

稠
油
开
采
技
术



稠油开采技术



胡常忠 编



石油工业出版社

石油

学(北京)

355.9

905

登录号	126674
分类号	TE355.9
种次号	005

稠油开采技术

胡常忠 编



石油0121783

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在对稠油油藏成因及特征、稠油的基本性质与分类标准进行全面论述的基础上，系统地介绍了稠油开采技术——注水开发、注蒸汽开发、火烧油层和出砂冷采的采油机理、筛选标准（或适应条件）、开采特点及工艺技术要求等。

本书可供从事油田开发的科研工作者及石油院校师生参考，特别适合于从事稠油开发的工程技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

稠油开采技术/胡常忠编.

北京：石油工业出版社，1998.6

ISBN 7-5021-2320-2

I. 稠…

II. 胡…

III. 稠油开采-技术

IV. TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 13639 号

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 8.875 印张 227 千字 印 1—1000

1998 年 6 月北京第 1 版 1998 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2320-2/TE·1935

定价：18.00 元

前 言

世界上稠油资源极为丰富，其地质储量远远超过常规原油（稀油）的储量。近年来，随着常规原油开发受到储量增长的限制，稠油开发对弥补常规原油产量不足起着越来越重要的作用。正如第一届国际重质油和沥青砂大会主席指出的那样：我们已进入一个新的石油时代——重质油的时代。即将在中国北京召开的第七届重油及沥青砂国际会议的大会主题是重油——21世纪的重要能源。中国的稠油资源相当丰富，然而，在1982年以前，我国丰富的稠油资源基本上没有得到开发。从1982年起，我国稠油开发依靠科技进步，不断取得新的进展，新的稠油储量不断投入开发，年产油量以平均30%以上的速度持续快速增长。1995年，稠油产量达1300万吨，成为我国石油工业的重要组成部分。我国已成为世界上四大稠油生产国之一。

稠油开采技术是一门多学科、多专业、综合性很强的技术。它是近30年在国际上发展起来的，因此，稠油开采技术又是一门新技术。为了适应稠油开发技术发展的需要，多年来，作者一直在梦想给我国稠油开发工作者提供一本比较实用的“稠油开采技术”，本书的出版总算圆了这个梦。

本书从我国实际出发，精选内容除主要吸收了国内外在稠油开发方面的常规技术及新成果外，还系统地介绍了近几年在国外迅速发展起来的一门最新的、经济有效的稠油开采技术——稠油出砂冷采技术。

本书共七章，前三章重点介绍了稠油的定义、稠油油藏成因与特征、稠油的基本性质与分类标准，第四、五、六、七章分别介绍了注水开发、注蒸汽开发、火烧油层和出砂冷采的采油机理、筛选标准、开采特征、工艺技术要求、开采过程中的主要技术问题及对策和进一步提高稠油采收率的方法。

在本书编写过程中参考了一些国内外文献资料，在此表示诚挚的感谢。由于作者水平及时间有限，不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

1998年2月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 稠油油藏成因与特征	3
第一节 稠油油藏成因	3
第二节 稠油资源形成条件	5
第三节 稠油油藏基本特征	5
第三章 稠油的基本性质与分类标准	7
第一节 稠油的基本性质	7
第二节 稠油分类标准	11
第四章 注水开发	14
第一节 水驱油机理	14
第二节 注水开发界限研究	15
第三节 注水开发设计	16
第四节 注水开发特征	17
第五节 注水开发的稳产措施	20
第六节 水驱特征曲线分析与应用	23
第七节 注水开发工艺技术	26
第八节 提高稠油注水开发采收率的方法	30
第五章 注蒸汽开发	34
第一节 基本概念	34
第二节 蒸汽的特性	35
第三节 蒸汽吞吐	39
第四节 蒸汽驱	45
第五节 水平压裂辅助蒸汽驱	53
第六节 注蒸汽热采对稠油储层的影响	55
第七节 注蒸汽开发设计	58
第八节 注蒸汽开发分析	64
第九节 传热与热损失	70
第十节 注蒸汽开采工艺技术	79
第六章 火烧油层	92
第一节 火烧油层机理与特点	92
第二节 火烧油层方式	92
第三节 点火方法	95
第四节 火烧油层筛选标准	96
第五节 火烧油层动态分析	98
第六节 完井技术	102
第七章 出砂冷采	103
第一节 出砂冷采机理	103

第二节	出砂冷采适应条件	108
第三节	出砂冷采基本特征	109
第四节	出砂冷采工艺技术	112
第五节	出砂冷采监测技术	119
第六节	出砂冷采技术发展趋势	120
第七节	中国稠油出砂冷采前景	123
附录一	油气藏工程常用参数符号与计量单位	126
附录二	常用单位换算表	128
附录三	热力学单位换算表	129
附录四	饱和蒸汽的热力特性	130
附录五	常用套管体积与井的容积	132
参考文献		133

第一章 绪 论

一、稠油的定义

稠油，国际上称之为重质油或重油 (heavy oil)。严格地讲，“稠油”和“重油”是两个不同性质的概念。因为“稠油”是以其粘度高低作为分类标准，而原油粘度的高低取决于原油内胶质沥青及蜡含量的多少；“重油”则是以原油密度的大小进行分类，而原油密度的大小往往取决于其金属、机械混合物及硫的含量大小。尽管一般原油的粘度与密度之间存在着一定的关系，即原油密度大，其粘度值高，但是有相当部分油藏的原油密度大，粘度值却低，或者是原油粘度高，而密度小。因此，不能把“稠油”和“重油”两个概念完全等同起来。

几十年来，国际上一直以原油密度为主要指标进行分类，故称之为重油。那么，原油密度多大为重油，世界各国的分类标准各有差异。美国曾经将相对密度为 0.9042 以上 (25°API 以下) 的原油称为重质油；委内瑞拉将相对密度为 0.934 以上 (20°API 以下) 的原油称为重质油。随着稠油开发的发展，人们发现原油密度并不能真正表达稠油的特征，为了把原油特性(主要是粘度)和开发效果及经济效益联系起来，有利于稠油资源评价和开发方式研究，1982 年，联合国训练署 (UNITAR) 在委内瑞拉召开的第二届国际重质油和沥青砂学术会议上，制定了以原油粘度为主要指标，相对密度为辅助指标的定义法，并把原油粘度不小于 100mPa·s，相对密度不小于 0.934 (20°API 以下) 的原油称为重油。我国稠油中含金属及机械混合物较少，而胶质沥青含量较高，因此，早就以粘度为主要指标进行定义，故称为稠油。所谓稠油，是指地层原油粘度大于 50mPa·s (地层温度下脱气原油粘度大于 100mPa·s)，原油相对密度大于 0.92 的原油。与 UNITAR 定义法相比，主要指标(原油粘度)是相同的，而辅助指标(相对密度)偏低些。

二、稠油资源及分布

世界上稠油资源极为丰富，其地质储量远远超过常规原油的储量。据统计，世界上已证实的常规原油地质储量约为 $4200 \times 10^8 \text{t}$ ，而稠油 (包括沥青) 油藏地质储量高达 $15500 \times 10^8 \text{t}$ 。据美国能源部爱德华兹估计，全世界稠油 (包括沥青) 的潜在储量可能是已探明的常规原油储量的 6 倍左右。

稠油油藏分布范围十分广，世界上各产油国差不多都有稠油，但稠油储量主要集中在美国、加拿大、委内瑞拉和前苏联地区 (见表 1-1)。

表 1-1 主要稠油国家的稠油储量

国 家	美国	加拿大	委内瑞拉	前苏联	全世界
地质储量, 10^8t	4000	4000	3000	数千	15500

我国的稠油资源也相当丰富，广为分布。目前已在松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地、南襄盆地、二连盆地等 15 个大中型含油盆地和地区发现了数量众多的稠油油藏，预测全国稠

油（包括沥青）储量在 $80 \times 10^8 \text{t}$ 以上，其中仅渤海湾盆地各拗陷在低凸起、边缘斜坡带等处，稠油储量可达 $40 \times 10^8 \text{t}$ 以上；准噶尔盆地西北缘稠油储量达 $10 \times 10^8 \text{t}$ 以上。此外，我国南方的珠江口盆地、百色盆地也有一定规模的稠油资源。总之，稠油资源为我国一巨大的潜在资源，它将在今后的能源结构中起着至关重要的作用。

第二章 稠油油藏成因与特征

第一节 稠油油藏成因

关于稠油的成因问题众说不一。但从本世纪 30 年代以来,人们对稠油成因的看法主要有三种学说,即稠油演变说、反稠油演变说和原油性质取决于生油母质及形成环境说。

(1) 稠油演变说认为,所有原油都是从稠油演变而成的。即在缓慢的演变过程中,经压力、温度及其他因素对石油的作用把环烷基油变成烷基油。

(2) 反稠油演变说认为,烷基油是原生的,从浅层采出的环烷基原油是经过次生的外力作用的产物,也就是说,环烷基稠油是在次生作用下由烷基原油变来的。

(3) 原油性质取决于生油母质及形成环境说认为,原油性质取决于生油物质及石油形成的沉积环境,其中最主要的是生油母质,否则,深度、压力、温度都不能使石油性质发生根本性的转变。

随着现代科学技术的发展,特别是色谱—质谱计算机联用技术的发展,上述几种学说也在不断地发展,至今广为流行的学说有稠油是低成熟原油说、生油母质类型及其沉积环境决定稠油说和原油在储层中的次生变化、水洗、氧化、生物降解形成稠油说。

目前,我国大多数人认为稠油的成因主要有两种类型,即原生型和次生型。原生型主要是指所谓的未成熟或低成熟油,次生型是指后期遭受生物降解等稠变作用形成的稠油。

由于石油的变重、变稠可以在油运移到聚集成为油藏以及之后的任何阶段,甚至石油遭到破坏,成为固体沥青为止,因此,把石油经初次运移进入储层,以及之后的各个阶段中,使石油变重、变稠的各种作用统称为稠变作用。进一步研究表明,无论低成熟油还是高成熟油,均需要通过后期的稠变作用才能形成稠油,因此,稠油均是次生的。只是由于生油母质类型和原始成熟度的不同,才使其相应形成的稠油各具特色而已。

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因素的影响,其中后期构造运动起主导作用,而其他因素是这一地质背景下的地化过程。按照上述因素可将稠油油藏的成因分为风化剥蚀、边缘氧化、次生运移和底水稠变等四种。

一、风化剥蚀成因

这种稠油油藏主要受后期构造抬升活动强烈的影响,使早期形成的古油藏因抬升而接近地表,或者因古油藏的盖层封堵条件遭到不同程度的破坏,天然气和轻质组分大量溢散,从而导致液态烃因地层水的水洗作用或地表风化作用而形成稠油。渤海湾盆地黄骅拗陷南部枣园稠油油田是较为典型的实例。枣园稠油油田位于其拗陷南部孔店断裂构造带高部位,与构造断裂带周缘低断块的原油相比有一个明显变重变稠的过程,这主要发生在油藏形成之后,与古油藏盖层封闭条件遭受一定程度破坏有关。由于孔店断裂背斜构造带形成于始新世末期,规模较大,加之在渐新世末期发生强烈断裂构造运动,使构造带进一步抬升,其顶部遭受强烈削蚀作用,使天然气和轻质组分溢散,而后期上第三系覆盖取得一定的保存条件,从而造成

原始气油比低，胶质沥青富集，原油密度和粘度增高，原油变稠。

二、边缘氧化成因

这种稠油油藏主要分布在盆地和拗陷斜坡边缘。由于在盆地后期构造活动抬升过程中，盆地边缘急剧上升，边缘斜坡带成为油气大规模运移和聚集的去向，当油气从盆地内部生油层沿地层不整合面或稳定砂体向上倾方向运移，进入盆地边缘地层水交替带时，原油发生严重生物降解作用，导致油质变重变稠，从而形成稠油油藏。

南襄盆地泌阳拗陷稠油油藏在第三纪廖庄期北部斜坡带断裂活动加剧，形成良好的圈闭条件，使其成为油气大规模运移和聚集的方向，油源主要来自生油中心，油气沿断层，或稳定砂体上倾方向运移，从而进入盆地边缘地层水交替带，使原油发生严重的生物降解作用，沿地层倾斜方向自下而上，生物降解程度有一明显变化规律，即下部原油有明显原生性甚至为常规原油，而上倾部位则发生不同程度的生物降解作用，油质越来越稠，甚至在不整合面上形成沥青封堵油藏（见图 2-1）。

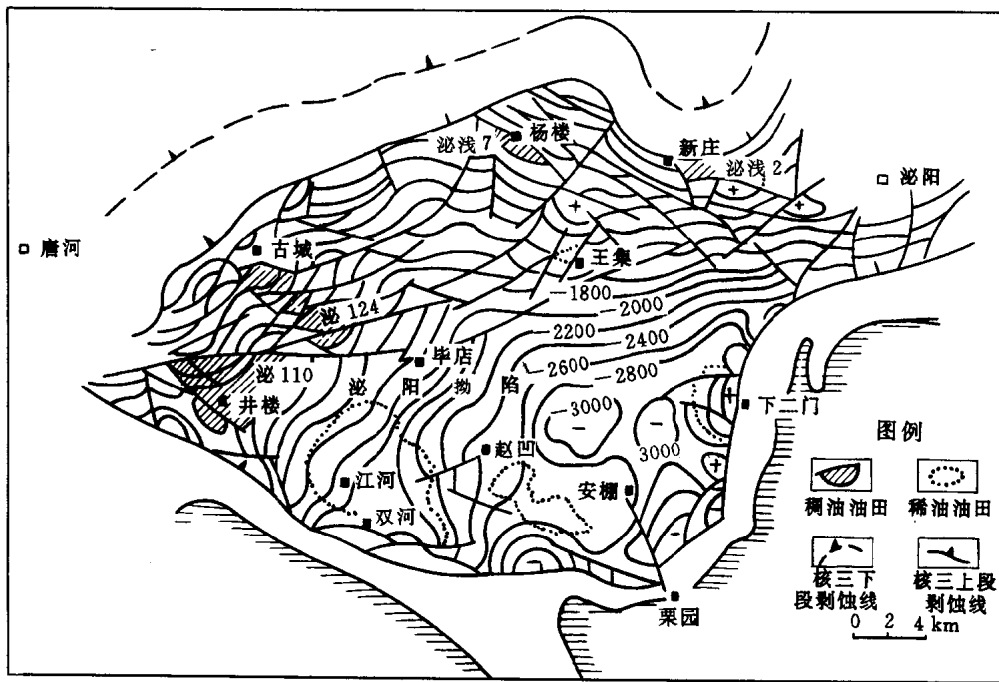


图 2-1 泌阳拗陷稠油油田位置图

三、次生运移成因

这种稠油油藏主要受后期断裂构造活动的影响，使下部原油沿地层不整合面或断裂向上运移到较浅的储层中，在原油运移过程中发生生物降解作用，从而形成稠油。这类稠油油藏具有埋藏浅、物性好、油气丰度高特点，并且一般都位于原生性常规油藏的上部，并与其有一定的共生关系。这类油藏在我国东部许多盆地中广泛分布，如大港的羊三木油田。

四、底水稠变成因

有部分稠油油藏在储集成因上属原生气藏，但是，由于边底水比较活跃，油水接触面大，经过长期的、缓慢的水洗作用，使油藏下部的原油经受细菌降解作用逐渐变为稠油油藏，这种稠油油藏在纵向上，原油密度上小下大，有时还有气顶。如胜利孤岛油田和辽河高升油田。

不同成因类型稠油油藏在空间上有一定的分布规律。

(1) 纵向上,一般分布在盆地上部构造层或上覆较年青地层中。一般情况下,稠油油藏埋深小于 2000m,并且随着埋深逐渐变浅,原油生物降解程度愈来愈高。在埋深 1000~2000m 之间,原油生物降解程度轻微;在埋深小于 1000m 以内,原油生物降解程度中等。在接近地表原油或地面油砂或沥青生物降解程度严重。

(2) 平面上,稠油油藏分布受盆地不同构造部位控制。如我国东部断陷盆地,在拗陷边缘潜伏隆起倾没部位分布披覆背斜稠油油藏;在陡带分布地层超覆稠油油藏;在盆地内部长期发育断裂带隆起上部的地堑发育稠油油藏;在盆地缓坡带分布地层不整合稠油油藏。

(3) 稠油油藏与常规油藏有一定的共生关系,在一个油气聚集带中,平面分布序列为,由拗陷向边缘是常规油藏渐变为稠油油藏或沥青矿;纵向上分布序列为,由深层至浅层是由常规油藏变为稠油油藏。

第二节 稠油资源形成条件

在任何沉积盆地中,稠油资源的形成均取决于原油的自身损失和后期构造运动两方面。

一、原油的自身损失

盆地在其地质历史或至今的演化过程中,具有相当规模的常规油形成与聚集,这是形成稠油资源的根本基础。据统计,只有常规油损失达到自身 10%~90% 的数量,才能成为稠油或沥青,其中成熟常规油需损失 50%~90%;低成熟常规油因原始密度和粘度值较高,一般需损失 10%~50%。

二、后期构造运动

后期构造运动的发生为石油进入连通系统提供了动力,因此,只有在油气生成、聚集之后发生的构造运动(如产生开启断层、不整合面以及开启储层等与地表连通的输导层(面)),才能为原始聚集的常规油由深部进入浅部或连通系统创造条件,而构造运动方式只有在连通系统内创造较好的封盖条件才能使石油在连通系统内有相当数量的聚集,且不会迅速散布。由于既遭受运移期又遭受油藏期的各种稠变因素的作用,从而为形成相当规模的稠油和沥青提供了基础。资料表明,后期构造运动发生的次数愈多,构造运动的强度越大,原油遭受的稠变作用愈强,在连通系统内稠油的形成量和聚集量就愈大。

综上所述,盆地稠油资源形成条件的两个方面的特征及其相互的配置关系,决定了最终稠油资源的形成、分布及规模的大小,因此,在一个盆地或拗陷中,油源愈充足,区域盖层愈完善,有利圈闭愈多,则其油气聚集的丰度就愈高。后期构造运动造成盆地区域盖层的局部缺乏或遭受断层的切割,使得油气由非连通系统泄漏进入连通系统。泄漏进入连通系统的石油越多,在连通系统内创造的封盖条件越好,越有利于稠油资源的大规模形成。

第三节 稠油油藏基本特征

我国的稠油油藏分布广泛,按储层时代,从中元古代至第三纪均有分布,其中大部分稠油油藏分布在中新生代地层中。相对于常规油油藏而言,稠油油藏具有以下特点。

(1) 油层埋藏浅,地层压力及温度低。稠油油藏的埋藏深度范围分布很广,埋藏深的可以达到 4000 多米,多数稠油油藏埋深小于 2000m。埋藏浅的离地表仅几米、几十米,有的甚至就在地表上。由于稠油油藏埋藏浅,因此,其地层压力及温度一般较低。例如准噶尔盆地

西北缘稠油油藏埋深小于 600m 的储量约占 88%，地层压力一般为 1.8~4.0MPa，地层温度为 16~27℃。

(2) 气油比低，饱和压力低。由于稠油油藏在形成过程中产生了生物降解作用和氧化作用，并在次生运移过程中天然气和轻质组分溢散，所以一般稠油油藏具有饱和压力低，气油比低的特点（见表 2-1）。

表 2-1 稠油油藏参数表

油田	压力, MPa			原始气油比 m ³ /t	油层物性		
	原 始	饱 和	压 差		孔隙度 %	渗透率 μm ²	含油饱和度 %
高 升	16.10	12.41	3.69	31.0	24.0	2.247	60.0
克九区	2.03	1.72	0.31	5.0	31.7	3.000	68.0
井 楼	3.09	1.42	1.67	5.1	31.7	2.642	66.6
单家寺	11.65	4.66	6.99	8.1	33.5	1.418	65.0
孤 岛	12.50	10.75	1.75	30.0	33.0	1.639	64.0
羊三木	13.14	10.39	2.75	31.0	31.0	1.475	64.0

(3) 油层胶结疏松。世界上，绝大部分稠油分布在砂岩油藏中。我国已发现的稠油油藏几乎全部为砂岩油藏。由于稠油油藏一般埋藏浅，成岩作用差，因此，一般稠油油藏具有胶结疏松的特点。如泌阳拗陷井楼油田，稠油油藏埋深一般小于 500m，钻井取心时，油层岩样似“古巴糖”状，基本上无成形岩心。

(4) 油层物性好。由于稠油油藏埋藏浅，成岩作用差，胶结疏松，因此，稠油油藏一般具有孔隙度高、渗透率高和含油饱和度高的特点。如表 2-1 所示，井楼油田油层孔隙度为 29.6%~34.0%，平均为 31.7%；渗透率为 1.630~4.020μm²，平均为 2.642μm²；原始含油饱和度为 61.8%~74.8%，平均为 66.6%。

第三章 稠油的基本性质与分类标准

第一节 稠油的基本性质

一、稠油的一般性质

我国发现的稠油油藏分布很广，类型很多，埋藏深度变化很大，一般在10~2000m之间，主要储层为砂岩。中国稠油特性与世界各国的稠油特性大体相似，主要有以下特点。

(1) 稠油中轻质馏分很少，而胶质沥青含量很多，而且随着胶质沥青含量增加，原油的相对密度及同温度下的粘度随之增高。

据统计，大多数稠油中轻质馏分在10%以下，一般仅5%左右。图3-1是辽河油区35个稠油油藏或区块的原油胶质沥青含量与相对密度的关系图；图3-2是辽河油区高升、曙光、欢喜岭油田的39个稠油油藏或区块中胶质沥青含量与原油粘度的关系图。

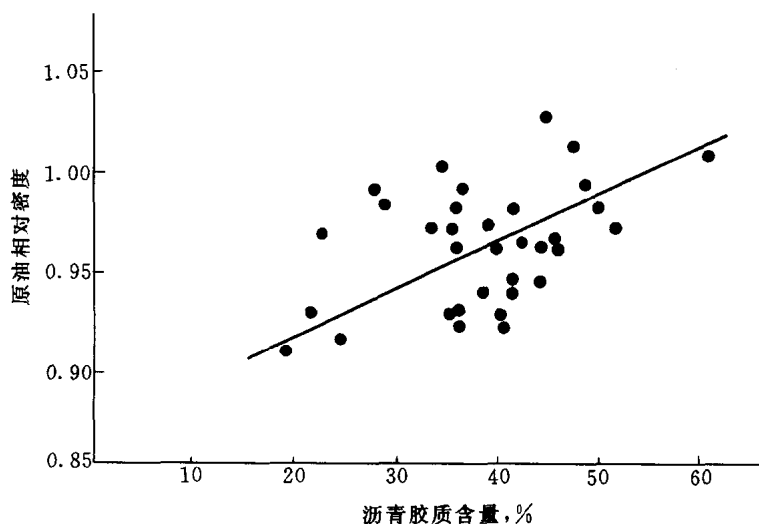


图 3-1 稠油油藏脱气原油沥青胶质含量与原油相对密度关系图

常规油（即稀油）中沥青质含量一般不超过5%，但稠油中沥青质含量可达10%~30%，个别特超稠油可达50%或更高。

(2) 稠油随着密度增加其粘度增高，但线性关系较差。

众所周知，原油密度的大小与其含金属元素的多少有关，而原油粘度的高低主要取决于其含胶质量的多少。我国稠油油藏属于陆相沉积，原油中金属元素含量少，而沥青、胶质含量变化大，与其他国家相比，沥青质含量较低，一般不超过10%，而胶质含量较高，一般超过20%。因此，原油密度较小，但原油粘度较高。

图3-3是辽河油区41个稠油油藏或区块的原油相对密度与脱气原油粘度的关系图。由图可知，稠油粘度随着相对密度的增加而增加的趋势十分明显，但线性关系较差。

(3) 稠油中烃类组分低。稠油与稀油的重要区别是其烃类组分上的差异。我国陆相稀油

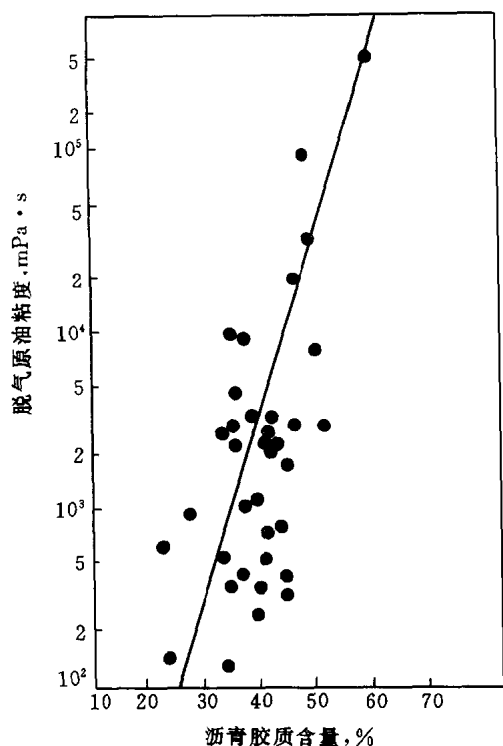


图 3-2 脱气原油粘度 (50℃) 与
沥青胶质含量关系图

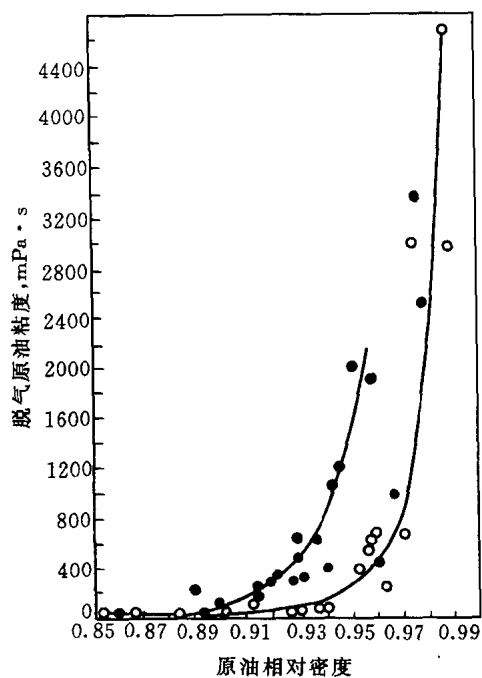


图 3-3 脱气原油粘度 (50℃) 与
原油相对密度关系图

• 辽河东部
• 辽河西部

中, 烃的组成 (饱和烃+芳香烃) 一般大于 60%, 最高可达 95%, 而稠油中烃的组成一般小于 60%, 最少者在 20% 以下, 稠油中随着非烃和沥青质含量的增加, 其密度呈规律性增大。

(4) 稠油中含硫量低。在我国已发现的大量稠油油藏中, 稠油中的含硫量都比较低, 一般小于 0.8%。河南油田稠油中含硫量仅为 0.1%~0.38%, 远低于国外稠油含硫量 (见表 3-1)。

表 3-1 典型稠油油田原油性质对比表

参 数 油 田	相对密度	粘 度 mPa·s	胶质沥青 质含量 %	含蜡量 %	含硫量 %	凝固点 ℃	金属含量, mg/L			
							Ni	V	Fe	Cu
中国	高 升	0.9500	2661	48.8	6	0.55	12.0	122.5	3.1	
	风 城	0.9656	500000	62.4		0.31		33.3	1.03	15.3
	井 楼	0.9425	23546	32.2	9.6	0.32	10.8	19.0	0.94	15.4
	单家寺	0.9850	9200	35.1				47.5	2.3	17.6
	孤 岛	0.9650	2975		6	0.4	<15	16.5	2.5	
	羊三木	0.9584	102.3	21.1	5.26	0.29	-7	25.8	0.9	
加拿大	冷 湖	0.9940		43.3		4.5				
	和平河	1.0260		50.0		5.9				
委内	Jobo	1.0200		34		3.0		94	405	7
瑞拉	Melones							87	395	14

(5) 稠油中含蜡量低。我国的大多数稠油油田（如辽河高升、曙光、欢喜岭，新疆克九区，胜利单家寺）原油中含蜡量在 5% 左右。河南井楼稠油油田稠油中含蜡量虽然高于上述稠油油田，但远低于河南双河等稀油油田的含蜡量（一般含蜡量在 30% 以上），见表 3-1。

(6) 稠油中金属含量较低。中国陆相稠油与国外海相稠油相比，稠油中镍、钒、铁及铜等金属元素含量很低。特别是钒含量仅为国外稠油的 1/200~1/400（见表 3-1），这是中国稠油粘度较高，而密度较小的重要原因之一。

(7) 稠油凝固点较低。大多数稠油油藏属于次生油藏，由于石蜡的大量脱损，以及浅部氧化作用强烈，因此，稠油性质表现为胶质沥青含量高、含蜡量及凝固点低的特点（见表 3-1）。

二、稠油的热特性

1. 粘度对温度的敏感性

原油粘度随温度变化而变化的曲线，称为粘温曲线。对于常规原油而言，由于粘温曲线作用不大，往往被人们忽视。但对于稠油来说，粘温曲线十分重要，因为稠油粘度对温度敏感性的强弱，是决定是否进行热力开采的基础。

图 3-4 是河南油田稠油油藏的原油粘度随温度的变化曲线。由图可知，在 ASTM（美国材料试验学会）坐标纸上，粘度随温度的变化呈线性关系，即温度每升高 10℃，粘度下降近 60%。由此可见，原油粘度对温度敏感性强。用沃尔特（Walther）方程导出的粘度与温度的关系式为

$$\lg \lg(\mu_0 + a) = A - B \lg(1.8t + 492) \quad (3-1)$$

式中 μ_0 ——原油粘度，mPa·s；

t ——温度，℃；

A 、 B ——常数，分别为曲线的截距和斜率；

a ——经验系数，一般取 1.05。

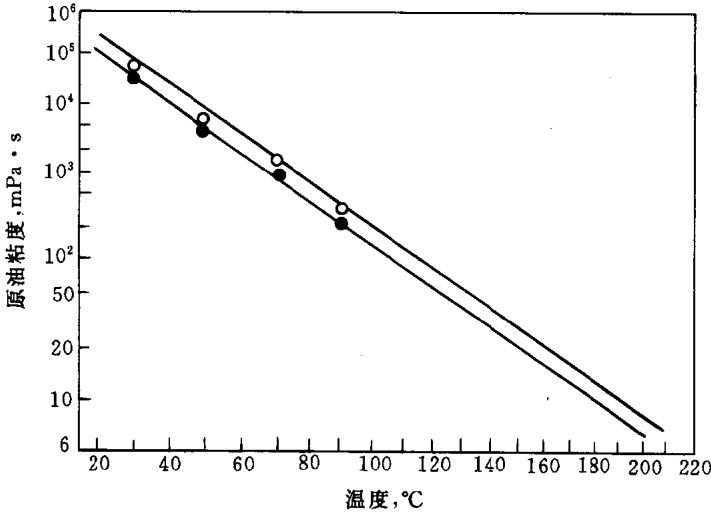


图 3-4 稠油粘温曲线

安德拉德（Andrad）根据粘度与温度的变化关系，提出了另一种相关式，即

$$\mu_0 = ae^{bT} \quad (3-2)$$

式中 a 、 b ——常数；

T^* ——绝对温度，K。

该式比较简便，但在作为外推预测时不太可靠。

2. 热膨胀性

在热力采油过程中，随着油层温度的升高，地下原油、水及岩石都将产生不同程度的膨胀，为驱动提供能量。上述三种物质中，原油的热膨胀系数最大 ($10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$)，其次是水 ($3 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$)，岩石最小 ($10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$)。当温度由常温升高到 200°C 时，原油体积将增加 20%。由此可见稠油的热膨胀性在热采中的作用。

3. 热裂解性

当温度升高一定值时，稠油中的重质组分将会裂解成焦炭和轻质组分（轻质油和气体），热裂解生成的轻质组分对改善地下稠油的驱油效果作用很大。

4. 蒸馏性

随着温度的上升，原油中开始出现汽化时的温度叫做原油的初馏点（又称泡点）。当温度大于或等于初馏点时，原油中的轻质组分将分离为气相，重质组分仍保持液相。随着温度的进一步升高，馏出轻质组分逐渐增多（见表 3-2）。馏出量的多少除取决于蒸馏温度外，还与原油特性及总压力有关。值得注意的是，在蒸汽驱过程中，蒸汽对原油的蒸馏过程有重要影响，即有蒸汽存在时，相同温度下的馏出量将大大增加，这是蒸汽驱提高稠油采收率的重要机理之一。

表 3-2 高升油田二、三区混合油的蒸馏特性

温 度, $^{\circ}\text{C}$	153.5	160	180	200	220	240	260	280	300
馏出量, %	初馏点	1.0	1.5	2.1	2.9	4.0	5.3	6.8	9.5

由于稠油具有热特性，因此，热力开采稠油（包括热水驱、注蒸汽开采、火烧油层等）是目前提高稠油开发效果的有效技术之一。

5. 燃烧热

在稠油和沥青砂的开采和精制中，燃烧热是其能量平衡计算的重要参数之一。室内对沥青砂、稠油和焦炭的燃烧热进行测定和研究表明，稠油及沥青砂的燃烧热与其组分和含量大小有关（见表 3-3）。

表 3-3 燃烧热实测值与计算值比较

项 目 样 品	相对密度	元素含量, %				燃 烧 值, kJ/g		
		C	H	S	O+N	实 测	计 算	差 值
新疆稠油①		86.37	12.14	0.30	0.19	43.53 ± 0.04	44.01	-0.48
新疆稠油②		85.62	12.25	0.30	1.81	44.23 ± 0.06	43.96	0.27
新疆稠油③		86.89	12.32	0.28	0.51	44.42 ± 0.06	44.54	-0.12
辽河油田①		85.66	11.55	0.30	0.89	43.51 ± 0.03	43.13	0.38
辽河油田②		87.72	11.36	0.27	0.73	43.22 ± 0.03	43.64	-0.42

续表

项 目 样 品		相对密度	元素含量, %				燃 烧 值, kJ/g		
			C	H	S	O+N	实 测	计 算	差 值
美 国	加州原油	0.959	85.20	12.40	0.50	1.90	43.029	43.802	-0.773
	宾州原油	0.886	85.90	13.70	无	1.40	44.681	45.587	-0.906
	得州原油	0.925	84.00	13.20	1.00	1.80	44.425	44.416	0.009
汽 油			87.51	11.78	0.35	0.36	44.52±0.08	44.15	0.37
沥 青							40.55±0.08	40.25	0.30

物质组成与燃烧热之间的经验公式为

- ΔU° = 0.3473(C) + 1.1696(H) + 0.1505(S) - 0.1927(O + N) (3-3)

式中 -ΔU°——燃烧热, kJ/g;

C——碳元素含量, %;

H——氢元素含量, %;

S——硫元素含量, %;

N——氮元素含量, %;

O——氧元素含量, %。

第二节 稠油分类标准

稠油的开采、集输及加工技术与常规轻质原油有很大差别, 因此, 稠油的分类直接关系到稠油油藏开采潜力的评价及开采方式的选择。多年来, 国内外许多石油专家对稠油的分类标准进行了研究。

一、国外稠油分类标准

1982 年第二届国际重质油及沥青砂学术会议之前, 国外对稠油的分类一直以原油重度(°API) 作为主要指标, 故称为重油或重质油。

1. 法国石油公司对稠油的分类标准

法国石油公司认为, 凡是相对密度大于 0.934 (<20°API) 的原油, 从储层中采出来以后未经过任何化学转变, 不论其物理状态如何(在环境温度下是液体还是固体), 都属于重质油的范围, 可将其按相对密度或 API 度数分成三类, 即 I、II、III 类, 见表 3-4。

2. 委内瑞拉能源矿业部对重质油的分类标准

委内瑞拉能源矿业部认为, 凡相对密度大于 0.934 (<20°API) 的原油都属于重质原油。可将其按相对密度分为重质油、特重质油和天然沥青(沥青砂或沥青)三类, 见表 3-4。

3. 第二届国际重质油及沥青砂学术会议对重质油的分类标准

在第二届国际重质油及沥青砂学术会议上, 各产油国对重质油的分类标准取得了一致意见, 即按原油粘度及相对密度来分类, 将其分为重质油、超重质油和沥青, 见表 3-4。

4. UNITAR 推荐的稠油分类标准

UNITAR 推荐的分类标准将稠油分为重质油和沥青两类, 见表 3-4。