吉林开展火烧油层试验,直至 20 世纪 80 年代初,相继在辽河的高升和曙光油田,新疆克拉玛依的九区、胜利的单家寺等大型稠油油田开展稠油热采的工业性试验,1995 年稠油产量达到千万吨以上,成为世界主要稠油生产国之一。

从生产上讲,注蒸汽稠油生产过程包括注入热流体自地面蒸汽发生器、地面注汽管线、注汽井筒的管流,到达井底后热流体从井底到油层中的渗流,以及受热流体从生产井底到井口的管流、井口油嘴的嘴流和地面集输管线的管流。从学科上讲,热力采油是指以热力学和传热学的理论与方法为基础,以稠油和高凝油为主要开采对象,通过加热方式来降低原油黏度、解除油层堵塞、改善地层渗流特性,从而提高原油的采收率。热力采油的过程特征决定了无论注入热流体还是受热原油,无论管流还是渗流,其运动规律都是指非等温运动规律,表明流体在一定驱动力和温度效应共同作用下的运动速度或流量大小。

《热力采油原理与设计》以热力学和传热学的理论为基础,以稠油开发系统的油藏和油井动态为背景,系统介绍热力采油技术的基本原理和设计方法,其中包

括高温和非等温状态下流体和岩石热物理性质;注蒸汽热力采油油藏工程设计中井网系统、注蒸汽参数和效果预测等,并介绍了注蒸汽油藏动态评价方法与开发调整设计;火烧油层技术系统介绍其开采原理与适应性、点火工艺、注气参数设计与动态预测、火烧动态评价;热力采油注采工艺介绍注汽管线与井筒热损失、油井举升参数设计方法;热力采油模拟方法重点介绍数学模拟和物理模拟原理及模拟应用方法。

全书注重突出稠油开发的系统性特征,立足于从理论联系实际方面培养学生分析问题和解决问题的能力。全书内容的深度和广度也适宜于非石油工程专业的学生和技术人员学习参考。

本教材在编写过程中,得到了中国石油大学(北京)石油工程学院油气田开发工程系的大力支持和热情帮助,在此表示感谢。

书中如有错误和不当之处,敬请使用本教材的师生和有关读者指正。

# 目 录

<b>第一章 稠油油藏概述</b> .....	(1)
第一节 稠油资源及油藏特征.....	(1)
第二节 稠油油藏开发概况.....	(7)
练习题 .....	(16)
<b>第二章 稠油油藏流体和岩石热物理性质</b> .....	(17)
第一节 蒸汽热力学特征 .....	(17)
第二节 岩石和流体热物性参数 .....	(22)
第三节 岩石和流体物性非等温效应 .....	(26)
第四节 稠油油藏非等温渗流特征 .....	(33)
练习题 .....	(37)
<b>第三章 注蒸汽热力采油原理</b> .....	(38)
第一节 注蒸汽热力开采原理与适应性 .....	(38)
第二节 注蒸汽油层蒸汽超覆 .....	(49)
第三节 蒸汽吞吐动态预测 .....	(54)
第四节 蒸汽驱产量预测 .....	(66)
练习题 .....	(76)
<b>第四章 注蒸汽热力采油油藏工程设计</b> .....	(77)
第一节 注蒸汽井网系统设计 .....	(77)
第二节 注蒸汽参数设计 .....	(86)
第三节 稠油开发油藏工程方案设计内容 .....	(93)
练习题 .....	(96)
<b>第五章 注蒸汽油藏动态分析与调整</b> .....	(97)
第一节 注蒸汽井间汽窜规律 .....	(97)
第二节 注蒸汽油藏动态分析与评价方法.....	(107)
第三节 注蒸汽实施跟踪调整与效果评价内容.....	(117)
练习题.....	(121)
<b>第六章 火烧油层技术原理与设计</b> .....	(122)
第一节 火烧油层开采原理与适应性.....	(122)
第二节 油层火烧点火工艺和燃烧方式.....	(124)
第三节 注气参数设计与动态预测.....	(127)
第四节 火驱前缘及火烧动态评价.....	(132)
练习题.....	(139)

<b>第七章 热力采油注采工艺设计</b> .....	(140)
第一节 注蒸汽工艺系统.....	(140)
第二节 地面注汽管线与注汽井筒热损失.....	(144)
第三节 油井举升参数设计方法.....	(157)
练习题.....	(165)
<b>第八章 热力采油模拟方法</b> .....	(166)
第一节 热力采油数学模型.....	(166)
第二节 热力采油物理模型.....	(177)
第三节 注蒸汽热力采油数值模拟.....	(186)
练习题.....	(200)
<b>参考文献</b> .....	(201)

# 第一章 稠油油藏概述

## 第一节 稠油资源及油藏特征

石油是埋藏在地下的、天然形成的、不可再生的流体资源。由于原油产量与原油黏度成反比,与生产压差成正比,因此原油黏度越高产量越低,通过增加生产压差提高产量是有限的,可以通过降低原油黏度提高产量。

在油层条件下,原油黏度大于  $50\text{mPa}\cdot\text{s}$  或脱气原油黏度大于  $100\text{mPa}\cdot\text{s}$  的原油称为稠油,国际上称稠油为重质原油。美国等国家将 API 度低于 20,委内瑞拉将 API 度低于 22 的原油称为“重油”。黏度很高的重质原油称为沥青。

### 一、稠油资源

世界上蕴藏有巨大的稠油资源,据专家估计稠油资源是常规原油资源的数倍以上,具有重要的石油能源战略地位。稠油资源分布广,几乎各产油国均有发现。重油资源丰富的国家有加拿大、委内瑞拉、美国、前苏联地区等,世界重油地质储量及沥青砂资源(含预测资源量)约为  $(4000\sim 6000)\times 10^8\text{m}^3$ 。加拿大重油油砂主要分布在阿尔伯达盆地,包括阿萨斯卡等 8 个重油大油田,地质储量为  $(2680\sim 4000)\times 10^8\text{m}^3$ ;委内瑞拉 4 个重油区,地质储量约  $(490\sim 930)\times 10^8\text{m}^3$ ,预测重油资源约  $3000\times 10^8\text{m}^3$ ;美国重油油田地质储量约  $(90\sim 160)\times 10^8\text{m}^3$ ;前苏联地区有 300 个左右重油油田,重油储量  $1200\times 10^8\text{m}^3$ ;中国的重油资源也非常丰富,约占总石油资源量的 25%~30%,已在松辽、渤海湾、准噶尔、南襄、二连等 15 个大中型含油气盆地发现 70 多个稠油油藏。表 1-1-1 和表 1-1-2 分别为世界和主要稠油生产国家的重油资源分布。

表 1-1-1 世界稠油及沥青资源分布

地区	稠 油		沥 青	
	探明储量 $10^8\text{bbl}(10^8\text{m}^3)$	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)
全世界统计	2614.8(414.9)	3063.3(486.2)	25045.1(3981.6)	8648.4(1375.1)

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



表 1-1-2 世界主要稠油生产国稠油及沥青资源分布

国家/地区	稠 油		沥 青	
	探明储量 10 <sup>8</sup> bbl(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	远景资源量 10 <sup>8</sup> bbl(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	探明储量 10 <sup>8</sup> bbl(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	远景资源量 10 <sup>8</sup> bbl(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
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)

## 二、稠油油藏特征

表 1-1-3 为国外大型稠油油藏主要参数。

表 1-1-3 国外大型稠油油藏参数表

国家	油田	埋藏深度 m	油层特性			原油性质		油层 温度 ℃
			孔隙度 %	渗透率 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	饱和度 %	密度 °API	黏度 mPa·s	
美国	Kern River(Shell)	46~460	30	500~2500	55	12~13	(1~20)×10 <sup>4</sup>	25.6~29.4
	Kern River(Texaco)	305	31	4000	70	13	4060	32.2
	Belridge	122~426	36.8	3000	64.5	13~14	1900	35
	Midway	270~450	33~35	1300~2500	60	11~12	4000~6500	37.8
印度尼西亚	Duri	190	34	1550	62	22	157	38.3
委内 瑞拉	Bare(FO)	800	28.6~31.9	5000~6600	83~88	9.2	376	55
	Bare(FO)	920	28.6	5000	83	9.2	370	57.8
	B·E·Peerro Negro	610	35	10000	80	8.5	5500	51.7
	Jobo	1000	31	5000	85	9.0	1950	55.6
	Lagunillas	700~880	35		75~87	11.0~15.2	2000~3500	46.1~55.2
	East Tia Huana	365~520	38	1000~1700	81~85	9.0~13.6	500~30000	35.0~47.5
	Main Tia Huana	365~520	36~38.1	675~1000	85	13.1~13.5	750~5000	40.0~50.5
Beahunillas	610	33.5	575	84.5	13	500	47.2	
加拿大	Cold Lake	457	35	1500	70	10.2	10×10 <sup>4</sup>	12.7
	Peace River	548	28	100~2000	80	7.5	10×10 <sup>4</sup>	15.5
哥伦比亚	Teca	640	28	1200	57	12.8	2965	42.2

中国中生代含油气盆地中,稠油油藏成因包括风化剥蚀、边缘氧化、次生运移、底水稠变,也决定了稠油油藏分布的规律性,即存在有稠油油藏或沥青矿的大型油气聚集带中,平面上从凹陷到边缘,由常规油藏渐变为稠油油藏或沥青矿;纵向上由深层的常规油藏变为浅层的稠油油藏。表 1-1-4 为中国主要稠油油藏相关参数。

表 1-1-4 中国主要稠油油藏参数表

油田	区块	埋藏深度 m	油层特性			原油性质		油层 温度 ℃
			孔隙度 %	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	饱和度 %	原油 相对密度	黏度(50℃) mPa·s	
高升	高二、三	550~1750	13~24	900~2300	60	0.94~0.96	2000~4000	60~62
曙光	曙 1-7-5	950~1080	25.6	1500	60	0.98	12000~25000	54
	杜 48	850~1300	28.0	948	65	0.94	1540	48
	杜 66	808~1130	27.0	781	65	0.93	300~2000	57
	杜 212	840~1050	21.4~23.4	779~1029		0.96~0.99	1723~11165	42.0
欢喜岭	锦 45	890~1050	30~32	449	65	0.93	7696	45.0
	锦 7	910~1010	32.1	1044	65	0.98	2906	40.0
	锦 25	760~850	31.6	700	65	0.99	14132	35.0
	锦 127	600~850	33.9	1832	65	0.99	3661~7243	
	欢 17	1000~1230	28	700	65	0.971	2338	46.0
	齐 40	625~1050	30.8	1200~1300	65	0.936	2325	36.0
克拉 玛依	九区	215~350	29.0	3800	64	0.91~0.96	219~6179	19.3
	六区	260~320	30.0	2300	66	0.915~0.955	800~10000	19.2
单家寺	单 2	1120~1200	30.0	500	65	0.9784	9200(56℃)	55
乐安	东区	880~955	14~31	5331	60	0.99	20000	54
井楼		100~830	30~35	2690	66.3	0.948	2667	29.7
古城		150~1047	30	1320	66.1	0.918~0.966	75.5~12431	21.9~66

可以看出,与稀油油藏相比,稠油油藏具有如下特征。

### 1. 油藏埋深较浅

国外绝大多数大型稠油油藏埋深小于 1000m,与国外稠油油藏相比,中国的稠油油藏埋藏较深,中国稠油油藏埋深大于 900m 的已探明储量占六成以上,部分油藏埋深在 1300~1700m。

辽河断陷盆地西部凹陷西部斜坡带,由北向南分布有高升、曙光、欢喜岭等稠油油田,埋藏深度一般在 700~1200m,其中高升和冷家油田埋藏深度在 1600~1700m。

胜利油区稠油油藏广泛分布在凹陷边部古隆起、古凸起和斜坡带,如东营凹陷西部的单家寺、尚店、林樊家,东营凹陷南部斜坡带的金家、乐安油田,这些油田埋藏深度一般为 800~1600m。

新疆准噶尔盆地的西北缘,由红山嘴至夏子街 150km 范围内为稠油油藏集中分布带,埋藏深度一般为 200~600m。

河南泌阳凹陷的西斜坡和北斜坡稠油资源比较丰富,已发现有井楼、古城油田,埋藏深度一般为 200~600m。

中国国内迄今已发现的稠油油藏埋藏最深的为吐哈油区的吐玉克油田,深度达 3300m。

### 2. 储层胶结疏松岩石物性较好

稠油油藏储集层多为粗碎屑岩,中国的稠油油藏多为砂岩、砂砾岩,沉积类型一般为河流

相或河流三角洲相,储层胶结疏松,成岩作用低,固结性能差。

国内外稠油油藏储层性普遍较好,具有孔隙度高、渗透率高的特点,孔隙度一般为 25%~30%,岩石渗透率一般为  $0.5\sim 2\mu\text{m}^2$ ,属于高渗透油藏。

### 3. 原油中胶质沥青质含量高,饱和压力低

与普通原油相比,稠油中的胶质和沥青质含量高,且随着胶质和沥青质含量增加,稠油的密度和黏度也逐渐增加,因此高黏度、高密度成为稠油区别于普通原油的主要指标(表 1-1-5)。

表 1-1-5 稠油主要物性参数表

国家	油田区块	原油相对密度	油层温度下脱 气油黏度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	含胶质 %	沥青质 %	含硫 %	含钒 $10^{-6}$
中国	高升	0.94~0.96	2000~4000	40~46	3.3	0.56	3.1
	曙一区	0.93~0.94	330~1540	34~39	—	0.30	1.1
		0.96~0.98	465~25900	34~52	—	0.36	0.87
	锦 45 块	0.96~0.99	565~7696	33.1	—	0.23~0.24	0.74~0.61
	克拉玛依九区	0.92~0.95	2300~15000	25~35	—	0.15	0.66
	单家寺	0.98	9200	24.8	1.2	0.72	2.49
	江汉王场	0.97	62.2(100℃)	51.0	9.6	11.8	0.31
加拿大	阿萨巴斯卡	1~1.0143	$550\times 10^4$	39	18.0	4.8	250
	Peace River	1.0071~1.0143	$10\times 10^4$	—	19.8	5.6	—
	Cold Lake	0.9861~1	$10\times 10^4$	23	15.0	4.7	240
委内瑞拉	Bare(FO)	0.9861~1	334	—	9~17	5.2	1200
	Tia Huana	0.9854	2000	—	5.8	2.7	284

稠油组分中胶质沥青质含量为 30%~50%,烷烃和芳香烃含量相对较低,通常小于 60%~50%。稠油含蜡量小于 10%,其凝点一般低于 20℃。中国部分稠油含蜡量小于 5%,凝点多数在 0℃以下。例如,克拉玛依油田稠油含蜡量为 1.4%~4.8%,原油凝点为 -16~-23℃;孤岛油田稠油含蜡量为 5%~7%,凝点为 -10~-26℃。

与轻质原油在化学组成上的重大差别在于稠油含氢量小于 12%(约 10%~14%),碳氢比大于 7(原油范围为 5.9~8.5)。稠油中除碳氢化合物外还有大量的氧、氢、硫的化合物以及灰分元素。

稠油具有密度大、黏度高的特点,稠油的相对密度大于 0.92。稠油黏度变化范围从 50mPa·s 到几万甚至几十万毫帕秒。

稠油油藏在形成过程中产生了生物降解作用和氧化作用,天然气和轻质组分在次生运移过程中产生逸散,因此一般稠油油藏的饱和压力低,气油比低,稠油的原始溶解气油比一般小于  $10\text{m}^3/\text{t}$ ,原油体积系数较小。

### 三、稠油油藏类型

稠油分类不仅直接关系到油藏类型划分与评价,也关系到稠油油藏开采方式的选择及其开采潜力。由于稠油黏度变化范围很大,为了划分稠油油藏类型,首先按照原油黏度区分稠油类别。

## 1. 按照流体性质分类

### 1) 国外稠油分类标准

对稠油分类标准许多专家进行了研究并多次举行国际学术会议进行讨论。联合国训练研究署(UNITAR)推荐的稠油分类标准如表 1-1-6 所示,委内瑞拉的稠油分类标准如表 1-1-7 所示。

表 1-1-6 UNITAR 推荐的分类标准

分类	第一指标	第二指标	
	黏度, mPa·s	60°F(15.6°C)相对密度	60°F(15.6°C)重度, °API
重质油	100~10000	0.934~1.000	20~10
沥青	>10000	>1.000	<10

表 1-1-7 委内瑞拉能源矿业部的分类标准

分类	分类标准
重质原油	(1)相对密度为 0.934~1.000(10~20°API) (2)黏度小于 10000mPa·s
特重原油	(1)相对密度大于 1.000(小于 10°API) (2)黏度小于等于 10000mPa·s
沥青	(1)相对密度大于 1.000(小于 10°API) (2)黏度大于 10000mPa·s

### 2) 中国稠油分类标准

我国稠油沥青质含量低胶质含量高,金属含量低,稠油黏度偏高,相对密度则较低。我国稠油的分类标准如表 1-1-8 所示。

表 1-1-8 中国稠油分类标准

分类	第一指标	第二指标	开采方式
	黏度, mPa·s	相对密度(20°C)	
普通稠油	50*(或 100)~10000	>0.9200	可以先注水 再热采
	亚类	50*~150*	
		150*~10000	>0.9200
特稠油	10000~50000	>0.9500	热采
超稠油(天然沥青)	>50000	>0.9800	热采

注: \* 指油层条件下的原油黏度;无 \* 者为油层温度下脱气原油黏度。

中国的稠油分类标准基本与国际标准一致,有利于国际间的交流与合作,也便于进行稠油资源评价和开采方式的选择,分类标准中将稠油分为普通稠油、特稠油、超稠油;以原油黏度为第一指标,相对密度为其辅助指标,当两个指标发生矛盾时则按黏度进行分类。

考虑到原油黏度测定条件的同时,在分类标准中对普通稠油列出了两种情况。在油层条件下,黏度较小时,尽可能采用井下取样测取油层条件下的原油黏度。对于高黏度原油,井下取样非常困难,在分类标准中采用了油层温度下脱气原油黏度。

中国的稠油黏度较高,相对密度较低,在分类标准中原油相对密度的界限要比联合国训练研究署(UNITAR)的标准低。在 UNITAR 分类中的沥青,黏度大于  $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,其相对密度大于  $1.0(15.6^{\circ}\text{C})$ ,而中国特稠油黏度大于  $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,相对密度大于  $0.95(20^{\circ}\text{C})$ ,这里所取的温度是  $20^{\circ}\text{C}$  而不是  $15.6^{\circ}\text{C}(60^{\circ}\text{F})$ 。如中国新疆风城地区的超稠油,原油相对密度为  $0.94\sim 0.962$ ,而油层温度下的黏度高达  $(30\sim 50)\times 10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

## 2. 按照油藏特征分类

油藏分类问题比较复杂,属多学科综合性研究内容。分类可以采用单因素分类,也可以采用多因素综合分类,可依据油藏成因或构造形态进行分类,可依据储层储油空间类型或油、气、水分布状况进行分类,也可依据原油性质、驱动类型进行分类等。

在稠油注蒸汽开采中,储层发育状况将极大影响开发效果,单层厚度的大小制约着开采方式的选择,按照单层厚度通常分为四类:薄层小于等于  $2\text{m}$ ;中厚层  $2\sim 5\text{m}$ ,厚层  $5\sim 10\text{m}$ ,块状大于等于  $10\text{m}$ 。

为了研究不同类型稠油油藏注蒸汽开发工程技术条件,改进不同类型稠油油藏注蒸汽开发效果,提高其经济效益,稠油油藏推荐依据储层类型及其发育状况为基础的分类方法。中国稠油油藏可分为块状稠油油藏、多油组互层状稠油油藏、单层状稠油油藏三大类六种类型。

### 1) 块状稠油油藏

#### (1) 气顶、巨厚块状油藏。

这类油藏以辽河高升油田莲花油层为代表。油藏具有统一的油水界面,统一的油气界面。储集层多为冲积扇—扇三角洲砂砾岩体,砂岩体厚度较大,成块状;隔层和夹层不发育。储层物性较好,属高孔隙、高渗透油层。油层孔隙度为  $20\%\sim 30\%$ ,渗透率为  $1\sim 3\mu\text{m}^2$ ,泥质含量为  $5\%\sim 10\%$ ,埋藏深度在  $1550\sim 1700\text{m}$ ,原油性质较好,地层原油黏度为  $518\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,原始气油比高达  $24\text{m}^3/\text{t}$ 。

#### (2) 边底水块状油藏。

这类油藏以曙光油田曙 175 块大凌河油层,胜利单家寺油田单 2 块沙河街组油层为代表。油藏储层物性具有与气顶巨厚块状油藏相似的特性。其差别在于边底水体积大,水油体积比为  $8\sim 10$ ,边底水较活跃;在开采过程中,边底水对注蒸汽开发有着重要的影响。

### 2) 多油组互层状稠油油藏

#### (1) 多油组厚互层状油藏。

这类油藏以辽河欢喜岭锦 45 块的于楼和兴隆台油层为代表。油藏大多数为多期河流—三角洲沉积复合体,砂泥岩间互,按沉积旋回可分为几个油层组。油藏含油井段可达  $150\sim 250\text{m}$ ,油层层数多、厚度大,总厚度一般大于  $30\text{m}$ ,单层厚度大于  $2\text{m}$ ,这类油藏油层间物性和原油性质不同,非均质性强。油水关系复杂,各油层组往往具有独立的油水系统。油藏储层物性好,孔隙度大,渗透率高。孔隙度大于  $25\%$ ,渗透率大于  $1\mu\text{m}^2$ ,油层多为泥质胶结,其含量大于  $5\%$ 。油层组间泥岩隔层较稳定,其厚度一般大于  $5\text{m}$ 。油层组内、油层之间,泥岩夹层不发育,稳定性差。油层组内油层厚度(有效厚度)与含油层段厚度之比(净总厚度比)大于  $0.6$ 。

#### (2) 多油组薄互层状油藏。

代表性油藏包括辽河曙光油田一区杜家台油层、河南井楼和古城油田。这类油藏油层层数多,单层厚度小,净总厚度比小,一般为  $0.3\sim 0.6$ ,油层物性差。这类油藏与厚互层状油藏具有相似的地质特点。

### 3) 单层状稠油油藏

#### (1) 单层状构造岩性稠油油藏。

这类油藏主要分布于新疆克拉玛依油田九区,油层厚度在 10~20m,油层较集中,构造相对简单,隔层和夹层不发育,但油层内夹有泥岩条带和岩性夹层,油层净总厚度比大于 0.5,油层物性与沉积相带有关,非均质较严重,油藏天然能量小。

这类油藏多为分流平原河流相沉积,河床相为一套以含砾砂岩、中粗砂岩为主的碎屑沉积,分布稳定,是储油的最有利相带。油层厚度大于 10m,孔隙度大于 25%,渗透率则为  $1.0\sim 4.0\mu\text{m}^2$ 。河漫滩亚相以中细粉砂岩为主,分布范围有限,储油条件变差,油层厚度小于 10m,孔隙度小于 25%,渗透率小于  $1\mu\text{m}^2$ 。储层非均质性表现在油层内岩性的不均一性和物性差异;平面上表现为分区油层厚度不同,物性差异以及原油性质的变化。

#### (2) 薄层状稠油油藏。

这类油藏以井楼零区为其代表。储层为一套含砾细砂岩和粉砂岩,胶结疏松,物性好。孔隙度为 28%~32.9%,渗透率为  $0.83\sim 3.16\mu\text{m}^2$ ,含油饱和度为 60%~75%,储层砂体厚度小,但又细分小层,层间往往发育较稳定的泥岩隔层和夹层,油层厚度一般小于 10m,净总厚度比大于 0.5。这类油藏埋藏浅,为 250~350m,油层温度低在 30~32℃。

## 第二节 稠油油藏开发概况

通过向地层中注入热能或使得油层就地燃烧产生热能提高原油采收率的方法称为热力采油;热力采油是开采稠油的主要方法。热力采油始于 20 世纪 30 年代,之后经过几十年的大量矿场试验和室内研究,人们积累了丰富的开采经验。常用的热力采油方法分为蒸汽吞吐、蒸汽驱、热水驱、火烧油层等。其中注蒸汽热力采油是目前开采稠油的主要技术,世界上约有 80% 的热采产量是通过注蒸汽采油法获得的。

### 一、稠油开发技术及主要参数

#### 1. 稠油油藏主要开发技术

##### 1) 蒸汽吞吐技术

蒸汽吞吐是指在本井中完成注蒸汽、焖井和采油三个过程的稠油开采方法,从注蒸汽开始到油井不能正常生产为止,称为一个吞吐周期,如图 1-2-1 所示。

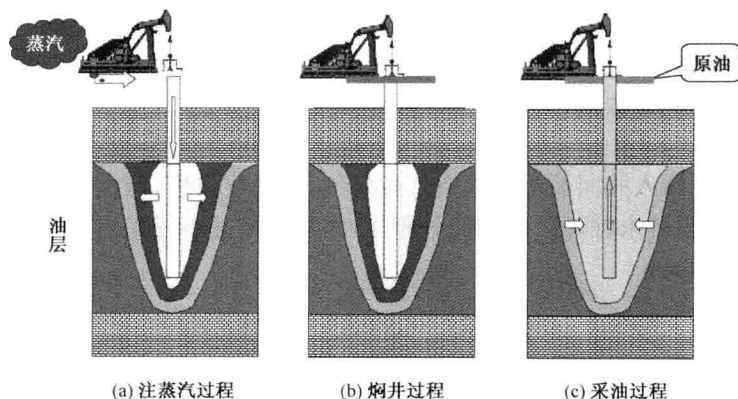


图 1-2-1 蒸汽吞吐过程示意图

蒸汽吞吐注汽时间与注汽量、设备、井况与地层条件有关,一般为 10~15d。焖井过程是将注入蒸汽的热量充分释放给油层,合理的焖井时间应该满足蒸汽释放完潜热为止,焖井时间过长或过短都将影响注入蒸汽的热效应,焖井时间一般为 3~5d。生产阶段是将蒸汽凝结的流体和被加热的油藏流体一起开采到地面上来,与常规生产井的过程基本相同,生产时间可长达上百天。

### 2) 蒸汽驱技术

蒸汽驱是指通过适当井网,由注汽井连续注汽,在注入井周围形成蒸汽带,注入的蒸汽将地下原油加热并驱到周围生产井后产出。蒸汽驱的注采形式与常规注水开采相似,如图 1-2-2 所示。

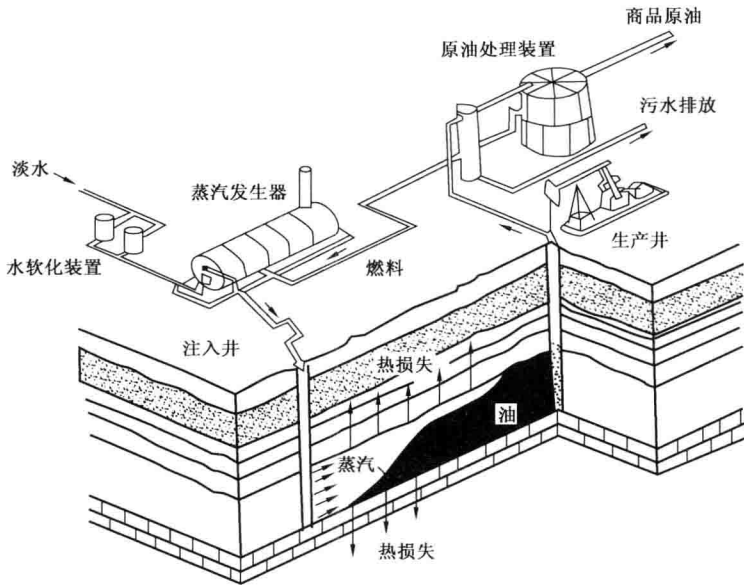


图 1-2-2 蒸汽驱过程示意图

蒸汽驱的常用基础井网形式多为方形井网,由于维持蒸汽驱油井的能量主要来源于注入的蒸汽,因此其油井的产量变化可分为三个阶段:启动阶段——加热原油未突破生产井,油层原油的初始黏度较高,初期主要依靠提高注入压力维持生产,原油产量较低;蒸汽驱受效阶段——随着注入蒸汽量增加,受热原油突破生产井,原油降黏效应起到控制作用,同时随着受效范围增加,油井将维持较高的产量;蒸汽突破阶段——蒸汽在生产井突破,热效率降低,注汽井可以转入间歇注汽状态,油层中的剩余油越来越少,油井产量逐渐下降。蒸汽驱后期可以转入热水驱或水汽交替改善效果。

### 3) 火烧油层技术

火烧油层是通过注入井向油层注入空气或氧气,将油层点燃,使油层中的一部分原油燃烧而产生热量,加热和驱替未燃烧区的大部分原油,并从生产井中开采出来,如图 1-2-3 所示。

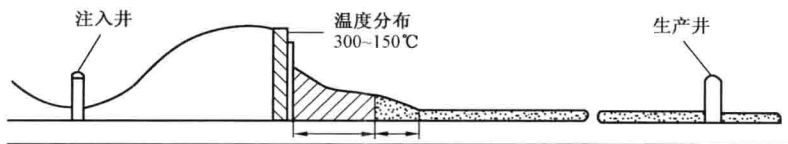


图 1-2-3 火烧油层过程示意图

当今世界重油开采主要以蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层、热水驱等热力开采为主,其产量占总产量的近 70%。中国国内稠油生产现状以辽河油田为例,稠油开采仍以注蒸汽为主,稠油的产量主要来源于蒸汽吞吐、蒸汽驱和蒸汽驱辅助重力泄油技术(SAGD 技术)。稠油的热力敏感性和注蒸汽的经济性决定了注蒸汽热力采油是今后较长一段时间内开采稠油的主要技术和保持稠油生产持续稳定发展的主要途径。

科学技术的进步使得人们的主观因素对稠油油藏开采作用的影响程度逐渐增加,向地层注入工作剂已从注蒸汽发展到非凝析气混注、化学添加剂混注等。进入 20 世纪 90 年代,稠油的开采技术呈现出综合或交叉特点,如水平井技术、蒸汽辅助重力驱、物理法采油技术等,这些新技术已成为改善稠油开发效果和保持稠油产量稳定增长的重要因素。

## 2. 稠油开发主要参数和指标

在油田开发过程中能够表征油田开发状况的数据,统称为开发指标,可以评价和衡量油田开发的程度、速度和效率等。稠油开发指标中的部分概念与常规油田开发指标的概念是相同的,包括油田生产能力与日产水平、含水率、采油指数、生产压差、采油速度、采出程度和采收率等。

应当指出,与常规油田相比,由于稠油开发方式的特殊性,反映开发状况的单井指标具有强时变性特征,如蒸汽吞吐井的产量、含水率、生产压差、采油指数等在一个吞吐周期时间内将大幅度变化。除上述指标外还包括:

### 1) 注汽速度和注汽量

单位时间注入蒸汽的质量称为注汽速度,也表明了注热速度。对于蒸汽吞吐方式,一个周期内的总注入蒸汽量称为周期注汽量。由于注入的蒸汽为一定干度的湿蒸汽,且注入压力不同,蒸汽的体积不同,为了便于比较,规定采用等质量冷水(或称冷水当量)表示注汽速度和注汽量。

### 2) 注汽压力和注汽温度

通常情况下,注汽压力和注汽温度为注蒸汽井口的压力和温度,对于饱和蒸汽,注汽压力和注汽温度是相关的。注汽压力和注汽速度的选择通常以稠油油层是否产生非目的性压裂为限制。

### 3) 油汽比

采油量与注汽量之比称为油汽比(OSR)。由于稠油热采注入的蒸汽主要为地面蒸汽发生器所产生的,且蒸汽发生器的燃料可以选择为自产原油,因此油汽比能够较好地评价稠油注蒸汽开发的效果,显然油汽比越低,稠油注蒸汽开发的效果越差。

对于蒸汽吞吐方式,油汽比为周期油汽比,即一个吞吐周期内累积产油量与累积注汽量之比;对于蒸汽驱方式,油汽比为瞬时油汽比,即日产油量与日注汽量之比;由于蒸汽发生器的燃料也可以选择自产原油以外的其他燃料,如天然气、煤炭等,可以采用等效油汽比进行评价。

实际生产过程中存在极限油汽比,极限油汽比与油价、生产方式和生产成本等因素有关,不同国家的极限油汽比可以不同。例如,中国在 20 世纪蒸汽吞吐的极限油汽比取 0.25,蒸汽驱的极限油汽比取 0.15,而当前蒸汽吞吐和蒸汽驱的极限油汽比分别取 0.2 和 0.12。采用极限油汽比可以预测注蒸汽热采稠油油田的采收率。

### 4) 蒸汽吞吐回采水率

蒸汽吞吐累积产水量与累积注汽量之比为蒸汽吞吐回采水率,回采水率可以是周期回采水率,也可以是多吞吐周期累积回采水率;蒸汽驱作为蒸汽吞吐的接替开发技术,要求吞吐转



驱的油藏应具有相对较低的油层压力,回采水率可以评价蒸汽吞吐地层的压力下降状况。

#### 5) 蒸汽驱采注比

常规注水开发的油田通常为保持压力开采方式,显然注采比的大小可以反映油层压力的保持和恢复状况。而蒸汽驱油藏一般为降压开采方式,蒸汽驱汽腔的扩展反映注入蒸汽的波及状况,因此采用采注比更方便评价油藏降压和汽腔扩展状况。

## 二、稠油开发方式筛选

稠油油藏开发方式的选择应根据油藏条件及原油性质,结合开发方式筛选标准、物理模拟和数值模拟、试采效果综合确定。

### 1. 考虑稠油油品筛选开发方式

稠油最大的特点是原油黏度对温度极为敏感,基本呈半对数关系或指数关系。从不同油品的黏温曲线上看,当温度低于拐点温度时,温度每增加  $10^{\circ}\text{C}$ ,原油黏度就明显下降  $2\sim 10$  倍。当油层温度升高到拐点温度以上时(拐点温度是指原油黏温曲线上曲率最大点所对应的温度),原油在油层中可以具有较好的流动能力,从而形成较高的产能。因此,对于稠油油藏应采用热力开采方式。如曙一区超稠油在地层温度下黏度虽然很大,达到十几万毫帕秒,油藏中没有流动能力,不具备开发条件。但当温度升至  $65^{\circ}\text{C}$  时,黏度降至  $5000\text{mPa}\cdot\text{s}$  左右,当温度升至  $100^{\circ}\text{C}$  时,黏度在  $1500\text{mPa}\cdot\text{s}$  以下,适合于注蒸汽热力开采。

### 2. 采用稠油热采筛选标准初选开发方式

在稠油热力开采筛选标准中,将影响注蒸汽开采的各种方式的主要油藏条件分成若干因素,确定出了相对应方式下的界限值。需要说明的是,这些标准的制定,虽然是在大量研究和实践验证的基础上得到的,但考虑到工艺技术的不断进步,国际油价的涨跌以及油藏条件的差异,在应用中可以灵活掌握。

从筛选标准中可以看出,在油层物性都满足的条件下,不同的开发方式最主要取决于两个因素:油品性质和油层厚度。以辽河稠油为例,普通稠油油藏基本适合蒸汽吞吐转蒸汽驱开发(如齐 40 块莲花油层)。其中,对于油层条件下原油黏度小于  $500\text{mPa}\cdot\text{s}$  的油藏,适合蒸汽吞吐后转泡沫驱(如锦 90 块兴 I 油层)。对于特、超稠油,在油层连续厚度大于  $20\text{m}$  块状油藏,适合蒸汽吞吐后转蒸汽辅助重力泄油方式(如冷 41 块  $S_2$  油层、杜 84 块馆陶油层)。

### 3. 运用数模和物模手段优选开发方式

“双模”技术是油藏工程设计的主要手段。运用“双模”技术可以更好地对多种开发方式进行对比,从而优选出合理的开发方式。

以杜 84 块馆陶油层(块状超稠油油藏)为例。数值模拟研究中建立了三维地质模型,预测了  $70\text{m}$  井距下蒸汽吞吐、吞吐+蒸汽驱、吞吐+火烧驱、吞吐+蒸汽辅助重力泄油(SAGD)四种不同开发方式的开发效果。模拟结果表明,四种开发方式中以吞吐+SAGD 方式的采收率为最高,达到  $50.7\%$ ,油汽比  $0.36$ ,而其他几种方式的采收率相对都比较低。根据数模研究结果,馆陶油层适宜采用蒸汽吞吐+SAGD 开发。

运用三维物理模拟研究方法,进行了蒸汽驱、火烧驱、SAGD 的物理模拟实验研究。蒸汽驱开发方式物理模拟研究进行了两个实验,实验一为直井蒸汽驱实验,最终采收率只有  $14\%$ ;实验二是水平井预热转直井蒸汽驱实验,目的是设想利用水平井来加热油层底部,形成一个热通道,降低原油黏度,实现直井蒸汽驱,实验并没有达到预期的效果。两个实验结果证实蒸汽