

辽河油田勘探开发40年系列丛书

稠油开发 实验技术与应用

张方礼 刘其成 等著
刘宝良 张 勇

CHOUYOUKAIFA
SHIYANJISHU
YUYINGYONG

LIAOHE

OILFIELD

石油工业出版社

辽河油田勘探开发 40 年系列丛书

稠油开发实验技术与应用

张方礼 刘其成 刘宝良 张 勇 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对稠油油藏的特点,系统介绍与稠油油藏开发密切相关的实验技术,内容包括:稠油油藏岩石特性,流体特性,储集层热物理性质,基础管式物理模拟,稠油油藏高温相对渗透率,二维、三维比例物理模拟,物理模拟数字实验,热采储集层伤害评价,稠油热采污水回用,井筒传热模拟等系列实验技术。书中还介绍了辽河稠油油田应用实例和研究成果,具有科学性、实用性和较强的操作性。

本书可供从事稠油储集层评价、开发机理研究、油层保护、油藏工程设计、采油工艺和地面集输优化等研究的科研人员、技术人员及相关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

稠油开发实验技术与应用/张方礼等著.

北京:石油工业出版社,2007.3

(辽河油田勘探开发40年系列丛书)

ISBN 978-7-5021-5984-9

I. 稠…

II. 张…

III. 粘性原油-油田开发

IV. TE 345

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 032506 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

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

2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:20

字数:512千字 印数:1—2000册

定价:60.00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

攀登石油科技高峰
实现辽河百年伟业

题赠辽河油田勘探开发研究院

二〇〇六年十一月

王涛



《辽河油田勘探开发 40 年系列丛书》编委会

主 任：谢文彦

副主任：任芳祥 孟卫工 张方礼

委 员：张占文 尹万泉 陈绍生 赵立岩 李晓光 张文坡

赵晓强 龚姚进 曹正林 刘绍峰 李铁军 张巨星

陈振岩 武 毅 马德胜 张吉昌

序

辽河坳陷地质条件极其复杂，构造破碎，发育多套生、储、盖组合，油气藏类型丰富，素有“地质大观园”之称。面对复杂的石油地质背景，广大科技工作者依靠自强不息的精神！把勘探开发目标由小做到大，把勘探开发思路由窄引向宽，原油年产量不断攀升，1995年达到了1550万吨，辽河油田跃居全国第三大油田，建成了全国最大的稠油、高凝油生产基地，为中国石油工业的发展作出了突出贡献。

辽河油田40年的勘探开发历程是一段波澜壮阔的历史，充满了艰辛与挑战。在近40年的勘探开发实践中，广大的勘探开发工作者面对复杂的勘探开发对象，勇于打破传统思维，开拓进取，大胆实践，探索和实践出了一整套适合辽河油田油藏特点的勘探开发思路和配套的勘探开发技术。特别是“九五”以来，勘探上围绕火成岩、潜山、复杂断块油气藏形成与分布理论开展研究，形成了一系列有特色的地质理论和技术，一大批具有千万吨级储量规模的油气藏相继涌现。油田开发上，普通稠油以及特超稠油蒸汽吞吐热力开采技术不断完善，形成了具有国内领先的中深层稠油中后期开发技术与室内试验研究技术；复杂断块精细油藏描述技术、特殊岩性油藏开发技术日臻完善；水平井技术取得突破性进展，不同类型水平井规模应用技术走到了中国石油的前列。这些瞩目的成绩，为中国石油“东部硬稳定”的发展格局奠定了坚实的基础。

在辽河油田勘探开发40周年暨辽河油田勘探开发研究院40年华诞之时，系统回顾与总结，并出版《辽河油田勘探开发40年系列丛书》是一件很有意义和值得庆贺的事情。该套丛书是辽河油田40年勘探开发实践和地质理论发展的真实写照，从不同侧面、不同角度反映出了40年来辽河油田勘探开发的巨大成就。该套丛书对广大科技人员长期付出的辛劳是一种很好的纪念，同时又是缅怀历史、启迪来者、获取知识、吸取营养的重要阶梯。

整套丛书紧密结合勘探开发实际，论述全面系统，资料翔实可靠，主体思路开阔，是难得的由石油科技工作者自己编写的专著。这套丛书对类似盆地的油气勘探开发具有一定的指导和借鉴作用，特别是很多石油勘探开发方法和规律性总结，均有较强的推广价值。

辽河油田目前已转入高成熟勘探开发阶段，但是仍有很多未经开拓的领域，老探区勘探开发仍然有很大的潜力，仍然有着做不完的大文章。我相信该套丛书的出版将有助于广大科技人员和石油职工利用已有的认识和经验，更有效地去探索新的油气领域，实现辽河油田持续、有效发展的长远目标，为我国石油事业继续作出更大的贡献。

谌文新

2007年3月22日

前 言

全球重油和油砂资源巨大,其地质储量高于常规油气资源之和。近年来,由于技术进步、常规原油供应紧张以及油价走高,为重油发展带来机遇,具有替代常规石油能源的战略地位。正如2005年11月在北京召开的首届世界重油大会主题:重油—全球能源的未来,以及大会主席指出的那样:对重油的合理开发利用已经成为重油工业乃至世界石油工业可持续发展的关键,重油资源将成为世界的战略接替能源之一。

中国稠油资源比较丰富,预测石油资源量 $198 \times 10^8 \text{ t}$,可探明的地质资源量为 $79.5 \times 10^8 \text{ t}$ 。目前陆上已探明 $20.6 \times 10^8 \text{ t}$,已动用 $13.59 \times 10^8 \text{ t}$,从1992年起稠油年产量已连续15年超过 $1000 \times 10^4 \text{ t}$,成为中国原油产量的重要组成部分,勘探开发的潜力巨大。中国已成为世界上4大稠油生产国之一。

稠油开采技术是一门多学科、多专业、综合性很强的技术。自1982年辽河油区高升深层稠油油藏蒸汽吞吐技术试验成功以来,中国稠油开采技术不断发展和完善。稠油开发实验技术伴随着稠油油田的开发不断发展壮大。

中国稠油油藏类型繁多,地质条件复杂,油品性质变化范围大,油藏埋藏较深,新发现的还有超深层、低渗透稠油油藏,因而即使采用国外成熟的热采技术,也存在着许多重大的技术问题,面临着前所未有的技术挑战。因此,正确的认识稠油油藏特征,分析不同开发方式的渗流特征与开采机理,科学、快捷地模拟、预测和优化多种开发方案,为合理开发稠油油藏提供决策依据,则是稠油开发实验的重要任务。

辽河油田是中国最大的稠油生产基地,到2006年底,累计稠油探明地质储量 $10.5368 \times 10^8 \text{ t}$,已动用 $8.3584 \times 10^8 \text{ t}$,累计产油 $1.5205 \times 10^8 \text{ t}$,最高年生产稠油 $894 \times 10^4 \text{ t}$ 。在稠油开发实验配套技术上也发挥了“火车头”的作用。为了适应稠油开发技术发展的需要,作为中国石油稠油开采先导试验基地的稠油开发实验技术研究中心,希望向中国稠油开发工作者提供一本系统介绍稠油开发实验技术的专著——《稠油开发实验技术与应用》。

本书针对稠油油藏的特点,系统介绍与稠油油藏开发密切相关的实验技术,特别是稠油油藏疏松和松散岩心冷冻加工固结,冷冻岩心孔渗饱等分析校正、热采一维、二维、三维比例物理模拟和热采储集层伤害评价等系列特色技术,另外还介绍了一项最新的稠油开发实验技术——比例物理模拟数字实验技术。同时,例举了辽河稠油油田应用实例和新的研究成果,具有科学性、实用性和较强的可操作性。

本书由张方礼、刘其成组织编写,并提出整体结构,龚姚进、黄爱慈、刘其成负责审核、修改。各章编写人员分别为:第1、2章:刘其成;第3章:宋柏荣、杨彦东、黄毅、崔向东、姜来泽;第4章:于涛、吴拓、刘其成、刘敬、潘丽华;第5章:刘宝良、吴晓杰;第6章:张勇、孙尔杰;第7章:刘宝良、潘攀;第8章:张勇、刘其成、孙士强、彭旭;第9章:刘其成、于涛、张勇;第10章:刘宝良、刘其成、吴拓;第11章:齐先有、张英;第12章:刘宝良、刘其成;第13章:刘宝良、张勇、杨俊印;第14章:刘宝良、张勇;第15章:刘其成、赵庆辉;第16章:赵庆辉、蔡庆华;第17章:赵庆辉、田利;第18章:刘其成、周雅萍、赵庆辉、曲波、刘家林;第19章:刘宝良、刘其成;第20章:

刘宝良、刘敬、刘其成；第 21 章：张英、齐先有。

由于作者水平及时间有限，难免有不足和错误之处，敬请读者批评指正。

在本书出版之际，衷心感谢编写组和专家们在编写过程中提出的宝贵意见！衷心感谢任芳祥、尹万泉、孙岩、程仲平等领导对开发实验技术和本书编写的支持！衷心感谢边少之、王伟伟、庞树斌等帮助制图、编排等！

作者

2007 年 2 月 6 日

目 录

1 稠油的分类标准及稠油油藏的基本特征	(1)
1.1 稠油的分类标准	(1)
1.2 稠油资源	(3)
1.3 稠油油藏的基本特征	(3)
2 稠油开发实验技术发展历程及主要实验技术成果	(7)
2.1 稠油油藏开发历程	(7)
2.2 稠油开发实验技术发展历程及成果	(7)
3 稠油油藏岩石特性测试技术	(11)
3.1 稠油疏松和松散岩心冷冻加工与处理	(11)
3.2 冷冻岩心常规物性测试与校正技术	(18)
3.3 岩石矿物分析与鉴定	(22)
3.4 稠油疏松和松散岩心孔隙结构测试技术	(27)
4 稠油油藏流体特性测试技术	(30)
4.1 稠油物性测试技术	(30)
4.2 稠油流变特性分析技术	(36)
4.3 稠油高压物性实验技术	(59)
4.4 地层水水质分析技术	(65)
4.5 稠油油藏气体分析技术	(66)
5 储集层热物性参数测定技术	(69)
5.1 导热系数测定	(69)
5.2 比热容的测定	(72)
5.3 热膨胀系数测定	(77)
5.4 热扩散系数的计算	(78)
5.5 油藏岩石及流体热物性参数的影响因素	(78)
5.6 油藏岩石及流体热物性参数的变化规律	(80)
6 基础管式物理模拟实验技术	(84)
6.1 基础管式物理模拟研究概况	(84)
6.2 蒸汽驱油实验技术	(84)
6.3 热水驱油实验技术	(93)
6.4 蒸汽复合气驱油实验技术	(94)
6.5 注气非混相驱油实验技术	(99)
7 稠油油藏高温相对渗透率测定技术	(102)
7.1 稠油油藏高温相对渗透率测定	(102)
7.2 油—蒸汽(油—水)相对渗透率的计算	(106)
7.3 相对渗透率的影响因素	(112)
8 热采比例物理模拟实验技术	(116)

8.1	油藏相似理论研究概况	(116)
8.2	油藏物理模拟相似理论	(118)
8.3	油藏物理模拟相似准则	(120)
8.4	比例物理模拟实验装置	(131)
8.5	实验技术要求	(136)
9	比例物理模拟数字实验技术	(139)
9.1	物理模拟数字实验技术的特点	(139)
9.2	物理模拟数字实验步骤	(140)
9.3	物理模拟数字实验技术的功能	(140)
10	热采储集层伤害评价实验技术	(145)
10.1	热采储集层伤害状况	(145)
10.2	热采储集层伤害的类型	(145)
10.3	评价热采储集层伤害的实验方法	(149)
11	稠油热采污水回用指标测试技术	(157)
11.1	稠油热采污水水质特点及其对锅炉及深度处理工艺的影响	(157)
11.2	稠油污水回用水质分析方法	(159)
11.3	蒸汽干度测试方法	(163)
12	井筒传热模拟实验技术	(165)
12.1	井筒传热数学模型	(165)
12.2	井筒传热物理模型	(171)
12.3	井筒传热模拟实验程序	(174)
13	欢喜岭油田齐 40 块热采储集层变化研究	(178)
13.1	齐 40 块储集层基本特征	(178)
13.2	热采条件下水—岩石反应的物理模拟	(179)
13.3	热采条件下水—岩石反应的数值模拟	(183)
13.4	热采条件下储集层水—岩石反应变化规律及对储集层的伤害	(188)
13.5	热采作用对相对渗透率曲线的影响	(190)
13.6	热采条件下原油组分变化	(191)
13.7	齐 40 块热采储集层保护措施筛选研究	(192)
13.8	结论	(194)
14	欢喜岭油田齐 40 块蒸汽驱实验研究	(195)
14.1	引言	(195)
14.2	齐 40 块蒸汽驱驱油效果评价	(195)
14.3	齐 40 块油—水、油—蒸汽渗流特征	(198)
14.4	齐 40 块稠油蒸汽蒸馏率的测定	(200)
14.5	齐 40 块蒸汽驱三维比例物理模拟研究	(208)
15	直井与水平井组合 SAGD 物理模拟研究	(215)
15.1	蒸汽辅助重力泄油实验研究综述	(215)
15.2	物理模拟实验方案设计与实验模型建立	(217)
15.3	三维比例物理模拟实验结果与分析	(219)
15.4	二维比例物理模拟实验结果与分析	(221)

15.5	直井与水平井组合 SAGD 开采机理分析	(224)
15.6	认识与结论	(232)
16	蒸汽复合气驱实验研究	(233)
16.1	引言	(233)
16.2	洼 38 块蒸汽复合烟道气驱实验研究	(233)
16.3	锦 45 块蒸汽复合氮气驱实验研究	(236)
17	水平裂缝蒸汽辅助重力泄油物理模拟	(241)
17.1	物理模型及实验系统	(241)
17.2	物理模拟实验方案与实验方法	(242)
17.3	FSAGD 的不同生产阶段及渗流传热机理	(243)
17.4	影响 FSAGD 开采效果的因素研究	(244)
17.5	认识与结论	(247)
18	“2+3”调驱提高稠油采收率实验研究	(248)
18.1	锦 90 块实施“2+3”调驱有利条件分析	(248)
18.2	调驱体系筛选与评价	(249)
18.3	“2+3”调驱驱油效果评价	(262)
18.4	“2+3”调驱数值模拟研究	(265)
18.5	结论与认识	(266)
19	注蒸汽井筒氮气隔热技术实验研究	(268)
19.1	引言	(268)
19.2	氮气隔热井筒传热物理模型的建立	(268)
19.3	物理模拟实验方案设计	(271)
19.4	同心油管井筒氮气隔热效果评价	(272)
19.5	光油管井筒隔热效果评价	(276)
19.6	两种井筒氮气隔热效果对比	(278)
19.7	认识与结论	(279)
20	超稠油管输流动特征实验研究	(281)
20.1	引言	(281)
20.2	水平管输物理模型系统建立	(282)
20.3	不含水超稠油流变特征	(286)
20.4	含水超稠油流变特征	(287)
20.5	添加降黏剂后原油流变性	(290)
20.6	认识与结论	(292)
21	稠油污水回用湿蒸汽发生器 SiO₂ 水质指标研究	(294)
21.1	关于稠油污水回用中 SiO ₂ 指标问题	(294)
21.2	污水回用湿蒸汽发生器结垢模拟试验	(295)
21.3	模拟试验结果及分析	(296)
21.4	现场真实湿蒸汽发生器用清水和用污水对比实验	(300)
21.5	对锅炉结垢机理的认识	(302)
21.6	经济效益分析	(303)

1 稠油的分类标准及稠油油藏的基本特征

1.1 稠油的分类标准

稠油是指在油层条件下黏度大于 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的原油。国际上称稠油为重油 (Heavy Oil) 或沥青 (Bitumen)。因国际上的原油价格是按质论价的, 相对密度大的原油轻质馏分少, 价格就低, 所以采用相对密度或 $^{\circ}\text{API}$ 重度来表征稠油的特征及分类已形成了传统方法。

中国也曾沿用过国外标准, 在 20 世纪 70 年代末有人将相对密度大于 0.90 的原油称为稠油, 也有人将相对密度大于 0.92 的原油称为稠油或重油。将天然沥青称作焦油, 沥青砂称作焦油砂。随着稠油储量的增加、稠油开采及加工技术的进步以及生产规模的扩大, 建立统一的定义与认识则成了业内人士所关注的问题:

- (1) 从定义上将天然油藏中存在的重油及沥青明确地与原油炼制产品中的重油与沥青区别开来;
- (2) 用以黏度为主的适用于油田勘探开发的分类方法取代以相对密度为主的适用于商品贸易的分类标准;
- (3) 合理地确定重油及沥青的分类标准, 即定量地确定重质与轻质原油的分界线值以及普通重油与沥青的分界线值;
- (4) 将重油与沥青的分类形成更科学的体系, 以有利于稠油开采技术的发展。

1.1.1 联合国训练研究署 (UNITAR) 的稠油分类标准

许多专家对稠油分类标准进行了研究, 一些国际学术会议也多次进行了讨论。由联合国训练研究署 (UNITAR) 提出的重油分类标准取得了世界石油界的广泛同意, 见表 1.1.1。分类标准中使用了原油重度 ($^{\circ}\text{API}$), 它与相对密度的换算关系为:

$$\gamma = [141.5 / (131.5 + ^{\circ}\text{API})] \times \{2500 / [2400 + T(^{\circ}\text{F})]\}$$

当温度为 60°F (即 15.6°C), 上式可以简化为:

$$\gamma = 141.5 / (131.5 + ^{\circ}\text{API})$$

表 1.1.1 由 UNITAR 推荐的重油及沥青分类标准

分 类	第 一 指 标		第 二 指 标
	黏度 ^① ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	密度 (15.6°C) (kg/m^3)	重度 (15.6°C) ($^{\circ}\text{API}$)
重质原油	100~10000	934~10000	10~20
沥青	>10000	>10000	>10

① 指在油藏温度下的脱气原油黏度, 用油样测定或计算出。

此国际分类标准中突出强调的 3 点。

- (1) 将原油黏度作为第一指标, 原油相对密度作为辅助指标。以黏度为主的分类方法有

利于石油生产者，因为它指明了原油在油藏中的流动性及产油的潜力大小。

(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。油层中有溶解气，可以降低原油黏度。稠油油井井下取样非常困难，在取岩心或油样时，往往会损失掉地层中油中的溶解气，将油样恢复到原始相似状态既困难又不经济。为了测定方便，采用脱气油样测定来分类。

(3) 稠油或重油的黏度下限为 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，上限为 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，超过 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的成为沥青。但这是大致的界限，主要是根据美国加利福尼亚的重油资料确定的。

1.1.2 中国稠油分类的标准

原中国石油天然气总公司勘探开发研究院刘文章教授根据中国重质原油（稠油）的特点，经过 5 年（1982~1988 年）的研究，推荐了中国稠油的分类标准，经过讨论修订，作为试行标准颁布执行（表 1.1.2）。

表 1.1.2 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 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)		相对密度 (20°C)	
普通稠油	I	$50^{\text{①}}$ (或 100) ~ 10000		>0.9200	可以先注水 再热采 热采
	亚类 I-1	$50^{\text{①}}\sim150^{\text{①}}$		>0.9200	
	I-2	$50^{\text{①}}\sim10000$		>0.9200	
特稠油	II	10000~50000		>0.9500	热采
超稠油 (天然沥青)	III	>50000		>0.9800	热采

①指油层条件下原油黏度；无①者指油层温度下脱气原油黏度。

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。此分类标准与选择油田的开采方法相联系，有较好的实用性。根据此分类标准，将稠油分类为 3 个档次——普通稠油、特稠油及超稠油（或天然沥青），对选择开发方式有利。

第一种普通稠油 (Conventional Heavy Oil)，黏度低限值取脱气原油黏度为 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，或者油层条件下的原油黏度为 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，黏度高限值取脱气原油黏度为 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，相对密度在 0.92 (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 $150\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下的先注水开发，黏度在 $150\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上适宜于注蒸汽开发，而且目前注蒸汽开采技术是这类油藏开发最好的选择。

第二种特稠油 (Extra Heavy Oil)，黏度低限值取脱气原油黏度 $1\times10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，高限值取 $5\times10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，相对密度大于 0.95 (22°API)。对于这种稠油，采用蒸汽吞吐方法是成功的，国内成功的实例较多，其他国家也有大量的实践经验。但是，对于原油黏度在 $1\times10^4\sim5\times10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油藏进行蒸汽驱则技术难度较大，采收率也降低，原油蒸汽比也较第一种稠油降低。因此区别于前者是有必要的。

第三种超稠油 (Super Heavy Oil)，黏度在 $5\times10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上（脱气原油），相对密度在 0.98 (13°API) 以上。实际上，这种稠油在油层原始条件下基本是不能流动，常规注蒸汽开采方法的经济效益降低，技术难度大，显然和第二种稠油不同。如加拿大 Cold Lake 及 Peace River 油田，原油黏度超过 $10\times10^4\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，采用非常规的蒸汽驱技术及水平井热采，

利用底水层传热，蒸汽辅助重力驱开采已获成功。

1.2 稠油资源

全球重油和油砂资源巨大，其地质储量高于常规油气资源之和，它与常规原油和天然气的地质储量比例分别为 53%、25%、22%，大约 1×10^{12} t。全球的重油资源分布很广，几乎所有产油国都有发现，但分布是不均衡的。从全球各地区拥有的剩余重油和油砂资源量看，南美地区据首位，其次是北美、中东。世界稠油资源丰富的国家有委内瑞拉、加拿大、美国、俄罗斯等。全球 90% 的超稠油分布在委内瑞拉的 Orinoco 重油带，约 81% 的可采天然沥青分布在加拿大的阿尔伯达省，这种集中分布为未来的商业化规模开采提供了有利的资源基础。近年来，由于稠油开发技术的进步、常规原油供应紧张以及油价走高，为重油发展带来机遇，具有替代常规石油能源的战略地位。

中国稠油资源比较丰富，陆上稠油、沥青资源约占石油资源总量的 20% 以上，预测资源量 198×10^8 t，其中可探明的地质储量为 79.5×10^8 t，可采资源量 19.1×10^8 t。目前，已经在松辽盆地、二连盆地、渤海湾盆地、南阳盆地、苏北盆地、江汉盆地、四川盆地、珠江口盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、吐哈盆地等 12 个盆地中发现了 70 多个稠油油田，这些稠油油田主要集中在辽河油区、胜利油区、新疆克拉玛依油区及河南 4 大油区。最近几年在吐哈盆地、塔里木盆地发现了超深层稠油资源。油区内各含油气盆地的边缘斜坡地带以及边缘潜伏隆起倾没带为稠油油藏集中分布地区，此外，盆地内部长期发育断裂带隆起上部的地堑也分布有稠油油藏。中国目前已探明稠油地质储量 20.6×10^8 t，已动用地质储量 13.59×10^8 t，剩余未动用地质储量 7.01×10^8 t。其中辽河稠油资源截止到 2005 年底，已探明稠油石油地质储量 10.35×10^8 t，热采动用储量 6.32×10^8 t，已探明稠油储量和热采动用储量均占中国的一半以上。

1.3 稠油油藏的基本特征

根据中国各油区稠油油藏的基本情况，与国外稠油油藏相比，中国稠油油藏主要具有下述特征。

1.3.1 稠油成因类型多，原油黏度涵盖范围广，原油组分中胶质沥青质含量高

中国稠油油藏的形成主要受盆地后期构造抬升活动、细菌生物降解作用、地层水洗和氧化作用，以及烃类轻质组分散失等诸多因素的影响，而晚期构造运动是主导因素，其他因素是在这一背景下的地化过程。按上述因素可将稠油油藏分为风化削蚀、边缘氧化、次生运移和底水稠变等 4 种类型。按原油黏度的标准，分为普通稠油、特稠油和超稠油。在中国石油的探明储量中，普通稠油占 74.7%；特稠油，占 14.4%；超稠油占 10.9%。在 50℃ 条件下，脱气原油黏度最高达 1.23×10^6 mPa·s；稠油中胶质、沥青质含量高，油质含量小。稠油中胶质、沥青质含量一般大于 30%~50%，烷烃、芳烃含量则小于 50%~60%（表 1.3.1）。

表 1.3.1 稠油组分对比表

国 家	油 田	原油相对密度	组分成分 (%)		
			油质	胶质	沥青质
中 国	高升	0.94~0.96	—	45.4	3.3
	孤岛	0.946	—	32.9	7.8
加 拿 大	Athabasca	1.015	43.49	23.39	18.0
	Cold Lake	0.994	53.57	28.32	15.0
	PeaceRiver	1.026	50.00	30.50	19.5
委 内 瑞 拉	Jobo	1.020	—	25.4	8.6

原油的基本组成是碳氢化合物，其中碳元素含量占 80%~90%（质量百分比），氢元素含量占 10%~14%，碳氢比约为 5.9~8.5。其他元素（氧、硫、氮）约占 1.0% 左右，有时可达 2.0%~3.0%。稠油与轻质原油在其化学组成中的重大差别之一在于稠油含氢量低，碳氢比大。氢含量一般小于 12%，碳氢比一般大于 7.0。原油中的碳氢化合物主要以不同碳链的烷烃、环烷烃、芳香烃构成。除此之外，原油中特别是稠油中还含有大量的氧、氢、硫的化合物以及石油的灰分。

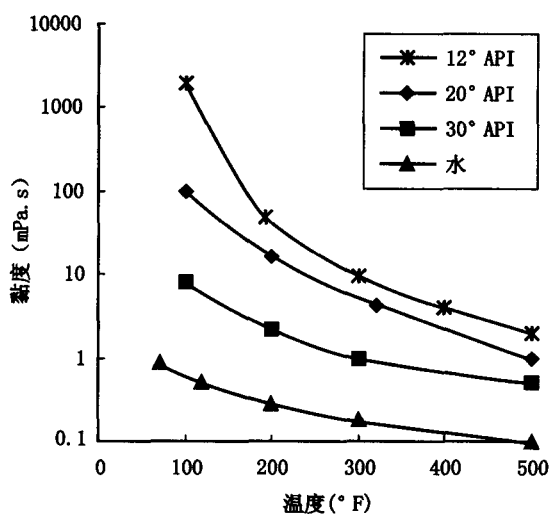


图 1.3.1 水、轻质油和稠油黏度随温度的变化关系

由于稠油的组成及组分与轻质油不同，因此稠油具有密度大、黏度高的特点。稠油的相对密度大于 0.92，美国等国家使用°API 度表示石油的相对密度值，他们将重度 20°API 以下、委内瑞拉则将 22°API 以下称之为“重油”。

稠油的黏度对温度极为敏感，随温度升高，原油黏度急剧下降，黏度与温度关系曲线（黏温曲线）在 ASTM 坐标纸上呈直线变化，温度每升高 10℃ 左右，黏度往往降低一倍，此外，稠油中也溶解有天然气（一般地，溶解天然气量较小），这可使其黏度大大地降低。

图 1.3.1 比较了水、轻质油和稠油黏度随温度的变化关系。当温度从 100°F 升高至 400°F 时，稠油（12°API）的黏度降低至原来的 1/12。而水的黏度只降低至原来黏度的 1/4。正是利用稠油的这种特性，采用注入蒸汽热力开采，可以有效地改善稠油在地层中的流动状态。

1.3.2 稠油储集层以粗碎屑岩为主，油层胶结疏松，储集层非均质较严重

稠油油藏储集层多为粗碎屑岩，中国稠油油藏有的为砂砾岩，多数为砂岩，其沉积类型一般为河流相或河流三角洲相，储集层胶结疏松，成岩作用低，固结性能差，泥质含量偏

高，一般为6%~9%，因而，生产中油井易出砂。

稠油油藏储集层物性较好，具有孔隙度高、渗透率高的特点。孔隙度一般为25%~30%，空气渗透率一般高于 $0.5\sim 2.0\mu\text{m}^2$ 。但储集层非均质较严重，纵向层间渗透率级差往往大于20~30倍，渗透率变异系数 $0.5\sim 0.7$ 。

1.3.3 油藏埋藏深度较深

中国已探明的稠油油藏，既有浅层、中等埋深层（600~900m）、深层（900~1300m），又有特深层（1300~1700m）、超深层（大于1700m）。埋藏深度大于800m的稠油储量约占已探明储量的80%以上，其中约有一半的油藏埋深在1300~1700m。吐哈油田的稠油油藏埋深在2400~3400m，塔里木的轮古稠油油藏埋深在5300m左右。

1.3.4 油藏类型较多

由于受断层、构造和岩性等诸多因素的影响，形成了复杂的油、气、水分布特征，从而导致中国稠油油藏类型多样。目前已投入开发的油藏类型有：

1.3.4.1 带气顶的块状厚层油藏

该类型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，呈块状，隔层和夹层不发育，储集层物性较好，属高孔隙、高渗透油层。油层孔隙度一般大于20%~30%，渗透率一般大于 $1\sim 3\mu\text{m}^2$ ，泥质含量5%~10%，油藏埋深1550~1700m。代表油藏为辽河高升油田莲花油层。

1.3.4.2 具有边底水的多层油藏

该类油藏与具有气顶的巨厚块状油藏相似，具有统一的油水界面，边底水体积较大，一般为油藏体积的8~10倍，在开采过程中，边底水较活跃，对注蒸汽开发有着重要的影响。代表油藏为辽河曙光油田曙175块大凌河油层和胜利油田单家寺单2块沙河街组油层。

1.3.4.3 多油组厚互层油藏

该类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。油藏含油井段长，一般可达150~250m，油层层数多、厚度大、总厚度一般大于30m，单层厚度大于2m。各油层间物性和原油性质不同，油水关系比较复杂，各油层组具有独立的油水系统。储集层物性好，孔隙度大，渗透率高。孔隙度一般大于25%，渗透率一般大于 $1\mu\text{m}^2$ ，油层多为泥质胶结，泥质含量大于5%。油层组间隔层比较稳定，厚度一般大于5m。油层组内夹层不稳定，净总厚度比一般大于0.6。代表油藏为辽河欢喜岭锦45块于楼、兴隆台油层。

1.3.4.4 多油组薄互层油藏

该类油藏油层层数多，单层厚度小，净总厚度比小，一般在0.3~0.6，油层物性差。代表油藏为辽河曙光油田一区杜家台油层、河南井楼和古城油田。

1.3.4.5 单层状构造岩性油藏

该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，油层厚度一般大于10m，油层较集中，构造相对简单，隔层和夹层不发育，但油层内有泥岩条带和岩性夹层，油层集中段净总厚度比一般大于0.5，油层物性的好坏与沉积相带有关，非均质较严重，天然能量小。代表油藏为新疆克拉玛依油田九区。

1.3.4.6 薄层状油藏

储集层为一套含砾细砂岩和粉砂岩、胶结疏松，物性好。储集层砂体厚度小，但又细分小层，层间有较稳定的泥岩隔层和夹层，油层厚度一般小于 10m。代表油藏为河南井楼零区。

1.3.4.7 超深层稠油油藏

吐哈油田稠油埋深 2300~3700m，含油井段 50~180m，单井平均油层厚度 35.3m，油水分布主要受断层和构造形态控制。

塔里木油田轮古 15、轮古 40 奥陶系稠油油藏，埋深 5200~5700m，为具有倾斜油底的准层状碳酸盐岩溶缝洞型复杂潜山油藏，储集层为裂缝型、裂缝孔洞型和裂缝溶洞型，溶孔溶洞分布很不均一。

1.3.5 油水系统较复杂

大部分稠油油藏具有边底水。多层状稠油油藏，含油井段长达 150~300m，按沉积旋回可划分为数个油层组，发育 20~30 个小层，具有多套油水系统，油水关系较复杂；块状稠油油藏，油层厚度达 30~70m，层内隔层、夹层不发育，具有较活跃的边底水，水体体积一般为含油体积的 8~10 倍；单层状油藏油层厚度较小，一般 10~20m，油藏较集中，油水关系较简单。

参 考 文 献

张锐. 1999. 4. 稠油热采技术. 北京: 石油工业出版社

刘文章编著. 1997. 稠油注蒸汽热采工程. 北京: 石油工业出版社